

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED– NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

## MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

**Énergie renouvelable**

*Option : Énergie renouvelable en électrotechnique*

Intitulé :

# Gestion D'énergie De Système Hybride Pile A Combustible-Batterie

Présenté par :

- Douina Chaimaa Ayêt errahmen
- Hamidi Fatima
- Hamoulia Fadhila

*Soutenu le : 29/06/2022 devant le Jury :*

<i>M. Taïbi bouziane</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>M. Toumi khalid</i>	<i>MCA</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>
<i>M. Brahimi.Mohammed</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>

# Remerciement

Nous remercions avant tous le Bon Dieu qu'il nous a aidé pour réaliser ce modeste travail

Nous remercions notre encadreur Mr: Brahimi Mohamed d'avoir accepté d'encadrer ce travail, de nous avoir orientées et soutenues, pour sa Collaboration effective et ses conseils judicieux et pour toute la rigueur qu'il a apportée. Nous tenons ensuite à remercier tous ceux et toutes celles qui nous ont apporté l'aide de près et de loin. Nos remerciements vont également à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation. Que Monsieur le Président et les membres du jury trouvent ici l'expression de notre gratitude et notre respect pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce modeste travail. Nous serons également très heureuses de toute remarque et suggestion qu'ils voudront bien nous soumettre.



# Dédicace

Je tiens avec grande plaisir à dédier ce modeste travail A ma famille, elle qui m'a doté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui  
A ma chère Maman et mon chère Papa pour l'effort qu'ils ont suscités en moi  
A toi mon chère mari Walid Benchohra ceci est ma profonde gratitude pour ton éternel amour, que ce rapport soit le meilleur cadeau que je puisse t'offrir.

A mon petit frère Mohammed et ma seule sœur Anfel qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études.  
A toute personne qui occupe une place dans mon cœur.

Je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite.

Douina Chaïmaa





A mon cher père Hamoulia Abd el Halim et  
ma chère mère Bellia Khadidja pour  
l'éducation et le grand amour dont ils m'ont  
entouré Et pour leur patience et leurs  
sacrifices.

A mes chères sœurs

(Amina, Fatima, Hadjer et zineb).

A mon cher frère Mohammed el Habib.

A mon cher marie Djebri Abd el wahab  
et sa famille.

A mes petites enfants

(Siradj, Sadjid, Sohaib, Tasnim, Ritelet Rihem).

A tous mes proches. A tous mes amis. A tous  
ce que j'aime. Cette thèse leurs est dédiée.

Fadhila Hamoulia





*Je dédie aux premières personnes dans le monde, les plus chères et les plus aimées, mes parents.*

*A mes frères et mes sœurs.*

*A tous ma famille.*

*A tous mes amies et collègue.*

HAMIDI FATIMA



# Résumée

Les énergies renouvelables sont de nos jours aux cœurs de l'actualité, elles sont perçues comme un moyen de promouvoir l'indépendance énergétique tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. La pile à combustible est une nouvelle source d'énergie fiable et renouvelable qui semble être une technologie prometteuse. La pile combustible est un système électrochimique qui convertit l'énergie chimique d'une réaction d'oxydoréduction en énergie électrique tout en produisant simultanément de l'eau et de la chaleur. En fait, il existe de nombreux type de piles à combustibles; néanmoins, dans notre thème on s'intéresse à étudier la pile à oxyde solide (SOFC) avec stockage.

En raison de l'analogie entre les domaines électrique, thermique et chimique, un outil de modélisation pour la SOFC a été développé dans le cadre de notre recherche. Cette méthode produit un outil simple, évolutif et efficace. A l'aide de ce modèle, une simulation a été effectuée à température constante pour obtenir les différentes caractéristiques et les effets des paramètres étudiés sur la performance de la pile à combustible SOFC.

En dépit du fait que la pile combustible a le potentiel de provoquer un changement dans le secteur de l'énergie, il y a encore un certain nombre de questions à résoudre avant qu'elle puisse être envisagée pour le développement et la commercialisation à grande échelle.

**Mots clé :** Energie renouvelable, Pile à combustible, SOFC, Modélisation, oxydoréduction, stockage.

### Abstract

Renewable energies are in the news these days as a way to promote energy independence while reducing greenhouse gas emissions. The fuel cell is a new, reliable and renewable energy source that appears to be a promising technology. The fuel cell is an electrochemical system that converts the chemical energy of a redox reaction into electrical energy while simultaneously producing water and heat. In fact, there are many types of fuel cells; however, in our topic we are interested in studying the solid oxide fuel cell (SOFC) with storage.

Because of the analogy between the electrical, thermal and chemical domains, a modeling tool for the SOFC has been developed in the context of our research. This method produces a simple, scalable and efficient tool. Using this model, a simulation was performed at constant temperature to obtain the different characteristics and effects of the studied parameters on the performance of the SOFC.

## Résumé

---

Despite the fact that the fuel cell has the potential to bring about a change in the energy sector, there are still a number of issues to be resolved before it can be considered for large-scale development and commercialization.

**Key words:** Renewable energy, Fuel cell, SOFC, Modeling, redox, storage.

### ملخص

إن الطاقات المتجددة في أوج ازدهارها في الوقت الحالي، ويُنظر إليها على أنها وسيلة لتعزيز استغلال الطاقة مع خفض انبعاثات الغازات المتسببة في التلوث و الاحتباس الحراري. خلية الوقود هي مصدر جديد للطاقة المتجددة يبدو أنها تقنية واعدة و هي عبارة عن نظام كهروكيميائي يحول الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية مع إنتاج الماء والحرارة في نفس الوقت. هنالك عدة أنواع لخلايا الوقود، لكن ينصب تركيزنا على خلية الأوكسيد الصلبة و لهذا تم العمل بمحاكاة في درجة حرارة ثابتة للحصول على خصائص وتأثيرات مختلفة على أداء الخلية.

على الرغم من أن خلية الوقود SOFC لديها القدرة على إحداث تغيير في مجال الطاقة، إلا أنه لا يزال هناك عدد من التساؤلات التي يجب حلها قبل النظر في تطويرها وتسويقها على نطاق أوسع .

**الكلمات المفتاحية :** الطاقات المتجددة ، خلية الوقود ، خلية الأوكسيد الصلبة ، المحاكاة ، الأكسدة و الأرجاع، التخزين.

# Table de matière

---

## Table de matière

Page de garde .....	i
Remerciement.....	iii
Dédicace.....	iii
Résumé.....	vi
Table des matières.....	viii
Liste des figures.....	xii
Liste des tableaux.....	xv
Liste des symboles.....	xvi
Liste des abréviations.....	xvii
Introduction générale.....	01
<b>Chapitre I : Etat de l'art sur les énergies renouvelables</b>	
I.1. Introduction.....	03
I.2. Production d'énergie renouvelable dans le monde.....	04
I.3. Production de l'énergie renouvelable en Algérie.....	06
I.4. Les sources d'énergies renouvelables.....	07
I.4.1. Energie hydroélectrique.....	07
I.4.2. L'énergie solaire.....	07
a) Energie solaire thermique.....	07
b) L'énergie photovoltaïque.....	09
b-1) Conversion photovoltaïque.....	09
b-2) Système photovoltaïque pour site isolés.....	10
b-3) Système photovoltaïque connecté au réseau.....	10
I.4.3. Energie éolienne.....	11
a) Système de conversion d'énergie éolienne.....	12
I.4.4. Energie Biomasse.....	12
I.4.5. Energie géothermique.....	13
I.4.6. Energies marine.....	14
I.5. Systèmes hybrides.....	15
I.5.1. La structure du système hybride.....	15
a) Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage.....	15
b) Système hybride éolien/stockage.....	16
c) Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage.....	16
I.6. Intégration des énergies renouvelables au réseau électrique.....	17

## Table de matière

---

I.7. Conclusion.....	18
Référence Bibliographique.....	19

### Chapitre II : Les Piles A Combustible

II.1. Introduction.....	20
II.2. Historique.....	20
II.3. Définition d'une pile à combustible.....	22
II.4. Structure générale d'une pile à combustible.....	23
II.4.1. Les électrodes (anode et cathode) .....	23
II.4.2. L'électrolyte .....	23
II.4.3. Les plaques bipolaires .....	24
II.4.4. Les couche de diffusion .....	25
II.5. Principe de fonctionnement.....	25
II.6. Etudes électrochimiques.....	26
II.6.1. Force électromotrice.....	26
II.6.2. Caractéristique tension-courant des piles à combustible.....	27
II.6.3. Différentes pertes de tension.....	27
a) Polarisation d'activation.....	27
b) Polarisation Ohmique.....	28
c) Polarisation de concentration.....	28
II.7. Avantages et les inconvénients d'une pile à combustible.....	29
II.7.1. Avantages.....	29
II.7.2. Inconvénients.....	29
II.8. Applications des piles à combustible.....	29
II.9. Piles à combustible de type SOFC.....	31
II.9.1. Principe de fonctionnement de SOFC.....	32
II.10. Conclusion.....	33
Référence bibliographique.....	35

### Chapitre III : Aperçue Générale Sur Les Batteries

III.1. Introduction .....	36
III.2. Historique de la batterie.....	36
III.3. Description.....	38
III.4. Principe de fonctionnement des batteries.....	39
III.5. Fonctionnement d'une batterie solaire.....	39
III.6. Différents types des batteries.....	40
III.6.1. Batteries primaires.....	40

## Table de matière

---

III.6.2. Batteries secondaires (ou rechargeables).....	40
III.6.2.1. Batteries au plomb (lead acid).....	41
a) Avantages des Batteries au plomb d'acide.....	43
b) Inconvénients des batteries au plomb d'acide.....	43
III.6.2.2. Batteries Nickel-cadmium.....	43
a) Avantages du NiCd.....	44
b) Inconvénients du NiCd.....	44
III.6.2.3. Batteries Nickel-métal hydrure .....	44
a) Avantages du NiMH.....	45
b) Inconvénients du NiMH.....	45
III.6.2.4. Batterie Nickel-Zinc (NiZn).....	45
a) Avantages des Batteries Nickel-Zinc.....	46
b) Inconvénients des Batteries Nickel-Zinc.....	46
III.6.2.5. Batteries Lithium-Ion (Li-Ion).....	46
a) Avantages des Batteries lithium-ion.....	47
b) Inconvénients des Batteries lithium-ion.....	47
III.6.2.6. Batteries Lithium polymère (Li-Po).....	48
a) Avantages Batterie des Lithium polymère.....	49
b) Inconvénients des batteries Lithium-Polymère.....	49
III.7. Modèle de la batterie.....	49
III.8. Etat de charge de l'accumulateur.....	52
III.9. Domaine d'application.....	53
III.7.1. Electronique.....	53
III.7.2. Véhicules propres.....	54
III.7.3. Energie renouvelable.....	54
III.8. La durée de vie d'une batterie.....	55
III.9. Conclusion.....	55
Références bibliographique.....	56

### **Chapitre IVI: modélisations de la pile à combustible /batterie**

IV.1. Introduction.....	59
IV.2. Principe de modélisation.....	59
IV.3. Description du système de la SOFC.....	59
IV.3.1. Conception de la pile SOFC.....	59
IV.3.2. La Pression partielle.....	59
IV.3.3. Equation de Nernst.....	61

## Table de matière

---

IV.3.4. Tension de sortie et chute de tension.....	61
IV.4. Le filtrage.....	62
IV.5. Onduleur.....	62
IV.6. Transformateur triphasé.....	63
IV.7. Partie contrôle d'onduleur.....	63
IV.8. Modélisation de la batterie.....	64
IV.8.1. Modèles de charge et décharge de batterie.....	64
IV.8.2. Modèle simple d'une batterie.....	65
IV.9. Résultat et discussion.....	66
IV.11. Conclusion.....	71
Référence bibliographique.....	72
Conclusion générale.....	73
Annexe.....	74

### Liste des figures

<b>Figure.I.1.</b> Les parcours de conversion pour les énergies.....	04
<b>Figure.I.2.</b> Part des énergies renouvelable dans la consommation.....	04
<b>Figure.I.3.</b> Les dix principaux producteurs d'énergies renouvelables en 2017.....	05
<b>Figure.I.4.</b> Objectif du programme Algérien des énergies renouvelables 22GW à l'horizon.2030.....	06
<b>Figure.I.5.</b> Fonctionnement d'une centrale.....	07
<b>Figure.I.6.</b> Energie solaire thermique : tour solaire et parc.....	08
<b>Figure.I.7.</b> Modules photovoltaïques.....	09
<b>Figure.I.8.</b> Schéma d'une cellule photovoltaïque.....	09
<b>Figure.I.9.</b> Exemple de système photovoltaïque autonome avec stockage.....	10
<b>Figure.I.10.</b> Exemple de système photovoltaïque connecté au réseau de distribution...	11
<b>Figure.I.11.</b> Ferme éolienne on-shore et off-shore.....	11
<b>Figure.I.12.</b> Système de conversion d'énergie éolienne.....	12
<b>Figure.I.13.</b> Bilan de cycle biomasse.....	13
<b>Figure.I.14.</b> Génération d'électricité par une source d'énergie géothermique.....	14
<b>Figure.I.15.</b> L'énergie marémotrice et vague.....	14
<b>Figure.I.16.</b> Système hybride photovoltaïque/stockage.....	15
<b>Figure.I.17.</b> Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage.....	17

### Chapitre II : Pile à combustible

<b>Figure II.1.</b> Flèche chronologique de l'historique de la pile à combustible.....	21
<b>Figure.II.2.</b> Quelques un des premiers prototypes de véhicules fonctionnant avec une pile ....	21
<b>Figure.II.3.</b> Structure générale d'une cellule d'une pile à combustible.....	23
<b>Figure.II.4.</b> Schéma d'une MEA relatif au principe de fonctionnement d'une pile à Combustible.....	25
<b>Figure. II.5.</b> Différents types de pertes de tension en fonction de la densité de courant pour une PAC.....	28
<b>Figure.II.6.</b> Pile à combustible CELLIA fabriqué par MTU.....	29
<b>Figure.II.7.</b> Train coradia iLint.....	30
<b>Figure. II.8.</b> Exemples des piles à combustible dans les applications portables.....	30

## Liste des figures

---

<b>Figure II.9.</b> (i) Nombre de piles à combustible expédiées dans le monde entier par application (ii) Mégawatts expédiées dans le monde entier par .....	30
<b>Figure.II.10.</b> Technologie tubulaire.....	32
<b>Figure.II.11.</b> Technologie planaire.....	33
<b>Figure.II.12.</b> Technologie monolithique.....	33
<b>Figure.II.13.</b> Technologie Sulzer Hexis.....	34

### Chapitre III : Aperçue générale sur les batteries

<b>Figure III.1.</b> Frise chronologique de l'évolution des différents systèmes de batteries...	38
<b>Figure III.2.</b> Description de l'intérieur d'une batterie.....	39
<b>FigureIII.3.</b> Classification des batteries.....	40
<b>Figure III.4.</b> Composants principaux d'une batterie au plomb (cellule).....	41
<b>Figure III.5.</b> Batterie au plomb ouverte.....	42
<b>Figure III.6.</b> Batterie au plomb fermée.....	42
<b>Figure III.7.</b> Batterie nickel cadmium.....	44
<b>Figure III.8.</b> Batterie au nickel-métal hydrure.....	45
<b>Figure III.9.</b> Batterie Nickel-Zinc.....	45
<b>FigureIII.10.</b> Batterie Lithium-Ion.....	47
<b>FigureIII.11.</b> Batterie Lithium polymère (Li-Po).....	49
<b>Figure III.12.</b> Modèle de la batterie utilisé.....	51
<b>Figure III.13.</b> Batteries utilisées dans les appareils électroniques.....	53
<b>Figure III.14.</b> Batterie d'une voiture.....	54
<b>Figure III.15.</b> Les centrales des énergies renouvelables .....	54

### Chapitre IV Modélisation de la pile à combustible/batterie

<b>Figure IV.1.</b> Structure de la SOFC.....	60
<b>Figure IV.2.</b> Schéma équivalent d'IGBT/Diode.....	62
<b>Figure IV.3.</b> Schéma d'un transformateur triphasé (étoile-étoile).....	63
<b>Figure IV.4.</b> Partie du control d'onduleur.....	64
<b>Figure IV.5.</b> Modèle simple d'une batterie.....	65
<b>Figure IV.6.</b> Structure d'une batterie Li-ion .....	66
<b>Figure IV.7.</b> La pression d'eau $H_2O$ en fonction du temps .....	66
<b>Figure IV.8.</b> La pression d'hydrogène en fonction du temps (s).....	67

## Liste des figures

---

<b>Figure IV.9.</b> La pression d'oxygène en fonction du temps (s).....	67
<b>Figure IV.10.</b> Tensions de sortie de la SOFC(v) en fonction du temps .....	67
<b>Figure IV.11.</b> Courant de sortie de la SOFC(A) en fonction du temps.....	67
<b>Figure IV.12</b> La tension lors du transformateur .....	68
<b>Figure IV.13</b> La tension triphasé du réseau en fonction du temps .....	68
<b>Figure IV.14</b> Courant triphasé du réseau en fonction du temps .....	68
<b>Figure IV.15</b> L'Etat de charge d'une batterie Li-ion (%) en fonction du temps (s).....	69
<b>Figure IV.16</b> La tension de la batterie.....	69
<b>Figure IV.17</b> Le courant d'une batterie.....	69
<b>Figure IV.18</b> Comparaisons entre la tension de la SOFC et la batterie.....	70
<b>Figure IV.19</b> Comparaison entre le courant de la SOFC et de la batterie.....	70

## Liste des tableaux

---

### Liste des tableaux

<b>Tableau.II.1.</b> Principaux types de piles à combustible.....	22
<b>Tableau.III.1.</b> Comparatif des technologies d'accumulateur Utilisé.....	50
<b>Tableau.IV.1.</b> Paramètres de la SOFC.....	60
<b>Tableau.IV.2.</b> Paramètres du transformateur.....	63
<b>Tableau.IV.3.</b> les paramètres de la batterie.....	65

# Liste des symboles

---

## Liste des symboles

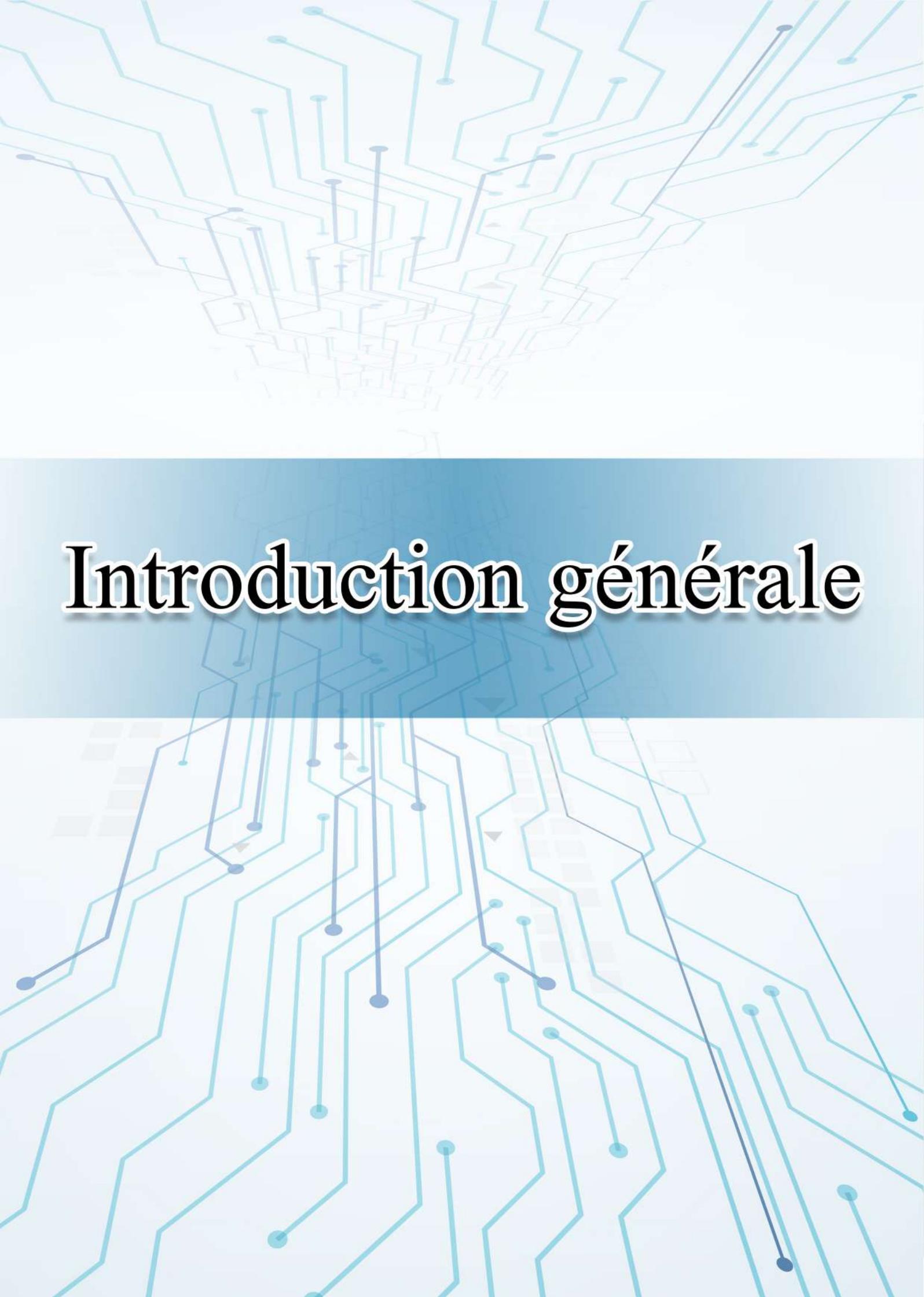
MW	: Mégawatt
m <sup>3</sup>	: Mètre cube
km <sup>2</sup>	: Kilomètres carrés
°C	: degré Celsius
K	: kelvin
C/mol	: coulombs par mole
A	: Ampère
V	: Volt
s	: second
Ω	: ohm
H <sub>2</sub> O	: L'eau
H <sub>2</sub>	: L'hydrogène
O <sub>2</sub>	: L'oxygène

## Liste des abréviations

---

### Liste des abréviations

<b>AC</b>	: Courant alternatif
<b>DC</b>	: Courant continue
<b>PAC</b>	: Pile à combustible
<b>PV</b>	: Photovoltaïque
<b>SOFC</b>	: pile à combustible à oxyde solide
<b>SEH</b>	: Système d'énergie hybride
<b>AFC</b>	: pile à combustible alcalines
<b>PEMFC</b>	: pile à combustible à membrane d'échange de protons
<b>DMFC</b>	: pile à combustible à méthanol direct
<b>PAFC</b>	: pile à combustible à acide phosphorique
<b>MCFC</b>	: pile à combustible à carbonate fondu
<b>H<sup>+</sup></b>	: Solution acide
<b>OH<sup>-</sup></b>	: Solution alcaline
<b>CO<sub>3</sub><sup>-2</sup></b>	: Sels fondus
<b>O<sup>-2</sup></b>	: Céramiques
<b>Li-ion</b>	: Lithium ion
<b>Bp</b>	: Batterie au plomb



# Introduction générale

## Introduction générale

---

L'un des principaux défis du XXI<sup>e</sup> siècle est de maintenir la production d'énergie, en particulier d'énergie électrique, afin de répondre à la demande croissante d'énergie tout en protégeant l'environnement. Pour l'instant, les combustibles fossiles comme le gaz naturel, le pétrole et le carbone, ainsi que l'uranium, restent les principales sources d'énergie, bien qu'ils présentent des inconvénients importants. Parmi ceux-ci, l'épuisement progressif des ressources et la pollution qui en découle, comme les émissions de gaz à effet de serre comme le  $CO_2$  et d'autres gaz nocifs, ainsi que la production de déchets, y compris certaines matières radioactives. Ces préoccupations, ainsi que les problèmes liés au climat qui en découlent, ont incité les chercheurs à rechercher des sources d'énergie primaire à la fois propres et renouvelables, ainsi que des convertisseurs d'énergie durables. Le vent, qui est associé au convertisseur d'énergie : l'éolienne, l'eau, qui est associée aux barrages hydro-électriques, et le soleil, qui est associé aux panneaux photovoltaïques, sont les plus communs de ces énergies auto-générées.

Coût de l'hydrogène peut être réduit en le produisant lorsque l'électricité est facilement disponible et peu coûteuse. Il peut également être facilement stocké et transporté. Son énergie chimique peut alors être convertie en énergie électrique grâce à une pile à combustible avec de l'eau comme seul sous-produit.

À l'heure actuelle, les piles combustibles suscitent beaucoup d'intérêt tant dans le monde industriel que dans le monde de la recherche. Ces systèmes représentent un moyen efficace de production d'énergie tout en respectant l'environnement, grâce à leur rendement électrique élevé, à de faibles émissions de gaz à effet de serre et à de faibles nuisances sonores. Alors que tous les piles à combustibles fonctionnent selon le même principe de combinaison de réactions électrochimiques impliquant un comburant tel que l'air et un combustible tel que l'hydrogène pour produire de l'électricité, il existe plusieurs types qui diffèrent dans la nature de leurs composants et les températures auxquelles ils sont utilisés.

La pile que nous intéressent est donc la pile de type SOFC qui fonctionne à des températures plus élevées et ne nécessitent donc pas de catalyseurs coûteux. En outre, ils offrent de meilleures performances, mais en raison de leur température de fonctionnement élevée, leur temps de configuration peut être long, ce qui les rend mieux adaptés aux applications stationnaires.

## Introduction générale

---

La faisabilité des applications de piles combustibles (PAC) a été démontrée dans le monde entier. La recherche actuelle vise à prolonger la durée de vie des piles tout en réduisant leurs coûts. Actuellement, une PAC est incapable de tolérer les variations de charge rapides, qui entraînent souvent un vieillissement prématuré. Pour compenser ce défaut, une hybridation avec un composant de stockage électrochimique (souvent des super condensateurs) est généralement proposée via un ou deux convertisseurs statiques. Exiger la mise en œuvre d'un système de gestion de l'énergie.

Un système hybride (multi-source) se compose d'au moins deux sources d'énergie connectées à un bus par des convertisseurs, permettant de contrôler la tension et le courant fournis par chacune des sources.

L'objectif d'un SEH est d'assurer que la charge reçoit l'énergie dont elle a besoin et, si possible, de produire autant d'énergie que possible à partir de sources renouvelables tout en maintenant une qualité élevée.

Notre travail se focalise sur un système multi-source ayant la SOFC comme source principale et une batterie qui représente la source secondaire, dans laquelle la SOFC assure la demande de puissance en régime permanent tandis que la batterie s'assure la continuité du système lors de panne.

En ce sens, les travaux présentés dans ce mémoire contribuent à une meilleure intégration des sources d'énergie renouvelables dans un système d'énergie hybride (SEH). Notre travail sera divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre met en évidence une généralité sur les énergies renouvelables, le deuxième chapitre sert d'introduction aux piles à combustibles. Après un bref historique de leur développement depuis leur découverte jusqu'à nos jours, les nombreux types de filières et les principales caractéristiques qui les distinguent sont présentés. Choisir la pile à oxyde solide (SOFC), son principe de fonctionnement et les équations thermodynamiques utilisées pour obtenir les caractéristiques courant-tension., le troisième chapitre concerne des batteries, leurs principes de fonctionnement avec les domaines d'utilisation, le dernier chapitre nous avons modélisées à l'aide du logiciel Matlab-Simulink la pile de type SOFS hybride avec batterie (Li-ion) et en discutant les résultats obtenus. On finit notre mémoire avec une conclusion générale.



# CHAPITRE I :

Etat de l'art sur les énergies renouvelables

## I.1.Introduction

La production d'énergie sera un défi important dans les années à venir. En effet, les besoins en énergie des sociétés industrialisées continuent d'augmenter. De plus, les pays en développement auront besoin d'une quantité croissante d'énergie pour maintenir leur développement. Aujourd'hui, les combustibles fossiles tels que le pétrole, le carbone, le gaz naturel et l'énergie nucléaire représentent une grande partie de la production énergétique mondiale. La consommation de ces sources entraîne des émissions de gaz à effet de serre et par conséquent, une augmentation de la pollution. En outre, la consommation non durable des ressources naturelles épuise les réserves de ces dernières, ce qui constitue une menace pour les générations futures. A la différence des énergies fossiles les énergies renouvelables importantes pour atteindre cet objectif [1].

Toutes les énergies inépuisables sont classées parmi les sources d'énergie renouvelables. Elles sont émises directement ou indirectement par le soleil, mais en quantité limitée, à un certain endroit et à un moment précis. La **figure I.1** donne un aperçu des principales ressources énergétiques de la planète qui peuvent être utilisées pour produire de l'électricité de manière durable.

Ces énergies ont très peu de conséquences négatives sur l'environnement. Leur utilisation, en particulier, n'entraîne pas d'émissions de gaz à effet de serre ni de déchets dangereux.

Ce premier chapitre propose d'abord un état de l'art très général sur la production d'énergie renouvelable comme leur nom l'indique, il s'agit de sources qui se renouvellent et ne s'épuiseront donc jamais à l'échelle du temps humain. Les sources renouvelables sont l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marine et la biomasse.

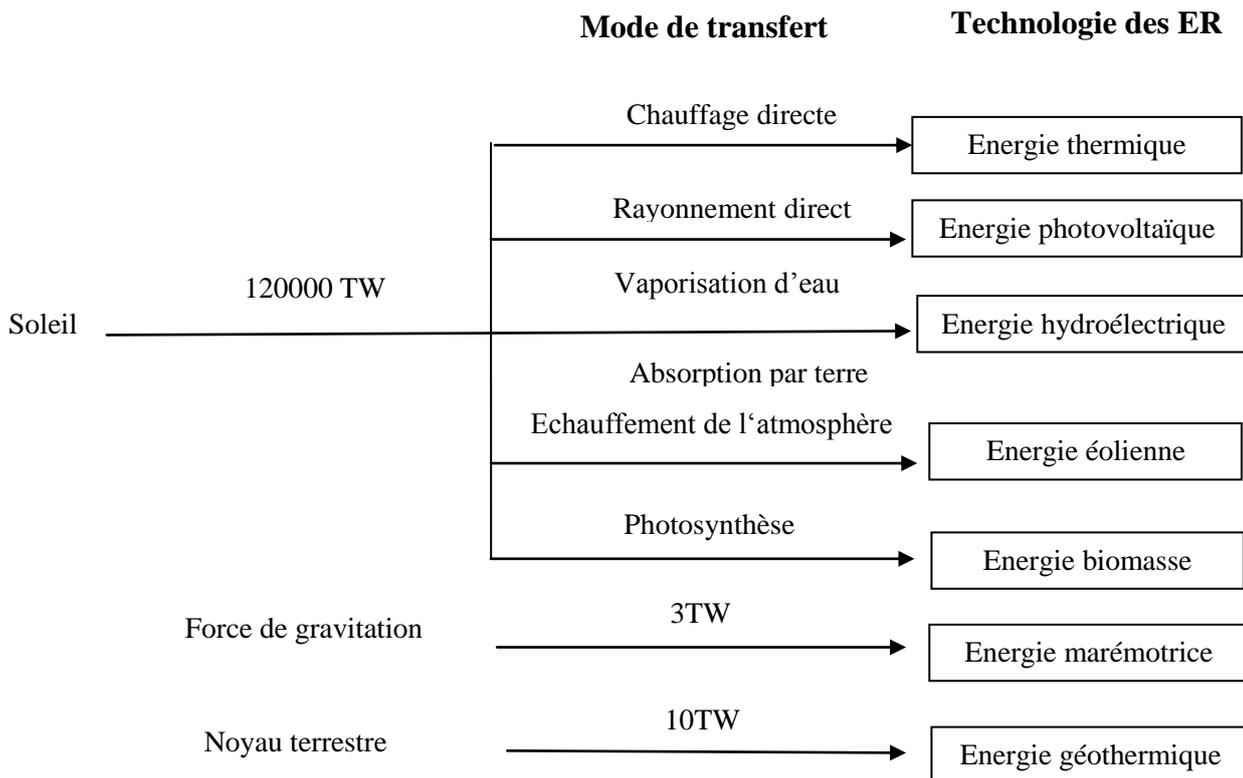


Figure.I.1. Les parcours de conversion pour les énergies renouvelables

## I.2. Production d'énergie renouvelable dans le monde

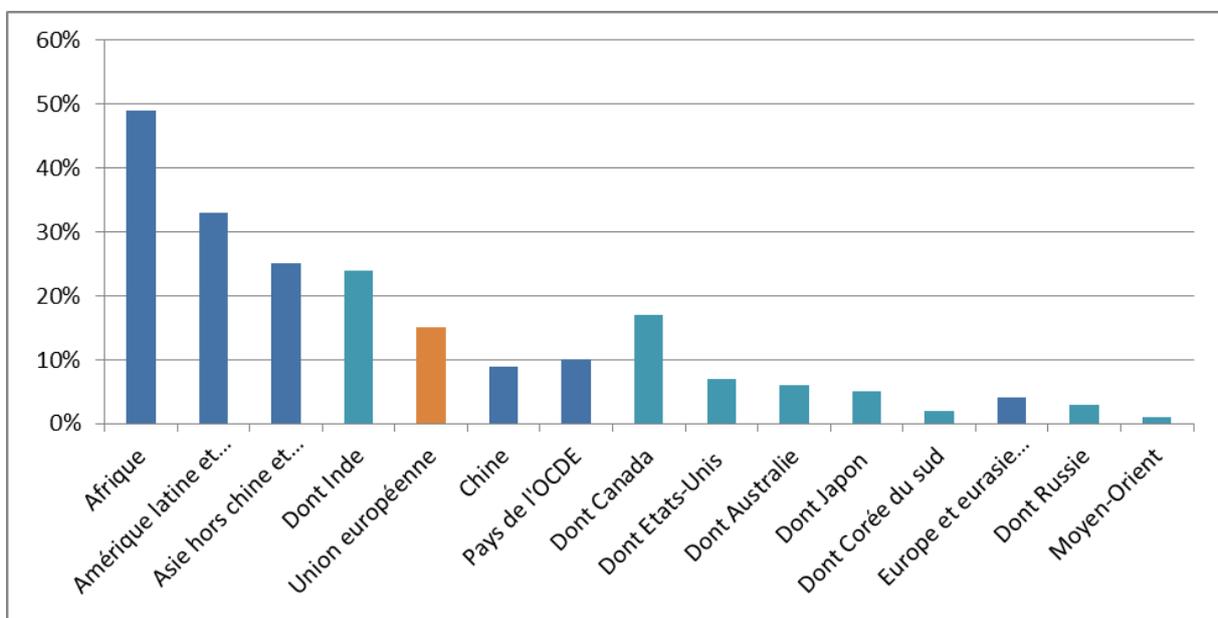


Figure.I.2. Part des énergies renouvelables dans la consommation primaire [2]

En raison d'une utilisation élevée de l'énergie de la biomasse combinée à une consommation d'énergie plus faible, les pays africains ont une part d'énergie renouvelable proche de 50 %. En revanche, les énergies renouvelables sont sous-représentées dans le

bouquet énergétique d'un certain nombre de pays, comme la Russie et le Moyen-Orient, qui disposent d'abondantes ressources en combustibles fossiles [2].

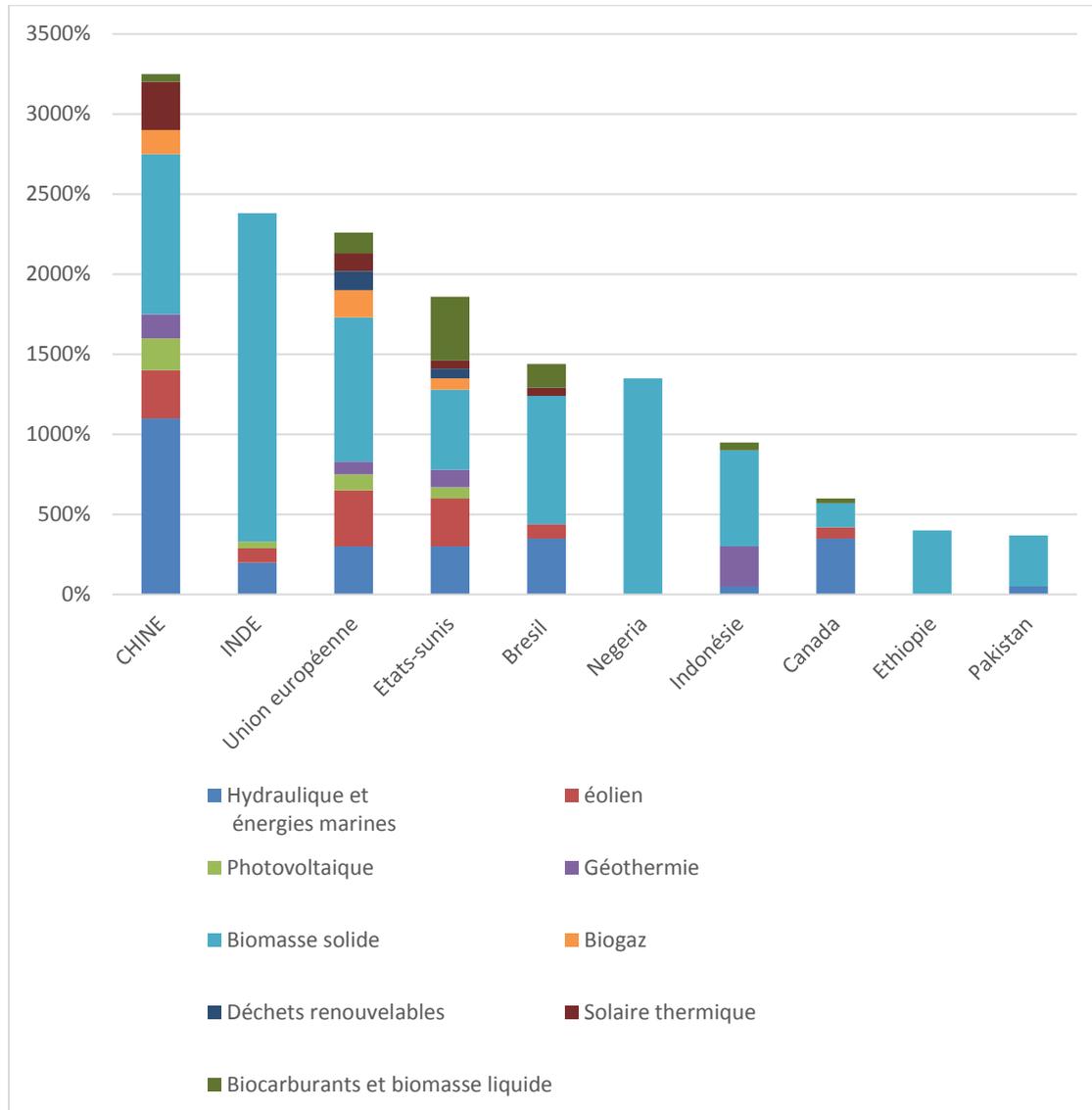


Figure.I.3. Les dix principaux producteurs d'énergies renouvelables en 2017 [2]

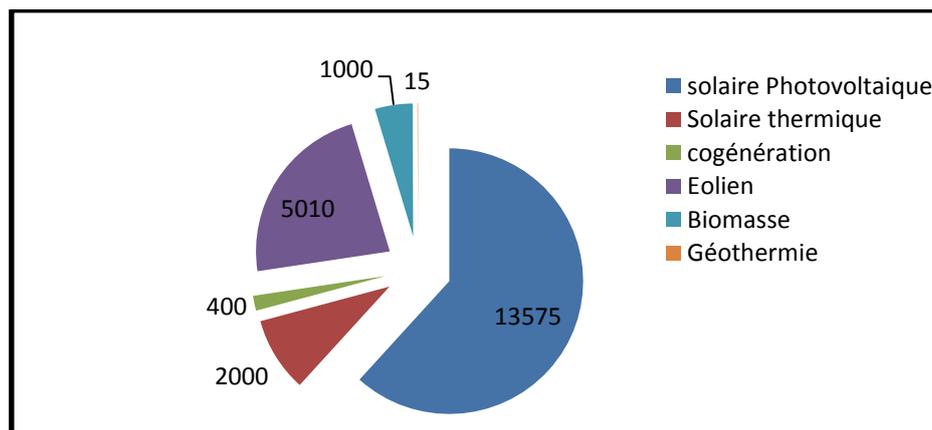
En 2017, la Chine était le premier producteur mondial d'énergie renouvelable, suivie par l'Inde et l'Union européenne. L'UE est à l'avant-garde sur des questions telles que l'éolienne, le biogaz et la production de déchets urbains renouvelables. Plusieurs pays d'Asie du Sud et d'Afrique, comme l'Inde et le Nigeria, se distinguent dans le classement en raison de leur forte population et de l'utilisation extensive de la biomasse solide, qui se produit principalement en dehors des circuits commerciaux [2].

### I.3. Production de l'énergie renouvelable en Algérie

Les énergies renouvelables sont au cœur des politiques énergétiques et économiques de l'Algérie, selon le Programme de développement des énergies renouvelables 2011-2030 [3]. Une première phase a été consacrée à l'exécution de projets pilotes et de tests de diverses technologies, au cours de laquelle des éléments pertinents des évolutions technologiques des industries considérées sont apparus sur la scène énergétique et ont conduit à la révision de ce programme. Il convient de mentionner l'un des nouveaux éléments [4] :

- Une meilleure connaissance du potentiel national en énergies renouvelables, notamment pour le solaire et l'éolien, suite aux études engagées.
- la baisse des coûts des filières photovoltaïques et éoliennes qui s'affirment de plus en plus sur le marché pour constituer des filières viables à considérer.
- Les coûts encore élevés de la filière solaire thermique induisant une croissance très lente du développement de ce marché à travers le monde.
- Le parachèvement d'une réglementation nationale cohérente et attractive en direction des investisseurs

La révision de ce programme est axée sur le développement à grande échelle de l'énergie photovoltaïque et solaire, ainsi que sur l'introduction de la biomasse (valorisation des déchets), de la cogénération et de la géothermie, et un rapport sur le développement du solaire thermique en 2021. La quantité totale d'énergie renouvelable à produire pour les besoins du marché national pour la période 2015-2030 est de 22 000 MW, avec plus de 4500 MW à réaliser d'ici 2020. Voici la répartition de ce programme par filière technologique :



**Figure.I.4.** Objectif du programme Algérien des énergies renouvelables 22GW à l'horizon 2030 [3]

La mise en œuvre du programme permettra d'atteindre une part d'énergies renouvelables dans le bilan national de production d'électricité d'environ 27% à l'horizon 2030. Le volume de gaz

naturel produit par les 22 000 MW d'énergies renouvelables sera de plus de 300 milliards  $dm^3$ , soit l'équivalent de 8 fois la consommation du pays en 2014.

## I.4. Les sources d'énergies renouvelables

### I.4.1. Energie hydroélectrique

Soulignons tout d'abord que l'hydroélectricité est de loin la source d'énergie renouvelable la plus mature et la plus développée. L'électricité est produite en convertissant l'énergie chimique d'un courant d'eau en énergie électrique à l'aide d'une ou plusieurs turbines couplées hydrauliquement. La puissance maximale est déterminée par la hauteur de la chute, la quantité d'eau déversée et les caractéristiques mécaniques de la turbine [5].

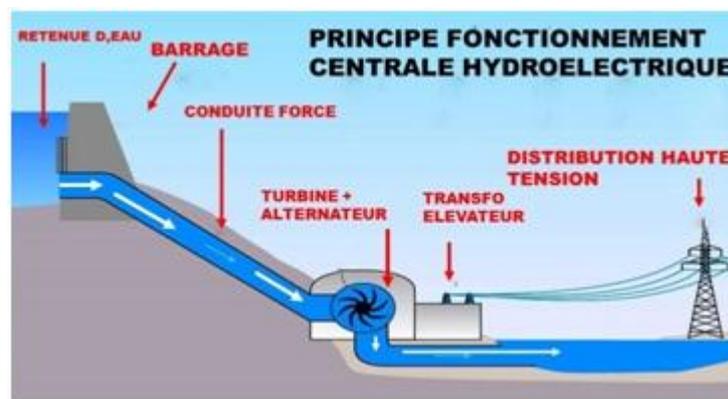


Figure.I.5.Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique [5]

Le fait que cette énergie ne soit pas intermittente constitue son principal avantage énergétique. La technologie nécessaire à son exploitation est standardisée, les coûts de maintenance sont raisonnables et les installations sont conçues pour durer [6].

Cependant, ses principaux inconvénients sont les coûts de construction élevés, le bruit, l'impact sur la vie aquatique, les équipements lourds et les zones d'exploitation limitées [7].

### I.4.2. L'énergie solaire

Ce mot désigne l'énergie fournie par les rayons du soleil. Le soleil est la source d'énergie la plus puissante et la plus gratuite qui soit ; il ne reste plus qu'à l'exploiter. Il existe deux formes d'énergie solaire : l'énergie photovoltaïque et l'énergie solaire thermique.

#### a) *Energie solaire thermique*

L'utilisation la plus courante des systèmes thermo-solaires consiste à concentrer le rayonnement solaire pour produire des températures élevées afin de maximiser le rendement des machines thermiques (selon le principe de Carnot) [8]. Les deux formes les plus courantes de générateurs de grande puissance sont basées sur le rayonnement solaire direct. Par conséquent, la technologie thermo-solaire à rayonnement direct est utilisée de deux façons :

- Il s'agit d'un parc solaire composé de réflecteurs paraboliques en forme de pièces cylindriques. Les radiations provoquent le réchauffement de "tuyaux" traversés par un fluide intermédiaire, comme de l'huile ou de l'eau pressée. Ce fluide chaud est envoyé dans un échangeur de chaleur (une chaudière), où il est transformé en vapeur d'eau, qui alimentera une turbine. La température de fonctionnement se situe entre 350 et 400 degrés Celsius, et les centrales solaires de ce type peuvent atteindre 80 mégawatts. La température de la vapeur peut être encore augmentée pour améliorer le fonctionnement de la turbine et donc sa production, en utilisant une méthode de chauffage traditionnelle.
- Il s'agit d'un panneau solaire central qui reçoit la lumière d'une série de miroirs (héliostats) qui suivent le soleil à son point culminant. Les héliostats réfléchissent et concentrent la lumière vers le sommet du tour, où elle est absorbée par un fluide intermédiaire, qui peut être de l'eau, du sel fondu ou tout autre liquide à haute température. Celui-ci peut atteindre 1000°C.



**Figure. I.6.** Energie solaire thermique : tour solaire et parc solaire

Cette technologie présente de nombreux avantages : elle a été conçue pour les zones isolées, dépourvues de commodités (pas de place pour construire) et pourtant abondamment ensoleillées. Par rapport à l'énergie photovoltaïque, son coût est plus faible. La maintenance nécessaire est minimale [9].

Cependant, l'énergie thermo-solaire présente quelques inconvénients : l'espace nécessaire à la construction est important (des centaines de kilomètres carrés) et il doit être exposé aux rayons du soleil toute l'année, avec une température ambiante d'au moins 25°C pour assurer un bon rendement [9].

### *b) L'énergie photovoltaïque*

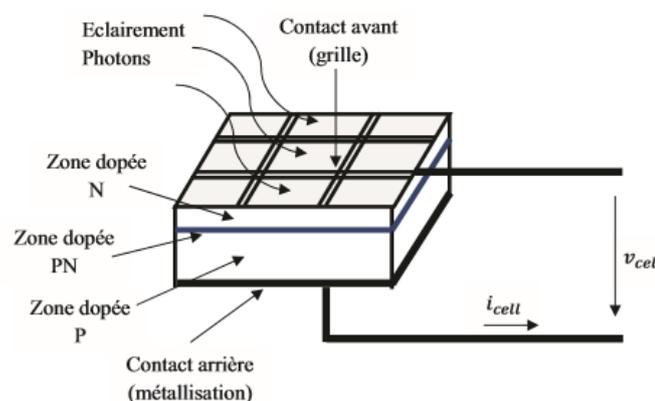
L'énergie photovoltaïque est basée sur l'effet photoélectrique. Celui-ci permet de générer un courant électrique continu à partir de l'irradiation solaire. Cette ressource a donc l'avantage d'être inexpugnable et utilisable sur l'ensemble d'un territoire. Cependant, cette ressource présente deux inconvénients : la production est inextricablement liée aux conditions météorologiques et le rendement est relativement faible (typiquement entre 10 et 18%)[6].



**Figure.I.7.** Modules photovoltaïques [6]

### *b-1) Conversion photovoltaïque*

Les propriétés des matériaux semi-conducteurs sont utilisées pour faire fonctionner le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. Une cellule photovoltaïque peut être constituée de deux couches de silicium, l'une dopée au bore (P) avec un déficit d'électrons et l'autre dopée au phosphore (N) avec un surplus d'électrons [10]. Une jonction PN avec une barrière de potentiel se développe entre les deux zones. Une grille métallique recouvre la zone N, qui sert de cathode (contact devant) et principalement de collecteur d'électrons, tandis qu'une plaque métallique (contact derrière) recouvre l'autre côté du cristal et sert d'anode.



**Figure.I.8.** Schéma d'une cellule photovoltaïque élémentaire [10]

Lorsque des photons sont absorbés par un semi-conducteur, leur énergie est transférée aux électrons par collision. Si l'énergie transmise est supérieure à l'énergie associée à la bande semi-interdite du conducteur, une paire d'électrons alternatifs se forme dans cette zone de

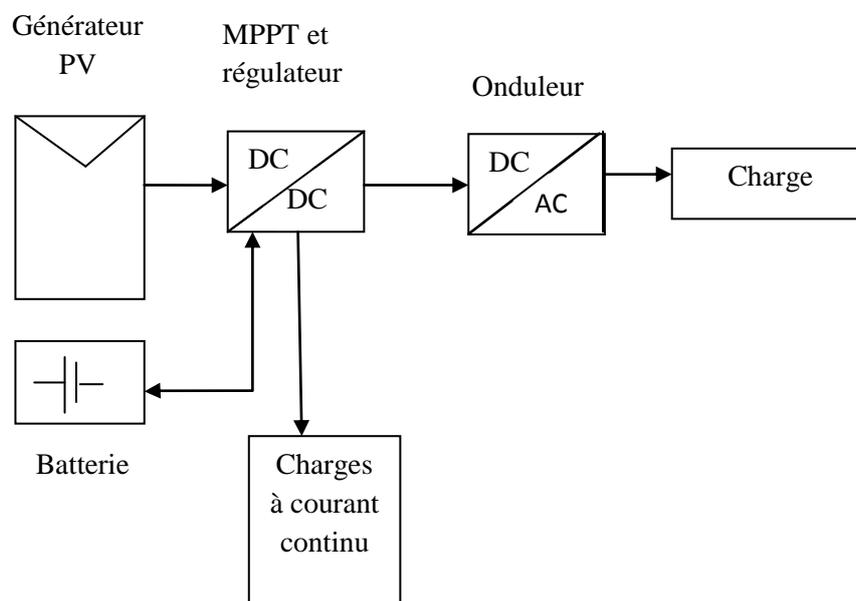
déplétion. Ces porteurs libres sont drainés vers les contacts métalliques des régions P et N sous l'influence d'un champ électrique qui régit cette zone. Il en résulte un courant électrique dans la cellule PV et une différence de potentiel (0,6 à 0,8 volt) supportée entre les électrodes métalliques de la cellule [11]. Il existe quatre types de cellules qui composent les modules photovoltaïques :

- Les cellules monocristallines, les Cellules poly-cristallines, les Cellules amorphes et le tellure de cadmium

La manière dont ce courant est utilisé varie d'une installation à l'autre, en fonction de l'objectif de cette dernière. Selon que l'installation photovoltaïque est raccordée ou non à un réseau de distribution d'électricité, il existe principalement deux formes d'utilisation.

### ***b-2) Système photovoltaïque pour site isolés***

L'électricité produite peut être utilisée directement par des installations non raccordées (sites isolés). C'est le cas des lieux non reliés au réseau électrique (en montagne, sur des îles ou des bateaux, un satellite, etc.) qui peuvent être équipés de piles et d'accumulateurs pour fournir de l'électricité pendant les périodes d'obscurité (la nuit notamment).

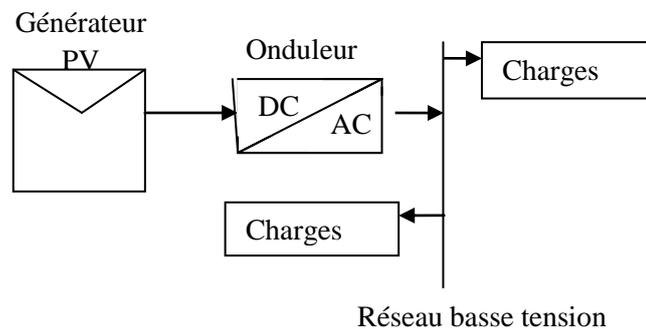


**Figure.I.9.** Exemple de système photovoltaïque autonome avec stockage

### ***b-3) Système photovoltaïque connecté au réseau***

Les systèmes photovoltaïques peuvent également être reliés à un réseau de distribution. Les systèmes photovoltaïques produisent de l'électricité et l'injectent dans le réseau sur les grands réseaux de distribution (Amérique du Nord, Europe, Japon, etc.). Pour ce

faire, ces appareils convertissent le courant continu en courant alternatif selon les caractéristiques du réseau (par exemple, 50 Hz en Europe ou 60 Hz en Amérique du Nord). Ils ne nécessitent pas de stockage sur batterie puisque l'électricité est utilisée à l'endroit où elle est produite par les consommateurs les plus proches sur le réseau. Ce raccordement nécessite l'utilisation d'un onduleur, qui est un appareil qui convertit un courant électrique continu en un courant alternatif identique à celui qui circule sur le réseau. Bien que les différentes technologies produisent des onduleurs différents, leurs principes et leurs objectifs sont les mêmes : convertir l'énergie CC (courant continu) en AC (courant alternatif). Ce changement entraîne une modification des performances globales du système.



**Figure.I.10.** Exemple de système photovoltaïque connecté au réseau de distribution

### I.4.3. Energie éolienne

Une éolienne est un appareil qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Puis, à l'aide d'une machine électrique, cette énergie est transformée en énergie électrique. Les termes "parc éolien" et "ferme éolienne" sont utilisés pour désigner des unités de production regroupées soit sur terre ("onshore"), soit en mer ("offshore").



**Figure.I.11.** Ferme éolienne onshore et offshore.

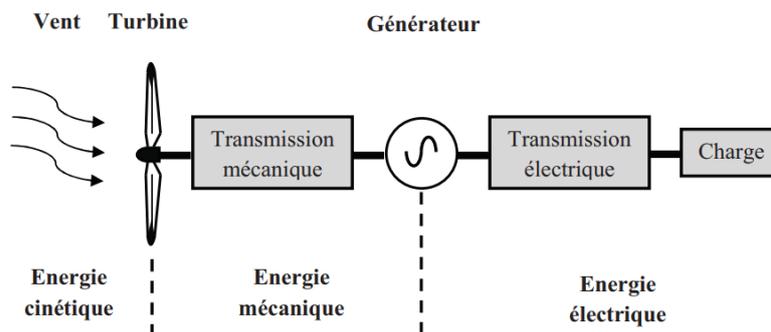
Le principal avantage de cette source est son faible coût d'installation par rapport aux autres sources d'énergie renouvelables. Cependant, les énergies renouvelables sont

intermittentes, et les installations de parcs solaires ont des conséquences à la fois financières et environnementales [7].

#### a) *Système de conversion d'énergie éolienne*

Un système de conversion d'énergie éolienne, quelle que soit sa technologie, convertit l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- La conversion de l'énergie cinétique en énergie mécanique au niveau de la turbine.
- La conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique au niveau de la génératrice.



**Figure.I.12.** Système de conversion d'énergie éolienne

#### I.4.4. Energie Biomasse

La biomasse est définie comme la partie biodégradable des produits, des déchets et des résidus biologiques provenant de l'agriculture, de l'élevage, de la pêche et de l'aquaculture, ainsi que la composante biodégradable des déchets industriels et municipaux[6].

La biomasse peut être utilisée de deux façons : pendant la fermentation des déchets, le méthane peut être capturé et utilisé comme source d'énergie, et la biomasse peut être brûlée directement. Dans les deux cas, l'énergie thermique peut être utilisée pour produire de l'électricité dans des centrales thermiques. Cette énergie est renouvelable si la quantité de combustible brûlée ne dépasse pas la quantité de combustible produite.

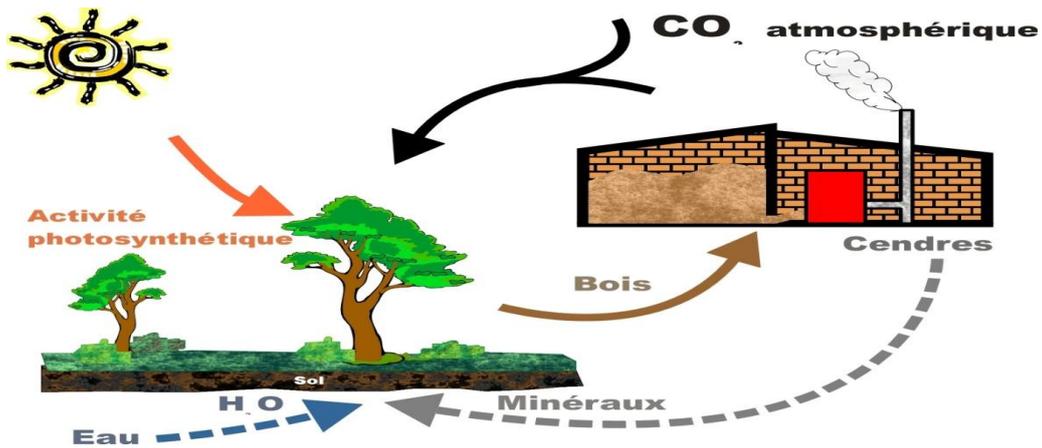


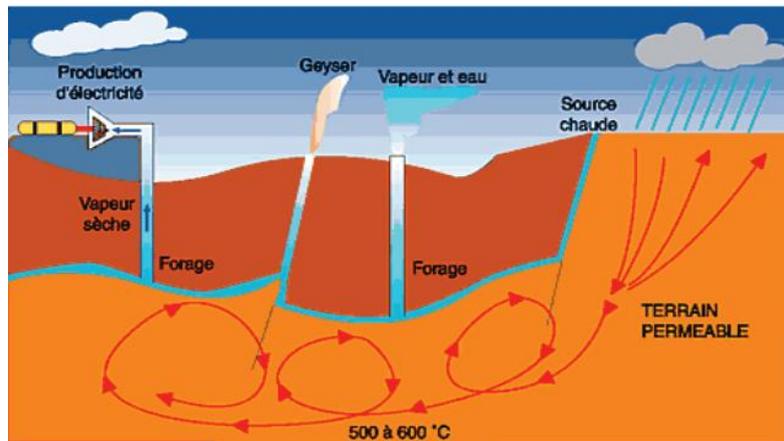
Figure.I.13. Bilan de cycle biomasse [6]

L'idée est que le dioxyde de carbone libéré dans l'atmosphère lors de la combustion de la biomasse ou du méthane est compensé par le dioxyde de carbone absorbé par les feuilles des plantes, qui sont la principale source de biomasse. Par conséquent, l'empreinte carbone pourrait être proche de zéro [6]. Le problème le plus grave est que la biomasse n'est pas inépuisable. Lorsqu'elle est utilisée dans un cadre naturel, elle présente peu de danger, mais lorsqu'il s'agit de biomasse cultivée (pour les biocarburants, par exemple) ou de surexploitation massive des ressources (comme la déforestation), la production de cette énergie peut rapidement avoir de graves conséquences sur l'environnement.

#### I.4.5. Énergie géothermique

Une différence de température de 3 degrés Celsius par 100 mètres existe dans la croûte terrestre [7]. Le but de la géothermie est d'étudier et d'utiliser le phénomène d'augmentation de la température avec la profondeur. L'utilisation de cette ressource consiste à extraire l'énergie géothermique du sol et à la convertir en électricité à l'aide de turbines.

Un fluide est mis en circulation dans les profondeurs de la terre pour capter l'énergie géothermique. Ce fluide peut provenir d'une nappe naturelle, de l'eau injectée dans une roche imperméable ou de l'eau de puits spécialisés. Dans tous les cas, le fluide se réchauffe et revient à sa température initiale. Le principe de l'utilisation de l'énergie géothermique pour produire de l'électricité est représenté sur la **figure.I.14**.



**Figure.I.14.** Génération d'électricité par une source d'énergie géothermique [7]

Cette ressource a l'avantage de préserver l'environnement et d'être indépendante des conditions météorologiques (disponible en permanence), ce qui la rend fiable et stable dans le temps. Malheureusement, cette ressource nécessite la recherche de nourriture, ce qui peut donner des résultats imprévisibles et prend beaucoup de temps pour être utilisée, jusqu'à un quart [13].

#### I.4.6.Énergies marine

L'énergie marine ou énergie des mers est extraite de l'océan. Il existe, par exemple, l'énergie marine dérivée du mouvement de l'eau créé par les mers, l'énergie des vagues dérivée de la puissance des vagues, ou une autre technologie basée sur les courants sous-marins.



**Figure.I.15.** L'énergie marémotrice et vague [7]

Comme les autres sources d'énergie renouvelables, elle ne pollue pas l'environnement pendant sa production. Il faut également noter que la quantité d'énergie qui pourrait être disponible est énorme, et que cette technologie a un bel avenir devant elle [7].

Cependant, cette énergie est extrêmement difficile à récupérer, et les coûts pour le faire sont prohibitifs dans un environnement hostile et imprévisible [12].

## I.5 Systèmes hybrides

Le problème de l'intermittence et du manque de fiabilité de l'énergie produite par les sources d'énergie renouvelables peut être résolu en combinant les sources d'énergie et en formant un système hybride (SH). Un système hybride avec des sources d'énergie renouvelables (SHSER) est un système électrique qui comprend plus d'une source d'énergie, dont au moins un est renouvelable. Un dispositif de stockage peut être inclus dans le système hybride. Dans une perspective plus large, le système énergétique d'un pays donné peut être considéré comme un système hybride.

### I.5.1. Structure du système hybride

Afin de classer un système en fonction de sa structure, deux critères doivent être pris en compte. La présence ou l'absence d'une source d'énergie traditionnelle est le premier critère. Cette source traditionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz ou, dans le cas d'une étude de réseau complet, une batterie. Une centrale tout entière. La présence ou l'absence d'un dispositif de stockage est un deuxième critère possible. La présence d'un dispositif de stockage permet une meilleure satisfaction de la charge pendant les périodes où une source d'énergie primaire est incapable de se convertir en électricité. Les batteries rechargeables, les électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, les dispositifs volants à inertie, etc. sont des exemples de dispositifs de stockage.

#### a) Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage

L'installation photovoltaïque doit être raccordée avec une autre source d'énergie, pour qu'il soit possible de satisfaire la charge durant la nuit ou par temps nuageux.

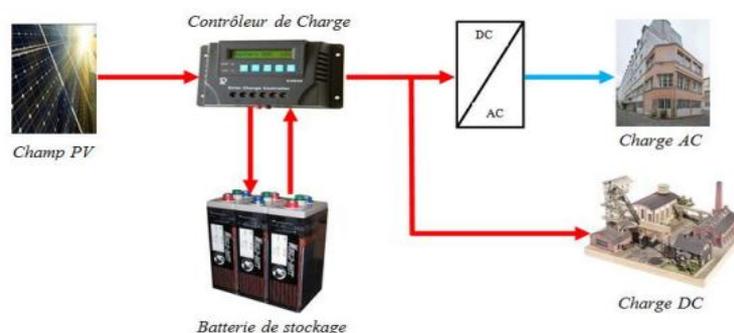


Figure.I.16. Système hybride photovoltaïque/stockage

Pour répondre à la demande d'électricité, les systèmes hybrides photovoltaïque/stockage reposent uniquement sur l'énergie solaire. L'énergie produite par les modules photovoltaïques pendant la journée peut être utilisée immédiatement ou stockée dans les accumulateurs pour être utilisée à la nuit ou pendant les périodes où l'énergie solaire est insuffisante, le ciel est partiellement couvert, ce qui permet de satisfaire les besoins énergétiques de la charge. Pour obtenir un rendement optimal, la puissance électrique du champ de modules et la capacité des accumulateurs sont soigneusement déterminées dans ces systèmes.

***b) Système hybride éolien/stockage***

L'interconnexion d'un dispositif de stockage avec un générateur d'éthanol peut servir à deux fins : il peut servir de tampon lorsque le système fonctionne en parallèle avec le réseau électrique, permettant au dispositif de lisser les variations rapides de la puissance de sortie du générateur d'éthanol, ou il peut servir de dispositif de stockage à long terme en mode autonome, permettant d'alimenter le consommateur pendant les périodes de faible vitesse du vent.

***c) Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage***

Le domaine de la production d'énergie renouvelable basée sur des systèmes hybrides vise à développer des systèmes de production d'énergie efficaces, rentables et peu polluants. Elle s'inscrit dans un contexte de développement à long terme, caractérisé par de nouveaux éco-concepts (analyse du cycle de vie, par exemple). Elle fonctionne en parfaite harmonie avec les technologies de stockage de l'énergie (piles à combustibles, accumulateurs et super condensateurs, etc.), qui font désormais partie intégrante des chaînes de production décentralisées.

Un système hybride est composé de plusieurs sources de production d'électricité. Il a un mode de fonctionnement autonome qui est parfois lié à un système de stockage. La fonction d'un système hybride de production d'électricité est de fournir de l'énergie à diverses charges tout en maintenant la qualité de l'énergie fournie et en réduisant la consommation de carburant.

Nous avons obtenu une réduction du prix des systèmes hybrides pour couvrir au moins l'investissement réalisé dans les générateurs d'énergie renouvelable et les autres composants du système. Cette perspective nous permet de rechercher la performance des systèmes hybrides en fonction de leur rendement et de leur durée de vie depuis leur invention.

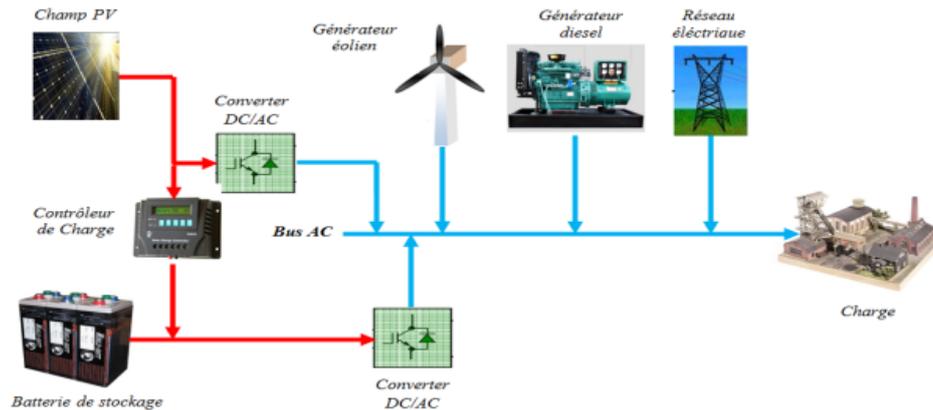


Figure.I.17. Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage

## I.6. Intégration des énergies renouvelables au réseau électrique

Au départ, les unités industrielles basées sur les énergies renouvelables et le photovoltaïque étaient de petite taille. Par conséquent, ces unités ont d'abord été reliées aux réseaux de distribution, d'où l'expression "production décentralisée". À mesure que la technologie progresse, les unités de production deviennent plus grandes et, par conséquent, sont reliées au réseau de transport. Le problème majeur de l'intégration des énergies renouvelables et du photovoltaïque dans les réseaux est de deux types [14].

La variabilité de la production est due aux fluctuations de l'énergie primaire, qui n'est pas dispatchée. L'incertitude entourant les prévisions météorologiques entraîne une incertitude dans la production. Ce problème est plus important dans la production éolienne car les prévisions de vitesse du vent sont moins fiables que les prévisions d'ensoleillement.

Ces problèmes ont conduit à un changement dans la structure du réseau (système multi-source) et à l'établissement de règles ou de critères techniques pour la synchronisation de la production entre les réseaux. En fait, pour les administrateurs de réseaux, il s'agit d'une difficulté à la fois nouvelle et critique.

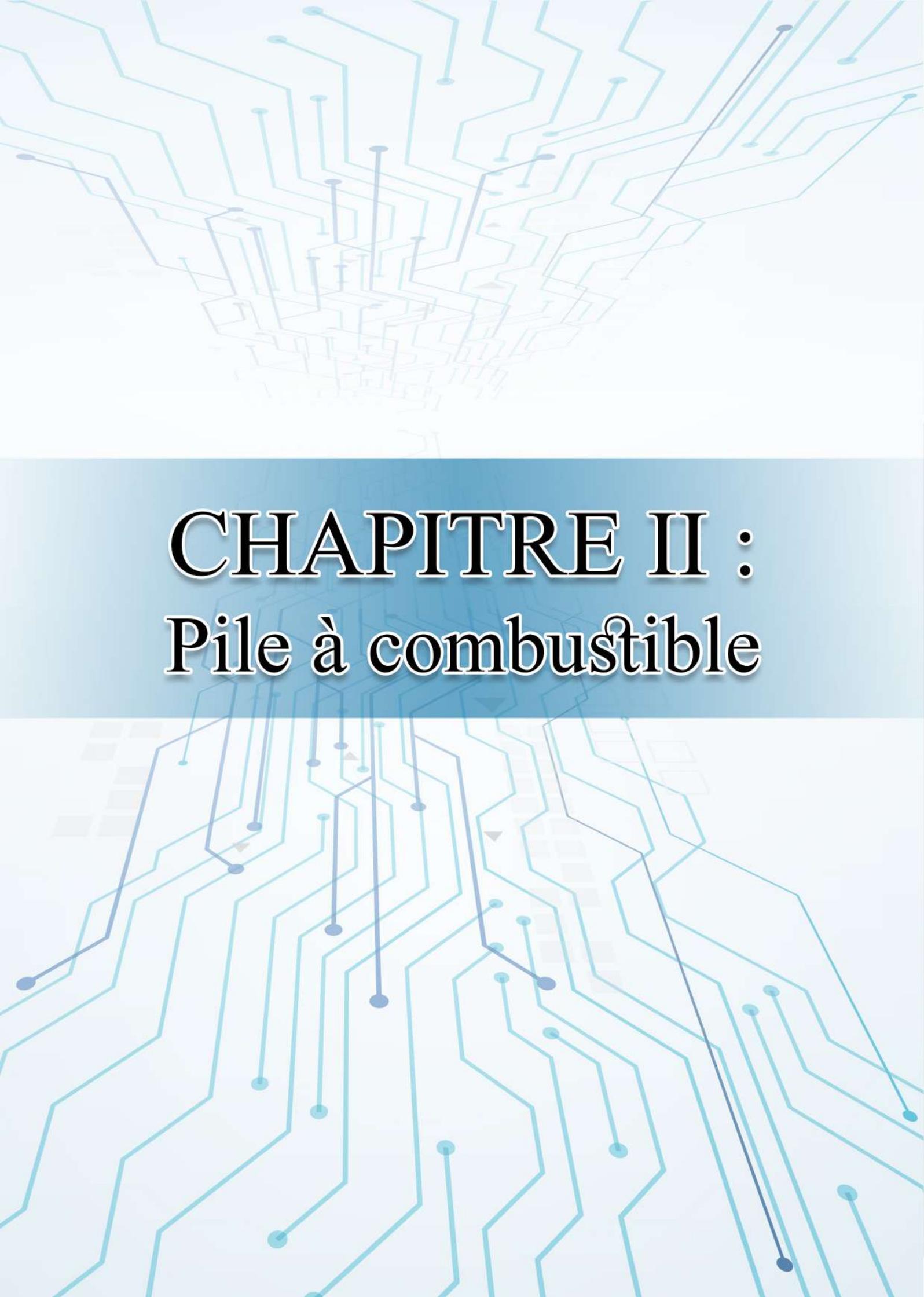
## I.7 Conclusion

Le contexte de ce mémoire ainsi que l'état de l'art sur les énergies renouvelables et l'intégration au réseau, sont présentés dans ce chapitre. L'augmentation de la consommation énergétique mondiale et le changement climatique sont les moteurs de la recherche de nouvelles technologies de production d'électricité qui ne dépendent pas des combustibles fossiles et ne présentent aucun risque pour l'environnement. Les sources d'énergie renouvelables ont le potentiel de répondre à une partie importante des besoins énergétiques de l'humanité. Étant donné que les secteurs résidentiel et industriel comptent parmi les plus gros

consommateurs d'électricité, l'avènement de la production décentralisée d'électricité devrait permettre de répondre en partie aux besoins énergétiques locaux tout en augmentant l'utilisation des sources d'énergie renouvelables. Une simple augmentation des sources d'énergie renouvelables pourrait avoir des conséquences défavorables sur la stabilité et le fonctionnement global du système électrique. Les générateurs actuels, qui sont basés sur des sources d'énergie renouvelables, ne sont pas en mesure de participer aux fonctions du système, et leur production a un caractère imprévisible. C'est pourquoi nous allons nous intéresser à la gestion de l'énergie pour les installations de stockage, qui sera abordée dans les prochains chapitres.

**Référence bibliographique**

- [1] Angel Cid Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques," Thèse de Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Septembre 2006.
- [2] <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr> consultée le 15/01/2022
- [3] <http://portail.cder.dz/spip.php?article4446> consultée le 03/02/22
- [4] le journal officiel février 2011 page (18)
- [5] Salhi, I, Doubabi, S, Essounbouli, N et Hamzaoui, A. "Application of multi-model control with fuzzy switching to a micro hydro-electrical power plant", *Renewable Energy*, 35(9) – Page 2071-2079, 2010.
- [6] K. Hristiyan, "Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable : Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain", Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Ecole Central de Lille, France, 2014
- [7] Ch. Darras, "Modélisation de systèmes hybrides Photovoltaïque / Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet pepite(ANR PAN-H)", Thèse de Doctorat en Energétique et Génie des Procédés, l'université de Corse, France, 2011.
- [8] Principe de Carnot : *Revue de Métaphysique et de Morale T. 18, No. 2 (Mars 1910)*, pp. 147-179 (33 pages) Publiée par : Presses Universitaires de France
- [9] L. Freris et D. Infield, " Les énergie renouvelable pour la production d'électricité ", DUNOD, Paris 2009.
- [10] L. Protin, S. Astier, " Convertisseurs photovoltaïques ", *Technique de l'Ingénieur*, Ref : D 3360, 1997.
- [11] C. Cabal, " Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ", Thèse de doctorat, Université de Toulouse III, 2008.
- [12] O Rourke, F., Boyle, F., and Reynolds, A. " Tidal energy update 2009 ", *Applied Energy*, 87(2) :398-409, 2010.
- [13] Analyse du cycle de vie d'une centrale géothermique haute énergie dans le contexte des DROM BRGM/RP-62538-FR Mars 2014
- [14] H. Bayem, "Apport Des Méthodes Probabilistes Aux Etudes D'insertion Des Energies Renouvelables Dans Les Systèmes Electriques", Thèse de Doctorat, Université Pris Sud11, 200



# CHAPITRE II :

## Pile à combustible

## II.1. Introduction

Actuellement, avec le développement de l'industrie, nous consommons de plus en plus de ressources énergétiques, comme le charbon, le pétrole, le gaz naturel, etc. La limite de ces ressources est devenue un sujet d'inquiétude publique. La question énergétique concerne actuellement deux domaines. L'un est lié au risque d'épuisement des ressources fossiles et fissiles, et l'autre aux problèmes de pollution de l'environnement tels que l'effet de serre et les pluies acides.

Face à la diminution des ressources énergétique et à l'aggravation de la pollution énergétique, il est impératif de réduire la pollution globale et de chercher des alternatives énergétiques avec les mêmes propriétés que les hydrocarbures, Dans ce contexte, l'hydrogène est une solution sérieuse et intéressante en tant que source d'énergie renouvelable. L'hydrogène, qui n'existe pas à l'état naturel, peut en effet être synthétisé à partir des énergies renouvelables. Il est particulièrement intéressant car son stockage est possible sous différents états (gaz, liquide et solide). D'autre part, il est léger et "propre". Mais il ne peut pas être utilisé directement, et nécessite de transformer l'énergie chimique en énergie électrique. Cette production d'énergie se fait au niveau de la pile à combustible.

Dans ce chapitre, nous commençons par un bref historique sur la pile à combustible, puis leur définition et sa structure générale suivi de leur principe de fonctionnement. Le choix de la pile à combustible de type SOFS parmi les autres, selon certains critères, nous conduit à approfondir ce type. Pour finir ce chapitre on cite les différentes applications des piles à combustible.

## II.2. Historique

La flèche temporelle de l'historique des piles à combustible est illustrée à la figure II.1. La découverte du fonctionnement de la pompe à chaleur a été faite en 1802 par Sir Henri David (génération d'électricité par électrolyse inverse de l'eau) puis en 1838 par le suisse Christiane Schönbein qui découvre l'effet PAC. L'anglais William Grove et le Suisse Christian Schönbein ont créé le premier prototype en 1845, nommé « GasBattery ». En 1889, Ludwig Mond et son assistant Charles Langer ont créé une pile à combustible avec des électrodes de platine perforées qui produisaient une tension de 0.75V et une densité de flux (par la chaleur traversant une unité de surface) est d'environ 2(A)/m<sup>2</sup>. D'où le nom de « Fuel Cell ».

En 1921, le Suisse Emil Baur améliore les performances des piles à combustible en les faisant fonctionner à haute température (1000°C). Puis, en 1932, l'Anglais Francis Thomas Bacon de l'Université de Cambridge reprend les travaux de Monde et Lange en remplaçant l'élément platine par le nickel et l'acide phosphorique par la soude. Ce sera la première pile alcaline (AFC,

pile à combustible alcaline).

Emile Baur a conclu en 1933 que la meilleure configuration pour une pile est la combinaison de l'hydrogène comme combustible et un composé alcalin comme électrolyte. La NASA a utilisé la pile combustible de M. Bacon comme générateur pour ses engins spatiaux habitables dans les années 1960 [1].

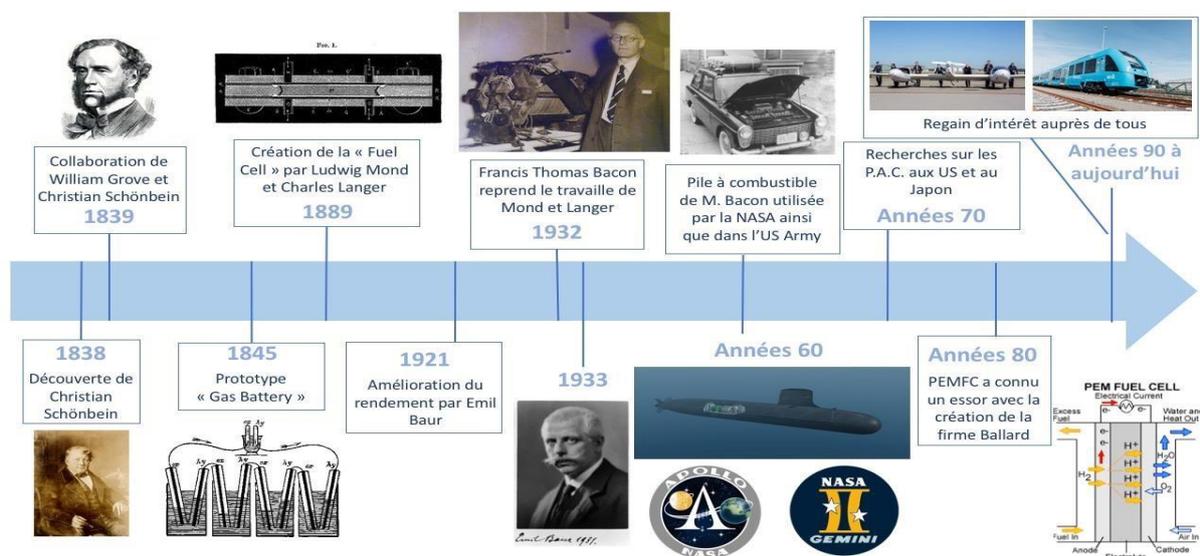


Figure II.1: Flèche chronologique de l'histoire de la pile à combustible [1].

La figure II.2 représente une transmission électrique et une voiture Austin A40 (cette dernière a une autonomie de 300 kilomètres et a parcouru une distance totale de 16000 kilomètres en trois ans).



Tracteur électrique

Austin A40

Figure II.2. Quelques un des premiers prototypes de véhicules fonctionnant avec une pile [2]

### II.3. Définition d'une pile à combustible

Les piles à combustible sont des dispositifs électrochimiques qui convertissent l'énergie chimique en énergie électrique en oxydant un combustible avec de l'oxygène. Elles sont constituées d'une anode et d'une cathode séparées par un électrolyte électriquement isolant qui permet la diffusion d'ions ou de protons. Nous distinguons six grands types de piles

combustibles en fonction de la nature de l'électrolyte qu'elles contiennent. Le **tableau.II.1** énumère les nombreuses piles à combustibles qui ont été mis au point, ainsi que leurs caractéristiques et leurs conditions d'exploitation.

**Tableau.II.1.** Principaux types de piles à combustible [3]

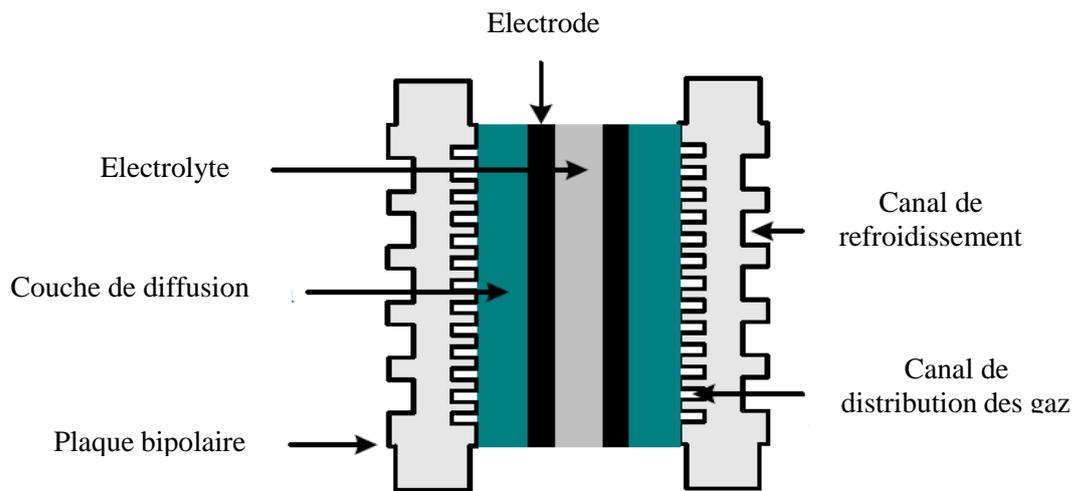
	<b>Electrolyte</b>	<b>Ions dans l'électrolyte</b>	<b>Niveau de température</b>	<b>Combustible</b>	<b>Oxydants</b>	<b>Domaine d'application</b>	<b>Rendement</b>
AFC	Solution KOH	OH <sup>-</sup>	60-80°C	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> (pur)	Spatial	55-60 %
PEMFC	Membrane Polymère Conductrice de protons	H <sup>+</sup>	60-100°C	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)	Air	Automobiles, Portable, Cogénération, Maritime	32-40 %
DMFC	Membrane Polymère Conductrice de protons	H <sup>+</sup>	60-100°C	Méthanol	Air	Portable	15-25 %
PAFC	Acide Phosphorique	H <sup>+</sup>	190°-220°C	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)	Air	Cogénération	85%
MCFC	L <sub>12</sub> CO <sub>3</sub> et KCO <sub>3</sub> Fondus dans une matrice L <sub>1</sub> AlO <sub>2</sub>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	600°-660°C	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)	Air	Cogénération, Production centralisée d'énergie	80-85%
SOFC	YSZ (céramique)	O <sup>-2</sup>	800°-1000°C	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)	Air	Cogénération, Production centralisée d'énergie	60/65%

Selon ce tableau, nous pouvons diviser les piles à combustible en deux catégories en fonction de la température de fonctionnement :

- **Les piles à combustible haute température (200 - 1000°C) :** Essentiellement les piles à combustible à oxyde solide (SOFC), les piles à combustible à carbonate fondu (MCFC) et les piles à combustible à acide phosphorique (PAFC).
- **Les piles à combustible basse température (≈ 100°C) :** Les piles à électrolyte alcalin (AFC), les piles à membrane polymère échangeuse de protons, (PEMFC) et les piles à méthanol direct (DMFC) se distinguent par leur faible température de fonctionnement.

#### II.4. Structure générale d'une pile à combustible

Une pile combustible est constituée d'une grappe de cellules, chacune composée de deux électrodes poreuses (anode et cathode) séparées par un électrolyte. De chaque côté de l'électrode, il y a deux couches de diffusion et deux plaques bipolaires. La structure d'une cellule d'une pile inflammable est illustrée à la **figure.II.3**.



**Figure.II.3.** Structure générale d'une cellule d'une pile à combustible [4].

#### II.4.1. Les électrodes (anode et cathode)

Les électrodes sont les sites de réactions électrochimiques telles que l'oxydation anodique et la réduction cathodique. Ces réactions sont influencées par l'état des surfaces des électrodes ainsi que par la facilité avec laquelle elles peuvent être réalisées [7]. Ils créent ainsi une zone de triple contact au site de réaction. Les électrodes ont une fonction triple [8] :

- Soutenir le catalyseur finement divisé et lui permettre de faire contact avec le gaz.
- Permettre aux protons de passer des sites catalysés par oxydation de l'hydrogène aux sites catalysés par réduction de l'oxygène.
- Évacuer les électrons des sites catalytiques anodisés et les redistribuer aux sites catalytiques cathodiques.

#### II.4.2. L'électrolyte

L'électrolyte (cœur de la cellule) permet aux ions (et non aux électrons) de passer de l'anode à la cathode. Il varie selon le type de pile :

- Pour les piles alcalines, utiliser du KOH (AFC).
- Échangeurs d'ions membranaires pour pile avec échange membranaire de protons (PEMFC) ou piles avec méthanol direct (DMFC).
- L'acide phosphorique pour les piles d'acide phosphorique (PAFC).
- Oxyde solide pour pile d'oxyde solide (SOFC) l'électrolyte est un composant clé d'une pile combustible. Il doit remplir plusieurs fonctions, y compris isoler électriquement les deux électrodes, séparer efficacement les regards pour éviter le contact direct entre le combustible et le gaz oxydant, et ainsi de suite.

La conductivité d'un électrolyte est principalement déterminée par sa température de fonctionnement et son taux d'hydratation. Ce dernier aspect pourrait ajouter une couche de complexité à la fabrication de l'électrolyte, qui est le résultat d'un compromis entre ces plusieurs paramètres : propriétés mécaniques, conductivité ionique, perméation gazeuse, stabilité chimique, propriétés d'hydratation et coût de fabrication. Il doit également avoir de bonnes propriétés de résistance mécanique et chimique pour résister aux contraintes de pression thermique et d'hydratation [9]. Le matériau utilisé varie selon le type de pile.

### II.4.3. Les plaques bipolaires

La plaque bipolaire est la frontière entre deux éléments cellulaires de pile combustible, ainsi nommés parce qu'ils incluent le pôle positif d'une cellule et le pôle négatif de la suivante. Ces plaques servent à diverses fins [9] :

- La connexion électrique entre les deux plaques mono polaires et le circuit externe.
- La collecte des électrons libérés au niveau de l'électrode afin d'assurer la conductivité du courant électrique.
- L'évacuation des produits non consommés et des matériaux réactifs.
- La tenue mécanique de la cellule.
- La séparation des gaz à l'anode et à la cathode.
- La collecte du courant.

Les plaques doivent avoir un niveau élevé de conductivité, une bonne inertie chimique, en particulier par rapport à l'eau et aux acides, et une faible perméabilité à l'hydrogène. Ils doivent également être résistants à la corrosion et légers de sorte que les époxydes nécessaires à la construction d'une pile inflammable ne soient pas trop lourds.

Les plaques de refroidissement qui sont placées entre les unités cellulaires ou les groupes de cellules sont similaires dans la conception, avec des canaux de refroidissement qui sont conçus pour maximiser les échanges thermiques. Les entrées et les sorties des fluides sont situées sur les plaques de refroidissement bipolaire, ce qui garantit également que les plaques à côté sont connectées. La présence de joints entre les plaques garantit que les flux de carburant, d'oxygène et de liquide de refroidissement ne se mélangent pas.

### II.4.4. Les couche de diffusion

Le but des couches de diffusion est d'assurer :

- Une dispersion uniforme du gaz sur toute la surface de réaction (couche de réaction), qui est la surface active de l'électrode.
- Faire une connexion électrique entre la couche active et les plaques bipolaires.

- Évacuer l'eau produite du côté de la cathode pour éviter une accumulation de liquide qui augmente la résistance au transport de gaz et limite ainsi leur diffusion.

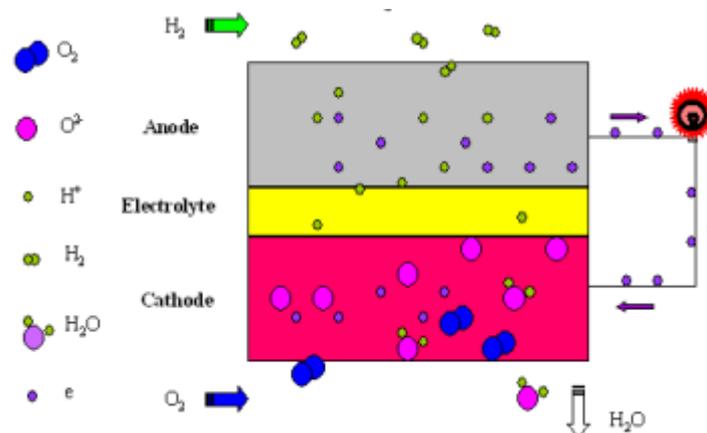
Les composants des couches de diffusion doivent avoir une bonne résistance mécanique à la température et à l'eau, ainsi qu'une alimentation constante en gaz pour éviter les points chauds (en raison de l'isotherme d'une réaction chimique) qui peuvent causer des fissures dans l'électrode [9]. Ils doivent également avoir une bonne inertie chimique parce qu'ils sont dans un environnement hautement corrosif.

## II.5. Principe de fonctionnement

Une pile combustible fonctionne selon le principe inverse de l'électrolyse de l'eau. Les réactions chimiques permettent la production d'énergie électrique. En général, le combustible est l'hydrogène, qui réagit avec l'oxygène pour produire de l'eau selon une réaction chimique universellement comprise [10] :



La réaction électrochimique utilise une membrane électrolytique solide qui conduit des protons et est théoriquement imperméable aux gaz réactifs (hydrogène et oxygène). L'électrolyte est inséré entre deux électrodes (anode et cathode). L'ensemble électrode membranaire (MEA, ensemble électrode membranaire) est représenté schématiquement à la **figure.II.4**.



**Figure.II.4.** Schéma d'une MEA relatif au principe de fonctionnement d'une pile à combustible [10].

Les électrodes fonctionnent comme des catalyseurs, ce qui permet d'activer un côté d'une réaction.

L'anode, l'oxydation du combustible (hydrogène) produit des ions et des électrons, selon **l'équation.II-2**. Les électrons sont toujours transférés de l'anode à la cathode. Les électrons permettent alors la réduction de l'oxydant (oxygène de l'air) et la génération d'ions oxygène à

la cathode, comme le montre **l'équation.II-3**. Les réactions électrochimiques peuvent être représentées mathématiquement comme suit :

À l'anode :



À la cathode :



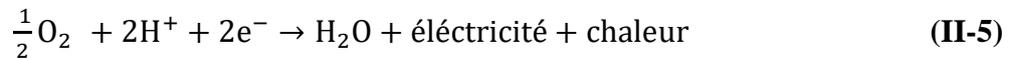
Comme l'électrolyte est un conducteur protonique, le matériau ne permet que le flux d'ions. Les ions produits sur l'anode sont toujours transférés de l'anode à la cathode. Enfin, à la cathode, les ions interagissent avec les ions oxygène pour produire des molécules d'eau. **L'équation.II-4** peut être utilisée pour représenter schématiquement les réactions électrochimiques.

À la cathode :



Cette relation est similaire à celle de la combustion de l'hydrogène et de l'oxygène. L'énergie de la réaction est libérée sous forme de chaleur et d'électricité. Un catalyseur de platine est utilisé pour produire la combustion (Pt).

La réaction chimique globale de la pile est la suivante :



## II.6. Etudes électrochimiques

### II.6.1. Force électromotrice

L'équation de Nernst établit une relation entre le potentiel standard idéal et le potentiel idéal à l'équilibre. Pour les autres conditions de température et de pression, l'expression Nernst pour la réaction **(II-1)** a la forme suivante :

$$E_{\text{Nernst}} = E_0 + \frac{RT}{2F} \left[ \ln \left( \frac{P_{\text{H}_2} \cdot P_{\text{O}_2}^{0.5}}{P_{\text{H}_2\text{O}}} \right) \right] \quad (\text{II-6})$$

L'énergie cinétique d'une réaction entre l'hydrogène et l'oxygène peut également être exprimée sous forme de variation d'énergie libre.

La fluctuation de l'énergie libre de la réaction détermine le travail électrique maximal (W el) fourni par une pile combustible fonctionnant à température et pression constantes :

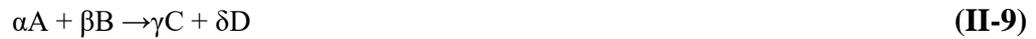
$$W_{el} = \Delta G = -n.F.E \quad (\text{II-7})$$

Si nous considérons le cas où les réactifs et les produits sont en bon état de fonctionnement :

$$\Delta G_0 = -nFE_0 \quad (\text{II-8})$$

$n$  est le nombre d'électrons impliqués dans la réaction,  $F$  est la constante de Faraday, qui est égale à 96487 coulombs,  $E$  est la tension cellulaire idéale, et  $E_0$  est le potentiel réversible normal à une certaine température et pression.

Pour une réaction générale, considérez :



Le changement d'énergie libre s'exprime par :

$$\Delta G = \Delta G_0 + RT \ln \frac{C^{\gamma} D^{\delta}}{A^{\alpha} B^{\beta}} \quad (\text{II-10})$$

La force électromotrice égale à:

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{C^{\gamma} D^{\delta}}{A^{\alpha} B^{\beta}} \quad (\text{II-11})$$

### II.6.2. Caractéristique tension-courant des piles à combustible

Pour caractériser le fonctionnement des piles combustibles, des modèles compliqués sont utilisés, en tenant compte de chaque petit détail dans la conception cellulaire (dimensions physiques, matériaux, etc.) ainsi que des propriétés physiques qui interagissent (phénomènes de transport, chimie, etc.). Lorsqu'un courant circule dans un circuit externe, le potentiel théorique de la pile est inférieur à son potentiel réel. Cela est dû à plusieurs goulottes de tension (polarisation ohmique, polarisation de l'activation, polarisation de la concentration, etc.). Ceux-ci sont présents au niveau des deux électrodes.

### II.6.3. Différentes pertes de tension

Les pertes, aussi connues sous le nom de polarisation, sont causées par trois types de polarisation : polarisation d'activation, polarisation ohmique et polarisation de concentration. Pour une pile de potentiel idéal  $E$ , ces pertes se traduisent par une baisse de tension dénotée par "perte."

$$V = E - \text{perte} \quad (\text{II-12})$$

#### a) Polarisation d'activation

Lorsque la vitesse d'une réaction électrochimique à la surface d'une électrode est contrôlée par le ralentissement de la cinétique pour cette électrode, on l'appelle polarisation d'activation. En d'autres termes, la vitesse d'une réaction chimique est directement liée à la polarisation de l'activation. Dans les deux cas, une réaction chimique ou électrochimique doit commencer et les réactifs doivent passer par une barrière d'activation. Dans le cas d'une réaction électrochimique avec pertes d'activation ( $\eta_{act}$ ) supérieures à 50-100 mV,  $\eta_{act}$  est décrit par l'équation suivante.

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha nF} \ln \frac{i}{i_0} \quad (\text{II-13})$$

Où  $\alpha$  est le coefficient de transfert électronique,  $i$  est la densité de courant traversant la pile,  $i_0$  est la densité de courant d'échange et  $R$  la résistance totale de la pile.

#### a) Polarisation Ohmique

La résistance que le flux d'ions rencontre lorsqu'il traverse l'électrolyte, ainsi que la résistance que les électrons rencontrent dans les électrodes et le circuit électrique, provoquent des pertes ohmiques. La loi d'Ohm est suivie par l'électrolyte et les électrodes. L'équation suivante est utilisée pour calculer les pertes ohmiques :

$$\eta_{ohm} = i \cdot R = i \cdot \sum_{an}^{cat} \frac{e_k}{\sigma_k} \quad (\text{II-14})$$

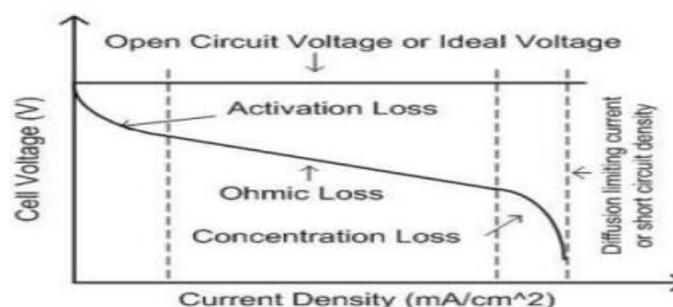
Lorsque  $R$  est la résistance efficace de la cellule,  $e_k$  est l'épaisseur de chaque élément, et  $\sigma_k$  est la conductivité électrique de chaque composant.

#### b) Polarisation de concentration

La polarisation de concentration est exprimée par l'équation suivante :

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \quad (\text{II.15})$$

Où  $i_L$  est la densité de courant limite ( $i_L = 4 \cdot 10^4 \text{ A/m}^2$ ).



**Figure. II.5.** Différents types de pertes de tension en fonction de la densité de courant pour une PAC

La polarisation de l'activation est répandue à de faibles densités de courant, comme le montre dans la **figure.II.4**. Les pertes ohmiques, qui sont directement proportionnelles à la densité de courant, deviennent donc prépondérantes sur une large gamme de densités de courant. Enfin, à des densités de courant élevées, les pertes dues au transport du gaz deviennent dominantes.

## II.7. Avantages et les inconvénients d'une pile à combustible [11]

### II.7.1. Avantages

Voici quelques-unes des raisons pour lesquelles les piles combustibles sont fréquemment présentées comme la solution future pour la production d'électricité stationnaire et embarquée :

- Un bon rendement électrique, même à charge partielle ;
- Une faible émission de polluants (selon le combustible utilisé) ;
- Une architecture modulaire et compacte ;
- De faibles émissions sonores ;
- L'absence de composants mobiles.

### II.7.2. Inconvénients

Les inconvénients des piles combustibles sont liés à leur manque de développement :

- Coûts de fabrication et d'entretien trop élevés ;
- Durée de vie insuffisante ;
- Gestion thermique délicate ;
- Disponibilité insuffisante de l'hydrogène.

## II.8. Applications des piles à combustible

En raison de leurs larges applications et de leurs rentabilités, les piles à combustibles peuvent être utilisées dans presque toutes les circonstances où l'électricité est nécessaire. Nous distinguons principalement trois types d'applications [5-6] :

- Applications stationnaires dans lesquelles les piles fournissent de l'énergie électrique et thermique dans des réseaux ou des installations décentralisées



**Figure.II.6.** Pile à combustible CELLIA fabriqué par MTU

- Les utilisations du transport dans lesquelles les piles sont utilisées pour la formation ou la fourniture d'électricité à bord de l'équipement dans les systèmes embarqués mobiles (automobile, ferroviaire, aéronautique, espace et sous-marin).



**Figure.II.7.** Train Coradia Int[12]

- Applications portables qui couvrent un vaste champ d'appareils électriques (ordinateurs et téléphones mobiles, caméscopes, etc.).



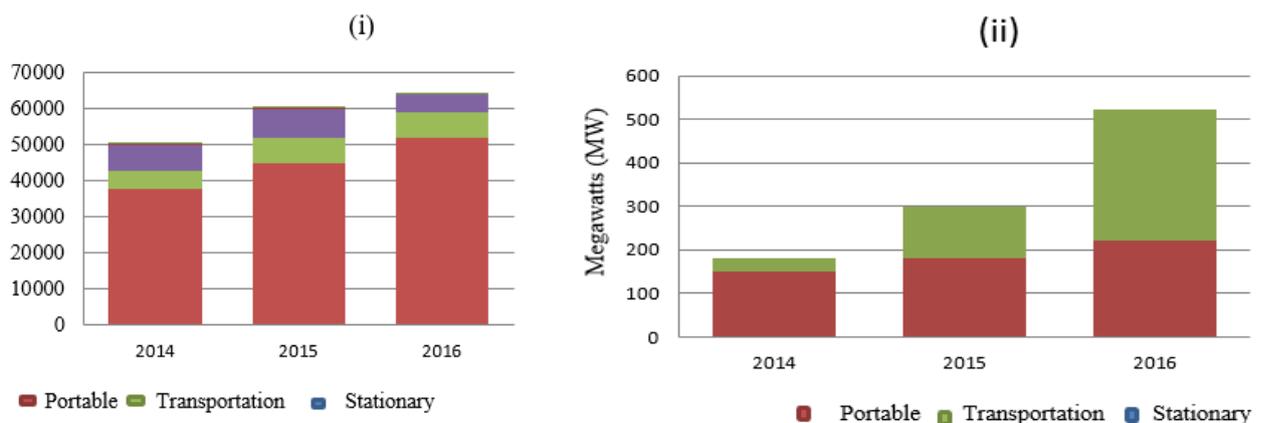
*a. Pile à combustible au méthanol*



*b. Chargeur de téléphone à pile à combustible*

**Figure. II.8.** Exemples des piles à combustible dans les applications portables

Les utilisations du transport dans lesquelles les piles sont utilisées pour la formation ou la fourniture d'électricité à bord de l'équipement dans les systèmes embarqués mobiles (automobile, ferroviaire, aéronautique, espace et sous-marin).



**Figure II.9.** (i) Nombre de piles à combustible expédiées dans le monde entier par application (ii) Mégawatts expédiées dans le monde entier par application [13].

Dans ce chapitre, nous examinerons les piles à combustible du type SOFC.

## II.9. Piles à combustible de type SOFC

Après 50 ans de développement, les SOFCs ont vu leurs premières utilisations industrielles au début des années 1990. Les progrès dans le domaine des matériaux, ainsi que les augmentations importantes du prix des combustibles fossiles, ont encouragé le travail et l'investissement. À l'heure actuelle, les SOFCs sont envisagés pour une large application, y compris la production domestique stationnaire, la cogénération, la production centralisée et décentralisée d'électricité, et l'APU (Auxiliary Power Unit) pour les automobiles et même les avions.

La SOFC a le potentiel d'être intéressant en raison :

- D'un rendement électrique élevé (50 à 70 % dans un cycle combiné);
- De la capacité d'oxyder le monoxyde de carbone et de réformer divers combustibles gazeux ;
- De la capacité de remplacer les métaux précieux dans les électrodes (Pt) par des métaux moins coûteux (Ni) ;
- La capacité d'utiliser la chaleur produite à des températures élevées.

La température de fonctionnement des SOFC se situe entre 600°C et 1000°C, ce qui nécessite que les composants aient des coefficients de dilatation similaires. Le but de la recherche est de mettre au point un SOFC qui fonctionne à une température plus basse (700°C), réduisant ainsi les contraintes matérielles. Cependant, à mesure que la température de la pile baisse, la conductivité ionique des matériaux diminue, réduisant les performances. L'augmentation de la pression de fonctionnement, par contre, permet un plus grand potentiel électrique.

Il n'y a que deux phases au cœur de la pile (solide et gazeuse), ce qui élimine les problèmes associés à la gestion d'une phase liquide. Les électrodes poreuses permettent un accès rapide au gaz vers les sites de réaction. L'anode est souvent un cermet (céramique métallique) à base de nickel dispersé sur du zircon stabilisé. L'électrolyte est une céramique. C'est généralement de la zircone stabilisée avec l'yttrium de la formule  $(ZrO_2)_{1-x}(Y_2O_3)_x$ , qui est un bon conducteur d'ions  $O^{2-}$  (qui diffusent à travers l'électrolyte).

### II.9.1. Principe de fonctionnement de SOFC

En général, les oxydes de gaz combustibles dans les SOFC sont l'hydrogène et le monoxyde de carbone. L'oxygène est réduit du côté cathodique, libérant des ions  $O^{-2}$  qui traversent l'électrolyte. Le combustible est anodisé et oxydé, libérant des électrons.

Anode :



Cathode:

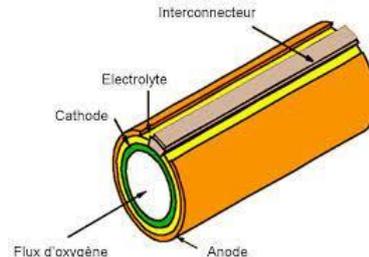


Globalement :



### II.9.2. Les différentes configuration de SOFC

- Siemens - Westinghouse est la société qui a inventé la technologie tubulaire. La cathode sert de support dans le centre du tube. L'anode (à l'extérieur) et l'électrolyte (à l'intérieur) sont entourés de couches concentriques. L'air passe par l'intérieur du tube (côté cathodique), tandis que le combustible passe par l'extérieur du tube (côté anodique).



**Figure.II.10. Technologie tubulaire [14].**

- La technologie sandwich a une structure plus compacte et de base que la technologie planaire. La cellule élémentaire est constituée des électrodes qui entourent l'électrolyte, chacune étant reliée aux autres par des plaques bipolaires. Le principal problème avec cette forme de construction est l'étanchéité cellulaire.

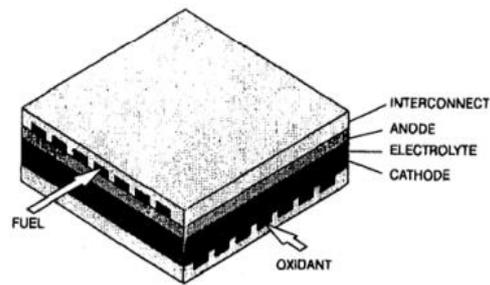


Figure.II.11. Technologie planaire [14].

- La technologie monolithique est plus récente et a été développée au Laboratoire National d'Argonne. L'anode, la cathode et un électrolyte sont formés en plissées et séparés par des joints d'étanchéité (figure II.12). Le flux comburant et combustible peut être parallèle ou croisé dans un échangeur de plaques. Des densités de puissance plus élevées sont disponibles par rapport à la structure tubulaire.

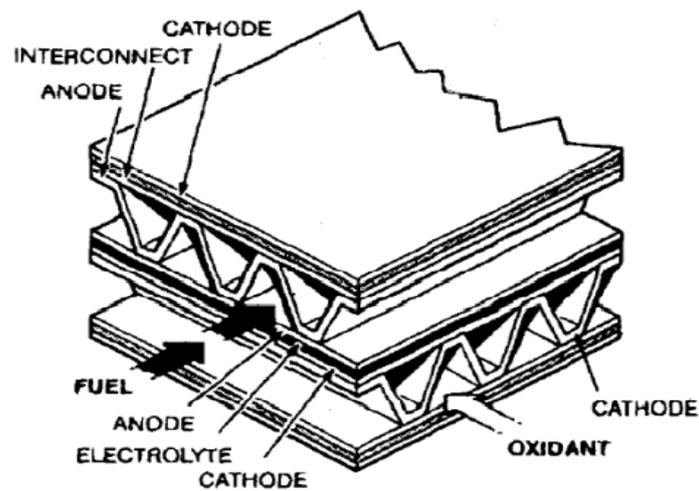
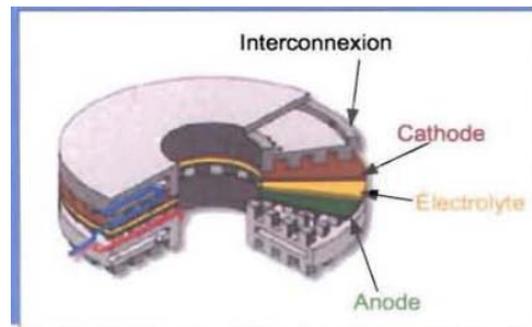


Figure.II.12. Technologie monolithique [14].

- La technologie de Sulzer Hexis est unique en ce sens que les SOFC sont plats et circulants. Chaque cellule est entourée et séparée des autres par des interconnexions, comme le montre la **fig.II.13**. Sulzer travaille sur une pile de faible puissance (1KW) [15].



**Figure.II.13.** Technologie Sulzer Hexis [15].

## II.10. Conclusion

Les piles à combustibles présentent de nombreux avantages énergétiques et environnementaux. Les récentes avancées scientifiques et techniques laissent espérer une mise sur le marché proche. Cependant, une pile à combustible ne peut pas fonctionner seule et elle doit être intégrée dans un système complexe contenant plusieurs appareils, dont parfois un évapore formeur de gaz naturel. Ce que nous expliquerons dans les chapitres suivants.

**Références bibliographique**

- [1] « S. Thomas and M. Zalbowitz, Fuel Cells Green Power. New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 2000. »
- [2] Photo, George WAND, «A battery of batteries under the bonnet (hood) of the AustinA40; the Allis Chalmers D-12, Austin .png; tracteur électrique.png», dans Fuel Cell History , Part2, sur le site ogniwa paliwowe,  
[http://ogniwapaliwowe.info/Fuel\\_Cell\\_History\\_2.pdf](http://ogniwapaliwowe.info/Fuel_Cell_History_2.pdf)
- [3] A. Saadi « Modélisation et commande du circuit d'air d'une pile à combustible PEMFC », thèse de doctorat, université de Biskra, décembre 2014.
- [4] A. L. Dicks and D. A. J. Rand, "Fuel cell systems explained: Third Edition «, Wiley, 2018.
- [5] P. Mayé, "Générateurs électrochimiques : Piles, accumulateurs et piles à combustibles", Dunod, Paris, 2010.
- [6] [www.fuelcells.org/basics/apps.html](http://www.fuelcells.org/basics/apps.html). Consulter le 20/04/2022.
- [7] N. P. Brandon and D. Thompsett, "Fuel Cells Compendium", Elsevier, 2005,
- [8] G. Hoogers, "Fuels Cell Technology Handbook ", CRC Press, Birkenfeld. Germany, 2003.
- [9] A. Haddad, " Modélisation dynamique non linéaire de la pile à combustible du type PEM: application à la régulation de l'humidité dans la membrane électrolytique", Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2009.
- [10] R. Hayre, S. W. Cha, W. Colella, and F. B. Prinz. Fuel Cell Fundamentals. Wiley, 2005.
- [11] Gregor Hoogers - Fuel cell technology handbook, CRC Press, 2002
- [12] Coradiailint « le premier train à hydrogène au monde », septembre 2016,
- [13] S. Curtin and J. Gangi, "Fuel Cell Technologies Market Report," U. S. D. O. ENERGY, Ed., ed. Washington, D.C., 2017.
- [14] N.Q. Minh and T. Takahashi, "Science and technology of ceramic fuel cells", Elsevier, 1995.
- [15] Karl Kardesch, Gunter Simader - Fuel Cell and Thier Applications, VCH Publishers, USA,1996.



# CHAPITRE III :

Aperçue générale sur les batteries

### III.1. Introduction

Face au problème de la carence d'énergie des sources d'énergie renouvelables, des différents types de solutions techniques ont été offerts. Le système de stockage d'énergie est considéré comme une meilleure solution. Ce type de stockage d'énergie peut aider à équilibrer les pannes d'électricité intermittentes causées par des sources d'énergie renouvelable, ainsi que les erreurs opérationnelles, les pannes d'électricité imprévues, les défaillances de composants...etc [1].

La combinaison d'un système de stockage d'énergie peut apporter des avantages tels que la régulation de la fréquence et de la tension dans les réseaux électriques, ainsi que la description de la clé de la production d'énergie renouvelable, comme les systèmes photovoltaïques et les éoliennes connectées au réseau. Il fournit non seulement une solution technique aux gestionnaires de réseau pour assurer l'équilibre production-consommation en temps réel, mais il permet également une meilleure utilisation des énergies renouvelables ou des ressources solaires tout en évitant un gaspillage de ressources en cas de surproduction [2].

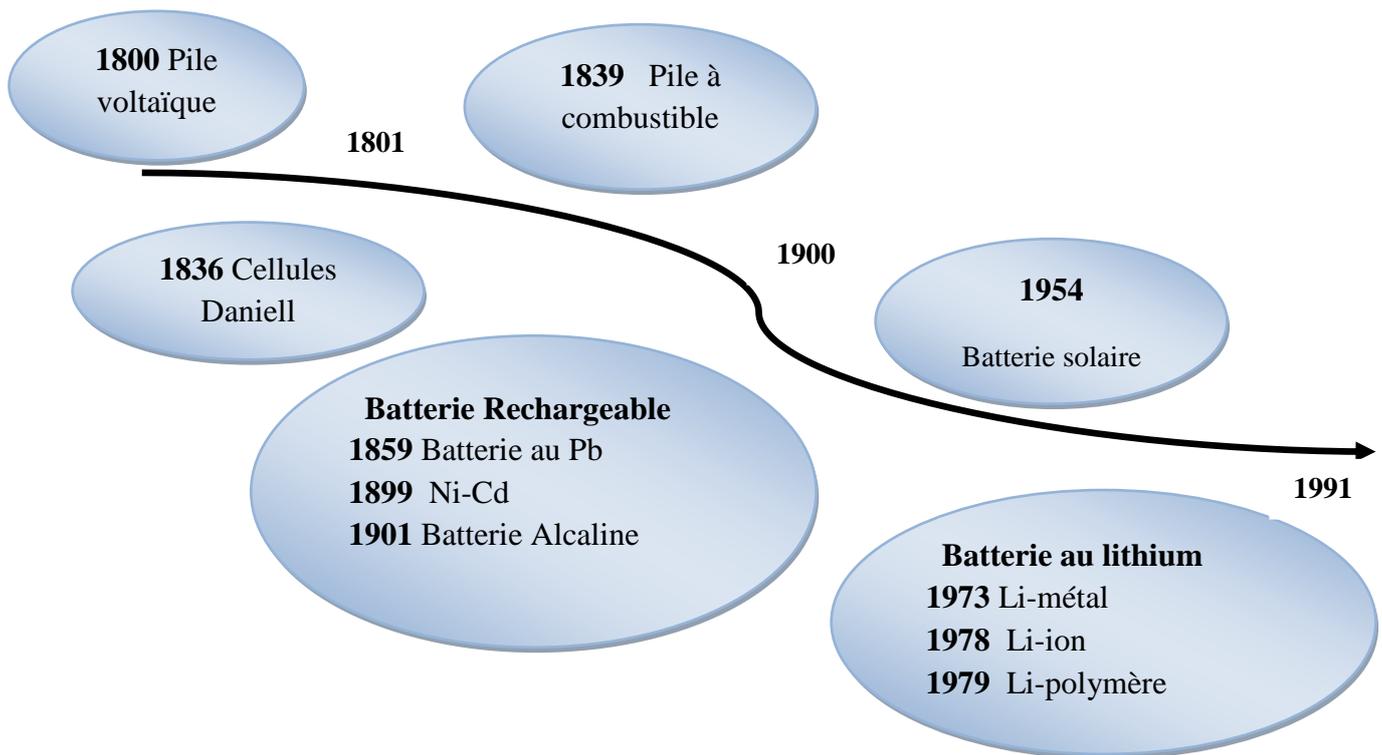
Ce chapitre présente l'historique des batteries leurs différents types avec ces avantages et ces inconvénients, en mettant en relief leurs domaines utilisation et son importance.

### III.2. Historique des batteries

- En 1748, Benjamin Franklin a inventé pour la première fois le terme «batterie» pour décrire un ensemble de plaques de verre chargées.
- Entre 1780 à 1786, Luigi Galvani a démontré ce que nous connaissons maintenant comme la base électrique de l'influx nerveux et a jeté les bases pour les futurs inventeurs comme Volta pour créer des batteries.
- En 1800, Alessandro Volta a inventé la pile Voltaïque et découvert la première méthode pratique de production d'électricité. La Pile Voltaïque génère un courant électrique en alternant des disques de zinc et de cuivre avec des morceaux de carton trempés dans la saumure entre les métaux. Le conducteur d'arc métallique a été utilisé pour transporter l'électricité sur une plus longue distance. La pile voltaïque d'Alessandro Volta a été la première "pile humide" à fournir un courant électrique fiable et constant.
- En 1836, La pile voltaïque a été incapable de fournir du courant électrique pendant une période étendue. L'Anglais John F. Daniell a inventé la cellule de Daniell, qui a utilisé deux électrolytes : le sulfate de cuivre et le sulfate de zinc. La cellule Daniel a duré plus longtemps que la cellule ou pile Volta. Cette batterie, qui a produit environ 1,1 volt et a été utilisé pour alimenter des objets tels que des télégraphes, des téléphones et des sonnettes, est resté populaire dans les foyers depuis plus d'un siècle.

- En 1839, William Robert Grove allume la première pile à combustible au monde, qui génère de l'électricité en combinant de l'hydrogène et de l'oxygène
- Entre 1839 à 1842, Les inventeurs améliorèrent les batteries qui produisaient de l'électricité à l'aide d'électrodes liquides. La plus réussie fut inventée par Bunsen (1842) et Grove (1839).
- En 1859 Rechargeable Gaston Plante, un inventeur français, a inventé la première batterie plomb-acide rechargeable pour le stockage pratique (batterie secondaire). Ce genre de batterie est actuellement le plus souvent trouvé dans les automobiles.
- Cellule Carbone-Zinc Leclanche 1866, Georges Leclanche, ingénieur français, a fait breveter la cellule Leclanche, une batterie humide au carbone et au zinc. La cellule originale de George Leclanche a été assemblée dans un récipient poreux. L'électrode positive était faite de dioxyde de manganèse broyé avec un peu de carbone mélangé. Une tige de zinc était le pôle négatif. La cathode a été insérée dans le pot, et une tige de carbone a été insérée pour agir comme collecteur de courant. L'anode ou la tige de zinc, ainsi que le pot, ont ensuite été immergés dans une solution de chlorure d'ammonium. Le liquide a agi comme un électrolyte, infiltrant facilement le couplage poreux et entrant en contact avec le matériau de la cathode.
- En 1881, JA Thiebaut est le premier à breveter une pile avec une électrode négative et un pot poreux logé dans une coupelle en zinc.
- En 1899, Waldmar Jungnerin vente la première batterie rechargeable au nickel-cadmium.
- En 1901, Thomas Alva Edison invente la batterie alcaline. La pile alcaline de Thomas Edison utilisait du fer comme anode (-) et de l'oxyde de nickel comme cathode (+).
- En 1949, New Urry a développé une petite pile alcaline. L'inventeur travaillait pour Eveready Battery Company dans leur laboratoire de recherche à Parme, Ohio. Les piles alcalines durent cinq à huit fois plus longtemps que leurs prédécesseurs, les piles zinc-carbone.
- En 1954 La première batterie solaire a été inventée par Gerald Pearson, Calvin Fuller et Daryl Chapin. L'énergie du soleil est convertie en électricité par une batterie solaire. Gerald Pearson, Calvin Fuller et Daryl Chapin ont inventé la première batterie solaire en 1954. Les inventeurs ont conçu un réseau de nombreuses bandes de silicium (chacune de la taille d'une lame de rasoir), qu'ils ont placées dans la lumière du soleil, capturant les électrons libres et les convertissant en courant électrique. Les Laboratoires Bell de New York ont annoncé la création d'un prototype de nouvelle batterie solaire. Bell avait financé les recherches. Le premier essai public de la batterie solaire par Bell a commencé le 4 octobre 1955, avec un système téléphonique (Americus, Géorgie).
- Entre 1973 à 1979, Les batteries en lithium sont inventées par Michael Stanley Whittingham, John Bannister Goodenough , Akira Yoshino [3].

- En 1991 Premier modèle commercial de batterie Li-ion produit par Sony Corp [4].



**Figure III.1.** Frise chronologique de l'évolution des différents systèmes de batteries

### III.3. Description

Une batterie est un composant électrochimique "générateur réversible", permettant de stocker l'énergie électrique sous une forme chimique, puis de la libérer de manière contrôlée sous forme de courant continu . Tous les types de batteries comportent une électrode positive et une électrode négative immergées dans un électrolyte, le tout contenu dans un récipient. Contrairement à une pile, l'accumulateur est basé sur un système électrochimique réversible qui peut être rechargé

Une cellule est constituée de trois composants fondamentaux [5].

- Une électrode positive (cathode),
- Une électrode négative (anode),
- Un électrolyte

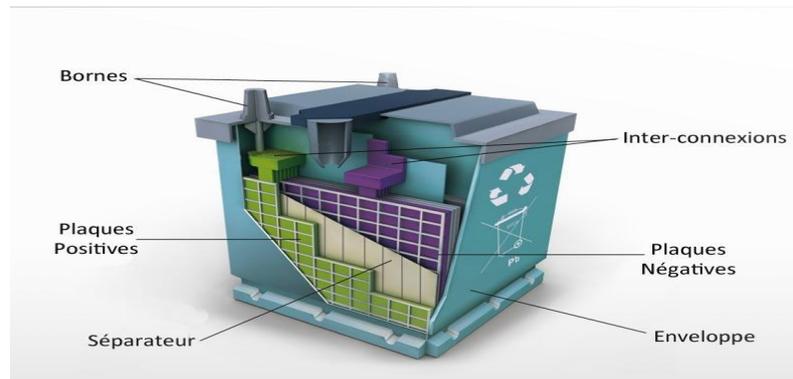


Figure III.2. Description de l'intérieur d'une batterie [26]

### III.4. Principe de fonctionnement des batteries

Deux électrodes immergées dans un électrolyte forment une chaîne électrochimique dans laquelle différents types de lames métalliques peuvent jouer différents rôles, comme les électrodes. La chaîne électrochimique fonctionne comme un générateur de courant en convertissant l'énergie chimique en énergie électrique. Les réactions électrochimiques ont lieu au niveau de ces électrodes. Ces réactions peuvent être décrites de manière générale comme suit [6] :

Au niveau de l'anode qui est l'électrode négative se fait la réaction de l'oxydation Pendant la décharge, qui est définie par la formule suivante :



$M_1$  : étant l'espèce active de l'anode

Les électrons libérés vont passer par un circuit externe pour atteindre la cathode, qui est l'électrode positive, où la réaction de réduction va se produire :



$M_2$  : étant l'espèce active de la cathode

La réaction de l'oxydoréduction globale est la suivante :



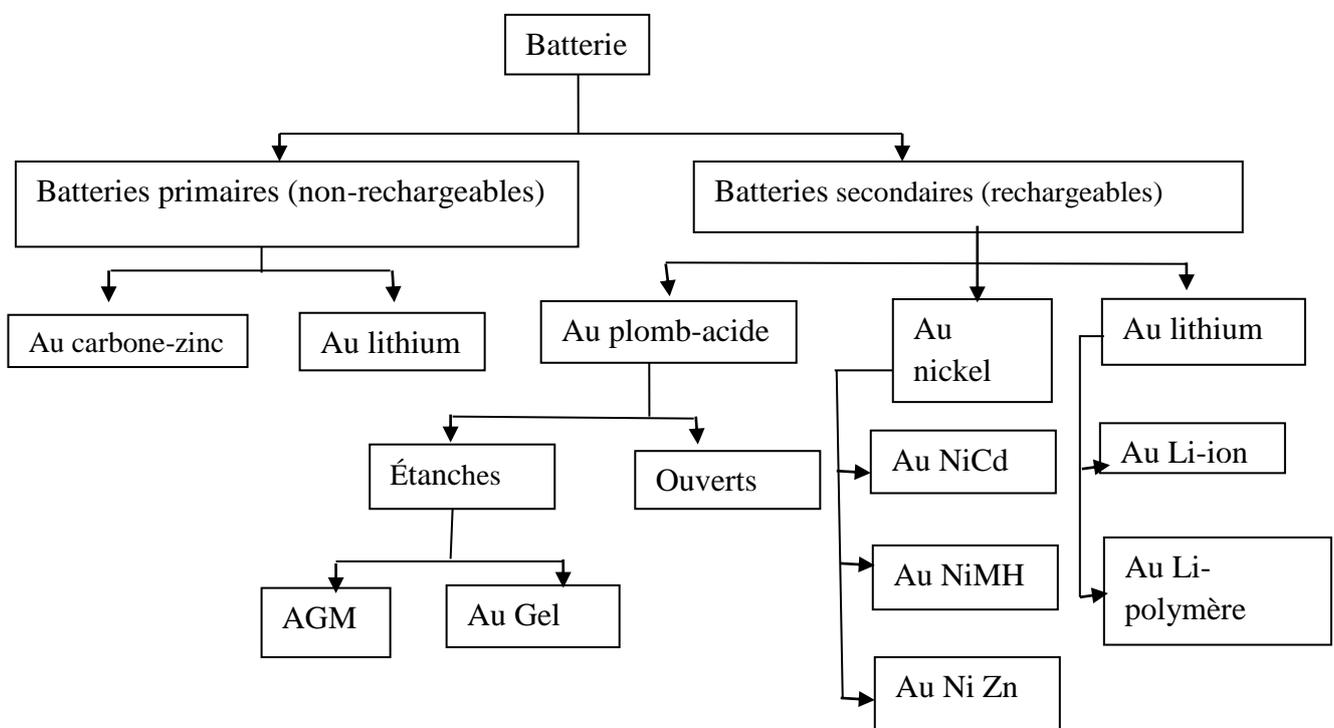
### III.5. Fonctionnement d'une batterie solaire

Son fonctionnement de base est le même que celui des autres types des batteries (batteries de démarrage de voiture, batteries de téléphone, etc.), c'est-à-dire que l'énergie est stockée sous forme chimique. Un certain nombre de composants (les plus courants étant le plomb et l'acide) interagissent en interne, ce qui permet de stocker ou de libérer de l'électricité à tout moment. Cependant, la manière dont les batteries solaires sont utilisées diffère, ce qui nécessite l'utilisation de différentes technologies. Les batteries solaires se déchargent lentement sur de longues périodes et ne sont parfois rechargées que quelques jours plus tard. C'est pour cette raison qu'elles sont également appelées "batteries

stationnaires" ou "batteries à décharge lente". Le terme exact, quand on parle de batterie, est « batterie d'accumulateurs ». Elles sont constituées de plusieurs éléments (accumulateurs) ayant chacun une tension de 2V. Ces éléments sont connectés en série pour fournir une tension plus élevée. Il existe des batteries solaires dans les gammes de tension suivantes : 2V, 6V, 12V (la plus courante), 24V, et même 48V [7].

### III.6. Différents types des batteries

En général, les batteries peuvent être divisées en deux grandes catégories (**Figure III.3**), les batteries primaires et secondaires.



**Figure III.3.** Classification des batteries [8]

#### III.6.1. Batteries primaires

La batterie primaire peut stocker et fournir de l'énergie électrique, mais ne peut pas être rechargée. Les batteries typiques au carbone-zinc et au lithium couramment utilisées dans les dispositifs électroniques de consommation sont des batteries primaires. Les batteries primaires ne sont pas utilisées dans les systèmes PV parce qu'elles ne peuvent pas être rechargées [8].

#### III.6.2. Batteries secondaires (ou rechargeables)

Une batterie secondaire peut stocker et délivrer de l'énergie électrique, et peut également être rechargée en y faisant passer un courant dans un sens opposé au courant de décharge. Il existe

plusieurs types de batteries secondaires. Elles diffèrent selon les paramètres relatifs aux matériaux des électrodes et de l'électrolyte. Ceci se traduit par différentes propriétés électriques telles que la densité énergétique, le rendement, la durée de vie, la température de fonctionnement, la résistance interne et l'autodécharge et ainsi par des propriétés économiques telles que le coût de la batterie et son besoin à l'entretien [9].

### III.6.2.1. Batteries au plomb (lead acid)

L'accumulateur plomb-acide à pleine charge est composé de deux électrodes : une cathode en dioxyde de plomb ( $\text{PbO}_2$ ) et une anode en plomb ( $\text{Pb}$ ), immergées dans une solution d'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), l'électrolyte [10].

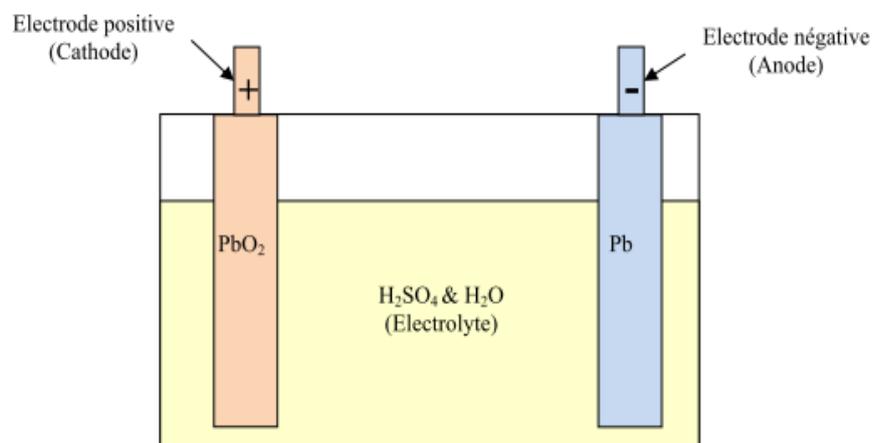


Figure III.4. Composants principales d'une batterie au plomb (cellule) [9]

On y trouve deux sortes

- **Batteries au plomb ouvertes** Batteries ouvertes utilisant un électrolyte d'acide sulfurique dilué avec de l'eau distillée. Elles ont la particularité d'être des économiseurs fiables dont la technologie est connue et perfectionnée depuis le XIXe siècle. Elles présentent l'inconvénient d'être fortement influencées par la température ambiante, ce qui réduit leur capacité. De plus, ils nécessitent un entretien régulier (mise à niveau avec de l'eau distillée), car leur électrolyte s'évapore avec le temps [5].

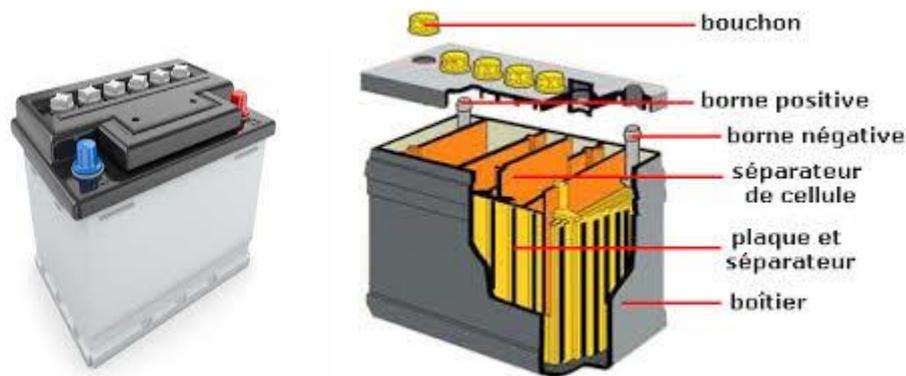


Figure III.5. Batterie au plomb ouverte [27]

- **Batteries au plomb fermées** (Étanches) avec un électrolyte gélifié. Elles ont l'avantage d'être sans entretien, facilement manipulable (pas de fuite) et d'avoir une stabilité contrôlée par le fabricant. Elles ont les inconvénients d'être plus chères et d'avoir une durée de vie plus courte. Elles offrent généralement environ 400 cycles à 80 % de décharge, nous pouvons trouver les batteries suivant : Les batteries GEL (Électrolyte figée par du gel de silice) et Les batteries AGM (Absorbent Glass Mat) [5].

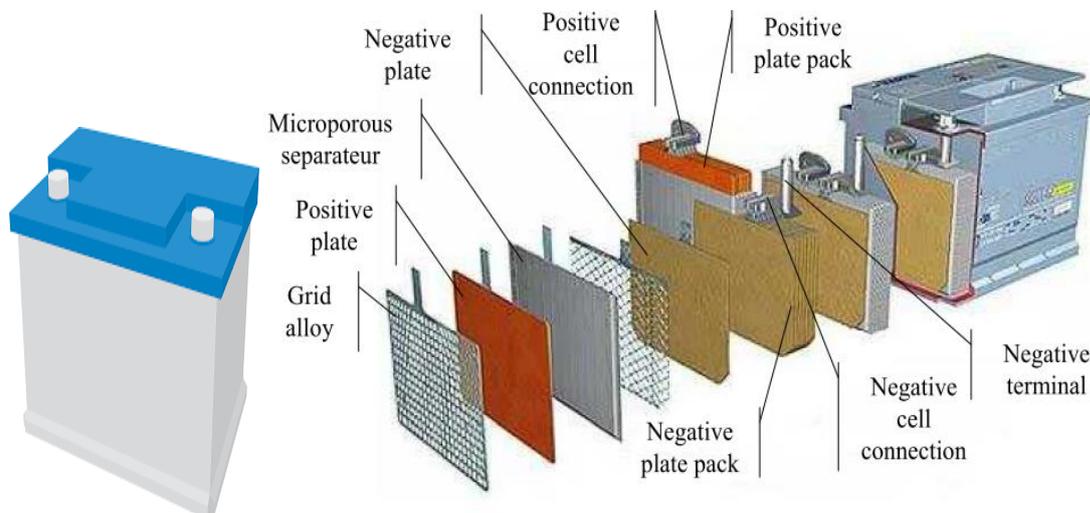


Figure III.6. Batterie au plomb fermée [27]

Les batteries plomb-acide peuvent être regroupées selon leurs applications en trois catégories principales

- **Batteries automobiles** dite aussi SLI (Starting Lighting Ignition): Elles servent au démarrage du véhicule ainsi qu'à fournir l'électricité nécessaire à ses accessoires (éclairage). Elles sont conçues pour fournir un courant élevé pendant une courte durée.

- **Batteries à décharge profonde (Deep Cycle)** : dite aussi batteries de traction, Elles sont des batteries industrielles utilisées pour alimenter les véhicules de transport interne (in-house): chariots élévateurs, voitures électriques, équipements miniers, etc.
- **Batteries stationnaires**: Elles sont couramment utilisées pour l'alimentation de secours, à savoir, pour générer et stocker de l'énergie électrique pour l'utilisation, sur demande, par les systèmes de télécommunication, les centrales électriques, les systèmes informatiques, les systèmes de sécurité, et les équipements militaires où l'interruption de fonctionnement est inconcevable, etc [11, 12].

#### a. Avantages des batteries au plomb d'acide

- Robustesse.
- Faible coût, production de masse, recyclage facile.
- Autodécharge très lente.
- Existe en versions avec recombinaison, sans entretien (dont version étanche).
- Nombreuses variantes technologiques permettant l'adaptation à tous les usages.
- La tension au repos fournit un bon indicateur de l'état de charge [10].

#### b. Inconvénients des batteries au plomb d'acide

- Une faible densité d'énergie massique (densité du Plomb)
- Puissance massique relativement faible, surtout en charge (limitation par le mécanisme de diffusion des ions, la forte distance inter-plaques, et par le gazage ; ce handicap est réduit avec les batteries à recombinaison)
- La capacité est limitée par le volume de l'électrolyte (l'acide sulfurique est consommé pendant la charge, ceci impose une distance minimale inter-plaques)
- Fragilité structurelle des pores de la plaque (sulfatation irréversible, désagrégation et corrosion de la plaque positive)
- Stratification de l'électrolyte (gradient vertical de concentration créé par convection de l'acide pendant la charge ou la décharge), qui entraîne une sulfatation irréversible du bas des plaques et des variations difficiles à modéliser de la concentration utile. Pour les batteries à électrolyte immobilisé, ce problème est pratiquement éliminé [10].

### III.6.2.2. Batteries nickel-cadmium

La structure physique des batteries nickel-cadmium est similaire à celle des batteries plomb-acide. Au lieu de plomb, elles utilisent de l'hydroxyde de nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de cadmium pour les plaques négatives. L'électrolyte est de l'hydroxyde de potassium. Le principal marché de ce type de batterie est celui des appareils portables et des équipements électroniques. Sa tension varie entre 1,15 et 1,2 Volts, par élément suivant l'état de charge [13].



Figure III.7. Batterie nickel-cadmium [28]

#### a. Avantages du NiCd

- Charge simple et rapide, même après une longue période de stockage.
- Se recharge facilement même à basse température.
- Grande durée de vie en nombre de cycle de charge et de décharge.
- Bonnes performances à basse température.
- Résistance interne très faible.
- Stockage aisé, quel que soit son niveau de charge.
- Stockage et transport simple.
- Faible coût. [14].

#### b. Inconvénients du NiCd

- Production polluante.
- Faible densité énergétique.
- Autodécharge assez rapidement (20% / mois).
- Sensibilité à l'effet mémoire [14].

### III.6.2.3. Batteries nickel-métal hydrure

Ces batteries sont dérivées des NiCd et ont été développés pour augmenter la capacité par unité de volume, faciliter les charges rapides, et éliminer le cadmium. Ils sont plus compacts que les NiCd.

En raison de sa densité énergétique élevée, ce type d'accumulateur est actuellement utilisé dans les applications spatiales, la téléphonie mobile, les ordinateurs portables, les équipements médicaux, ainsi que pour les véhicules hybrides dans les dernières années. Une batterie à l'hydrure métallique de nickel offre 40% de densité d'énergie supérieure à celle fournie par une batterie au nickel cadmium de même poids [13].



Figure III.8. Batterie au nickel-métal hydrure [29]

#### a. Avantages du NiMH

- La capacité des accumulateurs à fonctionner pendant des centaines de cycles de charge-décharge.
- Une densité de masse supérieure à celle du nickel-cadmium.
- Simple à stocker et à transporter (l'accumulateur ne contient pas de lithium).
- Ne contient pas de cadmium, métal lourd et toxique [16].

#### b. Inconvénients du NiMH

- Détection de fin de charge complexe.
- Durée de vie plus courte que le nickel-cadmium en nombre de cycles.
- Coût d'achat plus élevé que la technologie standard [16].

### III.6.2.4. Batterie nickel-zinc (NiZn)

Dans le contexte actuel de souci environnemental, le remplacement du cadmium par le zinc serait bénéfique, car ces batteries ont une densité énergétique élevée (25 % de plus que la batterie NiCd). La tension d'une cellule varie de 1,6 à 1,8 V. La question majeure à résoudre est la durée de vie [15].



Figure III.9. Batterie Nickel-Zinc [30]

**a. Avantages des batteries nickel-zinc**

- Longue durée de vie en stockage.
- Une énergie particulièrement élevée.
- Fortes puissance délivrées.
- Aptitude aux régimes de charge et de décharge élevés.
- Fonctionnement sans entretien.
- Les températures de fonctionnement vont (de -20 C° à +60 C°).
- Résistance interne particulièrement faible.
- Grande robustesse du dispositif (y compris en surcharge ou surdécharge).
- Dans toutes les conditions de travail, le niveau de sécurité opérationnelle est élevé et la gestion est simple.
- Pas de métaux lourds, pas de composés instables
- Un recyclage en fin de vie facile, rentable et complet
- À l'exception de l'accumulateur de plomb, le coût modéré est le plus faible de tous les accumulateurs
- Autodécharge : 1% par jour en moyenne, pendant les 30 premiers jours [17].

**b. Inconvénients des batteries nickel-zinc**

- Un nombre relativement faible de cycles de charge/ décharge.
- Un grand nombre de contrefaçons.

Même les produits de marques connues ne sont pas toujours capables de supporter plus de 300 cycles de charge, et les batteries, quant à elles, tombent fréquemment en panne au cours du premier mois d'utilisation. Malgré ces défauts, ces produits sont très populaires auprès des acheteurs nationaux en raison de leur faible coût [18].

**III.6.2.5. Batteries lithium-ion (Li-Ion)**

L'électrolyte est constitué soit d'une solution organique, soit d'un polymère solide. La grande légèreté de ce métal lui permet d'atteindre des densités d'énergie et des tensions de cellule extrêmement élevées, d'où une densité de puissance élevée. Leur coût est dix fois supérieur à celui du BP (600€/KWh), et ils sont encore principalement utilisés pour des applications de faible puissance comme l'étude d'une batterie de stockage dans un système photovoltaïque [15].

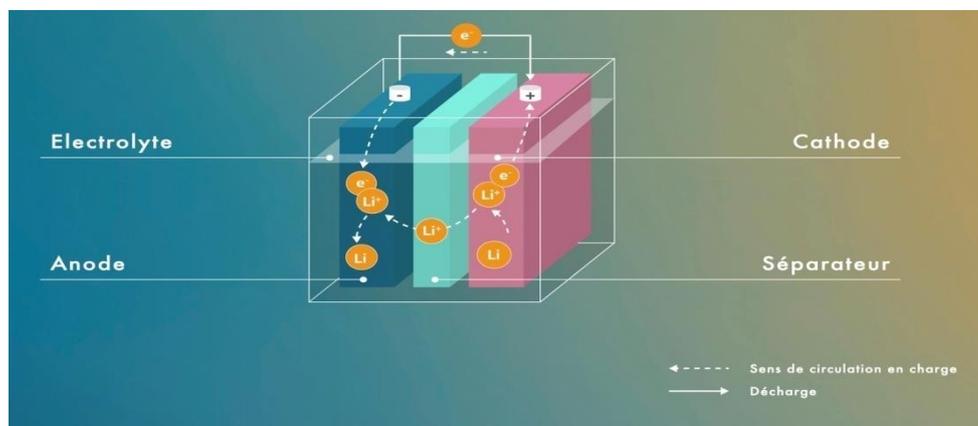


Figure III.10. Batterie Lithium-Ion [31]

#### a. Avantages des batteries lithium-ion

- Contrairement aux accumulateurs à base de nickel, il n'a pas d'effet de mémoire.
- Ne nécessite pas de maintenance
- Plutôt bon marché.
- Présente une faible autodécharge (10% / mois)
- Grâce aux propriétés physiques du lithium (très bon rapport poids/potentiel électrique), il présente une densité d'énergie élevée pour un poids très faible. De ce fait, ces accumulateurs sont largement utilisés dans le domaine des systèmes embarqués.

Elle offre une meilleure sécurité que les batteries au lithium pur, même si elle nécessite toujours un circuit de protection [16].

#### b. Inconvénients des batteries lithium-ion

- La profondeur de décharge : lorsque ces batteries sont rechargées tous les 10%, elles durent moins longtemps que lorsqu'elles sont rechargées tous 80% (préférez donc charger souvent votre téléphone portable à batterie lithium).

- Cette technologie fonctionne même quand on ne s'en sert pas (corrosion interne et augmentation de la résistance interne d'où une durée de vie de 2 à 7 ans).
- Les courants de charge et de décharge admissibles sont plus faibles qu'avec d'autres technologies
- Il peut se produire un court-circuit entre les deux électrodes par croissance dendritique de lithium
- l'utilisation d'un électrolyte liquide peut présenter des dangers si une fuite se produit et que celui-ci entre en contact avec de l'air ou de l'eau
- Cette technologie mal appliquée présente des risques potentiels : elles peuvent se dégrader lorsqu'elles sont chauffées à plus de 80°C, ce qui entraîne une réaction brutale et dangereuse. Les batteries lithium-ion doivent toujours être manipulées avec une extrême prudence car elles peuvent être explosives. Soyez particulièrement vigilant lorsque vous chargez la batterie : utilisez toujours le chargeur qui vous a été fourni. Et, comme pour tout autre accumulateur, ne le mettez jamais en court-circuit, n'inversez jamais les polarités et ne percez pas le boîtier.

Pour éviter tout problème, ces batteries sont généralement équipées d'un circuit de protection, d'un fusible thermique et d'une soupape de décharge. Elles doivent être chargées selon des paramètres stricts et ne jamais être déchargées en dessous de 2,5 V par élément [16].

#### III.6.2.6. Batteries lithium polymère (Li-Po)

La technologie lithium-polymère (Li-Po) est une variante de la technologie Li-ion. La différence se situe au niveau de l'électrolyte. Dans les cas des batteries Li-Po, l'électrolyte est un polymère gélifié. Cela permet une mise en forme plus aisée, en couches minces notamment, et d'être déposées sur des supports flexibles. Ces batteries s'affranchissent de l'enveloppe de métal présente dans les batteries Li-ion. Enfin, les batteries Li-Po sont plus résistantes à la surcharge et n'ont pas de soucis de fuite d'électrolyte, elles sont ainsi plus sûres que les batteries Li-ion. Cependant, les batteries Li-Po montrent des densités d'énergies plus faibles que les Li-ion et un prix similaire voire supérieur aux batteries Li-ion. De plus, les risques de gonflement, d'échauffement, d'inflammation et d'explosion de la batterie sont également réels. En 2016, Samsung s'est vu obligé de retirer son Galaxy Note 7 de la vente, suite à plusieurs cas d'incendies et d'explosions. Les batteries Li-Po équipent, aujourd'hui, les ordinateurs portables, smartphones, vélos électriques et même l'avion Solar impulse lors de son tour du monde en 2015 [19].



Figure III.11 Batterie Lithium polymère (Li-Po) [20]

#### a. Avantages des batteries lithium polymère

- Ils peuvent prendre des formes exquises et variées.
- Ils peuvent être positionnés sur un support souple.
- Faible poids (le Li-Po permet parfois de supprimer l'enveloppe de métal lourde).
- Elles sont plus sûres que les Li-ion (plus résistantes à la surcharge et aux fuites d'électrolytes).
- Elles ont une durée de vie plus longue (plus de cycles) [21].

#### b. Inconvénients des batteries lithium-polymère

- Elles sont plus chères que les Lithium-ion
- Elles ont une densité énergétique un peu plus faible que les Li-ion de dernière génération
- Leurs charges sont soumises à des règles strictes sous peine de risque d'inflammation [21].

### III.7. Modèle de la batterie

La batterie est modélisée dans la première est une résistance variable en série avec une source de tension. Malheureusement, pendant la simulation, ce modèle a un problème de boucle algébrique. Pour régler ce problème, un modèle semblable a été proposé à la suite d'un changement apporté à l'équation qui exprime la tension de la batterie en fonction du courant et de la résistance internes de la batterie, ce qui conduit à un modèle qui est équivalent à une source de tension contrôlé en série avec une résistance constante. Les deux modèles qui ne sont pas linéaires ils reflètent, dans une large mesure, le comportement de la batterie au coût de l'ajustement des paramètres du modèle, étant donné que le fabricant de l'accumulateur ne fournit pas cette information. Les paramètres de l'accumulateur doivent être spécifiés explicitement. Le modèle a été principalement utilisé pour les quatre types d'accumulateurs énumérés ci-dessous : plomb, nickel cadmium, nickel métal hydrures et ions de lithium, qui sont les plus largement utilisés et largement utilisés dans les applications de consommation, industrielles et d'énergie renouvelable, ainsi que les véhicules électriques hybrides.

Contrôlé en série avec une résistance constante. Les deux modèles qui ne sont pas linéaires. Le tableau ci-dessous montre la comparaison entre les 4 types accumulateurs [24].

**Tableau III.1.** Comparatif des technologies d'accumulateur utilisé [24]

	Plomb	Ni-Cd	NiMH	Li-ion
Durée de vie (année)	4-5	2-3	2-4	2-7
Nombre de Cycle de vie	400-800	1200	1000	1000
Rendement charge/décharge (%)	50	70-90	66	90
Autodécharge (% par mois)	5	15-20	20	10
Tension nominale par Elément (V)	2,1	1.15-1,2	1,2	3,6
Résistance interne (Ohm)	Très faible	Environ 0.06 par cellule de 1Ah	Environ 0.06 par cellule de 1Ah	Très faible
Température en fonctionnement (°C)	Ambiante	-40 à +80	Ambiante	Ambiante
Énergie massique (Wh/kg)	30-50	45-80	60-110	90-180
Énergie volumique (Wh/l)	75-120	80- 150	220-330	220-400
Temps de charge(h)	8	1	1	2-3

On constate que la batterie lithium-ion possède une énergie massique et volumique plus élevée que les autres. Aussi, elle possède un très bon rendement charge/décharge, ce qui est essentiel pour notre

application. Sa résistance interne et son pourcentage d'autodécharge mensuelle est très faible, cela constitue deux autres avantages de poids. Pour toutes ces raisons, nous avons choisi d'utiliser une batterie Li-ion pour notre simulation (Voir Figure III-12).

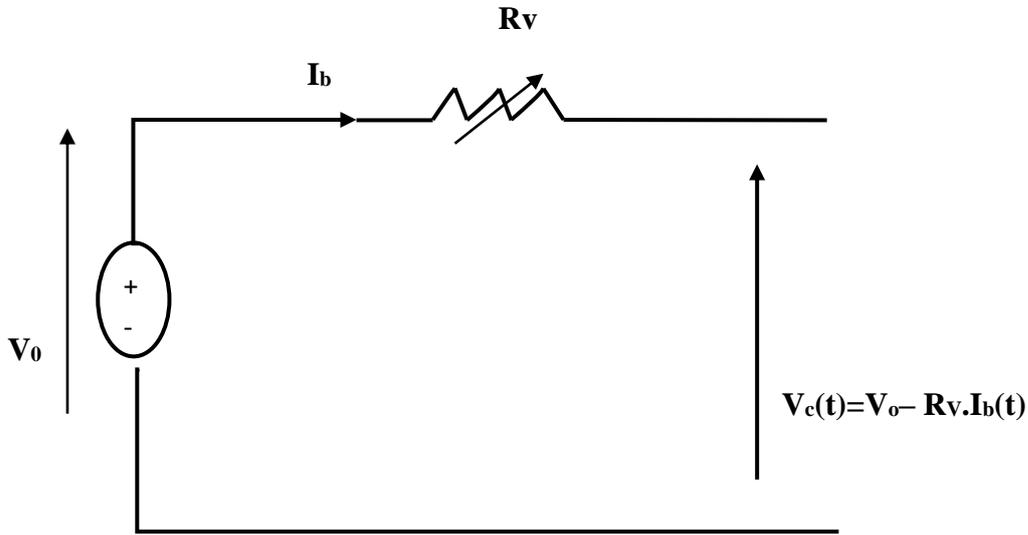


Figure III.12. Modèle de la batterie utilisé [24]

La formule précise pour  $V_c(t)$  est la suivante :

$$V_c(t) = V_0 - R_v I_b - K \frac{Q}{Q - \int_0^t I_b dt} + A \exp(-B \int_0^t I_b dt) \quad \text{(III-4)}$$

Avec :

$V_0$  : la tension nominale de la batterie.

La tension de source contrôlée s'exprime par la relation :

$$V_c = V_0 + A \exp(-B \int_0^t I_b dt) \quad \text{(III-5)}$$

Et la résistance variable :

$$R_v = R_i + K \frac{Q}{Q - \int_0^t I_b dt} \quad \text{(III-6)}$$

Avec :

- $V_0$  : Tension d'entrée (V);
- $V_c$  : Tension constante (V);
- $K$  : Tension de polarisation (V);

- Q : Capacité de la batterie (Ah);
- A : Tension exponentielle (V);
- B : Capacité exponentielle (Ah).
- R<sub>V</sub>: Résistance interne en série.

### III.8. Etat de charge de l'accumulateur

L'état de charge, parfois abrégé en SOC (state-of-charge), est une caractéristique essentielle à comprendre puisqu'il nous informe, en pourcentage, sur le niveau de charge de la batterie. Être en mesure d'estimer l'état de charge vous permet d'éviter les décharges profondes ou les charges excessives, ce qui peut nuire à vos batteries. Cette observation vise à prédire la dégradation de la batterie afin de prolonger sa durée de vie autant que possible. L'état de charge peut être défini comme la capacité disponible exprimée en fonction de la capacité nominale, comme indiqué dans l'équation.

$$SOC = \left( \frac{C}{C_n} \right) * 100 \quad (\text{III-7})$$

C : Capacité disponible.

C<sub>n</sub>: Capacité nominale.

Ils existent de nombreuses techniques d'estimation du SOC, aussi bien physiques qu'électrique.

La méthode physique consiste à utiliser un densimètre pour déterminer la densité de l'électrolyte. Plus la densité de l'électrolyte est grande, plus l'état de charge est élevé. L'électrolyte doit être retiré avant que la mesure puisse être effectuée. Cette opération n'est pas possible sur toutes les batteries. Une longue période de stabilisation est également nécessaire pour obtenir des résultats précis. [25]

La méthode électrique la plus utilisée est celle de l'intégration du courant. Il y a un lien entre la quantité de courant dans la batterie, la charge et la décharge de la batterie. Dans ce cas, l'état de charge peut être déterminé par l'équation.

$$SOC(t) == SOC_0 - \frac{\int_{t_0}^t Ib(\tau)d\tau}{Q} \quad (\text{III-8})$$

S O C<sub>0</sub> : État de charge initiale,

$\int_{t_0}^t Ib(\tau)d\tau$  : Charge délivrée par la batterie à l'instant t.

Q : Charge nominale de la batterie.

Une autre méthode de détermination du SOC consiste à utiliser les mesures de courant et de tension pour estimer la tension dans le vide. Il existe une relation linéaire approximative entre la tension à vide et l'état de charge, tel que défini par l'équation :

$$SOC(t) = \frac{V_0(t) - a}{b} \quad (\text{III-9})$$

Avec :

a : étant la tension lorsque  $SOC(t) = 0\%$

b : est obtenue à partir de la valeur a et  $V_0(t)$  lorsque  $SOC(t) = 100\%$

L'estimation de l'état de charge est essentiel à la gestion de l'énergie car elle permet d'optimiser la performance de l'accumulateur [25].

### III.9. Domaine d'application

#### a. Electronique

Les batteries sont déjà largement utilisées dans une vaste gamme de produits électroniques grand public, notamment les ordinateurs, les téléphones portables et les lecteurs de musique. L'aérospatiale (batteries de satellites, robotique et sondes spatiales - les électrodes sont dans ce cas constituées de matériaux nobles, ce qui permet à la batterie de fonctionner à très basse température) ou la médecine (défibrillateurs et moniteurs portables) [16].



(a) Batterie d'un ordinateur



(b) Batterie d'un portable

**Figure III.13.** Batteries utilisées dans les appareils électroniques [16]

#### b. Véhicules propres

Les moyens de transport, Les bicyclettes à assistance électrique, voitures électriques [16].



**Figure III.14.** Batterie d'une voiture [16]

### c. Energie renouvelable

Il existe de nombreuses zones isolées dans le monde qui sont alimentées par des systèmes autonomes de production d'électricité. Ces générateurs s'appuient sur des sources d'énergie renouvelables locales. On y trouve des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des micro-turbines. L'électricité produite à partir de sources renouvelables est intermittente et dépend des conditions météorologiques. Ces générateurs d'énergie renouvelable sont généralement reliés à un système de stockage qui garantit la disponibilité de l'énergie indéfiniment [16].



**Figure III.15.** Les centrales des énergies renouvelables [32]

### III.10. Durée de vie d'une batterie

Le nombre de cycles de charge/décharge que peut supporter une batterie solaire permet de déterminer sa durée de vie. La durée de vie moyenne des batteries a considérablement augmenté au cours des deux dernières décennies grâce à l'utilisation de nouvelles technologies de fabrication et de nouveaux matériaux, notamment l'utilisation de polypropylène pour les enveloppes externes, l'amélioration de la sécurité des enceintes, les connecteurs résistants à la corrosion, l'amélioration de la gestion des batteries, etc [22].

### III.9. Conclusion

Un changement de la consommation s'opère au fil des années afin d'atteindre une énergie plus responsable et écologique. Dans un contexte de préservation de la planète, les accords de Paris ont été signés par la majorité des pays afin de réduire la production mondiale des gaz à effet de serre et produire une énergie plus propre. Pour parvenir à cela la production d'énergie et notamment d'électricité doit être réalisée via les énergies renouvelables. Seulement ces énergies sont intermittentes et l'énergie qu'elles fournissent doit être stockée. Les batteries se sont placées comme technologie de choix pour remplir ce rôle. Ajouté à cela, l'apparition des véhicules électriques et des technologies sans fil présentes dans notre quotidien, les batteries sont devenues une technologie indispensable pour l'homme. Grâce à de nombreuses avancées scientifiques, différentes générations de batteries ont vu le jour montrant à chaque fois des performances toujours plus élevées jusqu'à l'arrivée des batteries Li-ion. Cependant, au vu des besoins actuels, la technologie du Li-ion a atteint ses limites et une nouvelle génération doit être élaborée afin de créer une batterie plus sûre et plus performante. La technologie des batteries tout-solide se place alors comme un candidat de choix pour la batterie de demain avec un potentiel accru comparé au Li-ion.

## Référence bibliographique

- [1] DI LU, « Conception et contrôle d'un générateur photovoltaïque PV actif à stockage intégré. Application à l'agrégation de producteurs-consommateurs dans le cadre d'un micro réseau intelligent urbain », Doctorat en génie électrique, soutenue le 16/12/2010, Ecole Centrale de Lille, France.
- [2] I. Hussein, I. Adrian, G. Mazen, D. Maria, B. Daniel, A.Cedric, A. Mattiewu , « Investigation des diverses options de stockage d'énergie face à l'intégration des parcs éoliens dans les réseaux » 1ère conférence Franco-Syrienne sur les énergies renouvelables, PP : 1-15, DAMAS, 24-28 Octobre 2010
- [3] <https://www.greelane.com/fr/sciences-humaines/histoire-et-culture/battery-timeline-1991340/> consulté le 29/01/2022.
- [4] M. Urbain, « Modélisation électrique et énergétique des accumulateurs lithium-ion estimation en ligne du SOC et du SOH », Doctorat en génie électrique, soutenue 04 juin 2009, Institut national polytechnique de lorraine.
- [5] O. Syphax, Z. Yanis, A. Boulaoued, « Etude et simulation d'un chargeur de batterie intelligent », Master en génie électrique 2019/2020 Université A. Mira-Bejaia.
- [6] J. Hladik , «livre Accumulateur électrique », Presses universitaires de France 1977.
- [7] <https://www.zonetronek.com/definition-dune-batterie-solaire/> consulté le 31/01/2022
- [8] J. P. Dunlop, « Batteries and charge control in stand-alone photovoltaic systems fundamentals and application », Sandia National Laboratories, Florida Solar Energy Center ,USA, Technical Report, 1997.
- [9] B. Bendib, « Une nouvelle approche de modélisation et de commande des systèmes photovoltaïques autonomes », Doctorat en Sciences Université Ferhat Abbas Setif. Soutenue le 15/11/2017.
- [10] F. Coupan, « Stockage pour les énergies renouvelables évaluation et modélisation de la batterie plomb-acide ». Doctorat en Energie électrique. Université de Guyane, Soutenue le 26 janvier 2017
- [11] N. Kularatna, « Energy Storage Devices for Electronic Systems rechargeable batteries and supercapacitors. London, UK: Elsevier-Academic Press, 2014.
- [12] V. Benamara, « Étude et simulation d'un panneau solaire raccordé au réseau avec périphérique de stockage », Maîtrise en génie électrique, École de technologie supérieure, Université du Québec, Canada, 2012.

- [13] A. CHERIFI, « Conception et réalisation d'un chargeur de batterie Plomb-Acide dans un micro-réseau DC, Master en génie électrique 2018/2019 Université Mohamed Boudiaf M'sila.
- [14] A.Gabin Koucoi, « Optimisation d'un générateur hybride photovoltaïque avec stockage sur batterie lithium ion pour site isolé ou connecte au réseau électrique » master n génie électrique, soutenu 16/10/2013, Centre Commun de Recherche et Energie et Habitats Durables (CCREHD/Fondation 2iE).  
<https://www.techno-science.net/definition/6752.html>, Consulté le 01/02/2022.
- [15] K. Mazouz, « Etude d'une batterie de stockage dans un système photovoltaïque », Master en génie électrique, 2011/2012 Université de Béjaia
- [16] Y. Tarfaya, H. Siad « Réglage et stabilisation de la tension d'une batterie dans un système PV » Master en génie électrique Année 2019, Université Badji Mokhtar Annaba.  
<https://www.techno-science.net/definition/5766.html>
- [17] [http://www.electrosup.com/accumulateur\\_nickel-zinc.php](http://www.electrosup.com/accumulateur_nickel-zinc.php) Consulté le 5/02/2022
- [18] [https://technoluxpro.com/akkumulatory/batarei/nizn.html#\\_\\_NiZn](https://technoluxpro.com/akkumulatory/batarei/nizn.html#__NiZn) consulté le 10/02/2022
- [19] M. Arnaud Delaille, « Développement de méthodes d'évaluation de l'état de charge et de l'état de santé des batteries utilisées dans les systèmes photovoltaïques. Thèse de doctorat Soutenue le 26 octobre 2006, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- [20] <https://eclats-antivols.fr/fr/accumulateur-12v/3508-2-batterie-rechargeable-lithium-polymere-400mah-pile-15v-aaa-lr03-znter-micro-usb-lipolymer-5990708897017.html>.  
<https://www.lipolbattery.com/lithium%20polymer%20battery.html>.  
Consulté 11/02/2022
- [21] Article-les-batteries-lithium-polymère <http://deplacement-durable.over-blog.com/>  
Consulté le 10/03/2022
- [22] S. Belaid Lalouni Cours Energie Solaire Photovoltaïque Université A.Mira de Bejaia 2014/2015
- [23] K. DÉNOUE « Synthèse de nouveaux électrolytes solides à base de soufre pour le stockage de l'énergie », Thèse de doctorat, Soutenue le 23 Septembre 2021 L'université de Rennes 1.
- [24] A. Dekkiche « Modèle de batterie générique et estimation de l'état de charge » Ecole de technologie supérieure université du Québec, Montreal, 2 MAI 2008.
- [25] J. Deepti, V. Ramanarayanan. « State of Charge of Lead Acid Battery » In India International conference On Power Electronics, 2006, p 89-93. Bangalore, India Electrical Engineering, Indian institute of science.
- [26] <https://www.solaris-store.com/content/43-principe-de-fonctionnement-d-une-batterie-solaire>,  
Consulté le 01/04/2022.

[27] <https://sitelec.org/cours/abati/accu/accu.htm>, consulté le 02/06/2022

[28] <https://renseigner.com/technologie/energie-electrique/batteries/nickel-cadmium>, consulté le 02/06/2022

[29] <https://www.lavoitureelectrique.info/accumulateur-pour-voitures-electriques-batteries-nickel-metal-hybride.html>.

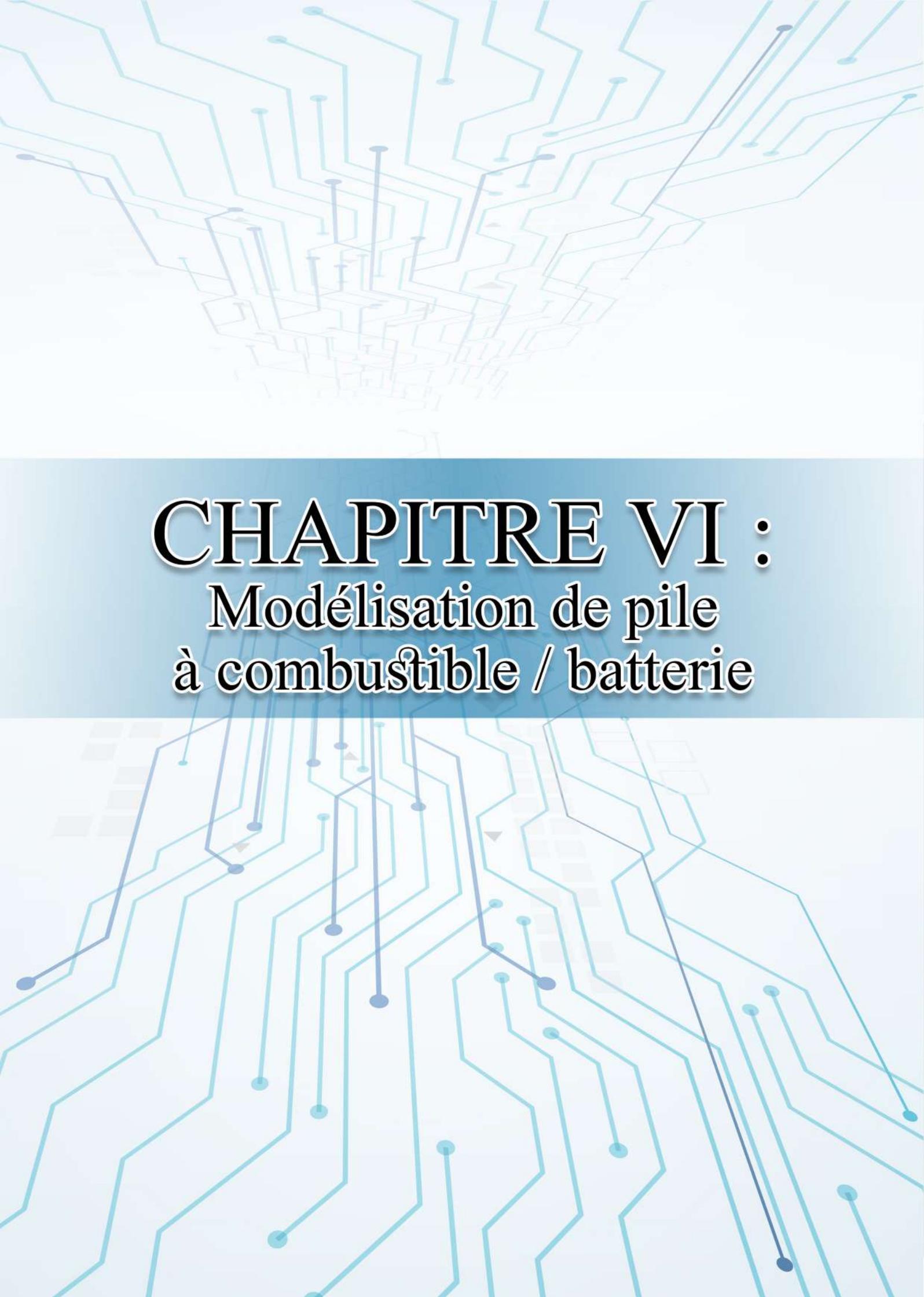
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur\\_nickelhydrure\\_m%C3%A9tallique#/media/Fichier:Ni\\_MH\\_various.jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur_nickelhydrure_m%C3%A9tallique#/media/Fichier:Ni_MH_various.jpg). Consulté le 02/06/2022

[30] <https://blasterhub.com/2019/04/nizn-batteries-isnt-thing>  
Consulté le 02/06/2022

[31] <https://www.guillaumedarding.fr/technique-batterie-li-ion-5031187.html>,

<https://www.directindustry.fr/prod/panasonic-industry-europe-gmbh/product-15208-2388562.html>.  
Consulté le 02/06/2022

[32] <https://youmatter.world/fr/energie-renouvelable-solution-viable-probleme/2022>.  
Consulté le 02/06/2022



# CHAPITRE VI :

## Modélisation de pile à combustible / batterie

## IV.1. Introduction

Afin d'étudier en détail le fonctionnement d'une PAC de type SOFC avec stockage, nous nous proposons de le modéliser puis de le simuler à l'aide du logiciel de calcul scientifique Matlab – Simulink[1].

Dans la première partie du chapitre, nous allons consacrer aux principes de modélisation appliqués dans les domaines chimique et électrique pour rendre compte des phénomènes physiques au sein de la pile. Ensuite nous présentons brièvement l'architecture de notre système

Dans la deuxième partie, nous faisons un petit dimensionnement de la batterie, et nous terminons le chapitre par une discussion des résultats obtenus.

## IV.2. Principe de modélisation

La modélisation de la pile électrique est basée sur une expression de la tension en circuit ouvert et de plusieurs surtensions : activation, ohmique, et concentration. Cette formule prend en compte les pressions partielles des espèces chimiques, le courant débité, et la température de fonctionnement. Une autre méthode est utilisée : l'expression de la tension de la pile est calculée à l'aide d'un polynôme dont les variables sont les pressions partielles des espèces chimiques, le courant et la température.

## IV.3. Description du système de la SOFC

### IV.3.1. Conception de la pile SOFC

La simulation des piles combustibles à oxyde solide (SOFC) nécessite l'entrée d'un certain nombre de paramètres afin de calculer la sortie du réseau, comme indiqué dans le tableau IV.1. Le modèle électrique détaillé de pile SOFC est montré dans la figure IV.1. Le simulateur de pile SOFC est également composé du calcul de la tension de Nernst, de la pression partielle ( $P_{H_2}$ ,  $P_{H_2O}$  et  $P_{O_2}$ ), du débit de carburant ( $q_f$ ) et de la chute de tension ( $V_{ohm}$ ).

### IV.3.2. Pression partielle

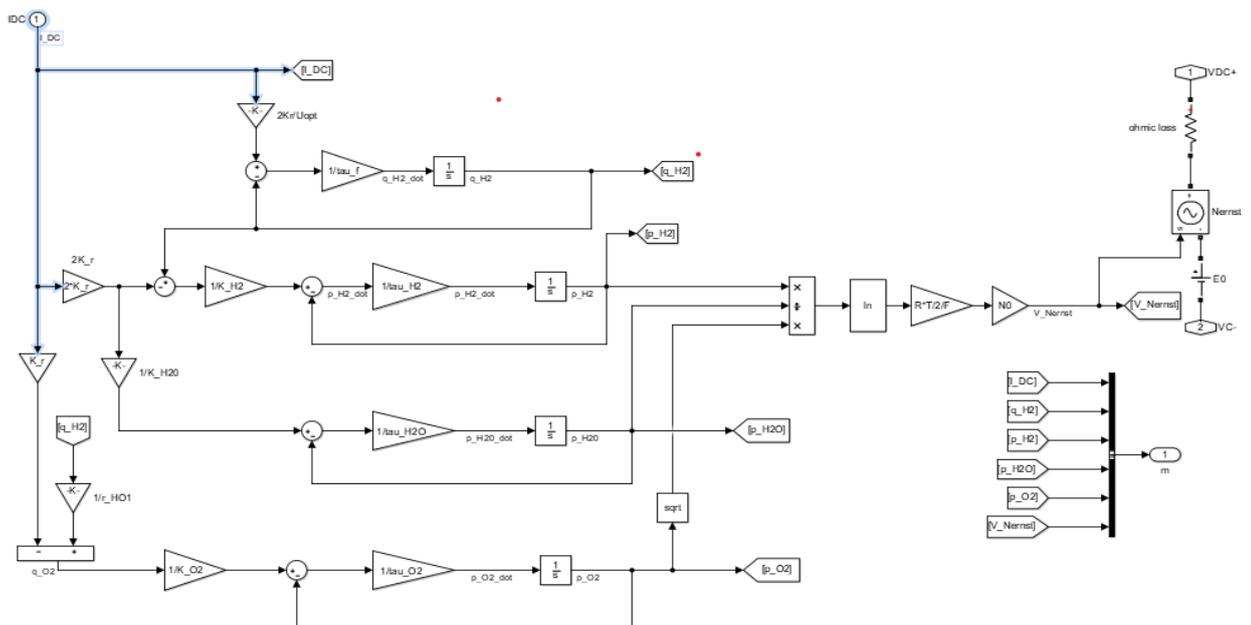
La réaction de l'hydrogène, de l'oxygène et de l'eau comme produits est utilisée dans les piles à combustible à oxyde solide (SOFC), chaque gaz ayant une pression partielle. La tension de Nernst sera calculée en utilisant la pression partielle. Les pressions partielles de l'hydrogène et de l'oxygène sont les suivantes [2]

$$P_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1+\tau_{H_2}} \left( \frac{1}{1+\tau_f} q_f^{in} - 2K_{rl} \right) \quad (IV-1)$$

$$P_{O_2} = \frac{1/k_{O_2}}{1+\tau_{O_2}} \left( \frac{1}{r_{H-O}} \frac{1}{1+\tau_f} q_f^{in} - k_{rl} \right) \quad (IV-2)$$

**TableauIV.1.** Paramètres de la SOFC

T	Température absolu	1273	k
F	Constante de Faraday	$96.487 \cdot 10^6$	C/mol
R	Constante universelle des gaz	8314	J/(kmolK)
I0	Le courant initial	100	A
E0	La tension idéale	1.18	V
N0	le nombre de cellules	450	
Uf	utilisation de la pile	0.85	
KH2	Constante molaire de la valve d'hydrogène	$8.43 \cdot 10^{-4}$	K mol /(s atm)
KH2O	Constante molaire de la valve d'eau	$2.81 \cdot 10^{-4}$	K mol /(s atm)
KO2	Constante molaire de la valve d'oxygène	$2.52 \cdot 10^{-3}$	K mol /(s atm)
$\tau_{H2}$	Temps de réponse du flux d'hydrogène	26.1	S
$\tau_{H2O}$	Temps de réponse du flux d'eau	78.3	S
$\tau_{O2}$	Temps de réponse du flux d'oxygène	2.91	S
R	Pertes ohmiques	$3.281310^{-4}$	$\Omega$
rH-O	Rapport de débit hydrogène-oxygène	1.145	
$\tau_f$	Temps de réponse de producteur du pile	5	S



**Figure IV.1** structure de la SOFC

### IV.3.3. Equation de Nernst

Les équations de Nernst sont utilisées pour déterminer la tension de sortie de la pile comme suit :

$$E_{cell} = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{p_{H_2O} - p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}} \quad (\text{IV-3})$$

Avec :

$E_0$  : La tension idéale de la pile SOFC (volts) ;

$R$  : La constante universelle des gaz (atm/mol.K) ;

$T$  : La température opérationnelle (K) ;

$p_{H_2}$ ,  $p_{H_2O}$  et  $p_{O_2}$  : la pression de l'hydrogène, de l'eau et de l'oxygène (atm) ;

### IV.3.4 Tension de sortie et chute de tension

La tension de sortie de la pile à combustible peut s'écrire dans l'équation suivante :

$$V_{dc} = V_0 - V_{ohm} - V_{act} - V_{con} \quad (\text{IV-4})$$

**Avec :**

$V_{dc}$  : Tension de sortie du Sofc (volts) ;

$V_0$ : Tension de Nernst (volts) ;

$V_{ohm}$  : Chute de tension ohmique ;

$V_{act}$  : Activation de la chute de tension

$V_{conc}$  : Concentration de la chute de tension

La chute de tension ohmique causée par la résistance sur l'électrolyte et l'interconnexion entre la pile à combustible

$$V_{ohm} = I \cdot R_{ohm} \quad (\text{IV-5})$$

Avec :

$V_{ohm}$ : Chute de tension,

$I$ : Courant de charge

$R_{ohm}$  : Pertes ohmiques.

La chute de tension causée par les différences ioniques entre les réactifs, entraînant la création d'un gradient de concentration ; la formation d'un gradient de concentration entraîne une chute de tension dans la pile.

$$V_{conc} = \frac{-RT}{2F} \ln \frac{1}{II} \quad (\text{IV-6})$$

**D'où :**

$I$  : Courant d'entrée ou courant de charge ;

$II$ : Densité de courant limite ;

R : Constante universelle des gaz (atm/mol.k) ;

T : Température de fonctionnement(K) ;

F : Constante de Faraday (C/mol) ;

#### IV.4. Le Filtrage

Un condensateur de filtrage est un filtre passif composé d'éléments passifs. La fréquence influe sur les effets condensateurs de tout signal. Cette caractéristique du condensateur est utilisée pour concevoir des filtres capables de filtrer une certaine gamme de fréquences de signaux en fonction des besoins de capacité de l'ordre de  $10^{-3}$  F

#### IV.5. Onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique qui assure une conversion continue - alternative. Il change régulièrement les connexions entre l'entrée et la sortie, ce qui permet d'obtenir l'alternative à la sortie.

##### L'onduleur triphasé à base d'IGBT/Diode

Depuis l'avènement du composant IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) au milieu des années 1980, il y a eu une augmentation notable de son utilisation dans la conception des convertisseurs de puissance par rapport à ses concurrents. Les convertisseurs IGBT ont les avantages suivants : dimensions plus petites, stabilité électrothermique des composants, contrôle de la tension, et un bon compromis temps de chute/commutation de tension.

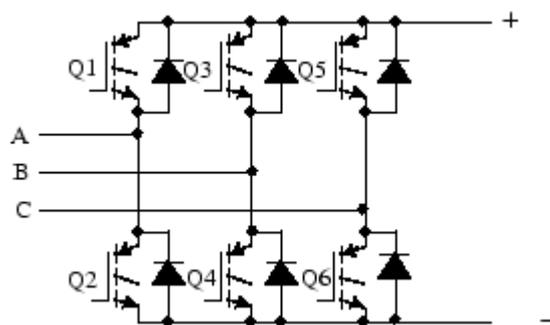


Figure IV.2 schéma équivalent d'IGBT/Diode

Les paramètres utilisés dans notre étude est : la résistance de Snnubère de  $10^5 \Omega$  avec un pont de trois bras

## IV.6. Le transformateur triphasé

Un transformateur est un appareil statique qui transfère une alimentation électrique d'un circuit à l'autre à la même fréquence, mais le niveau de tension est généralement modifié. Pour des raisons économiques, il faut que l'énergie électrique soit transmise à haute tension. Lorsque la tension est élevée, il vaut la peine de considérer le couplage étoile (qui nécessite moins de spire). La présence d'un neutre est nécessaire pour le chargement. Le secondaire doit être connecté en étoile ou en zigzag.

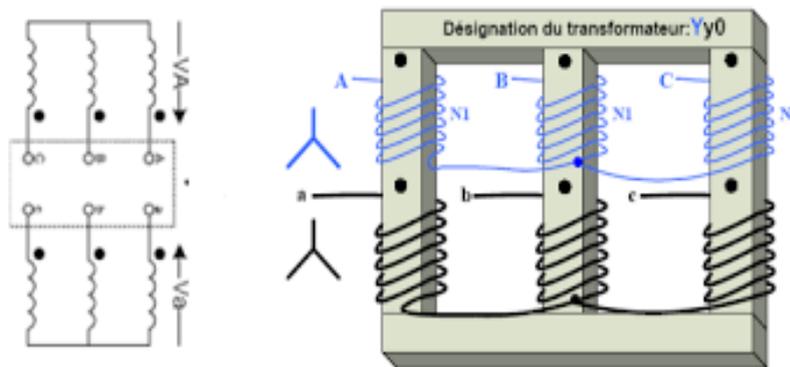


Figure IV.3. Schéma d'un transformateur triphasé (étoile-étoile).

Tableau IV.2 Paramètres du transformateur

Type de connexion	Y (étoile)-Y (étoile)	-
Puissance nominale	$10^6$	VA
La fréquence	60	Hz
V1 Ph-Ph	200	Vrms
V2 ph-ph	440	Vrms
Résistance de l'aimantation	500	Pu
L'inductance de l'aimantation	500	Pu

## IV.7. Partie control d'onduleur

Le control de l'onduleur est composée de plusieurs blocs qui sont boucle à verrouillage (PLL), un bloc d'hystérésis biphasé ( $d_q$ )/ triphasé (abc), le signal de sortie de ce type de bloc est illustré à l'aide d'un modulateur à largeur d'impulsion.

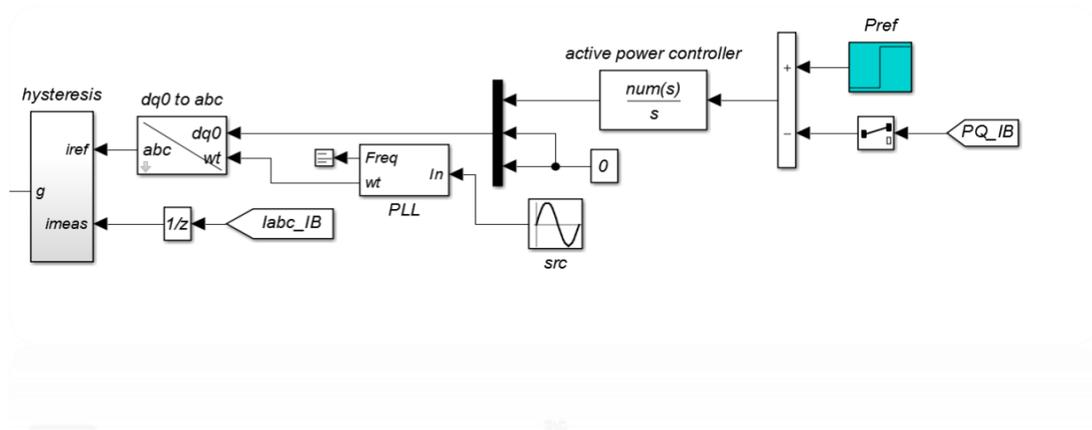


Figure IV.4. Partie du control de l'onduleur

## IV.8.Modélisation de la batterie

Les batteries électrochimiques sont constituées de cellules empilées qui produisent des réactions permettant de stocker ou de libérer de l'énergie en transformant des composés chimiques. Les batteries utilisées dans les systèmes électriques sont généralement à décharge profonde ; les blocs qui en résultent peuvent avoir une capacité allant jusqu'à 40 MWh [19]. Ces batteries sont utilisées pour la stabilisation de l'alimentation électrique dans les réseaux "intelligents" d'aujourd'hui, et contribuent à améliorer la qualité de l'électricité lors des pics de consommation ou des situations d'urgence, grâce à leur flexibilité et à leur rapidité de réaction. Parmi les systèmes de stockage par batterie existants, les batteries au lithium que nous allons étudier dans le cadre de ce mémoire se distinguent par leur haute performance. [3]

### IV.8.1 Modèles de charge et décharge de batterie

Le modèle de décharge incorpore un terme pour la tension de polarisation et un terme pour la résistance de polarisation, comme le montre l'équation ci-dessous, pour représenter la dépendance entre la tension à vide dans cette phase et l'état de charge de la batterie :

$$V_{oc} = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} \cdot it + A \exp(-B \cdot it) - K \frac{Q}{Q-it} \cdot i^*$$

Avec

$V_{oc}$  : Tension interne de la batterie (V);

$E_0$  : tension constante (rémnente) de la batterie (V) ;

$K$  : Constante de polarisation (V /Ah), ou résistance de polarisation ( $\Omega$ );

$Q$  : Capacité de la batterie (Ah);

$it = \int i \cdot dt$  : Charge courante de la batterie (Ah);

$A$  : Amplitude de la zone exponentielle sur la courbe de décharge (V) ;

$B$  : Constante de temps inverse de la zone exponentielle ( $(Ah)^{-1}$ );

$i$  : Courant traversant la batterie (A);

$i^*$  : Valeur filtrée du courant  $i$  dans la batterie (A) [4]

### IV.8 .2 Modèle simple d'une batterie

Le modèle le plus élémentaire et le plus utilisé, illustré à la figure (IV-1), consiste en une source de tension idéale  $V_0$  (tension à vide) en série avec une résistance interne. La tension terminale aux bornes de l'accumulateur est  $V_t$  .[5]

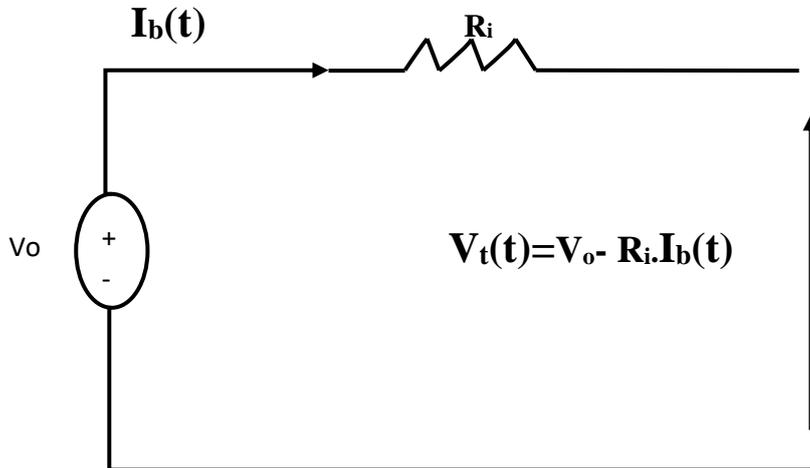


Figure IV.5 Modèle Simple d'une batterie

Tableau IV.3 les paramètres de la batterie

Paramètres	valeurs	Unité
La capacité nominale	50	Ah
La résistance interne	0.0722	mΩ
La tension nominale	361	V
La capacité maximale	50	Ah
tension à pleine charge	420.1994	V
Le courant nominal de décharge	21.7391	A
tension exponentielle	390.0193	V
La capacité exponentielle	2.456522	Ah

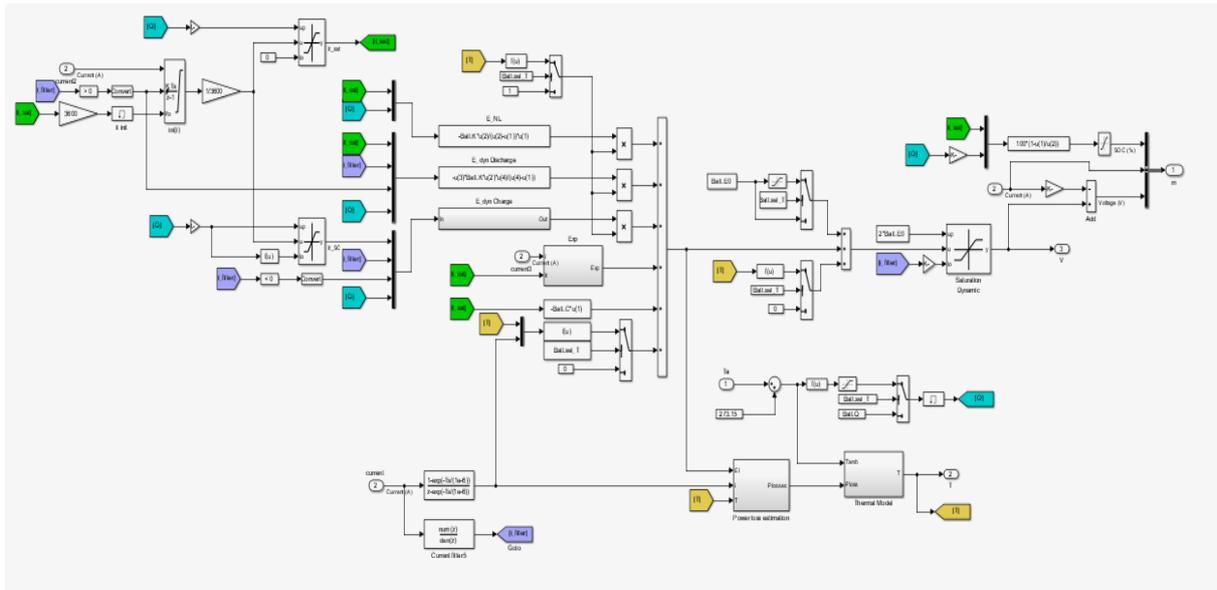


Figure IV.6 structure d'une batterie Li-ion

### IV.9 Résultats et discussion :

D'après notre étude effectuée sur la modélisation de la pile SOFC on a distingué quatre parties importantes organisées comme suit :

#### •Partie chimique

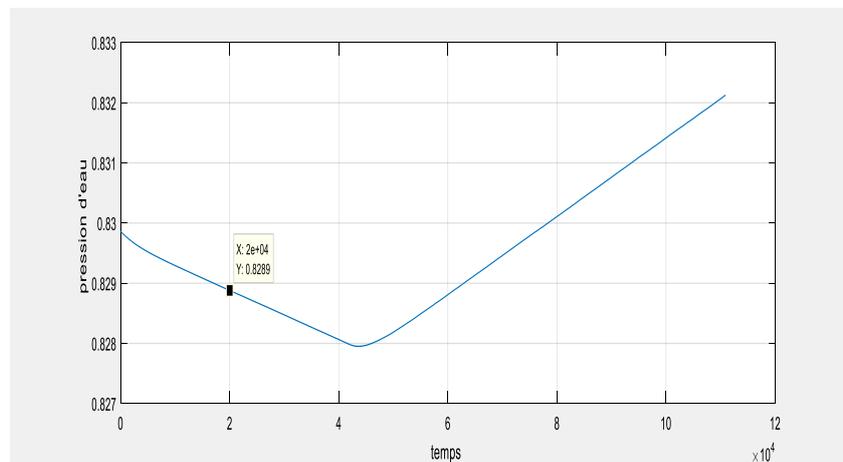
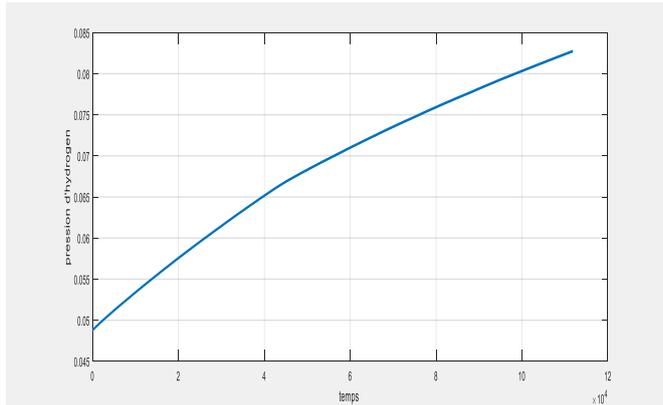
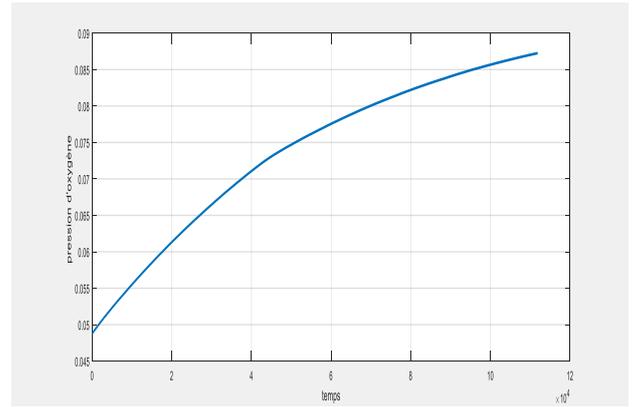


Figure IV.7 Pression d'eau H2O (atm) en fonction du temps(s)

La Figure IV.7 représente la pression d'eau par rapport au temps, Contrairement à l'hydrogène, la pression de l'eau H2O suit une droite croissante ; cette propriété est liée à la production de l'eau pendant la réaction chimique. (La production d'eau supplémentaire nécessite une augmentation de pression.)



**Figure IV.8** Pression d'hydrogène (atm) en fonction du temps(s).

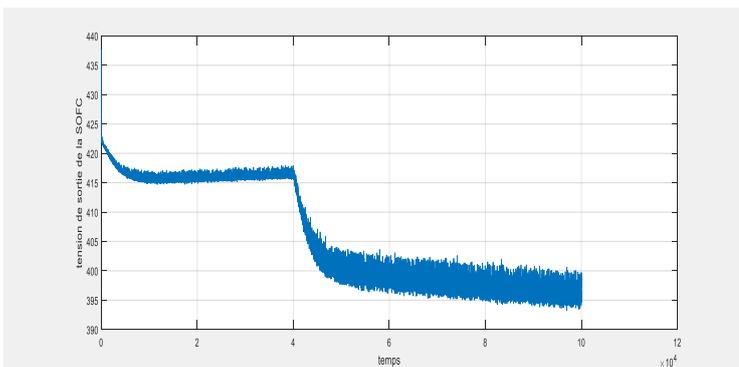


**Figure IV.9** Pression d'oxygène (atm) en fonction du temps(s).

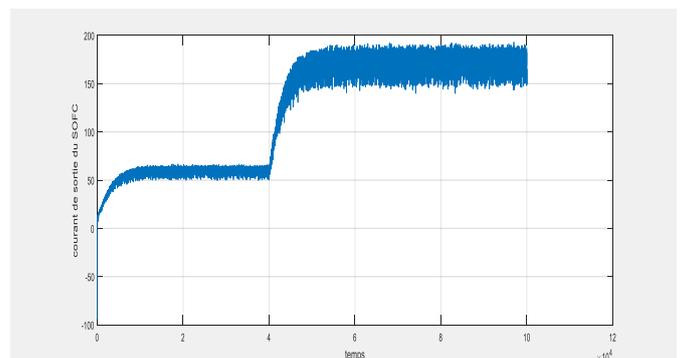
La **Figure IV.8** représente la pression d'hydrogène par rapport au temps de sorte que nous remarquons une augmentation significative avec une pente de 0.026

Nous marquons également une augmentation identique de l'autre courbe **Figure IV.9** de pression partielle d'oxygène dans un temps supérieur à 0,085. Cela indique le début de l'entrée des atomes d'hydrogène et d'oxygène dans la PAC afin de préparer l'oxydation et la réduction

- **Partie électrique continu**



**Figure IV.10** Tension de sortie de la SOFC(v) en fonction du temps(s)



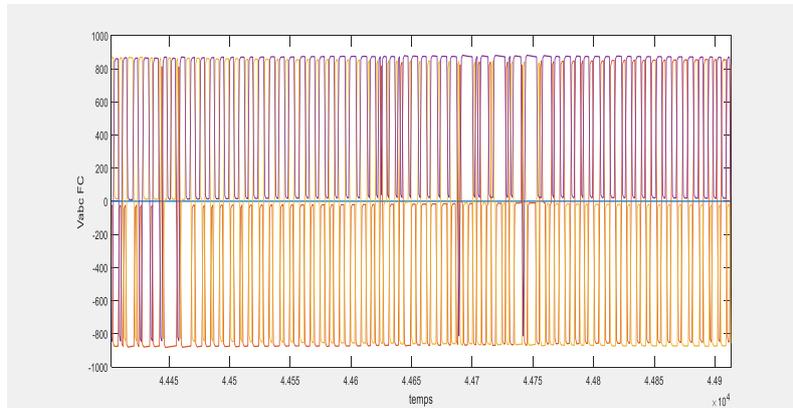
**Figure IV.11** Courant de sortie de la pile SOFC (A) en fonction du temps(s)

La **Figure IV.10** montre le graphique de tension CC de la SOFC avec la valeur de tension de 435,6 volts à 0,6 seconde avant de diminuer dans la durée entre [0.4-4] s où il est devenu 416 volts, dans la deuxième phase, il a diminué à 395 volts.

Le graphique illustré dans la **Figure IV.11** représente la caractéristique du courant de sortie CC de la SOFC, elle se divise également en deux phases de temps avec un voisinage de [0-4]

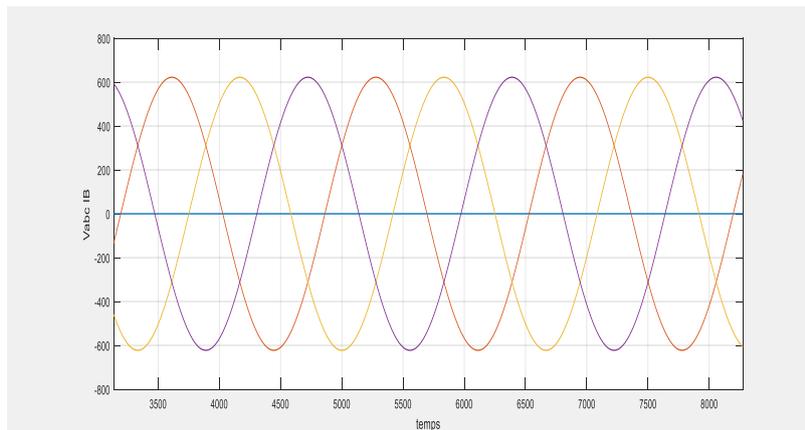
s, l'intensité du courant était égale à 50A puis augmentée à 160A pendant la période de 4 à 10s

### •Partie alternatif

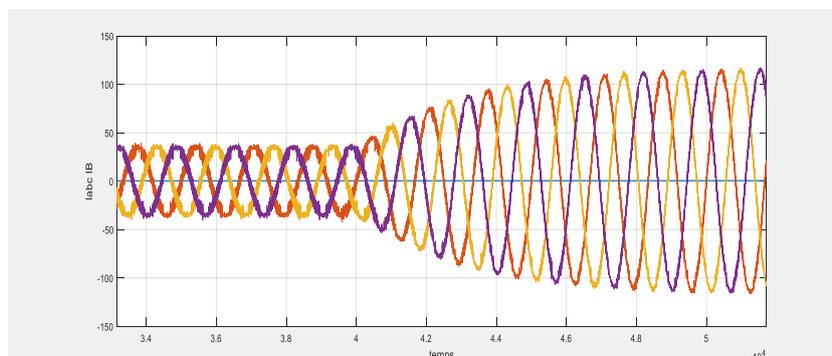


**Figure IV.12** Latension lors de sortie du transformateur

La courbe représentée dans la **Figure IV.12** montre la tension en fonction du temps après sa sortie du transformateur, qui a élevé sa valeur jusqu'à 900 volts au cours de temps



**Figure IV.13** Tension triphasé (v) en fonction du temps(s)

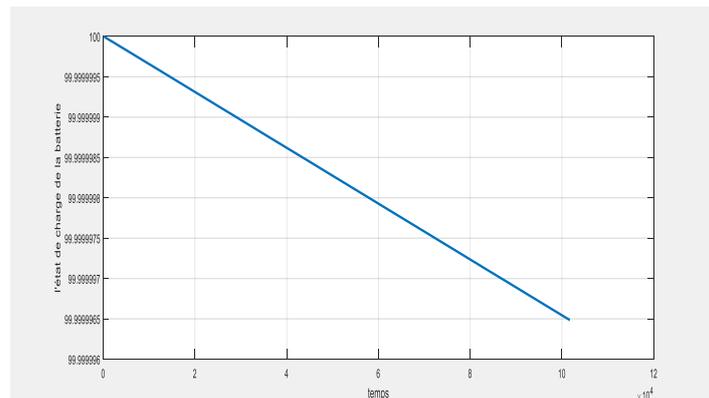


**Figure IV.14** Courant triphasé (A) en fonction du temps(s)

La courbe illustrée dans la **Figure IV.13** représente la tension sinusoïdale triphasée en fonction du temps injecté dans le réseau (infini bus) stable sur la valeur 600 V au cours du temps

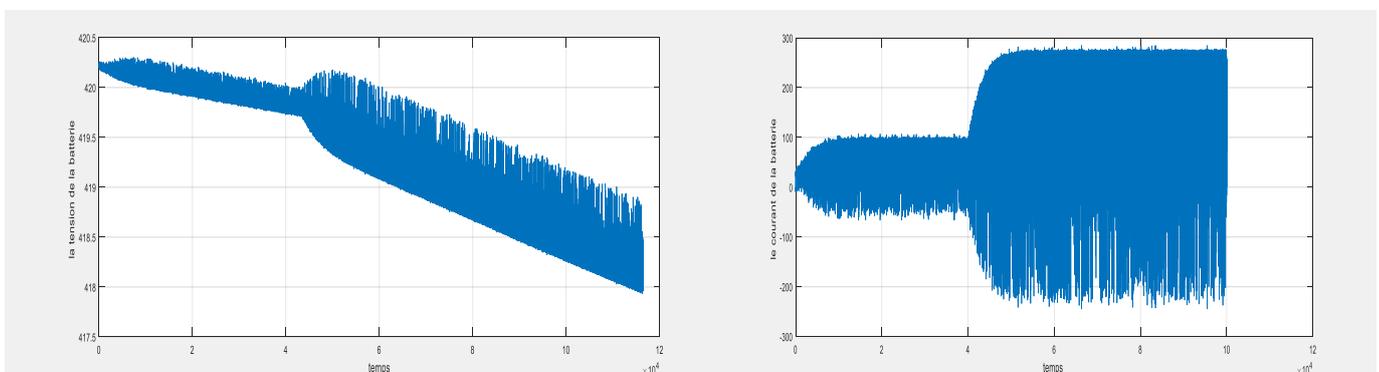
La courbe représentée dans la **Figure IV.14** montre le courant triphasé en fonction du temps, il est stable jusqu'à 4s sur la valeur 40 A, puis il augmente jusqu'à 120 A

### •Partie source d'appoint



**Figure IV.15** Etat de charge d'une batterie Li-ion(%) en fonction du temps (s)

**Figure IV.15** représente une droite décroissante de l'état de charge (state of charge) d'une batterie de type Li-ion qui a été pré-chargée à 100% et diminuer au 99.99 %



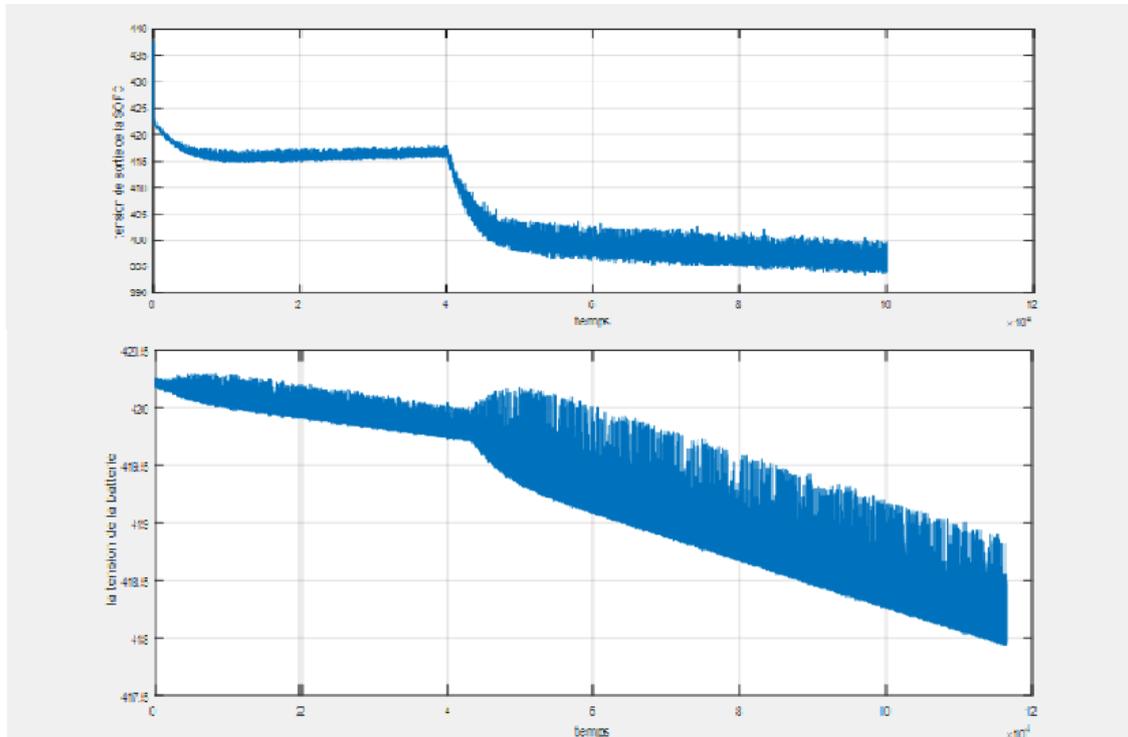
**Figure IV.16** la tension de la batterie

**Figure IV.17** le courant d'une batterie

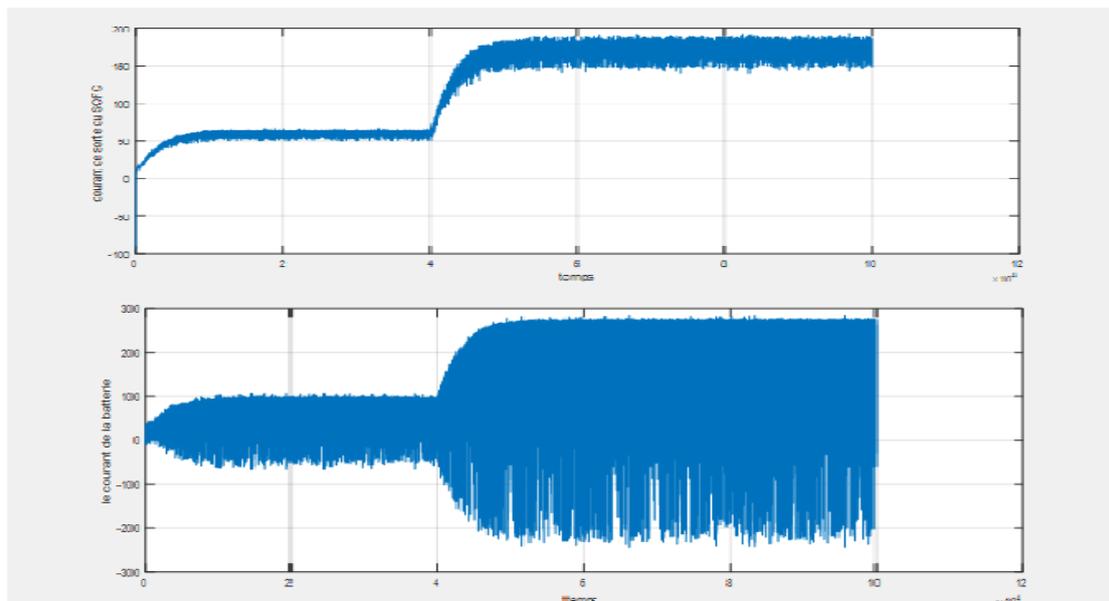
La courbe représentée dans la **Figure IV.16** montre la tension de la batterie par rapport au temps de sorte que nous notons qu'il est divisé en deux parties importantes

La tension passe de 420,3 volts à 419,6 durant 4s puis à 418 volts durant les 10 s

Tandis que la **Figure IV.17** représente l'intensité de courant de batterie dans par rapport au temps de sorte qu'il passe de zéro à 100A en 4 secondes, puis ré-augmenter vers 250 A dans les 10 secondes restantes.



**Figure IV.18** Comparaison entre la tension de la SOFC et la batterie



**Figure IV.19** Comparaison entre le courant de la SOFC et de la batterie

les courbes représentée dans la **Figure IV.18** et **Figure IV.19** montre une comparaison entre la tension et le courant d'une SOFC et l'un des batterie

#### **IV.10 Conclusion**

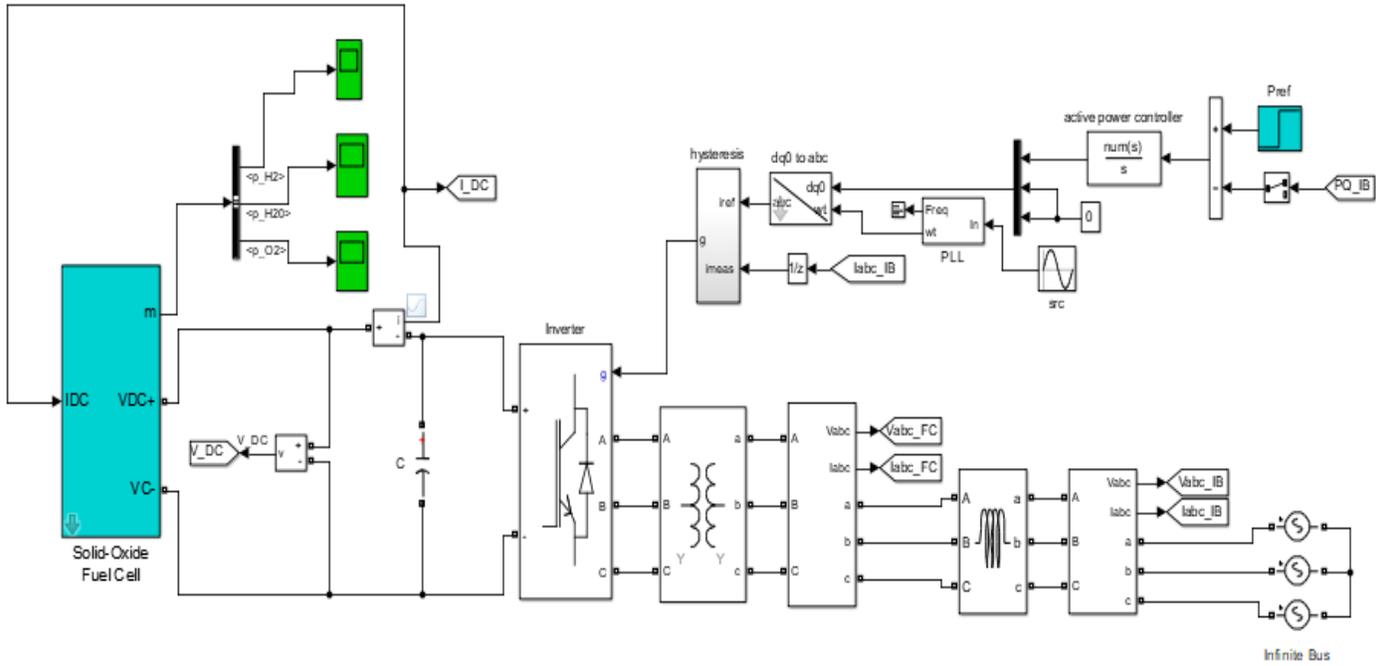
Comme nous avons mis la pile de type SOFC sur logiciel Simulink, nous avons obtenu des résultats satisfaisants, puis nous avons compensé la SOFC avec une batterie autant que secours, nous avons obtenu des résultats similaire, et nous pouvons dire que la batterie est un bon compensateur en cas de panne ou de maintenance d'une PAC

**Référence**

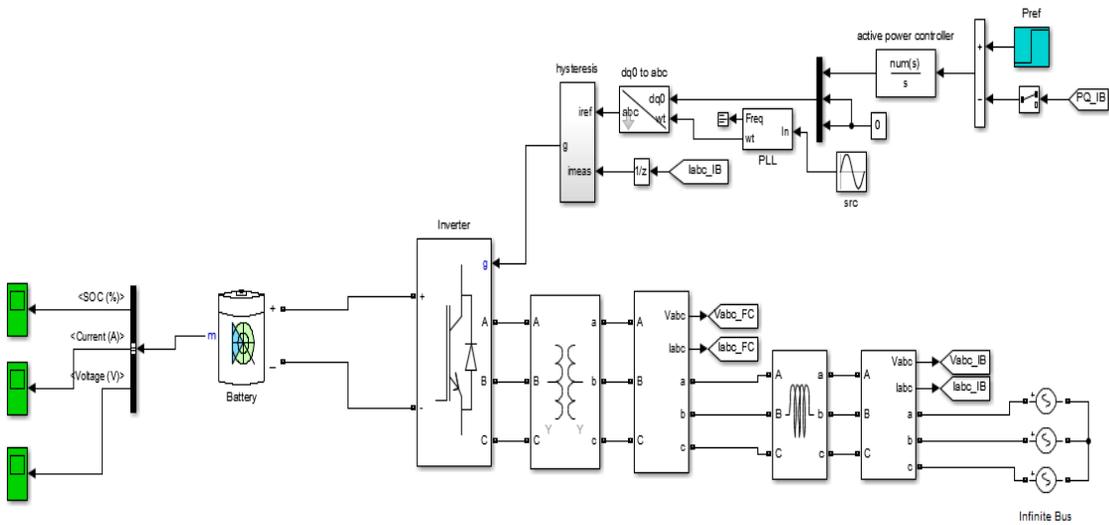
- [1]K. Energi et al., "Indonesiaenergy." G. Inverters, A. Abdalrahman, and A. Alshazly, "Simulation and Implementation of," vol. 6 no. 4, pp. 41-49, 2012.
- [2]Darjat et al 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 316 012057
- [3] Duclair Tiomo, « Modélisation et simulation d'un système électrique hybride à jumelage hydroélectrique –solaireavec stockage à batterie » université du Québec en Abitibi  
SEPTEMBRE 2019
- [4]DekkicheAbdelillah, Modèle de batterie générique et estimation de l'état de charge,Montréal, le 2 Mai 2008

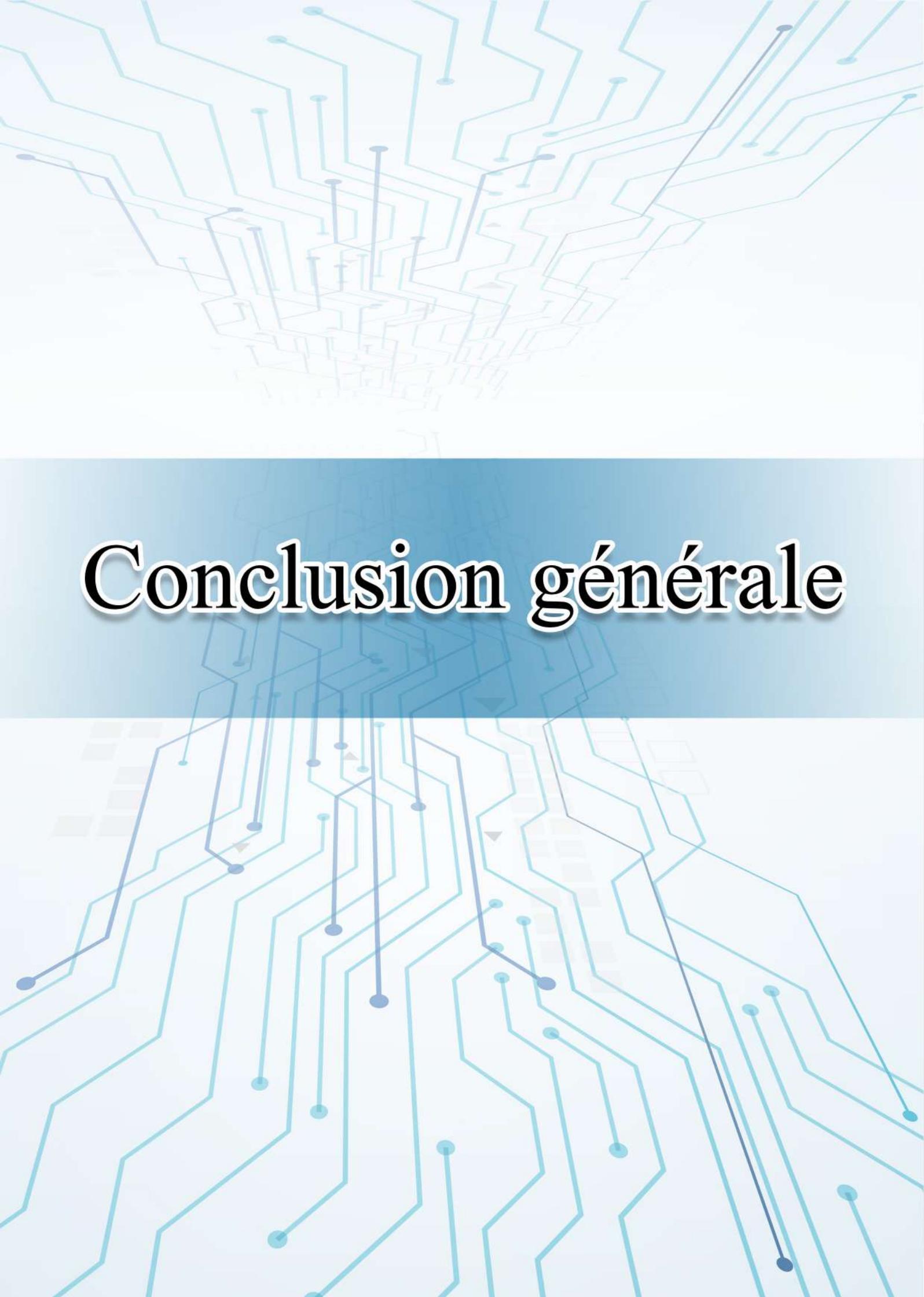
Annexe

Schéma globale de la Pile SOFC



Structure d'une batterie



The background features a complex network of light blue and white lines that resemble a circuit board or a data network. These lines are scattered across the page, with a denser concentration in the upper and lower portions. A solid, medium-blue horizontal band runs across the center of the image, serving as a backdrop for the main title. The overall aesthetic is clean, modern, and technological.

# Conclusion générale

### Conclusion Générale

Les besoins de production d'électricité augmentent, c'est pourquoi, ces dernières années, l'utilisation d'énergies renouvelables telles que le photovoltaïque et l'éolien a considérablement augmenté.

Toutefois, ces systèmes doivent être associés à d'autres sources d'énergie, comme l'hydrogène, qui peut être produit par électrolyse, stocké, puis réutilisé par une pile à combustible pour fournir de l'électricité verte. La production d'hydrogène par des mécanismes autonomes tels que le couplage ou le reformage des énergies renouvelables apporte des réponses plus fiables et plus rentables à cette nouvelle technologie.

L'objectif Principale de notre mémoire était d'étudier et de modéliser une nouvelle source d'énergie renouvelable et propre appelée pile à combustible avec batterie de stockage

Même si elle a le potentiel de provoquer un changement dans le secteur de l'énergie, elle a encore un long chemin à parcourir avant de pouvoir être développée et commercialisée à grande échelle.

En raison de l'analogie entre les domaines électrique, thermique et chimique, un outil de modélisation des SOFC a été développé dans le cadre de nos recherches. Cette méthode permet d'obtenir un outil simple, flexible et efficace. A l'aide de ce modèle, une simulation a été réalisée pour obtenir les différentes caractéristiques et l'impact des paramètres étudiés sur les performances de la pile SOFC.

Dans le cadre de l'implantation d'un modèle électrique de la pile à combustible à base d'oxyde solide, il est évident de remarquer que cette source renouvelable présente des performances électrique acceptable terme de rendement ( de 60% jusqu'à 65% ) et de caractéristique DC ( $V_{DC} = 435.6v$ ,  $I_{DC} = 151A$  ). Cette source inépuisable peut nous bénéficier d'injecter au réseau public de distribution et d'alimenter le consommateur avec une puissance de (250KVA ), La qualité de puissance électrique de la source aussi reste satisfaisante et peut la coupler avec le gestionnaire de réseau public.

À l'avenir, nous espérons que ce travail recevra l'attention et qu'il sera développé pour être utilisé dans différents domaines.