REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITEYAHIAFARESDE MEDEA

Faculté de **T**echnologie **D**épartement de **G**énie **E**lectrique

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Énergie Renouvelable Électrotechnique

MEMOIRE MASTER

TITRE

Modulisation et simulation d'un système de stockage intègre dans micro réseau

Présenté et soutenue par :

_SEDER abdenour

_BOUDJELLEL faisal

-Dr. MORSLI	Abdelkader	Université de Médéa	Président du jury
-Dr. SKENDER	Mohamed Reda	Université de Médéa	Examinateur
-Dr. AMOKRANE	Zouhir	Université de Médéa	Encadreur

Année universitaire 2023/2024

Remerciements

Mes remerciements vont tout premièrement à Allah le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et l'amour du savoir pour pouvoir réaliser ce modeste travail. Nos plus vifs remerciements vont à Dr. Amokran Zouhir pour avoir accepté d'encadrer ce sujet, ainsi pour son orientation nos sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail nos vifs remerciements à tous les enseignants du département d'électronique qui ont contribué à notre formation

Dédicaces

A mes parents, pour l'amour qu'ils m'ont toujours donné, leurs encouragements et toute l'aide qu'ils m'ont apportée durant mes études. Aucun mot, aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération, et mon amour pour les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon instruction et mon bien-être.

ملخص

يمكن أن تشكل الأنظمة المستقلة، التي تجمع بين مولد كهروضوئي ومولد ريحي وبطاريات تخزين، بديلًا ممتازًا. بفضل تكامل هذين المصدرين للطاقة، يمكن الاستفادة من مزايا كل منهما مع تقليل عيوبهما.

وبالتالي، فإن العمل البحثي المقدم في هذه الرسالة هو إسهام في تحليل سلوك والتحكم في أداء نظام طاقة هجين مستقل، يستخدم الألواح الكهروضوئية وتوربين الرياح، مما يسمح بمعايرة استغلال هذه المصادر. لتكييف إنتاج المصادر المتجددة مع احتياجات الحمل، قمنا بدمج أنظمة تخزين الطاقة. تظهر نتائج المحاكاة حدود البطاريات في وجود ذروات الطاقة. لمعالجة هذه المشكلة، اقترحنا استخدام مصدر تخزين هجين حيث تكون العناصر لها وظيفة محددة، إما في الطاقة أو في القدرة.

الكلمات المفتاحية: نظام طاقة هجين، الرياح، الكهروضوئية، أنظمة التخزين، مولد غير متزامن، تشغيل مستقل، إدارة الطاقة

Abstract

The autonomous systems, associating a photovoltaic generator, a wind generator and storage batteries, can constitute an excellent alternative. Thanks to the complementarity of the two sources of energy, it is possible to take advantage of each of the two, while minimizing their inconveniences.

Thus, the research work presented in this thesis is a contribution to the analysis of the behavior and the mastery of the performances of an autonomous hybrid energy system, using photovoltaic panels and a wind turbine, allowing to calibrate the exploitation of these sources. To adapt the production of the renewable sources to the load needs, we integrated energy storage systems. The simulation results show the limits of batteries in the presence of power peaks. To remedy this problem, we proposed the use of a hybrid storage source whose elements have a specific function, either in energy or in power.

Key words: hybrid energy system, wind, photovoltaic, storage systems, asynchronous generator, autonomous operation, energy management.

Résumé

Les systèmes autonomes, associant un générateur photovoltaïque, un générateur éolien et des batteries de stockage, peuvent constituer une excellente alternative. Grâce à la complémentarité des deux sources d'énergie, il est possible de profiter des avantages de chacune des deux, tout en minimisant leurs inconvénients.

Ainsi, le travail de recherche présenté dans ce mémoire est une contribution à l'analyse du comportement et à la maîtrise des performances d'un système d'énergie hybride autonome, utilisant des panneaux photovoltaïques et une éolienne, permettant de calibrer l'exploitation de ces sources. Pour adapter la production des sources renouvelables aux besoins de la charge, on a intégré des systèmes de stockage d'énergie. Les résultats de simulation montrent les limites des batteries en présence de pics de puissance. Pour remédier à ce problème, on a proposé l'utilisation d'une source hybride de stockage dont les éléments ont une fonction spécifique, soit en énergie, soit en puissance.

Mots clés : système d'énergie hybride, éolien, photovoltaïque, systèmes de stockage, génératrice asynchrone, fonctionnement autonome, gestion d'énergie.

Abréviations

AC : Courant Alternatif « Alternatif Current ».

Bus CC : Bus à courant continu.
CAES : Compressed air Energy Storage (Air comprimé).

DC : Courant continu « direct current ».

CS : Convertisseur statique.

EDC : Etat de charge.

Fem : Force électromotrice.

AC/DC : Convertisseur tension alternatif/continu.

DC/DC : Convertisseur tension continu/continu.

GSAP : Génératrice synchrone aimant permanent.

GPV : Générateur photovoltaïque.

IC : Conductance incrémentée.

MPPT : Maximum power point tracking (Recherche du maximum de puissance).

PI : Proportionnel intégral.

PV : Photovoltaïque.

P&O : Perturbation et observation : Commande de perturbation et observation.

PPM : Point de puissance maximal.

SEH : Système d'énergie hybride.

STC : Conditions standards de fonctionnement.

SMES : Superconducting magnetic energy storage.

Wc : Watt-crête (puissance maximale dans les conditions standards de fonctionnement).

Wt : Wind turbine (éolienne).

Symboles

Δe : La variation de l'erreur dans l'algorithme FLC **[-].**

ΔI : La variation du courant **[A]**.

ΔP : La variation de la puissance **[W].**

ΔV : La variation de la tension **[V].**

αcc : Le coefficient d'incrémentation du courant **[A/°C].**

Qoc : Coefficient d'incrémentation de la tension **[V/°C].**

λ : Rapport entre la vitesse des pales et la vitesse du vent **[/].**

$\boldsymbol{\Omega}$: Vitesse angulaire de rotation de la turbine **[rad/sec].**

$\boldsymbol{\Omega}$: Vitesse angulaire **[rad/sec].**

Cg : Couple génératrice **[N.m].**

$Cbatt$: Capacité de stockage de la batterie **[Ah]**.

Cp : Coefficient aérodynamique de puissance de la turbine **[-].**

Cpmax : Coefficient de puissance maximale de la turbine éolienne **[-].**

D : Rapport cyclique **[-].**

E 0 : Tension à vide de la batterie **[V].**

E : L'erreur de l'algorithme FLC **[-].**

G : L'irradiation solaire **[W/m²].**

$Gstc$: Insolation dans les conditions standards **[W/m²].**

IPV : Courant photovoltaïque **[A].**

Iph : Le photon courant de la cellule **[A].**

ID : Courant traversant la diode dans le circuit équivalent de la cellule PV **[A].**

IRp : Courant traversant la résistance parallèle **[A].**

Impp : Courant à la puissance maximale**[A].**

Iph : Courant à la puissance maximale **[A].**

Icc : Courant de court circuit **[A].**

Idc : Le courant modulé par le redresseur **[A].**

$Pbatt$: Puissance de la batterie **[W].**

$Péol$: Puissance de l'éolienne **[W].**

Ppv : Puissance du Panneau photovoltaïque **[W].**

Pch : Puissance de charge **[W].**

ipv**:** Courant fournie par le générateur photovoltaïque **[A]**.

ieol: Courant fournie par le système éolien **[A]**.

ic: Courant qui traverse la capacité **[A]**.

ihyb: Courant produit par le système hybride PV-éolien **[A]**.

ibatt : Courant de la batterie **[A].**

ich : Courant de la charge [A].

K : Constante de Boltzmann (K=1.38 J/k) **[J/k].**

m**:** Facteur d'idéalité **[-].**

Rsh : Résistance shunt (Parallèle) [**Ω**].

Rs : Résistance série [**Ω**].

Tstc : La température dans les conditions standards **[°C].**

Vdc : La tension redressée **[V].**

Vmpp : Tension au point de puissance maximale **[V].**

Vco : Tension en circuit ouvert **[V].**

J : Inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine **[m.s/rad].**

f : Coefficient de frottement dynamique **[m.s/rad].**

Tem : Couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone **[N.m].**

Tt : Couple développé par la turbine sous l'action du vent **[N.m].**

$\boldsymbol{\Omega}$: Vitesse mécanique de la génératrice **[tr/min].**

$\boldsymbol{\Omega}t$: Vitesse de la turbine **[tr/min].**

Table des matières

Remerciements……..…….…..……I

Dédicaces…….....II

Résumé……..…….....III

Abréviation …….....IV

Symboles …… …….….....V

Table des matières…… ……..…….VII

Liste Des Figures……..…….XI

Liste des tableaux……..……XIV

Introduction générale ……..……..1

CHAPITER I :

CONTEXTE ET ÉTAT DE L'ART SUR LE SYSTÈME HYBRIDE A STOCKAGE ÉTUDIÉ

I.1. Introduction : **4**

I.2. Problématique **4**

I.3. Objectifs généraux et spécifiques **5**

I.3. Motivations socio-économiques et scientifiques **5**

I.3. 1. Motivations socio-économiques **5**

I.3.2 Motivations scientifiques **6**

I.4 Système réseau électrique autonome **7**

I.5. Les Sources d'EnRs **7**

I.5.1 Le système solaire **9**

I.5.1.1 Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque **9**

I.5.1.2 Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque **9**

I.5.1.2 Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV **11**

I.5.1.4 Utilisation d'un générateur photovoltaïque (PV) **13**

I.5.2 Généralités **14**

I.5.2.1 Le vent **14**

I.5.2.2 Présentation de la turbine éolienne **14**

I.5.2.3 Caractéristique puissance-vitesse d'une éolienne **15**

I.5.3 Les avantages et inconvénients d'une source d'énergie solaire et éolienne **16**

I.6. Systèmes hybrides **16**

I.6.1. Classification des systèmes hybrides **17**

I.6.2. Principales configurations des systèmes hybrides **17**

I.6.3 Système hybride (photovoltaïque/éolienne/batteries/supercondensateur) **19**

I.6.3.1. Les Avantages et les inconvénients du système hybride étudié **19**

I.7 Systèmes de Stockage d'énergie (SSE) **20**

I.7.1 Les batteries (accumulateurs)....**20**
I.7.1.1 Les accumulateurs Lithium-Ion....**21**
I.7.1.2 Principe de fonctionnement....**21**
I.7.2 Les supercondensateurs....**22**
I.7.3 Dispositifs de stockage de l'énergie....**23**
I.8. Intégration du système de stockage dans un système hybride de production d'énergie renouvelabl **23**
I.9. Conclusion....**24**

CHAPITER II :

Modélisation et résultats des simulation de composants du système hybride

II.1. Introduction....25
II.2. Structure de la chaine de conversion photovoltaïque....**25**
II.3. Modélisation du panneau photovoltaïque [25]....**26**
II.4. MODÈLE D'UN HACHEUR SURVOLTEUR (BOOST)....**29**
II.5. Simulation de la chaine de conversion photovoltaïque....**32**
II.5.1. Résultats de la simulation de chaine PV....**33**
II.6. Modélisation de la chaine de production éolienne....**35**
II.7. LE REDRESSEUR PD3 À DIODE....**39**
II.8. SIMULATION DE LA CHAINE DE CONVERSION ÉOLIENNE....**39**
II.8.1. Résultats de la simulation....**40**
II.9 Modélisation des super-condensateurs....**41**
II.9.1 Modèle de super-condensateur double branche....**42**
II.9.2Modèle simple branche.....**43**
II.9.3 Modèle du pack des super-condensateurs....**44**
II.9.4 Modèle simple branche....**44**
II.10. Conclusion....**45**

CHAPITER III :

INVESTIGATION, DIMENSIONNEMET ET CHOIX DU SYSTÈME DE STOCKAGE (SS)

III.1. Introduction....**46**
III.2. Avantages techniques et économiques du stockage d'énergie....46
III.3. Définition et grandeurs caractéristiques....**47**
III.4. Investigation sur les différents systèmes de stockage....**48**
III.4.1. Historique....**48**
III.5. Système de stockage d'électricité....**50**
III.7. Capacité de stockage installé dans le monde....**63**
III.8 Choix du système de stockage....**63**
III.8.1 Critère de choix....**64**
III.9 Conclusion....**64**

CHAPITER IV:
BATTERIE LITHIUM ION

IV.1. Introduction....**66**
IV.2. Qu'est qu'une batterie Lithium Ion?....**66**
IV.3.1. Avantages :....**67**
IV.3.2. Inconvénients....**67**
IV.2. Caractéristiques positives....**68**
IV.2.1. Durée de vie des batteries Lithium Ion....**69**
IV.2.2. Cycles de la batterie :....**69**
IV.2.3. Décharge profonde « totale interdite »....**69**
IV.2.4. L'effet mémoire....**70**
IV.2.5. Formes de cellules Lithium Ion....**70**
IV.2.6. Cellules cylindriques....**70**
IV.2.7. Cellules « POUCH »....**71**
IV.2.8. Cellules prismatiques....**72**
IV.3. Normalisation....**73**
IV.4. Propriétés fondamentales....**73**
IV.4.2. Capacité de Peuk ert « Taux C »....**74**
IV.4.3. État de charge....**74**
IV.5. Sécurité de la batterie au Lithium Ion....**74**
IV.6.1. Processus de charge :....**75**
- Réaction en charge à la cathode peut s'exprimer selon l'équationSuivante :....**76**
- Réaction en charge à l'anode peut s'exprimer selon l'équation suivante :....**76**
- La réaction globale peut s'exprimer selon l'équation suivante :....**76**

IV.7. Conclusion....**77**

CHAPITER V:
Etude et gestion d'énergie d'unsystème hybride Error! Bookmark not defined.

V.1. Introduction....**78**
V.2. Le bus continu....**78**
V.3 Dimensionnement du système hybride....**79**
V.4. Détermination de la taille des batteries....**81**
V.5. Charge à satisfaire par le système hybride....**82**
V.6. Organigramme de gestion d'énergie....82
V.7. Résultats de la simulation et discussion....**83**
V.8. Application des super condensateurs pour le stockage des énergies renouvelables....**85**
V.9. Configuration du système avec stockage hybride....**85**
V.9.1 Gestion d'énergie du système hybride avec stockage hybride....**87**
V.10 Simulation et interprétation des résultats....**89**

V.11 Conclusion.....**97**

Conclusion générale……..……...…**98**

Bibliographie ……**100**

Annex …….……..…..**103**

Liste Des Figures

Figure I.1: Accès à l'électricité par état et territoire en 2016**……..…….…..…..(6)**

Figure I.2: Synoptique du système autonome**…….…..(7)**

Figure I.3 : Les type d'énergies renouvelables**……...…..(8)**

Figure I.4 : Croissance de la capacité d'énergie renouvelable**……...…..(8)**

Figure I.5 : passage de la cellule solaire au système photovoltaïque**…….…..(9)**

Figure I.6 : Caractéristique IPV = f(VPV) d'un module photovoltaïque**…….…..(10)**

Figure I.7: Courbe PPV = f(VPV) d'un module photovoltaïque. **…….…..(11)**

Figure I.8 : Caractéristique courant-tension pour différentes températures **…….…..(11)**

Figure I.9 : Caractéristique puissance-tension pour différentes températures**……..…….…..(12)**

Figure I.10 : *L'influence de l'éclairement sur la caractéristique IPV=f(VPV)* **……...…..(12)**

Figure I.11 : Caractéristique puissance- tension pour différents ensoleillements **…….…..(13)**

Figure I.12 : installation photovoltaïque autonome**……...…..(14)**

Figure I.13 : Délimitation des zones de fonctionnement sur la caractéristique**……..(15)**

Figure I.14 : Composants typiques d'un système de stockage hybride photovoltaïque/éolien**……..(17)**

Figure I.15 : Classification des systèmes hybrides**……..…..(17)**

Figure I.16 : Architecture à bus alternatif (AC). **……..(17)**

Figure I.17 : Architecture à bus continu (DC). **……..…….…..(18)**

Figure I.18: Configuration d'un système hybride avec un bus CA**…….……...(18)**

Figure I.19 : Principe de fonctionnement des accumulateurs au lithium**…….……..(19)**

Figure I.20 : Schéma de principe des supercondensateurs**…….……(25)**

Figure II.1 : Différents constituants de la chaine de conversion photovoltaïque**…….…..(25)**

Figure II.2 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode**…...…… ..……(27)**

Figure II.3 : Schéma bloc du GPV**……... …….(29)**

Figure II.4: Circuit électrique du convertisseur DC-DC**……...(29)**

Figure II.5: Schéma d'un Hacheur survolteur à t ∈ [0, α. T**]**……..…...**(30)**

Figure II.6: Schéma d'un Hacheur survolteur à t ∈ [0, α. T**]**……..……**(30)**

Figure II.7: Principe de la MPPT avec la méthode P&O**…….…….(31)**

Figure II.8 : Organigramme de la méthode perturbation et observation (*P&O)*……..**(32)**

Figure II.9: Schéma Bloc du système photovoltaïque avec une hacheur boost**…….(33)**
Figure II.10: la courbe de l'irradiance **…… .(33)**
Figure II.11: la courbe du courant et tension, la puissance générée par le système photovoltaïque. **...(34)**
Figure II.12: (a) la courbe de la tension et (b) la puissance de sortie de le hacheur**…… …… …(34)**
Figure II.13: Schéma synoptique de l'aérogénérateur**……. …..(35)**
Figure II.14: Système de la turbine à modéliser **…….. …..(36)**
Figure II.15: Courbe CP(λ) **…….…….. …..(37)**
Figure II.16: Le redresseur PD3 à diode**……. …..(39)**
Figure II.17: Schéma Bloc du système éolien**……..…….. .(39)**
Figure II.18: Profil du vent admissible par la turbine [m/s**]**……....**(40)**
Figure II.19: le courant statorique à la sortie de l'éolienne isa ,isb ,isc**…… …… ……..(40)**
Figure II.20: la courbe de la tension (a) et la puissance (b) de sortie de redresseur**……...…..(41)**
FigureII.21 : Schéma du bus continu du système hybride avec stockage hybride**……..…..(42)**
FigureII.22 : Modèle à deux branches d'une super-condensateur **……..…….. …..(42)**
Figure II.23 : Modèle du super-condensateur a simple branche**…… …..(43)**
Figure III.1: Schéma général d'une batterie**……..…..(47)**
Figure III.2: a) la pile de Volta, b) la Pile de Leclanché, c) La première batterie**……...…..(50)**
Figure III.3: Chronologie de l'évolution des différents systèmes de batteries**……...…….…..(50)**
Figure III.4: Classification des différents dispositifs de stockage**…….…..(51)**
Figure III.5: Structure d'un condensateur . **……...…..(52)**
Figure III.6: Structure d'un supercondensateur . **……..…….…..(53)**
Figure III.7: Principaux éléments d'un dispositif de stockage d'énergie sous forme magnétique par bobine supraconductrice [15,16]. **…….…..(54)**
Figure III.8: Principe d'un accumulateur électrochimique**…….…..(55)**
Figure III.9: Schéma de principe d'une STEP **……... …….…..(58)**
Figure III.10: Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé **……...…….…..(59)**
Figure III.11: principe du stockage par volant d'inertie **……...…..(60)**
Figure III.12: stockage thermique par chaleur sensible **……..…….. ..(61)**
Figure III.13: Capacité énergétique mondiale de stockage d'énergie par technologique **……...(63)**
Figure III.14: différents systèmes de stockage les plus rependus dans les (ER) **…… …...(64)**
Figure IV.1: Schéma d'une présentation chimique**……..……..…... (66)**
Figure IV. 2 : Schéma d'une présentation chimique**…… ……(71)**
Figure IV. 3 Cellules «POUCH» : (a) LTO 2.4V 26AH Lithium Titanate ; (b) Lithium Ion 3,7 V 32Ah Lithium Ion pour EV, E-Bike**…… ……..(71)**

Figure IV.4 : Cellules prismatiques**……...… …….(72)**
Figure IV.5 : Batterie déchargée (état initial) **…… …….…….....(75)**
Figure IV.6 : batterie en charge**…… …….……...(76)**
Figure IV.7 : Étapes de charge d'une batterie Li-ion**…….…….…..(77)**
Figure 1 Système hybride (éolien /photovoltaïque) avec stockage **…….…..……..(78)**
Figure V.2 : Schéma du bus continu **…….…… …..(79)**
FigureV.3 : Profil de puissance demandée par la charge**……..…… …..(82)**
FigureV.4 : Organigramme de gestion d'énergie du système hybride avec stockage par batteries**..(83)**
FigureV.5 : Tension du bus continu**……... …..(84)**
FigureV.6: Etat de charge des batteries**…… …….(84)**
FigureV.7 : Allure des puissance Pbat, Phyb, Pch**…… ……(84)**
FigureV.8 : Système hybride (éolien /photovoltaïque) avec stockage hybride (batterie/super-condensateur) **…… ……..(87)**
FigureV.9 : Organigramme de gestion d'énergie du système hybride avec stockage hybride (batteries / super-condensateur) **…… ……..(88)**
FigureV.10 : La puissance demandée par la charge avec la puissance d'autre source**…… …..(89)**
FigureV.11 : La puissance demandée par la charge**…… …..(89)**
FigureV.12 : Allure du courant de la batterie**…… …….(90)**
FigureV.13 : Etat de charge des batteries**…… ……..(90)**
FigureV.14 : Allure de Tension aux bornes des batteries**…… ……..(91)**
FigureV.15 : Allure du courant des super-condensateurs**…… ……..(91)**
FigureV.16 : Allure de tension aux bornes des super-condensateurs**…… ..…..(92)**
FigureV.17 : Etat de charge des super-condensateurs**…… ……..…..(92)**

Liste des tableaux

Tableau 1 Comparaison de quelques technologies d'accumulateurs électrochimique**s...(57)**

Tableau 2 : Tableau comparatif des différentes (principales) technologies de stockage d'énergie électrique**…….…..…..(62)**

Tableau 3 : Technologie des batteries Lithium**……..(68)**

Tableau 5 : L'Etat de chaque composant constituant le SEH**. ……. ..…..(94)**

Tableau 6 : Différents scénarios de fonctionnement du SEH**…….. ..…..(96)**

Introduction générale

Introduction générale

Actuellement, à la demande de la communauté internationale, les industriels s'efforcent de réduire la consommation des énergies fossiles et les émissions de polluants [1]. La question énergétique est d'envergure mondiale et prend une importance particulière avec l'entrée dans le circuit des échanges de pays très peuplés et très fortement demandeurs [2]. La raréfaction des ressources fossiles non renouvelables, leur inégale répartition géographique, et les tensions sur les prix qui en résultent, font de la question énergétique un enjeu majeur de développement. L'énergie de fission nucléaire souffre généralement d'une mauvaise image médiatique. Bien que les risques d'accident liés à son exploitation soient très faibles, les conséquences potentielles, même si elles sont peu probables, seraient désastreuses. De plus, le traitement des déchets issus de ce mode de production est très coûteux. L'accès à cette ressource pour les pays en développement nécessite des investissements lourds et un niveau de technicité souvent difficile à atteindre. Les solutions technologiques classiques apportées par le stockage électrochimique conventionnel sont onéreuses, techniquement limitées en puissance et restreintes en capacité [3]. Celles apportées par les groupes électrogènes présentent des inconvénients importants en raison de la nécessité d'approvisionnement en carburant et de leur maintenance, ainsi que du bruit, de la pollution, et de leur mauvais rendement à charge partielle [4].

Les nouvelles solutions technologiques, apportées par les systèmes hybrides à énergie renouvelable, bien qu'elles ne soient pas encore économiquement compétitives, offrent une sûreté élevée. Dans le contexte du développement durable, ces solutions, avec le soutien des politiques publiques, peuvent devenir économiquement viables à moyen et long terme.

Le caractère aléatoire des ressources d'énergie renouvelables signifie qu'un système autonome utilisant une seule source d'énergie renouvelable nécessite une grande capacité de stockage pour satisfaire les besoins énergétiques et assurer une meilleure fiabilité de la production. L'utilisation de systèmes hybrides, combinant plusieurs sources d'énergie, permet de réduire les besoins de stockage et d'atténuer les fluctuations de production causées par la nature aléatoire de ces ressources. De plus, ces systèmes peuvent constituer une alternative ou un complément aux groupes électrogènes diesel utilisés généralement pour la génération d'énergie électrique dans les régions isolées.

Les systèmes autonomes, associant un générateur photovoltaïque, un générateur éolien et des batteries de stockage, peuvent constituer une excellente alternative [3]. Grâce à la complémentarité des deux sources d'énergie, il est possible de profiter des avantages de chacune tout en minimisant leurs inconvénients.

C'est dans ce contexte que s'insère cette étude, qui constitue une contribution pour une meilleure gestion des sources d'énergies renouvelables dans un système d'énergie hybride. Le but de notre travail est l'étude et la gestion d'un système d'énergie hybride avec stockage par batterie et super-condensateur. Afin de mener

à bien cette étude, le présent mémoire est structuré en quatre chapitres, en plus de l'introduction générale et de la conclusion générale.

Les solutions technologiques classiques apportées par le stockage électrochimique conventionnel sont onéreuses, techniquement limitées en puissance et restreintes en capacité [3]. Celles apportées par les groupes électrogènes présentent des inconvénients importants en raison de la nécessité d'approvisionnement en carburant et de leur maintenance, ainsi que du bruit, de la pollution, et de leur mauvais rendement à charge partielle [4].

Les nouvelles solutions technologiques, apportées par les systèmes hybrides à énergie renouvelable, bien qu'elles ne soient pas encore économiquement compétitives, offrent une sûreté élevée. Dans le contexte du développement durable, ces solutions, avec le soutien des politiques publiques, peuvent devenir économiquement viables à moyen et long terme.

Le caractère aléatoire des ressources d'énergie renouvelables signifie qu'un système autonome utilisant une seule source d'énergie renouvelable nécessite une grande capacité de stockage pour satisfaire les besoins énergétiques et assurer une meilleure fiabilité de la production. L'utilisation de systèmes hybrides, combinant plusieurs sources d'énergie, permet de réduire les besoins de stockage et d'atténuer les fluctuations de production causées par la nature aléatoire de ces ressources. De plus, ces systèmes peuvent constituer une alternative ou un complément aux groupes électrogènes diesel utilisés généralement pour la génération d'énergie électrique dans les régions isolées.

Les systèmes autonomes, associant un générateur photovoltaïque, un générateur éolien et des batteries de stockage, peuvent constituer une excellente alternative [3]. Grâce à la complémentarité des deux sources d'énergie, il est possible de profiter des avantages de chacune tout en minimisant leurs inconvénients.

C'est dans ce contexte que s'insère cette étude, qui constitue une contribution pour une meilleure gestion des sources d'énergies renouvelables dans un système d'énergie hybride. Le but de notre travail est l'étude et la gestion d'un système d'énergie hybride avec stockage par batterie et super-condensateur. Afin de mener à bien cette étude, le présent mémoire est structuré en quatre chapitres, en plus de l'introduction générale et de la conclusion générale.

Dans le premier chapitre, une recherche bibliographique sur les systèmes de production d'énergies renouvelables sera réalisée. Nous nous intéresserons aux sources d'énergie qui composent ces systèmes et aux différentes structures des systèmes hybrides, en nous concentrant sur le système hybride combinant les deux sources d'énergie renouvelable (photovoltaïque et éolien) avec des batteries de stockage.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation et à la simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque et éolienne composant le système hybride pour l'architecture choisie.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons une les déférant source de stockage. Deux types de stockage seront envisagés : un stockage à court terme et un autre à long terme (batterie électrochimique).

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons des informations sur une source de stockage à long terme (batterie)

Dans le dernier chapitre, nous concevrons un algorithme de gestion pour l'ensemble de l'installation hybride, qui nous permettra de superviser les flux d'énergie, de protéger les batteries contre les surcharges et les décharges profondes, et de protéger également la charge en cas de demande non satisfait.

CHAPITER Ⅰ :
CONTEXTE ET ÉTAT DE L'ART SUR LE SYSTÈME HYBRIDE A STOCKAGE ÉTUDIÉ

CHAPITER I :
CONTEXTE ET ÉTAT DE L'ART SUR LE SYSTÈME HYBRIDE A STOCKAGE ÉTUDIÉ

I.1. Introduction :

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter. Mais avant de la consommer il aura fallu la produire, en général dans des unités de production de grande puissance, la transporter, puis la distribuer vers chaque consommateur, Un recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel pour les plus répandus, permet d'avoir des coûts de production faibles mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant. Comme les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires. Aujourd'hui, après l'hydraulique, le grand éolien devient compétitif en termes de coûts de production [5].

On remarque de plus en plus le jumelage de centrales photovoltaïques à des centrales éoliennes pour former un micro réseau d'énergie autonome pouvant alimenter les zones isolées ou éloignées. Par ailleurs, les centrales de production d'énergie à sources renouvelables font souvent face à des difficultés d'acceptation en raison de coûts d'investissement élevés. Leur disponibilité instable et imprévisible due aux variations saisonnières et climatiques ne facilite pas leur intégration à grande échelle [6]. Il est essentiel de contourner ces obstacles, un système de récupération d'énergie serait donc nécessaire pour garantir la disponibilité en énergie électrique.

Dans ce chapitre nous allons présenter certaines problématiques d'un système de stockage. Puis, nous présentons d'une manière générale les systèmes hybrides. Ensuite, nous présentons d'une façon plus détaillée les principaux composants de notre système hybride constitué par les éléments : photovoltaïque/éolienne avec le système de stockage.

I.2. Problématique

Les systèmes électriques hybrides de production d'énergie renouvelable associés aux systèmes de stockage peut faire face à certaines problématiques. Par exemple, si l'on veut satisfaire une certaine demande énergétique en tout temps, le système de stockage doit garantir une certaine autonomie afin de répondre aux besoins de la charge pendant les périodes moins ensoleillées ou moins ventilées. Pour continuer à assurer l'équilibre de l'offre et de la demande en électricité à tout moment, il est donc indispensable de considérer plusieurs aspects liés à la production et au comportement du système de stockage. Le stockage de l'électricité vise tout d'abord à répondre à quatre problématiques principales :

- ✓ La récupération de la production d'énergie excédentaire par rapport à une demande à un instant donné.

- ✓ La fourniture d'énergie pour compenser 1' insuffisance due au caractère intermittent de 1' offre.
- ✓ La fourniture d'énergie pour alimenter un pic de demande occasionnelle.
- ✓ La fourniture d'énergie en cas de défaillance du système électrique ou de mauvaise qualité du réseau local. [7]

I.3. Objectifs généraux et spécifiques

Le stockage d'énergie hybride provenant des sources renouvelables fait objet d'efforts soutenus de la recherche et du développement de la communauté scientifique. Ces efforts mobilisent aussi bien les institutions publiques et privées de recherche fondamentale que les fournisseurs d'équipement et les opérateurs de réseaux électriques [8].

L'objectif général ici est la modélisation, la simulation et l'utilisation convenable de l'énergie issue des sources renouvelables intermittentes via un système de stockage intégré dans un système hybride Solaire-Éolien.

Dans la littérature, plusieurs critères économiques sont utilisés pour l'analyse économique des systèmes de production d'électricité d'origines renouvelables. Parmi ces critères, on trouve, le coût annualisé, le coût du kilowattheure d'énergie et le coût de cycle de vie.

I.3. Motivations socio-économiques et scientifiques

I.3. 1. Motivations socio-économiques

Désigné comme une priorité pour les décennies à venir et faisant partie des sous critères des objectifs du millénaire pour le développement, l'accès à l'énergie est l'un des principaux enjeux pour le développement socio-économique mondial. Les besoins humains fondamentaux tels que l'eau, l'alimentation, la santé, l'éducation seront limités si l'on ne dispose pas de l'énergie électrique. Cependant l'accès à l'énergie est loin d'être assuré dans les pays émergents et les pays les moins développés de la planète. Les grands centres de production d'énergie sont généralement situés loin des points de consommation. L'énergie produite est transportée sur de longues distances via des équipements (lignes de transport, supports des lignes, équipements de protection le long des lignes, etc.) qui sont généralement coûteux. Les stations de contrôle sont très souvent implantées le long de la ligne de transport pour assurer la continuité et la qualité de la puissance électrique transférée, de la tension et de la fréquence [9]. Dans la plupart des régions éloignées des grands réseaux électriques, les centrales de production d'électricité existantes sont souvent à base d'énergie fossile, coûteuse et polluante. Le prix d'extension du réseau électrique est graduellement proportionnel à l'éloignement et le prix du combustible augmente radicalement avec l'isolement. Pourtant, les effets

multiplicateurs de l'accès à l'électricité sur le développement humain et économique sont indéniables l'augmentation de la capacité électrique installée et le recours croissant à des ressources renouvelables pourraient transformer 1 'économie et le mode de vie de la plupart des pays. Selon les estimations de la Banque mondiale et de 1 'Organisation des Nations unies (ONU), sur les 7 milliards d'habitants de la planète, 1,3 milliard n'a toujours pas accès à l'électricité. Près de la moitié, 600 millions, vit en Afrique subsaharienne (soit les deux tiers de la population de ce continent), environ 300 millions vivent en Inde, et autant dans d'autres pays d'Asie. La Chine a presque complètement résolu ses problèmes d'électrification (8 millions seulement en sont dépourvus). En Amérique latine, le chiffre tourne auteur de 30 millions [10].



Figure I.1*:* Accès à l'électricité par état et territoire en 2016 [11].

I.3.2 Motivations scientifiques

La puissance à la sortie d'un système photovoltaïque et éolien est variable, car elle dépend de l'irradiation solaire, de la température et du vent respectivement. Ceux-ci sont souvent instables à cause des nuages et de l'absence ou le faible flux de vent [12]. Le système de stockage peut se positionner comme compensateur pour atténuer les fluctuations aléatoires de la puissance délivrée, et ainsi fournir une alimentation électrique fiable à la charge [13]. Cependant, ces systèmes sont souvent limités par leur capacité de stockage quand les demandes sont plus élevées. La durée de vie des systèmes de stockage (batteries) est limitée et leur prix, relativement plus élevé ce qui les rend presque impossibles pour le stockage à grande échelle. Il faut noter que le coût du stockage représente la plus grande contrainte du coût global du système pour les installations photovoltaïques et/ou éoliennes de grandes puissances autonomes [14].

Les déséquilibres énergétiques dus à des variations saisonnières peuvent être surmontés partiellement ou totalement par la cogénération de ces deux sources d 'énergie. Le solaire, l'éolien et le système de stockage peuvent se compenser mutuellement. Les systèmes de stockage sont nécessaires dans la mesure où ils peuvent réduire les fluctuations rapides de puissance de la charge ou fournir de1' énergie en absence du soleil et du vent [15].

I.4 Système réseau électrique autonome

Dans la Figure I.1, nous présentons un système simplifié de stockage d'énergie à base Les battrai et supercondensateur dans un réseau électrique autonome. Selon les besoins en énergie durant la journée, de l'électricité est injectée dans le réseau ou utilisée par charge les battrai.

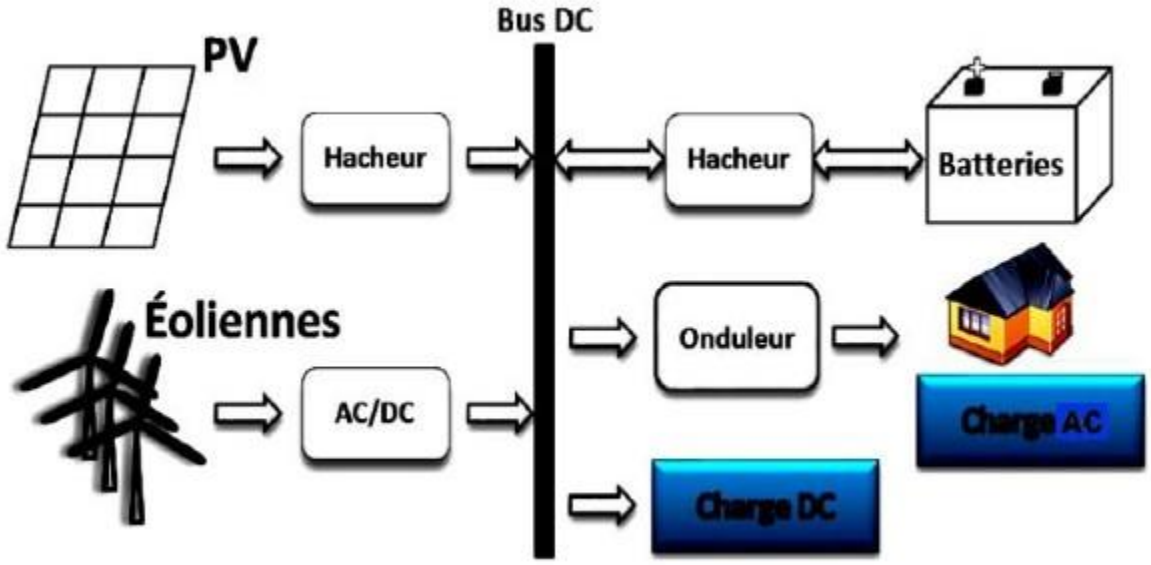


Figure I.2: Synoptique du système autonome .

I.5. Les Sources d'EnRs

Les EnRs désignent un ensemble de sources d'énergies dont le renouvellement naturel est assez rapide par rapport à l'échelle du temps humain. Ces énergies sont issues des éléments naturels tels que les rayons solaires, les chutes d'eaux, le vent, etc. Les EnRs sont également désignées par les termes « énergies propres » ou « énergies vertes ». Il existe principalement cinq types d'EnRs à savoir

- L'énergie solaire
- L'énergie éolienne
- L'énergie hydraulique
- La biomasse et la géothermie.

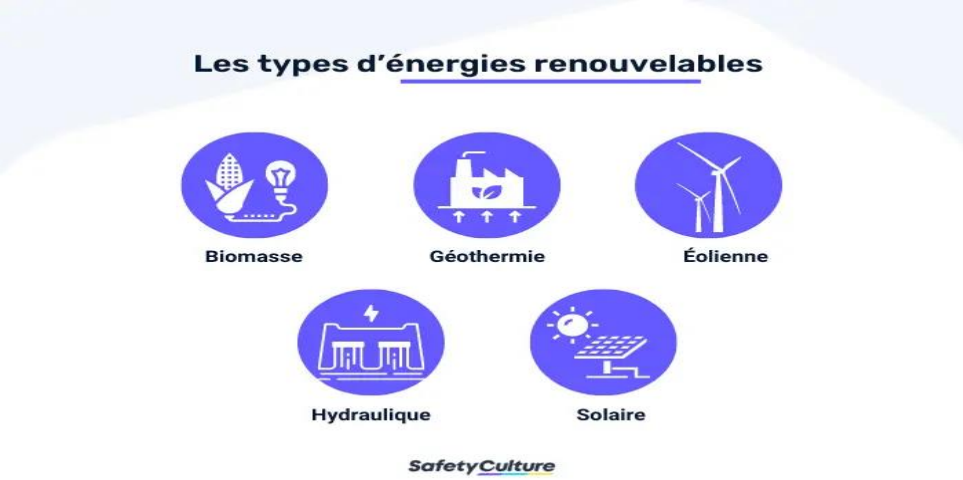


Figure I.3 : Les type d'énergies renouvelables

.

Cependant, les énergies solaire, éolienne et hydraulique restent les formes d'EnRs les plus exploitées. Rien qu'en 2018, ces trois formes d'EnRs représentaient 90.6% du total des EnRs produites dans le monde [16].

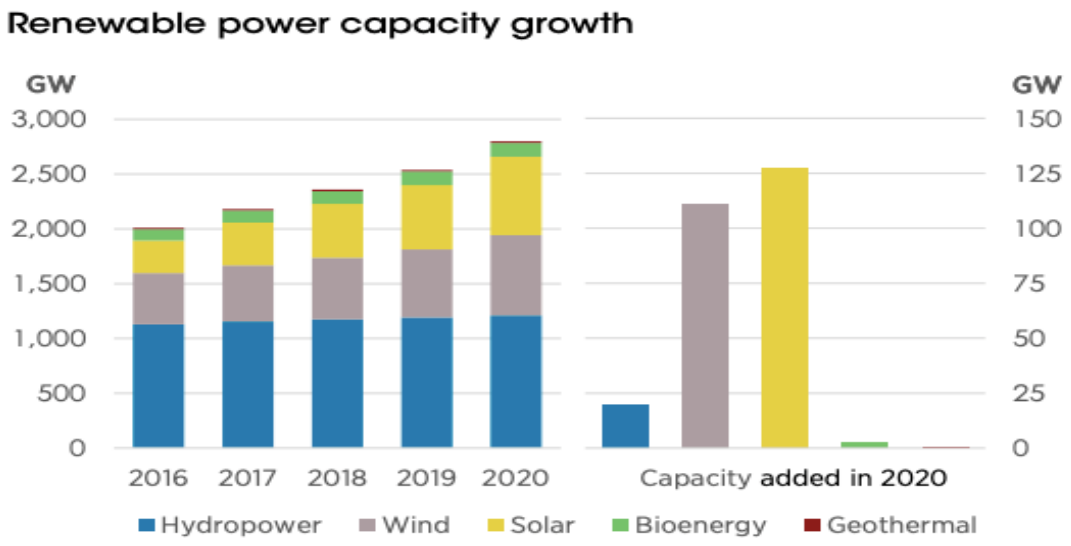


Figure I.4 : Croissance de la capacité d'énergie renouvelable [17].

I.5.1 Le système solaire

I.5.1.1 Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque

L'effet photovoltaïque se manifeste par l'apparition d'une différence de potentiel à la jonction entre un métal et un semi-conducteur ou entre deux semi-conducteurs lorsque le dispositif reçoit un rayonnement lumineux de longueur d'onde adéquate. Ainsi une cellule photovoltaïque peut convertir l'énergie solaire en énergie électrique en mettant en jeu ce phénomène physique optoélectronique. Industriellement les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium. Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12% avec du silicium polycristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe [13].

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass. Celle-ci n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.

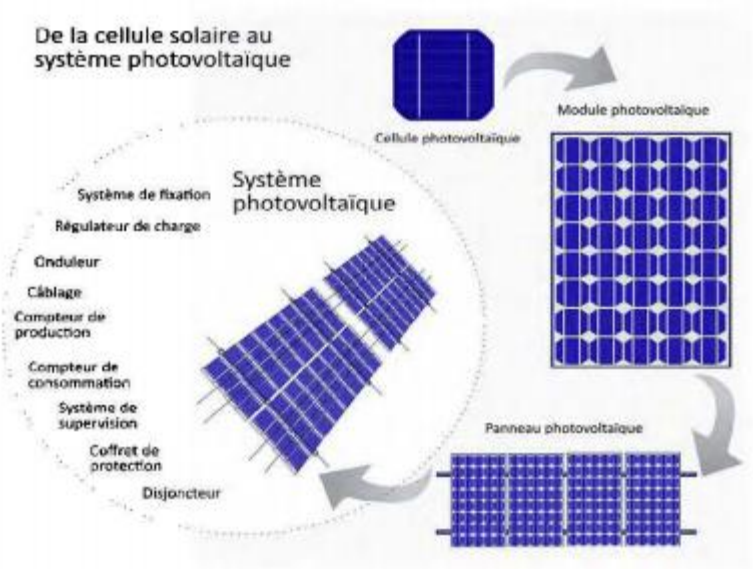


Figure I.5 : passage de la cellule solaire au système photovoltaïque *[19]*

I.5.1.2 Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque [20]

Dans notre travail nous avons utilisé le panneau de type SHARP [175W_c-24 V].

❖ **Caractéristique Courant-Tension**

La courbe caractéristique d'un panneau photovoltaïque représente la variation du courant qu'elle produise en fonction de la tension à ses bornes, depuis le court-circuit (tension nulle correspondante au courant

maximal) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de panneau).

La figure (I.4) représente la courbe I = f(V) d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de 25°C.

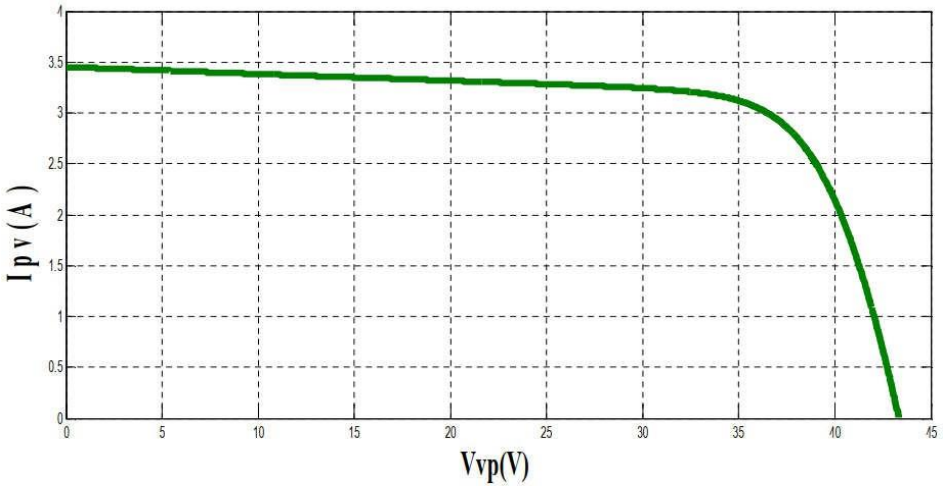


Figure I.6 : Caractéristique IPV = f(VPV) d'un module photovoltaïque [21].

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un module photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance.

Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point P_{mpp} où la puissance se trouve être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée **[21]**.

❖ ***Caractéristique puissance –tension***

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement standard (éclairement de 1000W/m^2 température de 25 °C) la puissance électrique P_{PV} disponible aux bornes d'un panneau photovoltaïque est égale au produit du courant photovoltaïque fourni I_{PV} par la tension à ces bornes donnée V_{PV}. Puissance délivrée par le module a pour expression : $P_{PV} = V_{PV} * I_{PV}$

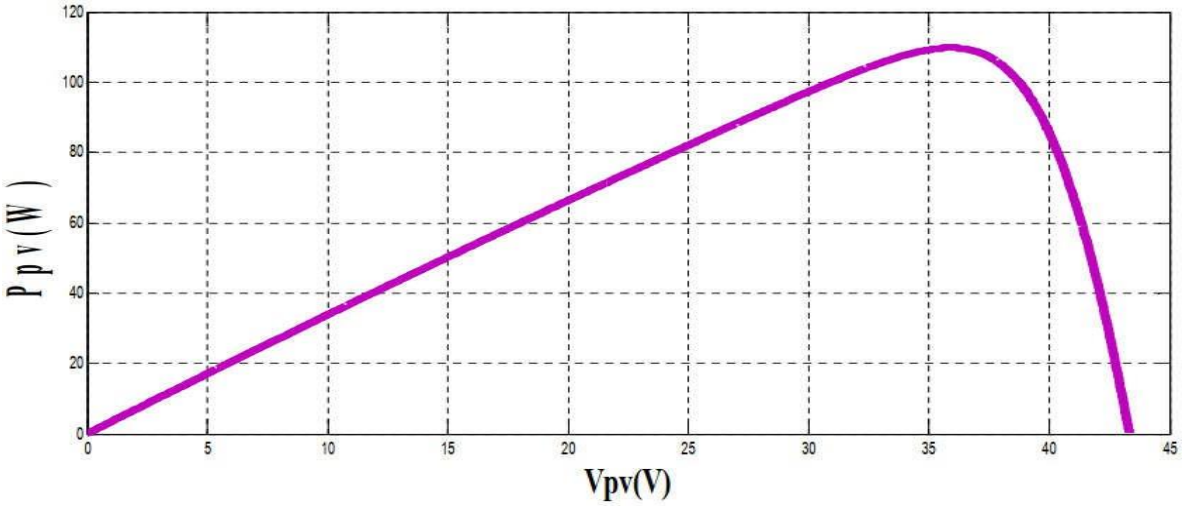


Figure I.7: Courbe PPV = f(VPV) d'un module photovoltaïque [21].

Cette courbe passe par un maximum de puissance (P_{opt}), à cette puissance correspond une tension V_{opt} et un courant I_{opt} **[21]**.

I.5.1.2 Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV

- **Influence de la température**

Les figures (I.6) et (I.7) présentent respectivement des courbes courant-tension et puissance-tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule photovoltaïque (25, 50, 75, et 90°C) :

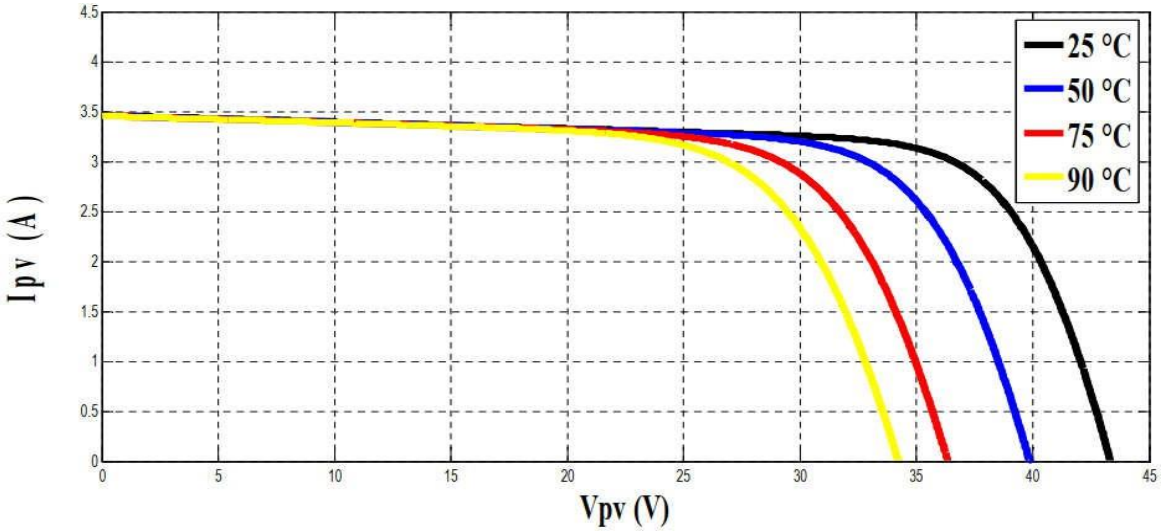


Figure I.8 : Caractéristique courant-tension pour différentes températures [21].

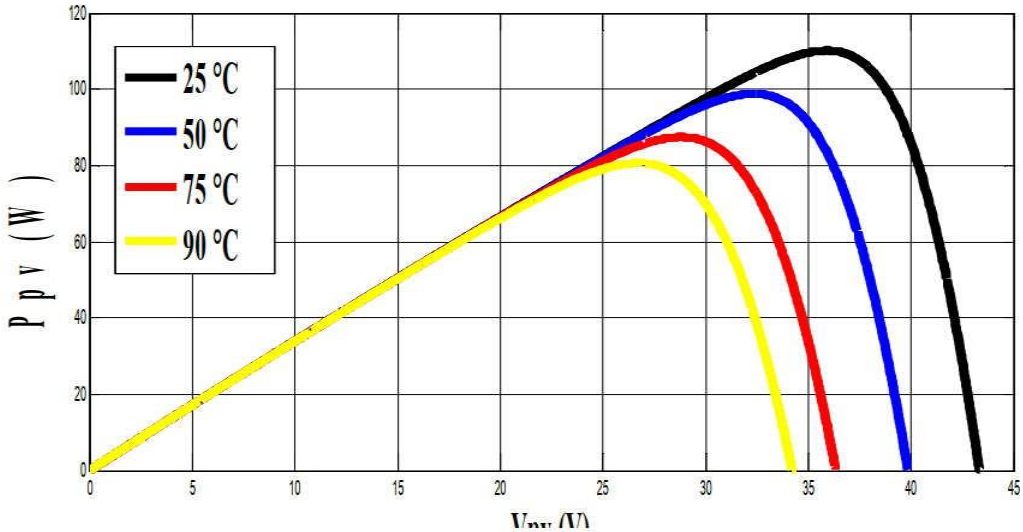


Figure I.9 : Caractéristique puissance-tension pour différentes températures [27].

On constate que la température influe sur la tension de circuit ouvert et non sur le courant de court-circuit de la cellule. Suivant les figures (II.6) et (II.7), on constate que lorsque la température croit à irradiation constante (1000W/m^2) la tension de circuit ouvert V_{co} décroît fortement et le courant de court-circuit I_{cc} augmente légèrement. L'augmentation de la température se traduit au total par une diminution de la puissance maximale disponible.

Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue d'environ 0,5% par degréd'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25 °C **[21].**

- **Influence de l'intensité du rayonnement**

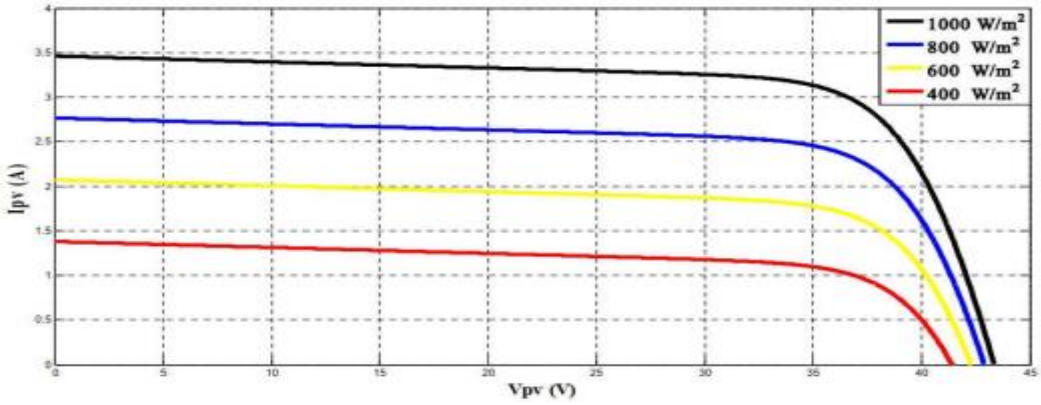


Figure I.10 : *L'influence de l'éclairement sur la caractéristique IPV=f(VPV) [21].*

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. Les figures (I.8) et (I.9) représentent la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'une cellule PV pour une température constante de (25°C) et pour différente intensité rayonnante de (400, 600, 800 et 1000W/m^2).

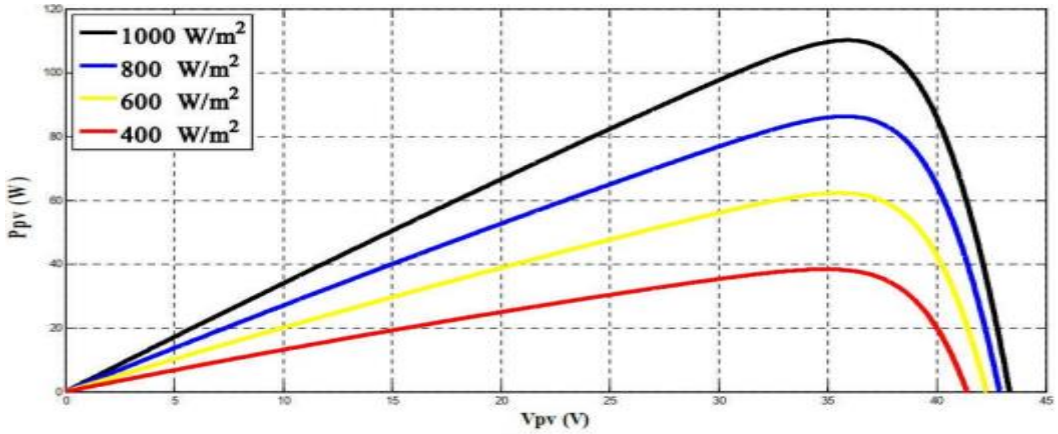


Figure I.11 : Caractéristique puissance- tension pour différents ensoleillements [21].

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste presque identique même à faible éclairement.

Et pour la caractéristique puissance-tension l'éclairement est proportionnel à la puissance optimale par-contre la tension du circuit ouvert ne varie pas beaucoup et reste quasiment identique.

D'après les résultats de la simulation on peut dire que les performances d'un générateur PV sont fortement influencées par les conditions météorologiques, particulièrement l'ensoleillement et la température. Cela nécessite donc une commande pour extraire le maximum de puissance quelque-soit ces paramètres **[21].**

I.5.1.4 Utilisation d'un générateur photovoltaïque (PV)

Le domaine d'application des générateurs photovoltaïques est diversifié parmi lequel nous citons deux principaux :

-On distingue le cas d'installations **connecté au réseau** : l'avantage du raccordement au réseau est de se dispenser de la problématique du stockage l'électricité. Mais lorsque le site de consommation est isolé ou éloigné du réseau local, il serait judicieux en termes d'économie de préférer une installation décentralisée.

- Le système peut également **être autonome**, l'énergie produite par les panneaux solaires photovoltaïques est utilisée immédiatement (pompage, ventilation, etc. ...) ou stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure. Le courant continu produit alimente directement des appareils prévus à cet effet ou est transformé en courant alternatif via des dispositifs d'électronique de puissance.

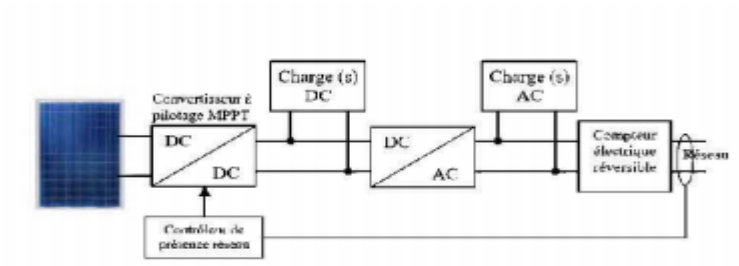


Figure I.13 : installation photovoltaïque couplée au réseau [22].

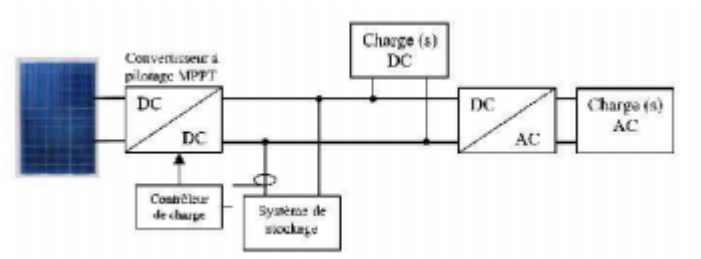


Figure I.12 : installation photovoltaïque autonome [22]

I.5.2 Généralités

I.5.2.1 Le vent

Le vent est causé par le déplacement de la masse d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres parties, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. C'est pourquoi le vent est une grandeur stochastique, intermittente qui dépend d'un ensemble de facteurs tels que la situation géographique, l'altitude, la température et la hauteur de captage. Les caractéristiques du vent déterminent non seulement la quantité d'énergie qui s'applique à la turbine,

Mais également les contraintes de fonctionnement (turbulences, valeurs extrémales,) qui jouent aussi sur la durée de vie. En réalité, le vent est mesuré par un anémomètre complété par une girouette qui génère les grandeurs fondamentales que sont la vitesse et la direction [23].

I.5.2.2 Présentation de la turbine éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leurs puissances nominales :

- Éoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW

-Éoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de KW.

- Éoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW [23].

Il existe différentes façons de classer les turbines éoliennes, mats celles-ci appartiennent principalement à deux groupes selon l'orientation de leur axe de rotation : celles à axe horizontal et celles à axe vertical.

I.5.2.3 Caractéristique puissance-vitesse d'une éolienne

Pour une turbine éolienne, on distingue 4 zones de fonctionnements comme indiqué Plus clairement dans la figure suivante :

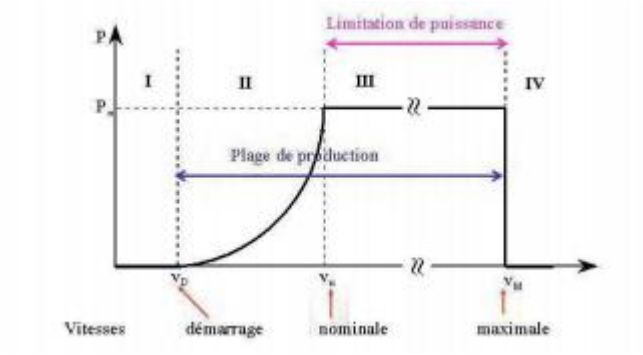


Figure I.13 : Délimitation des zones de fonctionnement sur la caractéristique

[24].

Après une (zone 1) où aucune puissance n'est délivrée pour des vitesses du vent inférieur à la vitesse du démarrage V_{min} une section de fonctionnement normal existe.

Si on extrait alors la puissance maximale de la turbine grâce à un contrôle MPPT, celle-ci évolue alors selon le cube de la vitesse du vent (zone II). Quand la puissance nominale P, est atteinte, les paramètres de la turbine (angle de calage f3) doivent évoluer de façon à la limiter (zone III) [25] ; en effet divers éléments de l'aérogénérateur sont dimensionnés en fonction des charges, vitesse de rotation et puissances correspondantes à cette vitesse de vent. Ces éléments ne peuvent pas supporter des valeurs de ces grandeurs supérieures à certaines limites. Lorsque la vitesse du vent devient trop importante (zone IV), les pales de la turbine sont mises en drapeaux (f3=90o) pour ne pas détériorer le générateur éolien

I.5.3 Les avantages et inconvénients d'une source d'énergie solaire et éolienne [26]

Technologies	Les avantages	Les inconvenient
Solaire	- Les panneaux solaires nécessitent très peu d'entretien et réduisent d'installation des panneaux sont considérablement la facture domestique d'électricité ; - Ils sont simples et rapides à installer ; - Le système est silencieux et sans danger pour la santé ...	- Les coûts de fabrication et assez élevés - Il est impossible d'obtenir une autonomie énergétique complète par le biais de panneaux solaires seulement ; - Le rendement énergétique est plutôt faible ...
Eolienne	- L'énergie éolienne ne nécessite aucun ne génère aucun gaz à effet serre et ne produit pratiquement aucun déchet ; -Les frais de fonctionnement sont limités et les coûts de production sont prévisibles et se stabilisent à long terme ; - La ressource principale (le vent) est à 100% renouvelable et son exploitation ne comporte pratiquement aucun effet néfaste pour l'environnement...	- Les vents peuvent parfois carburant, de souffler à des intensités Irrégulières ; -Impossibilité d'emmagasinage de la source (le vent) ; -La production dépend de l'intensité des vents et non de la demande en énergie ; -Des dispositifs externes de stabilisation sont en général nécessaires ..

I.6. Systèmes hybrides

Un SHSER comprend plus d'une source d'EnR. Ces sources sont habituellement associées à une source conventionnelle et/ou à un élément de stockage afin de maintenir une production d'énergie continue [27]. L'élément de stockage emmagasine l'énergie excédentaire et la réinjecte ultérieurement dans le cas d'un déficit énergétique [28].

Les SHSER sont non connectés aux réseaux électriques. Ils sont généralement exploités dans des régions isolées qui n'ont pas accès aux réseaux électrique de distribution. Ces systèmes sont dimensionnés selon le besoin énergétique des différentes charges connectées, toute en favorisant l'énergie produite par les sources d'EnRs au détriment de celle fournie par les sources conventionnelles [29].

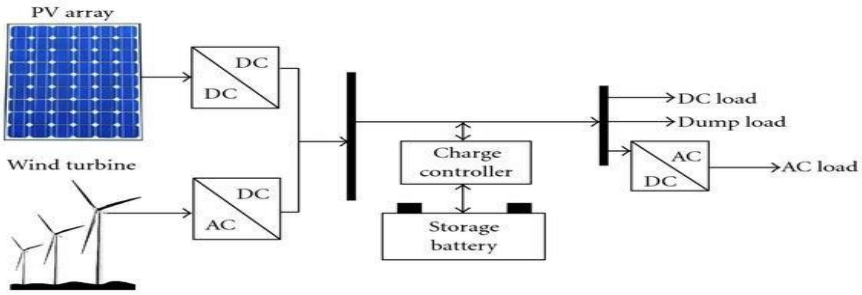
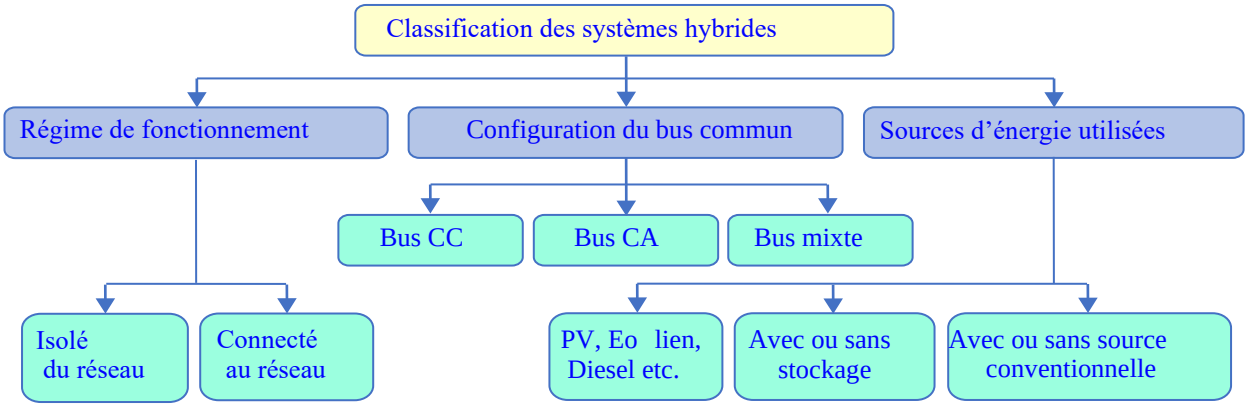


Figure I.14 : Composants typiques d'un système de stockage hybride photovoltaïque/éolien

I.6.1. Classification des systèmes hybrides

Vu l'intérêt grandissant porté aux SHSERs, plusieurs architectures et configurations ont été proposées. Pour réaliser leur classification, plusieurs critères peuvent être considérés [30]. Ci-après, nous présentons les trois classifications les plus répondues. Ces classifications sont établies selon le régime de fonctionnement, le type des sources exploitées et la configuration du bus commun dans le système. La figure **I.17** illustre une classification des systems hybrids



.

Figure I.15 : Classification des systèmes hybrides

[30].

I.6.2. Principales configurations des systèmes hybrides [31]

- **Configuration à bus alternatif (AC)**

Dans un système multi-source hybride à bus alternatif (AC-Coupled Hybrid Power Generators), Fig.1.2, toutes les sources sont connectées à un bus alternatif principal. Ce bus AC peut être le réseau utilitaire. Dans une structure à couplage alternatif, les différentes sources peuvent être localisées n'importe où dans le réseau à une grande distance les unes des autres. Cependant, la tension et la fréquence du bus

AC principal doivent être bien contrôlées afin d'assurer la stabilité des sources distribuées et l'harmonie avec le réseau électrique

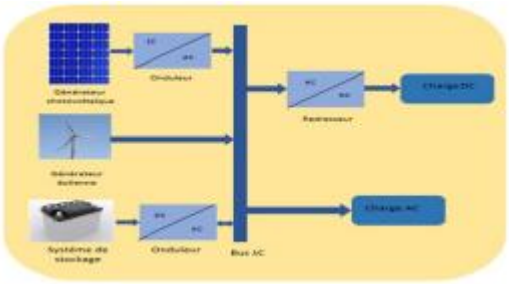


Figure I.17 : Architecture à bus alternatif (AC).

- **Configuration à bus continu DC**

Dans un système hybride couplé en courant continu (DC-coupled Hybrid Power Generators), Figure I .16, toutes les sources sont connectées à un bus continu principal avant d'être connectées au réseau via un onduleur principal. Dans cette structure, la tension et la fréquence du réseau sont indépendantes de celles des sources. L'intérêt qu'offre cette configuration est la possibilité de connexion sur le bus continu d'un pack de batteries ou de supercondensateurs par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC. Ce convertisseur DC/DC peut être utilisé pour mettre en œuvre un mode de fonctionnement (charge/décharge) optimisé. Les systèmes de production d'énergie conventionnelle (Centrale nucléaire, Diesel…) et décentralisée (Eolienne, PV) peuvent être connectés au bus continu via des convertisseurs d'électronique de puissance.

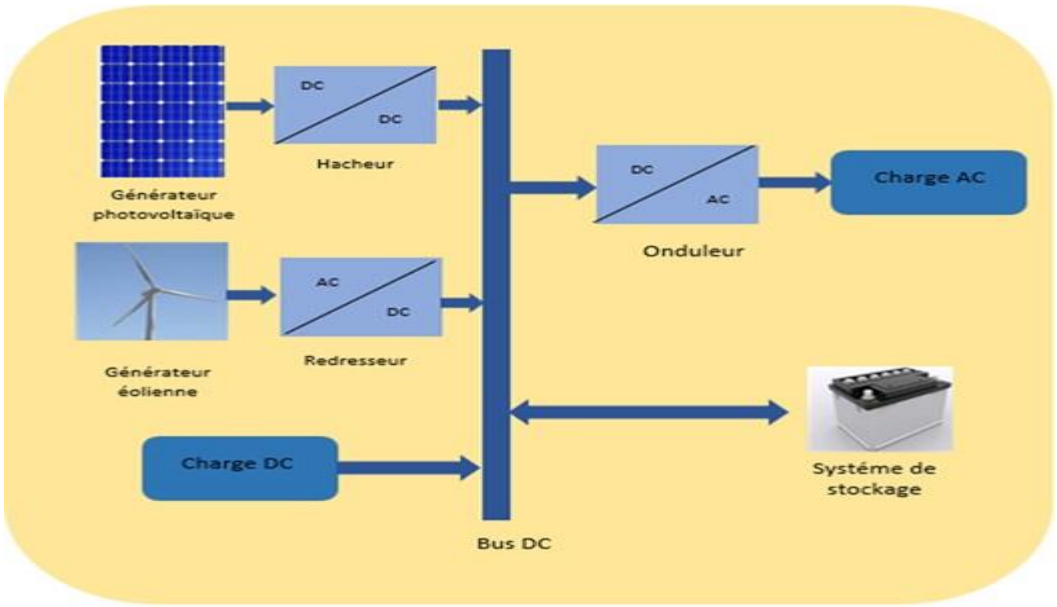


Figure I.18 : Architecture à bus continu (DC).

➢ **Configuration mixte**

En dehors des deux structures de couplage précédentes, une structure mixte peut également être utilisée pour construire un HPG, Figure I.17, avec certains avantages tirés des structures couplées en continu et en alternatif. Pour notre étude, une structure couplée en courant continu est choisie parce qu'elle est flexible et extensible en plus le nombre et le type des sources d'énergie peuvent être choisis librement. En outre, la fréquence du réseau est indépendante des sources via un bus continu. La tension du réseau est également différente de celle du bus continu et celle des sources grâce aux convertisseurs statiques.

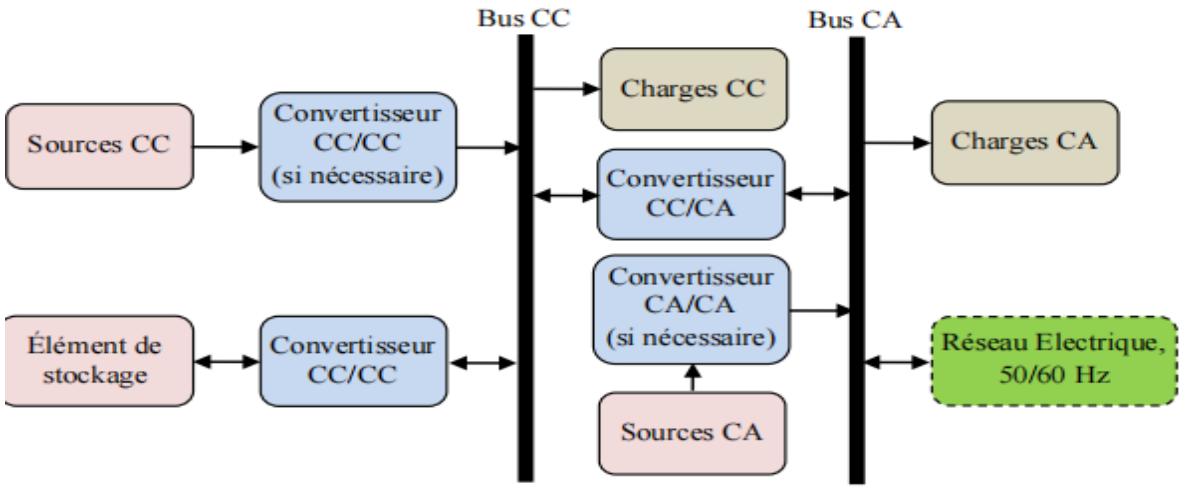


Figure I.19 : Configuration d'un système hybride avec un bus CA

I.6.3 Système hybride (photovoltaïque/éolienne/batteries/supercondensateur)

Dans notre étude on s'intéresse principalement au système hybride qui combine les deux sources d'énergie renouvelable (photovoltaïque-éolienne) avec des batteries de stockage. L'intérêt porté à ce système est dû au fait que l'Algérie dispose d'une position géographique Stratégique d'où la disponibilité et la complémentarité des gisements solaire et éolien.[32]

Une stratégie de contrôle avec une bonne gestion d'énergie s'avère être nécessaire, afin d'alimenter une charge sur un site isolé et de maximiser le rendement énergétique global.

I.6.3.1. Les Avantages et les inconvénients du système hybride étudié :

a) Avantages [33]

1. Flexible, extensible et Capable de satisfaire des charges évolutives.

2. Production d'une énergie propre

3. Non dépendant d'une seule source d'énergie.

4. Exploitation simple, travaux de révision réduite

b) Inconvénients [34]

1. Plus complexe que les systèmes mono source et nécessite souvent le stockage Dans le cas des systèmes autonome.

2. Pas encore entièrement en production commerciale, peu de fournisseurs.

3. Coût de capital élevé

I.7 Systèmes de Stockage d'énergie (SSE)

Stocker de l'énergie c'est garder une quantité d'énergie pour une utilisation future. Par extension, l'enjeu du "stockage d'énergie" est d'apporter de la flexibilité et de renforcer la fiabilité Chapitre1 : système hydride et stockage énergie : Etat des lieux des systèmes énergétiques. Il s'agit d'équilibrer l'offre et la demande en énergie, aussi bien pour la fourniture d'électricité que de chaleur ou de froid. Aujourd'hui, la réponse aux « pointes » de consommation, c'est -à-dire la régulation de la demande d'électricité aux heures pleines. de forte demande, est principalement réalisée soit par l'importation d'électricité, le stockage stationnaire de l'énergie, aussi bien le stockage d'électricité que le stockage thermique, est associé au développement des énergies renouvelables en garantissant un courant de « qualité » sur le réseau de distribution.

En effet, la production intermittente d'électricité grâce aux énergies solaires et/ou éoliennes engendre des fluctuations importantes qui perturbent et détériorent les équipements de distribution. Il existe cinq catégories physico-chimiques de stockage stationnaire selon que l'énergie stockée soit sous forme mécanique, chimique, thermique, électrochimique ou électromagnétique [35].

I.7.1 Les batteries (accumulateurs) [36]

Les termes "batterie" ou "accumulateur" désignent des "petits réservoirs" qui peuvent emmagasiner de l'énergie sous forme chimique pour la restituer ultérieurement. C'est un mélange appelé "électrolyte" qui permet d'accumuler ou de restituer cette énergie.

Les électrolytes les plus utilisés actuellement sont :

✓ Pour les batteries au plomb : Mélange Plomb/Acide ;

✓ Pour les accus au nickel qui sont aujourd'hui les plus répandus : Ni-Mh : nickel-métal Hydrure et Ni-Cd Nickel-cadmium ;

✓ Pour une génération plus légère et plus performante : lithium-ion et lithium polymère.

On lui donne le nom de batterie quand l'accumulateur est composé de plusieurs éléments. Le Terme accumulateur est plus général et sert aussi bien pour un élément ou pour une batterie.

I.7.1.1 Les accumulateurs Lithium-Ion

Ces accumulateurs font partie des nouveaux types diffusés depuis 10 ans et fort prometteurs. Leur énergie et puissance massique sont très élevées par comparaison au Plomb-Acide, respectivement 150Wh.kg−1 et 300W.kg−1. Le lithium est en effet le plus léger des métaux et possède un potentiel électrochimique élevé, ce qui en fait le métal le plus attractif pour constituer l'électrode négative d'un accumulateur [36].

I.7.1.2 Principe de fonctionnement [36]

Il existe deux types d'accumulateur au lithium. Les accumulateurs « Lithium Carbone » ou « Lithium-Ion » et les accumulateurs « Lithium-Métal ». Mais, le principe de fonctionnement d'un accumulateur au lithium est le même selon qu'est utilisée une électrode négative de lithium métallique ou à base de carbone. En cours d'utilisation, donc lors de la décharge de l'accumulateur, le lithium relâché par L'électrode négative sous forme ionique Li^+ migre à travers l'électrolyte conducteur ionique et vient s'intercaler dans le réseau cristallin du matériau actif de l'électrode positive (composé d'insertion du lithium de type oxyde métallique). Le passage de chaque ion Li^+ dans le circuit interne de l'accumulateur est exactement compensé par le passage d'un électron dans le circuit externe, générant ainsi un courant électrique. La Figure 5.a montré le fonctionnement d'un accumulateur Lithium métal. L'électrode métallique libère un ion qui vient s'insérer dans l'électrode positive. Dans le cas du Lithium-Ion (Figure 5.b), appelé ainsi car le lithium n'est jamais sous forme métallique dans l'accumulateur, le lithium fait « le va-et-vient » entre les deux composés d'insertion du lithium contenus dans les électrodes positive et négative à chaque charge ou décharge de l'accumulateur. Pendant la recharge, des ions lithium viennent s'insérer dans la structure de l'électrode négative en carbone graphite, d'où le nom donné à ce type d'accumulateurs. Lors de la décharge, la structure en carbone de l'anode libère alors ces ions qui viennent se replacer dans la structure de la cathode [36].

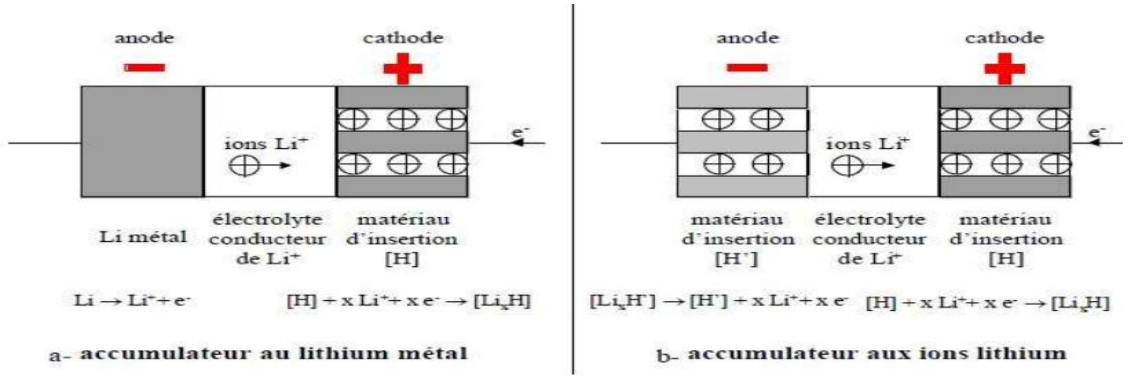


Figure I.20 : Principe de fonctionnement des accumulateurs au lithium [36].

La réaction générale mise en jeu dans un accumulateur Lithium-Ion à oxyde $LiNiO_2$ est la Suivante :

$$Li_{(1-x)}\ NiO_2 + Li_xC_6 \Leftrightarrow LiNiO_2 + C_6$$

Exemple :

- **À l'électrode positive:**

$$CoO_2 + Li + e^- \Leftrightarrow LiCoO_2$$

- **À l'électrode négative:**

$$LiC_6 \Leftrightarrow Li^+ + e^- + C_6$$

- **Réaction totale:**

$$CoO_2 + LiC_6 \Leftrightarrow LiCoO_2 + C_6$$

I.7.2 Les supercondensateurs

Certains systèmes permettent de stocker directement l'énergie sous forme électrique. Il s'agit principalement des supercondensateurs, composants électriques constitués de deux armatures conductrices stockant des charges électriques opposées. Ils sont capables de délivrer une forte puissance pendant un temps très court. À la différence des batteries électrochimiques, ils peuvent se décharger en un temps de l'ordre de la seconde ou moins avec un rendement compris entre 80% et plus de 90%. Toutefois, ces dispositifs ne stockent pas de grandes quantités d'énergie. Les supercondensateurs ont des applications dans le domaine des transports terrestres. Ils assurent notamment l'arrêt et le redémarrage à un feu rouge (stop and go). Leurs champs d'application se situent pour l'essentiel en dehors des limites de notre saisine.

Il n'en est pas de même des supercondensateurs. Leur capacité s'évalue en dizaines voire En milliers de Farad, ce qui les rend comparables aux batteries. Mais, dans les conditions actuelles, les supercondensateurs interviennent plutôt en puissance (pour délivrer du courant de manière instantanée) qu'en énergie. Ils peuvent donc représenter un complément intéressant des batteries. La combinaison batterie/supercondensateur peut s'avérer particulièrement efficace dans le cas des véhicules hybrides.

Le supercondensateur est un moyen de stocker l'énergie sous forme électrostatique. Il est Constitué de 2 électrodes poreuses, généralement en carbone activé, plongées dans un électrolyte liquide et séparées par un séparateur laissant circuler les ions mais pas les électrons. A la différence des batteries, il n'y a pas de réaction d'oxydo-réduction.

L'interaction des électrodes et de l'électrolyte entraîne l'apparition spontanée d'une accumulation de charges aux interfaces, on parle de formation d'une double couche Électrochimique : une couche de charges positives et une couche de charge négatives, l'ensemble étant électriquement neutre. L'interface entre les charges joue le rôle d'un diélectrique.

La combinaison d'une surface conductrice élevée et d'une épaisseur de diélectrique très faible permet d'atteindre des valeurs de capacité extrêmement élevées en comparaison des condensateurs traditionnels. L'électrolyte limite la tension des éléments à quelques volts. Ces dispositifs de stockage sont utilisés dans certaines installations électriques afin d'améliorer la qualité. Cependant, son développement ne se fait pas à grande échelle. Les plus gros supercondensateurs ont été développés majoritairement pour une utilisation dans le domaine des transports [36].

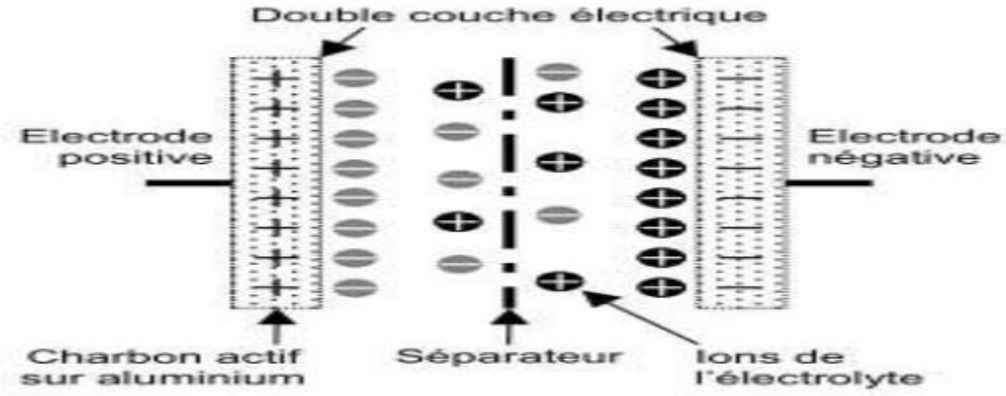


Figure I.21 : Schéma de principe des supercondensateurs

I.7.3 Dispositifs de stockage de l'énergie

Dans le cas d'une unité de production non raccordée au réseau la présence d'un dispositif de stockage s'impose dans la mesure où la consommation et la production sont fortement découplées.

Le système de stockage est dimensionné, comme on l'a vu précédemment, par sa capacité de stockage, mais pas seulement. Il doit en effet également répondre aux critères suivants : puissance crête déterminée ; Cyclabilité élevée ; bon rendement en charge et en décharge dans la gamme de puissance en production et en consommation ; pertes d'auto-décharges faibles ; coûts Réduits

I.8. Intégration du système de stockage dans un système hybride de production d'énergie renouvelable

Le stockage de l'électricité devient une caractéristique croissante des systèmes actuels d'approvisionnement en énergie. Deux facteurs principaux sont en jeu : la sécurité de l'approvisionnement et l'incitation économique. En premier lieu, les systèmes de stockage d'électricité facilitent l'intégration de sources d'énergie renouvelable généralisée (SER) [38].

Ceci est d'une importance significative, car de nombreux pays ont des objectifs juridiquement contraignants pour augmenter la part des sources renouvelables dans leur bouquet énergétique [39].

En raison de leur caractère intermittent, l'intégration à grande échelle des sources d'énergie renouvelable dans les systèmes d'alimentation introduit des défis opérationnels, c'est-à-dire un équilibre entre la demande et l'offre d'électricité. Le stockage de l'électricité fournit donc une solution en aidant

l'offre à répondre à la demande, en améliorant le fonctionnement du réseau national et en économisant toute énergie potentiellement gaspillée. En outre, il réduit le besoin de centrales de pointe, ce qui entraîne par conséquent une réduction des émissions [38].

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre, les principales notions liées à la technologie utilisée dans les SEH ont été données. Notre travail portant sur un système qui regroupe les deux sources d'énergie renouvelable (éolien-photovoltaïque) avec stockage hybride (batteries et super-condensateur), une attention particulière a été consacrée à ce type de sources et de stockage. Les différents types d'architectures existants, ainsi que les différentes structures des systèmes d'énergie hybride ont également été présentés. Le dimensionnement et le fonctionnement des composantes du système globale doivent tenir compte des variations de la charge et des ressources renouvelables disponibles pour maximiser l'utilisation des ressources renouvelables. Dans ce but, les sources du SEH étudié sont modélisées et simuler dans les chapitres suivants.e chapitre axé sur l'intégration du système de stockage dans un micro réseau autonome est motivé par un souci socio-économique centré sur 1' approvisionnement des zones isolées où le besoin énergétique est plus que nécessaire. Du point de vue scientifique, les motivations sont axées sur une production d'énergie stable, disponible, propre et sure grâce à l'utilisation du système de stockage.

Chapitre II

Modélisation et résultats des simulation de composants du système hybride

CHAPITRE II
MODELISATION ET RESULTATS DES SIMULATION DE COMPOSANTS DU SYSTEME HYBRIDE

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous plongerons en profondeur dans la modélisation du système hybride photovoltaïque-éolien. Notre objectif est de fournir une analyse exhaustive en élaborant des modèles mathématiques précis pour chaque composante de ce système dual de production énergétique. En effet, la compréhension approfondie de ces modèles est essentielle pour une exploitation efficace et une gestion optimale des puissances de production, surtout dans des environnements changeants et imprévisibles.

Nous explorerons en détail les caractéristiques individuelles des systèmes photovoltaïques et éoliens, en tenant compte des variables telles que l'intensité du rayonnement solaire, la vitesse et la direction du vent, ainsi que d'autres paramètres météorologiques pertinents. En combinant ces données avec des modèles mathématiques sophistiqués, nous serons en mesure de prédire avec précision les performances de chaque système de production dans différentes conditions météorologiques.

Cette approche analytique nous permettra d'identifier les synergies entre les deux sources d'énergie, ainsi que les moments où l'une ou l'autre source peut être prédominante. Nous examinerons également les stratégies de gestion de l'énergie, telles que le stockage et la redistribution, afin d'optimiser l'utilisation de cette ressource hybride et de garantir une alimentation stable et fiable.

En conclusion, ce chapitre fournira une base solide pour une exploitation efficace et durable des systèmes hybrides photovoltaïques-éoliens, en mettant en lumière les défis techniques et les opportunités offertes par cette technologie émergente dans le paysage énergétique contemporain.

II.2. Structure de la chaine de conversion photovoltaïque

Un système photovoltaïque est constitué de panneaux photovoltaïques connectés en série et/ou en parallèle, formant ainsi un générateur photovoltaïque (PV). Ce générateur est associé à un convertisseur DC/DC et à un système de commande, permettant d'alimenter une charge contenue, telle que des batteries. La configuration de ce système est illustrée dans la figure (II.1).

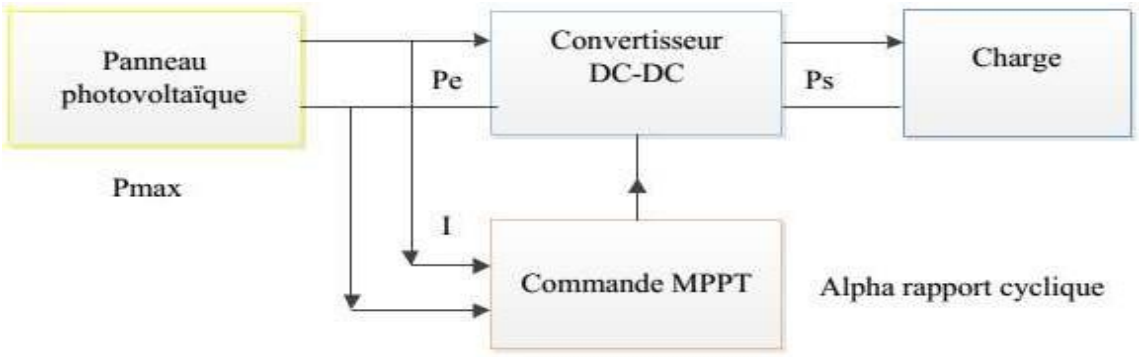


Figure II.1 : Différents constituants de la chaine de conversion photovoltaïque

II.3. Modélisation du panneau photovoltaïque [25]

Dans la littérature scientifique, on trouve plusieurs modèles de générateurs photovoltaïques, qui diffèrent par la procédure et le nombre de paramètres impliqués dans le calcul de la tension et du courant final. Parmi tous ces modèles, nous avons choisi le modèle le plus simple, qui est le modèle à une seule diode. Dans ce qui suit, nous citerons les différents modèles existants et nous nous intéresserons particulièrement au modèle à une seule diode.

- Model idéal

Une cellule photovoltaïque peut être modélisée de manière simplifiée comme une source de courant idéale produisant un courant **Iph** proportionnel à l'intensité lumineuse incidente, en parallèle avec une diode représentant la jonction P-N de la cellule PV.

- Modèle à une diode sans résistance parallèle

Une cellule photovoltaïque est composée d'une source de courant représentant le flux lumineux incident, d'une diode pour la polarisation de la cellule et d'une résistance en série.

- Modèle à deux diodes sans résistance parallèle

La cellule photovoltaïque est composée d'une source de courant modélisant le flux lumineux (éclairement), de deux diodes pour la polarisation de la cellule, et d'une résistance en série.

- Modèle à deux diodes (à deux exponentielles)

La cellule photovoltaïque est composée d'une source de courant modélisant le flux lumineux, de deux diodes pour la polarisation de la cellule, d'une résistance en parallèle et d'une résistance en série.

- Modèle à une diode [26]

Le modèle à une diode est le modèle le plus classique de la littérature. Il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, deux résistances (Rs , Rp) pour les pertes, le modèle d'une cellule est celui de la figure ci-dessous (II.2).

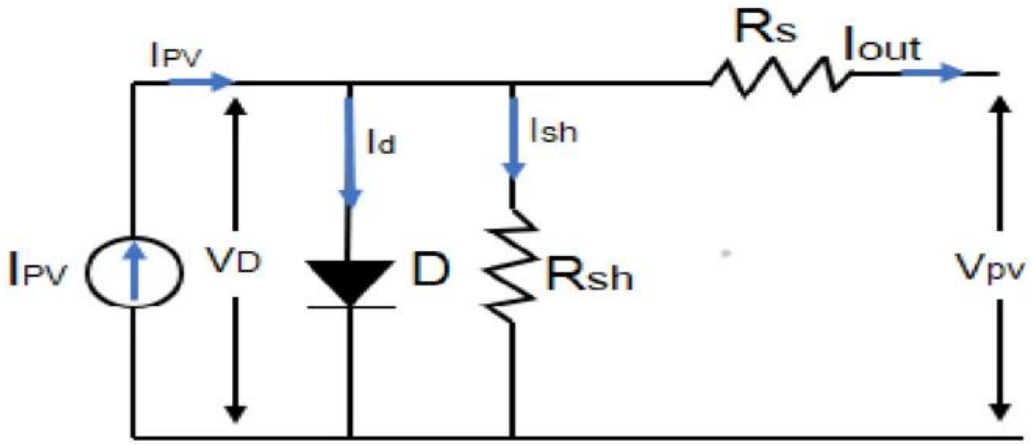


Figure II.2 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode

Ce modèle comporte quatre variables. Les deux variables d'entrée sont : E_S- ensoleillement dans le plan des modules [W/m^2] et T_j- température de jonction de la cellule [°C]. Les deux variables de sortie sont : I_{PV}- courant fourni par le groupe de modules [A] et V_{PV}-la tension aux bornes du groupe de modules [V].

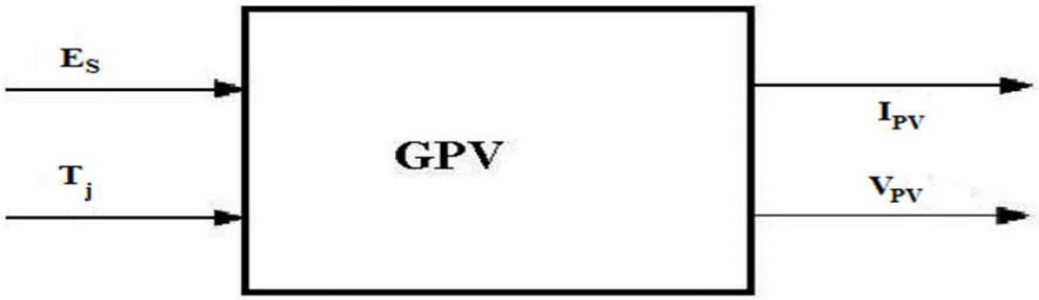


Figure II.3 : Schéma bloc du GPV.

A partir de la figure (II.3) la loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_D - I_P \qquad \text{(II.1)}$$

Le courant dans la résistance R_P est donné par :

$$I_P = \frac{V_{PV}}{R_P} \qquad \text{(II.2)}$$

Le photo-courant Iph est donné par :

$$I_{Ph} = P_1 E_S \left(1 + P_2(E_S - E_{\text{Sréf}}) + P_3\left(T_j - T_{\text{jréf}}\right)\right) \quad \text{(II.3)}$$

La température de jonction est donnée par :

$$T_j = T_a + E_S \left(\frac{N_{OCT}-20}{800}\right) \quad \text{(II.4)}$$

Le courant dans la diode est donné par :

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{q}{KAn_S Tj}(V_{PV} + R_S I_{PV})\right) - 1\right] \quad \text{(II.5)}$$

Le courant de saturation dans la diode est donné par :

$$I_0 = P_4 T_j^3 \exp\left(\frac{Eg}{KT_j}\right) \quad \text{(II.6)}$$

On obtiendra alors :

$$I_{PV} = P_1 E_S \left(1 + P_2(E_S - E_{\text{Sréf}}) + P_3\left(T_j - T_{jréf}\right)\right) - P_4 T_j^3 \exp\left(\frac{E_g}{KT_j}\right) * \left[\exp\left(\frac{q}{KAn_S Tj}(V + R_S I)\right) - 1\right] - \frac{V}{R_P} \quad \text{(II.7)}$$

I_{PV} : Le courant de cellule.

V_P: La tension de cellule.

R: La résistance série de la cellule [Ω].

E: L'ensoleillement [W/m^2].

$E_{Sré}$: L'ensoleillement de référence [W/m^2].

T_j : La température de jonction de la cellule [°C].

$T_{jréf}$: La température de jonction de référence [°C].

T_a : La température ambiante [°C].

q : La charge d'électron e = 1.6 *10^{-19} C.

I_0 : Courant de saturation de la diode [A].

K : La constante de Boltzmann (1.3854*10-23 JK-1).

k_S : Nombre total de cellules connectées en séries et/ou en parallèles.

A : Coefficient d'idéalité de la cellule.

E_g : Energie de gap.

N_{OCT} : La température nominale de fonctionnement de la cellule ou du module solaire [°C].

P_1, P_2, P_3, P_4 : Paramètres constants.

II.4. MODÈLE D'UN HACHEUR SURVOLTEUR (BOOST)

Pour augmenter la tension d'une source, un convertisseur parallèle de type BOOST, également désigné sous le terme de hacheur survolteur, est utilisé. Le schéma de fonctionnement de ce dispositif est illustré à la figure (II.4). Ce convertisseur continu-continu est essentiel en électronique de puissance, car il permet d'ajuster la tension aux bornes d'un panneau photovoltaïque (PV) pour atteindre le point de puissance maximale (MPPT).

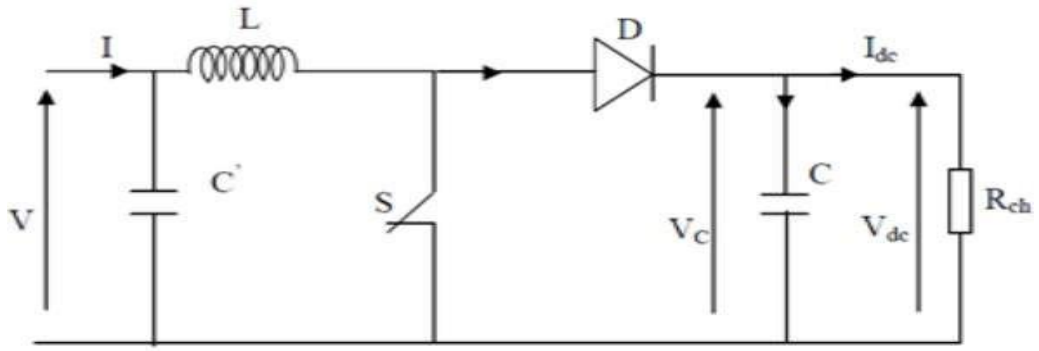


Figure II.4: Circuit électrique du convertisseur DC-DC.

Les figures (II.5) et (II.6) illustrent le cycle de fonctionnement d'un convertisseur, caractérisé par

une période de hachage T, qui comprend deux étapes distinctes. Durant la première étape, l'interrupteur est fermé, ce qui rend la diode polarisée en inverse et donc bloquée. Cette phase s'étend de 0 à α·T, où α représente le rapport cyclique, compris entre 0 et 1.

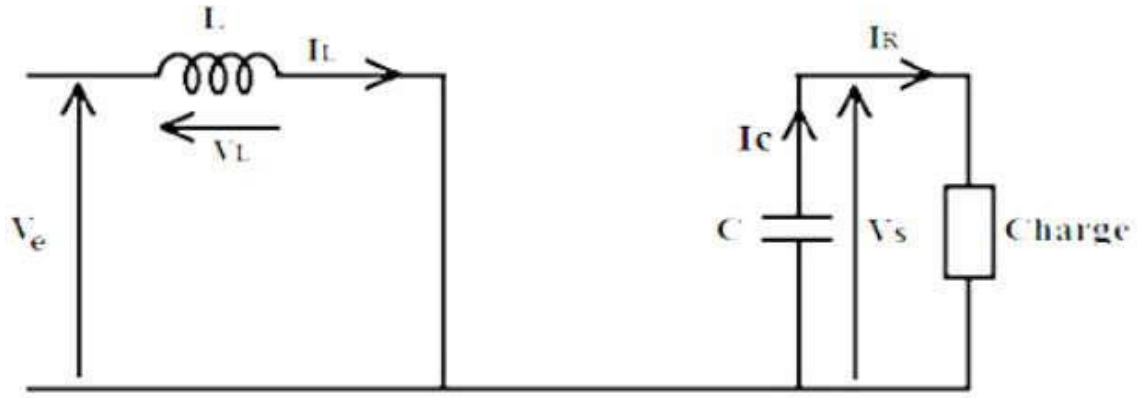


Figure II.5: Schéma d'un Hacheur survolteur à t ∈ [0, α. T]

Le condensateur **C**, supposé initialement chargé, fournit de l'énergie à la charge, induisant ainsi un courant **IR** qui circule dans cette dernière.

$$\begin{cases} V_L = -V_e = L\frac{dI_L}{dt} \\ V_S = RI_R \end{cases} \quad \text{(II. 8)}$$

On en déduit facilement la tension et l'intensité dans la charge par les équations suivantes :

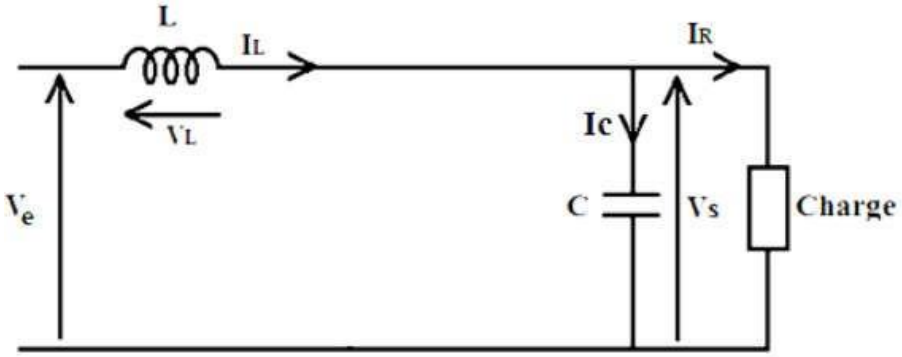


Figure II.6: Schéma d'un Hacheur survolteur à t ∈ [0, α. T]

$$\begin{cases} V_L = V_e - V_S \\ I_C = I_L - I_R \end{cases} \quad \text{(II.9)}$$

On en déduit facilement la tension et l'intensité dans la charge par les équations suivantes:

$$\begin{cases} V_S = \frac{1}{1-\alpha} V_e \\ I_R = (1-\alpha) I_L \end{cases} \quad \text{(II.10)}$$

II.4.1Méthode de perturbation et d'observation (*P&O*) **:**

L'algorithme *P&O* est le plus utilisé dans les systèmes PV en raison de sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre. Comme son nom l'indique, la méthode *P&O* est basée sur la perturbation du système à travers l'augmentation ou la diminution de la tension de fonctionnement de module PV avec un pas fixe où en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis en observant son effet sur la puissance de sortie du module []. Comme l'illustre la Figure II.7.on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension *Vpv* engendre un accroissement de la puissance *Ppv*, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système à dépassé le PPM [50]

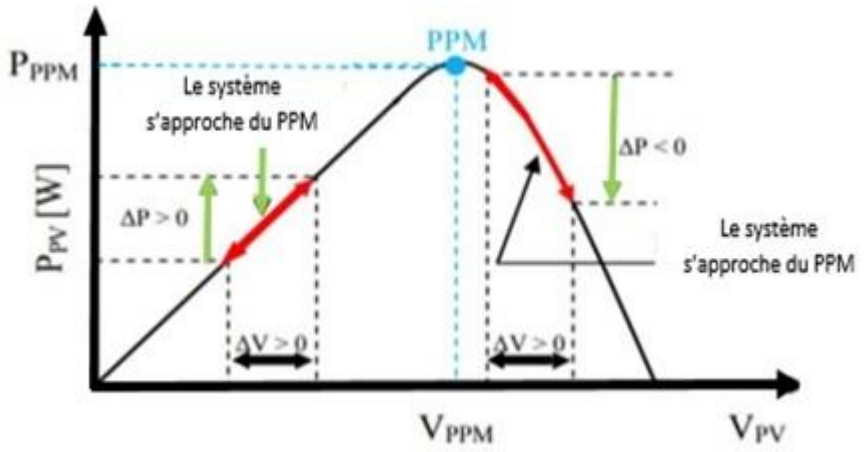


Figure II.7: Principe de la MPPT avec la méthode P&O

L'inconvénient de la technique de P&O est que, à l'état stable (équilibre) le point de fonctionne ment oscille autour du MPP, causant la perte d'une certaine quantité d'énergie disponible. En plus de cela, dans le cas d'une soudaine augmentation de l'irradiation, l'algorithme P&O réagit comme si l'augmentation est produite par l'effet de la perturbation précédente, alors il continue dans la même direction, qui est une mauvaise direction, ce qui fait qu'il s'éloigne du vrai point de puissance maximale [1]

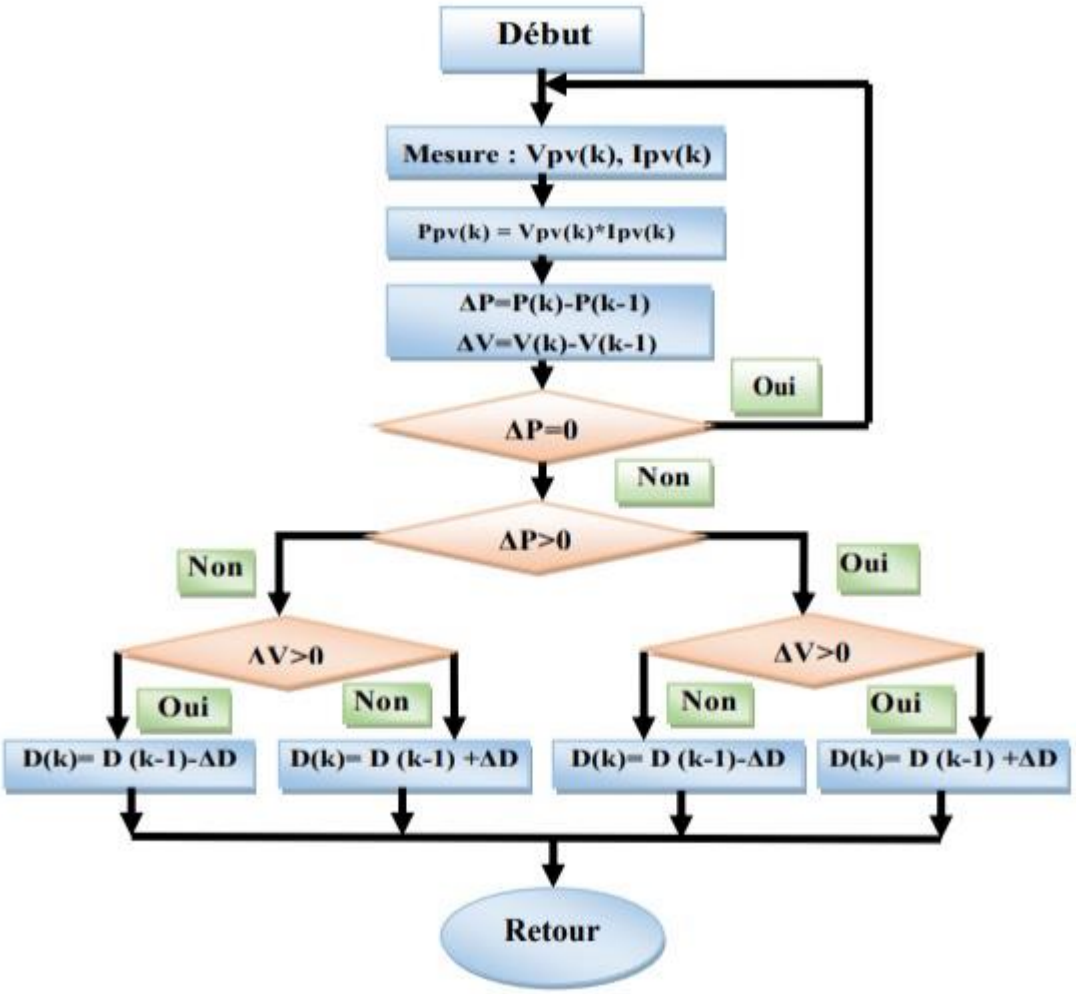


Figure II.8 : Organigramme de la méthode perturbation et observation (*P*&*O*)

La **Figure II.8**, représente l'algorithme classique d'une commande de type *P*&*O*, où deux capteurs sont utilisés pour la mesure du courant et de la tension des panneaux PV, dans le but de déterminer la puissance du PV à chaque instant.

II.5. Simulation de la chaine de conversion photovoltaïque

La figure (II.9) présente le schéma bloc du système photovoltaïque sans stockage sous Matlab/Simulink

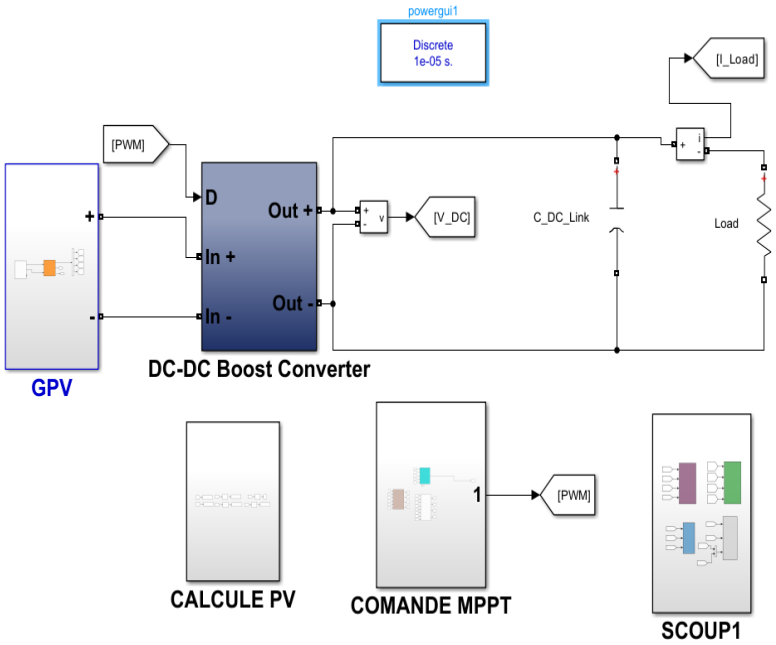


Figure II.9: Schéma Bloc du système photovoltaïque avec une hacheur boost

II.5.1. Résultats de la simulation de chaine PV

En se basant sur le schéma bloc du système photovoltaïque sous Matlab et en exécutant la figure (II.8), les résultats obtenus pour un ensoleillement variant entre Es=200W/m2 et Es=900W/m2 à une température de Tc=25 °C sont les suivants.

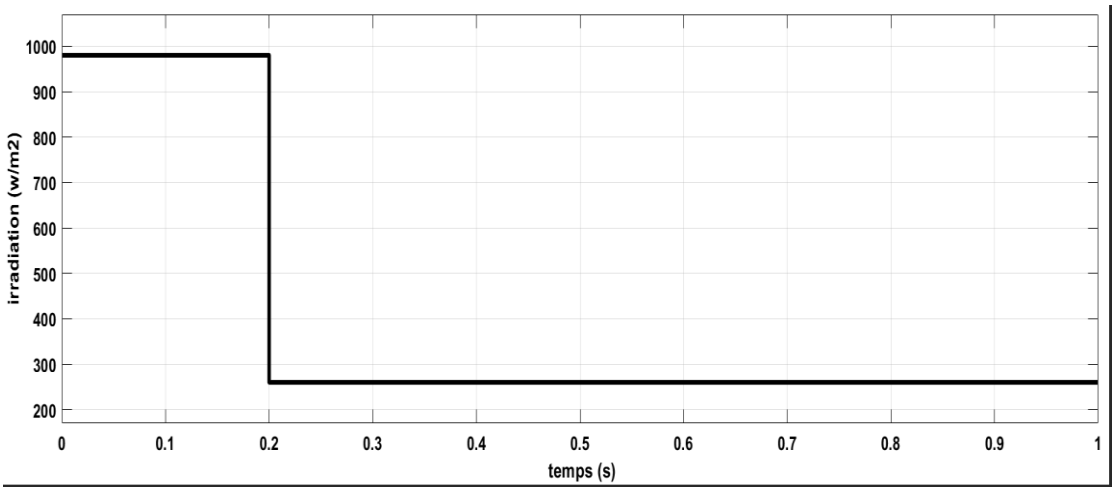


Figure II.10: la courbe de l'irradiance

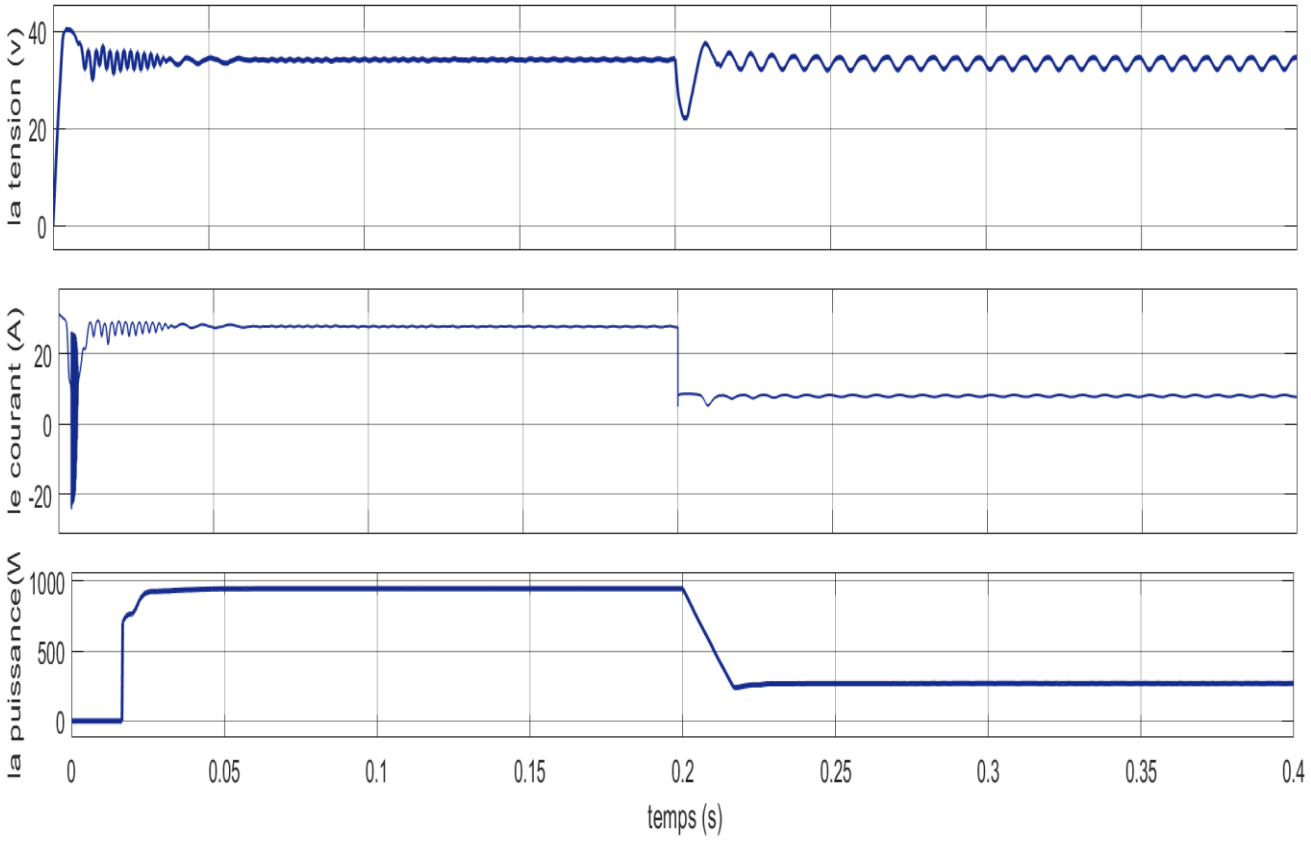
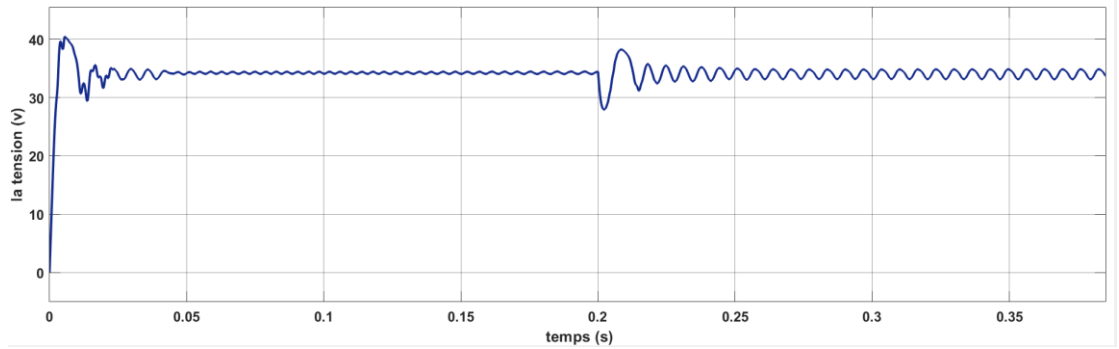


Figure II.11: la courbe du courant et tension, la puissance générée par le système photovoltaïque.

(a)



(b)

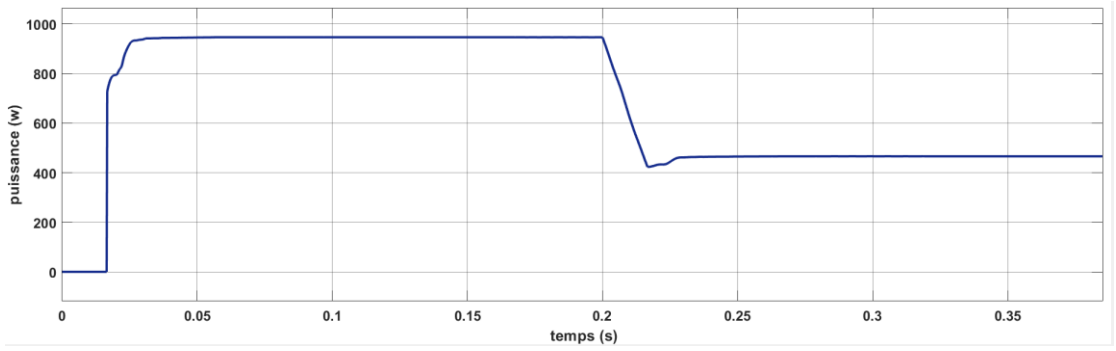


Figure II.12: (a) la courbe de la tension et (b) la puissance de sortie de le hacheur

II.6. Modélisation de la chaine de production éolienne

La modélisation de l'éolienne exige la modélisation du vent, du comportement aérodynamique des pâles, du système mécanique de transmission, et du générateur électrique. Le schéma synoptique étudié dans ce travail est présenté sur la figure (II.11). Il s'agit d'une turbine éolienne, d'une génératrice asynchrone, et d'un convertisseur statique. Ce système alimente une charge autonome par l'intermédiaire d'un dispositif d'interconnexion **[28]**

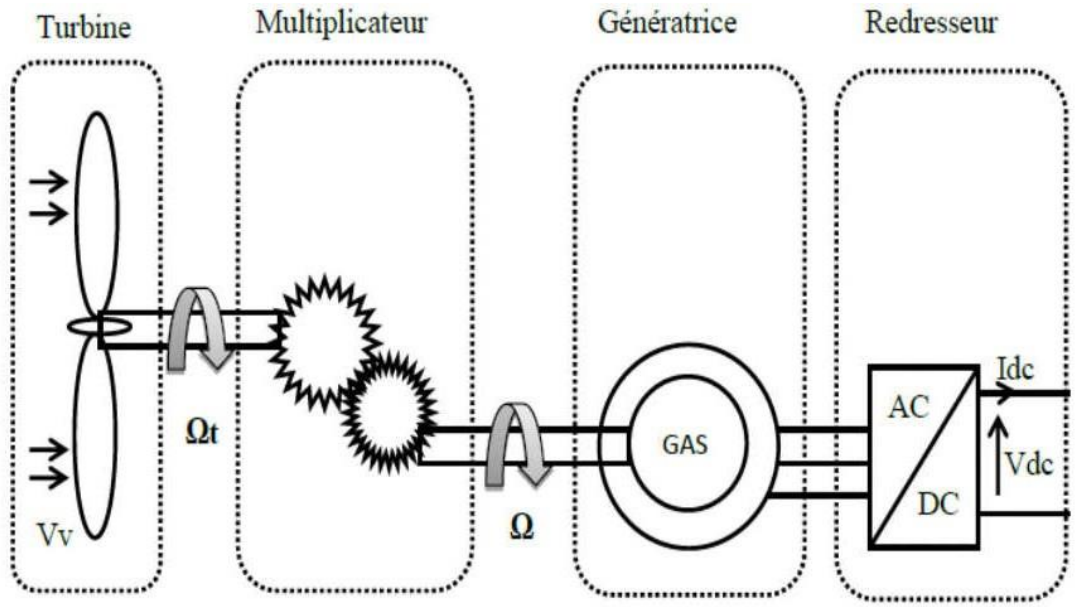


Figure II.13: *Schéma synoptique de* l'aérogénérateur [28].

- **Modélisation de la vitesse du vent**

Le vent est variable dans l'entrée du système éolien. Sa mesure exacte au niveau de moyeu est assez complexe. Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. La vitesse du vent est généralement représentée par la fonction suivante:

$$V_v = \mathrm{f}(t) \qquad \text{(II.11)}$$

- **Modélisation de la turbine**

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active S de la voilure.

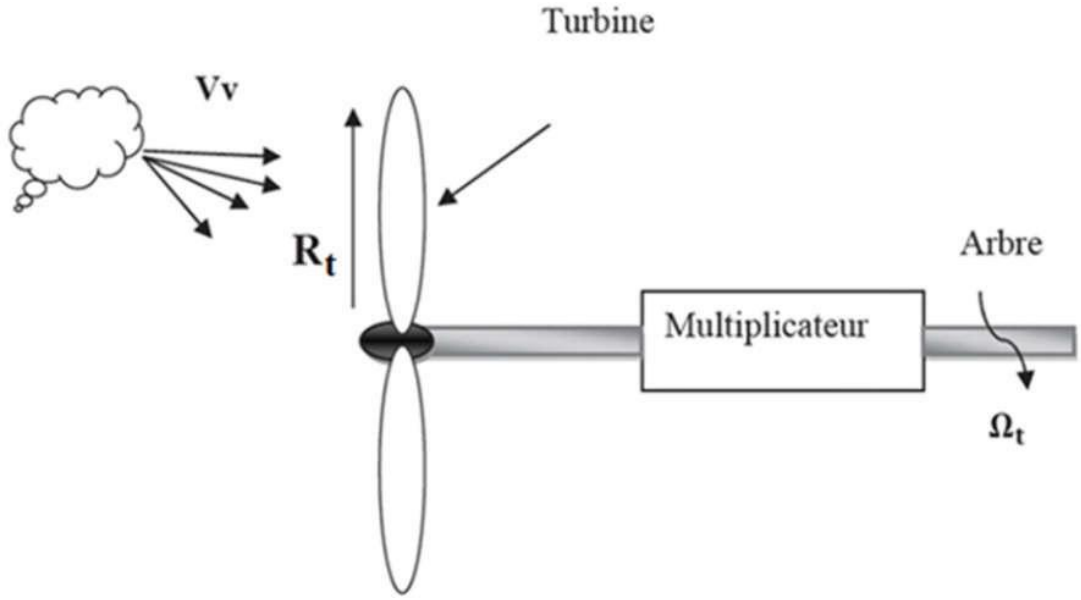


Figure II.14: Système de la turbine à modéliser [28].

Pour simuler la turbine, on utilise le couple associée à la caractéristique $C_P(\lambda)$, le couple de la turbine est alors déterminé par la relation suivante:

$$T_t = \frac{1}{2\Omega_t} C_P \rho S V_v^3 \qquad (II.12)$$

Avec :

$$S = \pi R_t^2 \qquad (II.13)$$

L'expression du coefficient de puissance de la turbine est généralement décrit par un polynôme, issu de l'interpolation des points en provenance des mesures. Le tracé de la turbine choisie est représenté sur la figure (II.12) suivante :

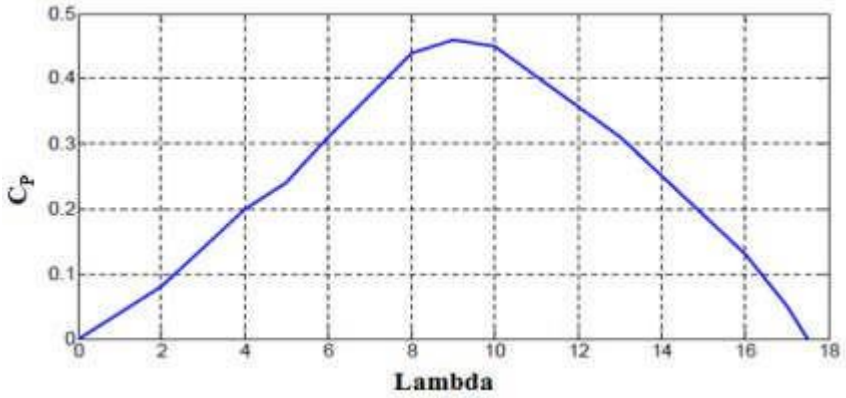


Figure II.15: Courbe CP(λ) [28]

- **Modèle des pâles**

La puissance cinétique du vent est donnée par

$$P_V = \frac{1}{2}\rho S V_v^3 \qquad \text{(II.14)}$$

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique. Son couple aérodynamique Tt est donné par l'expression suivante :

$$T_t = \frac{1}{2\Omega_t} C_P \rho S V_v^3 \qquad \text{(II.15)}$$

La puissance aérodynamique Pt apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit comme suit :

$$P_t = C_P P_V = \frac{1}{2} C_P \rho S V_v^3 \qquad \text{(II.16)}$$

Ω: La vitesse de la turbine.
: La densité de l'air.
: L'aire balayée par la turbine.
V: Vitesse du vent.
C_P : Le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine. Il dépend des dimensions de la pâle, le ratio de la vitesse (λ) et l'angle d'orientation de la pâle β.

Le ratio de vitesse λ est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire de la turbine Ω_t et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V_v} \qquad \text{(II.17)}$$

- **Le multiplicateur de vitesse**

La tache principale du multiplicateur de vitesse est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle de la génératrice, donc la puissance captée par la turbine est transmise à la génératrice. La vitesse mécanique de la turbine et celle de la génératrice sont liées par la relation suivante :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_m}{G} \qquad \text{(II.18)}$$

Le couple sur l'arbre lent et celui sur l'arbre rapide sont exprimés par la relation suivante :

$$T_{em} = \frac{Tt}{G} \qquad \text{(II.19)}$$

Avec :

: Le gain du multiplicateur.

T_{em} : Le couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone [N.m].

T_t : Le couple développé par la turbine sous l'action du vent [N.m].

Ω: La vitesse mécanique de la génératrice [rad/s].

Ω_t : La vitesse de la turbine [rad/s].

- **Equation dynamique de l'arbre de transmission**

Avec la présence du multiplicateur, l'équation dynamique de l'arbre est donnée par:

$$J\frac{d\Omega_m}{dt} + F\Omega_m = T_{em} - T_t \qquad \text{(II.20)}$$

- **La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.**

Les équations électriques des machines électriques dans un repère fixe lié au stator sont décrites par :

II.7. LE REDRESSEUR PD3 À DIODE[29]

$$V_{redmoy} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{h} \qquad \text{(II.21)}$$

Avec :

V_{dc} : La tension redressée [V].

V_m : La valeur max de la tension [V].

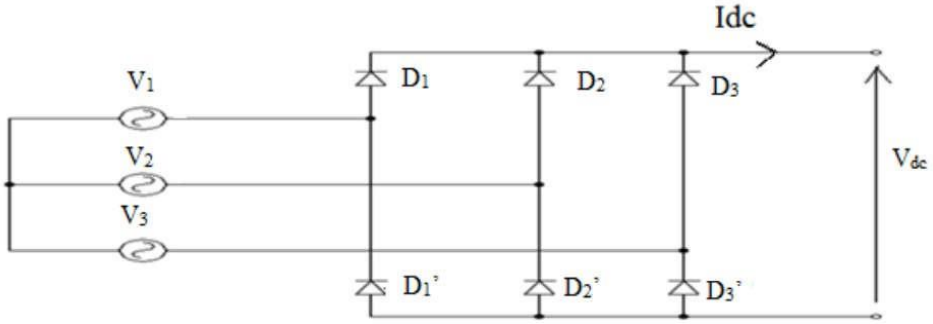


Figure II.16: Le redresseur PD3 à diode

Lorsque D1 conduit l'une des deux diodes D2' et D3' conduit également ; il en vient que D1 conduit lorsque V1 est supérieur à V2 et V3.

Pendant chaque séquence de conduction, la tension Vdc à la sortie de redresseur est :

$$V_{dc} = ma(V_j) - min(V_j), \quad j=1, 2, 3. \qquad \text{(II.22)}$$

II.8. SIMULATION DE LA CHAINE DE CONVERSION ÉOLIENNE

La figure (II.13) présente le schéma bloc du système éolien sans stockage Matlab/Simulink

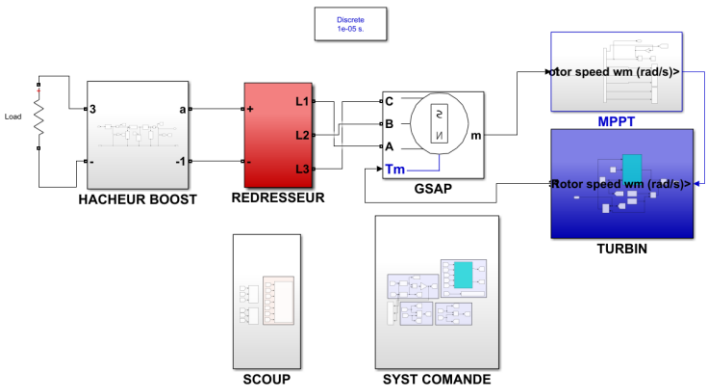


Figure II.17: *Schéma Bloc du système éolien*

II.8.1. Résultats de la simulation

La figure (II.14) présente la variation de la vitesse du vent en fonction du temps

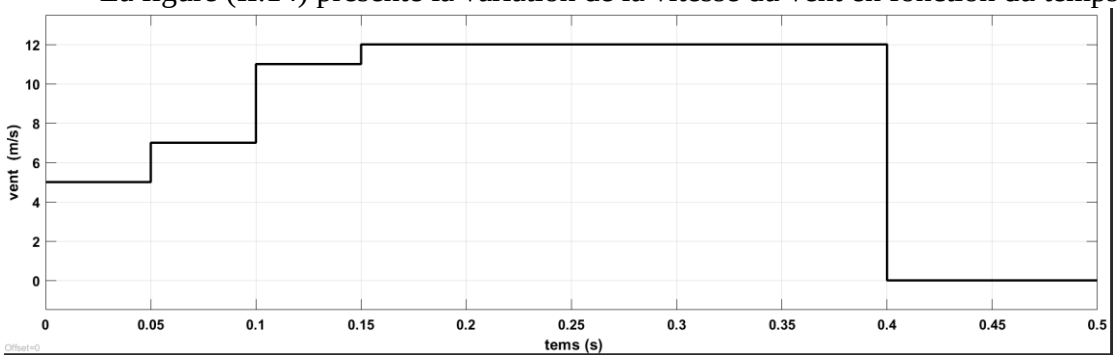


Figure II.18: Profil du vent admissible par la turbine [m/s].

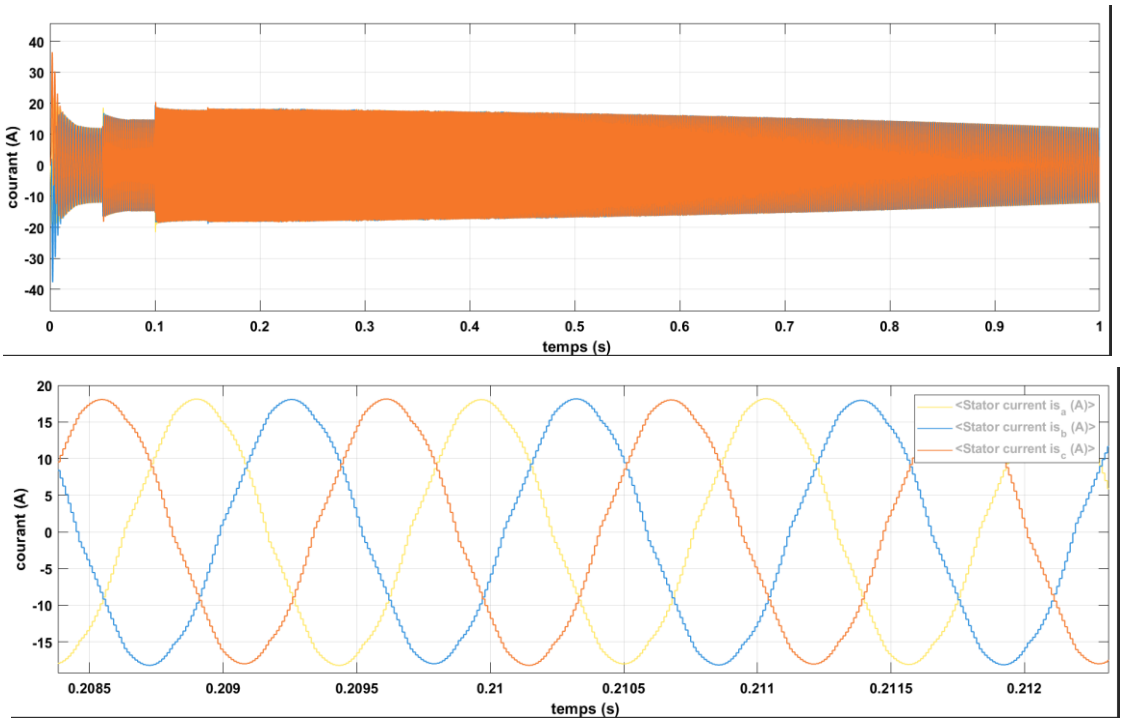
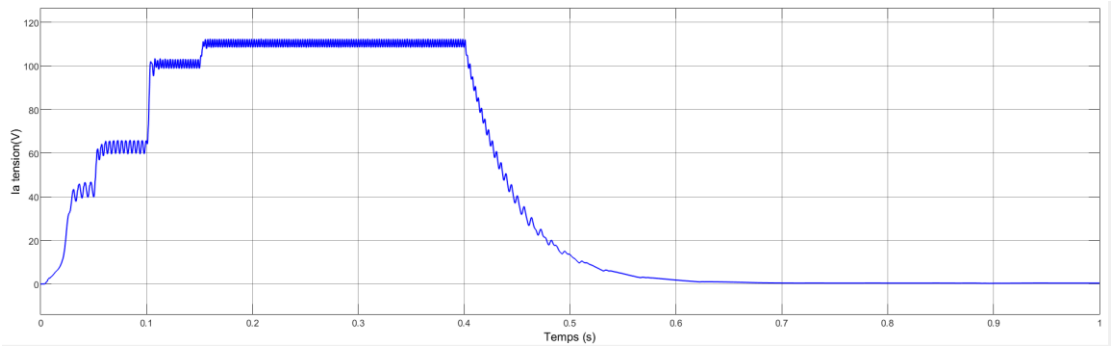


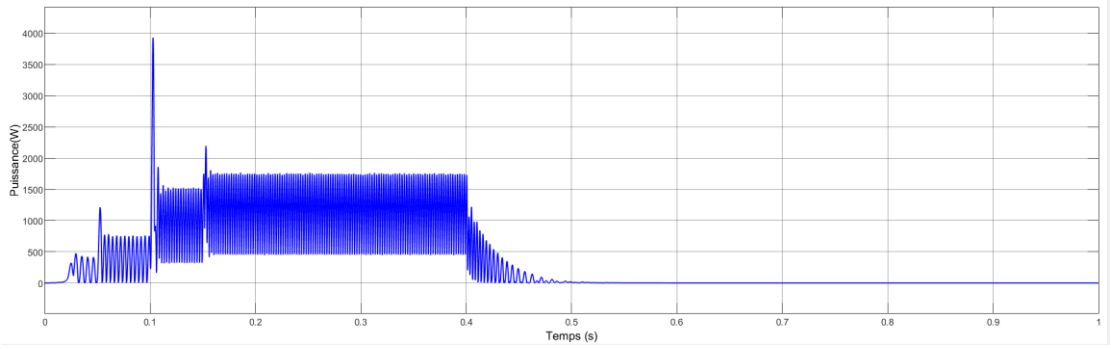
Figure II.19: le courant statorique à la sortie de l'éolienne isa ,isb ,isc

- **Interprétation des résultats :**

Les figures (II.15) montre l'évolution de courant statorique à la sortie de la machine en fonction du temps. On a aussi remarque que la courant reste sinusoïdale au fil du temps.



(a)



(b)

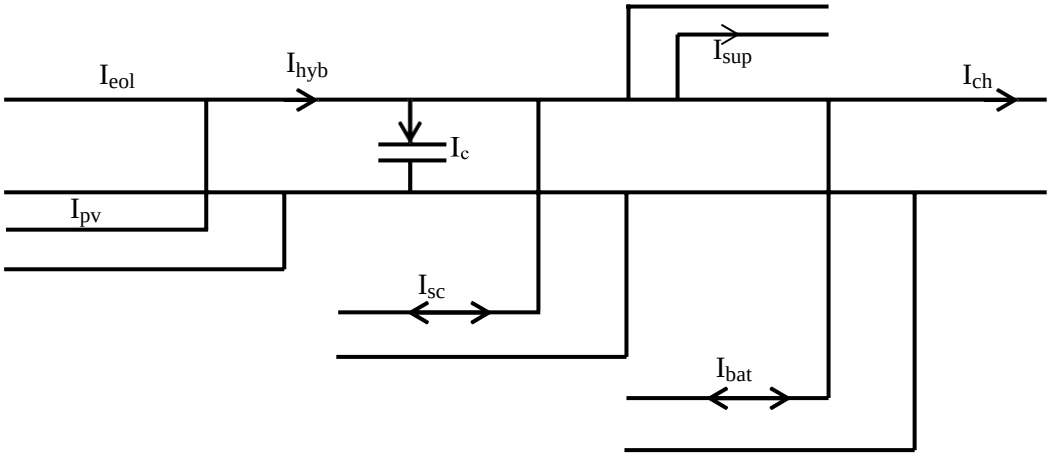
Figure II.20: la courbe de la tension (a) et la puissance (b) de sortie de redresseur

II.9 Modélisation des super-condensateurs

Le but de ce travail de modélisation consiste à définir tout d'abord le modèle comportemental d'une cellule puis celui du pack des super-condensateurs formé de plusieurs cellules en série. Dans la littérature de nombreux modèles sont proposés, plus le modèle de lacellule élémentaire est complexe, plus le modèle du pack des super-condensateurs devient difficile voire impossible à mettre en équation. C'est pour cette raison qu'on ne cherchera pasà établir un modèle sophistiqué qui tient compte de tous les phénomènes physique des super condensateurs.

Dans cette étude nous présenterons un modèle simplifié qui ne tient pas compte de tous les phénomènes physiques de ce composant sans que la précision et le comportement électrique du composant soient altérés. Dans la littérature plusieurs types de modèles sont proposés **[01], [06], [04]**. Une grande partie des travaux sur la modélisation des tension est maintenue constante pour un bon fonctionnement des charges. La variation d'énergie des super-condensateurs traduit par une variation de tension à leurs bornes.

Le bus continu est composé d'une capacité, qui a pour but de filtrer la tension et chaque convertisseur statique qui est reliés avec lui exerce une influence par le courant (figure V.2

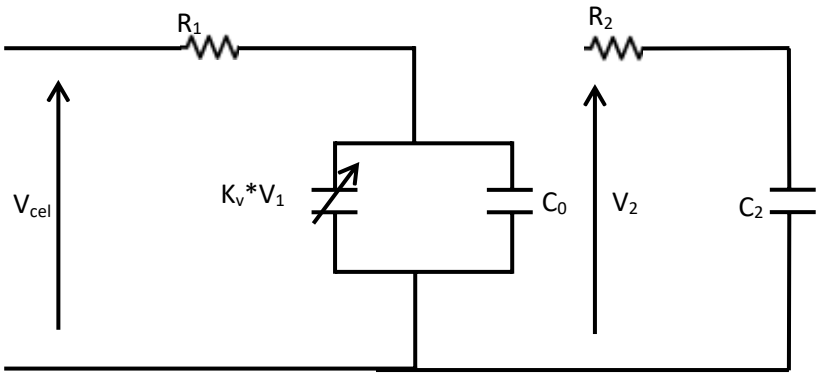


FigureII.21 : Schéma du bus continu du système hybride avec stockage hybride

super-condensateurs est basée sur le modèle de type circuit électrique qui décrit lecomportement des super-condensateurs avec un certain degré de complexité.

II.9.1 Modèle de super-condensateur double branche

C'est R. Bonert et L. Zubieta qui avaient présenté le premier véritable Modèle dessuper-condensateurs de puissance, (figure V.11)



FigureII.22 : Modèle à deux branches d'une super-condensateur [13]

Ce modèle à deux branche repose sur la partition de l'énergie électrostatique des super condensateurs en énergie rapidement stockée et énergie lentement stockée [10], [13], [04] .

Et comporte par conséquent deux cellules Figure. (V.11) :

La première, dite principale, rend compte de l'évolution de l'énergie durant les événements de charge

ou de décharge.

La deuxième, dite lente, vient en complément de la première pour décrire la redistribution interne de l'énergie.

Comme le montre la figure ci-dessus, et de façon à tenir compte, d'une part de la nature distribuée de la charge stockée, d'autre part de la non-linéarité physique des capacités développées par les interfaces électrode-électrolyte, la capacité de la branche principale est choisie variable en fonction de la tension à ses bornes. Par ailleurs, et dans un souci de simplicité, la loi de variation adoptée est linéaire [10], [07] :

$$C_1(V_1) = C_0 + K_v . V_1 \qquad \text{(II.23)}$$

II.9.2Modèle simple branche.

En négligeant la branche lente du modèle de R. Bonert et L. Zubieta (Figure.V.12), lemodèle du super condensateur devient équivalent à la branche principale (Figure.V.12).

Pour une cellule, la résistance R_1 correspond à la résistance interne du composant et la capacité $C_1(V_1)$ renferme deux composantes. La première C_0, est constante et la seconde(k_v*V_1), est variable en fonction de la tension aux bornes de la capacité. Ce modèle, bien que simplifié, s'avère être suffisant dans notre étude.

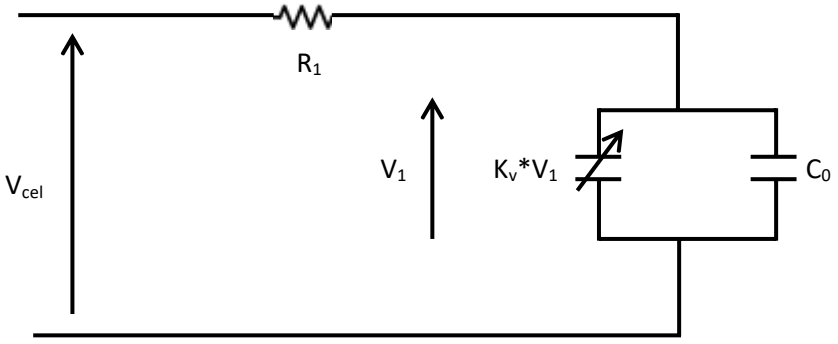


Figure II.23 : Modèle du super-condensateur a simple branche

.

Pour analyser le circuit du modèle simple branche, on admet que le courant du super-condensateur est positif pendant la phase de charge et il est négatif pendant la phase de décharge.

La tension aux bornes du super-condensateur est représentée par la relation suivante [13]:

$$V_{cel} = I_{sc} . R_{sc} + \frac{1}{C_0 + K_v V_1} \int I_{sc} dt + V_0 \qquad \text{(IV.24)}$$

II.9.3 Modèle du pack des super-condensateurs

L'emploi des super-condensateurs comme dispositif de stockage d'énergie nécessite laréalisation d'un pack formé de plusieurs cellules élémentaires en série ou mixe. La modélisation du pack revient à modéliser une cellule et à choisir le type de l'association des cellules élémentaires formant le pack **[Cam 07]**.

Le calcul de N_{sc} dépend du niveau de tension défini :

$$N_{sc} = \frac{V_{\text{scmax}}}{V_{\text{celmax}}} \qquad \text{(V.25)}$$

La capacité équivalente approximative du module dépend de N_{sc} et de la capacité d'une cellule de super-condensateur (C_0+K_v.V_1).

$$C_{\text{sceq}}(V_1) = \frac{1}{N_{sc}} \cdot (C_0 + K_v \cdot V_1) \qquad \text{(V.26)}$$

En supposant que toutes les cellules sont identiques, la résistance interne de N_{sc} cellules misesen séries peut être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$C_{\text{sceq}}(V_1) = \frac{1}{N_{sc}} \cdot (C_0 + K_v \cdot V_1)$$

$$R_{\text{sceq}} = N_{\text{sc}} \cdot R_1 \qquad \text{(V.27)}$$

II.9.4 Modèle simple branche

L'échange d'énergie entre le super-condensateur et le bus DC ou vis versa est assuré au moyen d'un hacheur bidirectionnel en courant, figure (IV.19).

La charge qui est stockée dans le super-condensateur est caractérisée par une grandeur appelée l'état de charge (EDC_{sc}). La tension de fonctionnement du super-condensateur peut être maintenue dans une plage appropriée en imposant une limite supérieure et inférieure sur l'état de la charge.

L'état de charge peut être exprimé en fonction du courant du super-condensateur par larelation suivante **[13]:**

$$A_{pv,h} = f \cdot \frac{\overline{E_L}}{\overline{E_{pv}}} \qquad \text{(V.28)}$$

$$A = (1 - f) \cdot \frac{E_L}{E_{el}} \quad \text{(V.29)}$$

Par ailleurs, l'état de charge est une fonction proportionnelle à la tension du super-condensateur, il est donné par la formule suivante :

$$EDC_{sc} = \frac{V_{sc}}{V} \quad \text{(V.30)}$$

II.10. Conclusion

L'éolien et le solaire fournissent une source d'énergie propre et sont prometteurs à court et long terme. Ce sont des solutions rentables pour alimenter les utilisateurs isolés et sont largement utilisés dans les applications connectées au réseau ou autonomes. Une présentation globale de la modélisation, du fonctionnement, de la structure et des différents composants (hacheur boost et redresseur) et du système photovoltaïque et éolien est faite.

Le dimensionnement et l'utilisation de l'énergie éolienne et solaire pour la production d'électricité et la possibilité de produire de l'énergie électrique à partir de systèmes hybrides éolien et solaire a été souligné. Des simulations notifiant les caractéristiques de base de chaque système (solaire et éolien) nécessaire à la prédiction de la production hybride sont présentées.

Les inconvénients de tels systèmes sont leurs coûts d'investissement élevés et, dans les zones reculées, la nécessité d'une source d'énergie dynamique supplémentaire pour faire face à la charge. Le stockage d'énergie est souvent nécessaire pour améliorer la rentabilité et la fiabilité du système. Si ces systèmes sont optimisés avec des prévisions météorologiques et une modélisation précise, ils peuvent être plus rentable

CHAPITRE III :

INVESTIGATION, DIMENSIONNEMET ET CHOIX DU SYSTÈME DE STOCKAGE (SS)

CHAPITRE III :
INVESTIGATION, DIMENSIONNEMET ET CHOIX DU SYSTÈME DE STOCKAGE (SS)

III.1. Introduction

Le stockage de l'énergie est devenu un enjeu mondial et un défi majeur. En effet, depuis les années 1980, la consommation mondiale annuelle de pétrole est devenue supérieure aux quantités des nouveaux gisements découverts [33]. Il est donc nécessaire de se tourner vers d'autres sources d'énergies, comme les énergies renouvelables, et de développer des technologies pour le stockage de ces énergies afin de mieux gérer ces ressources. Les efforts pour réduire la consommation de pétrole se sont portés sur les transports, notamment *via* le développement de véhicules électriques et de batteries. Si les batteries Lithium-ion (Li-ion) sont maintenant répandues pour les applications portables comme les ordinateurs et les téléphones mobiles, il y a néanmoins des limitations technologiques pour les applications de grande échelle aux véhicules électriques et au stockage de surplus de production d'énergie [21]. De plus, les coûts de certains éléments comme le cobalt (un des constituants utilisé comme matrice support dans les batteries) et le lithium sont élevés et le recyclage des batteries Li-ion pose de nombreux problèmes techniques mais aussi écologiques à cause de la toxicité des métaux qu'elles contiennent. Les procédés actuels ne sont pas économiquement intéressants pour les industriels du secteur de l'énergie et seulement 50 % des batteries Li-ion sont aujourd'hui recyclées comme stipulé par la directive européenne 2006/66/CE.

Dans ce chapitre nous allons présenter Avantages techniques et économiques du stockage d'énergie et les caractéristiques de batterie. Puis, nous présentons les différent type système de stockage. Ensuite, nous présentons critère de Choix du système de stockage.

III.2. Avantages techniques et économiques du stockage d'énergie

Le stockage d'énergie présente de nombreux avantages. C'est important dans la gestion de l'énergie. Il contribue à réduire le gaspillage d'énergie et à augmenter 54 l'efficacité d'utilisation de l'énergie [12, 13] des systèmes de traitement. Le stockage de formes d'énergie secondaire telles que la chaleur et l'électricité contribue à réduire la quantité d'énergie primaire consommée (combustibles fossiles) pour les générer. Cela, non seulement réduit les émissions de C02 et d'autres gaz à effet de serre ainsi que le réchauffement planétaire associé, mais contribue également à la préservation des combustibles fossiles considérés comme étant épuisables [8]. Il peut également jouer un rôle crucial dans l'augmentation de la pénétration des énergies renouvelables, propres et intermittentes. Des ressources énergétiques telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire et les courants de marée marins menant au réseau [5-8] et facilitent le transfert de charge [9]. Le stockage d'énergie aide à la planification, à l'exploitation et à la régulation de la fréquence du réseau électrique [9, 41]. Il contribue à maintenir la stabilité des systèmes énergétiques, à améliorer la qualité de l'énergie dans les systèmes de micro réseaux et à faire correspondre la demande à

l'offre [6, 8, 9].

Stockage et énergies renouvelables Le développement et l'utilisation des énergies renouvelables ont connu une croissance

III.3. Définition et grandeurs caractéristiques

Un accumulateur est un système physico-chimique réversible pouvant convertir l'énergie chimique en énergie électrique grâce à des réactions d'oxydoréduction. L'énergie électrique est stockée sous forme d'énergie chimique lorsque le système est en mode accumulateur (le système est en mode charge) puis restituée sous forme d'énergie électrique lorsqu'il se trouve en mode générateur (le système est alors en décharge) [2]. Une batterie est définie en général par l'association de plusieurs accumulateurs.

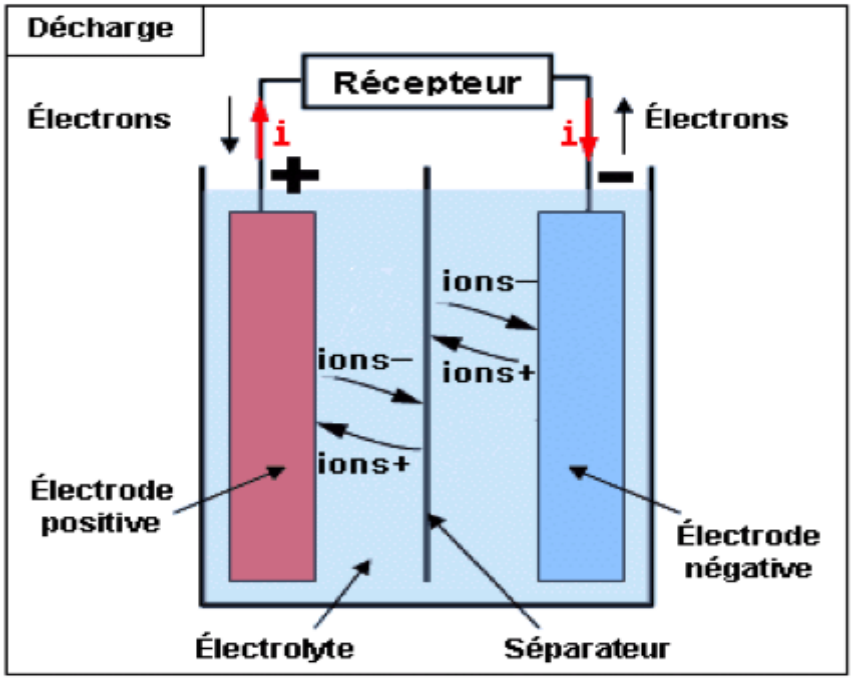


Figure III.1: Schéma général d'une batterie

Une batterie (souvent indifférenciée avec le terme accumulateur par abus de langage) est composée d'une cathode où se déroule la réduction des métaux et d'une anode pour l'oxydation des métaux, ces électrodes sont imprégnées par un électrolyte conducteur pour permettre la circulation des ions. Le séparateur sert à éviter au maximum les courts-circuits dans la batterie.

Suivant le mode dans lequel se trouve la batterie (accumulateur ou générateur), les noms des électrodes s'inversent (Figure III.1**)**. Par souci d'homogénéité, dans cet article, la batterie sera toujours considérée en mode générateur (décharge) et la cathode sera toujours l'électrode positive où se déroule la réduction, quelles que soient les conventions utilisées dans les différentes publications citées.

Une batterie est caractérisée par sa force électromotrice (fem), notée ΔE, qui s'exprime en Volts et dépend de la nature des couples d'oxydo-réduction des matériaux présents et de l'avancement de la réaction. Il s'agit de la différence des potentiels de travail des deux électrodes. L'autre grandeur caractéristique est la capacité (Q) exprimée en Coulomb ou plus souvent pour les batteries en Ampère-heure (Ah). Cette grandeur dépend de la nature des couples rédox et des quantités de matière des différentes espèces impliquées dans les réactions redox [4].

On caractérise et compare usuellement les batteries en utilisant leur énergie spécifique exprimée en Wh/kg (ou Wh/L). Cette énergie spécifique est le produit de la fem et de la capacité, elle représente la quantité d'énergie pouvant être délivrée par la batterie par unité de masse (ou de volume). On peut également exprimer leur capacité spécifique en mAh/g, cela représente la charge électrique que la batterie peut fournir d'un état complètement chargé jusqu'à sa décharge complète, par unité de masse. La durée de vie d'une batterie est estimée par sa cyclabilité, c'est-à-dire le nombre moyen de cycle charge/décharge qu'elle peut effectuer.

III.4. Investigation sur les différents systèmes de stockage

III.4.1. Historique

Intéressons-nous tout d'abord à l'histoire de la batterie, depuis son invention jusqu'à nos jours, les références [92, 93] nous ont permis d'avoir un large aperçu sur le sujet.

En effet, en 1800, Alessandro Volta fut le premier à réaliser un système de stockage d'électricité avec sa célèbre « pile » de rondelles métalliques alternant le cuivre et le zinc, et entre lesquelles un tissu imbibé de saumure assurait le rôle de séparateur et d'électrolyte. Une photographie de la pile de Volta est représentée sur la (Figure III.2 a). En 1829, le français Antoine César Becquerel proposa une évolution de la pile de Volta, permettant d'éviter les phénomènes de polarisation provoquant la formation de petites bulles d'hydrogène sur l'électrode de cuivre, entravant le passage du courant électrique. Pour ce faire, il élabora un agencement différent : la plaque de zinc baignant dans de 1 'eau acidulée était enfermée dans un sac de baudruche, fabriqué à partir du gros intestin d'un bœuf, ce qui permettait d'obtenir une pellicule très fine.

En plongeant ce dispositif dans une solution de sulfate de cuivre, on évitait le mélange entre les deux liquides, qui était indésirable pour le bon fonctionnement de la pile, sans pour autant gêner le passage du courant électrique. Il s'agit de la première pile à courant électrique constant. La pile de Daniell, en 1836, reprend le principe de celle de Becquerel, mais échange la baudruche contre un vase en terre cuite poreuse. En 1868, Georges Leclanché propose une pile qui aura beaucoup de succès. Celle-ci était composée d'un bocal en verre dans lequel se trouvaient un crayon en zinc et un cylindre en terre cuite poreuse contenant

notamment du charbon ainsi que des 56 éléments dépolarisants, le tout baignant dans un électrolyte à base de chlorure d'ammonium. La première pile secondaire, c'est-à-dire rechargeable, que nous appelons plus communément « batterie », fut inventée par Gaston Planté, chimiste français, en 1859. Il réussit une succession de cycles de décharge/charge en reliant les accumulateurs entre eux de façon à obtenir une batterie au plomb. Malgré son prix attractif, cette batterie présentait des utilisations assez limitées du fait de sa faible énergie spécifique (c'est-à-dire la quantité d'énergie stockée par unité de masse) et du nombre de cycles assez limité qu'elle permettait d'atteindre. Ce dispositif est, de ce fait, principalement utilisé dans les voitures utilisant un moteur thermique. C'est en 1899 que Waldemar Jungner inventa la première batterie au nickel-cadmium. Plusieurs versions dérivées de cette pile suivirent, comme par exemple les nickel-zinc, nickel-fer ou encore nickel-hydrogène. Ces batteries permettent d'atteindre de bien meilleures performances en termes de nombre de cycles réalisables ainsi que d'énergie spécifique. En 1988, une nouvelle batterie dérivée du nickel-cadmium voit le jour : la batterie nickel-métal-hydrure. Ce principe ouvre la voie aux batteries lithium-ion qui sont énormément utilisées à l'heure actuelle. En effet, ce type de batterie a amené l'utilisation d'une électrode d'insertion, cela signifie qu'au lieu de « consommer » une des électrodes au cours de la réaction, une électrode, dans ce cas l'anode, est capable d'absorber et de désorber les ions actifs dans les réactions électrochimiques. Cela permet de ne pas consommer de métal. Cette technologie a été utilisée pour la première voiture hybride, la Toyota Prius, malgré son coût plus élevé et son énergie Spécifique inférieure. La première batterie alcaline primaire a été développée au milieu des années 1960. Dans cette pile, le charbon de la pile Leclanché est remplacé par du dioxyde de manganèse et le chlorure d'ammonium par de l'hydroxyde de potassium, le potassium étant un élément alcalin. Cette batterie présente certains avantages par rapport à celle 57 proposée par Georges Leclanché elle permet de fournir une intensité plus élevée pendant une plus longue période. Les premières batteries au lithium métallique sont alors apparues en 1973. Grâce au développement des électrodes d'intercalation, le matériau actif est absorbé ou désorbé à l'intérieur même de l'électrode au lieu de consommer celle-ci ; le lithium s'est avéré être un bon matériau étant donné qu'il s'agit du plus petit des métaux. L'énergie spécifique d'une batterie lithium-métal est plus que doublée par rapport aux chimies précédemment utilisées. Ainsi une telle batterie peut présenter une énergie spécifique de 200 Wh/kg, là où une batterie au plomb présentera une énergie spécifique de 20 à 35 Wh/kg, 50 à 80 Wh/kg pour une batterie nickel-cadmium et 80 Wh/kg pour une batterie nickel-métal hydrure. La production de ces batteries lithium-métal a cependant été arrêtée suite à certains problèmes de sécurité. Cependant des solutions ont été trouvées : la batterie lithium polymère et la batterie lithium ion.

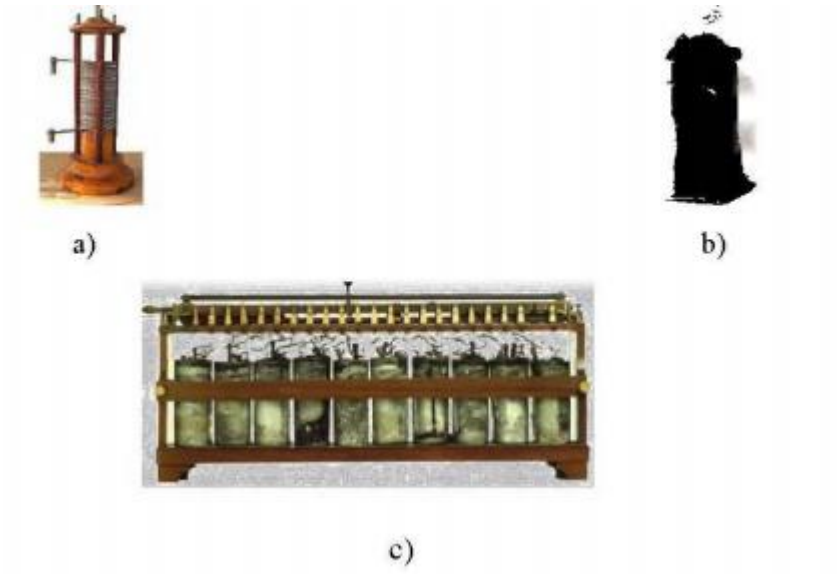


Figure III.2: a) la pile de Volta, b) la Pile de Leclanché, c) La première batterie

C'est la compagnie Sony qui lança la production en masse des batteries lithium-ion en 1991. Elles sont, depuis lors, largement utilisées dans toute une série de domaines tels que les smartphones, les ordinateurs portables, les caméras ...Notons que la plupart de ces batteries sont toujours utilisées à 1 'heure actuelle, le choix de la chimie dépendant de l'application qui sera faite de la batterie. Ainsi certaines applications préféreront un coût plus faible, d'autres une sécurité optimale ou encore une capacité plus grande [9].

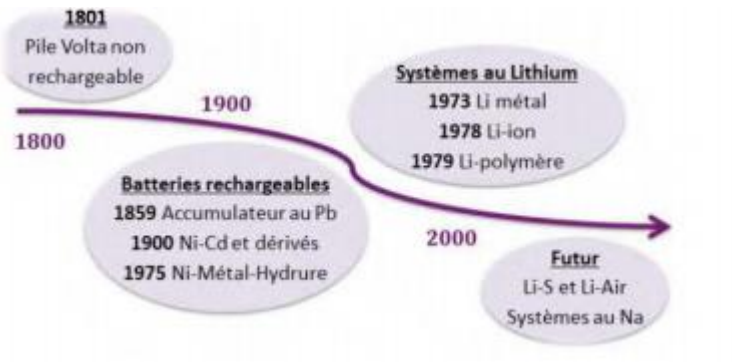


Figure III.3: Chronologie de l'évolution des différents systèmes de batteries

[5]

III.5. Système de stockage d'électricité

Le stockage de l'électricité peut être réalisé efficacement. Initialement, il doit être transformé en une

autre forme d'énergie stockable et être reconverti en cas de besoin. Il existe de nombreuses techniques possibles de stocker de l'énergie, que l'on retrouve dans pratiquement toutes les formes d'énergie : mécanique, chimique et thermique. Les technologies de stockage répondant à des critères techniques et économiques spécifiques, qui varient considérablement en fonction des applications et des besoins, seront évidemment de types différents. Les technologies sont nombreuses, mais une étude comparative est rendue difficile par le fait que, entre autres, leur niveau de développement varie considérablement [36]. Il existe différentes technologies de stockage d'énergie électrique, chacune adaptée à leur domaine d'application. En général, plusieurs critères sont analysés lors de la considération et du choix des technologies du système de stockage pour une 59 application spécifique. Ces critères incluent la durée de ·VIe, le cycle de vie, la puissance et l'énergie, les taux d'autodécharge, l'impact sur l'environnement, l'efficacité du cycle, le coût en capital, la durée de stockage et la maturité technique [45, 7]. Selon la nature du stockage, on peut distinguer le. Stockage direct et le stockage indirect comme l'illustre la classification

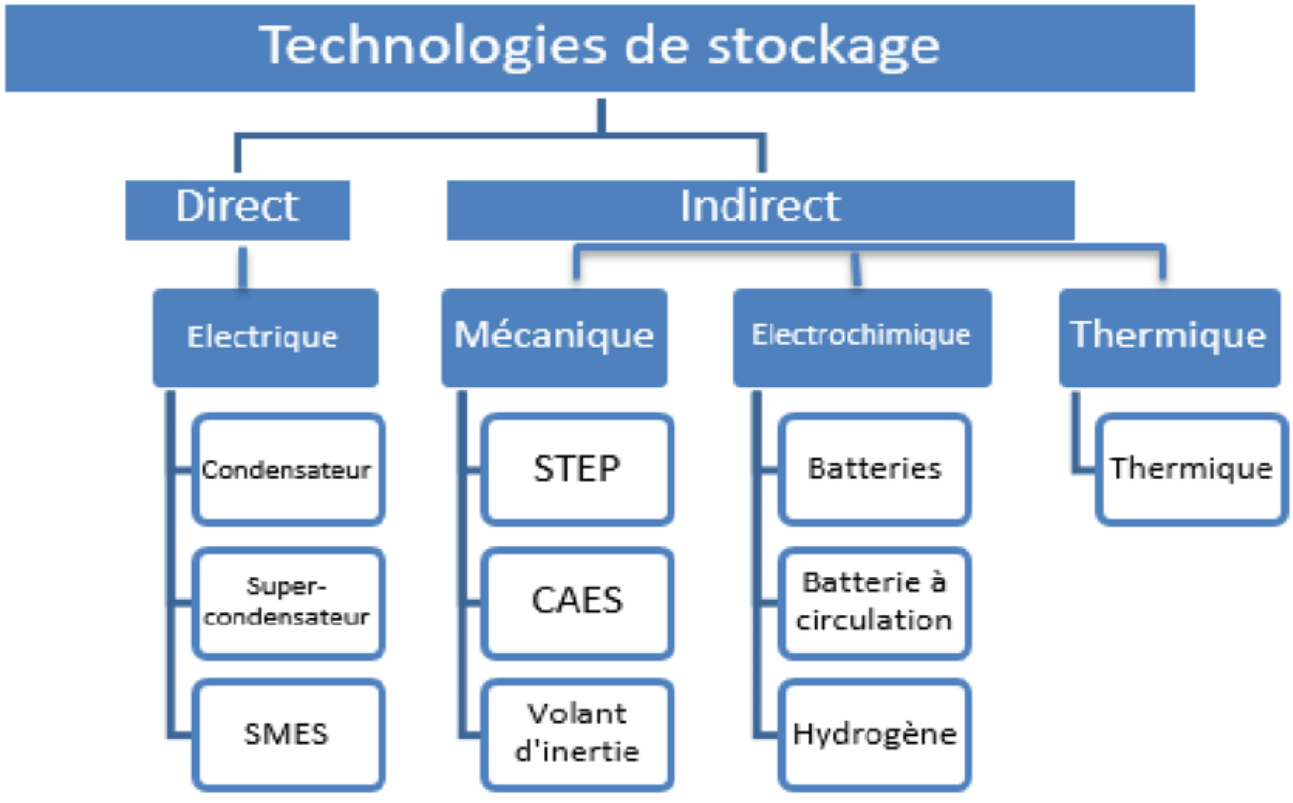


Figure III.4: Classification des différents dispositifs de stockage

➢ **Stockage direct**

Ce sont des techniques qui permettent de stocker directement l'énergie sous forme électrique. Il s'agit : des condensateurs, des supercondensateurs et des inductances supraconductrices. Ces techniques

de stockage sont considérées comme des sources de puissance à cause de leur grande puissance spécifique et de leur faible densité.

a. Condensateur Un condensateur est un composant de stockage électrostatique. La structure d'un condensateur est donnée par la Figure **III.6**.

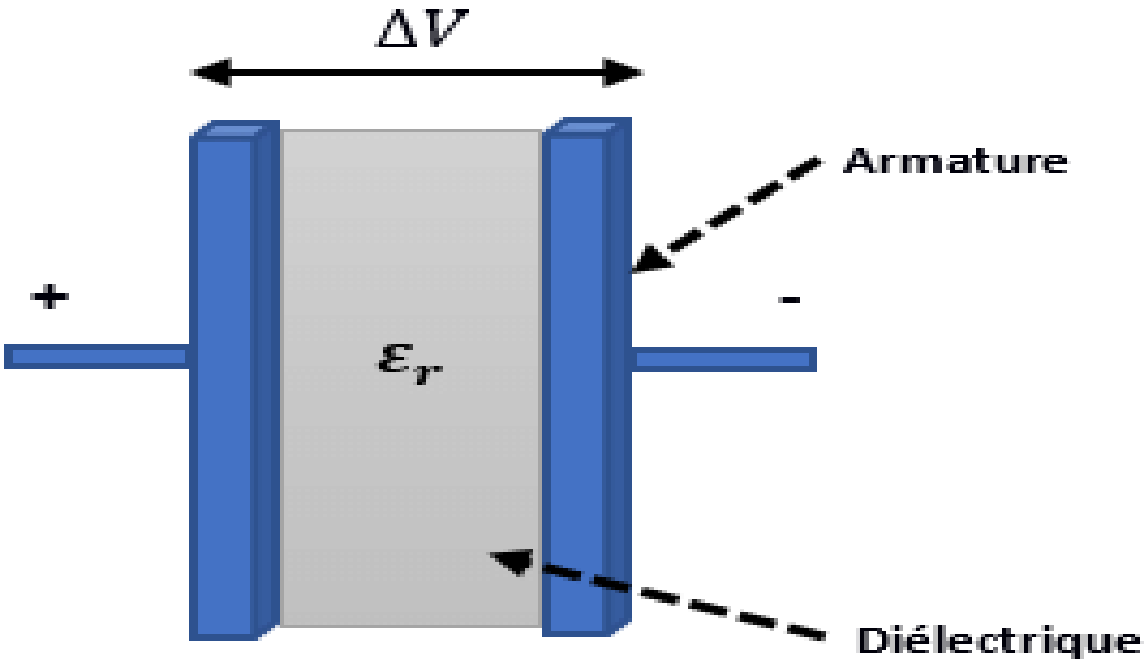


Figure III.5: Structure d'un condensateur [12].

- Principe : le condensateur permet d'emmagasiner transitoirement une charge électrique entre deux électrodes séparées par un isolant diélectrique. En fonction de la nature des électrodes et de l'isolant, on peut distinguer plusieurs familles de condensateurs : le condensateur céramique, le condensateur électrochimique ou électrolytique et le condensateur à film plastique.
- Propriétés et applications : les condensateurs ont une capacité de stockage très faible (de 1 pF à 1 F), une densité énergétique volumique de l'ordre de 0,1 à 0,2 Wh/l et un faible temps de décharge de l'ordre de quelques fractions de millisecondes [13].

Ils sont très souvent utilisés pour le démarrage de moteurs électriques ainsi que lorsqu'il y a un important besoin en énergie électrique sur un intervalle de temps assez court.

b. Supercondensateur Un supercondensateur est formé de deux collecteurs métalliques généralement en aluminium, de deux électrodes conductrices électroniques à très haute surface spécifique plongées dans un électrolyte et d'une membrane de séparation poreuse (FigureIII.6).

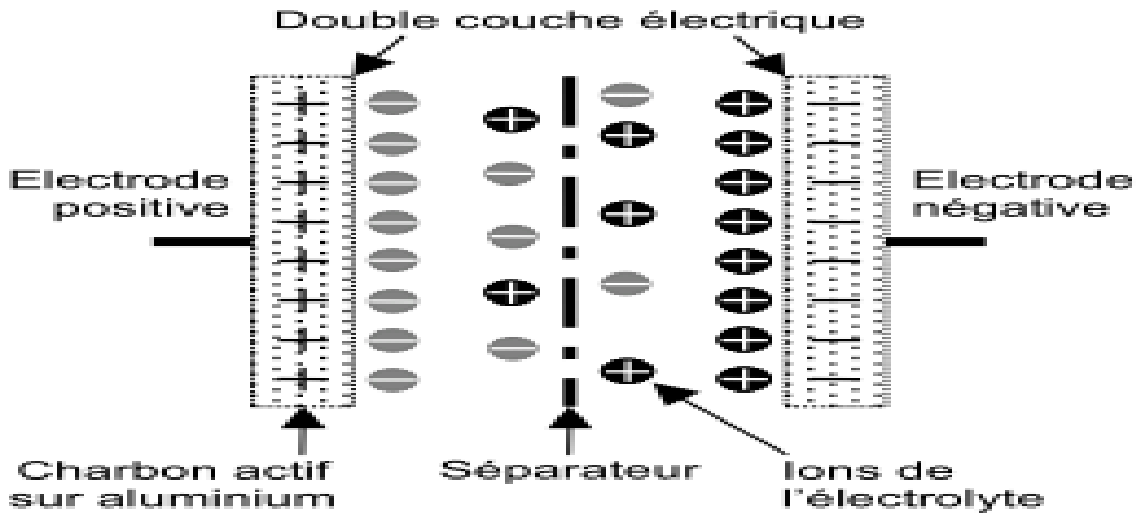


Figure III.6: Structure d'un supercondensateur [14].

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

• Propriétés et applications : les supercondensateurs ont une durée de vie de l'ordre de 8 à 10 ans, un rendement de l'ordre de 95%, une autodécharge de l'ordre de 5% par jour et une capacité pouvant atteindre 5000 F [13, 22].

Ils sont très souvent utilisés dans le domaine du transport où sa technologie satisfait généralement aux fonctions de démarrage. Aussi, ils sont utilisés comme alimentation de secours de mémoires en informatique et de récupération d'énergie de freinage (ascenseurs, tramways, métros…).

c. Inductances supraconductrices Une station de stockage électromagnétique se compose principalement d'enroulements supraconducteurs appelés bobines supraconductrices connectées à un générateur par des transformateurs et des convertisseurs alternatif-continu à thyristors (Figure 6).

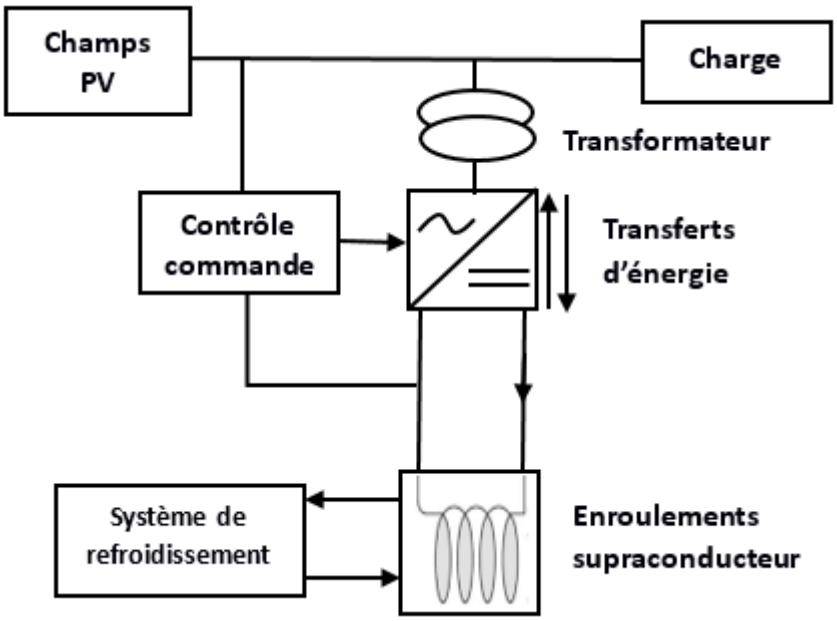


Figure III.7: Principaux éléments d'un dispositif de stockage d'énergie sous forme magnétique par bobine supraconductrice [15,16].

- Principe : le stockage d'énergie dans une inductance supraconductrice est fait sous forme de champ magnétique, lorsqu'on fait passer un courant électrique continu dans une bobine supraconductrice court-circuitée. Le courant circule sans perte par effet Joule dans la bobine supraconductrice et stocke ainsi une certaine quantité d'énergie pour une durée théoriquement infinie. La bobine est réalisée en matériau supraconducteur (matériau à très basses températures proches du zéro absolu 4,2 K) dans le but que l'énergie stockée ne soit pas dissipée par effet joule. La résistance ohmique du supraconducteur étant nulle, les seules pertes sont dues aux résistances de contacts et à la puissance nécessaire pour maintenir la bobine froide (environ -269,5 °C). Pour récupérer l'énergie stockée, il suffit d'ouvrir le circuit et de le brancher sur un récepteur électrique à alimenter. L'énergie stockée dans la bobine supraconductrice est transférée en un temps très court (50% en moins d'une seconde) [14,15,16].
- Propriétés et applications : avec une très grande puissance, les inductances supraconductrices ont la possibilité de décharge 50% de leur capacité en moins d'une seconde [17].

Ces technologies de stockages sont généralement connectées au réseau pour le stabiliser dynamiquement et transitoirement. D'autres sont utilisées pour le lissage des creux de tension pour les alimentations non interruptibles. Elles trouvent également des applications dans le domaine militaire comme une source impulsionnelle pour des lanceurs électromagnétiques par exemple.

- **Stockage indirect**

Pour stocker l'énergie de façon significative et l'utiliser sur de longues périodes, il est nécessaire de la

transformer d'abord en une autre forme d'énergie intermédiaire et stockable (potentielle, cinétique, chimique ou thermique).

A) Stockage électrochimique

Un stockage électrochimique fait souvent référence à une batterie qui est constituée d'un assemblage en série et/ou en parallèle d'éléments électrochimiques. Chaque accumulateur est constitué de deux électrodes, l'une positive et l'autre négative séparée par un électrolyte (figure III.7). C'est un générateur électrochimique capable de fournir une énergie électrique à partir d'une énergie stockée chimiquement. Cette conversion d'énergie est réversible pour un accumulateur, contrairement à une pile [103].

a. Accumulateurs électrochimiques Une batterie est constituée d'un assemblage en série et/ou en parallèle d'accumulateurs électrochimiques. Chaque accumulateur est constitué de deux électrodes, l'une positive et l'autre négative séparée par un électrolyte (Figure III.7). L'accumulateur est un générateur électrochimique capable de fournir une énergie électrique à partir d'une énergie stockée chimiquement. Cette conversion d'énergie est réversible pour un accumulateur, contrairement à une pile [14].

- Principe : aux interfaces électrodes-électrolyte de l'accumulateur interviennent des réactions électrochimiques d'oxydation ou de réduction des matières actives des électrodes :

- au niveau de l'anode (électrode négative en décharge), s'effectue une réaction d'oxydation suivant la relation :

$M1 \rightarrow M1\ n+ + ne-$de potentiel redox E

- à la cathode (électrode positive en décharge), les électrons libérés à l'anode transitent par le circuit extérieur pour atteindre la cathode où s'opère une réaction de réduction suivant l'équation

$M2\ n+ + ne- \rightarrow M2$ de potentiel redox $E2$. $M1$ et $M2$ représentent respectivement les espèces actives à l'anode et à la cathode. L'électrolyte assure le transport des espèces ioniques mises en jeu dans la réaction globale d'oxydoréduction, qui s'écrit

$M1 + M2\ n+ \rightarrow M1\ n+ + M2$. Le transport engendre une force électromotrice

$E = E2 - E1$. Durant la charge, le phénomène s'inverse. La Figure(III.7) montre le principe de fonctionnement d'un accumulateur électrochimique.

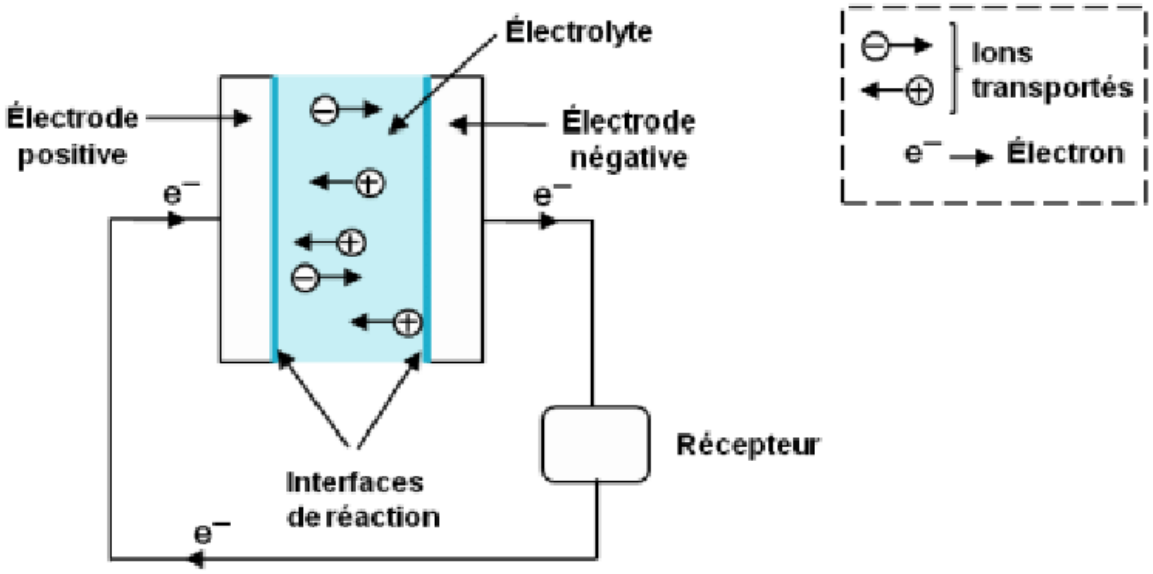


Figure III.8: Principe d'un accumulateur électrochimique [12]

• Propriétés et applications : les accumulateurs électrochimiques ont une densité énergétique pouvant atteindre 250 kWh/kg avec une durée de vie relativement faible de l'ordre de 200 à 10000 cycles [13, 17]. Les accumulateurs électrochimiques notamment ceux au lithium-ion occupent la quasi-totalité du marché de la téléphonie mobile. Ils sont également utilisés dans les applications de forte puissance et dans l'aérospatiale tel que les satellites Galileo [18]. Les accumulateurs Ni-Cd sont aussi utilisés dans les applications demandant une forte puissance et peuvent fonctionner sous une température relativement élevée. Pour ce qui est de la batterie au plomb, son marché est un enjeu industriel important. Il concerne les batteries de démarrage ainsi que la plupart des batteries stationnaires. En fonction de la nature des électrodes et de l'électrolyte, on rencontre différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques dont les plus utilisées sont : lithium-ion, plomb-acide et nickel-cadmium [13].

■ Accumulateurs au lithium-ion (Li-ion)

Durant la charge, les ions lithium viennent s'insérer dans la structure de l'électrode négative en carbone graphité. Lors de la décharge, l'anode libère ces ions qui viennent se placer dans la structure de la cathode. L'équation électrochimique globale est la suivante : $Li + MI \rightarrow LiMI$ MI le matériau d'insertion (graphite, coke …) placé à l'électrode positive. Par rapport aux batteries au plomb, les batteries au lithium-ion n'ont pas besoin de maintenance. Elles ont une durée de vie assez importante et présentent une plus grande résistance aux conditions extérieures [18]. La tension d'un accumulateur lithium-ion varie de 2,5V (état

de charge minimum) à 3,7V (état de charge maximum) [19, 20].

■ Accumulateurs au plomb-acide (Pb-ac) La batterie au plomb-acide est la technologie la plus ancienne et la plus utilisée dans le monde [11]. Son électrolyte est une solution aqueuse d'acide sulfurique, l'électrode positive est constituée d'oxyde de plomb PbO2 et l'électrode négative de plomb Pb. La réaction mise enjeu est la suivante :

$Pb + PbO2 + 2H2SO4 \rightleftarrows 2PbSO4 + 2H2O$. La tension aux bornes d'un accumulateur varie de 1,7V (état de charge minimum) à 2,5V (état de charge maximum) [19, 20].

■ Accumulateurs au nickel cadmium (Ni-Cd) Les accumulateurs au nickel-cadmium offrent des performances supérieures au plomb en termes de capacité et de durée de vie (Tableau 1). Cependant leur prix est nettement plus élevé et leur tension plus faible (1,15V à 1,45V) que ceux des batteries au plomb [19, 20]. L'électrolyte est à base de potasse, l'électrode positive est composée d'hydroxyde de nickel et l'électrode négative de cadmium. Ces éléments réagissent de la manière suivante : $2Ni(OH) + Cd + 2H2O \rightleftarrows 2Ni(OH)2 + Cd(OH)2$. Le Tableau 1 donne une comparaison des caractéristiques de quelques accumulateurs électrochimiques [17-20].

Technologies	Densité énergétique (Wh/kg)	Densité de puissance (W/kg)	Temps de décharge	Durée de stockage	Autodéchae (%/mois)	Rendment (%)	Durée de vie (nombre de cycles)	Coût (FCFA/kWh)
Plomb-acide (Pb-ac)	25 – 45	80 - 150	15mn - 100h	>1 mois	40	60-98	300-1500	32750-131000
Lithium-ion (Li-ion)	80-150	500-2000	45mn-100h	Plusieurs mois	20	90-100	>1500	458500-655000
Nickel-cadmium (Ni-Cd)	20-60	100-800	15mn-100h	<1mois	25	60-80	300-1500	131000-393000

Tableau III.1: Comparaison de quelques technologies d'accumulateurs électrochimiques

Comparaison de quelques technologies d'accumulateurs électrochimiques.

a) Station de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) hydroélectrique.

Le principal avantage de cette technologie est qu'elle est facilement disponible. Elle utilise le pouvoir de l'eau, une source d'énergie renouvelable très concentrée. Cette technologie est actuellement la plus utilisée pour les applications de forte puissance. Des stations de sous-transmission à stockage pompé seront essentielles pour le stockage de l'énergie électrique. Le principe est généralement bien connu : pendant les périodes de faible demande, ces stations utilisent l'électricité pour pomper l'eau du réservoir inférieur au réservoir supérieur (figure III.11). Lorsque la demande est très élevée, l'eau sort du réservoir supérieur et active les turbines pour générer de l'électricité de haute valeur pendant les heures de pointe. De nouveaux types de STEP sont envisagés notamment en bord de mer (STEP marine), la mer représentant le réservoir inférieur et un réservoir supérieur étant installé sur la côte. 65 Les systèmes hydroélectriques pompés ont une efficacité de conversion, du point de vue d'un réseau électrique, d'environ 65 à 80%, en fonction des caractéristiques de l'équipement. Compte tenu de l'efficacité du cycle, il faut 4 kWh pour en générer trois. La capacité de stockage dépend de deux paramètres : la hauteur de la cascade et le volume d'eau (figure III.11). Le principal inconvénient de cette technologie est la nécessité de disposer d'un site présentant différentes altitudes d'eau [27].

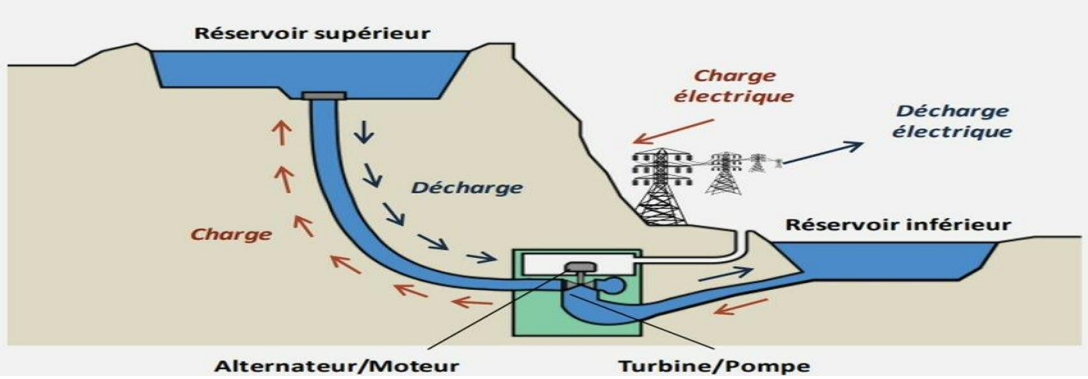


Figure III.9: Schéma de principe d'une STEP [27].

b) Stockage d'énergie par air comprimé ou CAES (Compressed Air Energy Storage)

Grâce à un compresseur, alimenté pendant les heures creuses de demande d'électricité, de 1 'air comprimé est produit puis stocké dans une cavité sous-terraine. Lors des périodes de pointe, 1 'air comprimé passe dans une chambre de combustion où il est réchauffé grâce à l'apport du gaz naturel avant d'être détendu dans une turbine. Sans cette étape de réchauffement, la température atteinte lors de la détente de l'air serait beaucoup trop basse et la turbine serait vite endommagée. Celle-ci est reliée à un alternateur qui produit de l'électricité. Si le rendement n'est pas très bon, il reste meilleur qu'une turbine à gaz classique. Une des améliorations en cours d'étude, le CAES adiabatique, vise à

stocker la chaleur produite lors de la compression de 1 'air pmrr la restituer lors de la détente du gaz, ce qui permet 1 'utilisation de turbines à air pour régénérer de l'électricité sans aucune émission directe [101].

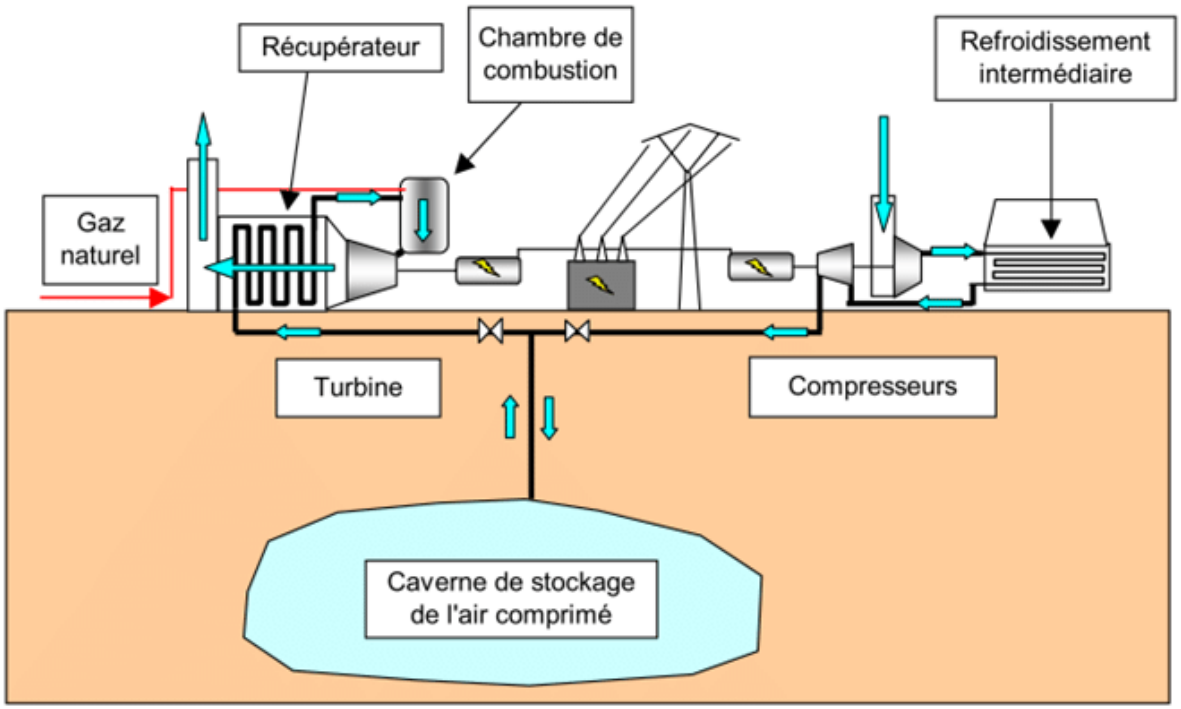


Figure III.10: Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé [34].

c) Volant d'inertie

Le stockage inertiel est constitué d'un volant d'inertie composite couplé à un générateur de moteur et à des supports (souvent magnétiques), avec un carter basse pression permettant de réduire les pertes d'autodécharge. Son principe est utilisé depuis les années 1950, date à laquelle il a été utilisé pour construire des « autobus gyroscopiques ». En tant que dispositif de stockage d'énergie, le volant d'inertie a été conçu pour traiter les perturbations de tension brèves afin d'améliorer la qualité de l'énergie. Il stocke l'énergie électrique sous forme d'énergie cinétique de rotation. La (figure III.10) montre le schéma d'un système à volant avec ses parties. En tant que dispositif de stockage d'énergie, le volant d'inertie fonctionne en mode de chargement et de déchargement [8] [39]

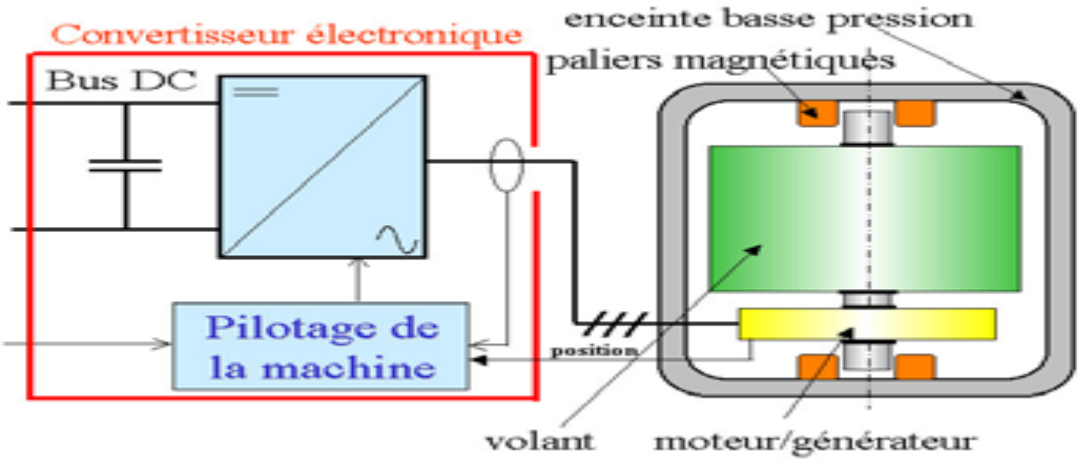


Figure III.11: principe du stockage par volant d'inertie [40]

d) Stockage à Hydrogène

Le stockage d'énergie à base d'hydrogène est l'un des réservoirs d'énergie chimique les plus populaires. L'hydrogène est un vecteur d'énergie stockable, transportable, extrêmement polyvalente, efficace et propre. Il a également une densité d'énergie élevée. Comme le montre la (pour les applications de stockage d'énergie, de l'électricité en période de pointe est utilisée pour l'électrolyse de l'eau afin de produire de l'hydrogène. L'hydrogène peut être stocké sous forme de gaz comprimé, de gaz liquéfié, d'hydrures métalliques ou de nanostructures de carbone. Le choix de la technologie de stockage dépend des caractéristiques des technologies disponibles en termes de performances techniques, économiques ou environnementales. Pendant la phase de décharge, l'hydrogène stocké est soit utilisé dans une pile à combustible, soit brûlé directement pour produire de l'électricité. L'utilisation de l'hydrogène pour le stockage de l'électricité présente un inconvénient majeur, à savoir les pertes d'énergie considérables subies au cours d'un cycle. Ces pertes sont dues au transport et à la compression lors du stockage. Ceci est partiellement compensé par la densité de stockage élevée [41].

e) Stockage thermique

Le stockage par chaleur sensible a fait ses preuves depuis des milliers d'années. Il s'agit par exemple du simple fait de poser une pierre près d'un feu, de la déplacer et de profiter de la chaleur qu'elle restitue dans le temps. C'est aussi le principe que l'on retrouve dans l'utilisation d'un ballon d'eau chaude ou d'une simple bouillotte. Dans 70 le cas d'une centrale thermodynamique, il s'agit de stocker la chaleur emmagasinée au cours de la journée d'ensoleillement. Le fluide caloporteur (qui transporte la chaleur) circule jusqu'à un échangeur thermique relié à deux réservoirs de sels fondus.

Les sels fondus froids passent à travers 1' échangeur et emmagasinent à leur tour la chaleur du fluide, ils sont ensuite stockés dans un réservoir de sels chauds. Au coucher du soleil, le circuit s'inverse et les sels chauds circulent, à travers l'échangeur, vers le réservoir à sels froids. La chaleur est ainsi cédée au fluide caloporteur (autour de 500°C) et permet d'alimenter une turbine pour produire de l'électricité (figure III.14) [34].

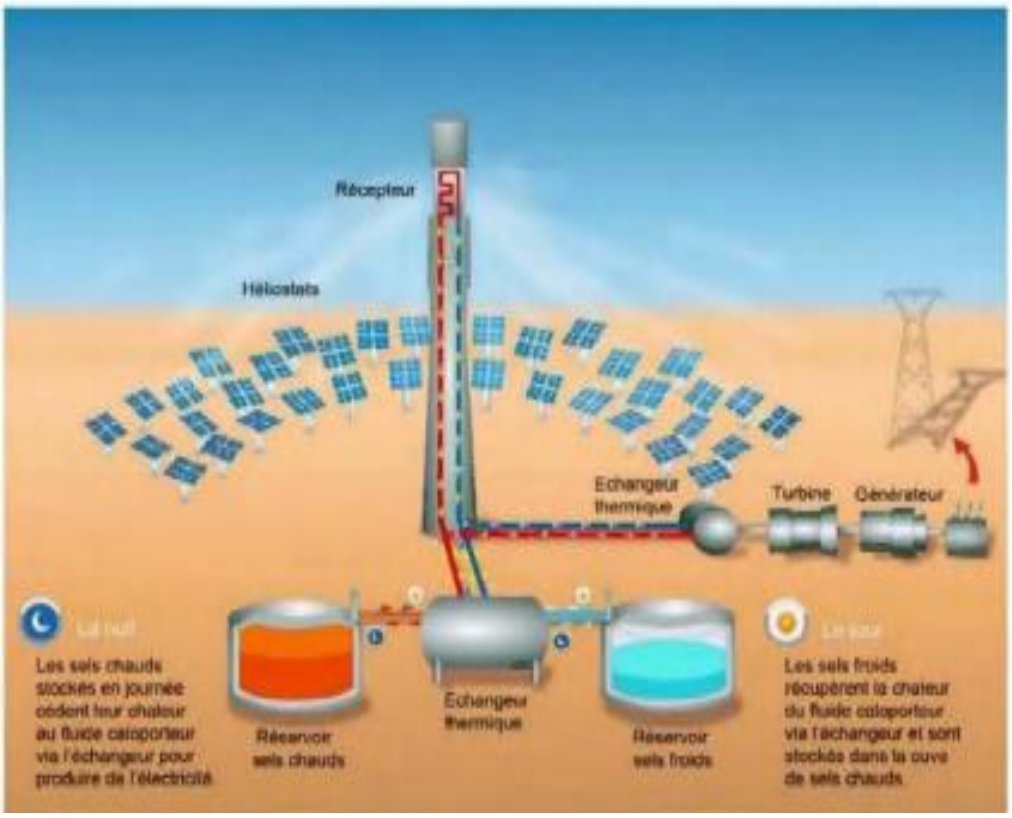


Figure III.12: stockage thermique par chaleur sensible [11].

	Densité énergétique en kW/m^3	Capacité en MWh	Puissance en MW	Rendement (en %)	Durée de vie	Coût $/kWh	Maturité
STEP	1 à 300 bars	1000-10000	100-2000	0.8	11000 cycles	Très faible	Elevée
CEAS	12 à 100 bars	1-200	15-200	0.5	11000 cycles	Faible	Moyenne
Thermique à turbine	200	1000-100000	10-100	0.6	-	Très faible	Prototype
Hydrogène et PAC	0.3-06	0.01-10000	001-1000	0.6	25 ans	Elevé	Moyenne
Flow Batterie	33	0.01-480	100	0.7	4000 cycles	Moyen	Moyenne
Batterie	20-120 kwh/kg	0.01-1000	001-10	0.8	500-4000 cycles	Moyen-faible	Elevée
SMES	1-5kwh/kg	3.10^{-4}-3.10^{-3}	1-3	0.9	> 10000	Elevé	Moyenne
Volant d'inertie	1-5kwh/kg	0.5-10	2-40	0.8	> 10000	Moyen-élevé	Moyenne
Super-condensateur	5-10kwh/kg	Quelques kWh	-	0.9	> 10000	Elevé	Moyenne

III.6 Tableau comparatif des différentes (principales) technologies de stockage d'énergie Electrique

III.7. Capacité de stockage installé dans le monde

Les différentes technologies de stockage en sont à différents stades de maturité et sont applicables à différentes échelles de capacité. Le stockage hydroélectrique par pompage convient aux applications à grande échelle et représente 96% de la capacité Totale installée dans le monde, avec 169 GW en exploitation (figure III.1). Le stockage d'énergie thermique occupe la seconde place avec une puissance installée de 3,2 GW, dont les 75 % sont déployés par la technologie de stockage thermique au sel fondu.

Les batteries électrochimiques sont la troisième méthode de stockage la plus Développée avec une capacité de puissance globale de 1,63 GW, suivie du stockage Électromécanique avec 1,57 GW de puissance installée globale. Finalement, une Technologie prometteuse de stockage de l'énergie est celle de l'hydrogène, qui ne Représente qu'une faible part par rapport aux autres technologies, avec près de 15 MW de capacité de stockage mondiale installée [ll5].

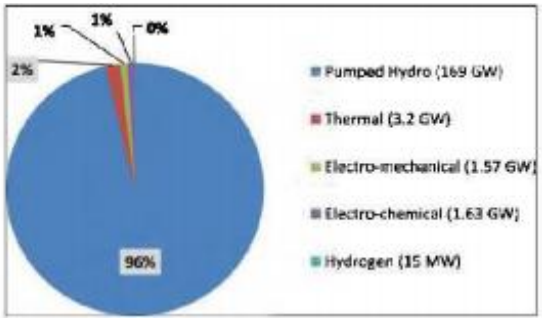


Figure III.13: Capacité énergétique mondiale de stockage d'énergie par technologique en [19].

Les parts de stockage mondiales actuelles des technologies électrochimiques et Électromécaniques sont présentées sur la (figure III.15). En ce qui concerne le stockage Électromécanique, les volants d'inertie et l'air comprimé sont les technologies de Stockage les plus développées.

Les batteries au lithium-ion représentent la plus grande Part de la puissance installée, avec 1,12 GW en fonctionnement. Les autres technologies électrochimiques sont les batteries à base de sodium, les condensateurs, Les batteries au plomb-acide, les batteries de flux et les batteries au nickel [41].

III.8 Choix du système de stockage

À l'échelle mondiale, divers types de projets de stockage d'énergie ont été exécutés à différentes échelles. Une analyse détaillée de la base de données de projets de stockage d'énergie globale du « Département of Energy » des États-Unis [105] révèle que la technologie de stockage d'énergie par batterie compte le plus grand nombre de projets opérationnels lié aux énergies renouvelables (ER) (

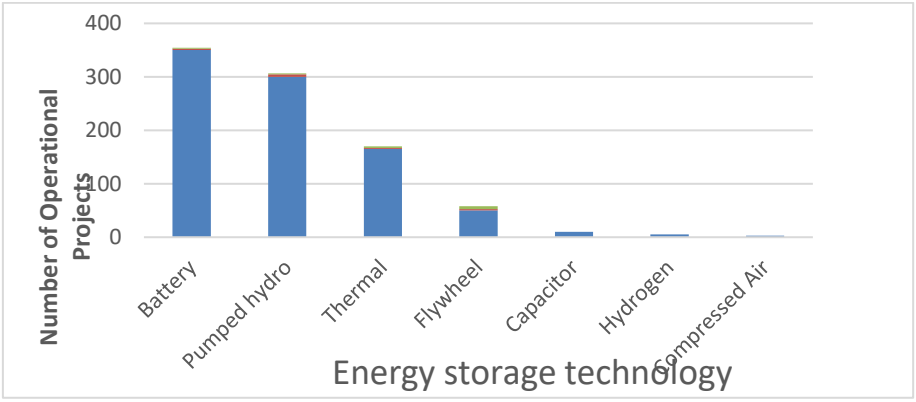


Figure III.14: différents systèmes de stockage les plus rependus dans les (ER) [15]

III.8.1 Critère de choix [112]

Le système de stockage a pour rôle d'assurer une permanence de production dans un réseau électrique (Système hybride) et d'absorber les pics de consommation afin d'éviter les déséquilibres énergétiques. La sélection d'un mode de stockage dépend de plusieurs critères parmi lesquels on cite :

- Densité de puissance et densité d 'énergie ;
- Coûts d'investissement ;
- Rendement ;
- Cycle de vie ;
- Taille d'application

Maturité technologique et adaptation à l'environnement etc. Un critère de choix selon un indice de performance allant de 0 à 1 a été élaboré par le centre de recherche et d'expertise (Techno Centre éolien, Nergica) basé en Gaspésie les-de-la-Madeleine (Québec). Cet indice est matérialisé par 1 pour très bonne performance et 0 pour mauvaise performance [43]. Il s'agit de la réscente étude effectué (sur les différents systèmes de stockages électriques) par le centre de recherche canadien basé en Gaspésie.

III.9 Conclusion

Le réseau électrique fait face à de grands défis en matière de transmission et de distribution d'énergie pour répondre à la demande avec des variations quotidiennes et saisonnières imprévisibles. Le stockage de l'énergie électrique (SEE) est reconnu comme un potentiel technologique majeur pour relever ces défis, selon lequel l'énergie est stockée dans un certain état, en fonction de la technologie utilisée, et convertie en énergie électrique en cas de besoin. Cependant, la grande variété d'options et les matrices de caractéristiques complexes rendent difficile l'évaluation d'une technologie de stockage spécifique pour une application particulière. Il existe différents types de méthodes de stockage, dont certaines sont déjà

utilisées, tandis que d'autres sont encore en développement. Nous avons examiné les principales caractéristiques des différentes techniques de stockage d'électricité et leur domaine d'application.

Chapitre IV

BATTERIE LITHIUM ION

IV.1. Introduction

Les accumulateurs électriques, également appelés batteries rechargeables, sont des systèmes conçus pour stocker l'énergie électrique sous une forme différente. Ils reposent sur une technique de conversion d'énergie réversible.

Les accumulateurs sont parmi les principaux mécanismes d'alimentation des appareils autonomes. Ils se distinguent par leur capacité à stocker l'énergie électrique produite par une réaction chimique, pour la réutiliser ensuite sous forme de courant électrique.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une vue d'ensemble des batteries rechargeables, y compris leurs principes de fonctionnement, leur composition, leurs différentes gammes, ainsi que quelques notions fondamentales essentielles.

IV.2. Qu'est qu'une batterie Lithium Ion?

Ce type de batterie, appelé lithium-ion, produit de l'électricité grâce à un échange réversible d'ions lithium entre deux électrodes : une anode en graphite chargée négativement et une cathode en oxyde métallique chargée positivement. Ce processus se déroule dans un électrolyte liquide contenant un sel conducteur, à travers lequel les ions lithium se déplacent entre l'anode et la cathode.

Pour isoler les substances chimiques de l'anode et de la cathode, la batterie est équipée d'un film séparateur en polyéthylène ou en polypropylène, comme illustré dans la figure I.1. Ce film ne permet le passage que des ions de lithium mobiles. Il est également possible de modifier chacun des composants et des matériaux de la batterie pour en changer les caractéristiques [4].

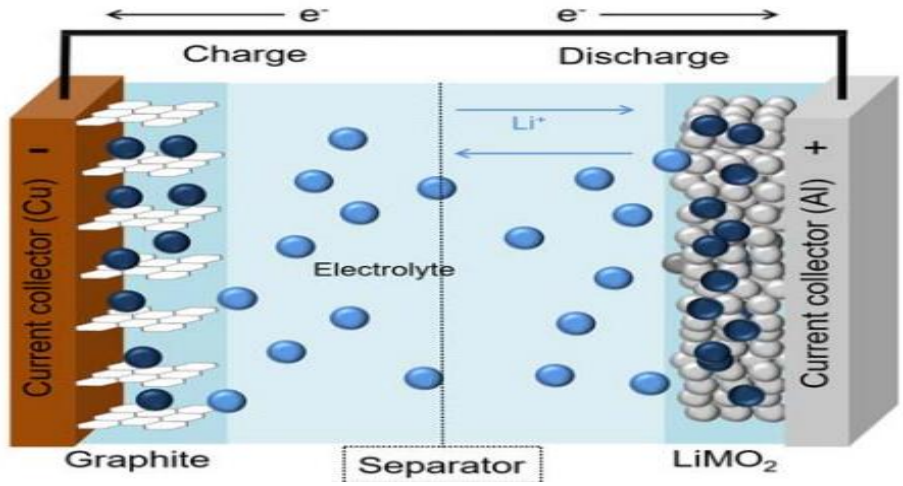


Figure IV.1: Schéma d'une présentation chimique

Les indices sur la figure sont :

Cu : Copper, $_{29}$**Cu** ;

Al : Aluminium, $_{13}$**Al** ;**LiMO$_2$** :
Lithium-rich layered oxide materials.

IV.3.1. Avantages :

Les batteries lithium-ion sont considérées comme l'une des meilleures solutions de stockage d'énergie pour les appareils mobiles et les systèmes embarqués, grâce à plusieurs avantages importants :

- **Haute densité énergétique** : Les batteries lithium-ion offrent une grande quantité d'énergie par unité de volume, ce qui les rend adaptées aux appareils compacts et mobiles.
- **Haute énergie massique** : Elles fournissent une importante quantité d'énergie par unité de masse, ce qui les rend idéales pour les appareils légers et portables.
- **Pas d'effet mémoire** : Contrairement à certaines autres technologies de batteries, les batteries lithium-ion ne sont pas affectées par l'effet mémoire, ce qui signifie qu'elles peuvent être rechargées partiellement sans perdre de capacité.
- **Faible autodécharge** : Elles présentent un faible taux d'autodécharge, conservant ainsi leur charge pendant de longues périodes sans nécessiter de recharge fréquente.
- **Pas de maintenance nécessaire** : Grâce à leurs caractéristiques physiques et chimiques, les batteries lithium-ion ne nécessitent pas de maintenance régulière, ce qui les rend pratiques pour une utilisation quotidienne.

En conclusion, les batteries lithium-ion sont un choix idéal pour répondre aux besoins énergétiques des appareils mobiles et des systèmes embarqués, en raison de leurs avantages significatifs [5].

IV.3.2. Inconvénients

Les batteries lithium-ion présentent également quelques inconvénients :

- **Coût initial élevé** : Les batteries lithium-ion sont généralement plus coûteuses à l'achat que d'autres types de batteries, bien que leur prix ait considérablement diminué au fil des ans.
- **Sensibilité à la chaleur** : Les batteries lithium-ion peuvent être endommagées par des températures extrêmes, ce qui peut réduire leur durée de vie et leur efficacité.
- **Risque d'incendie** : Bien que rare, les batteries lithium-ion peuvent prendre feu ou exploser si elles sont mal utilisées, surchargées ou endommagées.
- **Performance réduite par temps froid** : Les batteries lithium-ion peuvent voir leur performance réduite par temps froid, ce qui peut limiter leur utilisation dans des environnements froids.

Malgré ces inconvénients, les batteries lithium-ion restent largement utilisées en raison de leurs nombreux avantages et de leur adaptabilité à une grande variété d'applications [5].

IV.2. Caractéristiques positives

La batterie Lithium Ion est composée de lithium l'élément le plus petit et le plus léger de tous les métaux. Sur le tableau I.1, on présente quelques dérivés de cet élément.

Nom chimique	Matériel	Abréviation	Applications
Lithium cobalt oxyde	$LiCoO_2$	LCO	Téléphones portables, ordinateurs portables, caméras
Lithium manganèse Oxyde	$LiMn_2O_4$	LMO	Outils électroportatifs, EVs, médicales, amateurs
Lithium iron. phosphate	$LiFePO_4$	LFP	Outils électroportatifs, EVs, médicales, Amateurs
Lithium nickel Manganèse cobalt oxyde	$LiNiMnCoO_2$	NMC	Outils électroportatifs, EVs, Médicales, Amateurs
Lithium nickel cobalt Aluminium oxyde	$LiNiCoAlO_2$	NCA	EVs, Stockage en réseau
Lithium titanate	$LiTi_5O_{12}$	LTO	EVs, Stockage en réseau

Tableau IV.1: Technologie des batteries Lithium

Selon le tableau périodique de Mendeleïev, le lithium est l'élément chimique ayant le numéro atomique 3 et le symbole Li. Il se trouve dans le premier groupe du tableau périodique. Le lithium se distingue par ses excellentes propriétés électrochimiques par rapport à son poids et est un élément métallique alcalin solide. Cependant, pour des raisons de sécurité, les batteries ne contiennent pas de lithium sous forme métallique, mais sous forme ionique, car le lithium métallique est instable [6]. Charge et décharge Le processus de chargement s'effectue généralement en deux étapes :

- La première étape se réalise avec un courant limité C / 2 à 1 ° C (C est la capacité de la batterie). Cette étape permet une charge rapide d'environ 80% ;
- La deuxième étape s'effectue avec une tension constante et des valeurs des courantsdécroissantes afin de se rapprocher de 100% de charge environ deux heures ou plus.

  La recharge se termine lorsque le courant de recharge chute en dessous d'une valeur appelée « courant de fin de charge ».

Généralement, la tension de fin de charge des batteries Lithium Ion peut être de l'ordre de 4,2 Volts ; elle est mentionnée par les fabricants suivants une spécification. Pour la tolérance de ces accumulateurs, elle est couramment admise à la valeur de ± 0,05 Volts par élément.

Les batteries Lithium Ion sont très sensibles à la surcharge, elles demandent toujours une protection lorsqu'elles sont connectées en série (batterie d'un ordinateur portable, alimentation d'une perceuse etc.). Les chargeurs doivent être de bonne qualité pour respecter cette tolérance.

NB : Il est important de respecter la fiche technique fournie par le constructeur qui indique les conditions de charge de la batterie (Tolérance, Courant de charge, Courant de fin de charge, etc.).

IV.2.1. Durée de vie des batteries Lithium Ion

La durée de vie d'une batterie Lithium-Ion est influencée par plusieurs facteurs:

Température : Les températures élevées accélèrent la dégradation chimique des cellules de la batterie, réduisant ainsi leur durée de vie. Il est recommandé de maintenir les batteries à une température ambiante de 20-25°C. Les températures extrêmement basses peuvent également affecter les performances de la batterie.

Taux de charge/décharge : Charger et décharger une batterie à des taux élevés (rapidement) peut provoquer un stress thermique et électrique sur les cellules, réduisant leur durée de vie. Il est conseillé de charger à des courants modérés et de décharger lentement.

Profondeur de décharge : Décharger régulièrement une batterie à des niveaux très bas (profonde décharge) peut réduire sa capacité de stockage et endommager les cellules de manière permanente. Une pratique courante est de maintenir le niveau de charge entre 20% et 80% pour prolonger la durée de vie.

IV.2.2. Cycles de la batterie :

Chaque cycle de charge et de décharge contribue à l'usure de la batterie. Un cycle complet est défini comme une charge à 100% suivie d'une décharge à 0%. Cependant, une décharge partielle, comme de 50% à 100%, compte comme un demi-cycle. La capacité des batteries Lithium-Ion diminue progressivement avec chaque cycle de charge. Après environ 300 à 500 cycles, la capacité peut chuter à environ 80% de sa capacité initiale.

Charge partielle : Les cycles de charge partielle sont préférables car ils sont moins stressants pour les cellules par rapport aux cycles complets. Par exemple, charger une batterie de 25% à 75% (50% de cycle) est moins dommageable qu'une charge de 0% à 100%.

IV.2.3. Décharge profonde « totale interdite »

En fait, il est préférable de recharger la batterie avant qu'elle ne descende en dessous du seuil de sa capacité « de 5% ». Dans le cas des batteries Lithium Ion, cela se passe à environ 2,5 Volts selon les fabricants et dans le cas des batteries Lithium Polymère la valeur 3,30 Volts implique une décharge profonde si la tension est inférieure à cette valeur, on a une décharge complète. Lorsque la batterie atteint plusieurs fois le niveau de décharge profonde, un processus d'inversion se produit à l'intérieur de la batterie, il se peut qu'un de ces éléments constructeurs « Cellule élémentaire » soit endommage et arrêter

la recharge.

Les causes de décharge totale peuvent être associées à un chargeur défectueux ou à de vieilles batteries.

NB : Il existe un risque d'incendie lors du chargement de batteries fortement déchargées.

IV.2.4. L'effet mémoire

L'effet mémoire est un phénomène physico-chimique qui affecte les performances des batteries rechargeables si elles ne sont pas totalement déchargées avant d'être rechargées. Il concerne principalement les technologies Ni-Cd (nickel-cadmium) et NiMH (nickel-hydrure métallique) [5].

L'effet mémoire réduit la quantité d'énergie que les batteries rechargeables peuvent récupérer en raison de la diminution de la capacité nominale des batteries rechargeables.

Quand les batteries rechargeables ne peuvent plus charger comme il l'était à l'origine, cela donne l'impression qu'elles sont capables de stocker moins d'énergie, mais réellement, c'est la restitution qui pose un problème simplement ; l'énergie n'est plus accessible de la même manière en raison de l'effet mémoire.

IV.2.5. Formes de cellules Lithium Ion

Afin de renforcer la capacité ou la tension d'une batterie Lithium Ion, les cellules constructrices sont additionnées en série ou en parallèle. Actuellement, les formats de cellules au Lithium Ion les plus populaires sont : les cellules cylindriques, les cellules «POUCH» (en formede poches) et les cellules prismatiques.

IV.2.6. Cellules cylindriques

Les cellules cylindriques au lithium-ion sont réputées pour leur coque résistante et leur capacité à permettre des ajustements de formules chimiques tout en conservant le même contenant. Ce modèle d'emballage est le plus répandu, principalement en raison de sa facilité de fabrication, de sa grande stabilité mécanique, et de son mécanisme de décompression efficace. Le cylindre tubulaire de ces cellules est capable de supporter des pressions internes élevées sans se déformer. Un autre avantage notable est l'intégration d'un Dispositif de Protection Thermique (PTC) dans le commutateur. Lorsqu'il est soumis à un courant excessif, le polymère conducteur du PTC surchauffe, augmentant ainsi sa résistance, ce qui permet de protéger efficacement contre les courts-circuits [6].

Une fois le court-circuit supprimé, le PTC se refroidit et revient à l'état initial « conducteur ».La figure si dessous présente quelques cellules cylindriques au lithium.



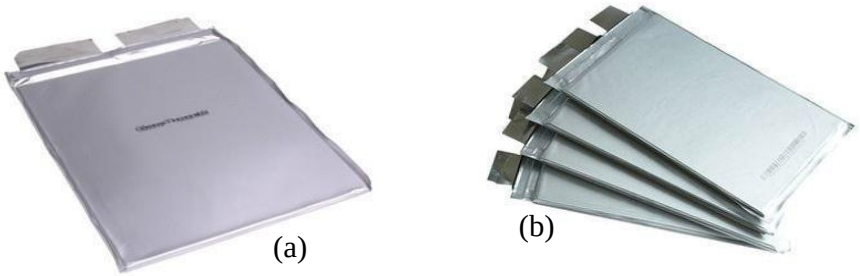
(a) (b) (c) (d) (e)

Figure IV. 2 : Schéma d'une présentation chimique

No table of figures entries found.V.2 Gamme des cellules cylindriques : (a) LTO 66160 2.4 v 30Ah cellule au Lithium titanate 2.3 ; (b) Lifepo4 au lithium 38120 10Ah ; (c) GTF 26650 batterie 3.7 v 12 Ah ; (d) Lithium ER14250 3.6V 1200mAh ; (e) INR 18650-2

IV.2.7. Cellules « POUCH »

Les cellules lithium-ion de type "poche" se présentent sous forme de petites pochettes, offrant une solution simple, flexible et légère. Leur dimension peut varier considérablement en fonction du choix de conception du fabricant. Généralement constituées de lithium polymère, ces cellules se distinguent par leur adaptabilité et leur légèreté, en faisant un choix privilégié pour de nombreuses applications..



(a) (b)

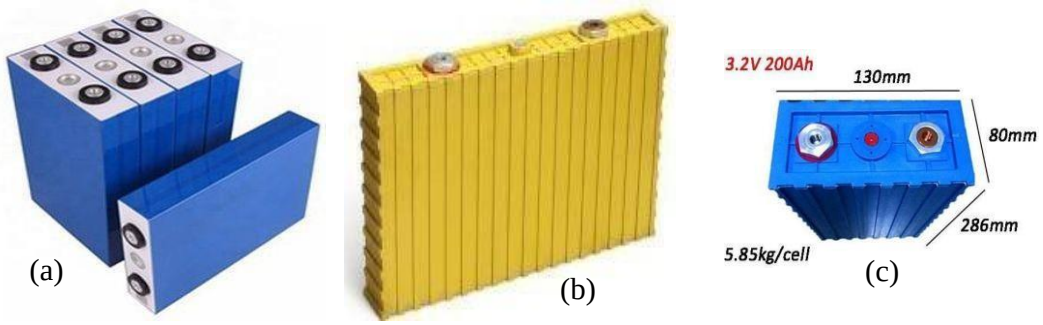
Figure IV. 3 Cellules «POUCH» : (a) LTO 2.4V 26AH Lithium Titanate ; (b) Lithium Ion 3,7 V 32Ah Lithium Ion pour EV, E-Bike

Les cellules lithium-ion de type "poche" se distinguent par leur haute densité d'énergie et leur coût relativement bas en termes d'enveloppe. Sur le marché, elles sont disponibles dans une plage de capacités allant de quelques centaines de mAh à 40 Ah ou plus, bien que les fabricants proposant des capacités plus élevées soient rares. Cependant, elles présentent l'inconvénient d'une enveloppe fragile et peuvent subir un gonflement de l'ordre de 8 à 10% après 500 cycles d'utilisation. Ces cellules sont particulièrement prisées pour les applications à haute puissance (haute tension et faible puissance) ou nécessitant une empreinte réduite, comme les motos ou les véhicules électriques.

IV.2.8. Cellules prismatiques

Les cellules Lithium Ion prismatiques se trouvent sous des enveloppes solides et très résistantes qui sont généralement en plastique ou en aluminium. Les bornes de ces batteries sont souvent de forme à vis ou à souder.

Comme avantage elles sont caractérisées par une grande capacité pour chaque cellule ; une seule cellule pouvant atteindre 300 Ah, est un point fort pour créer des batteries à fortes capacités pour le secteur industriel, évitant ainsi les cellules montées en dérivation et augmentant la sécurité de toutes les batteries.



(a) (b) (c)

Figure IV.4 : Cellules prismatiques

(a) Cellules de batteries prismatiques ultra minces LiFePO4 3.2V 60Ah de lithium pour UPS/EV/inverseur;

(b) 3-2V-400Ah-Thundersky-Lifeypo4-Lithium-Ion « Stockage d'énergie solaire » ;

(c) ; 3.2V LiFePO4 batterie 200Ah pour stockage d'énergie solaire et véhicules électriques

La forme et la nature de la borne de cette gamme batteries « à vis » simplifient l'assemblage et facilitent leurs remplacements. Comme point faible, les cellules au lithium prismatiques possèdent une densité énergétique légèrement inférieure à cause du type ducontenant.

L'utilisation de ces batteries au lithium est fortement connue dans le secteur industriel et automobile.

IV.3. Normalisation

Dans notre travail, l'objectif vise à réaliser un chargeur pour les batteries Lithium Ion et précisément la catégorie des cellules cylindriques pour cela une synthèse de standard doit être faite afin d'englober toutes les informations qui contournent cette catégorie. Pour la plupart des cellules rechargeables, des normes ont été élaborées par la commission électrochimique internationale (CEI) sous le N°600086 [7, 8].

Pour le cas des cellules cylindriques et comme titre d'exemple chaque cellule possède un nom qui commence par des lettres qui signifient un code donné par le constructeur afin de préciser le nom du fabricant dont ces dernières sont suivies par cinq chiffres où les deux premiers nombres déterminent le diamètre en millimètres et les deux qui suivent, expriment la longueur de la cellule en millimètres où le cinquième chiffre présente le type de l'enveloppe « 0 pour la catégorie cylindrique ».

Afin d'éclaircir cette nomination, la cellule « US18650 » présente une signification parmi plusieurs, pour le constructeur SONY de par les lettres **US**. Le chiffre 18 exprime un diamètre dela cellule qu'est de 18 millimètres avec une longueur de 65 millimètres et une nature cylindrique par le chiffre zéro.

IV.4. Propriétés fondamentales

La batterie fournit l'énergie qu'elle stocke avec une certaine efficacité. Le choix de la capacité et du type de batterie sont des considérations importantes lors de la conception d'un système en particulier s'il s'agit d'un système autonome.

IV.4.1. Loi de Peukert

En 1897, le scientifique allemand W. Bukert exprime la capacité d'une batterie en fonction de son niveau de décharge par la **loi Peukert**, Lorsque ce taux augmente, la capacité de la batterie diminue bien que sa capacité réelle à tendance à rester constante. La loi de Peukert calcule l'énergie totale fournie par une batterie idéale et est représentée par l'équation suivante :

$$C_P = I^k.t \quad (1)$$

Où :

C_p : est la capacité selon Pouket, exprimée en ampères heure,I :

est le courant de décharge, exprimé en ampères ;

k : présente la constante de Peukert, nombre sans dimension ;

T : est le temps de décharge en heure.

IV.4.2. Capacité de Peuk ert « Taux C »

D'après Peukert, la capacité de la batterie est mesurée pour un taux de décharge de 1 Ampère. La capacité nominale d'une batterie est la quantité d'énergie qu'elle peut fournir. Elle est exprimée en ampère-heure (Ah). Cette grandeur C_n d'une batterie est donnée pour un temps de décharge en h : C5 pour 5 h, C10 pour 10 h ou C100 pour 100 h. Plus la décharge est rapide, plus la capacité de la batterie est faible « loi de Peukert » [9].

Pour la capacité utile d'une batterie c'est l'énergie que peut être fournie sans se détériorer. Cette capacité dépend du taux de décharge acceptable pour chaque technologie. Pour le cas d'une batterie lithium, le taux de décharge peut atteindre 90 %. « La capacité utile d'une batterie de 100 Ah est de 90 Ah ».

IV.4.3. État de charge

L'état de charge de la cellule, SoC « en anglais **S**tate **o**f **C**harge » il présente le grandeur qui indique la quantité de charge qui peut être utilisée à un instant donné par rapport à la capacité de la batterie « le niveau de charge d'une batterie ». Cette indication est donnée en pourcentage.

Le moyen le plus simple pour observer l'état de charge de la batterie lors de son utilisation est de surveiller le courant en l'intégrant durant l'utilisation de la batterie. Cette intégration donne directement la quantité de charges électriques injectées ou prélevées de la batterie permettant de déterminer avec précision le SoC de la batterie.

Il existe plusieurs manières pour surveiller l'état de charge (SoC) ou la profondeur de décharge d'une batterie. Certaines méthodes nécessitent un équipement quelquefois complexe [10].

IV.5. Sécurité de la batterie au Lithium Ion

Au niveau de l'unité élémentaire d'une batterie Lithium Ion, la cellule dispose de plusieurs systèmes de protections internes ; on peut citer.

- Le (PTC) en anglais « **P**ositive **T**hermal **C**oefficient » : actuellement, la plupart des cellules cylindriques commercialisées en ont. Ce PTC à la forme d'anneau est constitué d'un polymère irradié (polyéthylène) laminé avec un métal. Dans le cas de surcharge, ce polymère chauffe, change de phase, résiste et limite ainsi le passage du courant [11].

- Le (CID) en anglais « **C**urrent **I**nterrupt **D**evice » [12]: certaines cellules intègrent ce dispositif qui interrompt le courant si la pression du gaz dans la cellule dépasse les limites spécifiées.

- Système d'arrêt dit « SHUTDOWN » ou « coupe circuit », disposé aux cellules possédant des

séparateurs tri-couches où, ce système empêche les courants élevés.

- L'évent, système de soupape qui présente l'organe mécanique, s'ouvre lorsque la pression augmente brusquement quand celle-ci dépasse une pression critique afin d'éviter l'explosion de la cellule.
- Fusible thermique remarqué dans les cellules de grande capacité coupe le courant lorsque la température dans les cellules dépasse le seuil.

Sur l'ensemble d'une batterie Lithium il se trouve que le pack exige un autre dispositif de sécurité et de contrôle, il s'agit de (BMS) en anglais « **B**attery **M**anagement **S**ystem » [13]. Ce système de contrôle surveille et garde la batterie dans un état de fonctionnement optimal. Il gère quelques fonctions, parmi lesquelles on cite :

- Protection générale du pack ;
- L'acquisition et la communication de mesures ;
- L'équilibrage de niveau de tension entre les cellules ;
- Optimisation de l'énergie ;

IV.6. Fonctionnement d'une batterie Lithium-Ion

La batterie lithium-ion est basée sur l'échange réversible de l'ion lithium entreL'électrode positive et l'électrode négative. La tension nominale d'un élément Li-ion est de 3,6 V ou 3,7 V (selon la technologie).

Lorsqu'une industrie fabrique une batterie Li-ion, elle assemble d'abord unebatterie déchargée comme le montre la figure suivante *[28]* :

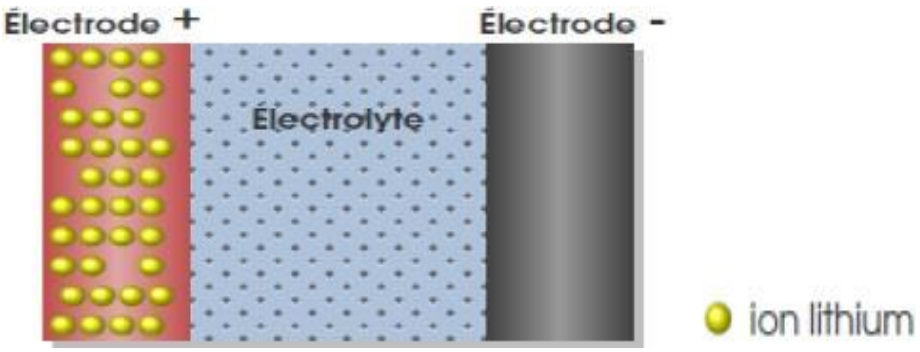


Figure IV.5 : Batterie déchargée (état initial)

IV.6.1. Processus de charge :

L'accumulateur est chargé par un courant constant, ce qui va causer le déplacement desélectrons de l'anode (borne positive dans ce cas) vers la cathode (borne négative) [29]. Le processus est arrêté lorsque l'anode atteindra un excès d'électrons et la cathode un manque d'électrons. La Figure IV.6 illustre le

processus de charge d'une cellule électrochimique.

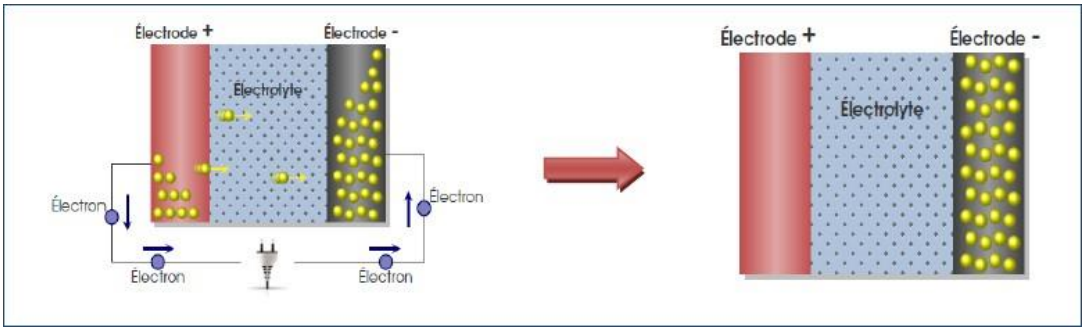


Figure IV.6 : batterie en charge

Prenant l'exemple d'une technologie lithium basée sur l'oxyde d'Olivine lithiné (LiFePo4) pour l'électrode positive et sur le graphite (LiC6) pour l'électrode négative [30] :

- Réaction en charge à la cathode peut s'exprimer selon l'équationSuivante :

$$\mathbf{LiFePO\,4} \longrightarrow \mathbf{xL}i^{+} + xe^{-} + Li_{1-x}FePO4 \qquad (1.4)$$

- Réaction en charge à l'anode peut s'exprimer selon l'équation suivante :

$$C_6 + xLi^{+} + xe^{-} \longrightarrow Li_xC6 \qquad \mathbf{(1.5)}$$

- **La réaction globale peut s'exprimer selon l'équation suivante :**

Lors de la charge, des ions lithium Li+ sont extraits du LiFePO4 et des ions Fe2+ sont oxydés en Fe3+. Les ions lithium sont alors transportés à l'anode par l'électrolyteoù ils sont réduits pour reprendre un aspect métallique (Lithium métal), tandis que lesélectrons sont insérés dans le graphite.

La Charge des batteries Li-ion s'effectue par la méthode (CC/VC) en deux phases:

- En début de charge et durant toute la première phase de la charge, le courant est limité (phase CC) et la tension augmente petit à petit jusqu'àatteindre la tension régulée.
- A partir de là on atteint la deuxième phase dite de remplissage (phase VC)la tension reste parfaitement stable et le courant diminue pour se rapprocher de 100 % de charge.

La charge est terminée lorsque le courant passe en dessous du seuil de décharge(2.1V). Il est alors impératif de couper la charge, car les accus au Lithium ne supportent absolument pas la surcharge.
La tension de fin de charge des accumulateurs Li-ion peut être de 4,1 V ou 4,2 V suivant la spécification du fabricant de l'accumulateur [20].

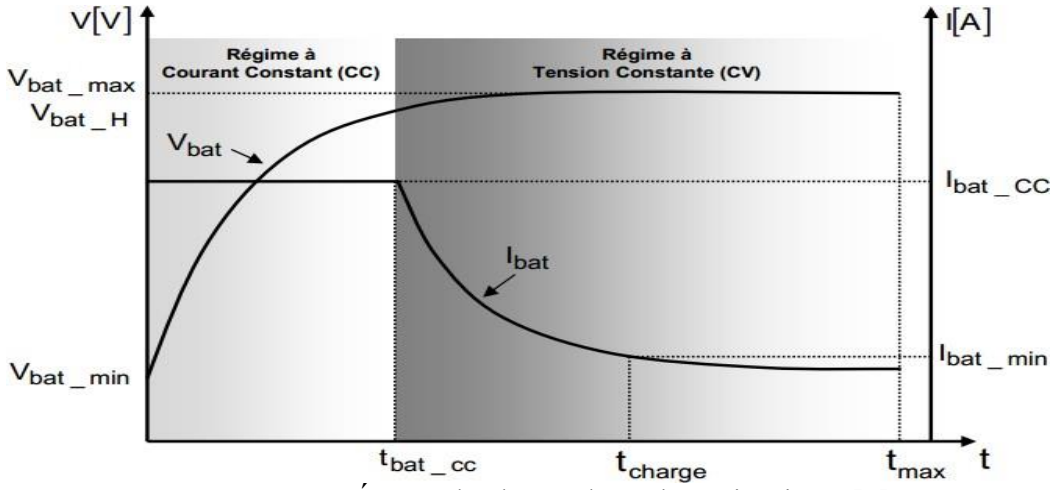


Figure IV.7 : Étapes de charge d'une batterie Li-ion [3].

IV.7. Conclusion

Dans le chapitre, on a essayé d'entourer notre sujet avec une recherche bibliographique générale afin de projeter la lumière sur les accumulateurs tel que les cellules au Lithium Ion. On espère que cette étude sera comme support théorique pour d'autres sujets.

Dans le dernier chapitre, nous développerons un algorithme de gestion pour l'ensemble du système hybride. Cet algorithme nous permettra de superviser les flux d'énergie, de protéger les batteries contre la surcharge et la décharge profonde, ainsi que d'assurer la protection des charges en cas de demande non satisfaite en énergie. Nous examinerons les différences entre les systèmes hybrides avant et après l'ajout de supercondensateurs

Chapitre V

Etude et gestion d'énergie d'unsystème hybride

V.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous avons donné les modèles mathématiques de notre système . nous allons synthétiser les commandes nécessaires et présenter les résultats obtenus après la simulation de chaque composant de ce système hybride isolé. Ce chapitre est organisé de la manière suivante : Dans une première partie, nous devons maximiser la production des sources d'energie renouvlable (PV et éolien) en appliquant les algorithmes MPPTet La deuxième partie présenter les résultats de stockage avent de connecter le supercondonsateur et après l'avoir connecté

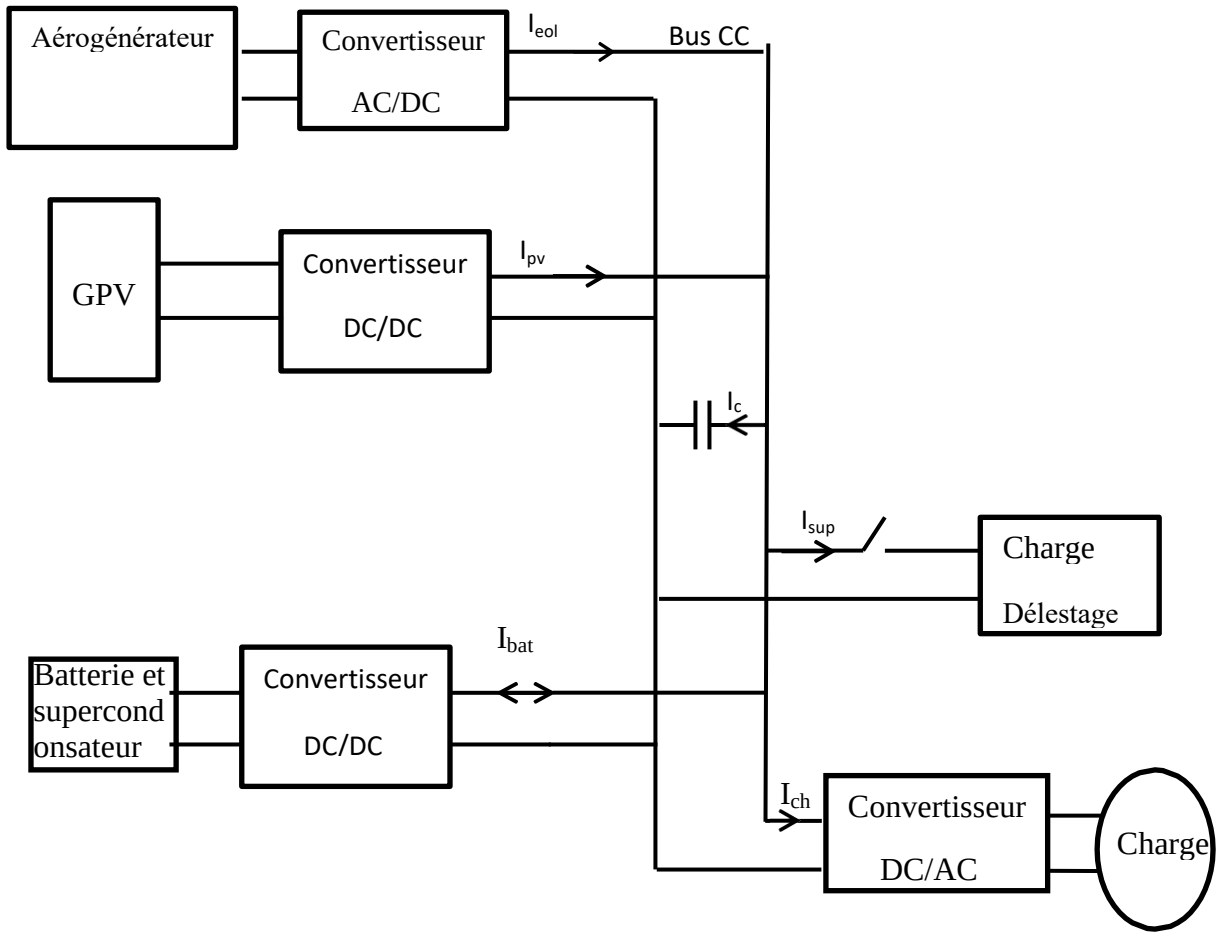


Figure 1 Système hybride (éolien /photovoltaïque) avec stockage

V.2. Le bus continue

Le bus continu assure le couplage entre les sources d'énergie, les batteries et lacharge, Le bus continu est composé d'une capacité, qui a pour but de filtrer la tension et chaque convertisseur statique qui est reliés avec lui exerce une influence par le courant (figure V.2)

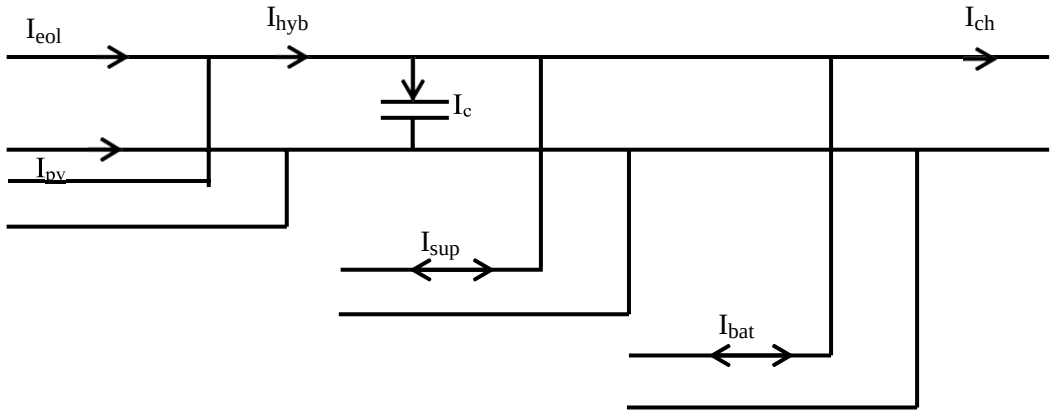


Figure V.2 : Schéma du bus continu

D'après la figure (V.2), on a :

$$\mathbf{I_{hyb} = I_{eol} + I_{pv}} \quad \text{(V.1)}$$

$$\mathbf{I_{ch} = -I_{hyb} - I_c - I_{sup} - I_{bat}} \quad \text{(V.2)}$$

Avec : $\mathbf{I_c = \frac{dV_{dc}}{dt}}$

I_{pv} : le courant du générateur photovoltaïqueI_{eol} :
le courant du générateur éolien
I_{bat} : le courant de charge/décharge de la batterieI_{ch}
: le courant de la charge

Il est important de fixer la tension du bus continu V_{dc} pour assurer lefonctionnement correct des organes qui sont attachés à lui.

V.3. Dimensionnement du système hybride

Dans une installation hybride, le concepteur du système doit associer les sourcesd'énergie et les moyens de stockage de manière à satisfaire deux objectifs :

- Assurer une production suffisante pour couvrir l'ensemble de la consommation électrique des utilisateurs ;
- Garantir le coût minimum de l'énergie consommée par les utilisateurs.

Cette phase de conception s'appelle le dimensionnement, il s'agit notamment de déterminer quelle sera la puissance et la capacité des différents éléments. Cependant, à cause de la nature intermittente des sources renouvelables, le dimensionnement de l'installation s'avère difficile et doit, en toute rigueur, dépendre à la fois des caractéristiques météorologiques du lieu d'installation tout en intégrant le profil de consommation.

L'énergie mensuelle produite par le système par unité de surface est notée : $E_{pv,m}(kWh/m^2)$ pour le photovoltaïque et $E_{el,m}(kWh/m^2)$ pour l'éolien et $E_{L.m}(kW/m^2)$ représente l'énergie mensuelle demandée par la charge (ou m=1,…, 12, représente le mois de l'année). La surface totale des générateurs $A_{pv,tot,m}$ et $A_{el,tot,m}$ par un mois (m) nécessaire pour assurer la couverture totale (100%) de la charge ($E_{L,m}$) est exprimée par:

- Pour le générateur photovoltaïque :

$$\mathbf{A_{pv,\,tot,m}} = \frac{\mathbf{E_{L,m}}}{\mathbf{E_{pv,m}}} \quad \text{-} \qquad \text{(V.4)}$$

- Pour le générateur éolien :

$$\mathbf{A_{eol,tot,m}} = \frac{\mathbf{E_{L,m}}}{\mathbf{E_{el,m}}} \quad \text{-} \qquad \text{(V.5)}$$

L'énergie totale produite par les deux générateurs photovoltaïque et éolien qui alimentent la charge est exprimée par [09] :

$$E_{pv,m}.A_{pv,h,m} + E_{el,m}.A_{el,h,m} = E_{L,m} \qquad \text{(V.6)}$$

Avec :

$$E_{pv,m}.A_{pv,h,m} = f.E_{L,} \qquad \text{(V.7)}$$

$$E_{el,m}.A_{el,h,m} = (1-f).E_{L,} \qquad \text{(V.8)}$$

Où : f représente la fraction de la charge alimentée par la source photovoltaïque et (1-f) celle alimenté par la source éolienne. La valeur limite f=1 indique que la totalité de la charge est alimentée par la source photovoltaïque, quant à f=0 correspond à une alimentation 100% éolienne.

Dans cette étude la méthode de dimensionnement est basée sur la moyenne mensuelle annuelle.

Le calcul de la taille des générateurs photovoltaïques et éoliens ($A_{pv,h}, A_{el,h}$) est établi à partir des valeurs moyennes annuelles de chaque contribution nommée $\overline{E_p}$, $\overline{E_{el}}$. De la même manière, la charge est représentée par la valeur moyenne mensuelle annuelle. Par

conséquent, les surfaces des deux générateurs photovoltaïque est éolien sont données par [09] :

$$Apv,h = \frac{f \cdot \overline{EL}}{\overline{Epv}}$$

Le nombre de générateur photovoltaïque et éolien à retenir, se calcul selon la surface del'unité du système en prenant la valeur entière du rapport par excès.

$$N_{pv} = ENT\left[\frac{A_{pv,h}}{A_{pv}}\right] \quad (V.11)$$

$$N_{el} = ENT\left[\frac{Ael,h}{A_{el}}\right] \quad (V.12)$$

La surface retenue pour chaque générateur est :

$$A_{pv,h,r} = N_{pv}.A_{pv} \quad (V.13)$$

$$A_{el.h.r} = N_e \,.\, A_{el} \quad (V.14)$$

V.4. Détermination de la taille des batteries

La capacité des batteries de stockage est déterminée à partir de la charge demandéemaximale $E_{L,m,max}$ (charge mensuelle maximale) **[09]**, elle est exprimée par :

$$C_{bat,tot} = \frac{N_{ja} \cdot E_{L,m,max}}{V_{bat} \cdot P_{DD} \cdot \eta_{bat} N_m} \quad (V.15)$$

Où :

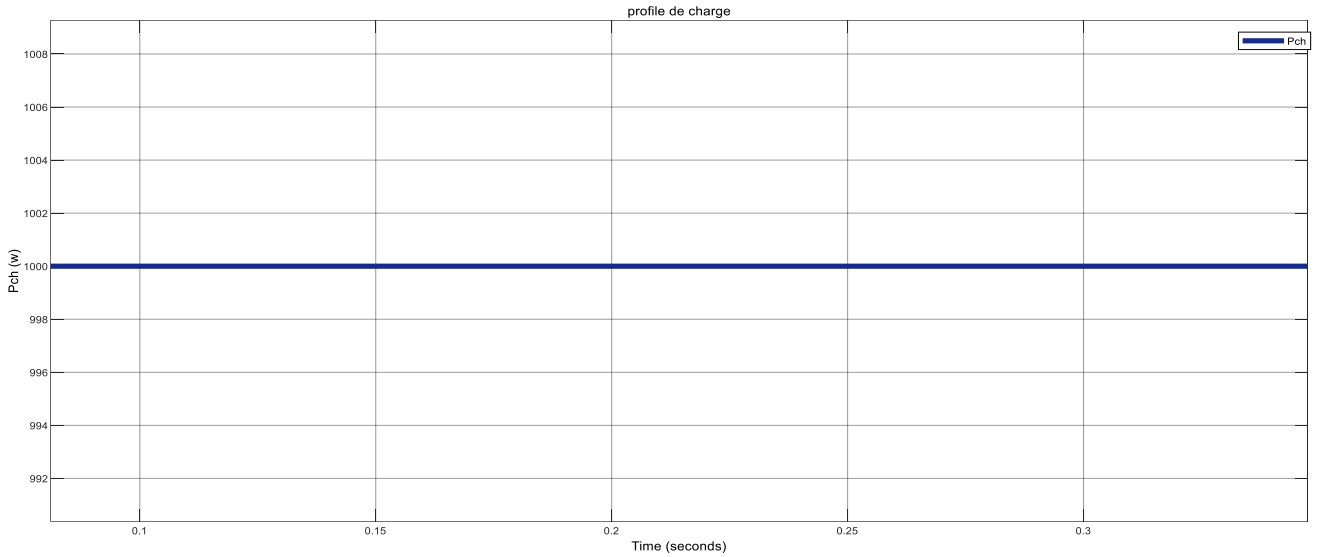
- ✓ N_{ja} : nombre de jours d'autonomie
- ✓ $E_{L.m.max}$: charge consommée
- ✓ P_D : profondeur de décharge
- ✓ η_{bat} : Le rendement de la batterie
- ✓ V_{bat} : tension des batteries
- ✓ N_m : le nombre de jours du mois qui présente la charge maximale (31 jours).

Le nombre de batteries à retenir est déterminé à partir de la capacité d'une unité debatterie, en prenant la valeur entière du rapport par excès.

$$N_{bat} = ENT\left[\frac{C_{bat,tot}}{C_{bat,u}}\right] \quad (IV.16)$$

V.5. Charge à satisfaire par le système hybride

Nous simulons la consommation de l'utilisateur par des demandes en puissance, ce qui revient à utiliser une charge fix. Le profil de charge à alimenter en électricité est illustré dans la figure (V.3).

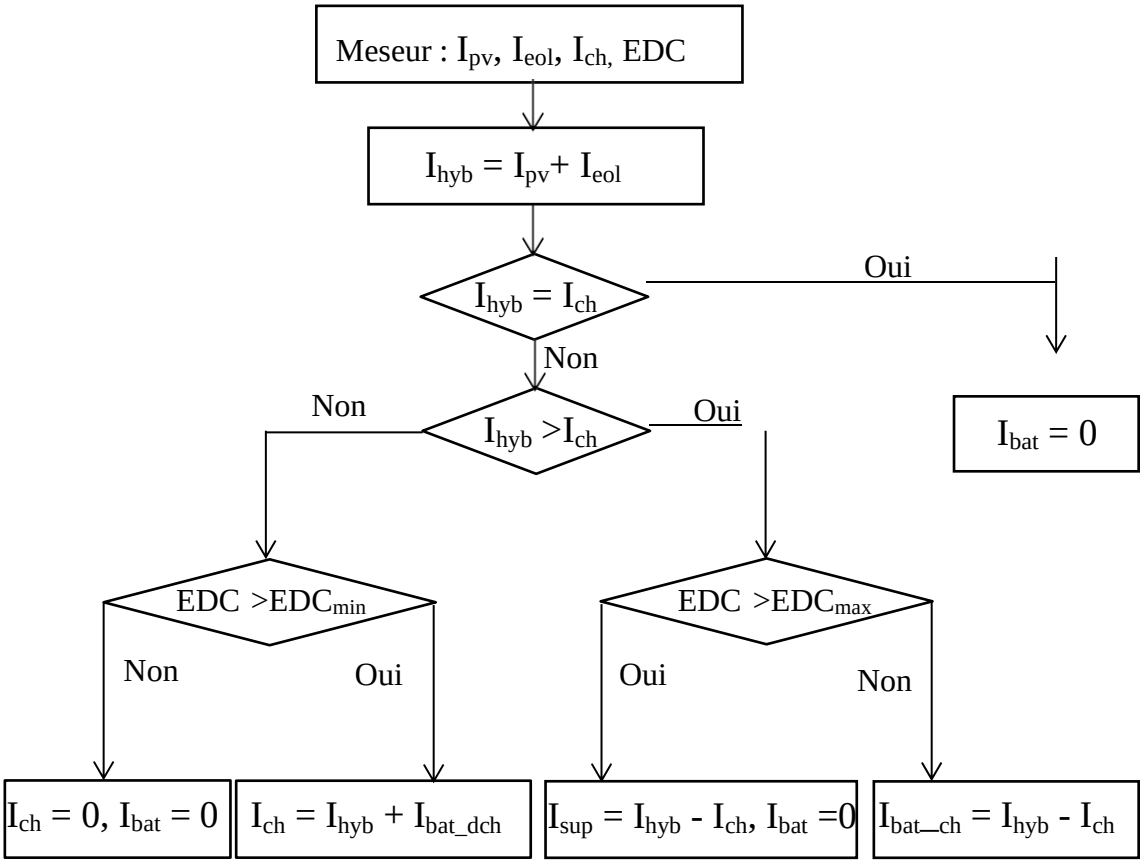


FigureV.3 : Profil de puissance demandée par la charge

V.6. Organigramme de gestion d'énergie

Au cours de son utilisation, une batterie placée dans un réseau hybride autonome peut subir : Les surcharges pour un dépassement de son EDC à EDC_{max}, les décharges profondes pour une décroissance de son EDC au-dessus de EDC_{min}. De plus, l'alimentation de l'installation peut être interrompue en cas d'absence des énergies renouvelables ou de décharge de la batterie. Partant de ces remarques, nous proposons un algorithme de gestion d'un réseau hybride autonome. Cet outil doit :

- ✓ Empêcher les décharges profondes de la batterie.
- ✓ Empêcher les surcharges de la batterie.
- ✓ Déconnection de la charge dans le cas de l'insuffisance de la production et décharges profondes de la batterie.

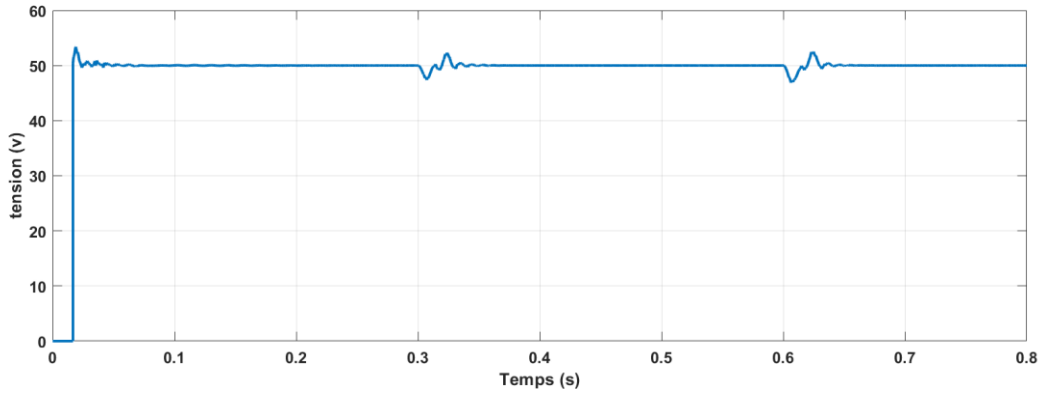


FigureV.4 : Organigramme de gestion d'énergie du système hybride avec stockage par batteries

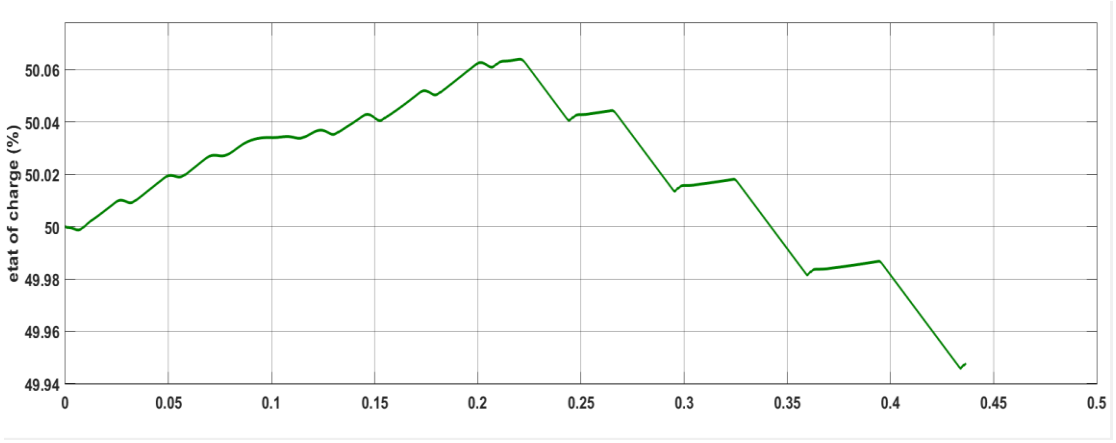
V.7. Résultats de la simulation et discussion

On a procédé à la simulation du système d'énergie hybride (éolien – photovoltaïque)à pas fixe pendant 2.4s qui correspond réellement à 24 h avec le changement d'échelle. Afin de montrer l'efficacité de l'algorithme de gestion dans les différents cas possible ; on a fait varier le profil de la charge, ainsi que l'ensoleillement et la vitesse du vent, misà part la température à la surface des PV qui est considérée constante (T =25°C).

La figure (V.6), représente la tension du bus continu. Après un régime transitoire, la tension du bus est gardée constante.

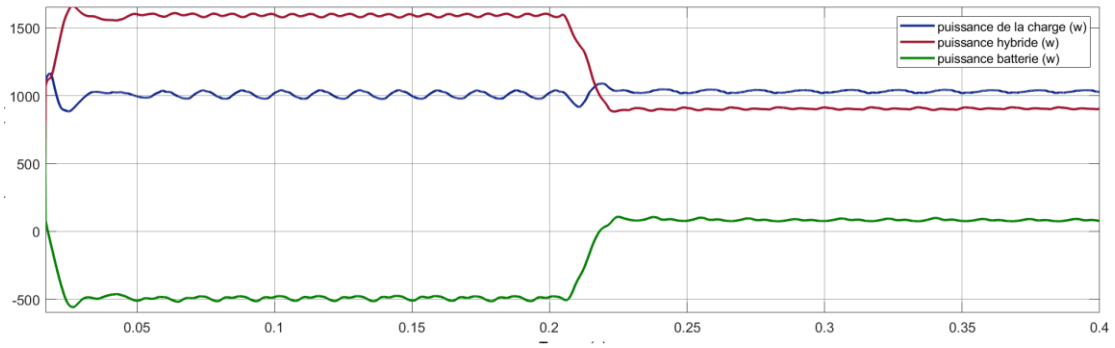


FigureV.5 : Tension du bus continu



FigureV.6: Etat de charge des batteries

La figure (V.6) représente le courant de délestage, on déduit que ce courant existe seulement si le courant généré par le system globale et supérieur à celle demandée par la charge et EDC = EDC_{max}.



FigureV.7 : Allure des puissance Pbat, Phyb, Pch

La figure (V.7), représente le puissance total fourni par le système hybride (P_{hyb}), la puissance demander par la charge (P_{ch}) et la puissance de la batterie (P_{bat}).

D'après ces résultats, nous pouvons déduire les interprétations suivantes sur le fonctionnement par phase du système hybride avec l'algorithme de gestion :

Phase 1 (t=0-0,2 h) : À ce stade, la puissance fournie par le système hybride est supérieure à la puissance demandée par la charge (figure V.7). Cela signifie que le système hybride est capable de répondre pleinement aux besoins énergétiques de la charge, avec un surplus d'énergie. Ce surplus est utilisé pour recharger les batteries rapidement, car l'état de charge (EDC) est inférieur au maximum autorisé (EDCmax) de 90 %. Cette recharge rapide permet de s'assurer que les batteries sont prêtes à être utilisées lorsque les sources d'énergie renouvelable ne sont pas suffisantes.

.**Phase 3 (t=0,2-0,4 h)** : Dans cette phase, la puissance fournie par les sources photovoltaïques et éoliennes est largement inférieure à celle demandée par la charge (figure V.7). Cela signifie que le système hybride ne peut pas fournir toute l'énergie nécessaire à la charge à partir des sources renouvelables seules. Par conséquent, il est nécessaire de puiser dans les batteries pour combler le déficit. Comme l'état de charge (EDC) est supérieur au minimum requis (EDCmin) (figure V.6), les batteries commencent à se décharger rapidement pour répondre aux besoins énergétiques de la charge. Cette décharge rapide est essentielle pour garantir une alimentation continue de la charge, démontrant ainsi l'importance des batteries dans le système hybride pour assurer une fourniture d'énergie stable pendant les périodes de faible production d'énergie renouvelable.

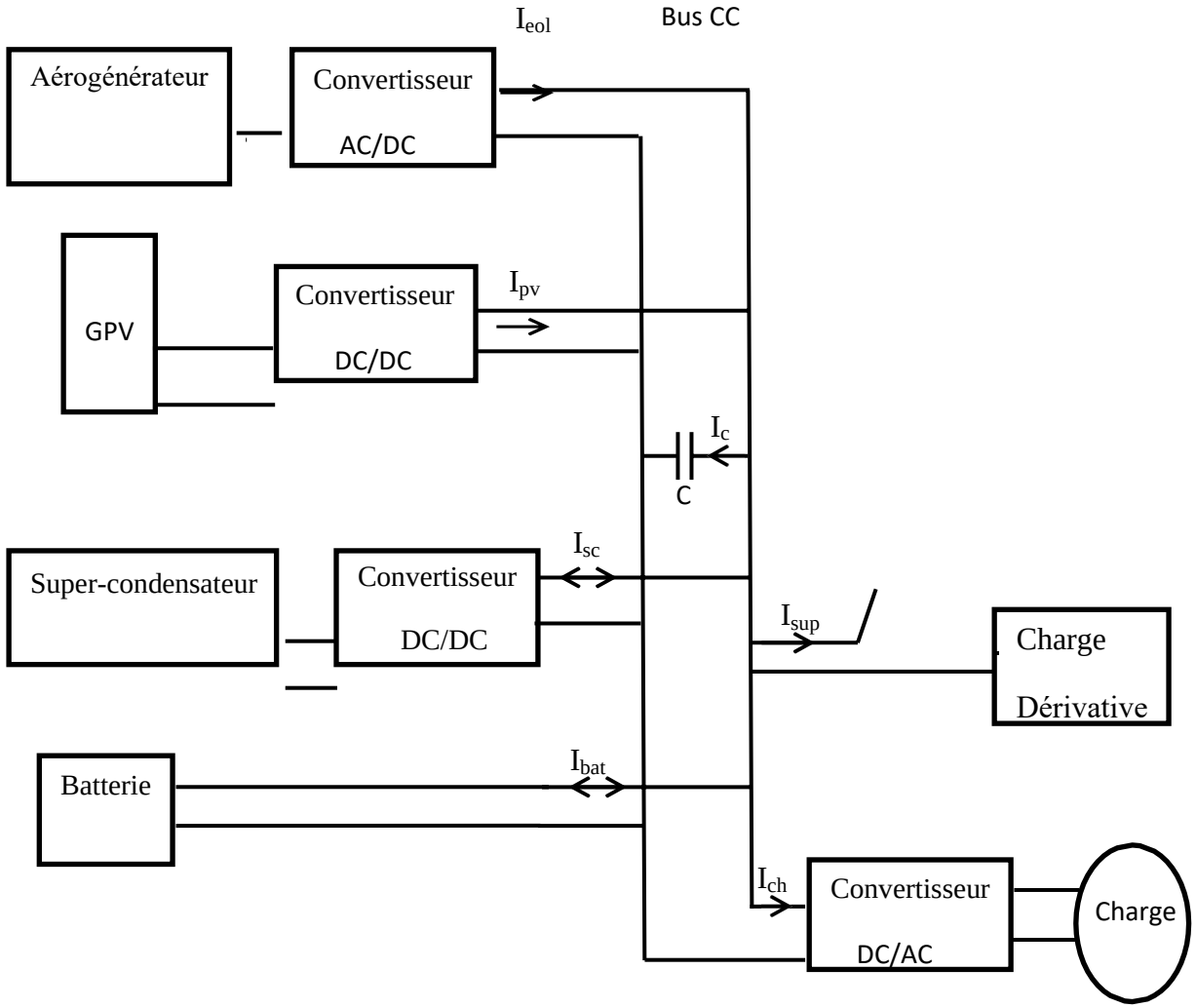
V.8. Application des super condensateurs pour le stockage des énergies renouvelables

Les sources d'énergies renouvelables comme l'éolien, le solaire, nécessitent un besoin d'importants de dispositifs de stockage d'énergie. En raison de leur haute fiabilité, efficacité et de durée de vie, les super condensateurs sont particulièrement idéals pour des applications liées aux énergies renouvelables. Souvent, les sources d'énergie renouvelables sont situées dans des régions éloignées. Les considérations de conception sont basées sur la fiabilité et l'absence des opérations de la maintenance. Les super condensateurs sont fondamentalement considérés comme des dispositifs sans entretien qui ne nécessitent pas de tests coûteux et onéreux comme des batteries, qui nécessitent un suivi d'évaluation de leur état de charge.

V.9. Configuration du système avec stockage hybride

Les tests de performances effectués précédemment ont montré les limites des batteries en présence de pics de puissance. Pour remédier à ce problème, nous proposons l'utilisation d'une source

hybride de stockage dont les éléments ont une fonction spécifique, soit en énergie, soit en puissance. Les batteries assurant la fonction « énergie » tandis que les super-condensateurs ayant pour fonction « puissance ». Le schéma synoptique du système d'énergie hybride éolien-photovoltaïque avec stockage hybride est représenté par la figure (V.8).



FigureV.8 : Système hybride (éolien /photovoltaïque) avec stockage hybride (batterie/super-condensateur)

Suivant cette configuration, les super-condensateurs sont connectées au bus continu à travers un convertisseur bidirectionnel pilotant leurs charges et décharges.

Comme précédemment, les batteries ont été dimensionnées pour satisfaire aux besoins journaliers de consommation, évalués à 0.00027 kWh. En outre, les super-condensateurs seront dimensionnés pour fournir la puissance nécessaire pendant les phases transitoires(15kW).

L'énergie stockée dans les super-condensateurs est fournie à une source de tension continue, généralement un bus de tension DC, sur lequel sont connecté des charges. Cette

D'après la figure (V.8), on a :

$$I_{hyb} = I_{eol} + I_{pv} \quad (V.17)$$

$$I_{ch} = -I_{hyb} - I_c - I_{sup} - I_{bat} - I_{sc} \quad (V.18)$$

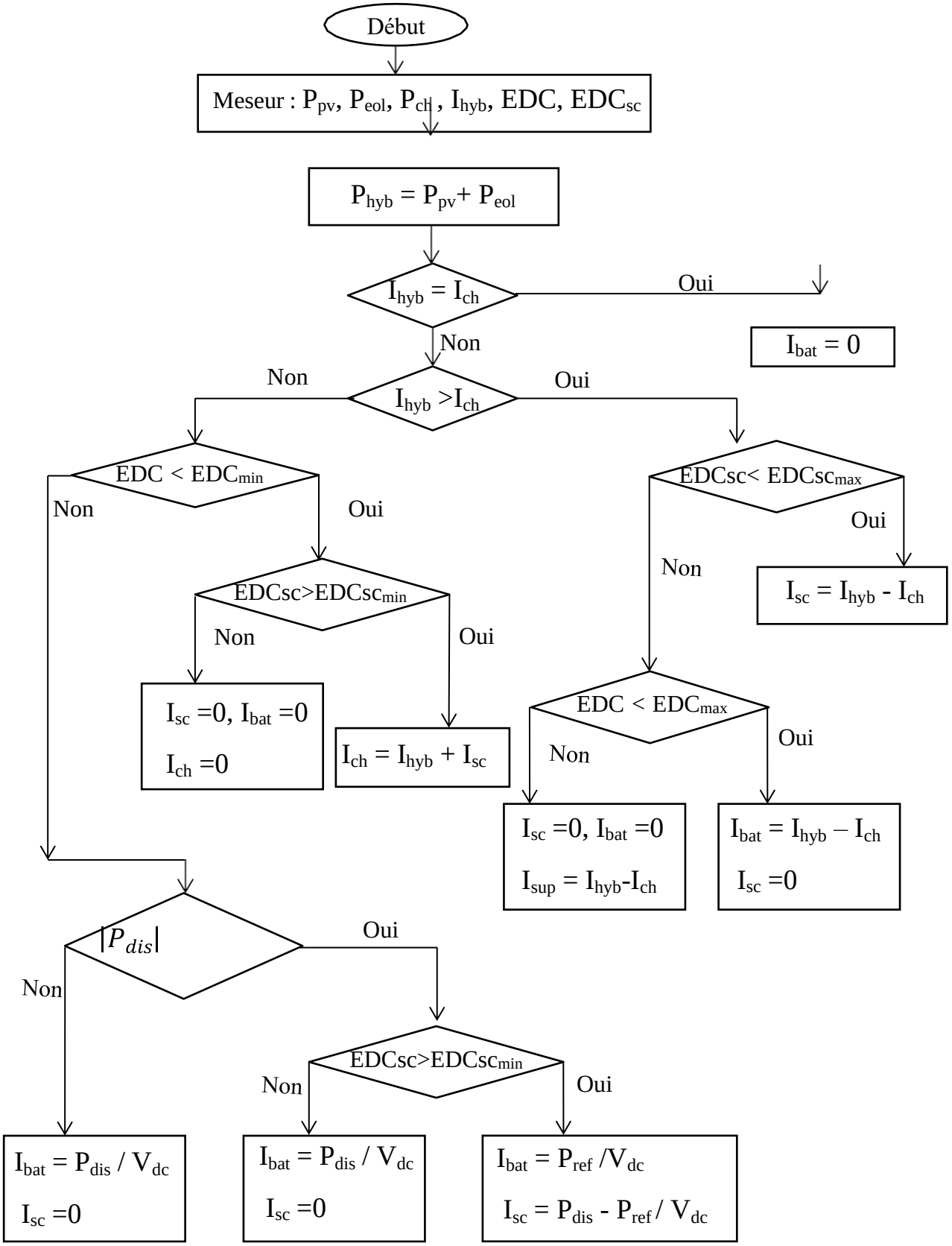
V.9.1 Gestion d'énergie du système hybride avec stockage hybride

Nous proposons un nouveau module de gestion de l'énergie qui tenir compte de la présence des super-condensateurs (Figure. IV.9). Une gestion convenable pour un mini réseau hybride autonome, avec stockage hybride permettant de calibrer l'exploitation de ces sources.

L'organigramme de gestion d'énergie dispache le courant de charge entre les batteries et les super-condensateurs et pendant la décharge permet de limiter le courant aux bornes des batteries en connectant les super-condensateurs. Cette connexion se fait suivant une puissance de référence P_{ref}. D'une façon plus détaillée, voici comment fonctionne l'organigramme de gestion d'énergie:

- Alimentation du consommateur uniquement par le SEH si l'énergie provenant de SEH est égale à la demande de consommateur ;
- Lorsque le SEH produit assez d'énergie pour satisfaire aux besoins de la charge, le surplus sert à recharger les super-condensateurs en priorité puis les batteries ;
- La recharge des batteries et des super-condensateurs s'arrête lorsqu'elles sont à pleine charge et le surplus d'énergie sera diriger vers un charge de délestage
- Déconnecter les batteries et les super-condensateurs si l'énergie est insuffisante (P_{hyb} < P_{ch}, EDC < EDC_{min} et EDC < EDC_{min}) ;
- Les batteries débitent sur la charge lorsque l'énergie de SEH est insuffisante (P_{hyb}<P_{ch}) ;
- Lorsque la puissance demandée par la charge est supérieure à un certain seuil (P_{ref}), les super-condensateurs sont mis à contribution ;

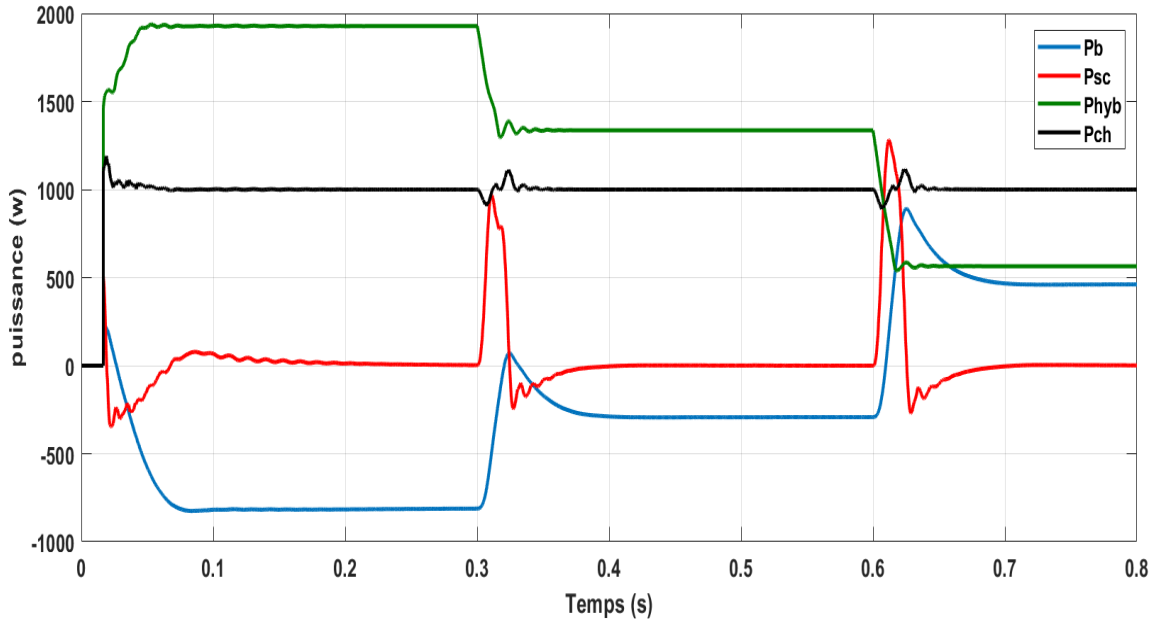
La puissance disponible (P_{dis}) est calculée en faisant la différence entre la puissance fournie par le SEH (P_{hyb}) et la puissance demandée par la charge (P_{ch}). Si la puissance disponible est positive, alors les batteries et les super-condensateurs sont mis en charge. Si P_{dis} est négative, alors l'état de charge EDC des batteries est vérifiée, si cette dernière est inférieure à EDC_{min}, alors les batteries sont déconnectées, les super-condensateurs prennent alors la relève jusqu'à ce que leur état de charge soit aussi inférieure à EDC_{scmin}. Si l'état de charge des batteries est supérieur à EDC_{min} et si P_{dis} est supérieure à P_{ref}, alors les batteries fournissent la puissance demandée, dans le cas contraire, les batteries fournissent P_{ref} et les super-condensateurs le reste de la puissance demandée à savoir P_{dis}-P_{ref}.



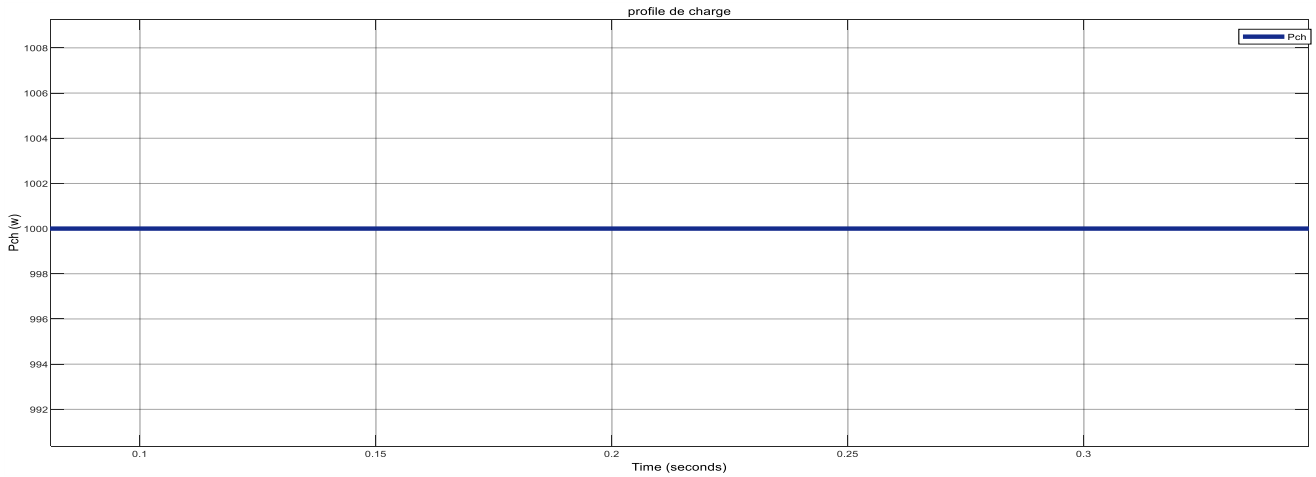
FigureV.9 : Organigramme de gestion d'énergie du système hybride avec stockage hybride (batteries / super-condensateur)

V.10 Simulation et interprétation des résultats

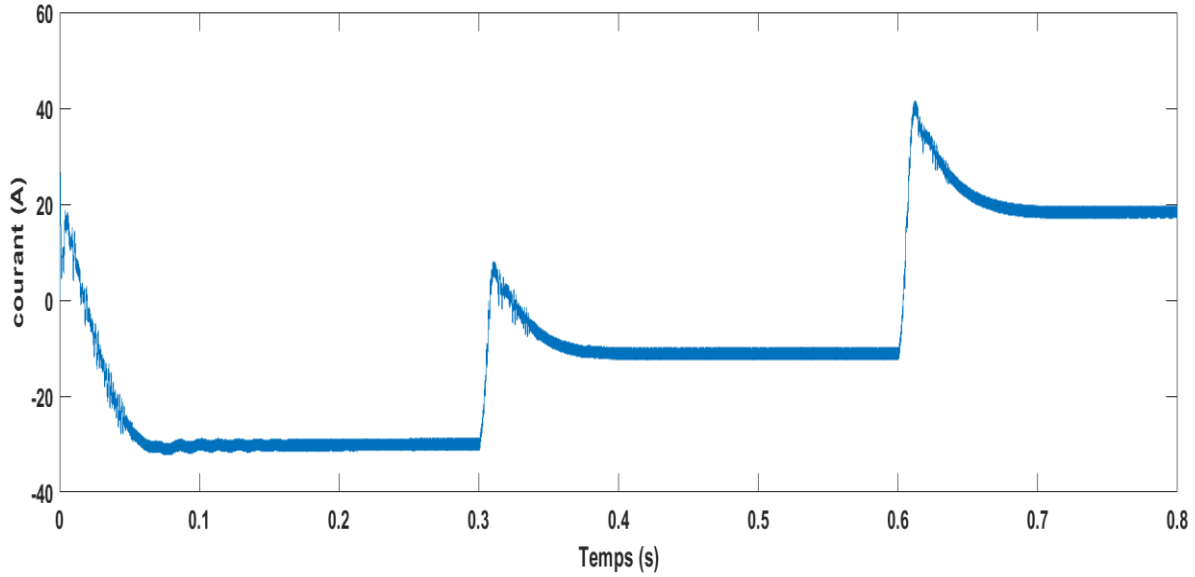
Nous avons introduit la notion de stockage hybride dans un système hybride en combinant des batteries et des super-condensateurs. L'intérêt d'une telle association permet de partager les besoins de l'utilisateur en deux catégories, besoins en puissance et en énergie. Dans l'organigramme de gestion d'énergie, nous avons défini les besoins en puissance comme étant des demandes en puissance supérieures à P_{ref}, lesquelles doivent être assurées par les super-condensateurs.



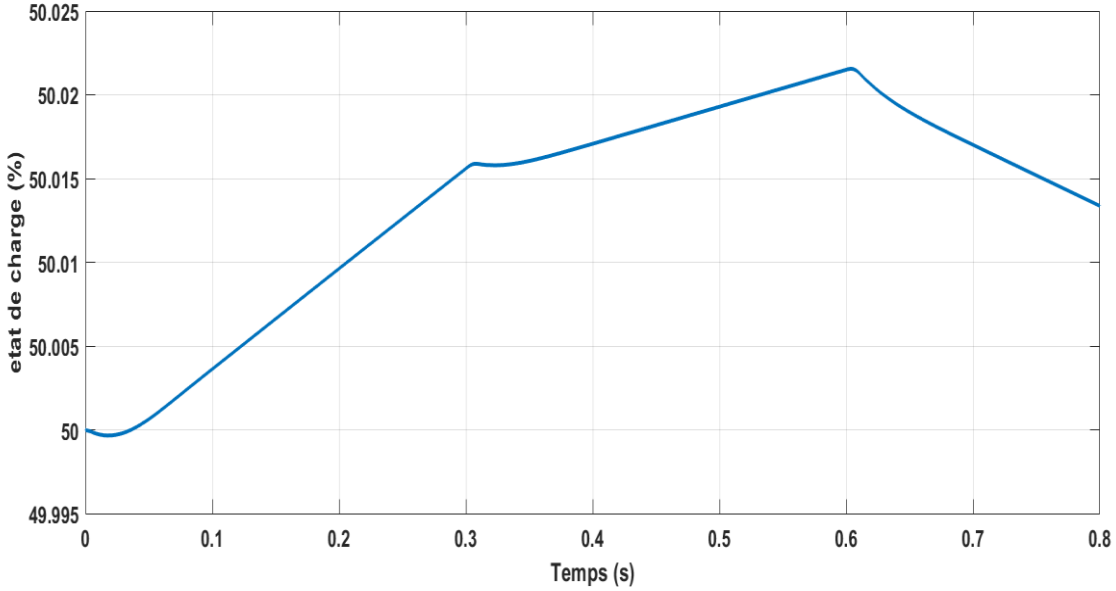
FigureV.10 : La puissance demandée par la charge avec la puissance d'autre source



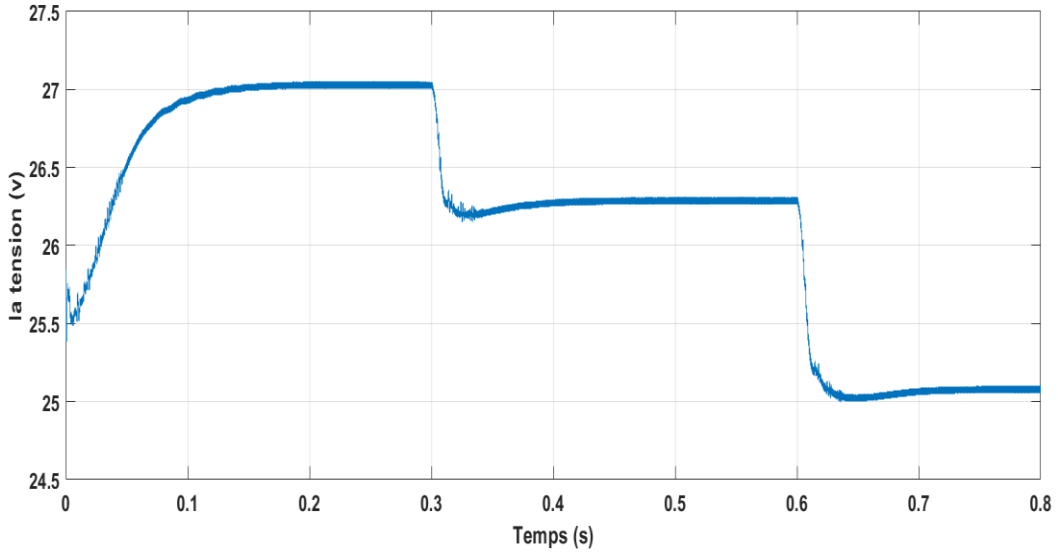
FigureV.11 : La puissance demandée par la charge



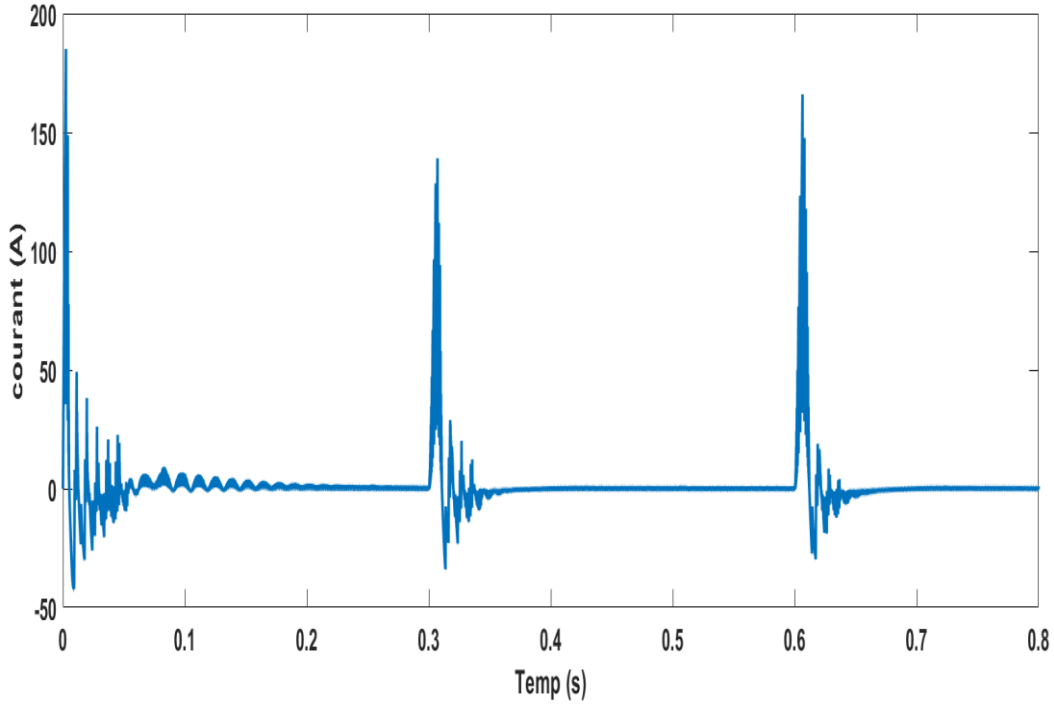
FigureV.12 : Allure du courant de la batterie



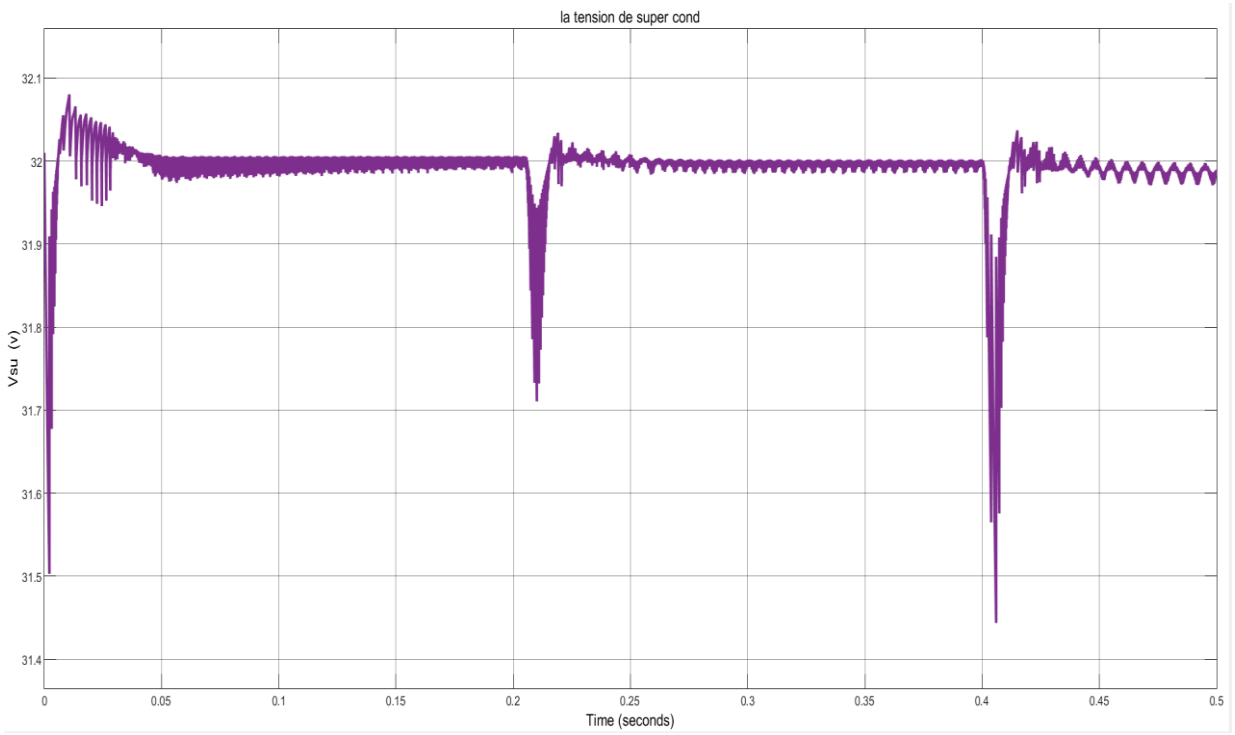
FigureV.13 : Etat de charge des batteries



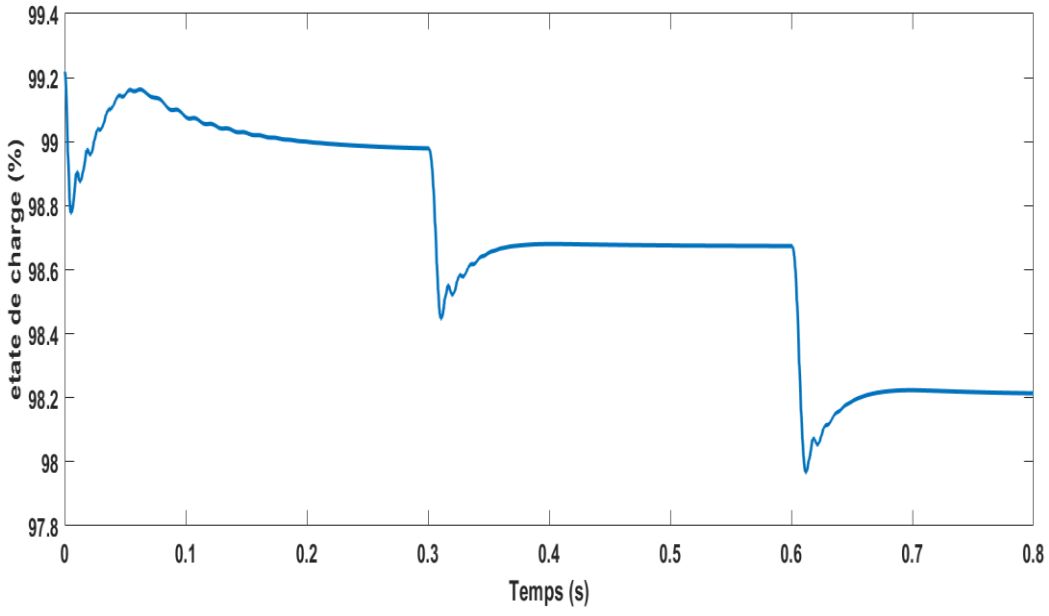
FigureV.14 : Allure de Tension aux bornes des batteries



FigureV.15 : Allure du courant des super-condensateurs



FigureV.16 : Allure de tension aux bornes des super-condensateurs



FigureV.17 : Etat de charge des super-condensateurs

Le programme de gestion gère correctement les échanges d'énergie entre le SEH, les batteries, les super-condensateurs et la charge:

Lorsque le SEH produit assez d'énergie pour la charge (figure IV.10), le surplus sert à recharger les

super-condensateurs en priorité puis les batteries (figures IV.14, IV.17).

Dans la figure (IV.15), le système montre une stratégie intelligente de gestion de l'énergie qui repose sur l'intégration entre les supercondensateurs et les batteries. Lorsqu'il y a une variation soudaine de la demande en énergie due aux fluctuations climatiques, les supercondensateurs fournissent rapidement et efficacement l'énergie nécessaire, permettant ainsi de répondre aux besoins de la charge sans délai. Lorsque les batteries sont prêtes à fournir de l'énergie, les supercondensateurs arrêtent de se charger pour éviter les pertes d'énergie.

Les batteries agissent comme une source d'énergie secondaire lorsque la production du système solaire n'est pas suffisante. Une fois que les batteries et les supercondensateurs sont pleinement chargés, leur chargement est interrompu pour éviter la surcharge, et ils recommencent à fournir de l'énergie à la charge dès que la production devient insuffisante. L'énergie excédentaire est déchargée dans une charge de délestage, ce qui contribue à une utilisation plus efficace de l'énergie et à un meilleur équilibre du système.

Phase 1 (t=0-0,2 h) : Dans ce contexte, il est important de noter que la gestion efficace de l'énergie dans un système hybride repose sur une coordination précise entre les différentes sources et les dispositifs de stockage. Lorsque les super-condensateurs prennent en charge la charge initiale pour stabiliser le système, ils le font de manière rapide et efficace grâce à leur capacité à fournir et à absorber l'énergie de manière réactive. Cette réactivité leur permet de réagir rapidement aux fluctuations de la charge, assurant ainsi la stabilité du système Une fois que le système est stabilisé et que la demande en énergie est établie, les batteries peuvent prendre le relais pour fournir de l'énergie de manière plus constante et à plus long terme. Cela permet aux super-condensateurs de se recharger pour être prêts à intervenir à nouveau en cas de besoin. Cette stratégie de gestion permet d'optimiser l'utilisation des différentes sources d'énergie et de maximiser l'efficacité du système dans son ensemble.

Phase 2 (t=0,2-0,4 h) : Au cours de cette phase, la puissance fournie par le système hybride diminue (figure V.15), tandis que la puissance demandée par la charge reste stable par rapport à la phase précédente (figure V.3). Lors de ce changement, les supercondensateurs interviennent pour répondre à ce besoin, car les batteries continuent de consommer l'énergie produite par le système hybride. Une fois que le système se stabilise, les supercondensateurs cessent de fournir de l'énergie et les batteries continuent de se charger, mais à un rythme plus lent. Cette diminution de la vitesse de charge reflète les variations des conditions environnementales qui affectent la production d'énergie des sources renouvelables

Phase 3 (t=0,4-0,6 h) : Dans la phase trois, un changement se produit où la puissance fournie par le système hybride est inférieure à celle demandée par la charge. Dans ce cas, les supercondensateurs interviennent

d'abord pour répondre aux besoins immédiats en énergie. Ils comblent l'écart jusqu'à ce que les batteries atteignent la puissance nécessaire pour fournir l'énergie requise. Une fois que les batteries atteignent le niveau de puissance nécessaire, les supercondensateurs cessent de fournir de l'énergie et les batteries prennent le relais pour alimenter la charge. Cette intervention rapide des supercondensateurs garantit la stabilité du système et la satisfaction des besoins de la charge sans interruption, illustrant l'importance du rôle complémentaire des supercondensateurs et des batteries dans le système hybride pour assurer une fourniture d'énergie stable et durable.

Tableau V.1 : Létat de chaque composant constituant le SEH

Etat		Actif	Inactif
Sources	**PV**	• Pendant un jour ensoleillé.	• Pendant la nuit ; • Pendant un jour nuageux ; • En cas de panne.
	Eolien	• Pendant la nuit ; • Pendant un jour nuageux ; • Pendant un jour ensoleillé.	• Pendant un jour ensoleillé (Vitesse du vent < à la vitesse de démarrage de l9éolien) • En cas de panne
Source Auxiliaire	**Batterie**	• Pendant l9incapacité des sources principales, par exemple lorsque : ✓ Les conditions climatiques sont faibles ; ✓ La demande de charge est supérieure à la production ; ✓ En cas de panne d9une source ou les deux sources principales ; ✓ Lorsque l 'État d e Charge est supérieur à 30%.	• Pendant le fonctionnement normal des sources principales (PV et éolien) ; • La demande de la charge égale ou inférieure à la production : P_{ch} f $P_{pv} + P_{éol}$
Charge principale	**DC & AC**	La charge est toujours connectée.	

Tableau V.8 : L'Etat de chaque composant constituant le SEH.

Cas	Période	PV	Eolien	Batterie	Description
1	Pendant un jour ensoleillé ou nuageux			**Charge**	P_{ch} - $P_{batt} = P_p + P_{éol}$
2				**Décharge**	$P_{ch} = P_{pv} + P_{éol} + P_{batt}$
3				**Charge**	P_{ch}-$P_{batt} = P_{éol}$
4				**Décharge**	$P_{ch} = P_{éol} + P_{batt}$

5				**Charge**	P_{ch} - $P_{bat} = P_{pv}$
6				**Décharge**	$P_{ch} = P_{pv} + P_{batt}$
7				**Repos**	$P_{ch} = P_{pv} + P_{éol}$
8				**Repos**	$P_{ch} = P_{pv}$
9				**Repos**	$P_{ch} = P_{éol}$
10				**Charge**	$P_{ch} = P_{pv} + P_{éol}$ $P_d = (P_{pv} + P_{éol})$ -P_{ch} -P_{batt}
11	**Pendant la nuit**			**Charge**	P_{ch} -$P_{batt} = P_{éol}$
12				**Décharge**	$P_{ch} = P_{éol} + P_{batt}$
13				**Repos**	$P_{ch} = P_{éol}$
14				**Repos**	$P_{ch} > P_{éol} + P_{pv} + P_{batt}$
		 **Fonctionnement normale (Actif)**			
		 **Inactif**			

Tableau V.2 : Différents scénarios de fonctionnement du SEH

V.11 Conclusion

Après avoir adopté un profil de consommation correspondant à celui rencontré généralement dans les sites isolés, un nombre optimal de batterie et de modules photovoltaïque a été calculé après avoir calculé la puissance horaire produite parl'aérogénérateur, et par le générateur photovoltaïque.

Dans ce chapitre, nous avons vu une méthodologie de développement de loi de gestion d'énergie pour un système hybride avec stockage hybride. Nous pouvons conclure que ces résultats de simulation sont d'une grande importance pour la gestion de ce type d'installation. Ainsi, une maîtrise des flux énergétiques dans un tel système s'avère intéressante pour le rentabiliser dans un contexte isolé. Nous avons aussi montré que les batteries étaient susceptibles de subir des cycles de charge et décharge intempestifs avec parfois des pics de courant de nature à écourter leur durée de vie.

Nous avons aussi montré que les super-condensateurs contribuent à améliorer le fonctionnement des batteries et ainsi à accroître leur durée de vie, et donc à réduireles coûts d'investissement. Aussi, le fait que les super-condensateurs peuvent être complètement déchargées et stockées tel quel, rend leur utilisation très intéressante pour le stockage d'énergie renouvelable.

L'intérêt de l'utilisation de deux éléments de stockage (batterie et super condensateurs)dans un système d'énergie hybride comme celui étudié est multiple :

- ✓ il peut limiter la trop grande intensité de courant électrique débitée par la batterie ;
- ✓ il peut mettre la batterie à l'abri des décharges trop profondes pouvant conduire àune perte irréversible de capacité ;
- ✓ il peut accroitre le nombre de cycles, par conséquent la durée de vie de la batterie.

Conclusion générale

Conclusion général :

L'objectif de ce travail présenté dans ce mémoire est l'étude, la modélisation et la gestion d'un système d'énergie hybride autonome (photovoltaïque éolien) avec un stockage hybride (batteries-super-condensateurs), auquel on a implanté un algorithme de gestion pour gérer le flux d'énergie entre les différents sources constituants le système globale.

Le premier chapitre de ce travail rappelle les différents types des énergies renouvelables suivies par une description des différents dispositifs de stockage. Ensuite, nous avons présenté les différents architecteurs du bus, puis une étude de différentes configurations des systèmes hybride, ainsi que leurs principaux constituants. Pour un développement écologique et économique, la combinaison la plus adaptée port sur un système d'énergie hybride autonome utilisant des panneaux photovoltaïques, une éolienne, des batteries de stockage et de super-condensateurs.

Dans le deuxième chapitre, un système photovoltaïque autonome est étudié. Il a pour objectif : le fonctionnement optimal d'un générateur photovoltaïque, la régulation de la tension du bus CC, La modélisation de la batterie de stockage, gestion de charge et décharge des batteries. Pour la recherche de point de puissance maximale (MPPT) on a utilisé la méthode P et O (perturbation et observation) et la modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion éolienne. Elle est composée d'une turbine éolienne, fonctionnant à vitesse variable, avec une génératrice asynchrone. L'optimisation de la chaine de conversion éolienne est effectuée en utilisant l'algorithme MPPT classique, les résultats de simulation présentés montrent le bon fonctionnement des batteries avec des cycles de charge et de décharg.

Dans le dernier chapitre on a procédé à la simulation du système hybride (éolienne photovoltaïque) avec stockage par batteries électrochimique (plomb-Acid). les résultat de simulation montrent l'efficacité de la méthode de gestion du flux d'énergie . Nous avons aussi montré les limites des batteries en présence de pics de puissance. Pour remédier à ce problème, on a proposé l'utilisation d'une source hybride de stockage dont les éléments ont

une fonction spécifique, soit en énergie (batterie), soit en puissance (super-condensateur). On présence des pics de puissance, les batteries subissaient de fortes décharges de nature à écourter leur durée de vie. En effet, pour un stockage composé exclusivement de batteries, nous observions, des pics de courants dépassant parfois 30A avec une chutede tension de 2V. Bien que ces valeurs de courant soient localement supportables par les batteries, le danger viendrait de la variation de tension. Dans ces conditions, les simulations effectuées pour le système d'énergie hybride avec stockage hybride (batteries super-condensateurs) ont permis de montrer l'intérêt des super-condensateurs. En effet, elles permettent de faire face efficacement aux pics de puissance. Les batteries ne fournissant, ainsi, que la puissance moyenne pour laquelle elles ont été dimensionnées. Ainsi on a proposé une méthodologie de développement de loi de gestion d'énergie pour un système hybride avec stockage hybride. Nous pouvons conclure que ces résultats de simulation sont d'une grande importance pour la gestion de ce type d'installation. Ainsi, une maîtrise des flux énergétiques dans un tel système s'avère intéressante pour le rentabiliser dans un contexte isolé.

Les résultats de ce présent travail nous permettent de dégager les perspectives suivantes :

- ✓ Etude détaillée sur la commande et l'optimisation afin de démontrer la sensibilité aux variations brusques.
- ✓ Etudes de différentes structures des systèmes d'énergie hybride avec stockage hybride (batteries super- condensateurs).
- ✓ Réalisation de différents tests sur un système réel, car il est très intéressant de tester les performances dynamiques des stratégies de commande, ainsi que l'efficacité de l'algorithme de gestion sur un système réel afin de valider les résultats de simulation par des résultats expérimentaux.

Bibliographie

[1] Pancaldi, Giuliano (2003). Volta, Science and Culture in the Age of Enlightenment. Princeton Univ. Press. ISBN 978-0-691-12226-7.

[2] M. Joulié, Mécanismes de dissolution de matériaux actifs d'électrodes de type LiNi1/3Mn1/3Co1/3O2 d'accumulateurs Li-ion en vue de leur recyclage, Ecole Nationale Supérieure de Chimie Montpellier, 2015.

[3] **Encyclopedia Britannica** articles on Alessandro Volta and the history of batteries.

[4] Sara ABADA. "Compréhension et modélisation de l'emballement thermique de batteries Li- ion neuves et vieillies". Thèse De Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie.2016.

[5] Le livre intitulé "Lithium-Ion Batteries : Basics and Applications"

[6] McMurry, J. E., & Fay, R. C. (1997). *Chimie : L'Essentiel*. Pearson.

[7] Elie RIVIERE. "Détermination in-situ de l'état de santé de batteries lithium-ion pour un véhicule électrique". Thèse De Doctorat De La Communaute Université Grenoble Alpes.2016.

[8] Eduardo REDONDO-IGLESIAS. "Étude du vieillissement des batteries lithium-ion dans les applications (véhicule électrique) : Combinaison des effets de vieillissement calendaire et de cyclage". Thèse De Doctorat De L'université De Lyon.2017.

[9] Jin, X., Li, J., Zhang, C., & Wu, P. (2016). Researches on Modeling and Experiment of Li-ion Battery PTC Self-heating in Electric Vehicles. Energy Procedia, 104, 62–67. doi: 10.1016/j.egypro.2016.12.012.

[10] ISO 12405-4: Electrically propelled road vehicles --Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems -- Part 4: Performance testing, (2018).

[11] IEC 62660-1: Rechargeable Cells Standards Publication Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles. Part 1: Performance testing, (2010).

[12] Zhang, Q., Cui, N., Shang, Y., Duan, B., & Zhang, C. (2018). An improved Peukert battery model of nonlinear capacity considering temperature effect. IFAC-PapersOnLine, 51(31), 665–669. doi:10.1016/j.ifacol.2018.10.154.

[13] Rezoug, M. R., Chenni, R., & Taibi, D. (2019). A New Approach for Optimizing Management of a Real Time Solar Charger Using the Firebase Platform Under Android. Journal of Low Power Electronics and Applications, 9(3), 23. doi:10.3390/jlpea9030023.

[14] Hoshino, N., Tamura, S., & Akutagawa, T. (2019). Negative-to-positive thermal conductivity temperature coefficient transition induced by dynamic fluctuations of the alkyl chains in the layered complex (C4H9NH3)2CuCl4. Chemistry - A European Journal. doi:10.1002/chem.201904553.

[15] Augeard, A., Singo, T., Desprez, P., Perisse, F., Menecier, S., & Abbaoui, M. (2014). Arc analysis to the CID of li-ion battery cells in high-current applications. 2014 IEEE 60th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm). doi:10.1109/holm.2014.7031038.

[16] Dai, H., Zhang, X., Wei, X., Sun, Z., Wang, J., & Hu, F. (2013). Cell-BMS validation witha hardware-in-the-loop simulation of lithium-ion battery cells for electric vehicles. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 52, 174–184. doi:10.1016/j.ijepes.2013.03.037.

[17] R.C. van Dongen. "Li-Ion Charger for Implantable DevicesSelection of optimal charge algorithm and implementation". Master of Science in BioMedical Engineering,Biomedical Instrumentation at Delft University of Technology. 2012.

[18] Weixiang Shen, Thanh Tu Vo, & Kapoor, A. (2012). Charging algorithms of lithium-ion batteries: An overview. 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). doi:10.1109/iciea.2012.6360973.

[19] L. Croci, « Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries super condensateurs », Thèse Doctorat, Université de Poitiers, 2013

[20]]. B. Madaci, « Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les multi systèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs », Thèse de doctorat, université de Constantine, 2018.
[21] M. Zandi, « Contribution au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique », Thèse Doctorat NANCY Université - Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010.
[22]]. E. Ian Barning, L. Flowers, P. Lundsager, « Worldwide statues of wind-diesel applications », Pre-world shop wind-diesel, Anchoray, Alaska 2004.
[23] Z. Roumila , « Etude d'un système hybride (PV-éolien-diesel) », Thèse de doctorat, université de Bejaia, 2018.
[24] J.G. Mc Gowan, J.F. Manwelle, « Hybrid/pv/diesel system experiences» renewable energy, 116,928-933, 1999.
[25]]. D. Abbes, « Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éolien-photovoltaïque avec batterie pour l'habitat résidentiel autonome, Thèse de doctorat, université Poitier, 2012.
[26] I. Vechwi, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de doctorat, université du havre 44, 2005

[27] Boulkhrachef, S.,Habilation A diriger des recherches 2020-2021,Université de Médea.

[28] Bouhedda Ali, «Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne», Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi-ouzou, 2011

[29] A. Zaimi," Optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents ", Mémoire d'ingénieur cnam, Coservatoire natonal des arts et matiers, maroc, 2014.

[30] TOUAHRIA.L,YOUSFI.Y,'Gestion de puissance d'un système hybride(Pv-Eolien),2017,Université de bejaia

[31] Liman Amine et Soukane Samir « Etude et modélisation d'un système photovoltaïque autonome
», mémoire d'Ingéniorat, UMMTO, 2012.

[32] A, MADJBER. Polycopie de cours énergie renouvelable,2018-2019,Université de Médea.

[33] Liman Amine et Soukane Samir « Etude et modélisation d'un système photovoltaïque autonome
», mémoire d'Ingéniorat, UMMTO, 2012.

[34] Anne Labouret, Michel Villoz : « Energie solaire photovoltaïque », Dunod 3éme édition 2006.

[35] Falk Antony, Christian Durschner, Karl-Heinz Remmers : « Le photovoltaïque pour tous, concep- tion et réalisation d'installations », deuxième édition, Berlin 2010

[36] http ://www.aps.dz/economie/101347-energies-renouvelables-produire-15-000-mw-electricite-a- l-horizon-2035

[37] Alain Ricaud. « Systèmes photovoltaïques ». Polytech' Savoie 5eme année Oct 2011

[38] Sciences Physiques Etats-Unis Recherche Industrie Photovoltaïque (PV) aux Etats-Unis Juin 2006.

[39] Mr Belaiche Hacene ((etude d'une installation en energie photovoltaique integree au batiment : cas d'un laboratoire au cder)) master professionnel en genie mecanique option energetique specialite energies renouvelables . Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

[40] A. Tchapo SINGO, " Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome ", thèse de doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.

[41] K. Idjdarene, « Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes ». Thèse de doctorat en cotutelle entre l'université A. Mira de Bejaia, Algérie, et l'université de Lille1, France, 2010.

[42] Mayouf Messaud, « Contribution a la modélisation de l'aérogénérateur synchrone a aimants permanents», Mémoire de Magister ,LEP, 2008

[43] S. Sadkine, A.Rachedi, " Etude d'un système éolien connecté au réseau, basé sur une GAS auto-excitée". Mémoire de Master en électromécanique, Université A. Mira, Bejaia, 2017.

[44] S. Ziraoui, "Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau». Mémoire de Master en électromécanique, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2017.

[45] M. Latreche, «Réglage et stabilisation de la tension d'une batterie dans un système pv». Mémoire de Master en Électrotechnique, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2019.

[46] M. Latreche, «Commande floue de la machine synchrone à aimant permanant (MSAP) utilisée dans un système éolien». Mémoire de Magister en Électrotechnique, Université Ferhat Abbas de Setif, 2012.

[47] S. Sadkine, A.Rachedi, " Etude d'un système éolien connecté au réseau, basé sur une GAS auto-excitée". Mémoire de Master en électromécanique, Université A. Mira, Bejaia, 2017.

[48] A. Miricki, « Etude comparative de chaine de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance ». Thèse de doctorat de l'institut national de polytechnique de Toulouse France, 2005.

Annexe

Paramètres de la machine asynchrone [Idj 10]

Rotor de type de cage d'écureuil

4 paires de pôles

230/400 V – 23,8/13,7 – 5,5 kW – 50 Hz – 690 tr/mn

Rs = 1,07131 Ω ;

Rr = 1,29511 Ω ;

ls = 8,9382 mH ;

lr = 4,8613 mH

Paramètres de la turbine

Puissance nominale : Pn =7.5 kW ;

Rayon de la turbine : Rt =3.24m ;

Vitesse nominal de la turbine : Ω_t =296 tr /mn ;

Vitesse maximal de la turbine : Ω_{tmax} =10 tr /mn ;

Vitesse minimal de la turbine :Ω_{tmin} =4 tr /mn ;

Moment d'inertie : J=0.075 Kg.m2;

Frottement : f=0 ;

Paramètres d'un panneau photovoltaïque SHARP NTR5E3E

Dimension extérieur : 1575*826 mm.

Epaisseur : 40 mm.

Poids : 17.0 kg.

Puissance maximale du panneau : Pppm = 175 W ;

Courant au point de puissance maximale : Ippm = 4.95 A ;

Tension au point de puissance maximale : Vppm = 35.4 V ;

Courant de court-circuit : Icc = 5.4 A.

Tension en circuit ouvert : Vc0 = 44.4 V

Paramètres de la batterie LITHIUM-ION [Sin 10]

Capacité de batterie : C_{bat} = 260Ah

Tension au borne de la batterie : Vbat = 12V;

La résistance interne de la batterie : Rs = 4 $m\Omega$.

Paramètres du super-condensateur [Ben 13b]

La capacité constante : $C_0 = 8.66$ F La résistance interne :$R = 0.17$ Ω

La capacité spécifique : $K_v = 0.95\ F.V^{-1}$