



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Ingénierie de la Maintenance en Instrumentation

Thème

**Etude avancée de procédés de stockage de l'énergie
solaire**

Présenté et soutenu publiquement par :

BENDIDI Sihem

et

BENAISSA Ikram

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
BELKHODJA Leila	MCB	IMSI-Univ. D'Oran2	Présidente
BENABED Khadidja	MAA	IMSI-Univ. D'Oran2	Encadreur
DJELGHOUM Farida	MAA	IMSI-Univ. D'Oran2	Examineur

Dédicace

Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que je dédie mon travail à mes très chers, respectueux et magnifiques parents, pour leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A mes chères frères et sœurs pour leurs appuis et leurs encouragements

A tout ma famille

A tous mes amies et à tous mes collègues de la promotion Master 2

«Ingénierie de la Maintenance en Instrumentation» 2020/2021

A tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près durant les moments difficiles pendant les études et pendant ce travail

Bendidi Sihem

To my father "Benaissa M'hammed", who gave me more than a name and many sacrifices, to whom I hope to bring prosperity and relieve him from many burdens... ..

To my mother "Benamassoude Nadia", who gave me life and taught me to live, which I hope to dedicate to her without miserliness or pride. You are my support And the reason of my existence

To all my supporters sisters, brothers & my friends In the better or worst I 'm proud to be in

"2020_2021 "

"graduation class as a engeniring maintenance and instrumentation "

master holder ...

Benaissa Ikram

Remerciement

Tout d'abord on remercie infiniment le bon dieu « ALLAH » puissant, de nous avoir donné la volonté et le courage tout le long de nos études.

A la suite, Nous tenons à remercier vivement M^{me}. BENABED KHADIDJA enseignante à l'institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle. Notre promotrice qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils et ses encouragements.

Nous remercions vivement tous les membres du jury M^{me}.DJELGOUM Farida et M^{me}.BELKHODJA Leila, qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce mémoire et à cet égards nous leurs présentons nos profonds respects, et notre grande gratitude.

Nous rendons grâce à tous les enseignants du département Maintenance en Instrumentation, qui nous ont suivis durant notre cursus, et tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Enfin, nous adressons nos vives reconnaissances à nos familles qui nous ont soutenues.

Résumé:

Notre avenir énergétique doit être basé sur des énergies non polluantes ayant des ressources importantes. Les énergies renouvelables en particulier l'énergie solaire photovoltaïque sont les meilleurs candidats mais avec une production intermittente.

Pour pallier cette insuffisance et assurer la continuité du service dans les systèmes photovoltaïques (PV) l'utilisation de dispositifs de stockage est nécessaire, en utilisant différents types de stockage.

D'un autre côté notre étude traite le stockage de l'hydrogène en raison de ces caractéristiques (coût, fiabilité et durée de vie) comme nouvelle technologie pour lutter contre la pollution de l'environnement résultant de la limitation des énergies non renouvelables.

Mots clés : Solaire photovoltaïque, énergies renouvelables, dispositifs de stockage, la production d'énergie.

Abstract: Our energy future must be based on non-polluting energies with significant resources. Renewable energies in particular solar photovoltaic energy are the best candidates but with intermittent production.

To overcome this insufficiency and ensure continuity of service in photovoltaic (PV) systems, the use of storage devices is necessary, using different types of storage.

On the other hand, our study treats the storage of hydrogen due to these characteristics (cost, reliability and lifetime) as a new technology to fight against environmental pollution resulting from the limitation of non-renewable energies.

Keywords: Solar photovoltaic, renewable energies, storage devices, energy production.

الملخص :

يجب أن يستند مستقبل الطاقة لدينا إلى طاقات غير ملوثة بموارد كبيرة. الطاقات المتجددة على وجه الخصوص الطاقة الشمسية الضوئية هي أفضل المرشحين ولكن بإنتاج متقطع.

للتغلب على هذا القصور وضمان استمرارية الخدمة في الأنظمة الضوئية (PV)، فإن استخدام أجهزة التخزين ضروري، باستخدام أنواع مختلفة من التخزين.

من ناحية أخرى، تعالج دراستنا تخزين الهيدروجين بسبب هذه الخصائص (تكلفة وموثوقية وحياة الخدمة) كتقنية جديدة لمكافحة التلوث البيئي الناتج عن الحد من الطاقات غير المتجددة.

الكلمات الرئيسية: الطاقة الشمسية الضوئية، الطاقات المتجددة، أجهزة التخزين، إنتاج الطاقة.

Sommaire

Sommaire :

Résumé

Introduction générale.....1

Chapitre I : l'énergie solaire photovoltaïque

I.1- Introduction.....	4
I.2- Le soleil.....	4
I.2.1 Caractéristiques du soleil.....	4
I.2.2 Spectre solaire	5
I.2.3 Mouvement de la terre autour du soleil.....	6
I.3- Rayonnement solaire.....	7
I.3.1. Le rayonnement direct	7
I.3.2. Le rayonnement diffus.....	7
I.3.3. Le rayonnement réfléchi.....	8
I.3.4. Le rayonnement global	8
I.4- Gisement solaire dans l'Algérie.....	8
I.5- L'énergie Solaire Photovoltaïque.....	9
I.6- Potentiel photovoltaïque dans le monde.....	10
I.7- L'effet photovoltaïque.....	10
I. 8- Cellules photovoltaïque	12
I.8.1. Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque	12
I.8.2. Caractéristiques électriques d'une cellule.....	13
I.8.3. Les principales technologies de cellules solaires photovoltaïques.....	14
I.8.3.1. Cellules cristallines	15
I.8.3.2. Cellule en couche mince	15
I.8.3.3. Cellule multi jonction	16
I. 9- Association de cellule photovoltaïque.....	18
I.9.1. Association série	18
I.9.2. Association en parallèle	19
I.10- Comportement d'un générateur photovoltaïque	20
I.10.1. Influence de l'Éclairement	20
I.10.2. Influence de la Température	20
I.11- Différents types d'installation photovoltaïque	21
I.11.1.Installation autonome	21
I.11.2. Installation raccordé au réseau.....	22
I.11.3. Installation hybride	23
I.12- Composants d'un système photovoltaïque	24

I.12.1. Modules photovoltaïques	24
I.12.2. Régulateurs de charge solaire	25
I.12.2.1. Les fonctions du régulateur de charge	25
I.12.2.2. Les différents types de régulateur de charge	24
I.12.3. Batteries d'accumulation	26
I.12.4. Onduleur de tension	26
I.12.5. Contrôleur DC/DC	27
I.13. Les avantages et les inconvénients d'une installation photovoltaïque	28
I.14 Conclusion	29

Chapitre II : Stockage d'énergie Solaire

II.1- Introduction	31
II.2 Le stockage d'énergie Solaire	31
II.2.1 Les Avantages de stockage de l'énergie solaire.....	32
II.2.2 Le système de stockage de l'énergie.....	33
II.3- Dispositifs de stockage.....	33
II.3.1 Stockage direct.....	34
a- Condensateur.....	34
b- Super condensateur.....	36
c- Inductances supraconductrices.....	38
II.3.2 Stockage indirect.....	39
a- Accumulateurs électrochimiques.....	39
b- Stockage virtuel	43
c- Stockage sous forme d'hydrogène	47
d- Stockage de l'air comprimé	50
e- Volant d'inertie.....	53
f- Stockage sous forme thermique.....	54
g-Stockage hydraulique.....	56
II.4-Méthodologie de comparaison.....	57
II.4.1-Comparaison selon l'autonomie la puissance et la capacité.....	59
II.4.2-Comparaison selon la durée de vie.....	60
II.4.3-Comparaison selon les coûts.....	61
II.4.4-Comparaison selon le niveau de maturité technologique.....	62
II.4.5-Critères de choix des technologies de stockage pour applications PV autonomes.....	63
II.4.6-Choix des dispositifs de stockage.....	64
II.4.7-Comparaison selon l'indice de performance.....	64

II.5 Conclusion.....	71
----------------------	----

Chapitre III : Stockage de l'hydrogène

III.1- Introduction.....	74
III.2- Caractéristiques de L'hydrogène.....	74
III.3- Procédée de production d'hydrogène.....	75
III.3.1 Productions de l'hydrogène à partir des énergies fossiles.....	76
III.3.2 Productions de l'hydrogène en utilisant la biomasse.....	77
III.3.3 Productions de l'hydrogène par décomposition de l'eau.....	78
III.4- Technologie des électrolyseurs	80
III.5- Piles à combustibles.....	82
III.5.1 Description générale	82
III.5.2 Différents types de piles à combustible.....	84
III.5.3 Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible.....	85
III.6- Stockage de l'hydrogène.....	85
III.6.1 Différentes méthodes de stockage de l'hydrogène	86
III.6.1.1 Stockage conventionnel.....	86
a) Stockage sous forme gazeuse.....	86
b) Stockage sous forme liquide.....	88
III.6.1.2 Stockage sous forme solide	89
a) Stockage par adsorption	90
b) Le stockage dans les hydrures ou stockage par absorption	91
III.6.2 Comparaison des différentes méthodes de stockage de l'hydrogène.....	94
III.7- Le stockage souterrain de l'hydrogène.....	96
III.8- Transport de l'hydrogène.....	98
III.9- Risques industriels de l'hydrogène.....	99
III.10 Conclusion	101
Conclusion générale	104
Bibliographie.....	105
Webographie.....	109
Annexe.....	111

Listes des figures

Figure I.1: Analyse spectrale du rayonnement solaire.....	6
Figure I.2: Mouvement de la terre autour du soleil.....	6
Figure I.3: Différents composants du rayonnement.....	7
Figure I.4: Les trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné.....	8
Figure I.5: Effet photovoltaïque	11
Figure I.6: Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une diode.....	12
Figure I.7: Caractéristique courant-tension d'une cellule.....	14
Figure I.8: Cellule monocristalline.....	15
Figure I.9: Cellule poly cristalline	15
Figure I.10: Cellule photovoltaïque amorphe.....	16
Figure I.11: Cellule photovoltaïque en couche mince à base de cuivre.....	16
Figure I.12: Cellule Double jonction.....	17
Figure I.13: Caractéristiques résultantes d'un groupement de Ns cellules en série.....	19
Figure I.14: caractéristique résultante obtenue en association en parallèles.....	19
Figure I.15: Caractéristique P-V du module PV selon l'éclairement.....	20
Figure I.16: Caractéristique I-V du module PV selon l'éclairement.....	20
Figure I.17: Caractéristique P-V du module du PV selon la température.....	21
Figure I.18: La caractéristique I-V module PV selon la température.....	21
Figure I.19: Schéma de principe d'un système autonome.....	22
Figure I.20: Structure d'un système PV raccordé au réseau.....	23
Figure I.21: schéma d'une installation hybride (photovoltaïque – éolien).....	23
Figure I.22: Module photovoltaïque.....	24
Figure I.23: régulateur de charge	26
Figure I.24: Onduleur de 1000W.....	27
Figure II.1: Schéma descriptif de type d'un Dispositifs du stockage.....	33
Figure II.2: Structure d'un condensateur.....	34
Figure II.3 : Structure d'un super condensateur.....	37
Figure II.4: Principaux éléments d'un dispositif de stockage d'énergie sous forme magnétique par bobine supraconductrice.....	38
Figure II.5: Schéma de principe de fonctionnement d'un accumulateur électrochimique....	40
Figure II.6: schéma de principe de stockage Virtual	44
Figure II.7: Différentes possibilités de restitution de l'électricité à partir de l'hydrogène stocké.....	48
Figure II.8: Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé	51
Figure II.9: schéma de stockage du volant d'inertie.....	53
Figure II.10: schéma principale de stockage thermique.....	55
Figure II.11: principe du marche d'hydroélectrique.....	56

Figure II.12: Autonomie des technologies de stockage en fonction de leur puissance.....	59
Figure II.13: Comparaison en termes de puissance et de capacité en fonction du temps de décharge.....	60
Figure II.14: Comparaison entre l'efficacité énergétique et la durée de vie.....	61
Figure II.15: Comparaison entre les coûts d'investissements par unité de puissance et par unité d'énergie.....	61
Figure II.16: Comparaison selon les coûts d'investissements calculés par cycle	62
Figure II.17: Niveau de maturité technologique des différentes technologies de stockage d'énergie.....	63
Figure II.18: Répartition des différents critères.....	66
Figure II.19: Répartition des différents critères pour une application autonome à grande échelle.....	69
Figure II.20: Indice de performances des technologies de stockage applicable aux systèmes PV suivant deux catégories d'applications.....	70
Figure III.1: Répartition des modes de production d'hydrogène actuels.....	76
Figure III.2: Procède de production d'hydrogène.....	76
Figure III.3: Principe d'électrolyse de l'eau.....	78
Figure III.4: Vue de l'ensemble des applications basée sur l'électrolyse de l'eau alimenté par la source d'énergie photovoltaïque.....	79
Figure III.5: Exemple de procédé de photo-électrolyse de l'eau.....	80
Figure III.6: Principe de l'électrolyse alcaline.....	81
Figure III.7: Electrolyseur alcaline standard.....	81
Figure III.8: L'électrolyse PEM.....	81
Figure III.9: Principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte	82
Figure III.10: Fonctionnement d'une pile à combustible.....	83
Figure III.11: Diagramme simplifié du processus de liquéfaction de l'hydrogène.....	88
Figure III.12: Réservoir d'hydrogène liquide à -253°C.....	89
Figure III.13: Modélisation de la physisorption.....	90
Figure III.14: Modélisation de la chimisorption.....	92
Figure III.15: Galette à base d'hydrure de magnésium.....	93
Figure III.16: Colonne de stockage.....	93
Figure III.17: Unité autonome (adiabatique) de stockage à hydrure de magnésium.....	94
Figure III.18: Stockage d'hydrogène McPhy avec échangeur de chaleur extérieur.....	94
Figure III.19: Capacité volumique des différentes techniques de stockage de l'hydrogène	95
Figure III.20: Exemple de cadres de neuf bouteilles.....	98

Liste des tableaux

Tableau I.1: Caractéristiques principales du soleil.....	5
Tableau I.2 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.....	9
Tableau I. 3: Comparaison des technologies des cellules.....	17
Tableau II.1: Comparaison de quelques technologies d'accumulateurs électrochimiques ...	42
Tableau II.2: Données technico-économiques pour les principales technologies de stockage.....	57
Tableau II.3 : Matrice élémentaire de décision pour le critère de coût.....	65
Tableau II.4 : Matrice de décision élémentaire pour le critère de cyclabilité.....	66
Tableau II.5 : Matrice globale de décision (petite échelle).....	67
Tableau II.6 : Matrice globale de décision (petite échelle).....	69
Tableau III.1: Caractéristiques physico-chimiques de l'hydrogène.....	75
Tableau III.2 : Les différents types de piles à combustibles.....	84
Tableau III.3 : Evolution des réservoirs de stockage d'hydrogène par compression.....	87
Tableau III.4 : Synthèse des caractéristiques des différents modes de stockage de l'hydrogène...	95
Tableau III.5 : Comparaison entre les trois méthodes de stockage.....	96

Introduction générale

Introduction :

Dans le contexte énergétique environnemental actuel, l'objectif visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre et les substances polluantes en exploitant et en combinant des sources d'énergie alternatives et renouvelables ainsi qu'en réduisant l'utilisation de combustibles fossiles voués à l'épuisement en raison de leur forte consommation dans de nombreux pays est devenu capital.

C'est pour cela le monde commence à prendre conscience de l'importance des énergies renouvelables, qui sont devenues une priorité pour l'avenir, car ces derniers sont des sources qui se renouvèlent assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle du temps humain.

Le soleil est une source d'énergie inépuisable, qui émet chaque jour sous forme de lumière l'équivalent de vingt-sept années de consommation électrique. Il existe plusieurs moyens d'utiliser l'énergie du soleil, l'une d'entre elles est de transformer sa lumière en électricité grâce à des cellules photosensibles ; c'est ce que l'on appelle l'énergie solaire photovoltaïque.

L'énergie Photovoltaïque connaît actuellement un fort développement dans le monde, vue son caractère écologique, elle apparaît comme une source importante telle que la quantité d'énergie solaire qui arrive à la surface de la terre dans un jour est dix fois plus grande que celle consommée.

L'électricité photovoltaïque peut être produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur, ce qui la rend accessible à une grande partie de la population mondiale.

Toutefois, l'alternance jour/nuit provoquée par la rotation de la terre et les aléas climatiques causés par les orages et les passages nuageux limitent considérablement l'utilisation de cette énergie de façon permanente.

Pour pallier cette insuffisance et assurer la continuité du service dans les systèmes photovoltaïques PV, l'utilisation de dispositif de stockage d'énergie est nécessaire. Le stockage d'énergie dans un système électrique peut être défini comme toute installation ou méthode, généralement soumise à un contrôle indépendant, à travers laquelle il est possible de stocker

l'énergie générée dans le système électrique, de la conserver, stockée et de l'utiliser dans le système électrique si nécessaire.

Le stockage d'énergie électrique comprend un large éventail de techniques. Ces principales techniques sont: électrochimiques, y compris les batteries, l'hydrogène, électriques y compris les condensateur, super condensateur et système de stockage d'énergie magnétique supraconducteur (SMES), mécanique y compris volant d'inertie, stockage d'énergie à air comprimé (CAES).

L'hydrogène est l'un des énergies renouvelables proposées, il est considéré comme une source d'énergie primaire et il peut être stockée pour une utilisation future et par conséquent réduire les problèmes résultant de la consommation de ressources non renouvelables. L'hydrogène, contrairement aux hydrocarbures, ne se trouve pas à l'état naturel mais est fabriqué par l'homme. Ceci implique un coût supplémentaire qui conduit à un prix final actuel trois fois plus cher que les produits pétroliers.

A travers ce mémoire on va faire une étude théorique de différents procédés de stockage de l'énergie solaire. Notre travail se divise en trois chapitres après une brève introduction.

Dans le premier chapitre nous présenterons les généralités sur la technologie photovoltaïque en commençant par des notions sur l'énergie solaire. Dans un deuxième temps nous montrerons le principe de l'effet photovoltaïque et les différentes installations PV. Et nous clôturerons ce chapitre par les principaux éléments constituant un système photovoltaïque ainsi que les avantages et les inconvénients de ce dernier.

Le deuxième chapitre sera consacré au différents types de stockage photovoltaïque ainsi ses caractéristiques. Puis nous allons faire une étude comparative entre les procédés de stockage de l'énergie solaire.

Le troisième chapitre est consacré à une étude dynamique orientée système de stockage d'hydrogène, Ça permet de toucher le sujet des plusieurs côtés : les procédés de productions et les différents modes de stockage.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion qui résume notre étude.

CHAPITRE I:

L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Chapitre I : l'énergie solaire photovoltaïque

I.1 Introduction :

L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en, tout point du globe terrestre.

Actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout pour les applications sur des sites isolés.

I.2 Le soleil :

Le Soleil est l'étoile du Système solaire. Dans la classification astronomique, c'est une étoile de type naine jaune d'une masse d'environ $1,989 1 \times 10^{30}$ kg, composée d'hydrogène (75 % de la masse ou 92 % du volume) et d'hélium (25 % de la masse ou 8 % du volume).

L'énergie solaire transmise par le rayonnement solaire rend possible la vie sur Terre par apport d'énergie lumineuse (lumière) et d'énergie thermique (chaleur).

I.2.1 Caractéristiques du soleil:

Le soleil est la seule étoile du système solaire et aussi la plus proche de la terre, il est né de la contraction de matière stellaire, (gaz et poussier) devenant de plus en plus dense à cause de l'attraction gravitationnelle et aussi de plus en plus opaque, ainsi la chaleur engendré par sa contraction ne pouvant plus être évacuer par rayonnement, le cœur commença à s'échauffer pour atteindre quelque million de degrés, température d'amorçage des réaction nucléaire, et l'énergie produite par ses réaction nucléaires a encore fait augmenter la température et ceci jusqu'à 15 million de degré [1]. A cette température les forces de pression de radiation et d'agitation de la matière s'opposent à la force gravitationnelle, et ainsi le soleil cessa de se contracter la matière étant stabilisée.

Bien que le soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul 99.9% de la masse du système solaire qui est dominé par les effets gravitationnels de l'importante masse du soleil.

Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau I.1 :

Diamètre (km)	139200
Masse (Kg)	2.10^{30}
Surface (Km ²)	$6.09.10^{12}$
Volume (Km ³)	$1.41.10^{18}$
Masse volumique (Kg/m ³)	1408
Vitesse (Km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	$2.5.10^{17}$

Tableau I.1 : Caractéristiques principales du soleil [1]

I.2.2 Spectre solaire :

Le spectre solaire est en effet composé de toutes sortes de rayonnements d'énergies et de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde [2]. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique, sont considérés comme des porteurs d'énergie qui est reliée à leur longueur d'onde par la relation suivante:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.1)$$

Avec : h est la constante de Planck, ν la fréquence, C la vitesse de lumière et λ la longueur d'onde.

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde qui varie entre de 0,22 à 10 μm .

La figure I.1 représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 6.4% dans la bande des ultraviolets ($0.20 < \mu < 0.38 \mu\text{m}$)
- 48% dans la bande visible ($0.38 < \mu < 0.78 \mu\text{m}$)
- 45.6% dans la bande des infrarouge ($0.78 < \mu < 10 \mu\text{m}$)

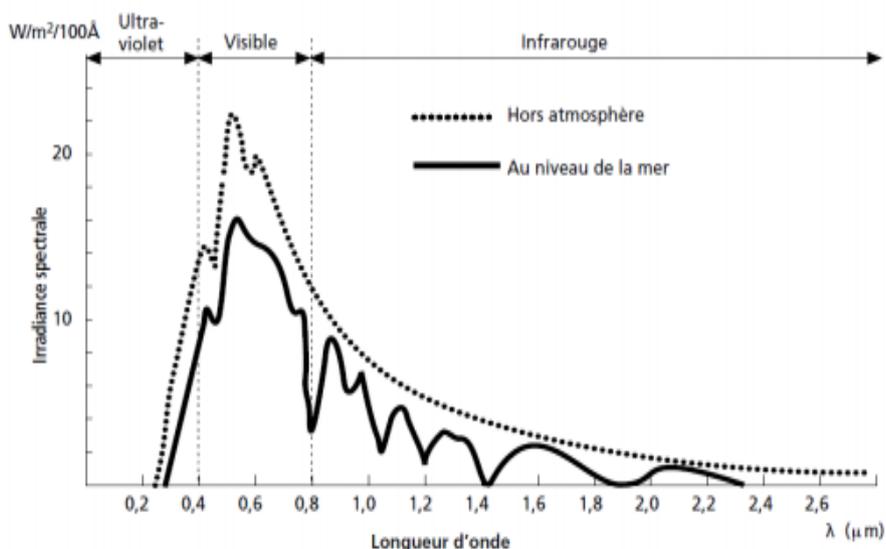


Figure I.1 : Analyse spectrale du rayonnement solaire [3]

I.2.3 Mouvement de la terre autour du soleil:

La terre tourne autour du soleil en une année, Son axe de rotation se dirige toujours dans le même sens (vers l'étoile polaire dans l'hémisphère nord), Ce qui fait que l'axe de rotation de la terre pointe vers le soleil six mois de l'année et dans le sens opposée les six autres mois ce qui explique l'alternance des saisons et le changement dans la durée de la longueur des jours et des nuits durant l'année.

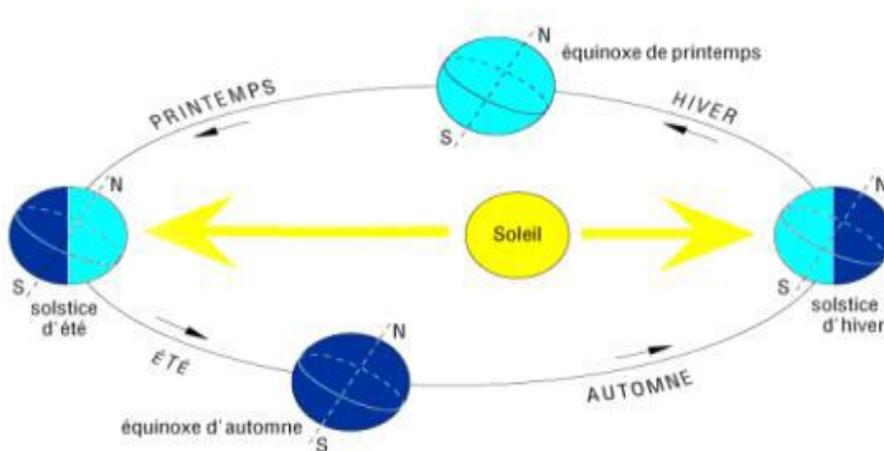


Figure I.2: Mouvement de la terre autour du soleil

Ce Mouvement de révolution se fait dans un plan appelé le plan de l'écliptique. L'axe des pôles nord et sud, autour du quel s'effectue le mouvement de rotation de la Terre.

La déclinaison change au cours de l'année, de $-23^{\circ}27'$ à $+23^{\circ}27'$. Le centre de gravité de la terre décrit une ellipse dont le soleil occupe l'un des foyers [4]. Le sens des variations de la déclinaison peut être appréhendé à travers de 4 positions clés suivantes:

- Au solstice d'hiver (21 décembre) : les rayons solaires touchent la terre avec un angle de déclinaison de $-23^{\circ}27'$; c'est la valeur minimum de la déclinaison.
- A l'équinoxe de printemps (21 mars) : l'ensemble des deux hémisphères sont éclairés de la même manière 12 heures de jours et 12 heures de nuit et la déclinaison vaut alors 0° .
- Au solstice d'été (23 juin) : la position de la terre est opposée à celle du 21 décembre et le soleil frappe l'hémisphère Nord avec l'angle maximum de déclinaison de $23^{\circ}27'$.
- A l'équinoxe d'automne (22 septembre) : la situation est identique à celle du 21 mars et la déclinaison repasse à 0° .

I.3 Rayonnement solaire:

Bien que le rayonnement de la surface du soleil soit pratiquement constant, au moment où il atteint la surface de la terre il devient fortement variable, et cela est dû à son absorption et à sa dispersion dans l'atmosphère terrestre.

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé vers le sol, On distingue plusieurs composantes:

I.3.1. Le rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire incident sur un plan donné provenant d'un angle solide centré sur le disque solaire.

I.3.2. Le rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. Les deux rayonnements direct et diffus sont illustrés sur la figure I.3.

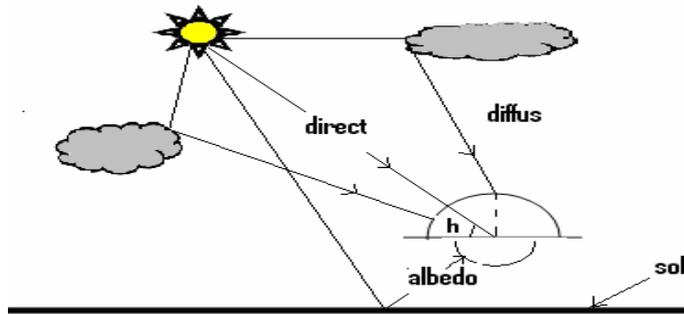


Figure I.3: Différents composants du rayonnement

La conversion photovoltaïque utilisant les modules photovoltaïques(PV) convertit aussi bien le rayonnement direct que le rayonnement diffus.

I.3.3. Le rayonnement réfléchi (albédo)

C'est la fraction du rayonnement incident diffusée ou réfléchi par le sol et les nuages. Ce terme étant généralement réservé au sol, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possible. Par définition, le corps noir possède un albédo nul.

I.3.4. Le rayonnement global

Rayonnement global sur une surface inclinée est la somme des rayonnements: Direct, Diffus et Réfléchi.

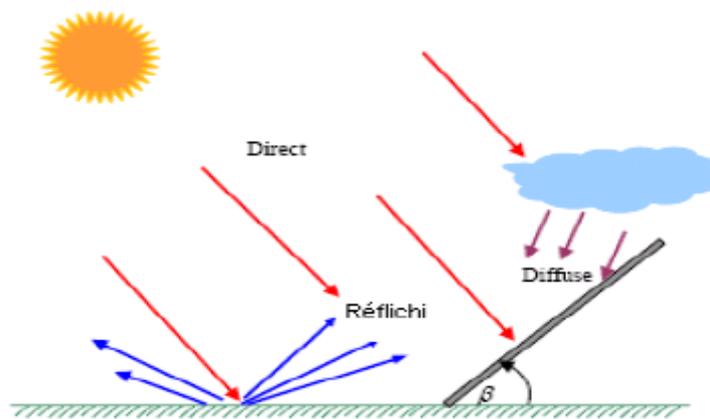


Figure I.4 : Les trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné [5]

I.4 Gisement solaire dans l'Algérie:

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire Algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau I.1 selon l'enseillement reçu annuellement :

Régions	Régions côtières	Haut Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée d'enseillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau I.2: Enseillement reçu en Algérie par régions climatiques [1]

I.5 L'énergie Solaire Photovoltaïque:

Le mot photovoltaïque est composé du terme photo, qui signifie le photon de la lumière et de voltaïque dont l'origine est le nom de l'inventeur de la pile électrique Volta. En d'autre terme c'est le synonyme de photopile. La technologie photovoltaïque (PV) offre une méthode pratique pour la conversion de la lumière du soleil disponible en abondance pendant une grande partie de l'année directement en électricité [6]. Cette technique de conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule solaire et se base sur le principe photovoltaïque, qui consiste à produire une force électromotrice lorsqu'elle est exposée à la lumière.

I.6. Potentiel photovoltaïque dans le monde:

L'énergie solaire photovoltaïque s'est d'abord développée pour satisfaire des besoins électriques en sites isolés. Depuis le début des années 2000, le développement de l'énergie solaire photovoltaïque a pris une toute autre dimension à l'échelle mondiale.

Fin 2007, la capacité totale installée s'élevait à près de 9200 MW, A la fin de l'année 2014, le marché mondiale cumule 177 GW de photovoltaïque raccordé, avec près de 40 GW installé en 2014, ce qui représente plus de 1% de la couverture de la demande mondiale électrique.

A la fin de l'année 2015, la capacité totale installée dépasse les 200 GW, EPIA, l'association européenne de photovoltaïque prévoit que le parc installé pourrait atteindre environ 1800000

MW en 2030, pour une production représentant 14% de la consommation mondiale d'électricité. En 2018, la production d'électricité à partir du solaire photovoltaïque représente 2.1% de la production mondiale d'électricité.

I.7 L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet la conversion directe des rayons du soleil en électricité. Sous l'action de la lumière, et grâce au champ électrique interne consécutif au dopage du matériau de la cellule, un courant photogénéré est créé. Les photons du Soleil sont absorbés dans la cellule et libèrent des électrons de son matériau.

Une cellule photovoltaïque se sert de ce phénomène photoélectrique pour produire de l'électricité, sous forme de courant continu. Elle n'est en réalité qu'un simple composant électronique, constitué de semi-conducteurs, principalement à base de silicium. Elle prend la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté, Ces cellules photovoltaïques sont ensuite assemblées dans un module photovoltaïque, plus communément appelé panneau solaire.

Pour entrer un peu en profondeur, quand ces semi-conducteurs sont exposés à la lumière (composée de photon), un photon avec suffisamment d'énergie arrache un électron, créant au passage un trou. Normalement l'électron trouve rapidement un trou pour se replacer, et l'énergie apportée par le photon disparaît.

Le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau photovoltaïque au lieu de se replacer simplement dans la même position qu'avant : ainsi apparaîtra une différence de potentiel, c'est à dire une tension entre les deux faces, comme dans une pile. Il s'agit en somme de faire déplacer tous ces électrons et ces trous dans une seule et même direction pour créer un courant.

La solution la plus fréquente pour guider les électrons et les trous est d'utiliser un champ électrique au moyen d'une jonction PN, entre deux couches "dopées" respectivement P (positif) et N (négatif). Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau.

Lorsque la première couche est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau dopé N se dirigent naturellement vers le matériau dopé P.

Quand un photon arrache un électron, libérant l'électron et formant un trou, sous l'effet de ce champ électrique ils partent chacun à l'opposé : les électrons s'accroissent dans la région N (qui

devient le pôle négatif), tandis que les trous s'accumulent dans la couche dopée P (qui devient le pôle positif).

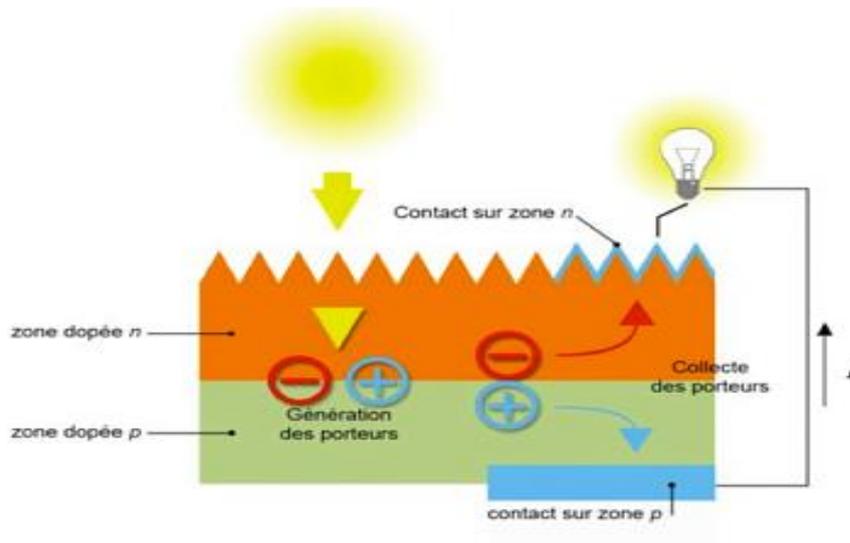


Figure I. 5 Effet photovoltaïque

I. 8 Cellules photovoltaïque :

I.8.1. Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque :

La figure I.6 présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode.

Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma [3].

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule :

- La résistance montée en série (R_s) représente la résistance de contacte et de connexion.
- La résistance shunt (R_{sh}) montée en parallèle représente le courant de fuite.
- Une diode en parallèle qui modélise la jonction PN.

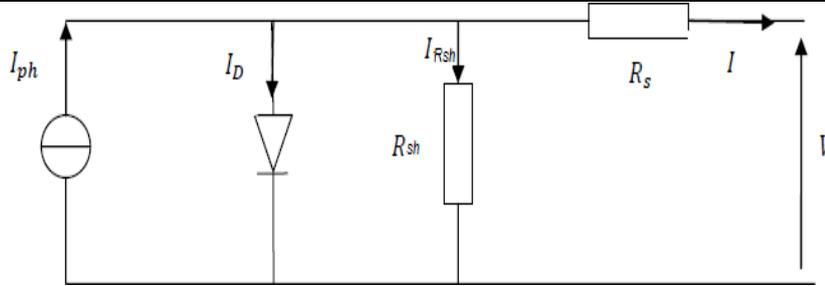


Figure I. 6 : Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une diode

La loi de Kirchoff nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_{ph} = I_D + I_{Rsh} + I \quad \text{Donc} \quad I = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \quad (I.2)$$

L'expression résultante à une caractéristique courant-tension (I-V) après tout calcul est :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{n V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + (1 \cdot R_s) I}{R_{sh}} \quad (I.3)$$

Les expressions de (I_{ph}) et de (I_{sat}) le courant de saturation de la diode sont donnés par:

$$I_{ph} = [I_{sc} + (k_i \cdot (T - 298))] \cdot \frac{G}{100} \quad (I.4)$$

$$I_{sat} = \left(I_{sc} \times \exp \left[\left(\frac{V_{CO}}{n V_t} \right) \right] - 1 \right) \times \left(\frac{T}{298} \right)^3 \times \exp \left[\frac{q \cdot E_g \cdot \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T} \right)}{n K} \right] \quad (I.5)$$

Dou :

I_{ph} : Photo courant produit.

I_{sat} : Courant de saturation de la diode

R_s, R_{sh} : La résistance série et la résistance parallèle, respectivement.

$V_t = \frac{KT}{q}$ Tension thermique à la température T.

q : Charge de l'électron (1.602×10^{-19} C)

K : Constante de Boltzmann (23.1381×10^{-4} J/k)

K_i : Constante ($1.2 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^3$)

n : Facteur de non idéalité de la jonction

T : Température effective de la cellule en degré Kelvin

E_g : énergie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV)

G : l'ensoleillement en W/m^2

I.8.2. Caractéristiques électriques d'une cellule :

Les propriétés électriques de la cellule sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle caractéristique courant-tension.

Remarque : tout dipôle électrique est entièrement défini par sa caractéristique courant-tension, qui lui est propre.

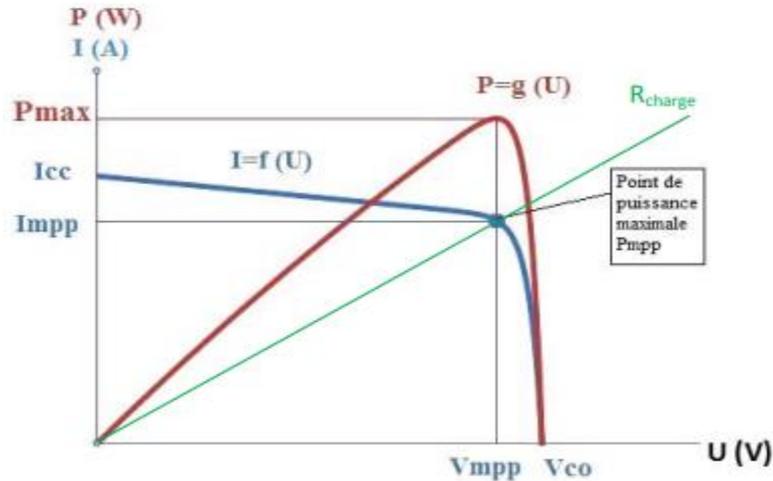


Figure I.7 : Caractéristique courant-tension d'une cellule

Trois points sont importants sur cette courbe :

- **Le point de puissance maximale PMPP - (Maximum Power Point) :** c'est quand la charge a une résistance égale à R_{charge} (droite verte) que la cellule délivre la puissance maximale.
- **Le courant de court-circuit noté I_{cc} :** il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est en court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle positif est relié au pôle négatif (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule ($P = U \times I$) est nulle.
- **La tension en circuit ouvert notée U_{co} :** il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle + et le pôle - sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul).

Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule ($P = U \times I$) est nulle.

I.8.3. Les principales technologies de cellules solaires photovoltaïques :

Le rendement des cellules PV dépend principalement des matériaux constitutants, la plupart des recherches se dirigent dans ce domaine, car c'est l'élément qui freine jusqu'à maintenant la production photovoltaïque et sa répartition à grande échelle.

Il existe trois types principaux de cellules :

I.8.3.1. Cellules cristallines

Les cellules en silicium mono et poly-cristallin représentent environ 94% du marché. On reconnaît deux types de cellules sont :

➤ **Cellule en silicium monocristallin :**

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

➤ **Cellule en silicium poly cristallin :**

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

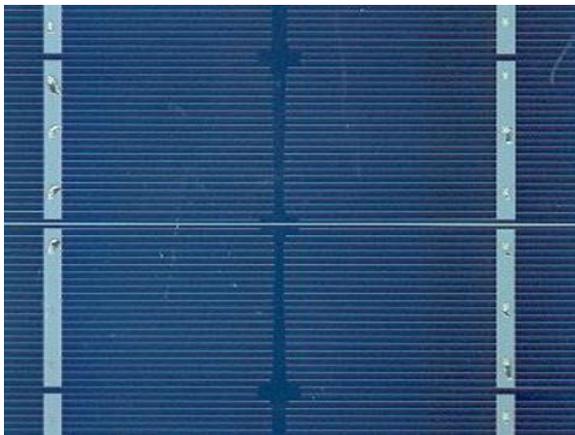


Figure I.8 : Cellule monocristalline

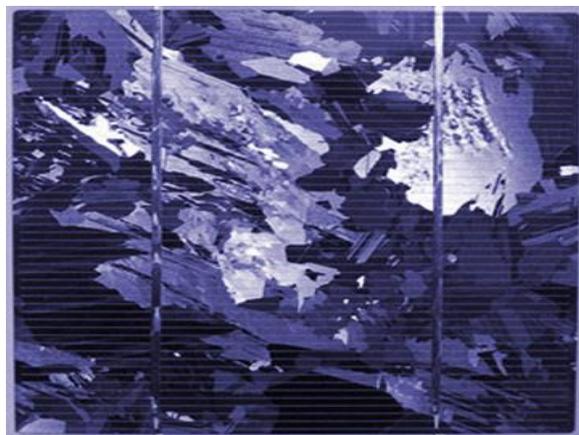


Figure I. 9 : Cellule poly cristalline

I.8.3.2. Cellule en couche mince :

➤ Cellule silicium amorphe en couche mince :

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires".



Figure I.10 : Cellule photovoltaïque amorphe

➤ Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS :

Les cellules CIS représentent une nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, de type CIS (cuivre, indium, sélénium) ou CIGS (cuivre, indium, gallium et sélénium). Les matières premières nécessaires à la fabrication de ces cellules sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques (bien que ce dernier soit déjà très abondant sur terre). De plus, leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince.

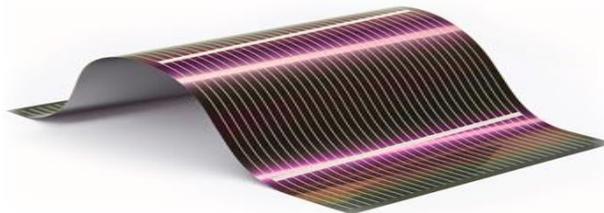


Figure I.11 : Cellule photovoltaïque en couche mince à base de cuivre

I.8.3.3. Cellule multi jonction :

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire [et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion.

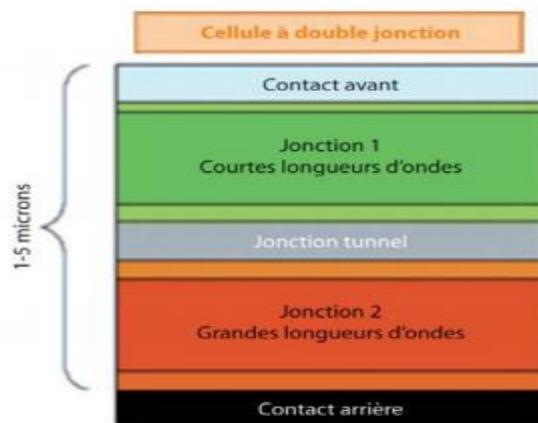


Figure I. 12 : Cellule Double jonction

Cellules	Rendement	Aspect économique	Avantages	Inconvénients
Cellule monocristallin	environ 25%	Coût plus élevé que le poly cristallin	-Meilleur rendement que le poly cristallin -Durée de vie importante (+/- 30 ans)	-Plus cher que le poly cristallin. -Rendement faible sous un faible éclairement.
Cellule poly cristallin	environ 20%	Ces cellules ont pour l'instant le meilleur rapport qualité / prix	-Bon rendement -Durée de vie importante -Moins cher que le monocristallin	-Rendement faible sous un faible éclairement

Chapitre I : l'énergie solaire photovoltaïque

Cellule silicium amorphe	environ 13.4%	Ces cellules à faible rendement peuvent fonctionner en intérieur, elles sont principalement utilisées pour des applications à faible puissance	-Fonctionnent avec un éclairage faible. -Bon marché par rapport aux autres types de cellules. -Moins sensible aux températures élevées.	-Rendement faible en plein soleil. - nécessite une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses.
Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS	Environ 19.3%	Suite aux investissements massifs dans les cellules "traditionnelles" qui ont entraîné une baisse importante des coûts de fabrication, les cellules sans silicium en couche mince ont perdu leur avantage concurrentiel.	-Meilleurs rendements par rapport aux autres cellules photovoltaïques en couche mince. -la cellule peut être construite sur un substrat flexible.	- Rendement plus faible que les cellules épaisses
Cellule multi jonction	Environ 40%	Développé pour les applications spatiales, ce type de cellule n'est pas encore commercialisable	- Rendement inégalé	- Peu d'applications commerciales

Tableau I. 3: Comparaison des technologies des cellules

I. 9 Association de cellule photovoltaïque

I.9.1. Association série

Dans un groupement de n_s cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant des cellules reste le même.

La figure I. 13 montre la caractéristique résultante (I_{SCC} , V_{SCO}) avec :

$$I_{SCC} = I_{CC} \quad \text{et} \quad V_{SCO} = n_s * V_{CO} \quad (I.6)$$

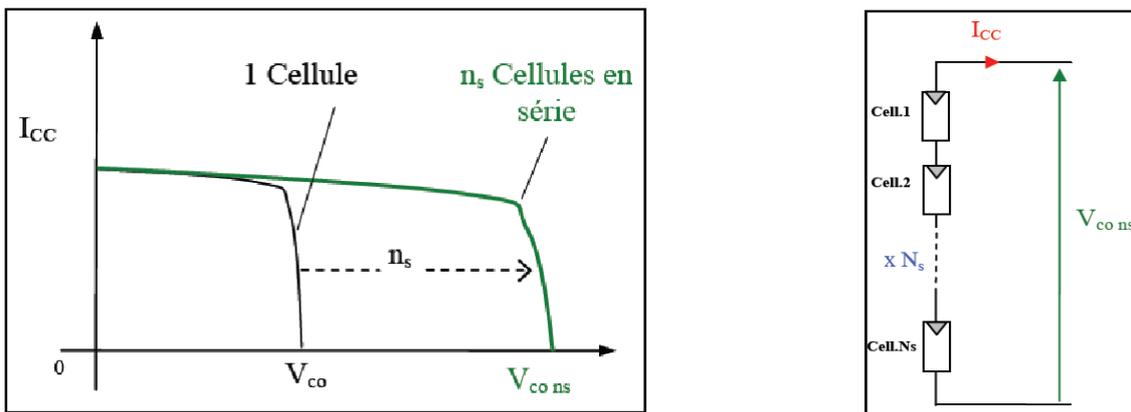


Figure I. 13 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de Ns cellules en série.

I.9.2. Association en parallèle

Dans un groupement de n_p cellules en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition du courant.

La figure I.14 montre la caractéristique résultante (I_{PCC} , V_{PCO}) Avec :

$$I_{PCC} = n_p \times I_{CC} \quad \text{et} \quad V_{PCO} = V_{CO} \quad (I.7)$$

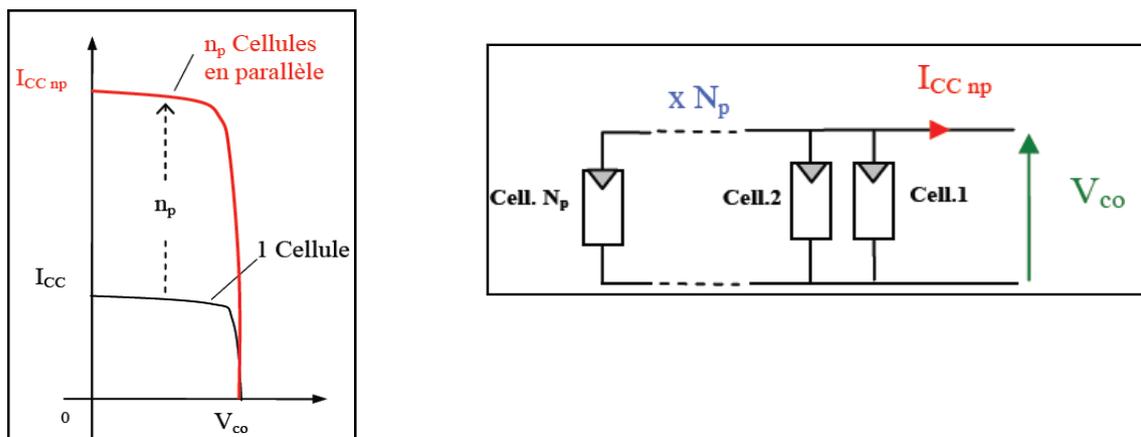


Figure I. 14 : Caractéristique résultante obtenue en association en parallèles

I.10. Comportement d'un générateur photovoltaïque :

I.10.1. Influence de l'Éclairement :

En faisant varier l'éclairement entre 200 w/m² et 1000 w/m² avec un pas de 200, la caractéristique ($I_{pv}=f(V_{pv})$) est donnée par les figures (I.16-17). On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m² et une température de 25 °C.

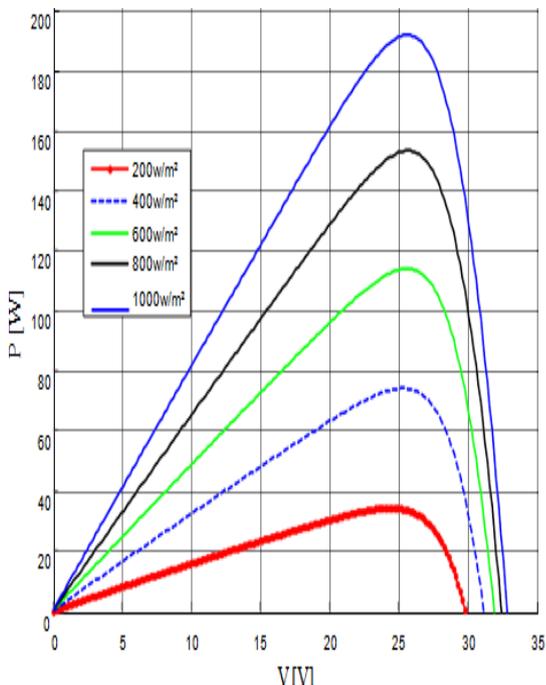


Figure I.15: Caractéristique P-V du module PV selon l'éclairement

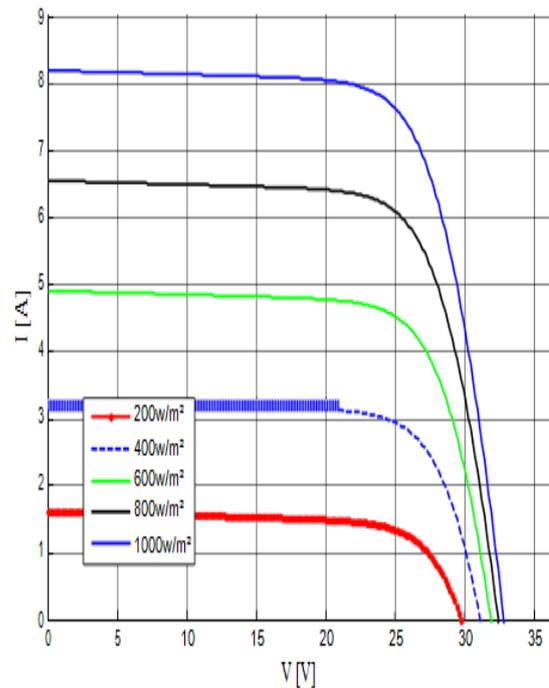


Figure I.16 : Caractéristique I-V du module PV selon l'éclairement

I.10.2. Influence de la Température :

En faisant varier la température de 25°C jusqu'à 50°C, la caractéristique ($I_{pv}=f(V_{pv})$) est donnée par les figures (I.18-19). On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit.

Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue [7]. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte.

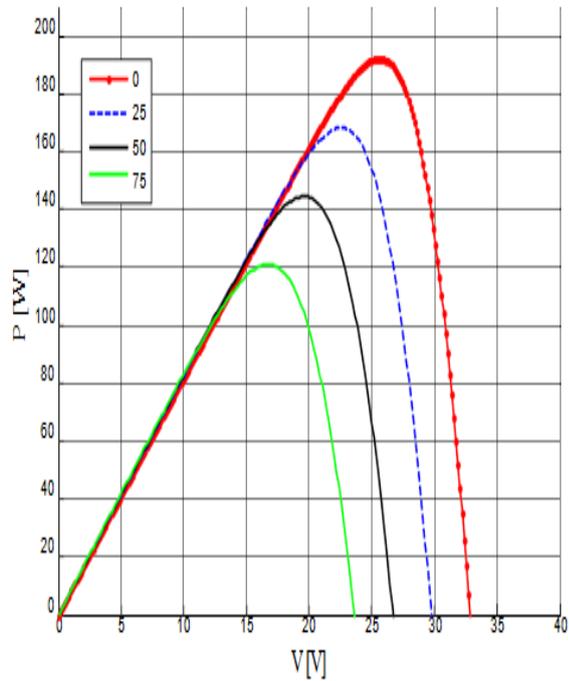


Figure I.17 : Caractéristique P-V du module selon la température

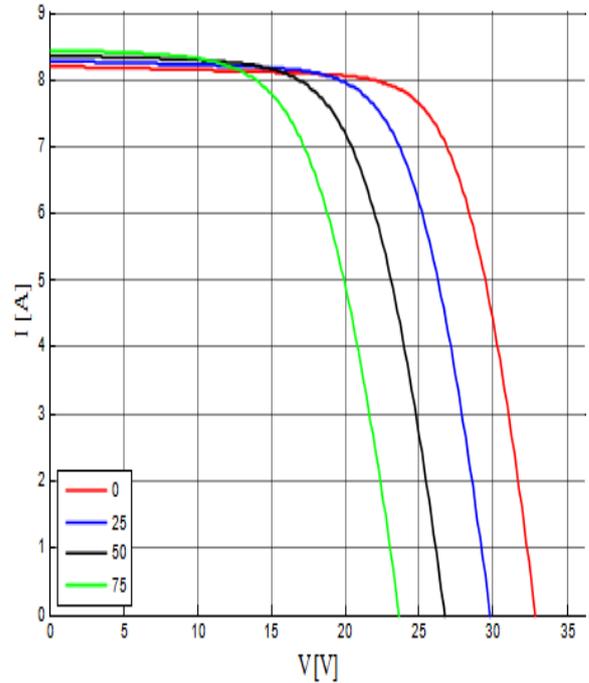


Figure I.18 : La caractéristique I-V du PV module selon la température

I.11 Différents types d'installation photovoltaïque :

Nous distinguons trois types de Systèmes Photovoltaïques :

- ❖ Système autonome.
- ❖ Système raccordé au réseau.
- ❖ Système hybride.

I.11.1.Installation autonome :

Comme illustré sur la figure (I.20) en site isolé, le champ photovoltaïque (panneaux solaires) peut fournir directement l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les récepteurs (éclairage et équipement domestique).

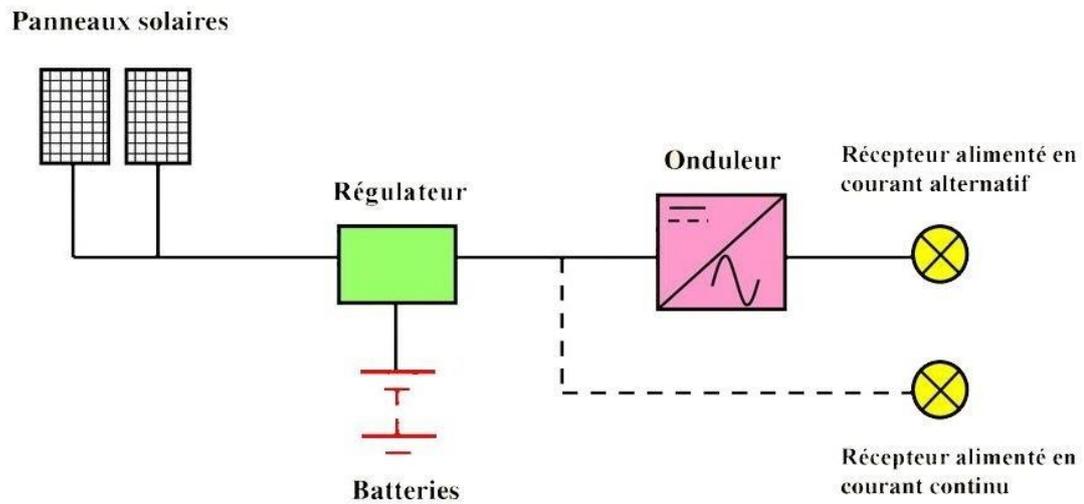


Figure I .19: Schéma de principe d'un système autonome

Un système de régulation et une batterie permettent de stocker l'énergie électrique qui sera ensuite utilisée en l'absence du Soleil. Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon ses caractéristiques. Le régulateur de charge a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes [8]. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie. On peut aussi utiliser des récepteurs fonctionnant en courant continu et alternatif. Dans ce cas, l'installation comprendra un onduleur. On peut citer quelques exemples de systèmes autonomes, comme les balises en mer, les lampadaires urbains, le pompage solaire et les maisons en sites isolés.

I.11.2. Installation raccordé au réseau :

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau. Généralement sur des habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement, voir Figure (I.21) :

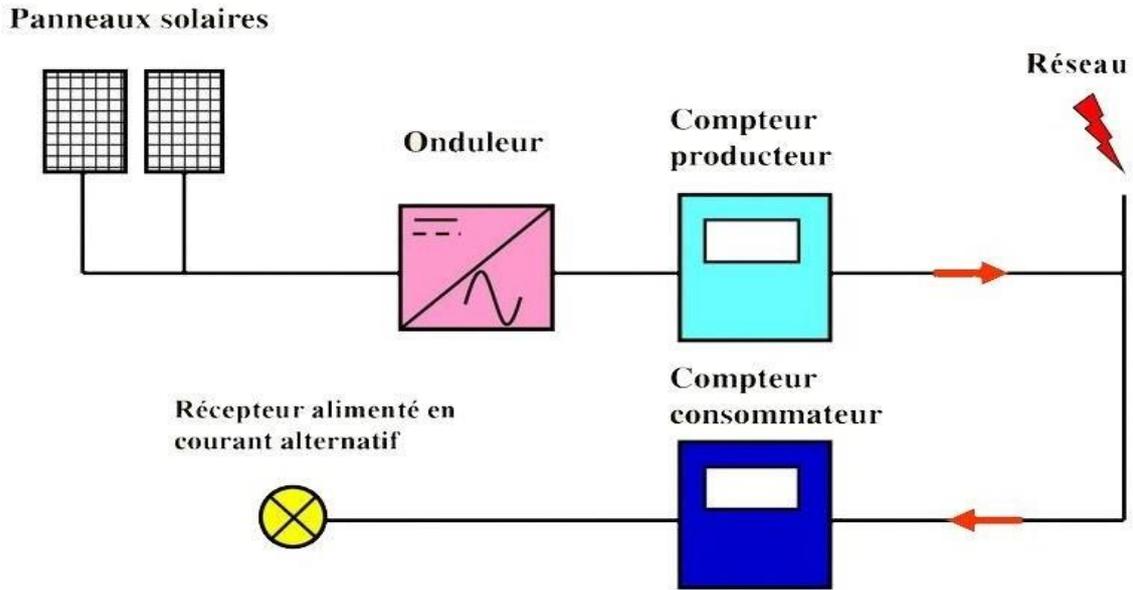


Figure I .20 : Structure d'un système PV raccordé au réseau

I.11.3. Installation hybride :

Il s'agit de systèmes qui regroupent des sources d'énergie de nature différentes telle une installation éolienne, un générateur diesel ou une centrale de cogénération en plus du générateur photovoltaïque [8]. Ce type d'installation est utilisé lorsque le générateur photovoltaïque seul ne couvre pas toute l'énergie requise.

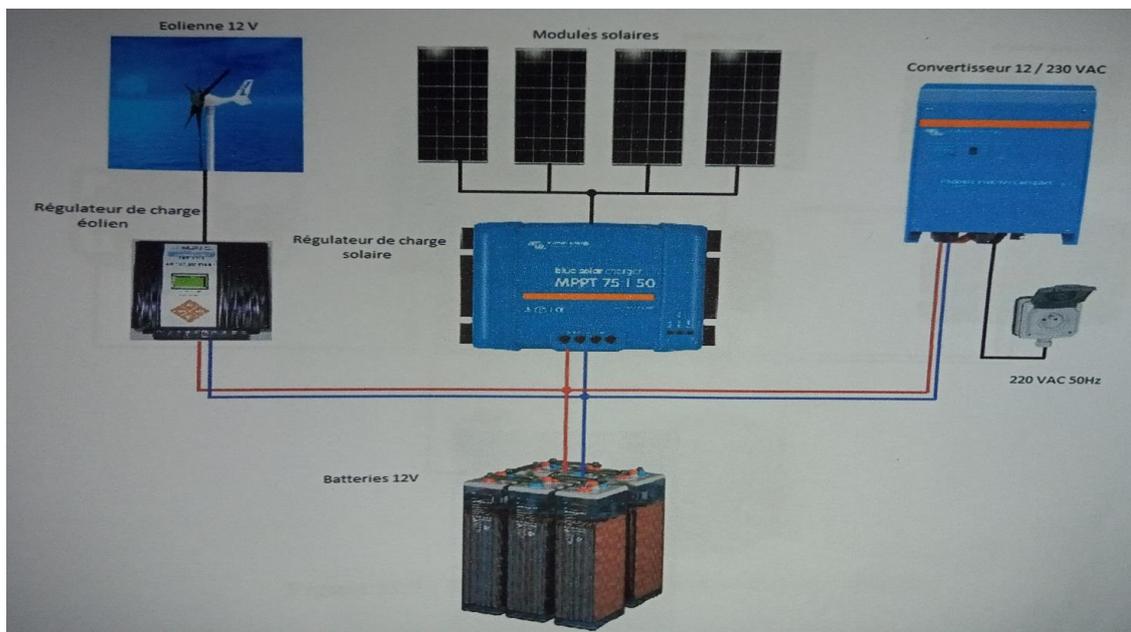


Figure I .21 : schéma d'une installation hybride (photovoltaïque – éolien) [9]

I.12. Composants d'un système photovoltaïque :

I.12.1. Modules photovoltaïques :

Les modules sont un assemblage de photopile (ou cellule) montée en série, afin d'obtenir la tension désirée (12V, 24V...) [10]. Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module figure (I.23). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (Ethylène-Acétate de Vinyle, de l'anglais Ethylene-Vinyl Acetate) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène. Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation.

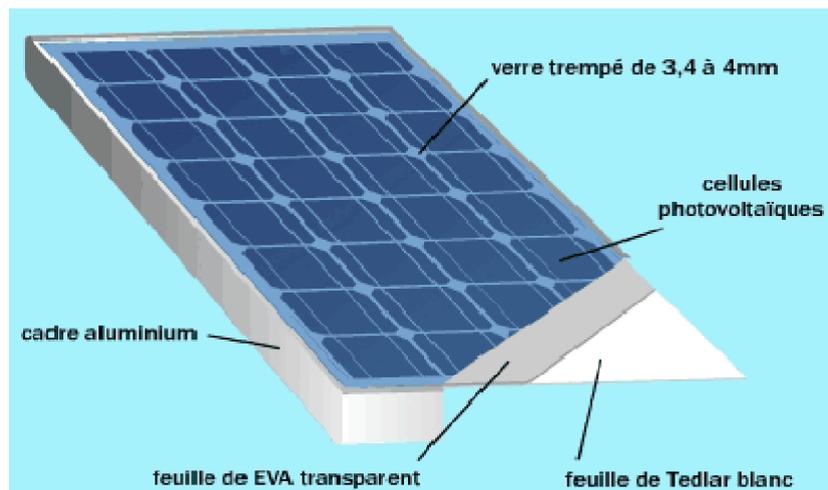


Figure (I.22): Module photovoltaïque [11]

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes:

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques.
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

I.12.2. Régulateurs de charge solaire :

Le régulateur de charge solaire est un composant essentiel d'un système solaire Photovoltaïque.

Il est mis en place dans le système solaire entre les panneaux solaires et batterie son rôle est de délivrer une tension normalisé (12 ,24ou48v) à la batterie de stockage.

I.12.2.1. Les fonctions du régulateur de charge :

Un régulateur de charge solaire remplit 2 fonctions :

- Il protège la batterie contre la surcharge en coupant le courant électrique allant du panneau solaire vers la batterie quand la batterie est pleinement chargée, il est donc limiteur de charge.
- Sa deuxième fonction est qu'il protège la batterie contre la décharge profonde, quand les utilisations sont branchées sur la sortie du régulateur de charge, il déconnecte les utilisations quand la batterie descend en dessous d'un seuil critique d'état de charge de la batterie, Il est donc limiteur de décharge.

I.12.2.2. Les différents types de régulateur de charge :

Les régulateurs de charge de systèmes PV peuvent se caractériser en trois groupes principaux:

- a) **les régulateurs de charge shunt** : Ce sont des régulateurs solaire basique, en fonction de la tension de la batterie le régulateur met ou non le panneau solaire en contact avec celle-ci.
- b) **les régulateurs de charge série** : qui intègrent un interrupteur entre le panneau solaire et la batterie pour l'arrêt de la charge [4].La majorité des régulateurs de charge à impulsions de largeurs variables (PWM, Pulse With Modulation) utilise cette technique.
- c) **les régulateurs à recherche de point de puissance maximum** (MPPT, Maximum Power Point Tracker) : qui utilisent un circuit électronique spécial permettant de toujours capter la puissance maximale produite par les panneaux solaires.



Figure I.23 : régulateur de charge

I.12.3. Batteries d'accumulation :

Dans un système photovoltaïque, la ressource solaire ne pouvant être disponible à tout moment, il est indispensable de stocker de manière journalière ou saisonnière de l'énergie électrique produite par les panneaux solaires. On utilise pour cela des batteries d'accumulateurs. Les batteries les plus courantes sont de type Plomb-acide a plaque plane pour les installations de faible puissance .Il existe aussi des accumulateurs de type nickel-cadmium qui sont chères et qui posent des problèmes de régulation de tension.

La batterie est constituée essentiellement des deux électrodes l'une positive et l'autre négative et une solution électrolytique : solution d'acide sulfurique de viscosité variable. Les batteries sont connectées au régulateur électronique car elles sont chargées à travers le régulateur et elles alimentent les charges par biais du même régulateur. Nous pouvons associer plusieurs batteries en série pour obtenir une tension adaptée à l'utilisation et on les associe en parallèle pour avoir la capacité et la puissance nécessaire à l'autonomie désirée. Les tensions des batteries seront déterminées par rapport à celle aux récepteurs à courant continu et la tension des modules.

I.12.4. Onduleur de tension :

La tension produite par les modules photovoltaïques est continue et celle fournie par les batteries pour l'alimentation des charges est aussi de nature continue. Dans ces conditions, il faudra intégrer obligatoirement un onduleur au système PV destiné à alimenter des charges alternatives. L'onduleur est un convertisseur DC/AC, c'est-à-dire convertir la sortie continue (DC) du champ de module ou des batteries en électricité alternative(AC) standards comme celle fournie par SONELGAZ.

• Caractéristiques des onduleurs

- ❖ Onduleurs légers (de basse puissance), ils fournissent en sortie une puissance de 100 à 10000.
- ❖ Onduleurs de résistance moyenne, ils fournissent une puissance allant de 500 à 20000W
- ❖ Onduleurs robustes (de grande puissance), Ils fournissent une puissance électrique allant de 10000 à 60000W.



Figure I. 24 : Onduleur de 1000W

I.12.5. Contrôleur DC/DC :

Il peut arriver que dans un système PV, la tension de sortie du champ ou de la batterie soit inférieure ou supérieure à celle de l'utilisation, qui doit être alimenté en continu. Il est donc nécessaire pour ces système, un convertisseur DC-DC transforme une tension continue de son entrée en une tension de sortie continue inférieure ou supérieure à celle de l'entrée selon qu'il soit abaisseur ou élévateur. Il permet de contrôler le signal d'alimentation de la charge et le stabilise. Les câbles relient électriquement tous les composants du système PV [10]. Le câblage est un point critique de toute installation PV. Il est très important de bien dimensionner les conducteurs afin d'éviter la circulation d'un courant très fort dans les câbles même pour de petites puissances dans le cas d'utilisation de faibles tensions. Le choix des câbles dont l'enveloppe est adaptée aux conditions d'utilisation est nécessaire.

I.13. Les avantages et les inconvénients d'une installation photovoltaïque :

a) Les avantages :

- ❖ Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement.
- ❖ Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes.
- ❖ Combinable avec d'autres sources d'énergie pour augmenter le rendement du système.
- ❖ La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- ❖ Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- ❖ Sur les sites isolés, l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'énergie électrique à moindre coût.

b) Les inconvénients:

- ❖ La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- ❖ Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15%. l'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue, donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
- ❖ Le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, par conséquent le coût du système photovoltaïque augmente.
- ❖ Les panneaux contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage [6] n'est pas encore existante.
- ❖ Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

I.14 Conclusion :

L'énergie solaire est donc transformée en électricité grâce à l'effet photovoltaïque, qui consiste à créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule en libérant des électrons sous l'action des photons.

Puisque la demande d'énergie dans les applications ne coïncide pas toujours avec sa production, il est donc nécessaire d'avoir un élément de stockage pour stocker l'énergie produite. Par conséquent le stockage d'énergie fera l'objectif du deuxième chapitre.

Chapitre II :

Stockage de l'énergie solaire

II.1 Introduction :

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Par extension, l'expression désigne également le stockage de matière contenant l'énergie.

Le stockage d'énergie devient un élément clé dans la réalisation des objectifs de durabilité énergétique qui conduisent à des économies d'énergie et de coûts telles que le stockage électrique (condensateur, super condensateurs (SC), systèmes de stockage d'énergie magnétique supraconducteurs (SMES)), le stockage d'énergie par volant d'inertie, stockage d'énergie dans l'air comprimé, stockage électrochimique (batterie, hydrogène), la comparaison et les barrières au déploiement des techniques sont également données afin de mieux appréhender la technique de stockage de l'énergie.

Ce chapitre est consacré aux systèmes de stockage d'énergie mécanique, électrochimiques et les systèmes de stockage d'énergie électrique, définis en termes de principe de fonctionnement, de caractéristiques, d'applications et de comparaison à la fin.

II.2 Le stockage d'énergie Solaire :

Le stockage fait référence aux technologies qui peuvent capter l'électricité, la stocker comme une autre forme d'énergie (chimique, thermique, mécanique), puis la libérer pour l'utiliser en cas de besoin. Bien que l'utilisation du stockage d'énergie ne soit jamais efficace à 100 % une partie de l'énergie est toujours perdue lors de la conversion de l'énergie et de sa récupération.

Le stockage permet l'utilisation flexible de l'énergie à des moments différents de ceux où elle a été produite. Ainsi, le stockage peut augmenter l'efficacité et la résilience du système, et il peut améliorer la qualité de l'alimentation en faisant correspondre l'offre et la demande.

Les installations de stockage diffèrent à la fois par la capacité énergétique, qui est la quantité totale d'énergie qui peut être stockée (habituellement en kilowattheures ou en mégawattheures), et la capacité d'énergie, qui est la quantité d'énergie qui peut être libérée à un moment donné (habituellement en kilowatts ou en mégawatts). Différentes capacités de stockage d'énergie et d'alimentation peuvent être utilisées pour gérer différentes tâches. Un stockage à court terme qui ne dure que quelques minutes garantira le bon fonctionnement d'une centrale solaire pendant les fluctuations de sortie dues aux nuages qui passent, tandis que le stockage à plus long terme peut

aider à fournir un approvisionnement pendant des jours ou des semaines lorsque la production d'énergie solaire est faible ou lors d'un événement météorologique majeur.

II.2.1 Les Avantages de stockage de l'énergie solaire :

- **Équilibrer les charges d'électricité** : Sans stockage, l'électricité doit être produite et consommée en même temps, ce qui peut signifier que les gestionnaires de réseau prennent une partie de la production hors ligne, ou la réduisent, pour éviter les problèmes de surgénérations et de fiabilité du réseau. Inversement, il peut y avoir d'autres moments, après le coucher du soleil ou par temps nuageux, où il y a peu de production solaire mais beaucoup de demande d'énergie. Entrez dans le stockage, qui peut être rempli ou chargé lorsque la production est élevée et que la consommation d'énergie est faible, puis distribué lorsque la charge ou la demande est élevée. Lorsqu'une partie de l'électricité produite par le soleil est mise en stockage, cette électricité peut être utilisée chaque fois que les gestionnaires de réseau en ont besoin, y compris après le coucher du soleil. De cette façon, le stockage agit comme une police d'assurance pour l'ensoleillement.
- **Raffermissement de la production solaire** : Le stockage à court terme peut garantir que les changements rapides de production n'affectent pas grandement la production d'une centrale solaire. Par exemple, une petite batterie peut être utilisée pour traverser une brève interruption de génération à partir d'un nuage qui passe, aidant le réseau à maintenir une alimentation électrique fiable et cohérente.
- **Fournir une résilience** : L'énergie solaire et le stockage peuvent fournir une alimentation de secours lors d'une interruption électrique. Ils peuvent maintenir les installations essentielles en activité pour assurer la continuité des services essentiels, comme les communications. L'énergie solaire et le stockage peuvent également être utilisés pour des micros réseaux et des applications à plus petite échelle, comme des unités de puissance mobiles ou portables.

II.2.2 Le système de stockage de l'énergie :

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. L'opération de stockage d'énergie est toujours associée à l'opération inverse consistant à récupérer l'énergie stockée (le déstockage).

Le stockage de l'énergie électrique passe le plus souvent par une forme d'énergie intermédiaire (gravitaire, de compression, chimique, cinétique, thermique...) que l'on accumule, puis transforme à nouveau en électricité [12]. Seule l'énergie électrostatique avec les condensateurs ou super-condensateurs et l'énergie électrodynamique avec le stockage magnétique supraconducteur, font quelque peu exception en stockant des charges électriques statiques ou en mouvement, ils représentent un stockage direct de l'énergie électrique.

II.3 Dispositifs de stockage :

Le stockage de l'énergie électrique est une opération qui consiste à placer une certaine quantité d'énergie dans un lieu donné pour en disposer lorsque la production sera interrompue ou insuffisante. Les techniques utilisées pour le stockage de l'énergie sont très nombreuses [13]. Selon la nature du stockage, on peut distinguer le stockage direct et le stockage indirect comme indiqué sur la figure (II.1)

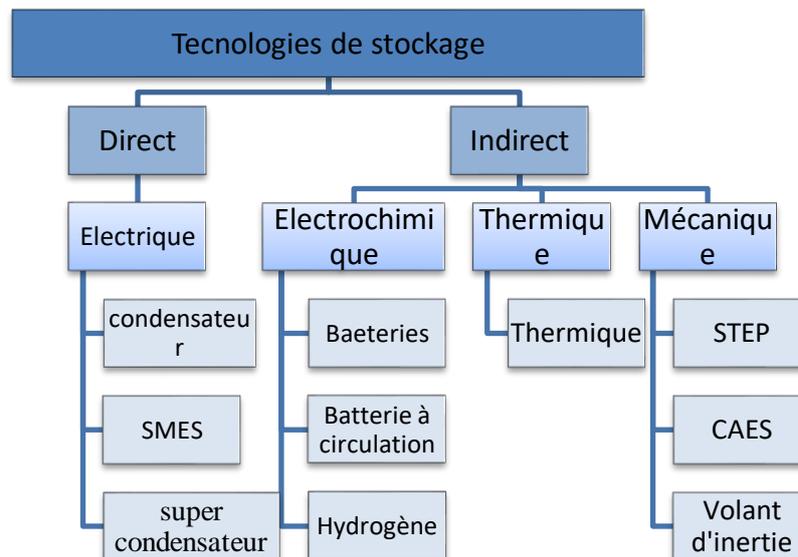


Figure II.1 : Schéma descriptif de type d'un Dispositifs du stockage

II.3.1 Stockage direct :

Ce sont des techniques qui permettent de stocker directement l'énergie sous forme électrique. Il s'agit : des condensateurs, des super-condensateurs et des inductances supraconductrices [14]. Ces techniques de stockage sont considérées comme des sources de puissance à cause de leur grande puissance spécifique et de leur faible densité.

a. Condensateur

Les condensateurs sont des composants de stockage électrostatique, direct, considérés comme une source de puissance dans une certaine mesure [15], compte tenu de leur grande puissance spécifique et leur densité d'énergie relativement faible.

➤ Principe de fonctionnement

Un condensateur se compose de deux électrodes, d'un isolant diélectrique entre les deux électrodes et de deux éléments de connexion pour permettre la liaison électrique du composant [16]. Un condensateur permet d'emmagasiner transitoirement une charge électrique entre les deux électrodes séparées par un isolant électrique.

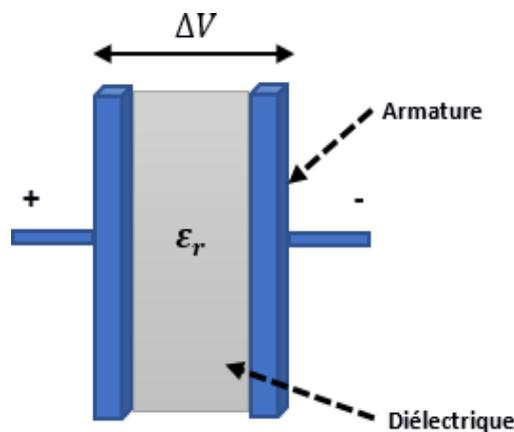


Figure II.2 : Structure d'un condensateur [14]

On distingue plusieurs familles de condensateurs suivant la nature de l'isolant et des électrodes :

- ❖ condensateur céramique
- ❖ condensateur électrochimique ou électrolytique
- ❖ condensateur à film plastique

- **Grandeurs caractéristiques :**

Chapitre II : Stockage d'énergie Solaire

Les grandeurs caractéristiques d'un condensateur sont relatives aux performances électriques du composant. On retrouve généralement ces caractéristiques dans les fiches des constructeurs.

La charge d'un condensateur est donnée par la relation suivante :

$$Q_c = \int I \cdot dt \quad (\text{II.1})$$

Avec :

Q_c : charge du condensateur [C]

I : intensité dans le condensateur [A]

t : temps [s]

La capacité d'un condensateur est donnée par la relation suivante :

$$C_c = Q_c / U \quad (\text{II.2})$$

Avec :

C_c : capacité du condensateur [F]

Q_c : charge du condensateur [C]

U : tension aux bornes du condensateur [V]

La capacité est également fonction de la structure du condensateur (condensateur plan, cylindrique, sphérique,...). En effet, la capacité dépend de l'épaisseur (distance entre les deux électrodes) et de la nature (permittivité) de l'isolant et de la géométrie des électrodes. Pour un condensateur plan, la capacité s'exprime comme suit :

$$C_c = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S / e \quad (\text{II.3})$$

Avec :

C_c : capacité du condensateur [F]

ϵ_0 : permittivité du vide 2 [F.m⁻¹]

ϵ_r : permittivité relative du diélectrique ou constante diélectrique

S : surface en regard des électrodes [m²]

e : épaisseur de l'isolant [m]

L'énergie stockée dans un condensateur est proportionnelle à sa capacité, suivant la relation :

$$W_c = \frac{1}{2} C_c U^2 \quad (\text{II.4})$$

Avec :

W_c : énergie stockée dans le condensateur [J]

C_c : capacité du condensateur [F]

U : tension aux bornes du condensateur [V]

➤ Propriétés

Les propriétés d'un condensateur sont :

- ❖ Une capacité de stockage très faible
- ❖ Une tenue en tension jusqu'à $300\text{V}\mu\text{m}^{-1}$ pour les condensateurs films
- ❖ Une densité énergétique volumique de l'ordre de $0,1$ à $0,2\text{Wh.L}^{-1}$ pour les condensateurs utilisés en électronique de puissance
- ❖ Une constante de temps très faible : la décharge d'un condensateur s'effectue en quelques fractions de millisecondes

➤ Applications

Le stockage de l'énergie est une des applications des condensateurs. Pour le stockage, les condensateurs électrochimiques et films sont privilégiés par rapport aux condensateurs céramiques [16]. Les autres applications de condensateurs sont : accord de circuits oscillants, résonateurs, découplage, liaison, filtrage ou encore compensation en température.

Les domaines d'application des condensateurs sont ceux de l'électronique : télécommunications, informatique, automobile, spatial, ... Leur application en grande quantité et depuis un grand nombre d'années fait que leur coût est relativement faible, que les technologies sont éprouvées et que le retour d'expérience est important.

b. Super condensateur

Les super condensateurs sont des moyens de stockage direct, électrostatique considérés comme des sources de puissance de par leur grande densité de puissance.

Un super condensateur est formé de deux collecteurs métalliques généralement en aluminium [13], de deux électrodes conductrices électroniques à très haute surface spécifique plongées dans un électrolyte et d'une membrane de séparation poreuse (Figure II.3).

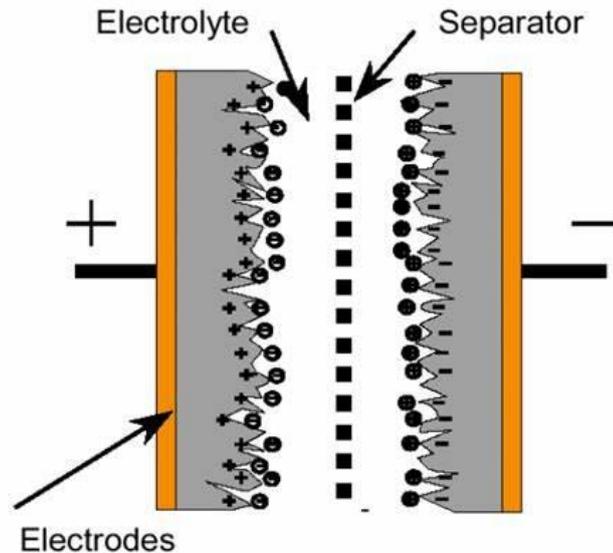


Figure II.3 : Structure d'un super condensateur

➤ **Principe de fonctionnement :**

Le fonctionnement d'un super condensateur est basé sur le stockage de l'énergie par distribution des ions provenant de l'électrolyte au voisinage de la surface des deux électrodes. En effet, lorsque l'on applique une tension aux bornes d'un super condensateur, on crée une zone de charge d'espace aux deux interfaces électrode-électrolyte. C'est ce que l'on appelle la double couche électrique. Ainsi, dans le super condensateur, l'énergie est stockée sous forme électrostatique.

➤ **Propriétés et applications :**

Les super condensateurs ont une durée de vie de l'ordre de 8 à 10 ans, un rendement de l'ordre de 95%, une autodécharge de l'ordre de 5% par jour et une capacité pouvant atteindre 5000 F [14]. Ils sont très souvent utilisés dans le domaine du transport où sa technologie satisfait généralement aux fonctions de démarrage. Aussi, ils sont utilisés comme alimentation de secours de mémoires en informatique et de récupération d'énergie de freinage (ascenseurs, tramways, métros...).

c. Inductances supraconductrices:

Les bobines supraconductrices (ou SMES : Superconducting Magnetic Energy Storage) sont des éléments de stockage magnétique, direct, considérés comme des sources de puissance très élevée. Le stockage d'énergie magnétique est un des rares moyens de stocker directement l'électricité. L'utilisation d'éléments supraconducteurs SMES est nécessaire pour ce type de stockage.

Une station de stockage électromagnétique se compose principalement d'enroulements supraconducteurs appelés bobines supraconductrices connectées à un générateur par des transformateurs et des convertisseurs alternatif-continu à thyristors (Figure II.4)

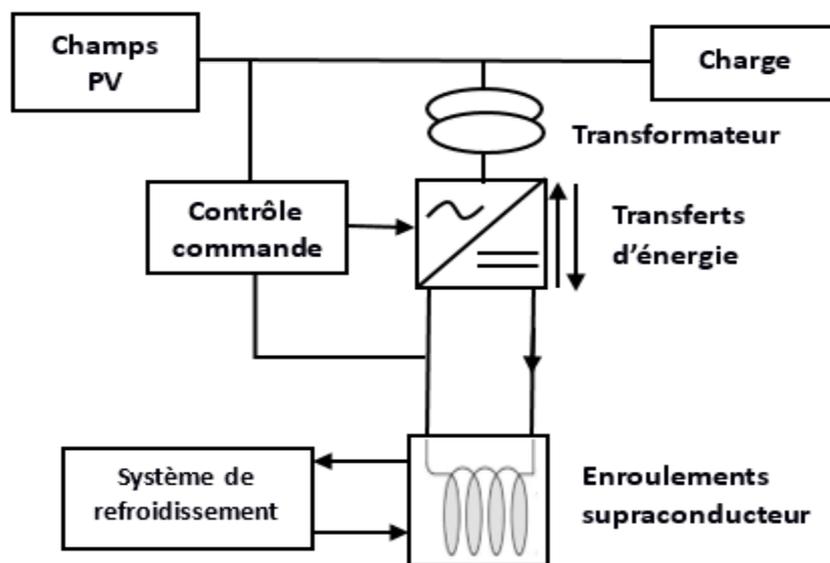


Figure II.4 : Principaux éléments d'un dispositif de stockage d'énergie sous forme magnétique par bobine supraconductrice

➤ Principe de fonctionnement:

Le stockage d'énergie dans une inductance supraconductrice est fait sous forme de champ magnétique, lorsqu'on fait passer un courant électrique continu dans une bobine supraconductrice court-circuitée. Le courant circule sans perte par effet Joule dans la bobine supraconductrice et stocke ainsi une certaine quantité d'énergie pour une durée théoriquement infinie. La bobine est réalisée en matériau supraconducteur (matériau à très basses températures proches du zéro absolu 4,2 K) dans le but que l'énergie stockée ne soit pas dissipée par effet joule. La résistance ohmique du supraconducteur étant nulle, les seules pertes sont dues aux résistances de contacts et à la puissance nécessaire pour maintenir la bobine froide (environ - 269,5 °C). Pour récupérer l'énergie stockée, il suffit d'ouvrir le circuit et de le brancher sur un

récepteur électrique à alimenter. L'énergie stockée dans la bobine supraconductrice est transférée en un temps très court (50% en moins d'une seconde).

➤ **Propriétés et applications :**

Avec une très grande puissance, les inductances supraconductrices ont la possibilité de décharge 50% de leur capacité en moins d'une seconde [16]. Ces technologies de stockages sont généralement connectées au réseau pour le stabiliser dynamiquement et transitoirement. D'autres sont utilisées pour le lissage des creux de tension pour les alimentations non interruptibles. Elles trouvent également des applications dans le domaine militaire comme une source impulsionnelle pour des lanceurs électromagnétiques par exemple.

II.3.2 Stockage indirect :

Pour stocker l'énergie de façon significative et l'utiliser sur de longues périodes, il est nécessaire de la transformer d'abord en une autre forme d'énergie intermédiaire et stockable (potentielle, cinétique, chimique ou thermique).

a. Accumulateurs électrochimiques

Les batteries sont les techniques les plus anciennes de stockage de l'énergie électrique. Elles sont considérées comme l'une des meilleures parce qu'elles sont compatibles avec le changement de source d'alimentation et qu'elles nuisent moins à l'environnement [17]. Elles apportent également des avantages opérationnels importants au réseau électrique public, notamment en réagissant rapidement aux changements de charge et en améliorant la stabilité du système.

Les batteries ont un rendement énergétique élevé (60-95%), mais la plupart des batteries contiennent des substances toxiques, rechargeable est la base de la possibilité de stocker de l'énergie électrique dans la batterie, et est la raison de son utilisation dans plusieurs applications, telles que le support de centrales électriques et de sources d'énergies renouvelables et l'amélioration de la qualité de l'énergie. Une batterie est généralement un groupe de cellules électrochimiques similaires, au sein desquelles se produisent des réactions d'oxydation et de réduction transformant l'énergie en énergie électrique ou chimique.

➤ **Principe de fonctionnement**

Une cellule d'accumulateur électrochimique est composée de deux électrodes (conducteurs électroniques) et d'un électrolyte (conducteur ionique et isolant électronique). Les réactions chimiques sont spontanées dans un accumulateur et mettent en jeu deux couples d'oxydoréduction de potentiels différents. Durant la décharge de l'accumulateur, l'électrode positive (cathode) est le siège d'une réaction de réduction du couple de plus haut potentiel et l'électrode négative (anode) est le siège d'une réaction d'oxydation du couple de plus faible potentiel. Durant la charge, le phénomène s'inverse : l'électrode positive (anode) s'oxyde et l'électrode négative (cathode) se réduit. Par convention, on note généralement la réaction chimique d'oxydoréduction dans le sens de la décharge (\rightarrow), la flèche inverse étant le sens de la charge (\leftarrow).

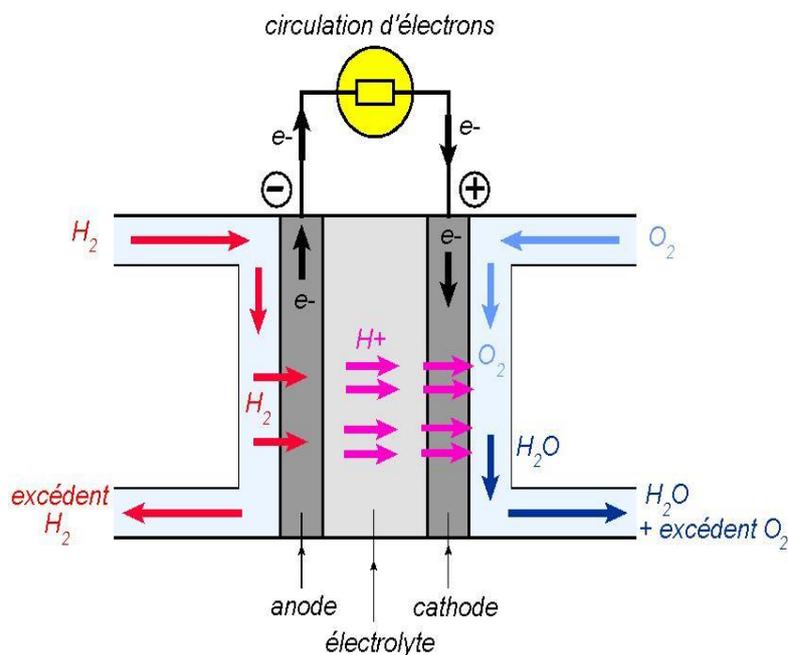


Figure II.5: Schéma de principe de fonctionnement d'un accumulateur électrochimique

a.1 Batterie Plomb-acide (Lead-Acid Battery)

La batterie au plomb a été découverte en 1859, ce sont les batteries rechargeables électrochimiques, les plus anciennes et les plus utilisées.

Dans le cas du chargement, l'un de ses pôles est en plomb, l'autre en oxyde de plomb et l'électrolyte en acide sulfurique [18]. Une fois les batteries déchargées, les électrodes retournent en sulfate de plomb et l'électrolyte se dissout dans l'eau.

Les batteries Plomb-acide sont les plus utilisées pour soutenir le déploiement d'énergie renouvelable, en particulier dans les systèmes d'alimentation autonomes, étant donné qu'elles

sont anti-éclaboussures, faciles à transporter et que leur coût est relativement faible par rapport aux autres types [19]. Cependant, le Plomb-acide conventionnel souffre de divers problèmes techniques :

- faible profondeur de décharge.
- durée de vie limitée.
- charge lente et exigences de maintenance.

a.2 Batterie Nিকেle-cadmium (NiCd)

Les batteries NiCd sont communément connues comme relativement bon marché et robuste. L'électrode positive en nickel est un hydroxyde de nickel /Oxyhydroxyde de nickel ($\text{Ni(OH)}_2 / \text{NiOOH}$), tandis que l'électrode négative en cadmium constituée de cadmium métallique (Cd) et l'hydroxyde de cadmium (Cd(OH)_2).

La batterie au nickel-cadmium a une densité d'énergie élevée (50 à 75 Wh / kg), Haute fiabilité, peu d'entretien. Cependant, la vie de la batterie est petite (2000 - 2500 cycles), et son coût est élevé (environ 1000 \$ / kWh) [17], ses inconvénients sont également difficiles à éliminer quand il est endommagé par la toxicité du cadmium, la batterie a un effet de mémoire, elle ne peut pas être complètement chargée seulement après Complètement déchargé plusieurs fois consécutives.

La batterie au cadmium et au nickel est connue pour sa capacité élevée utilisée dans les plus grandes applications de stockage de batteries au monde, à Golden Valley et dans Fire Banks en Alaska, aux États-Unis, où le système comprend quatre batteries contenant chacune 3 440 cellules. Le système produit une tension de 5 200 V, destinée à générer 27 MW toutes les 15 minutes ou 40 MW toutes les 7 minutes, avec une production maximale de 46 MW en raison du commutateur de puissance utilisé [20]. Le système est conçu pour durer 20 ans pour 100 cycles de décharge complets ou 500 cycles incomplets, pour pouvoir alimenter des zones séparées et pour fonctionner en îlots électriques afin de fournir une réserve rotative dans les cas critiques.

a.3 Batterie lithium-ion

Durant la charge, les ions lithium viennent s'insérer dans la structure de l'électrode négative en carbone graphité. Lors de la décharge, l'anode libère ces ions qui viennent se placer dans la structure de la cathode. L'équation électrochimique globale est la suivante : $\text{Li} + \text{MI} \rightarrow \text{LiMI}$ MI le matériau d'insertion (graphite, coke ...) placé à l'électrode positive [12]. Par rapport aux

Chapitre II : Stockage d'énergie Solaire

batteries au plomb, les batteries au lithium-ion n'ont pas besoin de maintenance. Elles ont une durée de vie assez importante et présentent une plus grande résistance aux conditions extérieures. La tension d'un accumulateur lithium-ion varie de 2,5V (état de charge minimum) à 3,7V (état de charge maximum).

Tableau II.1 Comparaison de quelques technologies d'accumulateurs électrochimiques.

Technologies	Densité Energétique (Wh/Kg)	Densité de puissance (W/Kg)	Temps de décharge	Durée de stockage	Autodéc harge (%/mois)	Rendement	Durée de vie (nombre de cycles)	Cout (FCFA/ Kwh)
Plomb-acide (pd-ac)	25-45	80-150	15mn-100h	>1mois	40	60-89	300-1500	32750-311000
Lithium-ion (LI-ion)	80-150	500-2000	45mn-100h	Plusieurs mois	20	90-100	>1500	455800 - 655000
Nickel-cadmium (Ni-Cd)	20-60	100-800	15mn-100h	<1mois	20	60-80	300-1500	131000 - 393000

➤ Les avantages :

L'introduction de l'énergie des cellules électrochimiques pour un usage domestique a fourni de nombreux avantages pour la population, notamment l'augmentation du développement de la miniaturisation et de la mobilité. Un tel exemple de cette technologie est la cellule de batterie utilisée dans de nombreux appareils qui sont utiles dans la vie quotidienne.

- Matériaux peu coûteux et non toxiques.
- C'est une source d'énergie abondante.
- Il produit des carburants à indice d'octane élevé qui fournissent une quantité substantielle d'énergie.
- Il brûlera facilement.
- Il brûlera efficacement.
- C'est la source d'énergie la plus facile et la plus efficace à stocker et à utiliser.

➤ Les inconvénients :

- Ne peut pas être recyclé, peut fuir (l'électrolyte acide faible réagit avec le zinc), courte durée de conservation, tension et courant instables (lorsque la batterie « s'épuise ») et faible puissance.
- ont qu'ils doivent être propres et exempts de saleté et d'autres matériaux étrangers, sinon la précision en sera affectée. Il existe également une plage étroite de températures de fonctionnement.

b. Stockage virtuel :

L'énergie peut également être stockée en modifiant la façon dont nous utilisons les appareils que nous avons déjà. Par exemple, en chauffant ou en refroidissant un bâtiment avant un pic prévu de demande électrique, le bâtiment peut stocker cette énergie thermique afin qu'il n'ait pas besoin de consommer de l'électricité plus tard dans la journée. Le bâtiment lui-même agit comme un thermos en stockant de l'air frais ou chaud. Un processus similaire peut être appliqué aux chauffe-eau pour répartir la demande sur la journée.

En fin de compte, les clients solaires résidentiels et commerciaux, ainsi que les services publics et les opérateurs solaires à grande échelle, peuvent bénéficier de systèmes solaires plus stockage. Au fur et à mesure que la recherche se poursuit et que les coûts de l'énergie solaire et du stockage diminuent, les solutions solaires et de stockage deviendront plus accessibles à tous les Américains.

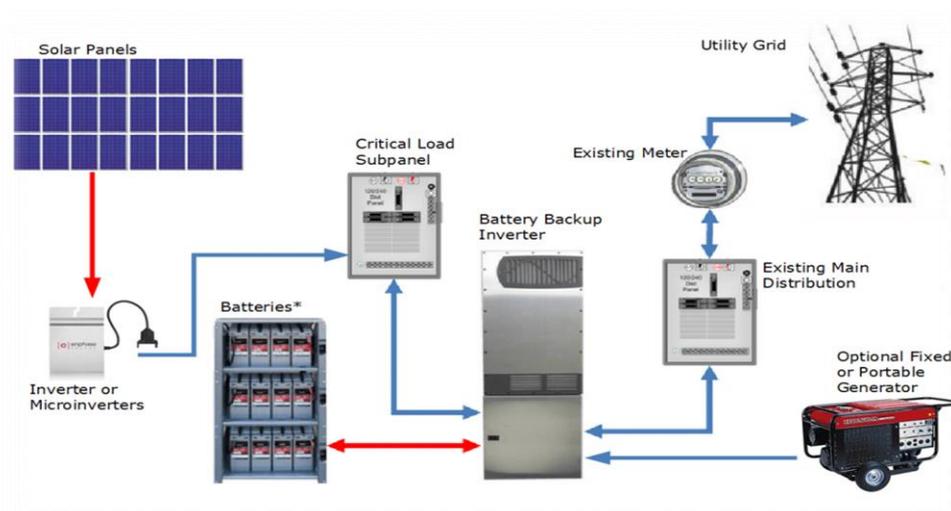


Figure II.6: schéma de principe de stockage Virtual.

➤ Le principe du stockage virtuel de l'énergie solaire :

Le processus de stockage de l'énergie solaire est assez simple à comprendre. Lorsque vous consommez votre propre énergie via l'utilisation de panneaux solaires, il est fortement possible qu'il y ait des périodes où vous produisez plus que nécessaire. En d'autres termes, vous produisez davantage d'énergie que vous n'en dépensez. Dans ce cas, il est possible d'exploiter le surplus d'énergie produite pour ne pas la gâcher et faire des économies. Deux solutions s'offrent alors à vous :

- **Vendre cette énergie à EDF** : qui pourra ensuite la réinjecter sur le réseau. Cela peut être plus ou moins intéressant selon le prix au kWh qui est proposé. Il faut cependant savoir que ce tarif est susceptible d'évoluer et donc de devenir plus ou moins rentable pour vous au fil des années.
- **Stocker votre énergie sur une batterie physique** : afin de l'exploiter par la suite. L'avantage est que vous gagnerez en autonomie puisque vous pourrez puiser dans votre réserve d'énergie lors des périodes creuses. En revanche, le coût de ce type de batterie est souvent élevé, ce qui est le principal frein à l'achat pour les particuliers intéressés.

➤ Les bénéfices du stockage virtuel :

- Vous devenez plus autonome dans votre consommation d'énergie : comme avec une batterie physique, vous pourrez stocker le surplus d'énergie produit pour pouvoir l'exploiter comme bon vous semble.
- Il n'y a pas de limite de stockage : il sera tout à fait possible de stocker l'intégralité de votre énergie solaire sans pertes inutiles.
- Il n'y a pas de limite dans le temps : dans la plupart des cas, les entreprises qui proposent une offre de stockage virtuel n'imposent pas de limites concernant le délai pour consommer l'énergie stockée. Vous serez donc totalement libre d'utiliser cette énergie à tout moment.
- Vous faites des économies d'argent : le fait de devenir plus autonome dans votre consommation d'énergie vous permettra d'être encore moins dépendant de votre fournisseur d'énergie. Ce qui se fera sans aucun doute ressentir sur vos factures.
- Il n'y a aucune contrainte technique : l'entreprise qui vous fournira un service de stockage virtuel s'occupera de tout à votre place pour ce qui est de comptabiliser votre surplus d'énergie. Il n'y aura pas non plus de modification à faire au niveau de votre installation photovoltaïque.

➤ **Les Inconvénient :**

- Il vous oblige à traiter avec plusieurs fournisseurs :

D'un point de vue technologique, le stockage a toujours été un marché défavorable au risque. Les gens ne veulent pas prendre de risques avec les informations qu'ils doivent stocker. Cela signifie qu'ils ne veulent pas que les données soient perdues. Cela a conduit à des systèmes de stockage complets développés par les fournisseurs pour aider les gens à répondre à leurs besoins de stockage. Avec la virtualisation du stockage, la plupart des consommateurs achètent leurs logiciels auprès d'un fournisseur et leurs besoins de stockage auprès d'un autre. Si un problème se produit, vous devez résoudre les problèmes avec les deux organisations au lieu d'une seule.

- Il n'est pas toujours à l'échelle de certaines zones :

La virtualisation du stockage évolue généralement comme il se doit, mais elle comporte un risque que ce ne soit pas le cas. Dans certains domaines, il peut ne pas évoluer correctement, comme offrir le nombre de disques virtuels qui ont été alloués au système. Il y a des limites strictes en place avec cette technologie, donc à mesure que vous continuez à croître et à ajouter plus de serveurs, vous constaterez peut-être que vous commencerez à manquer de salle de stockage. Même avec des solutions de contournement en place, vous rencontrerez des problèmes similaires aux limites de stockage physique, avec suffisamment de temps.

- Il a encore des limites qui doivent être prises en compte :

Différentes applications et serveurs répondront de manière unique dans un environnement de virtualisation du stockage. Dans certaines situations, une plate-forme logicielle hybride peut être nécessaire pour que les systèmes de stockage fonctionnent correctement. Au fil du temps, à mesure que les systèmes commencent à vieillir, des mises à niveau seront nécessaires pour maintenir l'intégrité du système. Si vous travaillez avec un système tiers, vous courez également le risque que le fournisseur cesse de prendre en charge le système après y avoir souscrit.

- Il n'élimine pas les risques de sécurité des données :

Le Ponemon Institute rapporte que le coût d'une violation de données aux États-Unis est de plus de 3,6 millions de dollars. Lorsque vous utilisez la virtualisation du stockage, vous êtes confronté à un risque de 25 % d'avoir une violation de données à un moment donné au cours de la durée de vie du système. Les voleurs savent que les informations que vous stockez sont précieuses. Ils vont cibler ce système, et parce qu'il y a deux points d'accès, ils ont une autre façon possible de

réussir. Vous devez protéger vos logiciels et vos composants matériels, en particulier avec les nouvelles règles de confidentialité en Europe, et ces coûts pourraient être excessifs pour certaines entreprises.

- Cela peut créer des problèmes de disponibilité :

Même si vous créez des ressources sur site pour la virtualisation du stockage, il existe un risque que vous ne puissiez pas accéder à ces informations. Les connexions LAN peuvent être interrompues. Les connexions cloud peuvent être perturbées. Si vous n'avez pas accès à Internet pour une raison quelconque, vous ne pourrez peut-être accéder à aucune de vos données. Bien qu'il y ait moins de problèmes de temps d'arrêt lors de l'utilisation de cette technologie, une disponibilité promue de 99.999% signifie toujours que vous perdrez l'accès à vos données pendant plusieurs heures tout au long de l'année. Le coût de ce temps d'arrêt doit être ajouté aux investissements réalisés dans ce type de système.

- Il crée plus de liens pour l'accès aux données au lieu de moins :

Utilisez l'appareil sur lequel vous lisez ce contenu à titre d'exemple. Si vous enregistrez quelque chose, il ira au stockage local - comme un disque dur, un disque SSD ou une carte SIM. C'est un maillon de la chaîne de stockage. Avec la virtualisation du stockage, vous pouvez avoir plusieurs liens qui doivent fonctionner ensemble pour terminer le même processus. De votre FAI à votre nœud logiciel en passant par le processus de stockage réel, vous avez maintenant 3 liens au lieu d'un. Ajoutez des fichiers stockés dans plusieurs emplacements, et vous pourriez avoir beaucoup plus de liens à craindre.

c. Stockage sous forme d'hydrogène :

Le stockage par la filière hydrogène nécessite une transformation de l'énergie électrique en dihydrogène (H₂) puis une deuxième transformation du dihydrogène en électricité.

➤ Principe de fonctionnement

L'excès de l'énergie produit par le système PV est utilisé par un électrolyseur (passage d'un courant continu à travers deux électrodes immergées dans un électrolyte liquide ou solide) pour décomposer l'eau en oxygène et en hydrogène suivant l'équation : $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$.

L'hydrogène ainsi produit est stocké sous forme gazeuse, liquide ou solide. Durant les périodes de fortes consommations, il existe différents moyens pour produire de l'électricité à partir de l'hydrogène stocké:

- Le premier consiste à alimenter une pile à combustible qui utilise l'hydrogène et l'oxygène comme couple électrochimique ;
- Le deuxième consiste à synthétiser du gaz naturel selon un procédé de la méthanisation qui consiste à utiliser l'hydrogène produit par l'électrolyseur pour produire du méthane. Le méthane ainsi obtenu peut certes être injecté directement dans le réseau de gaz ou être utilisé pour alimenter une centrale à gaz « classique », produisant de l'électricité ;
- Le troisième consiste à utiliser l'hydrogène directement dans une centrale à gaz spécialement conçue à cet effet, afin de produire de l'électricité. Le principe de restitution de l'énergie à partir de l'hydrogène stocké est résumé sur la Figure (II.7).

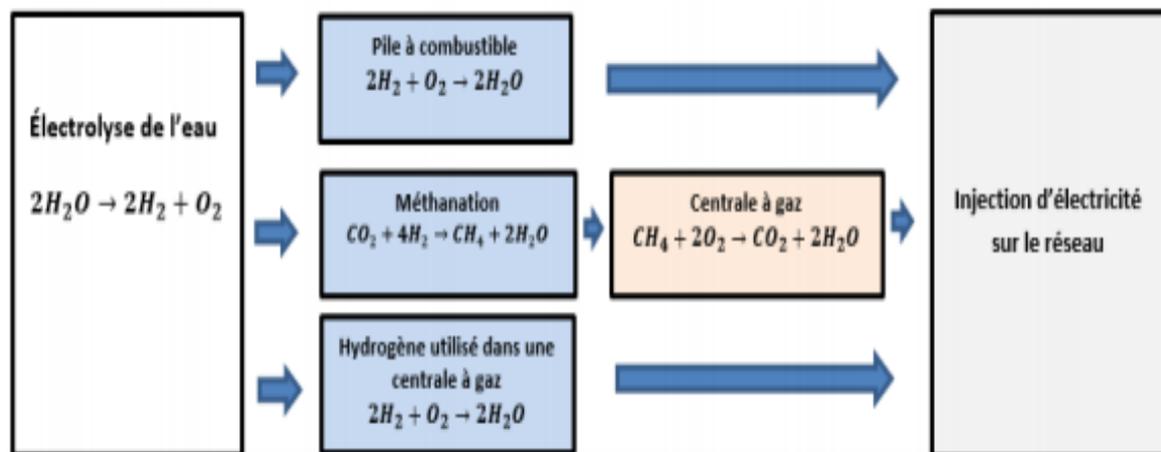


Figure II.7 : Différentes possibilités de restitution de l'électricité à partir de l'hydrogène stocké.

➤ Propriétés et applications

L'hydrogène obtenu peut être stocké sur de longues périodes. Toutefois, son efficacité énergétique est faible [21]. Au-delà de ses applications comme carburant, l'hydrogène, vecteur énergétique, pourrait constituer une source d'électricité pour les milieux isolés où il est difficile voire coûteux, d'installer des lignes électriques. Il existe peu d'installations de stockage d'énergie sous forme hydrogène. Actuellement, la plus grande installation est celle en Norvège.

a) Avantages de l'énergie hydrogène

➤ C'est une source d'énergie renouvelable et abondante dans l'approvisionnement :

L'hydrogène est une source d'énergie riche pour de nombreuses raisons, la principale étant qu'il est abondant en approvisionnement. Bien qu'il puisse falloir beaucoup de ressources pour

l'exploiter, aucune autre source d'énergie n'est infinie comme l'hydrogène. Cela signifie essentiellement qu'il n'y a aucune possibilité qu'il s'épuise comme d'autres sources d'énergie.

➤ **De nombreuses sources pour produire de l'hydrogène localement :**

L'hydrogène peut être produit soit sur place où il sera utilisé, soit de manière centralisée puis distribuée. L'hydrogène gazeux peut être produit à partir de méthane, d'essence, de biomasse, de charbon ou d'eau. Les facteurs tels que les quantités de pollution, les défis techniques et les besoins en énergie varient en fonction des sources utilisées.

➤ **C'est pratiquement une source d'énergie propre :**

Lorsque l'hydrogène est brûlé pour produire du carburant, les sous-produits sont totalement sûrs, ce qui signifie qu'ils n'ont pas d'effets secondaires connus. Les entreprises aéronautiques utilisent en fait l'hydrogène comme source d'eau potable. Une fois que l'hydrogène est utilisé, il est normalement converti en eau potable pour les astronautes à bord de navires ou de stations spatiales.

➤ **L'énergie hydrogène n'est pas toxique :**

C'est une substance non toxique qui est rare pour une source de carburant. Cela signifie qu'il est respectueux de l'environnement et ne cause aucun dommage ou destruction à la santé humaine. Cet aspect le rend préféré par rapport à d'autres sources de combustible comme l'énergie nucléaire.

➤ **L'utilisation de l'hydrogène réduit considérablement la pollution :**

Lorsque l'hydrogène est combiné avec de l'oxygène dans une pile à combustible, de l'électricité est produite, qui peut être utilisée pour alimenter des véhicules ou entraîner un moteur électrique comme source de chaleur et pour de nombreuses autres utilisations. Lorsqu'il se combine avec l'oxygène, les seuls sous-produits sont l'eau et la chaleur, ce qui est l'avantage d'utiliser l'hydrogène comme vecteur d'énergie.

b) Inconvénients de l'énergie hydrogène :

Bien que l'énergie hydrogène présente de nombreux avantages admirables, ce n'est pas vraiment la source d'énergie carrément préférable, propre et bon marché pour la plupart des gouvernements et des entreprises. À l'état gazeux, c'est assez volatil. Bien que sa volatilité lui donne un avantage sur les autres sources d'énergie en termes d'accomplissement de nombreuses

tâches, il le rend également risqué à utiliser et à contourner. Certains des inconvénients de l'énergie hydrogène comprennent:

➤ **L'énergie hydrogène coûte cher :**

L'électrolyse et le reformage à la vapeur, les deux principaux procédés d'extraction de l'hydrogène, sont extrêmement coûteux. C'est la vraie raison pour laquelle il n'est pas fortement utilisé dans le monde entier. Aujourd'hui, l'énergie hydrogène est principalement utilisée pour alimenter la plupart des véhicules hybrides.

➤ **Complications de stockage :**

L'une des propriétés de l'hydrogène est qu'il a une densité plus faible. En fait, il est beaucoup moins dense que l'essence. Cela signifie qu'il doit être comprimé à l'état liquide et stocké de la même manière à des températures plus basses pour garantir son efficacité et son efficacité en tant que source d'énergie.

Cette raison explique également pourquoi l'hydrogène doit en tout temps être stocké et transporté sous haute pression, ce qui explique pourquoi le transport et l'utilisation courante sont loin d'être réalisables.

➤ **Ce n'est pas la source d'énergie la plus sûre :**

La puissance de l'hydrogène ne doit pas être sous-estimée du tout. Bien que l'essence soit un peu plus dangereuse que l'hydrogène, l'hydrogène est une substance hautement inflammable et volatile qui fait souvent les manchettes pour ses dangers potentiels. Comparé au gaz, l'hydrogène manque d'odeur, ce qui rend toute détection de fuite presque impossible. Pour détecter les fuites, il faut installer des capteurs.

d. Stockage de l'air comprimé :

Les systèmes de stockage d'air comprimé sont constitués de grands navires, comme des réservoirs, ou de formations naturelles, comme des grottes. Un système de compresseur pompe les récipients pleins d'air sous pression. Ensuite, l'air peut être libéré et utilisé pour entraîner une turbine qui produit de l'électricité. Les systèmes de stockage d'énergie à air comprimé existants utilisent souvent l'air libéré dans le cadre d'un cycle d'alimentation au gaz naturel pour produire de l'électricité.

➤ Principe de fonctionnement

L'énergie produite par une centrale photovoltaïque peut d'une part être injectée dans le réseau et d'autre part être utilisée pour comprimer (grâce à un turbocompresseur) l'air ambiant à haute pression (100 à 300 bars) pendant les périodes de faibles consommations. L'air est ensuite stocké à une pression moyenne de 40 à 70 bars et à une température proche de l'ambiante. Pour récupérer l'énergie stockée, l'air comprimé est dirigé vers une machine semblable à une turbine à gaz. Dans laquelle, il est chauffé grâce à un apport d'énergie venant de l'extérieur ; ce qui augmente sa pression. Puis, il est détendu dans une turbine. La turbine a pour rôle de convertir l'énergie cinétique issue de la combustion de l'air en travail mécanique. L'énergie mécanique obtenue est ensuite convertie en énergie électrique grâce à un alternateur.

Le principe de fonctionnement est résumé dans la Figure (II.8) [22]. La chaleur résiduelle de la compression peut être récupérée et utilisée pour chauffer l'air (stockage adiabatique).

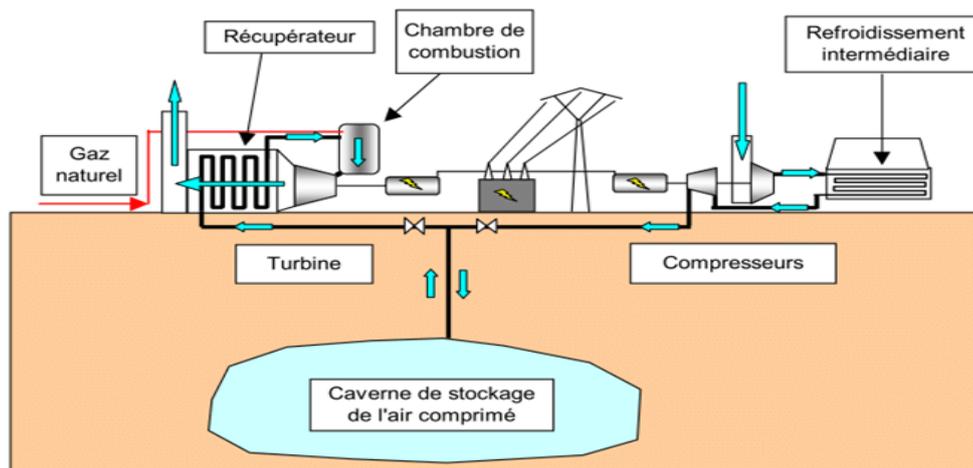


Figure II.8 : Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé

a) Les avantages du stockage de l'air comprimé :

La pneumatique fait face à une concurrence croissante des appareils mécaniques, hydrauliques et électriques sur tous les fronts. Mais les dispositifs pneumatiques présentent des avantages fondamentaux par rapport aux autres technologies:

➤ Facilement stocké :

Il est facile de stocker de l'air comprimé dans des réservoirs spécialement conçus. S'il y a un réservoir de stockage intégré dans un réseau pneumatique, le compresseur n'a besoin de fonctionner que lorsque la pression tombe en dessous d'un niveau critique. ET parce qu'il y a

toujours un coussin de pression, un cycle de travail peut être terminé même si le réseau d'alimentation tombe panne.

Les bouteilles d'air comprimé transportables peuvent également être utilisées à des endroits où il n'y a pas de système de canalisations (par exemple sous l'eau)

➤ **Sûr à utiliser :**

L'air comprimé fonctionne parfaitement même lorsqu'il y a de grandes fluctuations de température et que les températures sont extrêmes. Il peut également être utilisé lorsqu'il y a des températures très élevées, par exemple pour faire fonctionner des presses à forges et des portes de haut fourneau. Les dispositifs pneumatiques et les conduites qui ne sont pas étanches ne présentent aucun risque pour la sécurité et l'état de service du système. Les systèmes pneumatiques et les composants en général s'usent très peu. Ils ont donc une longue durée de vie professionnelle et un faible taux d'échec.

➤ **Résistance aux accidents :**

Les éléments pneumatiques sont très sûrs en ce qui concerne les risques d'incendie, d'explosion et électriques. Même dans les zones où il existe un risque d'incendie, d'explosion et de conditions météorologiques extrêmes, les éléments pneumatiques peuvent être utilisés sans appareil de sécurité volumineux et coûteux. Dans les pièces humides ou à l'extérieur aussi, il n'y a pas de danger avec l'équipement pneumatique.

b) Les inconvénients du stockage de l'air comprimé :

L'air comprimé n'est pas nécessairement bon marché. Les plus grandes dépenses entraînées par l'utilisation de l'air comprimé proviennent du mauvais entretien des compresseurs, de l'installation inadéquate des circuits de distribution et non -conditionnement- de l'air tout au long de son utilisation.

➤ **Propriétés et applications**

Le stockage à air comprimé permet de stocker de grandes quantités d'énergie de l'ordre de 10 MWh à 10 GWh. Il a une autonomie pouvant atteindre plusieurs jours et un rendement d'environ

50% [21]. Sa technologie est relativement mature avec plusieurs réalisations de grandes puissances à travers le monde : en Allemagne (Huntorf 290 MW), aux États unis (Norton 2700 MW). Toutefois, la construction d'un système CAES nécessite de disposer d'une géologie favorable permettant de disposer de grandes cavités souterraines [23].

e. Stockage par volant d'inertie :

Un volant d'inertie est une roue lourde fixée à un arbre rotatif. Dépenser de l'énergie peut faire tourner la roue plus rapidement. Cette énergie peut être extraite en fixant la roue à un générateur électrique, qui utilise l'électromagnétisme pour ralentir la roue et produire de l'électricité. Bien que les volants d'inertie puissent rapidement fournir de l'énergie, ils ne peuvent pas stocker beaucoup d'énergie.

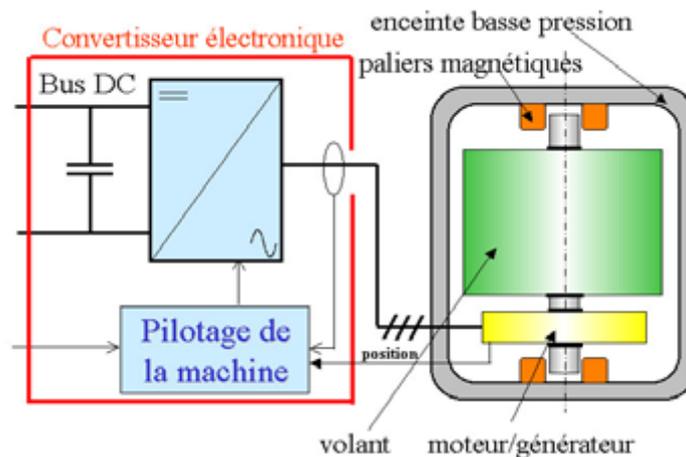


Figure II.9: Principaux composants de stockage du volant d'inertie

➤ Principe de fonctionnement

L'apport d'énergie électrique permet de faire tourner la masse à des vitesses très élevées (entre 8 000 et 16 000 tour/min) en quelques minutes. Une fois lancée, la masse continue de tourner, même si aucun courant ne l'alimente. L'énergie stockée dans le volant d'inertie est donc sous forme d'énergie cinétique. Elle pourra être restituée en utilisant un moteur comme génératrice électrique, entraînant la baisse progressive de la vitesse de rotation du volant d'inertie.

▪ Les avantages et les inconvénients du stockage par volant d'inertie :

a) Les avantages :

- ❖ Un haut rendement puisque 80% de l'énergie absorbée peut être restituée.
- ❖ Une mise en route puis une restitution d'énergie très rapide.
- ❖ Aucune pollution et une durée de vie très longue.
- ❖ Peu de maintenance

b) Les inconvénients :

- ❖ Le temps de stockage limité, autour de 15 minutes. Il faut donc une utilisation très rapide et ponctuelle. Le stockage par inertie est donc surtout utilisé pour la régulation et l'optimisation d'un système, et non pour assurer une longue durée d'autonomie, comme les batteries ou le turbinage hydraulique.
- ❖ Forte autodécharge due aux différentes pertes (mécaniques, magnétiques)
- ❖ Coût d'investissement élevé
- ❖ Potentiels problèmes de sécurité (masse tournante à haute vitesse)

f. Stockage de l'énergie thermique :

Le stockage d'énergie thermique est une famille de technologies dans lesquelles un fluide, tel que l'eau ou le sel fondu, ou un autre matériau est utilisé pour stocker la chaleur. Ce matériau de stockage thermique est ensuite stocké dans un réservoir isolé jusqu'à ce que l'énergie soit nécessaire. L'énergie peut être utilisée directement pour le chauffage et le refroidissement, ou elle peut être utilisée pour produire de l'électricité. Dans les systèmes de stockage d'énergie thermique destinés à l'électricité, la chaleur est utilisée pour faire bouillir l'eau. La vapeur qui en résulte entraîne une turbine et produit de l'énergie électrique en utilisant le même équipement que celui utilisé dans les centrales électriques conventionnelles. Le stockage d'énergie thermique est utile dans les centrales CSP, qui concentrent la lumière du soleil sur un récepteur pour chauffer un fluide de travail. Le dioxyde de carbone supercritique est exploré comme fluide de travail qui pourrait tirer parti de températures plus élevées et réduire la taille des centrales.

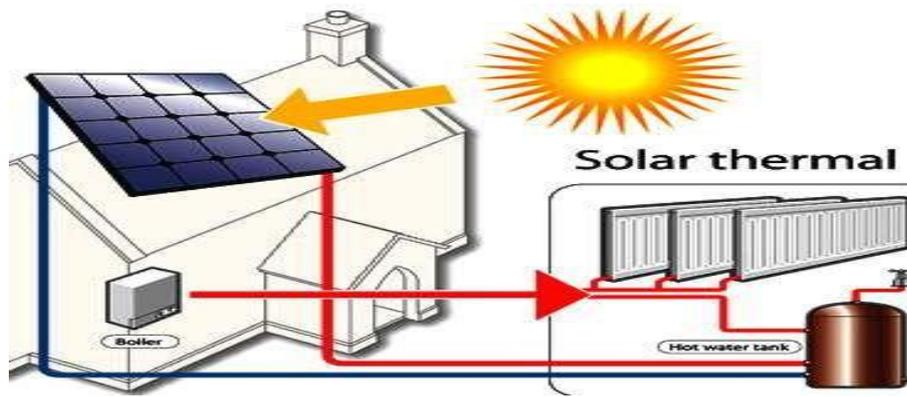


Figure II.10: Schéma principale de stockage thermique

a) Les avantages :

- Plus de capacité de baisse car le stockage d'énergie thermique est très capable de supporter de petites demandes de refroidissement par opposition à l'utilisation de refroidisseurs qui ne peuvent pas fonctionner efficacement dans des capacités à faible consommation d'énergie.
- Convertant la petite charge de puissance disponible afin qu'il puisse être poursuivi pour d'autres demandes et fonctions électriques.
- S'assurer qu'il y a un refroidissement constant même pendant les situations d'urgence pour les demandes de charge critique.
- Les systèmes de cogénération peuvent produire une puissance thermique et électrique équilibrée.
- Il fonctionne à la fois pour les situations à long terme et à court terme, garantissant ainsi une période de refroidissement plus longue ainsi que pour des intervalles de refroidissement sélectionnés.
- Peut récupérer près de 99% du refroidissement stockage.

b) Les Inconvénients :

- Il est considérablement pollué par les émissions continues de gaz à effet de serre.
- L'eau utilisée pendant le processus finit par être contaminée.
- En utilisant la technologie nucléaire, il laisse beaucoup de déchets radioactifs.
- En utilisant des combustibles fossiles, la production à long terme de cette énergie dépend des réserves fossiles disponibles.

- Les espaces où l'énergie est captée ne sont pas affectés car ils ne diminuent pas la quantité d'air dans l'endroit.
- Le transfert d'énergie est compliqué.

g. Stockage hydraulique

L'hydroélectricité à stockage par pompage est une technologie de stockage d'énergie basée sur l'eau. Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) sont composées de deux retenues d'eau situées à des hauteurs différentes et reliées par un système de canalisation. Elles sont équipées d'un système de pompage permettant de transférer l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur. La Figure (II.11) montre le principe de fonctionnement d'une STEP.

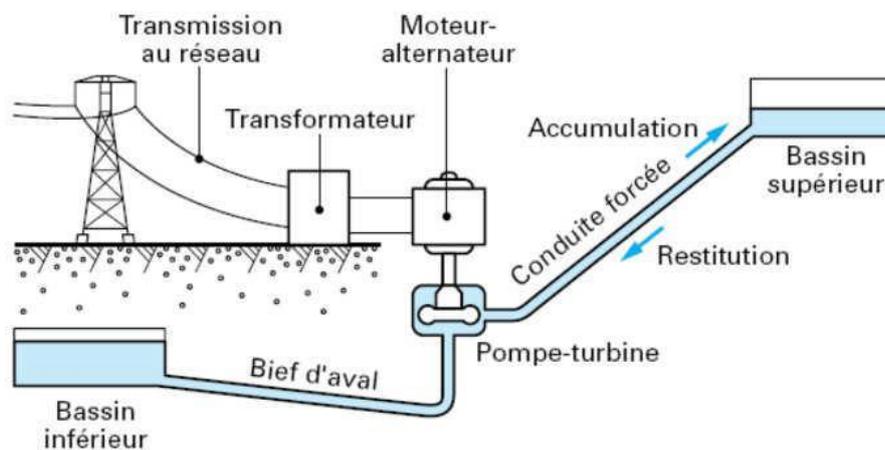


Figure II.11: Schéma de principe de fonctionnement au cas où il est associé aux PV [24]

➤ Le principe d'hydro-électricité :

Durant les périodes de forts ensoleillements, lorsque le champ photovoltaïque fournit un surplus d'électricité, l'eau du bassin inférieur est pompée et conduite vers le bassin supérieur. Sous l'effet de la pesanteur, cette masse d'eau représente une future capacité de production électrique. Lorsque le réseau connaît un déficit de production électrique, une partie du réservoir supérieur, est vidée et par gravité, l'eau fait tourner une turbine hydraulique qui alimente un alternateur et produit de l'électricité comme indiqué sur la figure (II.11). Le stock d'énergie potentielle est ainsi reconstitué indéfiniment.

a) Les avantages de STEP :

- L'hydroélectricité est alimentée par l'eau, c'est donc une source de combustible propre, ce qui signifie qu'elle ne polluera pas l'air comme les centrales électriques qui brûlent des combustibles fossiles, comme le charbon ou le gaz naturel.
- L'énergie hydroélectrique est une source d'énergie nationale, permettant à chaque État de produire sa propre énergie sans dépendre de sources de combustible internationales.
- L'hydroélectricité de retenue crée des réservoirs qui offrent une variété de possibilités récréatives.
- En plus d'une source de combustible durable, les efforts hydroélectriques produisent un certain nombre d'avantages, tels que le contrôle des inondations, l'irrigation et l'approvisionnement en eau.

b) Les inconvénients de l'hydroélectricité :

Les centrales hydroélectriques par pompage sont coûteuses à construire et nécessitent beaucoup d'infrastructures qui ont également besoin d'entretien. L'électricité produite par ces centrales est souvent assez chère, même lorsqu'on utilise des énergies renouvelables excédentaires qui sont presque gratuites sur le marché libre dans ce cas en a :

- Les constructions de barrages sont très coûteuses car elles sont à grande échelle et doivent être bien protégées. Tout léger dommage créera une énorme destruction non seulement dans le barrage, mais aussi autour de son voisinage.
- Les rendements sur le coût investi sur les barrages ne peuvent être obtenus qu'après une longue période. Par conséquent, le barrage doit être opérationnel pendant de nombreuses années pour être rentable.
- Au moment de la construction d'un barrage hydroélectrique, les habitants dans et autour de la région sont déplacés hors de leurs maisons et de l'entreprise. Cela crée une perturbation.

II.4 Méthodologie de comparaison :

L'intégration des différentes technologies de stockage dans les systèmes PV soulève des interrogations quant au choix de la technologie la plus adaptée aux besoins. Le Tableau ci-

Chapitre II : Stockage d'énergie Solaire

dessous présente quelques données technico-économiques chiffrées pour les principales technologies de stockage d'énergie dans un système photovoltaïque autonome.

Technologies		autonomie	Puissance (MW)	Capacité (MWh)	Rendement (%)	Durée de vie	Cout (FCFA/KWh)	Maturité	
Stockage Direct	Condensateur	1 min	Qlq Kwh	-	90	5000 heures à 85c°	Moyenne	Moyenne	
	Inductances supraconductrices	Qlq sec - 1 min	5-10	1-5 KWh	90-95	10000-500000 cycles	104800000	Moyenne	
	Super condensateur	Qlq min	Quelques KWh	-	90	>10000	Elevé	Moyenne	
Stockage Indirect	Hydrogène	1h dans Qlq jours	10-1000	0.01-10000	70-90	25ans	Elevé	Moyenne	
	Accumulateurs électrochimiques	Plomb-acide	10min_10h	80-150	-	60-98	300-1500 cycles	32750-13100	Très bonne
		Lithium ion	10min-10h	500-2000	-	90-100	>1500 cycles	458500-655000	Très bonne
		Nickel cadmium	10min_10h	100-800	-	60-80	300-1500 cycles	131000-393000	Très bonne
	Air comprimé (CEAS)	Qlq jours	15-200	1-200	50	11000 cycles	Faible	Moyenne	
	Hydro-électrique (STEP)	1h dans Qlq jours	100-2000	1000-10000	80	11000 cycles	Très faible	Elevée	
	Volant d'inertie	Qlq min- 1h	2-40	0.5-10	80-90	>10000 cycles	Moyenne Elevé	Moyenne	
Stockage virtuel	Qlq minute	-	-	70	5ans-10ans	Elevé	Bonne		
Thermique	-	10-100	1000-100000	60	-	Très faible	Prototype		

Tableau II.2 : Données technico-économiques pour les principales technologies de stockage.

II.4.1 Comparaison selon l'autonomie, la puissance et la capacité :

L'autonomie, la puissance et la capacité représentent des paramètres importants dans un système de stockage [14]. En effet, chaque technologie de stockage doit avoir:

- une autonomie assez élevée pour pallier entièrement au déficit énergétique en cas de non production du générateur PV.
- une forte puissance adaptée à la demande
- une capacité suffisante.

La Figure(II.12) montre que les technologies permettant la gestion de fortes puissances sur des longues périodes :

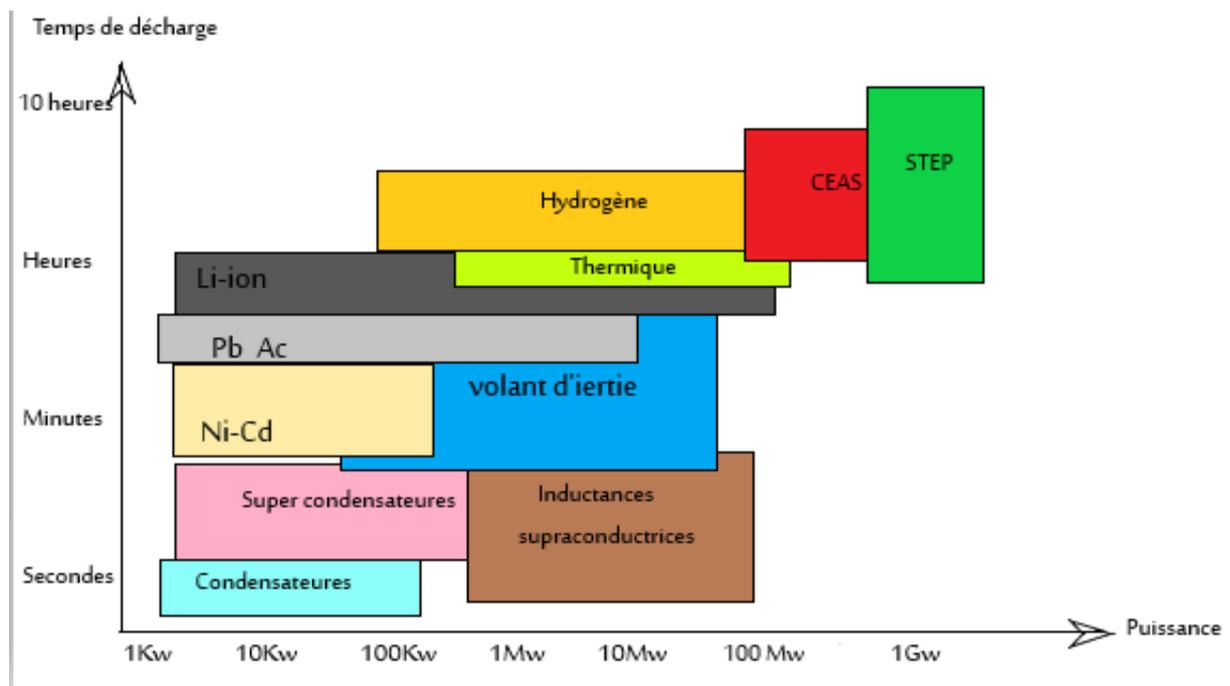


Figure II.12 : Autonomie des technologies de stockage en fonction de leur puissance

Concernent principalement les STEP, les CAES et le stockage sous forme hydrogène, les piles combustibles possède une capacité assez élevée lui permettant de stocker d'importantes quantités d'énergie de l'ordre de deux MWh.

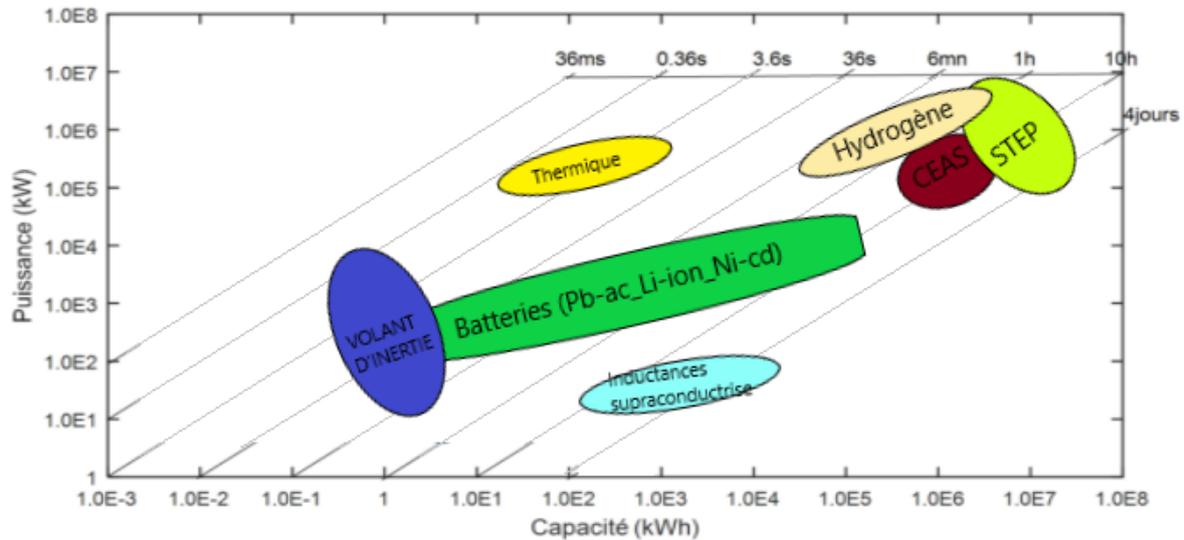


Figure II.13 : Comparaison en termes de puissance et de capacité en fonction du temps de décharge.

La Figure (II.13) compare les différentes technologies de stockage d'énergie en termes de puissance, de capacité et de temps de décharge [24]. Pour les applications à grande échelle, les STEP, Hydrogène et CAES sont les procédés les mieux adaptés car, ils ont une puissance, une capacité et un temps de décharge très élevés.

II.4.2 Comparaison selon la durée de vie :

Le moyen de stockage idéal disposerait d'une durée de vie élevée. Sur la Figure (II.14) le super condensateur, le volant d'inertie, hydrogène présentent cette propriété et aussi en a le CEAS et STEP quant à le stockage virtuel et électrochimique sous forme des batteries (Pb-ac, Li-ion, Ni-cd) ils ont une durée de vie relativement faible.

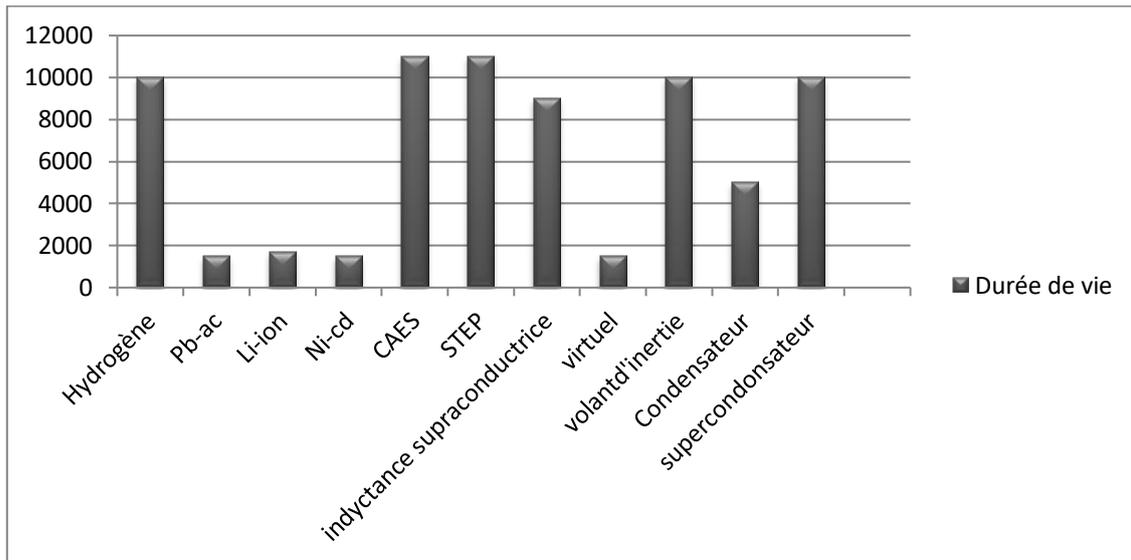


Figure II.14 : Comparaison entre l'efficacité énergétique et la durée de vie [23]

II.4.3 Comparaison selon les coûts :

Les coûts d'investissements représentent un paramètre économique très important car ils conditionnent le coût global de la production énergétique. La Figure (II.15) nous montre que le procédé d'électrolyse de l'eau et de son approvisionnement et stockage par énergie photovoltaïque à travers des piles combustibles ont un coût d'investissement élevé par unité de puissance et d'énergie. D'autres cas CAES, la STEP et les accumulateurs au plomb ont un coût d'investissement par unité de puissance et d'énergie faible. Cependant, ceux des accumulateurs au nickel-cadmium, au lithium-ion et Plomb-acide sont élevés. L'intégration de ces derniers comme technologie de stockage va augmenter le coût global du système photovoltaïque.

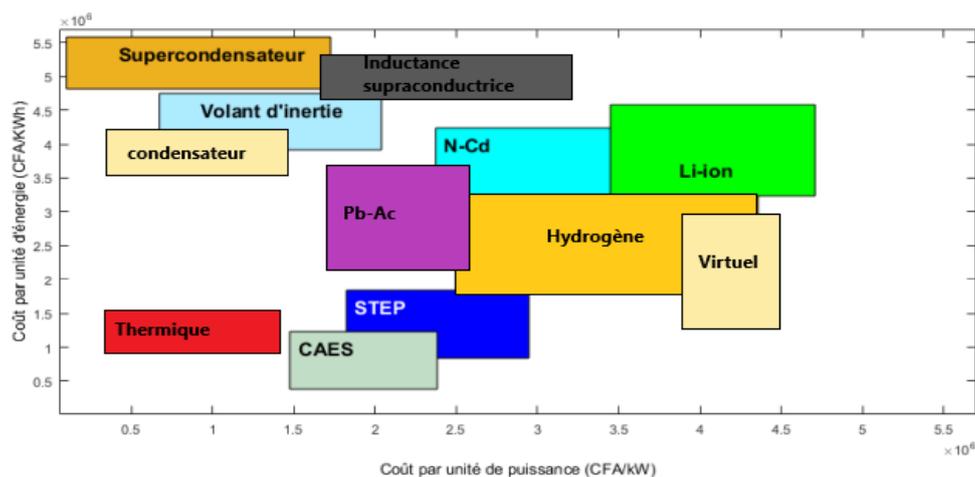


Figure II.15 : Comparaison entre les coûts d'investissements par unité de puissance et par unité d'énergie [25]

Lorsque l'application à une fréquence de charge/décharge élevée, le coût par cycle peut être la meilleure façon d'évaluer le coût du dispositif de stockage. La Figure (II.16) donne une comparaison des coûts d'investissement des dispositifs de stockage calculés par cycle. On remarque que la STEP et le CAES ont un coût d'investissement par cycle parmi les plus bas.

Par contre, les accumulateurs possèdent les coûts d'investissement par cycle les plus élevés causés par leur dégradation rapide en cyclage. Par conséquent, il faut à chaque fois remplacer les batteries. Cela augmente leurs coûts d'investissements par cycle.

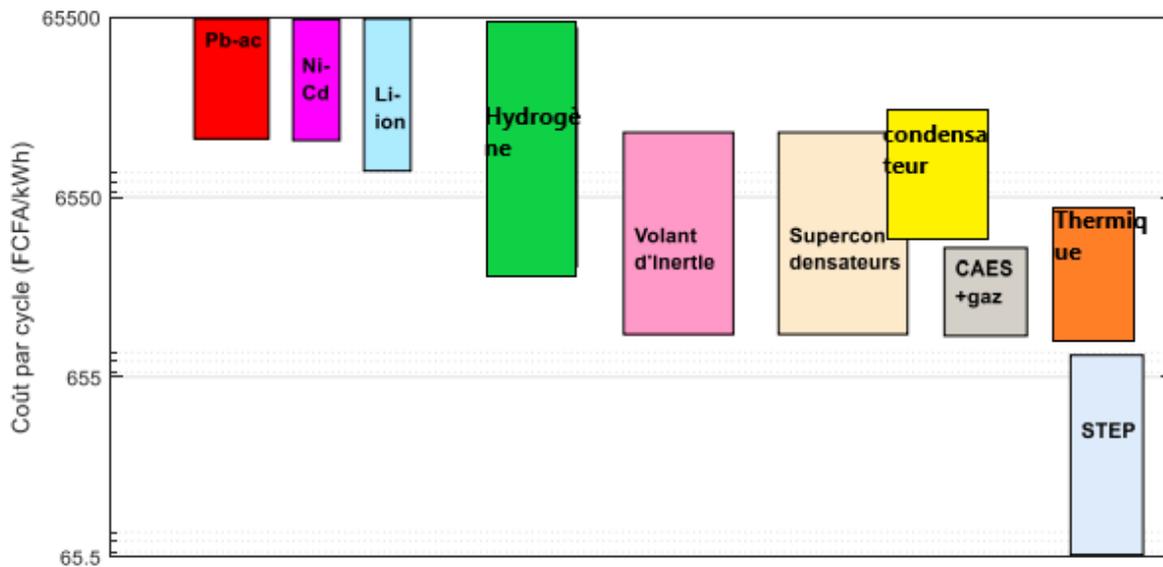


Figure II.16 : Comparaison selon les coûts d'investissements calculés par cycle

II.4.4 Comparaison selon le niveau de maturité technologique :

Malgré sa grande capacité énergétique, le stockage d'énergie sous forme thermique est toujours au stade de recherche. Par contre, l'hydrogène, les CAES, les inductances supraconductrices et les STEP par contre que les accumulateurs électrochimique : le Plomb-acide, le lithium ion et le nickel-cadmium ont une maturité technologique très avancée (Figure II.17).

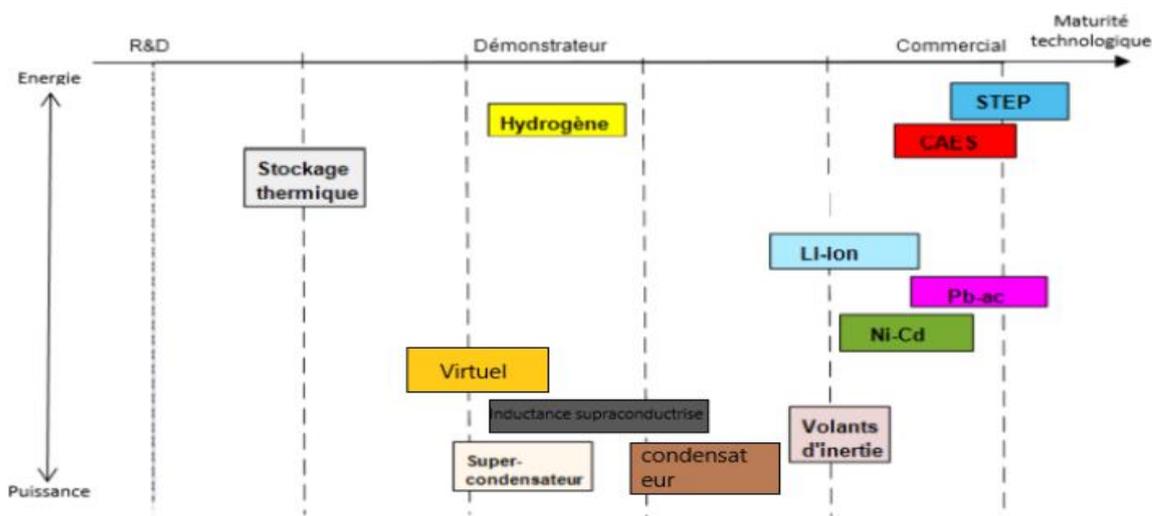


Figure II.17 : Niveau de maturité technologique des différentes technologies de stockage d'énergie. [26]

II.5 Critères de choix des technologies de stockage pour les applications photovoltaïques autonomes :

Pour faire le choix des technologies de stockage appropriées, nous avons considéré un certain nombre de caractéristiques propres aux systèmes PV que sont :

- Une autonomie assez élevée : la moyenne d'insolation dans la sous-région est d'environ 8,3 heures par jour. Durant les périodes non ensoleillées, c'est l'énergie apportée par le dispositif de stockage qui doit assurer la fourniture de la charge.
- Une capacité énergétique et une puissance disponible assez élevées : il faut au moins une capacité énergétique de 400 kWh et une puissance d'une centaine de kW.
- Un rendement et une durée de vie élevés : ce sont des paramètres importants à considérer car ils influencent le coût global de la production d'énergie. En effet, un faible rendement du système de stockage augmente le coût d'utilisation car seulement une petite partie de l'énergie stockée est utilisée. Également, une faible espérance de vie fait augmenter le coût global en raison de la fréquence de remplacement des équipements.
- Des coûts d'investissement et de fonctionnement des dispositifs de stockage faibles : leur accessibilité à toutes les couches de la population en dépend.
- Une température de fonctionnement élevée : le dispositif doit être capable de fonctionner normalement dans un climat sahélien (climat chaud et sec).
- Une technologie mature : elle doit être largement diffusée et ne doit pas représenter un danger pour la santé humaine et environnementale.

II.5.1 Choix des dispositifs de stockage :

A l'issue des différentes comparaisons entre les techniques de stockage (Figures 12 à 17) et en tenant compte des caractéristiques propres aux systèmes PV, il ressort que les technologies de stockage tels que :

- Les condensateurs, les super condensateurs, les inductances supraconductrices et le volant d'inertie ont une autonomie et une capacité faibles. Ils ne sont donc pas adaptés pour un stockage d'énergie d'origine photovoltaïque. Toutefois, ils peuvent être associés à d'autres dispositifs de stockage dans un système PV lorsqu'il y a des appels de puissance élevés de la charge.
- La toxicité due au cadmium représente un danger pour l'environnement et le coût encore élevé de ces accumulateurs au nickel, freinent leur utilisation dans les systèmes PV.
- Le stockage sous forme thermique a une autonomie et une puissance élevées avec un faible coût. Malheureusement, cette technologie est toujours au stade de recherche.
- Les STEP, les CAES, les accumulateurs électrochimiques (Plomb-acide et lithium-ion) et le stockage d'énergie sous forme d'hydrogène possèdent des caractéristiques assez remarquables (capacités énergétique et puissance élevées, une bonne autonomie, etc.).

Ils peuvent donc être utilisés comme technologies de stockage dans les systèmes photovoltaïques. Tant que la capacité, l'autonomie, la durée de vie et le coût total représentent des critères encore plus importants. Ainsi, les comparaisons effectuées dans les paragraphes précédents sont excessivement simplistes. Ils ne permettent donc pas de dégager une conclusion définitive à propos du choix de la technologie de stockage la plus appropriée pour chaque type d'application. Pour une comparaison plus efficace, nous allons utiliser une méthode de comparaison basée sur la détermination de l'indice de performance.

II.5.2 Comparaison selon l'indice de performance :

Les dispositifs de stockage sont généralement spécifiques pour des applications données. Afin de comparer les performances des différentes solutions de stockage et déterminer la technologie la plus efficace pour les systèmes PV en fonction de la nature d'application nous avons développé une approche qui s'inspire de celle d'Ibrahim [27-28] et utilisée dans le cas d'un générateur éolien. Elle se base sur l'indice de performance qui permet de comparer les

Chapitre II : Stockage d'énergie Solaire

performances des dispositifs de stockage en utilisant des critères basés sur leurs caractéristiques et associés à des coefficients de pondération. Dans la suite du travail, selon les caractéristiques, nous considérons les critères associés au coût le plus faible, l'autonomie la plus élevée, l'autodécharge la plus faible, la cyclabilité la plus élevée, l'adaptabilité la plus élevée, l'efficacité la plus élevée, la capacité la plus élevée, la maturité la plus élevée, l'aspect écologique la plus élevée, la sécurité la plus grande et le temps de réponse le plus faible.

Pour une comparaison plus fine par rapport à ce qui est généralement fait [23-12], nous regroupons d'abord les techniques de stockage en deux catégories d'applications autonomes suivant la valeur de la puissance fournie. Ensuite nous définissons les coefficients de pondération pour chaque catégorie et calculons l'indice de performance. Sa détermination se fait à l'aide d'une matrice de décision qui permet de pondérer l'importance, par des coefficients variant de 5 à 10%, de chaque caractéristique du système de stockage en fonction des exigences spécifiques de l'application considérée.

➤ Catégorie 1 : applications autonomes à petite échelle :

Ce sont des applications autonomes dont la puissance installée est inférieure à 100 kWc. La mise en œuvre de la matrice de décision prend en considération l'interaction entre les critères de choix cités dans le paragraphe 3, les données de références du système de stockage ainsi que les caractéristiques d'une application PV autonome et surtout le principal objectif dans cette catégorie : une technologie de stockage pouvant satisfaire aux besoins d'une charge de puissance 100 W à 100 kW. Ainsi, plus d'importance a été accordée au coût, à l'autonomie, à l'autodécharge, à la cyclabilité et à l'adaptabilité au système PV. Un coefficient de pondération de 10% a été attribué pour chacun de ces critères. Par ailleurs, l'efficacité, la capacité de stockage, la diminution des GES (Gaz à Effet de Serre) et la maturité étant considérés comme des critères moins importants ont chacun été pondéré par un coefficient de 7,5%. Enfin, l'aspect écologique, la sécurité, le temps de réponse et la simplicité ont chacun été pondérés par un coefficient de 5% car ils n'ont pas assez d'influence sur le choix de la technologie (Figure II.18).

La matrice globale de décision est construite à l'aide de plusieurs matrices élémentaires de décision. En effet, pour chaque critère (coût, durée de vie, maturité...), on construit une matrice élémentaire de décision dans laquelle, le système peut prendre, la valeur :

- 1 ou 0 lorsque l'un des dispositifs de stockage est respectivement plus ou moins performant que les autres ;

Chapitre II : Stockage d'énergie Solaire

- 0,5 lorsque les dispositifs de stockage sont en égalité de performances [38].
- la case reste vide quand la comparaison est faite entre la même technologie.

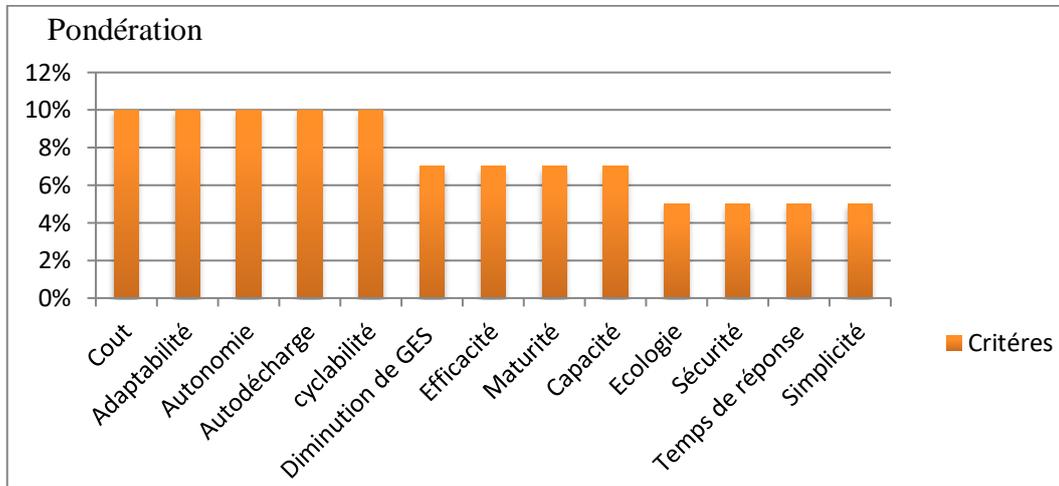


Figure II.18 : Répartition des différents critères

Ainsi, nous avons obtenu 13 matrices de décision élémentaires correspondant aux 13 critères repartis sur la Figure (II.18). Les Tableaux (II.3) et (II.4) donnent des exemples de matrices élémentaires de décision pour une application autonome à petite échelle.

Cout	STEP	CAES	Hydrogène	Virtuel	Accumulateurs électrochimiques	Thermique	Total
STEP		0.5	0	0	0	0	0.5
CAES	0.5		0	0	0	0	0.5
Hydrogène	1	1		0	0	0	2
Virtuel	1	1	1		0	0	3
Accumulateurs	1	1	1	1		0.5	4.5

Chapitre II : Stockage d'énergie Solaire

électrochimiques							
Thermique	1	1	1	1	0.5		4.5

Tableau II.3 : Matrice élémentaire de décision pour le critère de coût.

La matrice globale de décision (Tableau II.5) est construite à l'aide des coefficients de préférence globale qui ont été attribués pour chaque technologie de stockage et à partir des 13 matrices élémentaires de décision. En effet, la multiplication des totaux obtenus dans les matrices de décision élémentaire de chaque technologie par son coefficient de pondération et la sommation des résultats obtenus permet de classer les différents dispositifs de stockage par ordre de performance.

Cyclabilité	STEP	CAES	Hydrogène	Virtuel	Accumulateurs électrochimiques	Thermique	Total
STEP		0.5	1	1	1	1	4.5
CAES	0.5		1	1	1	1	4.5
Hydrogène	0	0		0.5	1	1	2.5
Virtuel	0	0	0.5		1	0.5	2
Accumulateurs électrochimiques	0	0	0	0		0	0
Thermique	0	0	0	0.5	1		1.5

Tableau II.4 : Matrice de décision élémentaire pour le critère de cyclabilité

	Pondération	CAES	STEP	Hydrogène	Virtuel	Accumulateurs électrochimiques	Thermique
Adaptabilité aux PV	0.1	0.05	0.05	0.45	0.25	0.45	0.25
Coût	0.1	0.05	0.05	0.45	0.3	0.45	0.2
Autonomie	0.1	0.3	0.3	0.15	0.25	0.25	0.25

Chapitre II : Stockage d'énergie Solaire

Autodécharge	0.1	0.4	0.4	0.05	0.15	0.15	0.4
Cyclabilité	0.1	0.45	0.45	0	0.2	0.15	0.25
Efficacité	0.075	0	0.1875	0.3375	0.1875	0.3375	0.075
Capacité	0.075	0.1875	0.1875	0.1875	0.1875	0.1875	0.1875
Diminution de GES	0.075	0.3	0.3	0.075	0.075	0.075	0.3
Maturité	0.075	0.0375	0.225	0.375	0.1125	0.3	0.15
Sécurité	0.05	0.175	0.175	0.05	0.175	0.175	0
Aspect écologique	0.05	0.2	0.2	0.05	0.075	0.05	0.2
Temps de réponse	0.05	0.05	0	0.2	0.2	0.2	0.1
Simplicité	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15	0.225	0.075
Total	1	2.575	2.25	2.3125	2.3125	3	2.4375
Rang		3	6	2	5	1	4

Tableau II.5 : Matrice globale de décision (petite échelle)

Cette matrice globale de décision montre que les accumulateurs au électrochimique se placent au premier rang, suivi au Hydrogène en termes de performances.

➤ **Catégorie 2 : applications autonomes à moyenne échelle :**

Ce sont des applications autonomes dont la puissance installée est supérieure ou égale à 100 KW ns cette catégorie, l'élaboration de la matrice de décision s'effectue pratiquement de la même manière que dans la première catégorie. La seule différence est liée à l'objectif principal ; il s'agit dans cette partie d'avoir un système de stockage dont la puissance peut satisfaire aux besoins d'une charge de plus de 100 kW. Ainsi, les critères basés sur : la capacité, l'efficacité, le coût, la cyclabilité et l'adaptabilité au système PV ont été retenus comme étant les plus importants. Chaque critère a donc été pondéré par un coefficient de 10%. L'autonomie, l'autodécharge, la maturité et la diminution des GES étant considérés comme des critères moins importants que les premiers. Un coefficient de 7,5% leur a été attribué. Quant à l'aspect écologique, la sécurité, le temps de réponse et la simplicité, une pondération de 5% a été attribuée à chacun des critères associés car ils n'ont pas assez d'influence sur le choix de la technologie. La Figure II.18 montre la répartition des différents critères.

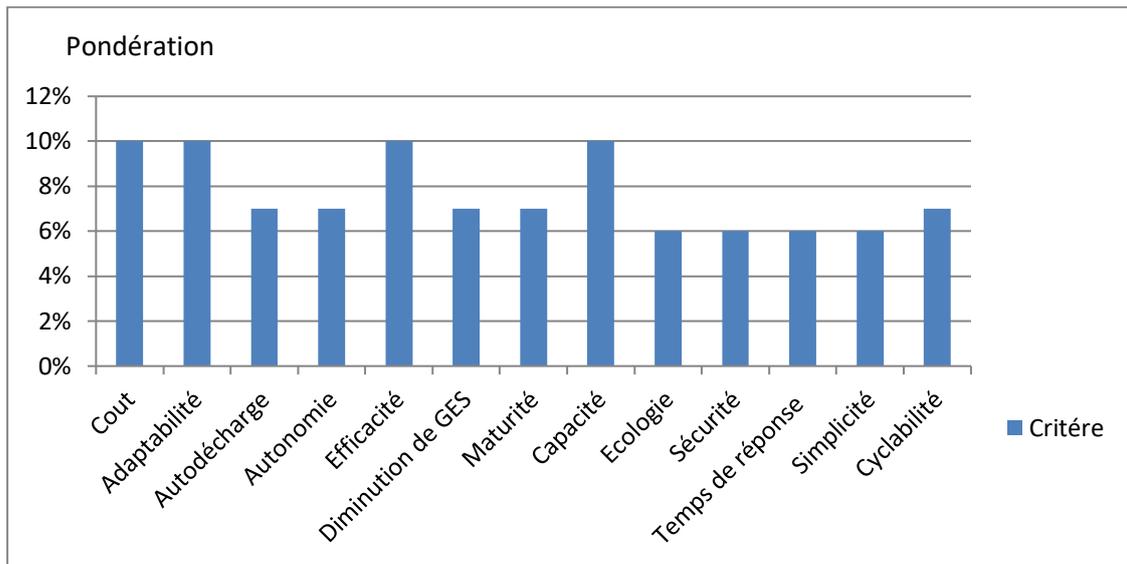


Figure II.19 : Répartition des différents critères pour une application autonome à grande échelle

Le Tableau (II.6) illustre la matrice de décision globale pour le cas d'une application à moyenne échelle. Cette matrice est obtenue en suivant le même procédé que celle obtenue dans le cas d'une application à petite échelle. Le Tableau (II.6) montre en termes de performance, que pour une application à moyenne échelle, les STEP viennent en première position et les CAES en seconde position. A partir des deux matrices de décision globales (Tableaux II. 5 et II. 6), pour les deux types d'applications, nous avons déterminé l'indice de performance (Figure II.20). Dans la catégorie 1, les accumulateurs électrochimiques et Hydrogène affichent de meilleures performances par rapport aux autres techniques de stockages. Les super condensateurs et les inductances supraconductrices ayant une dynamique plus rapide peuvent aussi être associés à ces accumulateurs électrochimiques pour réguler l'énergie lors des appels de puissances élevées. Cela permettra d'éviter le surdimensionnement des batteries et d'augmenter leurs performances. Pour les applications à grandes échelles (catégorie 2), ce sont : la STEP et le CAES qui sont les plus appropriés. Toutefois, ces technologies de stockages nécessitent des sites adaptés. Les anciens sites miniers sous-terrain peuvent être utilisés pour stocker l'air comprimé. Pour les STEP, Les barrages hydroélectriques existants peuvent être transformés en STEP.

	Pondération	CAES	STEP	Hydrogène	Virtual	Electrochimique	Thermique
Adaptabilité aux PV	0.1	0.15	0.15	0.45	0.25	0.45	0.15

Chapitre II : Stockage d'énergie Solaire

Cout	0.1	0.5	0.4	0.05	0.25	0.25	0.05
Autonomie	0.075	0.3	0.3	0.15	0.075	0	0.3
Autodécharge	0.075	0.225	0.375	0.075	0.225	0	0.225
Cyclabilité	0.1	0.4	0.4	0.15	0.15	0	0.4
Efficacité	0.1	0	0.25	0.5	0.25	0.4	0.1
Capacité	0.1	0.45	0.45	0.05	0.25	0.05	0.25
Diminution de GES	0.075	0.1875	0.1875	0.1875	0.1875	0.1875	0.185
Maturité	0.075	0.075	0.2625	0.1875	0.075	0.3375	0.1125
Sécurité	0.05	0.175	0.175	0.175	0.175	0.05	0
Aspect écologique	0.05	0.2	0.2	0.2	0.075	0.05	0.05
Temps de réponse	0.05	0.05	0	0.2	0.2	0.2	0.1
Simplicité	0.05	0.125	0.125	0.225	0.025	0.225	0.025
Total	1	2.8375	3.275	2.45	2.1875	2.2	2.1
Rang		2	1	3	5	4	4

Tableau II.6 : Matrice globale de décision (petite échelle)

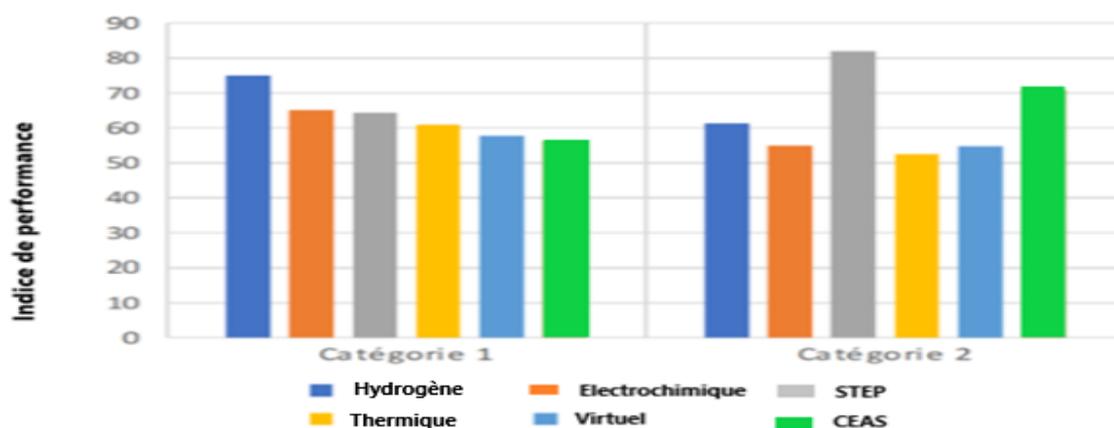


Figure II. 20 : Indice de performances des technologies de stockage applicable aux systèmes PV suivant deux catégories d'applications.

II.5 Conclusion :

L'étude comparative des différents dispositifs de stockage effectué dans ce travail a permis de dégager les technologies de stockage qui peuvent être utilisées dans les systèmes PV. Grâce au

Chapitre II : Stockage d'énergie Solaire

regroupement des techniques de stockage en deux catégories d'applications et à l'utilisation de la méthode de comparaison basée sur l'indice de performance, nous avons déterminé pour chaque catégorie, les techniques de stockage les plus adaptées. Ainsi, pour les applications à petite échelle (inférieure à 100 kW), la batterie au lithium-ion est la meilleure option comparée aux autres technologies en matière de performances. Malgré ses performances, les accumulateurs électrochimique au lithium-ion sont moins répandus que ceux au Plomb-acide à cause de leur coût plus élevé. Pour des applications à moyenne échelle (supérieure à 100 kW), la station de transfert d'énergie par pompage (STEP) est souhaitable et l'hydrogène est produit aussi par électrolyse à l'aide de machines qui décomposent l'eau en hydrogène et oxygène, sans aucun sous-produit. L'électrolyse nécessitait généralement tellement d'énergie électrique qu'il était déraisonnable de produire de l'hydrogène de cette manière. Aujourd'hui, la situation a changé pour deux raisons : d'une part, il existe un excédent important d'électricité renouvelable dans les réseaux de distribution d'électricité ; Au lieu de stocker l'excès d'électricité dans de grands lots de batteries, il peut être utilisé dans le processus d'électrolyse de l'eau, "stockant" ainsi l'électricité sous forme d'hydrogène. La deuxième raison est due à l'augmentation de l'efficacité des machines d'électrolyse.

Plusieurs grandes réalisations d'Hydrogène existent déjà à travers le monde. Bien que la production d'hydrogène vert en soit encore à ses premiers pas, de nombreux pays investissent dans cette technologie, notamment les pays qui disposent d'énergies renouvelables à faible coût. Parmi ces pays figure l'Australie, qui cherche à exporter l'hydrogène à produire en exploitant son énergie solaire et éolienne disponible, Toutefois, ces résultats doivent être confirmés par une étude expérimentale notamment des pays qui y appliquent des énergies renouvelables. Et puis il envisage de produire de l'hydrogène dans le nord du pays, situé dans le nord du pays, de l'électricité produite grâce à l'énergie solaire. La Chine prévoit de lancer un million de véhicules à pile à combustible à hydrogène d'ici 2030. La Commission européenne a récemment publié le Plan de production d'hydrogène 2030, qui prévoit d'augmenter les capacités de production d'hydrogène à 500 gigawatts d'ici 2050.

Ces études doivent également comprendre les accumulateurs au lithium-ion et plomb-acide pour les systèmes PV autonomes. Pour se débarrasser les inconvénients de la technologie précédent. L'hydrogène vert est l'une des quatre technologies essentielles réduire plus de 10 milliards de tonnes d'émissions de dioxyde de carbone par an dans les secteurs industriels qui constituent le plus grand défi dans ce domaine, tels que les secteurs des mines, de la construction et du bâtiment, et les industries chimiques. Quant au fonctionnement de cette technique, nous l'étudierons dans le troisième chapitre.

Chapitre III :

Stockage de l'hydrogène

Chapitre III : Stockage de l'hydrogène

III.1 Introduction :

L'hydrogène est l'atome situé en première place dans le tableau périodique des éléments. C'est le plus simple: un noyau constitué d'un proton, et un électron périphérique.

L'hydrogène est l'élément chimique le plus simple de l'univers : son noyau se compose d'un unique proton et son atome ne compte qu'un électron. La molécule de dihydrogène(H_2) est constituée de deux atomes d'hydrogène. On parle communément d'hydrogène pour désigner en effet le dihydrogène. L'hydrogène est très abondant à la surface de la terre mais n'existe pas à l'état pur, il est toujours lié à d'autres éléments chimiques, dans des molécules comme l'eau, les hydrocarbures.

Le stockage d'électricité par l'hydrogène ouvre des perspectives extraordinaires avec la capacité de stocker l'électricité sur des périodes longues, par exemple de l'été à l'hiver, avec très peu de pertes et un encombrement minimal. Cette technologie s'appuie sur l'électrolyse de l'eau qui transforme l'électricité en hydrogène et la pile à combustible qui transforme l'hydrogène en électricité. L'électrolyse de l'eau est bien connue : en faisant passer un courant électrique entre deux électrodes plongées dans l'eau, on sépare l'hydrogène de l'oxygène. L'hydrogène peut être stocké dans des bouteilles. Une pile à combustible permet ensuite de produire de l'électricité à partir de l'hydrogène et de l'oxygène présent dans l'air ambiant.

III.2 Caractéristiques de L'hydrogène :

L'hydrogène est le premier élément de la classification périodique. Son noyau n'a qu'un seul proton et son isotope principal est même dénué de neutron (un cas unique) ce qui fait de l'atome d'hydrogène le plus simple, le plus petit et le plus léger des atomes.

L'hydrogène est présent sous la forme d'un gaz incolore, inodore ce qui ne facilite pas sa détection naturelle.

Caractéristiques	Valeur numérique
PCS (Pouvoir calorifique supérieur)	12770 Kj/Nm^3 – 141860 Kj/Kg
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	10800 Kj/Nm^3 – 119930 Kj/Kg
Masse volumique du gaz à P_{atm} et 273K	0.08988 Kg/Nm^3
Masse volumique de la vapeur à P_{atm} et 20.3K	1.34 Kg/m^3
Température de flamme dans l'air à 300K	2318k
Vitesse de détonation dans l'air	2.0 Km/s
Cp (Capacité thermique massique à pression constante)	14266 $J/Kg.k$
Cv (Capacité thermique massique à volume constante)	10300 $J/Kg.k$
Conductivité thermique du gaz	0.1897 $W/m.k$

Tableau III.1: Caractéristiques physico-chimiques de l'hydrogène [29]

III.3 Procédée de production d'hydrogène:

L'hydrogène n'est pas directement disponible dans la nature. Il a cependant l'avantage de pouvoir être produit à partir des trois grandes sources que sont les énergies fossiles, nucléaire et renouvelable. Mais pour être économiquement et écologiquement viable, la production d'hydrogène doit répondre à trois critères :

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

Actuellement, 500 milliards de m^3 d'hydrogène sont produits annuellement dans le monde entier. Approximativement, 96% sont produits à partir des combustibles fossiles [30], (48 % à partir de gaz naturel, 30 % des hydrocarbures liquides, 18% du charbon).

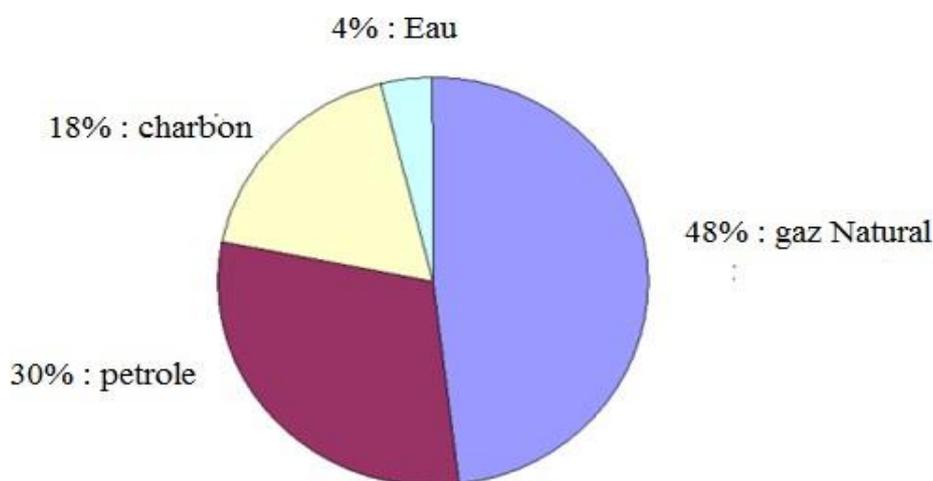


Figure III.1: Répartition des modes de production d'hydrogène actuels [31]

Les différentes méthodes de synthèse de l'hydrogène vont fortement dépendre de sa source et sont décrits ci-dessous :

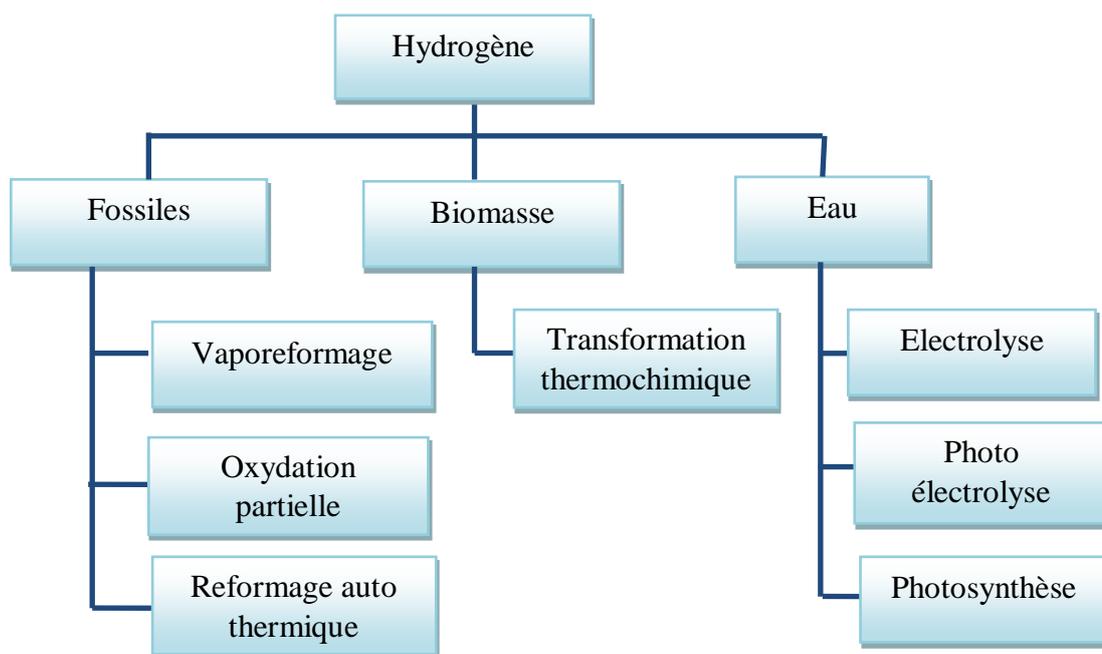


Figure III.2 : Procède de production d'hydrogène

III.3.1 Productions de l'hydrogène à partir des énergies fossiles :

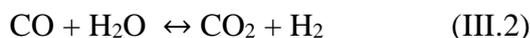
- **Le vaporeformage :**

Est la technique la plus répandue. Il s'agit de faire réagir du méthane avec de l'eau pour obtenir un mélange contenant de l'hydrogène et du CO₂. Cette transformation a lieu à haute

température (840 à 950°C), à pression modérée (20 à 30 bars) et selon une réaction endothermique (nécessite un apport de chaleur) :



Le monoxyde de carbone produit dans la réaction réagit aussi avec l'eau selon l'équation suivante.



Le CO₂ émis par ce procédé pourrait éventuellement être capté et stocké pour produire de l'hydrogène [32]. En lieu et à la place du gaz naturel, l'utilisation du bio méthane (méthane issu de la fermentation de la biomasse) constitue aussi une solution pour produire de l'hydrogène.

- **L'oxydation partielle :**

On peut synthétiser l'hydrogène par l'oxydation des hydrocarbures en présence d'air ou d'oxygène pur, cette procédure appelée l'oxydation partielle qui est également un processus de production maîtriser.

Dans le cas du méthane l'oxydation partielle de ce dernier peut être décrite par les équations suivantes :



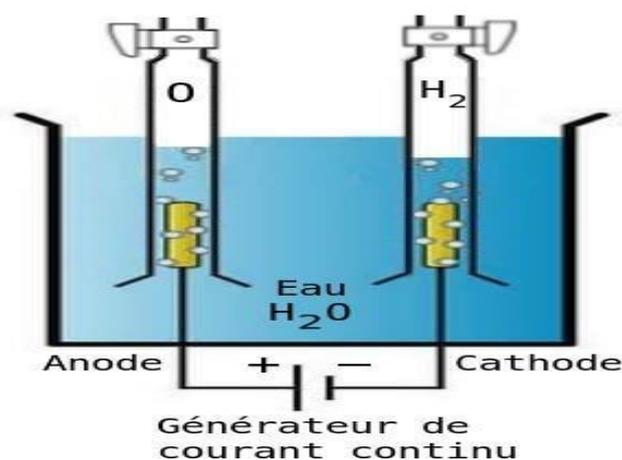
Ces types des réactions sont exothermiques et se déroulent (en général) sans catalyseur.

- **Le reformage auto thermique :**

Le reformage auto thermique est une combinaison de l'oxydation partielle et du vaporeformage. Dans ce procédé, le gaz naturel et l'oxygène sont mélangés en parallèle avec la vapeur d'eau avant d'être préchauffés. Ils sont ensuite dirigés vers le réacteur (catalyseur à base de nickel, pression de 20 à 60 bars et température de 900 à 1100°C) pour la production de gaz de synthèse. La composition typique du gaz obtenu est : 68% H₂, 20% CO, 10% CO₂, un peu de CH₄ et de N₂.

III.3.2 Productions de l'hydrogène en utilisant la biomasse :

- **Gazéification de la biomasse :**



La gazéification de la biomasse, une technologie stable qui utilise la vapeur à haute température pour fractionner la biomasse (issue de résidus forestiers, agricoles ou des déchets organiques secs) en hydrogène et en d'autres produits de combustion, est considérée être à la fois renouvelable et neutre en carbone. Lorsque jumelé au captage et au stockage du carbone, le procédé obtient un bilan carbone négatif.

III.3.3 Productions de l'hydrogène par décomposition de l'eau:

- **Production par électrolyse de l'eau :**

L'électrolyse est le procédé de décomposition de l'eau en hydrogène et oxygène par passage d'un courant électrique entre deux électrodes immergées dans un électrolyte aqueux [33]. Actuellement, le seul procédé disponible permettant de produire de l'hydrogène décarboné en quantité industrielle est l'électrolyse de l'eau, à la condition que l'électricité elle-même soit décarbonée.

Cette décomposition, nécessitant un apport d'énergie électrique, dépend essentiellement de l'enthalpie et de l'entropie de réaction. Cela correspond à un potentiel théorique de décomposition de l'ordre de 1,23 V/molécule d'eau à 298 K. en pratique, le potentiel est plutôt entre 1,7 et 2,3 V, ce qui correspond à des rendements d'électrolyse de 70 à 85%. Une cellule d'électrolyse est constituée de deux électrodes (anode et cathode) et un générateur de courant continu séparé par une électrolyse (milieu conducteur ionique).

Figure III.3 : Principe d'électrolyse de l'eau [29]

L'utilisation des sources d'énergie renouvelables et propres, telles que l'hydroélectricité, l'énergie éolienne et l'énergie solaire, comme source d'électricité, présente des avantages sur le plan environnemental. Le coût de l'hydrogène produit par électrolyse est d'abord et avant tout lié à celui de l'électricité et à son mode de production [34].

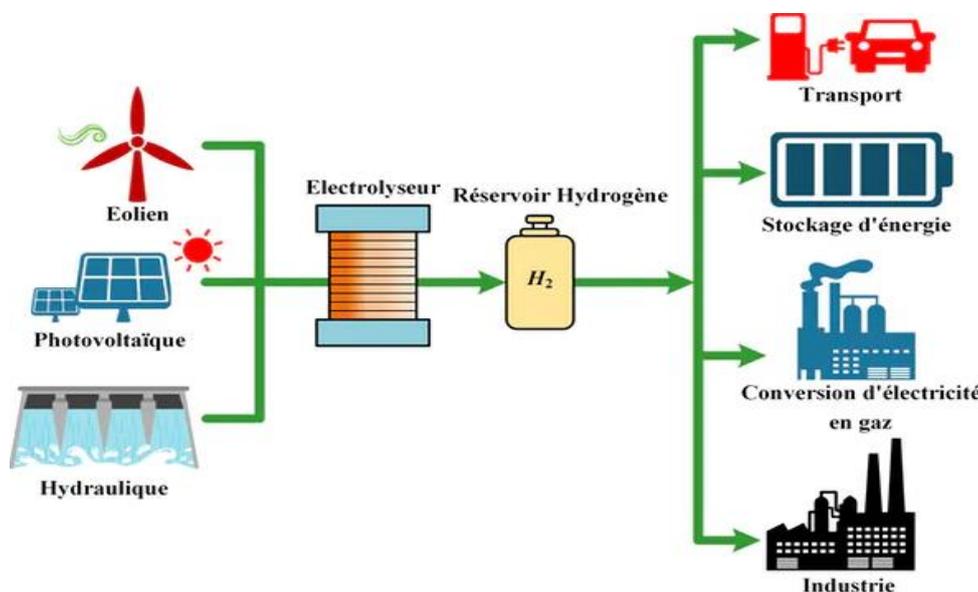


Figure III.4 : Vue de l'ensemble des applications basée sur l'électrolyse de l'eau alimenté par la source d'énergie photovoltaïque

- **Production par photo-électrolyse de l'eau :**

Une méthode directe pour produire de l'hydrogène est la photo-électrolyse de l'eau (fig III.5) : produire de l'hydrogène et de l'oxygène à partir de l'eau et du soleil en une seule étape. Cela est possible en utilisant un semi-conducteur adéquat qui permet à la fois d'absorber l'énergie solaire et de décomposer l'eau. Cette réaction se décompose en trois étapes: l'absorption du photon, la migration des porteurs photo-générés et la réaction de ces porteurs avec l'eau à la surface de l'anode et/ou de la cathode. Les oxydes métalliques sont à priori de bons candidats pour être utilisés comme photoanodes mais leur efficacité doit être encore améliorée. Les voies classiques pour améliorer les photoanodes sont la nanostructuration pour augmenter la surface de contact avec l'eau et le dopage pour ajuster la bande interdite. De plus, la forte recombinaison électron-trou a été mise en avant pour expliquer leur faible rendement.

Le rendement du système n'atteint toutefois que 0,74 %, alors que la plupart des photo-électrolyses de l'eau tournent plutôt autour de 1 à 2%.

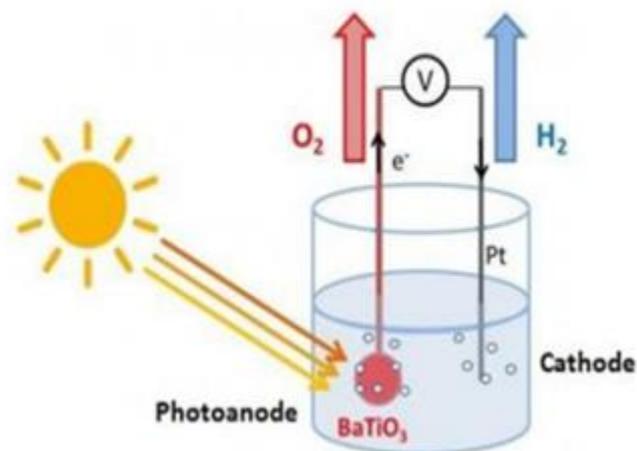


Figure III.5 : Exemple de procédé de photo-électrolyse de l'eau

III.4 Technologie des électrolyseurs :

L'eau ne se décompose pas spontanément en hydrogène et en oxygène. Il faut lui fournir de l'énergie pour cela. L'électrolyse de l'eau est donc une réaction électrochimique (forcée), qui se fait dans un appareil particulier appelé électrolyseur [29]. Dans un tel appareil, on injecte un courant électrique « à l'aide d'un générateur électrique » et de l'eau liquide, et l'on récupère en sortie de l'hydrogène et de l'oxygène gazeux. On fait donc de la chimie, c'est-à-dire que l'on transforme un composé chimique « l'eau » en d'autres composés chimiques (hydrogène et oxygène), avec de l'électricité.

Les différentes technologies de l'électrolyseur sont décrites ci-dessous :

- **Electrolyseur alcaline :**

L'électrolyse alcaline est la technologie la plus répandue pour la production d'hydrogène électrolytique mais également pour la production de nombreux composés chimiques dont le chlore.

Elle bénéficie ainsi d'une très grande maturité industrielle. L'électrolyseur choisi est à technologie Alcaline, l'électrolyte est une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium ($NaOH$).

La conduction Ionique est alors assurée par les ions hydroxyde (OH^-) et sodium (Na^+).

Les réactions anodiques et Cathodiques sont décrites ci-dessous

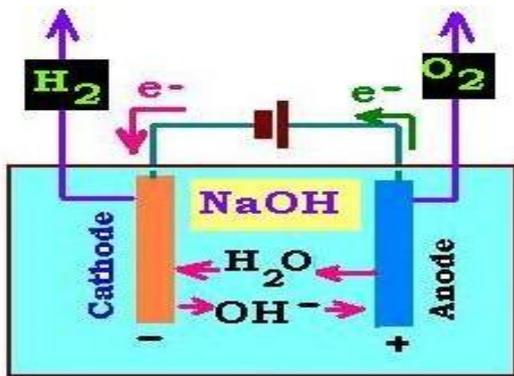
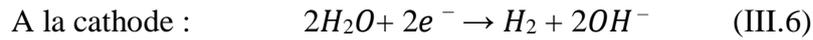
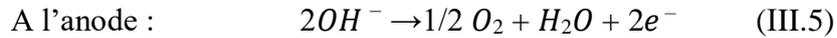


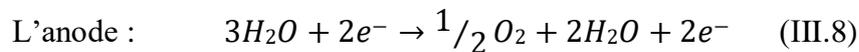
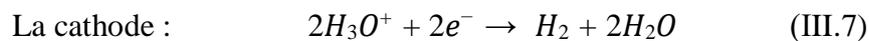
Figure III.6: Principe de l'électrolyse alcaline



Figure III.7 : Electrolyseur alcalin standard [35]

- **Electrolyseurs PEM**

Le principe de fonctionnement d'un électrolyseur PEM « Proton Exchange Membrane » est fondé sur le même concept qu'une pile à combustible PEM. La principale caractéristique de l'électrolyseur PEM est son électrolyte solide, constitué d'une membrane polymère. Il assure ainsi la conduction des ions hydronium (H_3O^+) produits à l'anode et permet la séparation des gaz produits (H_2 et O_2), selon les réactions ci-dessous :



Le principe de l'électrolyse PEM est décrit schématiquement par la figure I.6. Les performances de l'électrolyseur PEM dépendent essentiellement des caractéristiques de la membrane et des catalyseurs utilisés [29]. Ces deux composants constituent encore aujourd'hui les principaux verrous technologiques de l'électrolyse PEM.

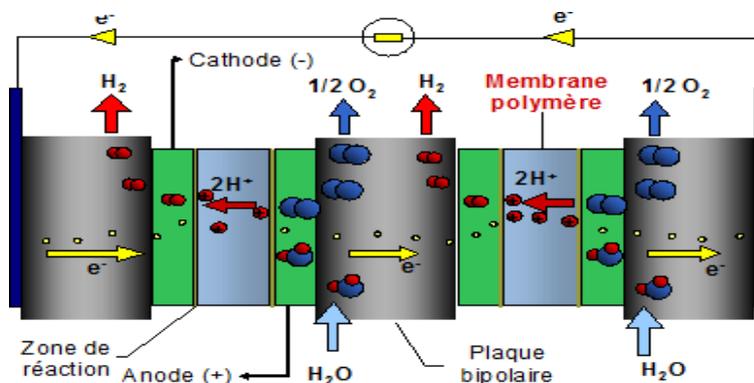


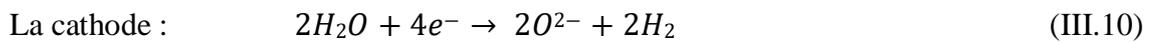
Figure III.8 : L'électrolyse PEM [36]

- **Electrolyseur à haute température :**

SOEC (solid oxide electrolysis cells) : cette technologie d'électrolyse à haute température et haut rendement est encore en stade de développement. Elle utilise la céramique comme électrolyte et a un faible coût en matériel, ce qui devrait conduire à une augmentation des rendements de plus de 30 % comparée aux électrolyseurs alcalins [37]. Parce qu'ils utilisent de la vapeur pour l'électrolyse, si l'hydrogène produit par cette technique devait être utilisé pour la production de méthane synthétique, la chaleur dégagée par le processus de méthanation pourrait être récupérée pour le rendement de la production d'hydrogène.

Le principe de l'électrolyse à haute température (fig III.9) repose sur la décomposition des molécules d'eau sous forme vapeur au niveau de la cathode [29]. Cette décomposition dépend alors de la nature de l'électrolyte. Celui-ci peut assurer soit une conduction protonique soit une conduction d'ions superoxydes O^{2-} . Les réactions mises en jeu au niveau des électrodes sont décrites ci-dessous en fonction du type d'électrolyte.

- Electrolyte à conduction d'ions superoxydes :



- Electrolyte à conduction protonique :

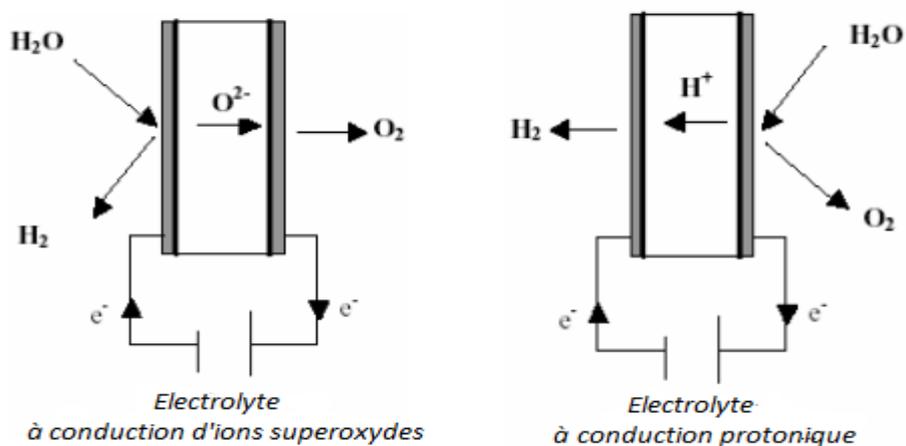
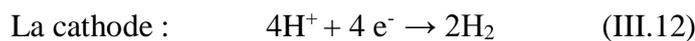
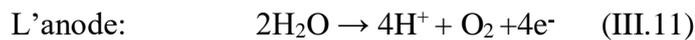


Figure III.9 : Principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte

III.5 Piles à combustibles :

III.5.1 Description générale :

Une pile à combustible est un générateur d'électricité qui transforme directement l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique [32]. Elle fonctionne selon le principe inverse de l'électrolyse de l'eau, puisqu'elle produit de l'électricité, de l'eau et de la chaleur à partir d'hydrogène et d'oxygène.

Le cœur d'une PAC est constitué de trois éléments, dont deux électrodes : une anode oxydante (émettrice d'électrons); une cathode réductrice (collectrice d'électrons) séparées par un électrolyte. L'électrolyte a la propriété de conduire directement d'une électrode à l'autre des molécules ionisées et de faire barrage aux électrons en les obligeant à passer par le circuit extérieur de la pile ou leur énergie électromotrice peut être exploitée. L'alimentation d'une PAC se fait par injection continue de combustible à l'anode, généralement de l'hydrogène, et à la cathode, généralement le dioxygène de l'air ou l'air lui-même. Une énergie électrique continue est alors disponible aux bornes de la pile

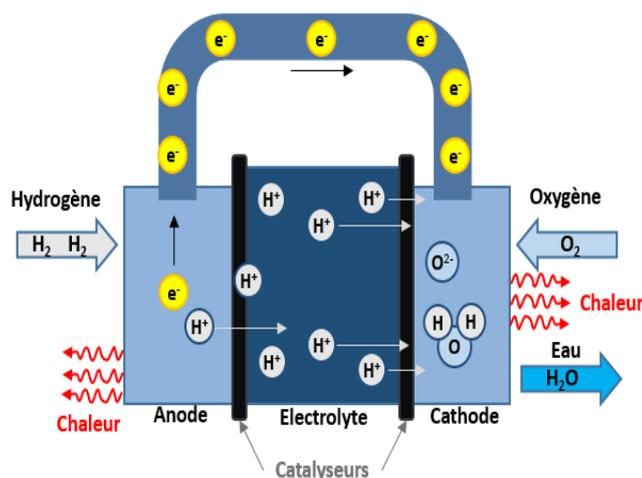


Figure III.10 : Fonctionnement d'une pile à combustible

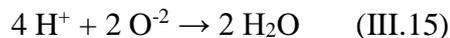
Au niveau de l'anode, la molécule d'hydrogène, au contact d'un catalyseur, se décompose et libère des électrons qui vont créer le courant électrique. C'est l'oxydation.



D'autre part, au niveau de la cathode, l'oxygène, au contact avec les électrons libérés par la précédente réaction réagit. C'est la réduction.



Enfin, les protons hydrogène, lorsqu'ils arrivent à la cathode, se recombinent avec les ions d'oxygène et forment de l'eau.



Cependant, même si le principe est simple, sa mise en application reste plus complexe.

III.5.2 Différents types de piles à combustible:

La classification des piles à combustibles 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. La classification repose essentiellement sur :

- La nature de la membrane : liquide ou solide
- La température de fonctionnement de la pile : basse (60°C – 250°C) ou haute (600°C – 1000°C).

Il existe six types de piles à combustibles qui se différencient entre elles par leur température de fonctionnement et par l'électrolyte donnant son nom à la pile :

- 1) Les piles à combustibles à membranes échangeuse de protons (PEMFC).
- 2) Les piles à combustibles alcalines (AFC).
- 3) Les piles à combustibles à acide phosphorique (PAFC).
- 4) Les piles à combustible à carbonates fondus (MCFC).
- 5) Les piles à combustible à oxyde solide (SOFC).

Types de pile	Electrolyte	T (°C)	Domaine d'utilisation
Alcaline (AFC)	Potasse (liquide)	80	Espace, transport. Gamme : 1-100kW
Acide polymère (PEMFC et DMEFC)	Polymère (solide)	80	Portable, transport, Gamme : 10mW-100kW
Acide phosphorique (PAFC)	Acide phosphorique (liquide)	200	Transport. Gamme : 200kW-10MW
Carbonate fondu (MCFC)	Sels fondus (liquide)	650	Transport. Gamme : 500kW-10MW

Oxyde solide (SOFC)	Céramique (solide)	600 à 1000	Transport. Gamme : 1 kW-10MW
---------------------	--------------------	------------	---------------------------------

6) Les piles à combustible à membrane électrolyte polymère (PEM).

Tableau III.2 : Les différents types de piles à combustibles [38]

III.5.3 Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible:

Les avantages essentiels d'une pile à combustible, se résument pour l'essentiel à :

- Un fonctionnement silencieux (peu d'organes en mouvement, si ce n'est des pompes de circulation), et non polluant (rejet d'eau pour la pile H₂/O₂).
- Une grande souplesse d'utilisation due, d'une part à une fabrication modulaire d'éléments de dimensions et de formes variées [32], et d'autre part à un démarrage et arrêt quasi-instantanés pour les piles à basse température (inférieure à 200°C).
- Un rendement énergétique élevé.
- Enfin, une grande densité massique d'énergie, qui est un avantage particulièrement important à considérer pour des applications à l'espace ou à des véhicules électriques terrestres.

A côté de ces avantages indéniables, les piles à combustible présentent un certain nombre d'inconvénients, qui ont limité leur développement :

- L'électrolyse de l'eau, principale méthode de production de dihydrogène avec le vaporeformage d'hydrocarbures, utilise plus d'électricité que le dihydrogène n'en produit lors de son utilisation dans la pile à combustible.
- Utilisation de métaux catalytiques précieux en quantité trop importante (3 à 4 g de Pt/kW pour une pile H₂/air de type PAFC), ce qui entraîne un coût exorbitant pour les applications civiles.
- La pile à combustible possède une durée de vie n'excédant pas quelques milliers d'heures. Pour qu'elle devienne rentable, il faudrait que cette espérance de vie augmente jusqu'à atteindre 20 000 à 40 000 heures

Le seul obstacle significatif restant celui du coût, il est possible d'espérer que les recherches en cours permettront d'atténuer, sinon de supprimer ce défaut.

III.6 Stockage de l'hydrogène :

Le stockage est l'un des verrous technologiques pour l'utilisation de l'hydrogène en tant que vecteur d'énergie. Il doit permettre d'une part un haut degré de sécurité et d'autre part, des facilités d'usage en terme de capacités de stockage et de dynamique de stockage/déstockage pour permettre à différentes applications de fonctionner dans des conditions techniques acceptables. Pour que l'hydrogène devienne une solution viable aux problèmes que les besoins d'énergie posent à l'environnement, les procédés de stockage devront donc être sûrs, économiques et adaptés à une multitude d'utilisation dans le futur : applications mobiles pour le transport et dispositifs portables ou stationnaires [39]. L'hydrogène est un gaz léger, caractérisé par une faible densité énergétique volumique (environ 10,8 mégajoules par mètre cube), qui le rend moins favorable à son stockage et son transport. Pour pallier ce problème, l'hydrogène peut être comprimé sous forme gazeuse pressurisée (environ 700 bars), sous forme liquide (à une température de - 253 °C) ou bien sous forme solide à basse pression (grâce à l'utilisation de matériaux pouvant adsorber l'hydrogène) comme les hydrures métalliques.

Actuellement, le stockage de l'électricité sous forme hydrogène est en pleine phase de démonstration et d'expérimentation avec de nombreuses plates-formes expérimentales en Allemagne, au Canada, au Danemark, en France, en Norvège, en Thaïlande et en Nouvelle-Zélande. Différentes applications sont envisagées.

III.6.1 Différentes méthodes de stockage de l'hydrogène :

L'hydrogène a l'avantage de pouvoir être stocké sous différents états, parmi ces modes on a :

III.6.1.1 Stockage conventionnel

C'est le mode le plus utilisé. Il est surtout approprié pour de grandes quantités. Il Y'a deux méthodes différentes :

a) Stockage sous forme gazeuse :

La voie gazeuse est la plus simple et la plus répandue des technologies de stockage. Car l'hydrogène une fois produit se présente sous la forme gazeuse à la pression et température ambiante [32] [40].

L'hydrogène est contenu dans des réservoirs sous pression. Plus la pression est élevée, plus la quantité d'hydrogène stockée est grande. Les réservoirs actuellement développés fonctionnent avec des pressions maximales pouvant aller jusqu'à 700 bar.

Ainsi, à 700 bars, l'hydrogène possède une masse volumique de 42 kg/m³ contre 0.090 kg/m³ à pression et température normales. À cette pression, on peut stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 125 litres.

Parmi les inconvénients de cette technique il y a :

- La faible densité volumétrique.
- La nécessité de concevoir des réservoirs résistants aux chocs et adaptables aux véhicules pour les applications embarquées.
- La consommation d'énergie liée à la compression.

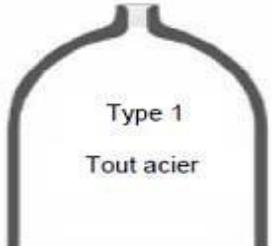
➤ Constitution d'un réservoir à hydrogène :

Les risques liés aux réservoirs à hydrogène sont très importants et constituent la première des priorités des industriels. Un réservoir à hydrogène est construit de plusieurs couches :

- **Une enveloppe interne étanche** (aussi appelé liner) : Elle a pour rôle de rendre le réservoir étanche à l'hydrogène et doit également répondre à une certaine élasticité.
- **Une couche de renfort** : Généralement constituée de fibre de verre ou fibre de carbone, c'est elle qui va être amenée à supporter la pression au sein du réservoir.
- **Une couche de protection** : Elle peut être de plusieurs matériaux différents (fibre de carbone, fibre de verre, polymères, structure en mousse, résines...). Cette couche ne sert pas à retenir l'hydrogène mais à protéger le réservoir de l'environnement extérieur.

Des tests très poussés concernant la résistance du réservoir doivent être effectués en cas de choc violent. Il faut également que cette couche assure une excellente protection contre l'humidité. En effet, la corrosion peut endommager la structure si celle-ci est en métal.

Les types des réservoirs : Il existe 4 types de réservoirs :

 <p>Type 1 Tout acier</p>	 <p>Réservoir tout</p>	<p>Type I : Ils sont entièrement métalliques, le métal assurant la structuration et l'étanchéité du réservoir. Les pressions maximales ne dépassent généralement pas 250 bar pour des applications mobiles et peut atteindre des pressions supérieures sur des stockages stationnaires.</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

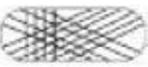
 <p style="text-align: center;">Type 2 Acier avec renfort composite circonférentiel</p>	 <p>Liner métallique Bobinage composite « hoop Wrap »</p>	<p>Type II : Ce type de réservoir est fabriqué en métal entouré par un cylindre de filament autour de la virole de l'enveloppe métallique. Les réservoirs construits en métal-fibre permettent un stockage d'hydrogène jusqu'à une pression de 850 bar.</p>
 <p style="text-align: center;">Type 3 Liner acier avec renfort composite complet</p>	 <p>Liner métallique Bobinage « fully Wrap »</p>	<p>Type III : Le réservoir de type III est composé de matériaux composites entourant un liner (enveloppe interne) en métal. Les composites sont généralement basés sur des fibres d'aramide ou de verre. Des pressions de l'ordre de 350 bars sont couramment atteintes. Des réservoirs de type III à 700 bar existent en fibre de carbone. Ceux-ci présentent cependant encore parfois une tenue au cyclage de pression insuffisante, ce qui peut être un obstacle à leur homologation pour utilisation dans les véhicules.</p>
 <p style="text-align: center;">Type 4 Liner composite avec renfort composite</p>	 <p>Liner plastique Bobinage « fully Wrap »</p>	<p>Type IV : Le réservoir de type IV est fabriqué sur un bobinage tournant avec des matériaux composites comme la fibre de carbone sur un liner aussi en polymère (polyéthylène, polyamide). Le liner est en général produit par injection-soufflage ou par roto-moulage. Ce type de réservoir peut stocker l'hydrogène jusqu'à une pression de 1000 bar.</p>

Tableau III.3 : Evolution des réservoirs de stockage d'hydrogène par compression [36]

b) Stockage sous forme liquide :

Une autre méthode pour augmenter la densité volumétrique de l'hydrogène consiste à le liquéfier en le refroidissant à 20K (-253 °C) [41]. Le processus de liquéfaction consiste à refroidir l'hydrogène gazeux à une température inférieure à -253 °C en utilisant de l'azote liquide et une série d'étapes de compression et d'expansion.

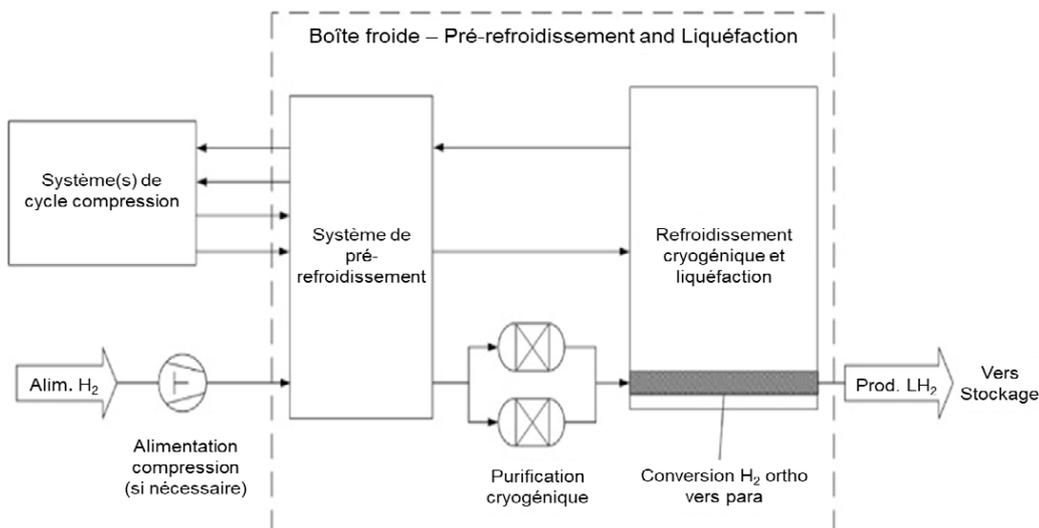


Figure III.11 : Diagramme simplifié du processus de liquéfaction de l'hydrogène

En comparaison avec l'hydrogène comprimé à 700 bars qui présente une capacité volumique de 42 kg.m^{-3} , l'hydrogène liquide possède une capacité massique de 70 kg.m^{-3} [32]. A cette pression on peut stocker 5kg d'hydrogène dans un réservoir de 75 litres.

Comme dans le cas des autres gaz liquéfiés, il est essentiel de minimiser l'évaporation de l'hydrogène liquide lors de son stockage. La raison n'est pas tant de contrôler la perte de l'énergie dépensée pour liquéfier l'hydrogène que d'éviter l'accumulation de pression à l'intérieur du récipient de stockage en évacuant l'hydrogène gazeux produit par son ébullition. La perte d'hydrogène stocké, également appelée « boil-off », est l'un des principaux inconvénients de la méthode de stockage du sous forme liquide. Le taux d'évaporation peut être réduit par des modifications appropriées pour minimiser le transfert de chaleur à travers les parois du réservoir. Les réservoirs d'hydrogène liquide sont généralement des réservoirs sphériques à double parois; les parois interne et externe sont séparées par un vide et cet espace contient divers matériaux, notamment de l'aluminium, de la silice, des particules de perlite, des couches alternées de feuilles d'aluminium et de fibres de verre ou des feuilles de polyester recouvertes d'alumine. L'énergie requise pour liquéfier l'hydrogène consomme environ 30% du contenu énergétique du gaz. Les réservoirs d'hydrogène sous forme liquide ne sont en général pas très résistants aux chocs mécaniques, cela pose d'importants problèmes de sécurité [41] [32].

Le stockage de l'hydrogène sous forme liquide est pour l'instant réservé à certaines applications particulières de très hautes technologies comme la propulsion spatiale. Par exemple, les réservoirs de la fusée Ariane, conçus et fabriqués par Air Liquide, contiennent les 28 tonnes d'hydrogène liquide qui vont alimenter son moteur central. Ces réservoirs sont une

véritable prouesse technologique : ils ne pèsent que 5,5 tonnes à vide et leur paroi ne dépasse pas 1,3 mm d'épaisseur.

Figure III.12 : Réservoir d'hydrogène liquide à -253°C

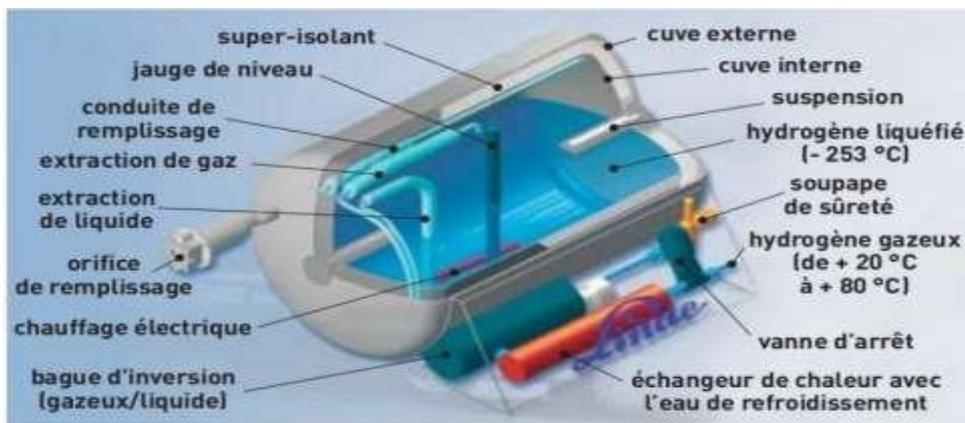
III.6.1.2 Stockage sous forme solide

Contrairement à ce que son nom indique, le stockage solide de l'hydrogène ne fait pas intervenir la forme solide de ce dernier [32]. L'hydrogène apparaît comme un invité chez un hôte qui est sous forme solide, c'est-à-dire conservé au sein d'un autre matériau.

Le stockage sous forme solide de l'hydrogène est possible à travers deux procédés différents l'adsorption et l'absorption :

a) Stockage par adsorption :

La physisorption est un phénomène physique où les molécules d'un élément forment des liaisons électriques (interactions de Van der Waals) avec un solide. Le fluide reste cependant uniquement sur la surface ou dans les pores du matériau adsorbant dans le cas de l'adsorption. La caractéristique principale de ce procédé est sa capacité à être totalement réversible. Cependant,



pour obtenir une adsorption élevée, la physisorption doit être effectuée à des pressions élevées et à des températures avoisinantes l'azote liquide (77K).

Le matériau le plus à même d'adsorber l'hydrogène est le charbon actif combiné à du graphite. Ce matériau permet de créer un réseau de pores pouvant fournir une surface de plusieurs milliers de m^2 contenu dans un gramme de charbon actif.

Malgré tout, stocker de l'hydrogène avec du charbon actif n'est pas très intéressant pour un usage pratique car, à température ambiante, la proportion d'hydrogène est seulement de l'ordre de 2%.

Des études sont menées pour améliorer les capacités de stockage de cette technique en utilisant des nanotubes de carbone. Cette structure augmente la densité d'adsorbant et par conséquent, la surface sur laquelle l'hydrogène peut être adsorbé. Pour une surface de 3 000m²/g, on atteint une proportion de l'ordre de 6% d'hydrogène.

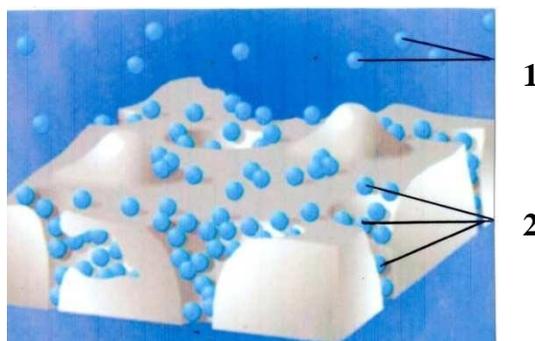


Figure III.13 : Modélisation de la physisorption [42]

1: molécules libres (phase gazeuse).

2 : molécules adsorbées en surface et dans les pores (phase adsorbée).

b) Le stockage dans les hydrures ou stockage par absorption :

La chimisorption est un processus réversible qui a la particularité de combiner chimiquement un élément avec un matériau. En général ces matériaux sont de nature métallique dans le cas de l'absorption de l'hydrogène. On retrouve principalement du vanadium, du palladium et du magnésium pour leur grande capacité à stocker l'hydrogène. Cette combinaison donnera ce qu'on appelle des hydrures métalliques ou des complexes hydrogène-métal.

L'absorption diffère de l'adsorption par sa capacité à accueillir l'hydrogène au sein du matériau solide. La capacité de stockage est pour certains métaux, si grande que la quantité d'hydrogène présente dans 1cm³ d'hydrure peut doubler celle contenu dans 1cm³ d'hydrogène liquide. Malheureusement, cela ne dépasse rarement les 10% de la masse total de la combinaison hydrure métallique.

Pour permettre au matériau adsorbant d'effectuer plusieurs cycles de charge/décharge, l'hydrogène qu'il doit contenir doit être le plus pur possible pour ne pas le dégrader prématurément.

C'est peut-être la méthode de stockage d'hydrogène la plus prometteuse car il est possible de stocker une grande quantité d'hydrogène dans un volume relativement faible. L'intérêt d'utiliser les hydrures métalliques pour stocker l'hydrogène est de minimiser le risque de manipuler de grandes quantités de cet élément très réactif. Les hydrures métalliques ont une densité volumique de stockage supérieure à celle de l'hydrogène liquide, ce qui rend le stockage de l'hydrogène sous forme d'hydrure un moyen viable pour le développement futur de l'hydrogène en tant que combustible.

Cette méthode a comme autres avantages le fait que les pressions mises en jeu à température ambiante, sont relativement faibles et que l'hydrogène obtenu est très pur [39]. Parmi les inconvénients de ce mode nous pouvons citer :

- La capacité qui est encore limitée.
- La cinétique de remplissage est lente à basse température.
- Le coût est élevé pour certains métaux.

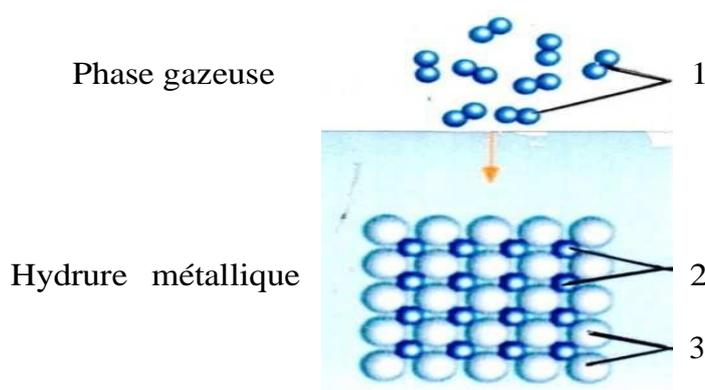


Figure III.14 : Modélisation de la chimisorption [42]

- 1 : molécules d'hydrogène.
2 : atomes d'hydrogène liés aux atomes du métal.
3 : atomes du métal.

❖ Exemple du stockage d'hydrogène sous hydrure métallique :

Il y a une décennie, une équipe de l'Institut Néel du CNRS [voire Annexe 1] à Grenoble a permis de réaliser des progrès décisifs. Elle a mis au point un procédé de fabrication par micro broyage d'un mélange de poudres nanostructurées d'hydrure de magnésium et de métaux de

transition présentant des cinétiques d'adsorption et de désorption suffisamment rapides pour une application au stockage de l'hydrogène avec une performance de 7,6% massique [42]. Ces poudres sont ensuite mélangées à du graphite expansé et l'ensemble est compacté sous forme de galettes (diamètre 50cm épaisseur 2 cm, contenant chacune 0,6 Nm³, soit 50g, d'hydrogène). Ces



dernières sont empilées dans les cylindres de stockage thermiquement isolés. De plus, grâce à l'énergie de changement de phase solide-liquide d'un mélange eutectique intégré au module de stockage (fig III.15), ont pu être pris en compte les effets thermiques liés à l'absorption et à la désorption. L'hydruration est en effet fortement exothermique et la chaleur produite nécessite d'être évacuée. A l'inverse, la déhydruration est endothermique et nécessite un apport de chaleur. Les températures optimales de la réaction d'hydruration se situent entre 350 et 370°C pour des pressions allant de 0,1 à 1 MPa.

L'un des intérêts de ce procédé est qu'il permet de stocker des dizaines, voire des centaines de kg d'hydrogène sans le risque que présenteraient ces mêmes quantités sous forme d'hydrogène gazeux à haute pression.

L'ensemble de ces travaux a donné lieu à des prises de brevets et en 2018 à la création de la Société « McPhy Energy » [Voir Annexe 2] devenue depuis l'une des spécialistes mondiales de ce type de stockage solide de l'hydrogène.

Figure III.15 : Galette à base d'hydrure de magnésium

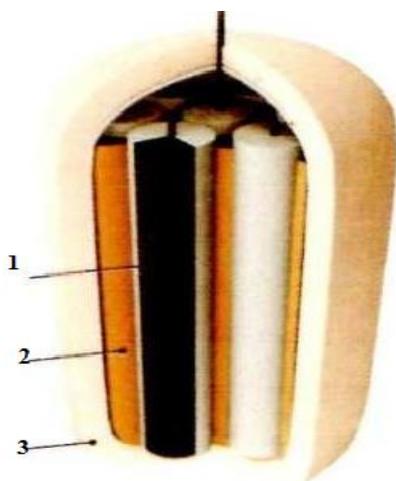


Figure III.16 : Colonne de stockage

1 : empilement de galettes.

2 : module à changement de phase régulant les échanges thermiques lors de l'absorption et de la désorption de l'hydrogène.

3 : isolation thermique.



Figure III.17 : Unité autonome (adiabatique) de stockage à hydrure de magnésium

- Ensemble de colonnes à empilement de galettes, capacité 70 kg d'hydrogène soit un stockage d'énergie de 2.3 MWh

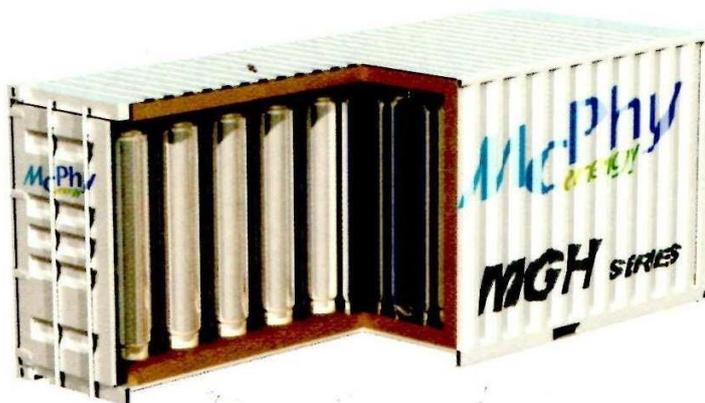


Figure III.18 : Stockage d'hydrogène McPhy avec échangeur de chaleur extérieur

- Pouvant être utilisé en cogénération avec un fluide caloporteur, capacité 700 kg d'hydrogène correspondant à une énergie de 23 MWh).

III.6.2 Comparaison des différentes méthodes de stockage de l'hydrogène :

L'hydrogène est un gaz extrêmement léger et inflammable. Les consignes de sécurité mises en place par les différents pays sont très strictes. Les infrastructures de stockage d'hydrogène sous forme comprimé et liquéfié sont de moins en moins acceptées dans les environnements urbains. D'autre part, le stockage solide sous forme d'hydrure métallique offre une capacité

volumique beaucoup plus élevée que le gaz comprimé ou liquide permettant de stocker plus d'hydrogène pour un volume équivalent [43].

Cependant le coût d'un réservoir utilisant les hydrures métalliques reste très élevé dû au prix de vente des matériaux mis en œuvre. Un compromis entre performances et coût est alors à trouver.

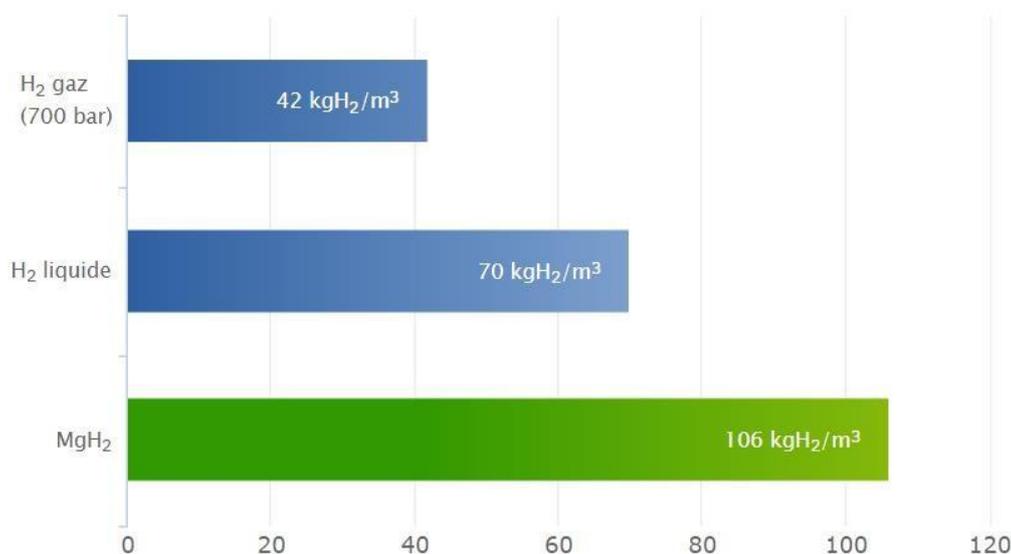


Figure III.19 : Capacité volumique des différentes techniques de stockage de l'hydrogène

Le tableau III.4 ci-dessous, présente une synthèse des caractéristiques des différents modes de stockage de l'hydrogène :

	Stockage gazeux	Stockage liquide	Stockage solide
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Coûts en capital (compresseurs) • Utilisation flexible à plusieurs échelles • Technologie maîtrisée 	<ul style="list-style-type: none"> • Meilleure densité énergétique que le stockage gazeux • Fortes économies d'échelle • Technologie maîtrisée 	<ul style="list-style-type: none"> • Densité énergétique par volume (température et pression ambiantes) • Sûreté • Pureté du gaz livré • Température et pression de fonctionnement proches de l'état standard
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Faible densité énergétique • Coûts de capital plus élevés des conteneurs en comparaison avec le stockage liquide • Sécurité des bouteilles à haute pression à bord des véhicules 	<ul style="list-style-type: none"> • Température très basse (-253 °C) • Forts coûts en capital au niveau de la liquéfaction • Large apport d'électricité pour la liquéfaction (grande consommation d'énergie) • Difficulté d'isolation 	<ul style="list-style-type: none"> • Lourd • Forts coûts en capital • Pas d'économies d'échelle • Gestion des flux de chaleurs • une très grande sensibilité à l'humidité

		<ul style="list-style-type: none"> • Perte d'hydrogène par évaporation « Boil off » 	
--	--	----------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Tableau III.4 : Synthèse des caractéristiques des différents modes de stockage de l'hydrogène

Le tableau III.5 ci-dessous donne une comparaison entre les trois méthodes de stockage :

Etat	Pression (bar)	Température (°C)	Capacité (kg/m ³) matériau	Sécurité
Gaz comprimé	350 – 700	25°C	45	Haute pression
Liquide cryogénique	1	-253°C	70	Cryogénique évaporation
Solide (Hydrures métalliques)	1-10	25°C	100	Basse pression

Tableau III.5 : Comparaison entre les trois méthodes de stockage

A travers le tableau ci-dessus, il est clair que les solides (hydrures métalliques) sont les meilleures pour le stockage de l'hydrogène, soit pour la quantité stockée, soit pour la sécurité (basses pressions et températures modérées).

III.7 Le stockage souterrain de l'hydrogène :

Face à la hausse à venir de la demande en stockage d'hydrogène, le stockage souterrain peut apporter une réponse pertinente à nos besoins futurs. En effet, cette technique présente trois avantages majeurs au niveau de l'économie, de l'environnement et de la sûreté :

- Économie : le stockage souterrain permet de stocker en grande quantité, jusqu'à 4 000 tonnes d'hydrogène par cavité. Cette technique ne demande pas de maintenance particulière, ce qui réduit les coûts.
- Environnement : l'empreinte au sol et l'impact visuel du stockage souterrain sont très réduits.
- Sûreté et sécurité : à partir de 50m de profondeur, les cavités sont peu sensibles à la sismicité. Il y a donc peu de risques que l'hydrogène s'échappe via l'apparition de

fissures. De plus, la faible empreinte au sol des équipements limite la possibilité d'actes malveillants.

Il existe actuellement trois grandes techniques de stockage de l'hydrogène dans le sol, assez proche des techniques de stockage du gaz :

- **Le stockage dans des cavités salines** : Il s'agit de créer une cavité souterraine en introduisant de l'eau douce dans les sols. L'eau douce va permettre de dissoudre une partie de la roche et ainsi former une cavité, où il sera possible d'injecter de l'hydrogène. Il en existe 6 pour l'instant dans le monde.

- **Avantages :**

- Propriétés du sel.
- Un seul forage nécessaire.
- Abondance du sel.
- Simplicité de la technique

- **Inconvénients :**

- Volumes stockés plus petits qu'en aquifère.
- Temps de lessivage important.

- **Le stockage en aquifères** : Cela consiste à profiter de gisements épuisés de gaz naturels et de pétrole pour y injecter de l'hydrogène.

- **Avantages :**

- Réservoir naturel fiable.
- Géologie déjà connue.
- Équipements déjà en place.

- **Inconvénients :**

- Pas très répandus sur les continents.

- **Le stockage en cavités minées**. Il s'agit de profiter de galeries minières déjà existantes ou de créer des galeries pour stocker de l'hydrogène.

- **Avantages :**

- Utilisable en l'absence des autres possibilités de stockage.

- **Inconvénients :**

- Technique coûteuse (excavation, pose du liner).
- Technique plutôt récente.

Le bénéfice de cette technique qu'elle ne présente pas de verrou technologique. Il existe déjà 1 900 cavités salines dans le monde dont 6 sont utilisées pour le stockage hydrogène, et 80 en France. C'est donc la solution la plus susceptible de passer à l'échelle supérieure. Selon les estimations mentionnées plus haut, pour stocker 5% de nos consommations en hydrogène à horizon 2030, il faudrait 20 à 40 cavités en France, 125 à 250 en Europe et 200 à 600 dans le monde [44- 45].

III.8 Transport de l'hydrogène :

Le transport de l'hydrogène, une fois produit et stocké, se fait généralement par camion ou par pipeline.

➤ Transport par camion :

L'utilisation du camion, adapté pour les petites quantités, permet de transporter l'hydrogène sous deux formes principales :

La première, concerne l'utilisation de structures métalliques appelées cadres contenant plusieurs bouteilles reliées entre elles avec une seule sortie. Ces cadres peuvent individuellement emmagasiner au total environ 8 kg à plusieurs dizaines de kilogrammes d'hydrogène gazeux [40]. De plus, une fois livrés à la station-service de distribution, ils se connectent directement aux lignes d'alimentations gazeuses de la station. La figure (III.20) présente un exemple de cadres contenant des bouteilles d'hydrogène interconnectées.



Figure III.20 : Exemple de cadres de neuf bouteilles

La deuxième forme est directement liée à l'utilisation de « grands cylindres, appelés aussi tubes, sur une remorque contenant plusieurs centaines de kilos d'hydrogène (de 180 à 500 kg) ».

Une fois sur le site de la station-service de distribution, l'hydrogène contenu dans les tubes est transféré dans un réservoir fixe préalablement installé.

➤ **Transport par pipeline :**

Le transport par pipeline est généralement réservé pour les grandes quantités d'hydrogène gazeux. Bien que le coût d'investissement dans ce type d'infrastructure soit très élevé, le transport par pipeline « s'avère être le plus économique et sera probablement amené à connaître une forte croissance dans l'avenir. Par ailleurs, à défaut de l'existence d'une infrastructure dédiée uniquement au transport de l'hydrogène, ce gaz pourrait être transporté en le mélangeant avec le gaz naturel dans son réseau de transport; cela nécessiterait par exemple « des opérations en début et fin de réseau pour mélanger et récupérer l'hydrogène ». Ainsi, selon certaines études menées en Europe, le mélange des deux gaz (hydrogène et gaz naturel) pourrait être réalisé lors du transport, par pipeline, avec des proportions maximales de 20 % en concentration d'hydrogène.

III.9 Risques industriels de l'hydrogène :

En milieu industriel, l'hydrogène est produit en grande quantité. Mais l'hydrogène est un gaz qui présente de nombreux risques liés à sa manipulation et à son stockage. Plusieurs accidents graves impliquant de l'hydrogène ont eu lieu sur des sites industriels. De plus, les risques liés à l'hydrogène sont variés à cause de ses nombreuses propriétés. Les industriels doivent donc mettre en place des mesures de sécurité et de prévention afin d'éviter tout accident.

Les secteurs d'activités principalement touchés par des accidents liés à l'hydrogène sont la chimie et le raffinage du pétrole.

Les trois principaux facteurs de dangers sont les suivants :

➤ Les risques de fuite :

L'hydrogène est un atome de très petite taille (son rayon atomique est de 0,12 nm) et qui est perméable à de nombreux matériaux. Il présente donc une forte propension à fuir, bien plus importante que les autres combustibles. De plus, l'hydrogène étant très léger, il se diffuse très rapidement dans l'air à une vitesse de 0,61 cm²/s. Il s'accumule donc très vite dans une pièce.

➤ Les risques d'incendie :

L'hydrogène est un élément qui s'enflamme très facilement. En effet, il nécessite 10 fois moins d'énergie que les gaz naturels pour s'enflammer. Son énergie d'inflammation est faible : 20 mJ contre 250 mJ pour le propane et 290 mJ pour le méthane. De plus sa vitesse de combustion est élevée variant de 265 à 325 cm/s. Les incendies se propagent donc rapidement. Les incendies sont l'un des principaux risques liés à l'utilisation de l'hydrogène puisque 84% des accidents liés à l'hydrogène impliquent des incendies ou des explosions. Les incendies liés à ce gaz deviennent probables lorsque l'air ambiant contient entre 4 et 8% d'hydrogène. Celui-ci a alors de grandes chances de prendre feu s'il est mis au contact d'une source d'inflammation. De plus, la flamme d'hydrogène est dangereuse car elle est peu visible.

➤ Les risques d'explosion :

La molécule de H₂ possède une faculté à détoner importante. L'hydrogène présente un très large domaine d'explosivité. Ce domaine est délimité par la limite inférieure d'explosivité (LIE) et par la limite supérieure d'explosivité (LSE). Ce domaine contient l'ensemble des concentrations d'hydrogène dans l'air pour lesquelles ce gaz est susceptible de s'enflammer ou d'exploser. Pour l'hydrogène, la LIE est de 4% et sa LSE est de 75%. Ainsi, l'hydrogène est susceptible d'exploser si son pourcentage volumique dans l'air est compris entre 4% et 75%. La particularité des accidents impliquant l'hydrogène est qu'ils ont souvent des conséquences graves. Les dégâts peuvent être matériels mais parfois ils sont également humains avec de nombreux blessés et même des morts.

Tous les risques énoncés ci-dessus sont aussi à prendre en compte lors de la manipulation et du stockage de l'hydrogène dans les nouveaux domaines qui l'utilisent. Par exemple, pour les voitures à hydrogène l'enjeu est que les bonbonnes d'hydrogène soient suffisamment étanches pour éviter les fuites mais qu'en cas de choc violent, elles libèrent rapidement l'hydrogène pour éviter un incendie ou une explosion.

III.10 Conclusion :

L'hydrogène est l'un des moyens de stockage de l'énergie photovoltaïque le plus prometteur, il permettra de stocker l'électricité produite par le solaire de manière faire à coïncider l'offre et la demande et ouvrira des nouvelles perspectives pour l'autoconsommation de l'énergie solaire.

Le stockage de l'hydrogène gazeux sous pression élevée est essentiellement pénalisé par la faible valeur de la capacité massique et volumique relative à ce système. A cela s'ajoutent les risques qui accompagnent l'emploi de pressions élevées. Sous forme liquide, l'hydrogène est

aussi un bon moyen de stockage mais il devient difficilement utilisable à cause des dangers qu'il présente (pertes constantes) et du coût de sa liquéfaction. La surveillance permanente dont il doit être l'objet, limite son emploi à des usages très particuliers.

Ce sont finalement les hydrures métalliques qui semblent pouvoir satisfaire au mieux les exigences que requiert ce type de stockage. Étant donné qu'aucun des hydrures déjà connus ne réunit toutes les qualités nécessaires, il est donc indispensable d'en modifier les caractéristiques en les adaptant aux spécifications qui leur sont imposées, notamment en ce qui concerne :

- Leur capacité massique de stockage.
- Leur température de désorption.
- Leur enthalpie de décomposition.
- La cinétique d'échange.

Un avantage déterminant qui présente ce mode de stockage réside dans une plus grande sécurité d'emploi, car en cas de rupture du réservoir, la réaction endothermique de désorption provoque un refroidissement rapide de la masse d'hydrure, ce qui réduit à la fois la pression d'équilibre et la vitesse de la réaction de décomposition.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Les technologies de production de l'électricité à base d'énergie solaire connaissent un développement soutenu depuis une vingtaine d'années. Ce développement est lié à un fort engouement pour les énergies renouvelables dans un contexte mondial de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Au terme de ce modeste travail on peut dire que notre contribution a été axée sur plusieurs aspects: Tout d'abord, nous avons présenté des notions de base sur l'énergie tel que le rayonnement solaire et des états de l'art sur les différentes filières technologiques des panneaux solaires tant que les systèmes PV permettent d'exploiter l'énergie du soleil, il sont très fiables et constituent une source non polluante d'électricité qui peut convenir à toute une gamme d'applications.

Ensuite, le stockage d'énergie est donc une solution possible pouvant être mise en œuvre pour gérer les intermittences et garantir la stabilité sur les réseaux. C'est également une opportunité économique pour:

- Réguler la volatilité du marché de l'électricité.
- Réduire les coûts de consommation d'électricité.
- Améliorer le rendement du parc de production d'électricité renouvelable (solaire)

La dernière partie de ce travail a été consacrée au stockage de l'hydrogène, qui est l'une des sources d'énergie les plus importantes du futur. La possibilité du stockage de l'hydrogène sous une forme solide semble techniquement difficile du fait de la température de liquéfaction très basse. Cependant, la sélection de l'un des trois processus de stockage à savoir : gaz comprimé, liquéfaction cryogénique, hydrures métalliques montre que les hydrures sont le bon choix. Cette méthode permet aux utilisateurs d'hydrogène industriel de :

- Réduire les risques industriels grâce à un stockage plus sécurisé.
- Réduire la consommation d'énergie sachant que le stockage de l'hydrogène consomme traditionnellement jusqu'à 33% de l'énergie contenue dans le gaz.
- Réduire les émissions de CO₂ et l'empreinte écologique.

Bibliographie

- [1]: OUBAZIZ Jugurta Saïd, MONATY IBANDZO Loucresh Yionel, Modélisation des performances d'un panneau photovoltaïque (MINI-EESF), Mémoire de fin d'études, Spécialité : Energétique et environnement, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES, 2016/2017.
- [2]: Hicham Bahtoun, ETUDE DES DIFFERENTS MONTAGES ET DIFFERENTS BRANCHEMENT DES PANNEAUX SOLAIRES, Mémoire Pour l'obtention du diplôme de Master en physique, Option : science des matériaux, UNIVERSITE L'ARBI BEN M'HIDI (OUM EL BOUAGHI), Soutenu le: 04/06/2014
- [3]: BOUZEGANE Mhenna, GAOUAOUI Ferhat, Alimentation d'un moteur à courant continu par une source photovoltaïque, Mémoire de Fin d'Etudes, Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 26 septembre 2018.
- [4]: ARBOUZ Brahim, BENHAMADA Ali, Conception et réalisation d'un dispositif mobile de l'énergie solaire photovoltaïque, Mémoire de fin d'études, Spécialité : Énergétique, Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana, 07/07/2019
- [5]: BIDI Manel, Conception d'une centrale photovoltaïque pour recharge de voitures, MEMOIRE DE FIN D'ETUDE, Option : Energétique, Université de M'sila, 26 juin 2019.
- [6]: KHECHAFI Sofiane, BENLAACHI Salah, Calcul et dimensionnement électrique d'une mini centrale photovoltaïque autonome, Mémoire de fin d'étude, Spécialité : énergie et environnement, ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES, T L E M C E N, 09 / 07 / 2019.
- [7]: M.SLAMA Fateh, Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique, Mémoire de magister en Électrotechnique, option: Réseau électriques, université Ferhat Abbas Setif le 01/04/2011.
- [8]: BENMEZIANE Yanis, BOURENANE Zakaria, Réalisation d'une interface web pour le dimensionnement des installations photovoltaïques autonomes, Projet de Fin d'Etude, spécialité : Électromécanique, Université A.MIRA-BEJAIA, 2019/2020.
- [9]: Djerrar Mohammed Al Amine, Étude comparative des dataloggers dédiés aux systèmes photovoltaïques, Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master, spécialité : Mesure-Analyse-Qualité, institut de maintenance et de sécurité industrielle, juin 2016.
- [10]: Mr.Boukhelifa Hamza, Dimensionnement technique d'une installation photovoltaïque De 300kw, Mémoire de master en Génie Electrique Option : Machines Electriques, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, promotion 2017.

[11]: AYACHI Méroïan, HAMDOUN Omar, ETUDE COMPARATIVE ENTRE DIFFERENTS MODELES ELECTRIQUES PHOTOVOLTAIQUES, MEMOIRE DE FIN D'ETUDES,

Spécialité : GENIE ELECTRIQUE, UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI DE OUM EL BOUAGHI, le 27 juin 2012.

[12]: I. BABOSELAC, Ž.HEDERÍĆ, T. BENŠIĆ, MATLAB SIMULATION MODEL FOR DYNAMIC MODE OF THE LITHIUM-ION BATTERIES TO POWER THE EV, Original scientific article, 2017.

[13]: Chiranjeevi Mondru, D.V. Ashok Kumar, R. Kiranmayi, Batteries Comparative Analysis and their Dynamic Model for Electric Vehicular Technology, International Journal of Pure and Applied Mathematics Volume 114 No. 7 2017, 629-637

[14]: E. Korsaga, Z. Koalaga, D. Bonkougou, F. Zougmoré, Comparaison et détermination des dispositifs de stockage appropriés pour un système photovoltaïque autonome en zone sahélienne, journal international de technologie, de l'innovation, de la physique, de l'énergie et de l'environnement, Laboratoire de Matériaux et Environnement, Burkina Faso, 2018

[15]: M. A. Camara (2011) « Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par super condensateurs », Thèse de doctorat, 'Université Paris Est Créteil.

[16]: Nathalie Devillers, Caractérisation et modélisation de composants de stockage électrochimique et électrostatique, Thèse de Doctorat, Spécialité : Génie Electrique, 26 juin 2013

[17]: Boudia Assam, Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec un système de stockage à base d'une inductance supraconductrice (SMES), Thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, Spécialité : Electrotechnique, 15/11/2020

[18]: A. Mohammedi, D. Rekioua, T. Rekioua, and S. Bacha, "Valve Regulated Lead Acid battery behavior in a renewable energy system under an ideal Mediterranean climate," J International Journal of Hydrogen Energy, vol. 41, no. 45, pp. 20928-20938, 2016.

[19]: R. Kempener, A. Borden, Abu Dhabi, "Battery storage for renewables: Market status and technology outlook," J International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, p. 32, 2015.

[20]: H. Chen, T. Cong, and W Yang, "Tan Ch., Li Y, Ding Y: Progress in electrical energy storage system: A critical review.,," J Progress 0in natural science, vol. 19, no. 3, pp. 291-312, 2009.

- [21]: J. Gustavsson « Energy storage technology comparison » Bachelor of science thesis, KTH School of industrial engineering and management, 2016
- [22] : H. Ibrahim (2010) « Etude et conception d'un générateur hybride d'électricité de type éolien-diesel avec élément de stockage d'air comprimé » Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi.
- [23] : J.I. S. Martín, I. Zamora, J.J. S. Martín, V. Aperribay, P. Eguía (2011) « Energy storage technologies for electric applications » RE&PQJ, Vol.1, No .9, pp. 593-598.
- [24]: T. Desrues « Stockage massif d'électricité sous forme thermique », Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2011
- [25] : G.Dillenseger, Caractérisation de nouveaux modes de maintien en charge pour batteries stationnaires de secours, Thèse de doctorat, 14 décembre 2004
- [26] : A. EDDAHECH « Modélisation du vieillissement et détermination de l'état de santé de batteries lithium-ion pour application véhicule électrique et hybride » thèse de doctorat, 12 décembre 2013
- [27]: H.Ibrahim, M.Dimitrova, Y.Dutil, D. Rouse, A.Ilinca, J.Perron « Wind-Diesel hybrid system: energy storage system selection method », the 12th International Conference on Energy Storage, 2012.
- [28]: H. Ibrahim, M. Dimitrova, D. Rouse, A. Ilinca, J. Perron « Générateur éolien diesel avec stockage d'énergie : critères de choix du système de stockage », 2011.
- [29] : M.Bekkouche, M.Khemais, Etude de la Nature d'Eau d'El Oued sur l'Electrolyse, Mémoire de fin d'étude, Filière : Génie mécanique Spécialité : Energétique, 2017-2018.
- [30] : M.Abdelhamid, Étude de la production d'hydrogène par des sources renouvelables, DOCTORAT EN SCIENCES, TLEMCEN, 18 octobre 2018
- [31] : Rodrigo Rivera-Tinoco, Etude technico-économique de la production d'hydrogène à partir de l'électrolyse haute température pour différentes sources d'énergie thermique, Thèse l'école Nationale supérieure des mines de Paris 30 Mars 2009.
- [32] : AIT MAHREZ Sofiane, ADJEROUD Bilal, Gestion optimale d'énergie d'un système PV/PAC avec stockage d'hydrogène, Université Saâd Dahleb, Blida-1, Spécialité : énergies renouvelables, 15/09/2020
- [33] : Jean-Louis DURVILLE, Jean-Claude GAZEAU, Jean-Michel NATAF Jean CUEUGNIET, Benoît LEGAIT, Rapport du Développement durable et de l'Énergie Septembre 2015

- [34] : KORBAA Fatima, Etude de l'influence de la température d'hydrogène sur la tension de la pile à combustible (PAC), Mémoire de fin d'études, 22/10/2019
- [35] : Valérie DE DIANOUS, Sylvaine PIQUE, Benno WEINBERGER, Etude comparative des réglementations, guides et normes concernant les électrolyseurs et le stockage d'hydrogène, RAPPORT D'ETUDE, 15/03/2016.
- [36] : Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, Source : AFHYPAC : Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible, janvier 2017
- [37] : Gilles L. Bourque Noël Fagaoga, L'hydrogène, un vecteur énergétique pour la transition, Institut de recherche en économie contemporaine, Janvier 2020
- [38] : Nabil Bouazizi, Elaboration et caractérisations de nanoparticules supportées par des matériaux poreux pour le stockage de l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau, these de doctorat, Spécialité : Chimie, Université de Monastir Tunisie, 29/02/2016
- [39] : Daoui Cheikh Bouzid, Mohammed elamine, Etude de possibilité de stockage de l'hydrogène par adsorption solaire, Mémoire master académique, Spécialité : Génie Energétique, UNIVERSITE KASDI MERBAH D'OUARGLA, 28 Mai 2017
- [40] : O. Loko Kouamy, Usage de l'hydrogène pour l'alimentation des véhicules au Québec dans un contexte de développement durable, université de Sherbrooke, février 2019.
- [41] : M.NEISIANI, O.SAVADOGO, J.CHAOUKI, L.FRADETTE, A.TANGUY, Etude sur le potentiel technico-économique du développement de la filière de l'hydrogène au Québec et son potentiel pour la transition énergétique, Polytechnique Montréal 2020
- [42] : AFHYPAC, F.Lamari, P.Malbrunot, C.Lamy, Stockage solide de l'hydrogène, janvier 2018.
- [43] : Michel Latroche, Étude de l'influence d'éléments d'addition sur les propriétés de stockage de l'hydrogène dans le système Ti-V-Fe, Thèse présentée pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ PARIS-EST ,22 septembre 2016
- [44] : Leonard, Matthieu Lerondeau, Stockage et distribution - Les enjeux des infrastructures de l'hydrogène, compte-rendu de la conférence, France, 05/07/2021.
- [45] : Quentin Bérout, Paul Caron...., Stockage d'hydrogène en cavités salines, Mines de Paris, 2018
- [46] : David Honoré, L'hydrogène vecteur énergétique du future, Projet de physique P6 STPI/P6/2018-5.6

Soleil, Disponible sur le site : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Soleil>, consulté le 14/05/2021

l'énergie solaire dans le monde, Disponible sur le site : <https://www.soltys.fr/fr/content/5-1-energie-solaire-dans-le-monde>, consulté le 16/05/2021

https://www.cea.fr/multimedia/Documents/infographies/posters/affiche_infographie_cea_cellules-photovolta%C3%AFques.pdf consulté le 20/05/2021.

Kristofer Espinosa , « **La cellule photovoltaïque** », **13 juin 2013**, Disponible sur le site : <https://blog.solorea.com/cellule-photovoltaique> consulté le 20/05/2021.

Synthese_Production_photovoltaique.pdf, Disponible sur le site : https://www.acclermont.fr/disciplines/fileadmin/user_upload/Technologie consulté le 22/05/2021

média web francophone, consulté le 22/05/2021, Disponible sur le site : <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaiques>

Solar Integration: Solar Energy and Storage Basics, Disponible sur le site : <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-integration-solar-energy-and-storage-basics>

Le stockage virtuel de l'électricité : comment ça marche ? Disponible sur le site : <https://www.insunwetrust.solar/blog/le-solaire-et-vous/stockage-virtuel-electricite/#fonctionnement>, 28 Mai 2021

What is Hydrogen Energy?, Disponible sur le site : https://www.conserve-energy-future.com/advantages_disadvantages_hydrogenenergy.php

Advantages and disadvantages of thermal energy, Disponible sur le site: <https://ventajasydesventajas.info/en/energy/benefits-of-thermal-energy/>

La production d'hydrogène au Canada, Disponible sur le site <https://www.rncan.gc.ca/nos-ressources-naturelles/sources-denergie-reseau-distribution/la-production-dhydrogene-au-canada/23153>

Service de physique de l'état condensé, Disponible sur le site : https://iramis.cea.fr/spec/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=fait_marquant&id_ast=2547

Produire de l'hydrogène vert sans électrolyseur : une avancée prometteuse dans la photo-électrolyse de l'eau, Disponible sur le site : <https://www.industrie-techno.com/article/vu-sur-le-web-produire-de-l-hydrogene-vert-sans-electrolyseur-une-avancee-prometteuse-dans-la-photo-electrolyse-de-l-eau.66074>

Comment l'hydrogène peut contribuer à stocker l'électricité à grande échelle, Disponible sur le site : <https://theconversation.com/comment-lhydrogene-peut-contribuer-a-stocker-lelectricite-a-grande-echelle-160307>

Stockage de l'hydrogène, Disponible sur le site : <https://www.ecosources.org/stockage-hydrogene>

Stocker l'hydrogène, Disponible sur le site : <https://energies.airliquide.com/fr/mediatheque-planete-hydrogene/comment-stocker-lhydrogene>

Annexe 1:**L’Institut Néel du CNRS:**

L’Institut Néel est un laboratoire de recherche en physique de la matière condensée situé à Grenoble qui dispose d’un effectif de 450 personnes dont 175 chercheurs et chercheurs enseignants. Son nom lui a été donné en l’honneur du scientifique Louis Néel, venu s’installer à Grenoble dès 1940 et devenu le principal instigateur du polygone scientifique de Grenoble à la fin des années 1950.

Il s’agit d’une unité propre de recherche du CNRS (UPR 2940) créée en 2007 par regroupement de quatre laboratoires de recherche : le Centre de recherches sur les très basses températures, le Laboratoire d’étude des propriétés électroniques des solides, le Laboratoire Louis-Néel et le Laboratoire de cristallographie.

Lors de la présentation du plan Quantique par Emmanuel Macron en janvier 2021, l’institut est présenté comme l’un des principaux acteurs français dans ce domaine de recherche.

Annexe 2:**La Société « McPhy Energy»:**

McPhy Energy (ou McPhy) est une entreprise française du secteur de l’énergie, développant des solutions de stockage d’énergie en utilisant l’hydrogène comme vecteur énergétique.

McPhy fournit des électrolyseurs pour produire l’hydrogène, à partir d’eau et de l’électricité prise sur le réseau ou au sortir de parc éoliens ou de centrales solaires (énergies renouvelables intermittentes). Ses électrolyseurs peuvent notamment équiper des points de livraison d’hydrogène ou un réseau météorologique.

En octobre 2020, le directeur général de McPhy Laurent Carme confirme que son modèle économique restera fondé à la fois sur la vente d’électrolyseurs et sur celle de stations de recharge