

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur

Filière : Electrotechnique
Spécialité : Energie et Environnement

Présenté par :

- *ABBOU Bouchra*
- *DJOURI Boutkhil*

Thème :

Contribution à l'étude de la gestion de stockage
d'énergie hybride : batterie Li-ion supercondensateur
dans les systèmes PV et éolien.

Soutenu publiquement, le 14 / 09 / 2022, devant le jury composé de :

<i>Dr.M.MEBROUKI MCA</i>	<i>ESSA. Tlemcen</i>	<i>Président</i>
<i>Dr.M.BOUCHAOUR MCA</i>	<i>UNIV Tlemcen</i>	<i>Directeur de mémoire</i>
<i>Professeur L.MERAD</i>	<i>UNIV Tlemcen</i>	<i>Co- Directeur de mémoire</i>
<i>Dr.A.CHEMIDI MCA</i>	<i>ESSA Tlemcen</i>	<i>Examineur 1</i>
<i>Dr.I. BOUSMAHA MCB</i>	<i>ESSA Tlemcen</i>	<i>Examineur 2</i>

Année universitaire : 2021/2022

Dédicace:

Je dédie ce mémoire à ma famille à mes amis.

Un sentiment particulier de gratitude envers mes parents bien-aimés, maman et papa qui m'ont soutenue émotionnellement jusqu'au bout, leurs mots d'encouragement résonnent encore dans mes oreilles. Mes sœurs Zeyneb et Dounia et ma nièce Rouaa qui ne m'ont jamais quittée et qui me sont très chères. J'apprécie énormément ce qu'ils ont fait pour moi et j'en serais toujours reconnaissante.

Je dédie ce travail également à mes meilleurs amis et tous ceux qui m'ont très chers, je les remercie d'avoir été là pour moi quand j'avais besoin de support.

Bouchra

Dédicaces

*À ma tendre mère. Aucune dédicace ne saurait exprimer
l'amour et le respect que j'ai toujours et pour toi. Que dieu,
vous protège, préserve santé et longue vie.*

*À mon très cher père. Que Dieu lui fasse miséricorde et fasse
de sa place le paradis*

À mes frères : Youcef, Nourdine, Amimo, Rachid, Yazid

À ma famille et tous mes amis

Tous ceux qui m'aiment et que j'aime

Boutkhil

Remerciements :

Nous tenons à remercier tout d'abord notre bon dieu le tout puissant qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

Nous tenons à témoigner toute notre reconnaissance pour l'expérience enrichissante et pleine d'intérêt qu'ils nous ont fait vivre durant cette période de formation éducative.

Nous remercions nos encadrants M. MERAD et Mme BOUCHAOUR pour nous avoir guidés dans ce travail.

Nous tenons à remercier Monsieur MESSIRDI, pour toute l'aide qu'il nous a apporté, sa précieuse aide technique et aussi sa gentillesse et sa modestie qui restent exemplaire.

A tous ceux qui ont contribué à l'achèvement de ce travail physiquement et émotionnellement.

Sommaire:

Dédicace:.....	2
Dédicaces	3
Remerciements :.....	4
Sommaire:.....	5
Notations et abréviations:	8
Liste de figures:.....	9
Introduction générale :	12
Chapitre 01 : Aperçu général sur les énergies PV et éolienne et les systèmes de stockage.....	14
1.1 Introduction :.....	15
1.2 Les énergies renouvelables :.....	15
1.3 L'énergie solaire photovoltaïque :	15
1.3.1 Caractéristique courant-tension d'une cellule :.....	17
1.4 Énergie éolienne :	18
1.4.1 Principe de fonctionnement d'une éolienne :.....	19
1.4.2 Types d'éoliennes :	20
1.4.2.1 Eolienne horizontale :.....	20
1.4.2.2 Eolienne verticale :	20
1.4.2.3 Eolienne domestique :	20
1.4.2.4 Hydrolienne :	21
1.5 Stockage d'énergie :.....	21
1.5.1 Système de stockage d'énergie des batteries :.....	22
1.5.1.1 Batterie Lithium:.....	24
1.5.1.1.1 Fonctionnement :.....	24
1.5.1.1.2 Cellule de base Lithium-ion :	26
1.5.1.1.3 Réactions chimiques :.....	26
1.5.1.1.4 Composants des batteries Li-ion :.....	27
a- Anodes :.....	27
b- Cathodes :.....	28
c- Électrolytes :.....	28
1.5.1.1.5 Applications des LIB dans les énergies renouvelables	29
1.5.1.1.6 Avantages des batteries Li-ion :.....	29

1.5.1.1.7	Inconvénients des batteries Li-ion : [27].....	31
1.5.2	Stockage d'énergie des condensateurs et des SCs :.....	31
1.5.2.1	Condensateur :.....	31
1.5.2.2	Supercondensateurs :.....	32
-	Condensateurs EDLC.....	33
-	Condensateurs FP.....	33
-	Condensateurs hybrides	33
a-	Fonctionnement :.....	33
1.5.2.3	Applications des supercondensateurs :.....	34
1.5.2.4	Avantage des supercondensateurs :.....	35
1.5.2.5	Inconvénients : [32].....	36
1.5.3	Différence entre les batteries Li-ion et SCs :.....	38
1.6	Conclusion :.....	39
Chapitre 02 : Modélisation des systèmes PV et éolien		40
2.1	Introduction :.....	41
2.2	Description et modélisation du système d'alimentation PV :.....	43
1.1.1	Modélisation de la cellule PV :.....	43
2.2.1	Système de conversion d'énergie PV :.....	44
2.2.2	Modélisation des convertisseurs DC-DC :.....	47
2.2.3	Schéma de contrôle proposé du système d'alimentation PV :.....	48
2.2.3.1	Contrôle du bus DC :.....	48
2.2.3.2	Conception du contrôleur PI :.....	50
2.2.4	Stratégie de gestion de l'énergie :.....	51
2.3	Description et modélisation du système d'alimentation éolien :.....	53
2.3.1	Modèle de la turbine et de la Machine Synchrones à Aimant Permanent et du redresseur:.....	54
2.3.2	Approche de commande coordonnée :.....	56
2.3.2.1	Stratégie de contrôle pour le convertisseur DC/DC :.....	57
2.4	Conclusion :.....	58
Chapitre 03:.....		59
Simulations et résultats		59
3.1	Introduction :.....	60
3.2	Système PV :.....	60

3.2.1	Contrôle d'énergie:	62
3.2.2	Contrôle du système de stockage hybride:.....	63
3.2.3	Contrôle PV :	65
3.2.4	Résultats de simulation :	67
3.3	Système éolien :	72
3.3.1	Paramètres de la turbine :.....	74
3.3.2	Paramètres du GSAP :	74
3.3.3	Résultats de simulation :	74
3.4	Conclusion :	76
	Conclusion générale:.....	78
	Perspectives :	79
	Liste de references:	80
	Résumé :.....	87
	Abstract:.....	87
	ملخص:	88

Notations et abbreviations:

- Li-ion : Lithium ion
- LIB : batterie Lithium ion.
- CC/DC : courant continu.
- CA : courant alternatif.
- EE : efficacité énergétique.
- EC : condensateur électrochimique.
- EDLC : Capacité électrique à double couche
- FP : pseudo-capacité faradique.
- PV : Photovoltaïque.
- EES/SSE : Système de stockage d'énergie.
- PMSG/GSAP/MSAP : générateur synchrone à aimant permanent.
- GPV: générateur photovoltaïque
- MPPT: maximum power point tracking/suiveur du point de puissance maximal
- P&O: perturbation et observation
- PPM: point de puissance maximal
- SSEH: système de stockage d'énergie hybride.
- ESR: résistance série équivalente.
- LCS : line controller side
- PWM : modulation par largeur d'impulsion.
- CHF : courant haute fréquence.

Liste de figures:

Figure 1-1 : principe de fonctionnement d'une cellule PV

Figure 1.2.a : caractéristique I-V d'une cellule PV

Figure 1.2.b : caractéristique puissance-tension d'une cellule PV

Figure 1.3 : Composants d'une éolienne

Figure 1.4: Charge et décharge de la batterie lithium ion.

Figure 1.5 : principe de fonctionnement d'une cellule lithium-ion

Figure 1.6: composants d'une batterie li-ion

Figure 1.7 : Comparaison entre plusieurs types de batteries selon la densité d'énergie

Figure 1.8 : Représentation schématique d'un SC dans l'état chargé et déchargé.

Les électrodes sont à base de carbone activé* de grande surface spécifique.

Figure 1.9: Utilisation de SC dans les circuits électroniques.

Figure 2.1: Schéma du système PV avec stockage d'énergie hybride batterie SC

Figure 2.2 : Modèle équivalent d'une cellule PV

Figure 2.3 : Connexion d'un GPV à une charge DC à travers un étage d'adaptation survolteur associé à une commande MPPT.

Figure 2.4 : Schéma illustratif du principe de la commande MPPT par P&O

Figure 2.5: Organigramme de la méthode P&O.

Figure 2.6 : Schéma électrique du convertisseur élévateur DC/DC

Figure 2.7 : Modèle du circuit buck-boost

Figure 2.8 Schéma bloc de contrôle du bus DC

Figure 2.9 : Boucle de contrôle PI du supercondensateur

Figure 2.10: Boucle de contrôle PI de la batterie

Figure 2.11: Schéma de contrôle du système de stockage d'énergie hybride

Figure 2.12 : Système éolien basé sur un GSAP avec un stockage d'énergie hybride

Figure 2.13 : Fonctionnement du convertisseur Boost pour réguler la tension du bus DC

Figure 3.1 : Courbes P-V des énergies Waaree WU-120 pour différentes irradiations.

Figure 3.2: Schéma du système PV étudié

Figure 3.3(a): Schéma de contrôle du système de stockage d'énergie hybride

Figure 0.1.3 (b): Schéma du contrôle du système de stockage hybride batterie SC sous Matlab Simulink

Figure 3.4 (a): Schéma du contrôle PV

Figure 3.4 (b) : Schéma du contrôle PV sous Matlab Simulink

Figure 3.5 : Système PV avec stockage hybride batterie li-ion et SC sous Matlab Simulink

Figure 3.6 : tension de sortie du convertisseur boost V_DC

Figure 3.7 : Etat de charge (%) (En haut) et puissance de la batterie Li-ion (W) (en bas).

Figure 3.8 : Etat de charge (%) (en haut) et puissance (W) du supercondensateur (en bas).

Figure 3.9 : 1)- Puissance P_{PV} 2)- Puissance de la charge P_L 3)- Puissance du SC P_{sc} (violet). 4)- Puissance de la batterie P_B (vert).

Figure 3.10 : 1) Tension de la batterie Li-ion (V), 2) Courant de la batterie Li-ion (A), 3) Etat de charge (%), 4) Puissance de la batterie Li-ion (W)

Figure 3.11 :1) Tension V SC (V), 2) Courant I SC (A), 3) Etat de charge du SC SOC (%), 4) Puissance P SC (W)

Figure 3.12 : 1)- Puissance P_{PV} (en noir). 2)- Puissance de la charge P_L (rouge). 3)- Puissance du supercondensateur P_{sc} (violet). 4)- Puissance de la batterie P_B (jaune).

Figure 3.13 : tension V DC

Figure (3.14- a) : système éolien avec stockage hybride par batterie Li-ion et SC

Figure (3.14-b) : Système de conversion de l'énergie éolienne par un GSAP

Figure 3.15. (a) Vitesse du vent (V-w), (b) Tension du bus DC (V-DC)

Figure 3.16: Partage de la puissance du système éolien à des conditions de vent variables et de charge constante.

Introduction générale :

L'énergie continue d'être un élément clé du développement mondial. En raison de la volatilité des prix du pétrole, de l'épuisement des ressources en combustibles fossiles, du réchauffement climatique et de la pollution locale, des tensions géopolitiques et de la croissance de la demande d'énergie, des énergies alternatives, les énergies renouvelables et l'utilisation efficace des combustibles fossiles sont devenues beaucoup plus importantes qu'à tout autre moment de l'histoire [1,2].

Les sources d'énergie renouvelables, comme l'énergie éolienne et solaire, ont retenu l'attention au cours des dernières décennies en tant que composantes clés de la construction d'un réseau électrique propre. Cependant, l'acceptation et l'utilisation généralisées de ces technologies sont entravées par leur incapacité à fournir de l'électricité lorsque le vent ne souffle pas ou que le soleil ne brille pas. Pour aider ces technologies renouvelables intermittentes à devenir plus compétitives avec les centrales fossiles et hydroélectriques, leur production peut être stabilisée avec l'utilisation de systèmes de stockage d'énergie, qui permettrait de produire de l'électricité à des moments de valeur économique relativement faible et de la stocker afin qu'elle puisse être expédiée ultérieurement. Ces systèmes peuvent également contribuer à rendre l'énergie renouvelable, dont la production d'électricité ne peut être contrôlée par les opérateurs de réseau, fluide et distribuable. Pour fournir une alimentation électrique fluide et ininterrompue, il est nécessaire de combiner plusieurs stratégies de gestion de l'énergie. La gestion de la qualité de l'alimentation, la régulation et le transfert de charge sont nécessaires pour maximiser l'efficacité et la fiabilité du système. Chacun a des caractéristiques souhaitables très différentes et les systèmes de stockage d'énergie les plus appropriés varieront selon le rôle souhaité dans la stratégie de gestion de l'énergie.

Parmi les différentes technologies de batterie, les batteries lithium-ion ont suscité un intérêt considérable en tant que dispositifs de support dans le réseau en raison de leurs avantages remarquables, à savoir une densité d'énergie relativement élevée (jusqu'à 200 Wh/kg), une EE élevée (plus de 95 %) , et longue durée de vie (3000 cycles à décharge profonde de 80%). [3]

Mais cette durée de vie est amenée à diminuer, ce qui est le problème majeur du stockage d'énergie. C'est pourquoi dans notre étude, on utilise un système hybride batterie li-ion et supercondensateur.

L'objectif de ce travail est d'étudier et simuler un système photovoltaïque et un système éolien avec un stockage hybride Li-ion et SC sous MATLAB-Simulink. Le mémoire est divisé en trois chapitres :

Le premier expose des généralités sur l'énergie PV et éolienne, les méthodes de stockage par batterie et supercondensateur et leurs applications dans le domaine des énergies renouvelables.

Le deuxième chapitre aborde la modélisation des deux systèmes PV et éolien et leurs méthode de gestion d'énergie dans le système de stockage hybride.

Dans le dernier chapitre la discussion et l'interprétation des résultats trouvés de la simulation est présentée. Nous terminons par la conclusion et les perspectives.

*CHAPITRE 01 : APERÇU
GENERAL SUR LES ENERGIES
PV ET EOLIENNE ET LES
SYTEMES DE STOCKAGE*

1.1 Introduction :

Les marchés actuels et futurs des combustibles fossiles sont soumis à des fluctuations des prix du pétrole et du gaz naturel. Les crises et les conflits énergétiques et environnementaux nationaux et internationaux se combinent pour motiver un changement de paradigme spectaculaire des combustibles fossiles vers des combustibles fiables, propres et efficaces. L'utilisation de sources d'énergie renouvelables semble être une option prometteuse; cependant, certaines sources d'énergie renouvelable et leur mise en œuvre suscitent encore de graves préoccupations, p. ex., (i) le coût du capital et (ii) leur nature intermittente dans la production d'électricité [4.5].

Dans le processus de transformation de l'énergie électrique, le système de stockage d'énergie au niveau du réseau joue un rôle essentiel dans l'équilibrage production et utilisation de l'énergie. Les batteries surtout les batteries lithium-ion et les supercondensateurs ont un potentiel considérable d'application aux systèmes de stockage d'énergie en raison de leur réponse rapide, de leur modularisation et de leur installation flexible.

1.2 Les énergies renouvelables :

Ce sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Elles proviennent de phénomènes naturels cycliques ou constants induits par les astres : le Soleil essentiellement pour la chaleur et la lumière qu'il génère, mais aussi l'attraction de la lune et la chaleur générée par la Terre. Leur caractère renouvelable dépend d'une part de la vitesse à laquelle la source est consommée, et d'autre part de la vitesse à laquelle elle se renouvelle. Il existe plusieurs sources des énergies renouvelables, on se focalisera sur l'énergie solaire PV et éolienne. [6]

1.3 L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Le terme

photovoltaïque désigne l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmont Becquerel en 1839. [7]

La cellule photovoltaïque est la composante électronique fondamentale du système, qui utilise l'effet photoélectrique pour convertir les ondes électromagnétiques (rayonnement) émises par le soleil en électricité. Plusieurs cellules sont reliées entre elles pour former un module ou collecteur solaire photovoltaïque, et ces modules sont combinés pour former une installation solaire. L'électricité est consommée ou stockée sur le site, ou distribuée par les réseaux de distribution et de transport.

Une partie de l'énergie incidente se transforme directement en énergie électrique lorsque la lumière atteint une cellule solaire c'est ce qu'on appelle effet PV. C'est un phénomène physique qui caractérise certains matériaux appelés "semi-conducteurs", produisant de l'électricité une fois exposés à la lumière. Le matériau le plus connu et le plus utilisé dans le monde est le silicium cristallin.

La lumière produite par le soleil est composée de photons qui vont heurter la surface du panneau solaire et les électrons présents vont alors se mettre en mouvement dans une direction particulière permettant de créer un courant électrique continu. Voir la figure (1.1)

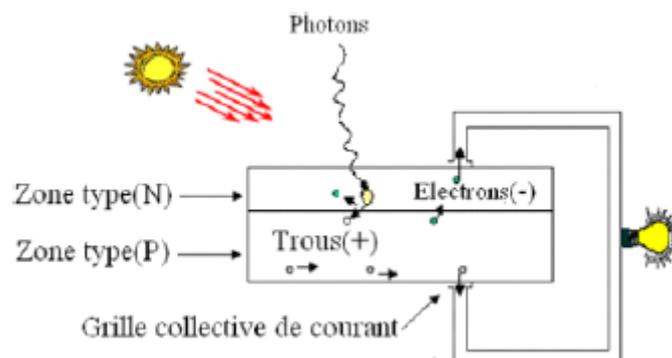


Figure 1-1 : principe de fonctionnement d'une cellule PV [35]

Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du « band gap » (notée E_g), en électronvolt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et varie entre 1,0 et 1,8 eV

pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1,124 eV pour le silicium cristallin (c-Si), et le 1,7 eV pour le silicium amorphe (a-Si). [8]

1.3.1 Caractéristique courant-tension d'une cellule :

La puissance électrique délivrée par une cellule photovoltaïque est le produit de la tension par le courant qu'elle génère. Ces deux grandeurs, courant et tension, dépendent à la fois des propriétés électriques de la cellule mais aussi de la charge électrique à ses bornes.

Les propriétés électriques de la cellule sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle caractéristique courant-tension. Tout dipôle électrique est entièrement défini par sa caractéristique courant-tension, qui lui est propre.

Une cellule photovoltaïque, en tant que dipôle électrique, dispose de sa propre caractéristique courant-tension, ainsi qu'illustré sur la figure 1.2a :

Cette caractéristique courant-tension est une relation entre la tension et le courant délivrés par la cellule photovoltaïque.

Deux données importantes sont à relever :

Le courant de court-circuit noté I_{cc} : il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle + est relié au pôle - (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = U \times I$ est nulle.

La tension en circuit ouvert notée U_{co} : il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle + et le pôle - sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = U \times I$ est nulle.

La puissance fournie par la cellule est tout simplement le produit du courant et de la tension. A partir de la caractéristique courant-tension, il est intéressant de dessiner le graphe de la puissance ($P = U \times I$) en fonction de la tension U , qu'on appelle aussi caractéristique puissance-tension (courbe verte) :

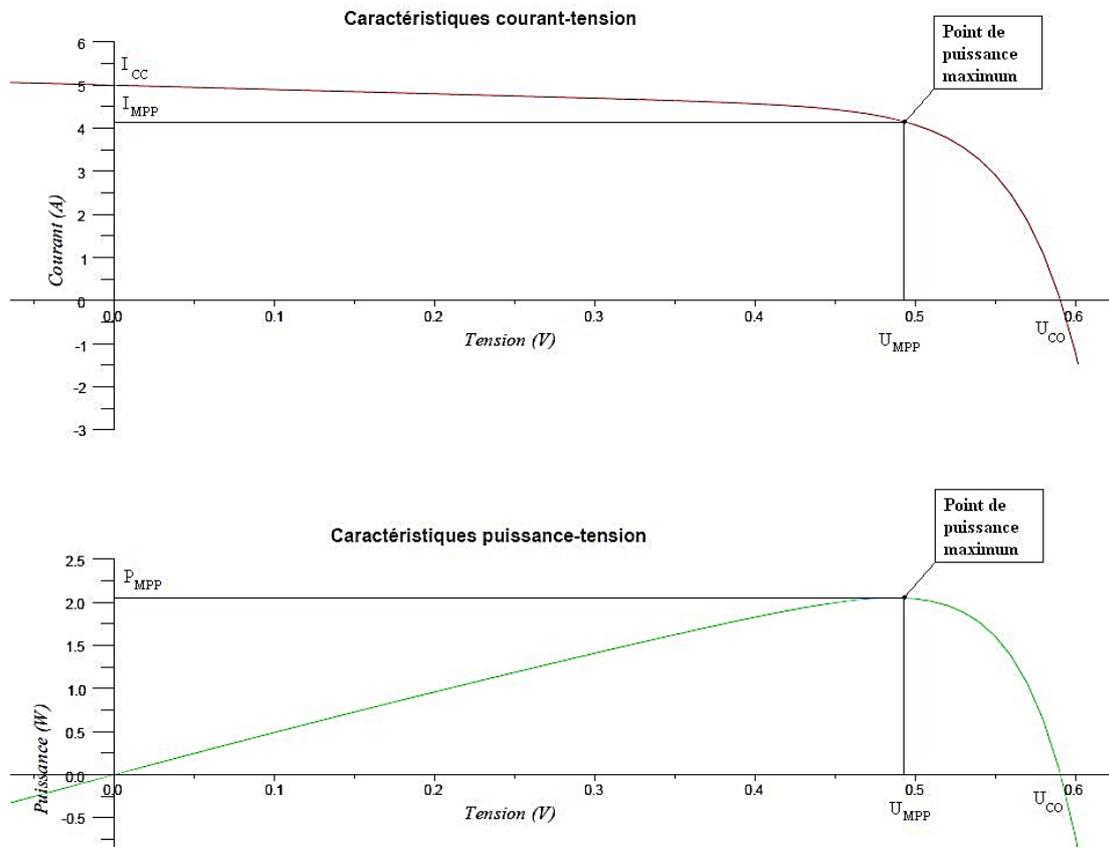


Figure 1.2. a) : Caractéristique I-V d'une cellule PV. a) : Caractéristique puissance-tension d'une cellule PV [36]

1.4 Énergie éolienne :

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent. Une éolienne est composée de 4 parties :

- Le mât
- L'hélice
- La nacelle qui contient l'alternateur producteur d'électricité

- Les lignes électriques qui évacuent et transportent l'énergie électrique (lorsqu'elle est raccordée au réseau). [9]

1.4.1 Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Une éolienne transforme l'énergie éolienne en électricité en utilisant la force aérodynamique des pales du rotor, qui fonctionnent comme une aile d'avion ou une pale du rotor d'hélicoptère. Lorsque le vent traverse la pale, la pression d'air d'un côté de la pale diminue. La différence de pression d'air entre les deux côtés de la lame crée à la fois la portance et la traînée. La force de la portance est plus forte que la traînée, ce qui fait tourner le rotor. Le rotor se connecte au générateur, soit directement (s'il s'agit d'une turbine à entraînement direct), soit par un arbre et une série d'engrenages (une boîte de vitesses) qui accélèrent la rotation et permettent un générateur physiquement plus petit. Cette translation de la force aérodynamique à la rotation d'un générateur crée de l'électricité. [10]

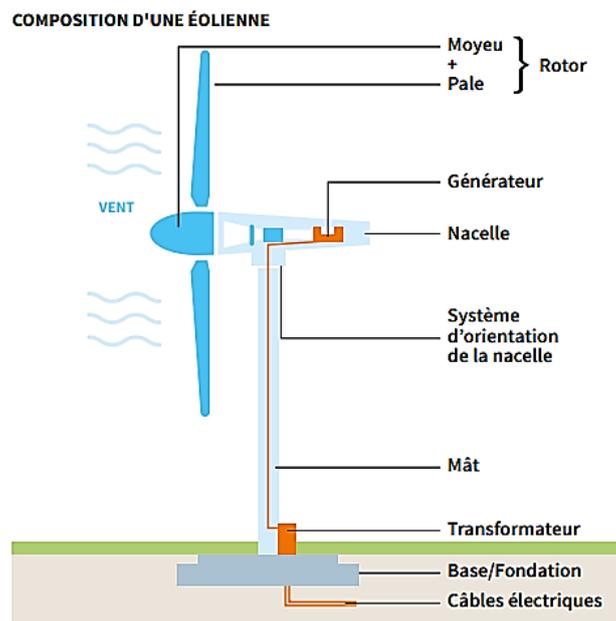


Figure 1.3 : Composants d'une éolienne [37]

1.4.2 Types d'éoliennes :

1.4.2.1 Eolienne horizontale :

L'éolienne horizontale est le type d'éolienne le plus "classique", le plus répandu en bord de route, et il incarne parfaitement l'image de cette source d'énergie renouvelable. De telles éoliennes captent le vent grâce à des pales assemblées sous forme d'hélices. Les pales tournent autour d'un mât placé horizontalement au sol, ce qui explique le nom de l'éolienne. Dans ce type d'éolienne, la force de l'hélice en rotation fait tourner un générateur situé au-dessus de l'éolienne. Le plus gros avantage de ce type d'éolienne est son efficacité, surtout lorsqu'elle comprend un système qui oriente les pales en fonction du vent. Ces turbines sont également considérées comme plus robustes et moins coûteuses à entretenir. Le principal inconvénient de ces éoliennes est le bruit qu'elles produisent. De plus, la complexité d'installation en fonction de la hauteur du mât doit être prise en compte lors du choix de ce mécanisme.

Dans ce type d'éoliennes on trouve les éoliennes offshore qui sont conçues pour être très robustes et donc capables de résister à des conditions océaniques très difficiles, notamment à la corrosion impliquée par le sel marin. Ces éoliennes sont souvent concentrées dans des fermes marines placées à des endroits particulièrement stratégiques au regard des conditions météorologiques.

1.4.2.2 Eolienne verticale :

Contrairement à l'éolienne horizontale, l'éolienne verticale tourne autour d'une tige positionnée de manière verticale. L'un des principaux atouts de ce type d'éolienne est de réussir à capter des vents faibles et de produire de l'énergie même avec une vitesse de vent plus légère.

1.4.2.3 Eolienne domestique :

Le terme éolien domestique désigne le type d'éolienne qui est installée chez un particulier, que ce soit dans son jardin ou sur son toit. Selon ce qu'un individu souhaite faire de l'énergie produite, 50 % de l'électricité consommée par une famille de 4 personnes peut être absorbée par l'éolien. Si la hauteur de l'éolienne domestique

dépasse 12 mètres, un permis de construire doit être installé à proximité de l'habitation. En dessous de cette hauteur, un simple cahier des charges préalable suffit pour installer ce type d'éolienne. Le prix d'une éolienne domestique est variable.

Les particuliers qui choisissent d'installer de telles éoliennes chez eux auront deux options pour gérer l'électricité produite :

La première possibilité est de revendre toute l'électricité produite à l'acheteur, qui garantira de racheter cette énergie sur une longue période (20 ans). En conséquence, l'électricité produite sera injectée dans le réseau, ce qui peut nécessiter des coûts de connexion au réseau importants. En revanche, la rentabilité du projet sera relativement facile à calculer.

La deuxième possibilité est de consommer sur place l'électricité produite par ce type d'éolienne, ce qui éviterait d'avoir à se connecter au réseau car l'électronique serait consommée directement sur place. Les particuliers doivent ensuite évaluer les solutions de stockage d'énergie, telles que les batteries ou les générateurs de transition. L'objectif de l'individu est d'obtenir un prix de l'électricité connu pendant la durée de vie de ses éoliennes domestiques.

1.4.2.4 Hydrolienne :

Une hydrolienne convertit l'énergie cinétique des courants marins en électricité, comme le feraient des éoliennes avec le vent. Le propulseur de l'hydrolienne permet la subversion de l'énergie mécanique de l'eau en motilité en énergie cinétique qui peut ensuite être convertie en énergie électrique par un générateur. [10]

1.5 Stockage d'énergie :

Le stockage d'énergie dans un système électrique peut être défini comme toute installation, généralement soumise à un contrôle indépendant, à l'aide de laquelle il est possible de stocker l'énergie générée dans le système électrique, de la conserver et de l'utiliser dans le système électrique si nécessaire. [11,12]

Il peut être multi-bénéfique pour les services publics et leurs clients en termes

- d'amélioration de l'efficacité du fonctionnement d'un système;

- de réduction de la consommation de combustible primaire par la conservation de l'énergie;
- d'assurance de sécurité de l'approvisionnement en énergie et de réduire l'impact environnemental.

Le stockage d'énergie électrique comprend un large éventail de technologies, qui fournissent directement ou indirectement du stockage d'énergie électrique via une entrée et une sortie électriques. Les principales technologies sont:

- Systèmes électrochimiques (piles);
- Les systèmes de stockage d'énergie cinétique, plus communément appelés systèmes de stockage d'énergie au volant d'inertie;
- Le stockage potentiel d'énergie sous forme d'hydroélectricité pompée ou d'air comprimé.

En revanche, les systèmes de stockage d'énergie thermique utilisent soit les réactions thermochimiques, la capacité de chaleur sensible ou latente des matériaux pour fournir une ressource de chauffage ou de refroidissement, qui peut être reconstituée au besoin. [11.12]

1.5.1 Système de stockage d'énergie des batteries :

Une batterie est un dispositif électrochimique qui a la capacité de fournir, sous forme d'énergie électrique, l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques [13]. Ces réactions sont mises en mouvement à l'intérieur d'une cellule de base, entre deux électrodes plongées dans un électrolyte, lorsqu'une charge est connectée aux bornes de la cellule. La réaction implique le transfert d'électrons d'une électrode à l'autre par un circuit électrique externe. Une batterie se compose de cellules simples ou multiples, connectées en série ou en parallèle ou les deux en fonction de la tension de sortie souhaitée et la capacité [13,14].

Chaque cellule est constituée de

- l'anode ou l'électrode négative qui fournit des électrons à la charge et est oxydée pendant la réaction électrochimique ;
- la cathode ou l'électrode positive qui accepte les électrons et est réduite pendant la réaction ;

- l'électrolyte qui fournit le support pour le transfert d'électrons entre l'anode et la cathode ;
 - les séparateurs entre les électrodes positives et négatives pour l'isolation électrique.
- Pendant la décharge, les réactions électrochimiques aux deux électrodes génèrent un flux d'électrons à travers un circuit externe. Pendant le processus de chargement, les réactions électrochimiques sont inversées par l'application de la tension externe sur les électrodes.

La principale différence entre les différents systèmes de batteries est les matériaux utilisés comme électrodes et électrolytes, qui déterminent les caractéristiques spécifiques des batteries. Les séparateurs sont faits de matériaux polymères, de papier ou de carton [15]. Le boîtier externe est composé d'acier, de matériaux polymères ou de carton. Les électrodes et électrolytes changent en fonction des différentes applications des batteries. Les composants potentiellement dangereux des batteries comprennent le mercure, le plomb, le cuivre, le zinc, le cadmium, le manganèse, le nickel et le lithium [16]. Le développement d'une technologie de batterie améliorée est essentiel pour les avancées dans une variété d'applications allant des véhicules électriques hybrides à l'électronique grand public [17], et l'amélioration des performances de la batterie dépend du développement de matériaux pour les différents composants de la batterie [18].

Les batteries peuvent être classées comme des batteries primaires, qui ne sont pas rechargeables, ou des batteries secondaires, qui peuvent être rechargées [19]. Dans le contexte de cette thèse seules les batteries secondaires sont prises en compte, car elles ne sont pas viables pour le stockage d'énergie en vrac. La construction d'une batterie secondaire est facilitée par les courts délais d'exécution, l'assise potentiellement pratique et la modularité de la technologie [20]. Cependant, le stockage à grande échelle des batteries des services publics a été rare jusqu'à récemment en raison des faibles densités d'énergie, de la faible capacité d'alimentation et des coûts d'entretien élevés, d'une courte durée de vie et d'une capacité de décharge limitée [21]. Les batteries qui sont utilisées et/ou qui pourraient convenir aux applications de stockage d'énergie des batteries utilitaires comprennent les batteries au plomb-acide, à base de nickel, à base de soufre de sodium et à base de lithium [22].

1.5.1.1 Batterie Lithium:

Les batteries lithium sont largement utilisées dans de petites applications, telles que les téléphones et les appareils électroniques portables; par conséquent, la production brute annuelle est d'environ 2 milliards de cellules [23]. Certains fabricants de batteries (SAFT, Shin-Kobe, Japan Storage, Avestor) mettent au point des batteries au Lithium dans des configurations à haute énergie et à haute puissance pour les véhicules électriques (VE) et véhicules électriques hybrides (VEH) [24]. Une batterie lithium se compose de deux types principaux : les cellules Lithium-ion et Lithium-polymère [25].

La haute densité d'énergie et de puissance des cellules lithium-ion les rend attrayantes pour un large éventail d'applications, de l'électronique portable aux applications satellites [26].

Pour les batteries lithium-ion, le taux de décharge automatique est très faible à un maximum de 5 % par mois et la durée de vie de la batterie peut atteindre plus de 1500 cycles [26]. Cependant, la durée de vie de la batterie lithium-ion dépend de la température, le vieillissement prenant son péage beaucoup plus rapidement à des températures élevées, et peut considérablement raccourcir en raison de décharges profondes. Cela rend les batteries lithium-ion inadaptées à une utilisation dans des applications de secours où elles peuvent être complètement déchargées. Le principal obstacle est le coût élevé (4 600 \$/kWh) dû au conditionnement spécial et aux circuits internes de protection contre les surcharges [26].

1.5.1.1.1 Fonctionnement :

Une batterie lithium-ion (Li-ion) est une technologie de batterie avancée qui utilise les ions lithium comme composant clé de son électrochimie. [27]

Au cours d'un cycle de décharge, les atomes de lithium dans l'anode sont ionisés et séparés de leurs électrons. Les ions lithium se déplacent de l'anode et traversent l'électrolyte jusqu'à atteindre la cathode, où ils se recombinent avec leurs électrons et se neutralisent électriquement. Les ions lithium sont suffisamment petits pour pouvoir se déplacer à travers un séparateur micro-perméable entre l'anode et la cathode. En partie à cause de la petite taille du lithium (troisième seulement après l'hydrogène et

l'hélium), les batteries Li-ion sont capables d'avoir une très haute tension et un stockage de charge par unité de masse et de volume unitaire. [27]

Les batteries Li-ion peuvent utiliser un certain nombre de matériaux différents comme électrodes. La combinaison la plus courante est celle d'oxyde de cobalt et de lithium (cathode) et de graphite (anode), que l'on trouve le plus souvent dans les appareils électroniques portables tels que les smartphones et les ordinateurs portables. D'autres matériaux de cathode comprennent l'oxyde de manganèse et de lithium (utilisé dans les automobiles hybrides et électriques) et le phosphate de fer et de lithium. Les batteries Li-ion utilisent généralement de l'éther (une classe de composés organiques) comme électrolyte. [27] (voir la figure 1.4).

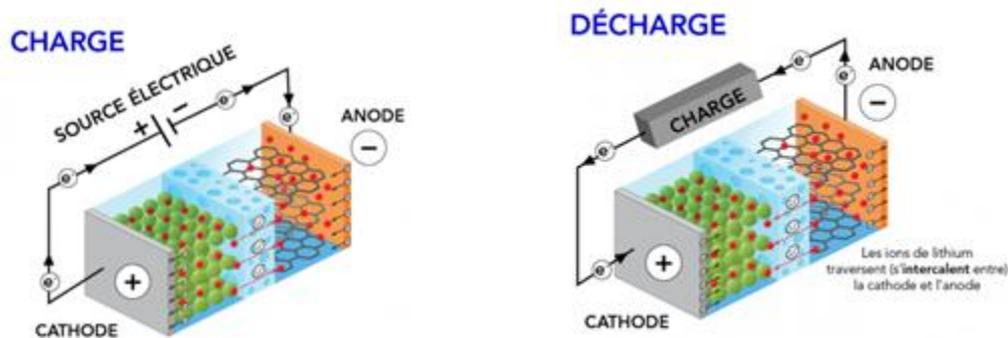


Figure 1.4: Charge et décharge de la batterie lithium ion. [verkor.com]

Tout comme les piles sèches alcalines utilisées dans les horloges et les télécommandes, les batteries lithium-ion fournissent de l'énergie par le mouvement des ions. Sous sa forme élémentaire, le lithium est extrêmement réactif. Le lithium élémentaire n'est donc pas utilisé dans les batteries Lithium-ion. [27]

La cathode contient plutôt du lithium métallique, comme le dioxyde de cobalt et de Lithium (LiCoO_2). C'est ce qui fournit les ions de Lithium. Quant à l'anode, elle contient du lithium carbonique. L'emploi de ces matériaux permet l'intercalation. Il s'agit de l'insertion d'une molécule entre deux autres molécules. Dans ce cas, les ions de Lithium peuvent facilement s'insérer dans les électrodes, ou s'en retirer. [27]

1.5.1.1.2 Cellule de base Lithium-ion :

L'élément de base est une cellule qui se présente un peu comme un feuilleté : une plaque d'Aluminium servant à collecter le courant, puis la cathode, l'électrolyte, puis l'anode, enfin une plaque de Cuivre [27].

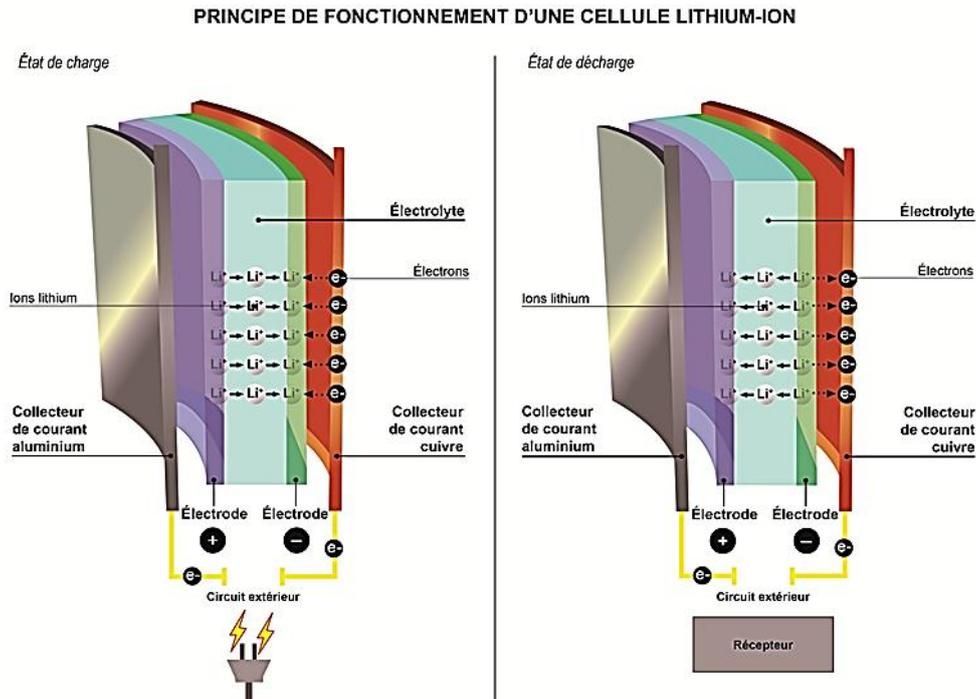
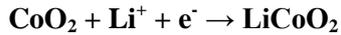


Figure 1.5 : principe de fonctionnement d'une cellule Lithium-ion [27]

Quand la batterie se charge, les ions de Lithium Li^+ quittent l'électrode positive (la cathode) et sont stockés dans l'électrode négative (l'anode). Quand elle se décharge, c'est-à-dire quand elle produit le courant électrique, les ions Li^+ font le mouvement inverse. Ces cellules, de quelques volts chacune, sont regroupées en plus ou moins grand nombre selon la puissance recherchée pour alimenter un téléphone portable ou une batterie de voiture. [27]

1.5.1.1.3 Réactions chimiques :

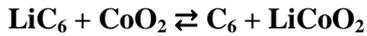
Des réactions d'oxydo-réduction (redox) ont lieu à l'intérieur d'une batterie li-ion. La réduction a lieu du côté de la cathode. Là, l'oxyde de cobalt se combine aux ions de lithium pour former de l'oxyde de lithium et de cobalt (LiCoO_2). Cela donne la demi-réaction suivante : [27]



L'oxydation a lieu de côté de l'anode. Là, le composé d'intercalation de graphite (LiC_6) forme du graphite (C_6) et des ions de lithium. Cela donne la demi-réaction suivante :



Et voici la réaction complète (de gauche à droite = décharge, de droite à gauche = charge) :



1.5.1.1.4 Composants des batteries Li-ion :

Chaque pile comprend trois éléments principaux : une électrode positive (une cathode), une électrode négative (une anode) et un électrolyte liquide. [27] (voir la figure 1.6).

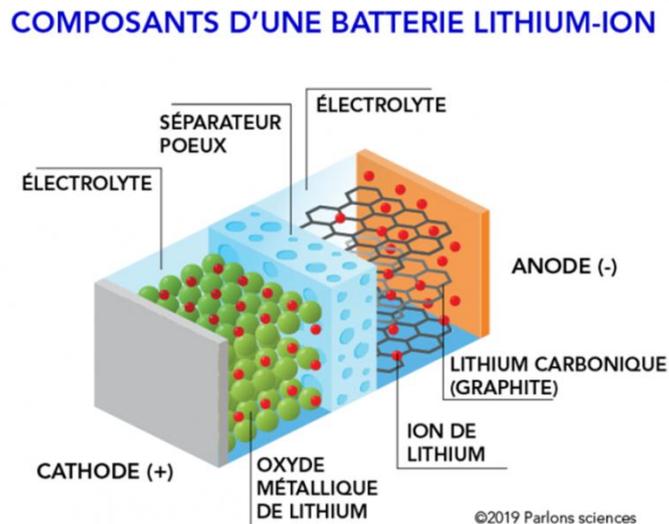


Figure 1.6: Composants d'une batterie Li-ion [vekor.com]

a- Anodes :

Les anodes sont des matériaux à base de graphite en raison du faible coût et de la grande disponibilité du carbone. Le graphite est courant dans les batteries Lithium ion (LIB) commerciales en raison de sa stabilité pour s'adapter à l'insertion de lithium. La faible dilatation thermique des LIB contribue à leur stabilité pour maintenir leur

capacité de charge/décharge même après de longs cycles. Cependant, la capacité du graphite à accueillir l'insertion de lithium (372 mAh/g) est relativement faible, et les LIB attireront davantage l'attention si cette propriété est améliorée. Heureusement, ces dernières années, des efforts considérables ont été déployés pour optimiser les matériaux d'anode à base de graphite, et plusieurs nouveaux matériaux d'anode, notamment le silicium, les alliages et les oxydes métalliques, sont développés. La capacité et la durée de vie des LIB ont été efficacement améliorées grâce au développement de nouveaux matériaux d'anode (par exemple, un composite silicium/carbone) ou de nouveaux matériaux de cathode riches en nickel. [1]

b- Cathodes :

Le nom des batteries Li-ion (LIB) commerciales actuelles provient du donneur Lithium-ion dans la cathode, qui est le principal déterminant des performances de la batterie.

Généralement, les cathodes sont constituées d'un matériau composé lithié complexe, en particulier plusieurs matériaux d'oxyde de lithium métallique, tels que LiCoO_2 , LiMn_2O_4 et LiFePO_4 . Avec différentes cathodes, les performances de la batterie diffèrent considérablement. Mais, par rapport au lithium métallique, tous les composés susmentionnés présentent une impédance élevée en raison de leurs faibles coefficients de diffusion et conductivités ioniques, ce qui se traduira par une EE et une durée de vie faibles. Cette limitation peut être surmontée en fabriquant la cathode à partir de matériaux composés de lithium finement pulvérisés et en la mélangeant avec des matériaux conducteurs (le carbone par exemple) en mélangeant avec un liant (comme le fluorure de polyvinylidène) et un solvant (la N-méthyl-2-pyrrolidone par exemple). La cathode sur la feuille d'aluminium est formée en forme de plaque ou de spirale. [1]

c- Électrolytes :

Les électrolytes des batteries Li-ion sont principalement divisés en deux catégories, à savoir les électrolytes liquides et les électrolytes semi-solides/à l'état solide. Habituellement, les électrolytes liquides sont constitués de sels de lithium [par exemple, LiBF_4 , LiPF_6 , $\text{LiN}(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2$ et LiBOB], qui sont dissous dans des carbonates organiques (par exemple, carbonate d'éthylène, carbonate de propylène,

carbonate de méthyle éthyle, carbonate de diméthyle et leurs mélanges). En règle générale, les électrolytes semi-solides / à l'état solide sont composés de sels de lithium en tant que sels conducteurs et de matrices polymères de poids moléculaire élevé (par exemple, le fluorure de polyvinylidène, le polyoxyde d'éthylène) et le fluorure de polyvinylidène-hexafluoropropylène). [1]

1.5.1.1.5 Applications des LIB dans les énergies renouvelables

Compte tenu de leur abondance et de leur large distribution, les sources renouvelables sont devenues l'un des choix les plus rentables pour la production d'électricité dans les réseaux électriques de nombreuses régions. Ces dernières années, la croissance importante des sources renouvelables variables favorise le développement des systèmes de stockage d'énergie électrique et les oblige à être plus flexibles. Les systèmes de stockage d'énergie par batterie peuvent stocker efficacement l'électricité générée à partir de sources renouvelables, contribuant à la stabilité et à la fiabilité du système de réseau, qui à leur tour favorisent l'utilisation de sources d'énergie renouvelables. [1]

La production d'énergie éolienne représente l'une des principales sources d'énergie renouvelable. Cependant, étant donné qu'elle est fortement influencée par la saison et la situation géographique, la production éolienne souffre considérablement de l'intermittence. De plus, une inadéquation entre la production d'électricité de pointe et la demande est souvent observée. Stocker l'énergie excédentaire produite par les parcs éoliens pour fournir de l'énergie électrique lorsque la demande de puissance atteint son pic est une solution efficace. [1]

1.5.1.1.6 Avantages des batteries Li-ion :

Par rapport aux autres technologies de batteries rechargeables de haute qualité (nickel-cadmium ou nickel-métal-hydrure), les batteries Li-ion présentent de nombreux avantages.

- Des densités d'énergie les plus élevées de toutes les technologies de batterie aujourd'hui (100-265 Wh/kg ou 250-670 Wh/L).
- Les cellules de batterie Li-ion peuvent fournir jusqu'à 3,6 Volts, 3 fois plus que des technologies telles que Ni-Cd ou Ni-MH. Cela signifie qu'elles peuvent

fournir de grandes quantités de courant pour les applications à haute puissance et ont relativement peu besoin d'entretien et ne nécessitent pas de cycle programmé pour maintenir leur durée de vie.

- Les batteries Li-ion n'ont pas d'effet mémoire, un processus préjudiciable où des cycles de charge/décharge partielle répétés peuvent amener une batterie à « se souvenir » d'une capacité inférieure. C'est un avantage par rapport au Ni-Cd et au Ni-MH, qui présentent cet effet.
- Les batteries Li-ion ont également un faible taux d'autodécharge d'environ 1,5 à 2 % par mois. Elles ne contiennent pas de cadmium toxique, ce qui les rend plus faciles à éliminer que les batteries Ni-Cd. [27]

En raison de ces avantages, les batteries Li-ion ont remplacé les batteries Ni-Cd en tant que leader du marché des appareils électroniques portables (tels que les smartphones et les ordinateurs portables). Les batteries Li-ion sont également utilisées pour alimenter les systèmes électriques de certaines applications aérospatiales, notamment dans le nouveau Boeing 787, plus respectueux de l'environnement, où le poids est un facteur de coût important. Du point de vue de l'énergie propre, une grande partie de la promesse de la technologie Li-ion vient de leurs applications potentielles dans les voitures alimentées par batterie. Actuellement, les voitures électriques les plus vendues, la Nissan Leaf et la Tesla Model S, utilisent toutes deux des batteries Li-ion comme principale source de carburant. [27]

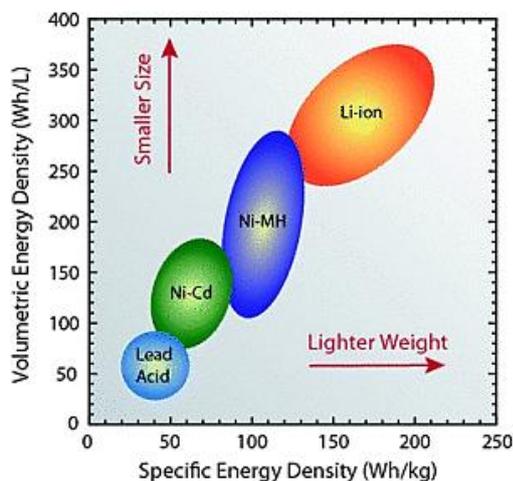


Figure 1.7 : Comparaison entre plusieurs types de batteries selon la densité d'énergie [core.ac.uk]

1.5.1.1.7 Inconvénients des batteries Li-ion : [27]

Malgré leur promesse technologique, les batteries Li-ion présentent encore un certain nombre de lacunes, notamment en matière de sécurité. Les batteries Li-ion ont tendance à surchauffer et peuvent être endommagées à haute tension. Dans certains cas, cela peut entraîner un emballement thermique et une combustion. Les batteries Li-ion nécessitent des mécanismes de sécurité pour limiter la tension et les pressions internes, ce qui peut augmenter le poids et limiter les performances dans certains cas.[27]

Les batteries Li-ion sont également sujettes au vieillissement, ce qui signifie qu'elles peuvent perdre de leur capacité et tomber fréquemment en panne après plusieurs années. Un autre facteur limitant leur adoption généralisée est leur coût, qui est environ 40 % plus élevé que le Ni-Cd. La résolution de ces problèmes est un élément clé de la recherche actuelle sur la technologie.

Enfin, malgré la densité énergétique élevée du Li-ion par rapport aux autres types de batteries, elles sont encore environ cent fois moins denses énergétiquement que l'essence (qui contient 12 700 Wh/kg en masse ou 8 760 Wh/L en volume). [27]

1.5.2 Stockage d'énergie des condensateurs et des SCs :

1.5.2.1 Condensateur :

Les condensateurs stockent l'énergie sous forme de charge électrique entre deux plaques métalliques ou conductrices séparées par un matériau isolant appelé diélectrique lorsqu'un différentiel de tension est appliqué sur les plaques [28]. Quand une plaque est chargée d'électricité à partir d'une source de courant continu, l'autre plaque aura induit en elle une charge du signe opposé [29]. Les facteurs qui déterminent la capacité sont la taille des plaques, la séparation des plaques et le type de matériau utilisé pour le diélectrique. L'énergie stockée dans les condensateurs est directement proportionnelle à leur capacité et au carré de la tension entre les bornes de la cellule électrochimique, tandis que la capacité est proportionnelle à la distance entre les électrodes. Les condensateurs sont déjà utilisés dans de nombreuses

applications de contrôle d'alimentation. Les avantages des condensateurs pour un faible stockage d'énergie et une décharge courte sont une longue durée de vie et une capacité de recharge immédiate [30]. Cependant, le principal problème présenté par les condensateurs est la faible densité d'énergie. Si une grande capacité est nécessaire, la surface du diélectrique doit être très grande. Ce fait rend l'utilisation de grands condensateurs peu économique et souvent encombrante [31]

1.5.2.2 Supercondensateurs :

Les SCs sont des dispositifs électrochimiques de stockage de l'énergie de forte puissance spécifique également appelé ultra-condensateur ou condensateur électrochimique (EC). Sa capacité provient de deux manières ; la capacité électrique à double couche (EDLC) et la pseudo-capacité faradique (FP) [32].

1. EDLC : Le stockage électrostatique a été réalisé par séparation de charge dans une double couche de Helmholtz, et aucun transfert de charge à travers l'interface électrode/électrolyte. Le stockage de charge est hautement réversible, permettant des stabilités de cycle de vie élevées. La distance de séparation de charge dans une double couche est de l'ordre de 0,3 à 0,8 nm. Le matériau d'électrode EDLC le plus courant est le carbone. Actuellement, le SC à base de carbone représente environ 85 % du chiffre d'affaires mondial des SCs. Le charbon actif représente le matériau carboné le plus utilisé dans les dispositifs commerciaux en raison de la disponibilité de ses précurseurs et de son faible coût [32].

2. FP : Des réactions redox rapides et réversibles se produisent à la surface des matériaux d'électrode, améliorant considérablement la capacité des matériaux d'électrode. La capacité FP peut être 10 à 100 fois supérieure à celle de l'EDLC. Ce type de matériau comprend principalement des oxydes de métaux de transition (par exemple, RuO₂) et des polymères conducteurs (par exemple, polyaniline, polypyrrole, polythiophène et leurs dérivés correspondants). Les réactions impliquent une adsorption réversible (par exemple, l'adsorption d'hydrogène), des réactions redox (par exemple, RuO₂) et un dopage/dédopage électrochimique réversible (par exemple, des électrodes conductrices à base de polymère). FP souffre généralement d'une densité de puissance relativement plus faible que EDLC car les processus faradiques sont normalement plus lents que les processus non faradiques. De plus, FP manque

souvent de stabilité pendant le cyclage en raison des réactions redox se produisant aux électrodes. Les capacités EDLC et FP contribuent à la capacité totale du SC. Le rapport des deux varie considérablement en fonction de la conception des électrodes et de la composition de l'électrolyte. Sur la base de la conception des électrodes, EC est divisé en trois familles. [32]

- **Condensateurs EDLC:** Le carbone ou ses dérivés servent d'électrodes. Les charbons actifs commerciaux ont une capacité inférieure à 200 F g^{-1} dans les électrolytes aqueux et inférieure à 100 F g^{-1} dans les électrolytes organiques. La densité d'énergie moyenne est d'environ 5 Wh kg^{-1} .
- **Condensateurs FP :** Les électrodes sont constituées d'oxydes métalliques ou de polymères conducteurs, qui présentent une capacité FP beaucoup plus élevée que celle des EDLCs. Une capacité de 600 à 1000 F g^{-1} est réalisable.
- **Condensateurs hybrides :** Ce type de condensateur a une configuration d'électrode asymétrique (par exemple, une électrode est en carbone tandis que l'autre est en FP) [32]

a- Fonctionnement :

Les SCs ont le même principe que les condensateurs. (C-à-d ils stockent l'énergie sous forme de charge électrique entre deux plaques métalliques ou conductrices séparées par un matériau isolant appelé diélectrique lorsqu'un différentiel de tension est appliqué sur les plaques [28]. Quand une plaque est chargée d'électricité à partir d'une source de courant continu, l'autre plaque aura induit en elle une charge du signe opposé.)

Contrairement au condensateur, le matériau isolant est remplacé par un conducteur ionique électrolytique dans lequel le mouvement ionique est effectué le long d'une électrode conductrice avec une surface spécifique très grande fournissant une densité d'énergie plus élevée au système [30]. La conception des électrodes et le choix de l'électrolyte permettent une densité de charge très élevée sur les surfaces de l'électrode, mais limite la tension à environ $2,7 \text{ V}$ par cellule. Malgré la basse tension, la teneur en énergie est beaucoup plus élevée que dans les condensateurs

conventionnels et peut atteindre l'échelle de quelques Wh pour certains des plus grands SCs qui sont maintenant disponibles sur le marché.

Les SCs sont reliés entre eux pour former des modules plus grands pouvant contenir jusqu'à 1 kWh d'énergie et peuvent être assemblés pour des unités de stockage d'énergie plus grandes. Ils ont une puissance de sortie très élevée et les systèmes de stockage d'énergie actuellement à l'essai atteignent environ 50 à 100 kW [33].

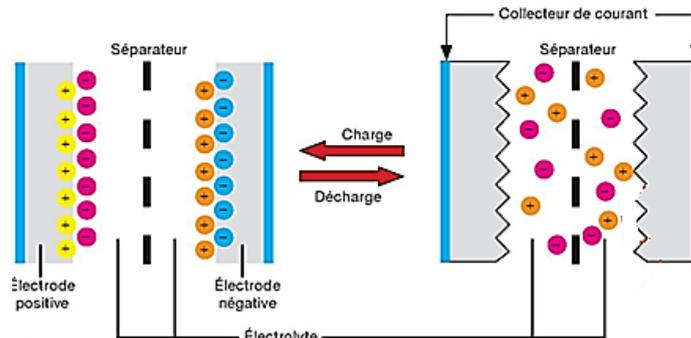


Figure 1.8 : Représentation schématique d'un SC dans l'état chargé et déchargé.

[openedition.org]

1.5.2.3 Applications des supercondensateurs :

Les applications des supercondensateurs couvrent le transport (VE, VEH, les métros et les tramways) (conservation d'énergie, freinage régénératif et aide au démarrage à froid, etc.), la sauvegarde (appareils photo numériques, ordinateurs, alimentations sans coupure, et télécommunications), industrielles (automatisation des usines et robotique) et énergies renouvelables (énergie solaire et éolienne), etc.

Dans la plupart des applications, l'énergie stockée ne fournit la charge que pendant quelques secondes ou quelques minutes. Le nombre de cycles de charge et de décharge est pratiquement illimité, mais le débit d'énergie en fonctionnement cyclique rapide est limité. Un circuit de contrôle pour équilibrer les tensions individuelles de chaque SC est nécessaire pour un fonctionnement sûr et fiable si les SCs sont connectés en série pour atteindre une tension de sortie élevée. La durée de vie des supercondensateurs sera probablement dans la gamme des grands condensateurs conventionnels, p.ex. 10 ans. L'efficacité d'entrée-sortie est très élevée,

mais le taux d'autodécharge est considérable par rapport aux batteries. Enfin, on peut noter que l'inconvénient le plus important des supercondensateurs est leur coût élevé estimé à 5 fois celui des batteries plomb-acide [34]

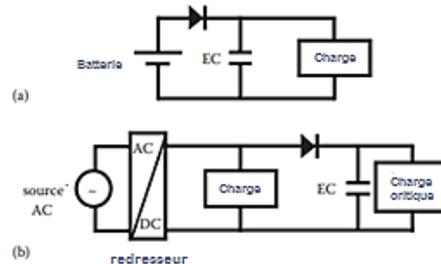


Figure 1.9: Utilisation de SC dans les circuits électroniques.[32]

- (a) Dispositif alimenté par batterie où le SC assure l'alimentation de secours de la charge en cas de déconnexion de la batterie.
- (b) Dispositif alimenté en courant alternatif impliquant de forts courants de commutation. Le SC protège la charge critique des chutes de tension importantes.

1.5.2.4 Avantage des supercondensateurs :

- **Longue durée de vie.** Les batteries rechargeables s'usent généralement après des centaines à quelques milliers de cycles de charge-décharge. par contre, l'espérance de vie des SCs, à l'exception de celles avec des électrodes polymères, est beaucoup plus longue que celle des batteries. Pour EDLC, ils ont une durée de vie quasi illimitée. Ils peuvent supporter un grand nombre de cycles de charge-décharge, jusqu'à des millions de cycles. Au cours de leur cycle de vie, aucune baisse substantielle de capacité ou augmentation significative de la résistance interne ne se produit, car aucune réaction chimique de transfert de charge ou des changements de phase négligeables ne sont impliqués dans le processus de charge et de décharge. Même pour les FP, bien que des réactions redox rapides soient impliquées, leur durée de vie est également beaucoup plus longue que celle des batteries. Par conséquent, une maintenance de routine minimale est requise, ce qui signifie moins d'influence sur le coût total. [32]
- **Large plage de température de fonctionnement:** Un SC peut fonctionner efficacement dans une large fenêtre de température allant de -40°C à 70°C sans

dégradation significative. Une plage de température de fonctionnement aussi large est incroyable pour une batterie lithium-ion, en particulier à basse température. En raison de la surchauffe, la batterie lithium-ion ne peut pas fonctionner à des températures extrêmement élevées

- **Ecologiques:** Principalement constitués de carbone et de ses composés, le SC est facilement biodégradable et ses déchets sont faciles à éliminer.
- **Haute efficacité:** Un SC démontre jusqu'à 90-95% de conversion d'énergie ou plus, ce qui est beaucoup plus élevé que celui des batteries. Pendant la charge, la perte d'énergie pour EDLC n'est que de 1 %, tandis que pour une batterie plomb-acide, la perte atteint jusqu'à 30 %.

1.5.2.5 Inconvénients :

- **Prix élevé.** Il est estimé à environ 10 fois plus élevé que celui des batteries. D'autre part, les SCs doivent être assemblés en série ou en parallèle pour la haute tension et la haute puissance. Les variations de l'autodécharge des cellules peuvent entraîner un déséquilibre des tensions dans un bloc SC. Par conséquent, l'équilibrage des tensions des cellules pour éviter les surtensions est le principal problème. Pour obtenir l'équilibrage des cellules, d'autres composants sont ajoutés, ce qui augmente également le prix. [32]
- **Faible densité d'énergie.** Actuellement, un SC ne peut pas complètement remplacer les batteries en raison de sa densité d'énergie limitée (environ 5 Wh/kg). En particulier, les SCs disponibles dans le commerce ne peuvent fournir que des densités d'énergie de 3 à 4 Wh/kg. En raison de leur faible densité d'énergie, ils ne peuvent pas supporter des charges pendant quelques minutes. Deux stratégies sont adoptées pour améliorer la densité d'énergie, à savoir, l'amélioration de la capacité spécifique des matériaux d'électrode et l'expansion de la fenêtre de potentiel de fonctionnement. Les électrolytes, en particulier les liquides ioniques ont une large plage de tension de fonctionnement. Les condensateurs asymétriques ou hybrides sont également un candidat potentiel pour améliorer la fenêtre de potentiel puis la densité d'énergie. Par exemple, les systèmes MnO_2/AC peuvent fonctionner dans

une plage de tension de 0 à 2,2 V. Dans un électrolyte aqueux doux Li_2SO_4 , le système Li fonctionne dans une plage de tension de 0,8 à 1,8 V. [32]

- **Basse tension.** Généralement, la fenêtre de potentiel du SC est comprise entre 1 et 2,5 V. Dans le cas de l'électrolyte organique, elle se situe entre 2 et 3 V. mais en pratique, les applications les plus puissantes nécessitent des tensions beaucoup plus élevées, et certaines atteignent jusqu'à 700 V. Pour obtenir les tensions d'application requises, un SC doit être connecté en série. Chaque SC présente une légère différence de valeur de capacité, de tension et de résistance série équivalente. Celles-ci posent un problème d'équilibrage des cellules, comme les équilibres de tension et de RSE. Une RSE plus élevée entraîne une chute de tension plus élevée, entraînant de mauvaises performances et une dégradation du produit. Et donc il est nécessaire de les équilibrer activement ou passivement avec une unité de commande ou un équilibrage électronique. Ceux-ci affectent l'efficacité volumétrique du module du SC fini. Un module de 500 V aura la taille d'un bureau, ce qui représente un grand défi pour la conception de l'appareil.[32]
- **Absence de normes:** Lors de l'utilisation des SCs comme dispositif de stockage d'énergie, un facteur de forme standardisé permettra leur adaptabilité facile. Cependant, jusqu'à présent, il n'y a toujours pas de norme commune pour le SC. L'absence de normes a grandement affecté l'adoption du marché, car chaque entreprise doit identifier différents paramètres de conception pour chaque client. Et ça rend la comparaison des produits fabriqués par différentes entreprises difficile et donne lieu à un défi supplémentaire dans le développement de la technologie et la conception de cette technologie, ralentissant l'étape de marché des supercondensateurs (ex :le SC actuel n'a pas de spécifications de taille et de forme, compliquant la conception. En conséquence, les entreprises s'efforcent de réduire l'empreinte de leurs produits en adoptant diverses formes. Ainsi, il est essentiel de réguler différents paramètres tels que la taille, la forme et la tension).[32]
- **Sensibilisation limitée des consommateurs :** En raison de sa faible densité d'énergie, le SC n'est pas une exigence directe pour les utilisateurs finaux, ce qui entraîne une sensibilisation limitée des consommateurs. Sur le marché de l'électronique grand public, le SC ne sert pas de principal dispositif de stockage

d'énergie, mais est particulièrement utilisé dans les produits à valeur ajoutée, tels que les téléphones mobiles de haute technologie et les appareils photo numériques. Par conséquent, il est nécessaire d'accroître la sensibilisation et mettre correctement l'accent sur les avantages de la technologie. [32]

- **Fuite :** La fuite est l'instabilité thermodynamique de l'état chargé dépend de la capacité, la tension, la température et la stabilité chimique de la combinaison électrode et électrolyte d'un SC. La fiabilité du stockage d'énergie peut devenir un problème dans la conception. De plus, en raison des fuites, il y a tendance à avoir un court-circuit, entraînant une perte immédiate de la mémoire de données lorsque les piles sont retirées. C'est pourquoi les caractéristiques de fuite des SCs doivent être évaluées et améliorées avant leur utilisation. [32]
- **Facteur de sécurité:** Bien que la faible résistance interne d'un SC permette une décharge extrêmement rapide, elle peut entraîner un risque d'étincelle beaucoup plus important que les batteries en cas de court-circuit. Pour garantir la sécurité, un circuit et un dispositif de protection sont souvent installés. [32]

1.5.3 Différence entre les batteries Li-ion et SCs :

Comme une batterie, un SC transfère et stocke des ions. Sa base est également constituée d'un électrolyte, mélange d'ions positifs et négatifs. Dans le cas de la batterie, la charge et la décharge provoquent des réactions chimiques qui déplacent les ions de l'électrolyte vers l'intérieur ou l'extérieur de la structure atomique, entraînant un changement d'oxydation du matériau.

Dans un SC, c'est un champ électrique qui amène les ions à se déplacer vers ou depuis la surface des électrodes, sans réaction redox. Les ions se stockent et se déstockent sans aucune réaction chimique, rendant l'opération quasi immédiate. Un SC peut ainsi être chargé et déchargé infiniment plus rapidement qu'une batterie. Par comparaison, un véhicule électrique équipé d'un SC se charge, intégralement, en quelques secondes.

Tableau 1 : Comparaison entre batterie li-ion et SC :

Fonction	Supercondensateur	Batterie lithium-ion
Temps de charge	1-10 secondes	10-60 minutes
Cycle de vie	1 million ou 30 000h	500 et plus
Tension d'une cellule	De 2.3 à 2.75 V	3.6 à 3.7 V
Energie spécifique Wh/kg	5	100-200
Puissance spécifique W/kg	Jusqu'à 10 000	1000-3000
Durée de service (véhicule)	10 à 15 ans	5 à 10 ans
Température de charge	-40 à 65°C	0 à 45°C
Température de décharge	-40 à 65°C	20 à 60°C
Coût par Wh	\$20	0.50-1.00 (système large)

1.6 Conclusion :

Ce chapitre concernait quelques généralités sur les énergies renouvelables, plus précisément l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne ainsi que les moyens de stockage par batterie lithium ion et supercondensateurs. Nous avons décrit le fonctionnement et les applications de ces deux moyens dans le domaine des énergies renouvelables.

La modélisation des systèmes PV et éolien et la méthode de gestion de stockage hybride sera présentée dans le chapitre suivant.

*CHAPITRE 02 : MODELISATION
DES SYSTEMES PV ET EOLIEN*

2.1 Introduction :

Les préoccupations croissantes en matière d'énergie et l'épuisement des sources conventionnelles ont donné lieu à l'exploration et à l'expansion de l'utilisation de sources renouvelables [1]. L'énergie solaire photovoltaïque est un candidat prometteur sans bruit et sans entretien [2] considérée comme une solution rentable dans de nombreuses applications hors réseau, surtout dans les régions éloignées du service public [3]. Toutefois son caractère intermittent en raison de sa dépendance aux conditions météorologiques environnantes, a rendu difficile le maintien d'un service autonome robuste et fiable [5-6]. C'est pourquoi les systèmes PVs autonomes sont des sources modulaires flexibles conçues pour fonctionner indépendamment du réseau d'électricité. Ils sont choisis car ils conviennent aux applications hors réseau dans les régions éloignées, où l'approvisionnement en réseau est inaccessible ou peu fiable [4]. Mais il faudrait leur fournir un système de stockage d'énergie (SSE) comme solution de rechange [7] qui équilibre la différence entre la puissance générée et la puissance consommée, c.-à-d. stocker l'excédent de puissance générée pendant les rayonnements élevés, tout en maintenant une alimentation stable à la charge lorsque le soleil est insuffisant [8].

D'habitude les systèmes PVs utilisent des batteries comme principal dispositif de stockage d'énergie, mais des problèmes liés à l'efficacité de chargement et de décharge et des durées de vie relativement courtes se posent. Bien que les batteries possèdent une densité d'énergie élevée qui les rend pratiques pour l'échange régulier de puissance à basse fréquence, elles montrent une faible densité de puissance. Cette dernière signifie que les batteries ont de faibles taux de charge/décharge, c.-à-d. des fluctuations soudaines de la puissance (en raison de surtensions ou de production irrégulière d'énergie PV) interrompent leurs cycles de charge/décharge et finissent par dégrader leur durée de vie [9]. Par contre, les SCs possèdent une densité de puissance plus de 10 fois supérieure, ce qui permet des taux de charge/décharge extrêmement plus rapides et des rendements comparativement plus élevés [10]. Cela en fait le meilleur choix pour les échanges de puissance rapides à haute fréquence. Leur durée de vie et le nombre de cycles sont 500 fois plus élevés [11] en plus d'être légers, sans

entretien, moins toxiques et sans danger pour l'environnement puisqu'aucune réaction chimique ne se produit lors de la charge de SC [12].

Par conséquent, afin de préserver la stabilité du système et d'éliminer l'impact des transitoires d'alimentation sur la durée de vie de la batterie, le principe du système de stockage d'énergie hybride batterie/sc a été réalisé dans ce chapitre [13, 14]. Les batteries avec leur grande capacité remplissent une alimentation d'énergie régulière tandis que les SC avec leur haute densité de puissance et de réponse rapide fournissent les puissances de crête instantanées pendant les transitoires. Ainsi, l'effort sur la batterie est réduit, sa durée de vie est augmentée, les coûts élevés de remplacement de la batterie sont éliminés et la fiabilité du système est améliorée [15-16].

Les SSH batterie/SC sont normalement divisés en topologies passives, semi-actives et actives basées sur la connexion des éléments de stockage au bus DC [10]. Dans le passif, les éléments de stockage sont directement connectés à la liaison DC. La topologie semi-active est lorsque seulement un élément est couplé au bus DC via un convertisseur DC-DC bidirectionnel. Enfin, lorsque les deux éléments sont connectés au bus par des hacheurs bidirectionnels, c'est considéré comme la topologie active. Cette dernière améliore la flexibilité du système de stockage et les performances de l'ensemble du système [17]. Sur la base de la topologie appliquée du SSE avec le système PV autonome, il devrait y avoir une stratégie de gestion de l'énergie capable d'atteindre le suivi de la puissance PV maximale (MPPT), coordonner le partage de la puissance entre la batterie et le SC et préserver l'équilibre entre la production et la consommation [18-19].

Dans ce chapitre, un système photovoltaïque autonome est considéré avec une batterie SSEH active/SC. Une stratégie est introduite pour contrôler le partage de puissance entre les éléments PV et SSE, pour garantir l'équilibre énergétique et préserver la stabilité de la tension au niveau du bus DC.

La commande SSE appliquée force le SC à faire face aux transitoires rapides tandis que la batterie compense les dérives de puissance stables. En outre, la commande PV est modifiée pour ajuster la charge de la batterie en fonction de son état de charge maximal, évitant ainsi sa dégradation et augmentant sa durée de vie. Des tests de simulation avec MATLAB/Simulink sont effectués pour vérifier l'efficacité du système avec des profils de charge et d'éclairement variables.

2.2 Description et modélisation du système d'alimentation PV :

Le système PV autonome proposé à l'étude est illustré à la figure (2.1). Il se compose d'un système PV solaire relié au bus DC par un convertisseur de puissance DC-DC. Le SSE se compose d'une combinaison de batteries et d'un supercondensateur. Chaque SSE est connecté au bus DC via un convertisseur buck boost DC-DC. Les trois sources sont utilisées pour fournir une charge DC, le PV est utilisé comme source principale, la batterie est utilisée lorsqu'il y a un surplus à consommer ou un manque à fournir, et le SC est utilisé pour limiter la variation PV ou la variation de charge. Le MPPT est utilisé pour extraire la puissance maximale du PV par le boost DC/DC, un contrôleur PI est utilisé pour contrôler chaque convertisseur buck-boost DC/DC, et l'ensemble du système est géré à l'aide d'une puissante stratégie de gestion de la puissance.

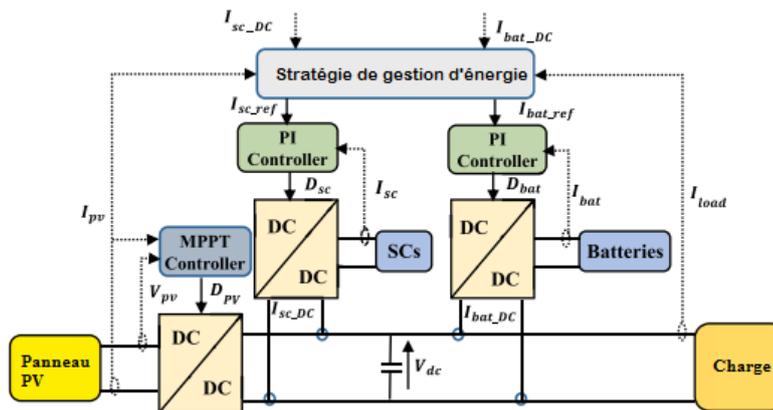


Figure 2.1: Schéma du système PV avec stockage d'énergie hybride batterie SC [31]

2.2.1 Modélisation de la cellule PV :

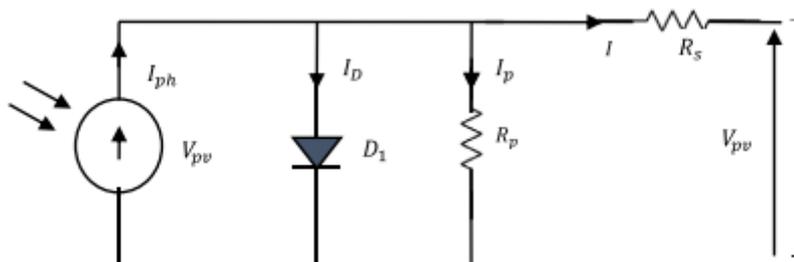


Figure 2.2 : Modèle équivalent d'une cellule PV [31]

La figure. 2.2 démontre le modèle commun de PV solaire, qui se compose d'un photo-courant, une diode, une résistance de série R_s représentant une résistance interne au courant [20]

L'équation (1) donne la caractéristique tension-courant d'une cellule solaire: [21]

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{qV + IR_s}{kT_s A} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.1)$$

Où I_{ph} est un photocourant, I_s est la saturation de la cellule de courant sombre, q est la charge d'électron ($q = 1.6.10^{19}C$), k est la constante de Boltzman ($k = 1.3.10^{-23} J/K$), T_c indique la température de travail de la cellule, et A est le facteur d'idéalité. [22]

L'équation (2) décrit le courant de saturation comme suit :

$$I_s = I_p \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[q G_r \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right) \frac{1}{kA} \right] \quad (2.2)$$

Où T_{ref} est la température de référence de la cellule, et G_r est l'isolation solaire.

Plusieurs modules PV sont raccordés en série et en parallèles pour former un réseau PV pour la génération du courant et de la tension requis. Le courant de sortie ou de charge calculé (I), avec des modules en parallèles N_p et des modules en série N_s . [23]

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s \left[\exp \left(q \left(\frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p} \right) \frac{1}{kT_c A} \right) - 1 \right] - \left(\frac{N_p V}{N_s} + IR_s \right) \frac{1}{R_p} \quad (2.3)$$

2.2.2 Système de conversion d'énergie PV :

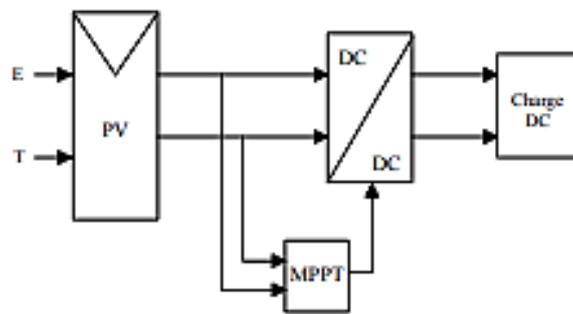


Figure 2.3 : Connexion d'un GPV à une charge DC à travers un étage d'adaptation survolteur associé à une commande MPPT.

La figure (2.3) représente le schéma synoptique d'un module PV doté d'un convertisseur DC-DC entre le GPV et la charge. Le rôle du convertisseur DC/DC (dans le cadre du PV) est de réaliser l'adaptation entre la source (GPV) et la charge pour un transfert de puissance maximal obtenu en maintenant le point de fonctionnement sur ou assez proche du MPP (point de puissance maximale) pour n'importe quelle condition de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc...)

L'algorithme MPPT permet de rechercher le point de puissance maximal que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque.

Il existe divers algorithmes pour la réalisation de la commande MPPT. On trouve la méthode de Hill Climbing, Perturb & Observe (P&O), de l'incrément de Conductance (IncCond) et par intelligence artificielle (logique floue, réseaux de neurones) [24,25].

Dans notre travail nous avons utilisé la commande P&O pour sa facilité d'implémentation. L'inconvénient majeur de cette procédure est lié aux oscillations autour du PPM en régime établi puisqu'elle doit être répétée périodiquement. Son principe et son algorithme de commande sont respectivement illustrés sur les figures (2.4 et 2.5) [26]

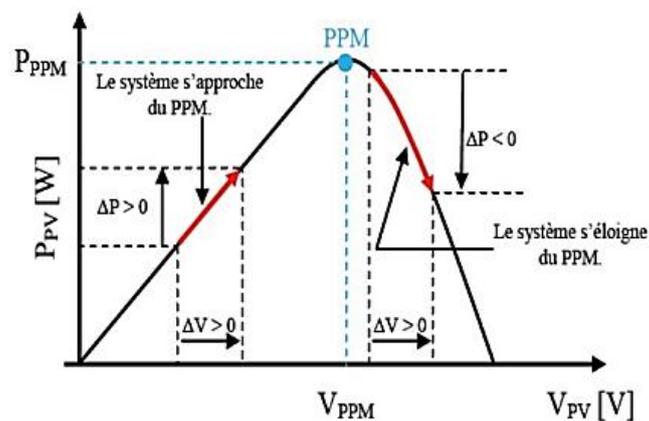


Figure 2.4 : Schéma illustratif du principe de la commande MPPT par P&O [34]

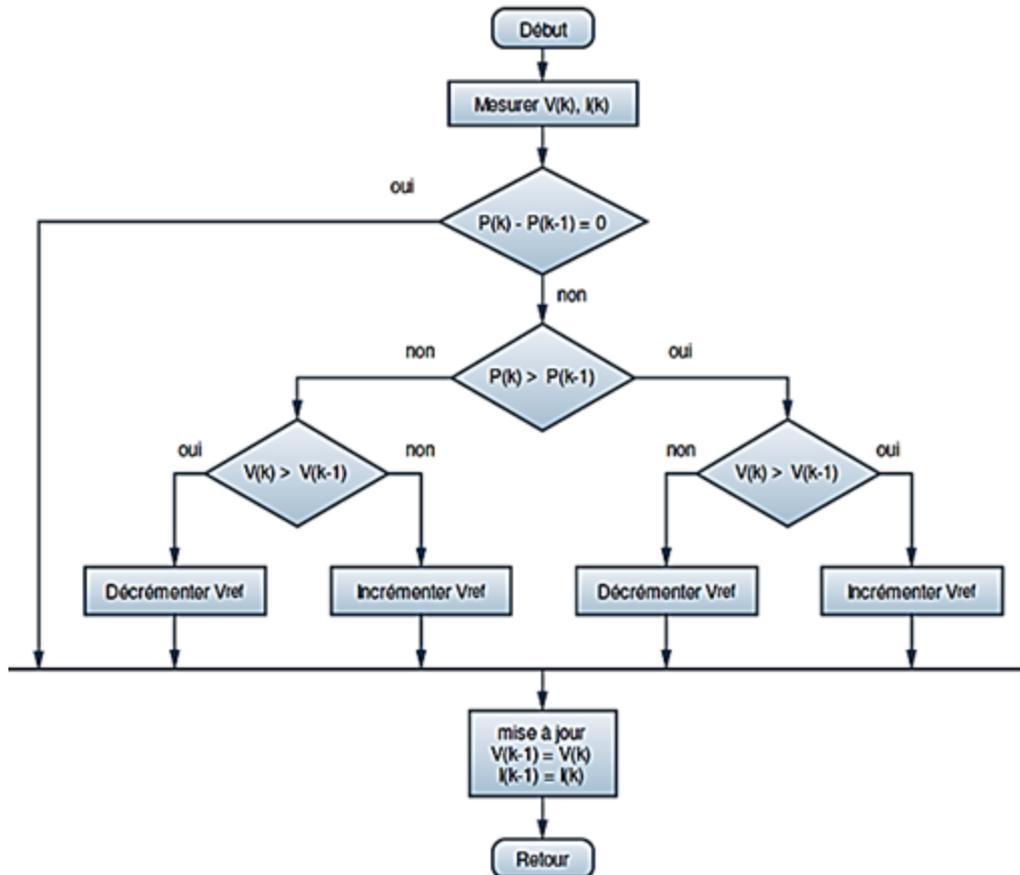


Figure 2.5: Organigramme de la méthode P&O.[energie28.blogspot.com/]

Le convertisseur utilisé est un convertisseur DC/DC élévateur. Son schéma électrique équivalent est présenté par la figure (2.6).

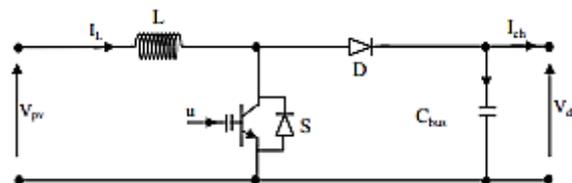


Figure 2.6 : Schéma électrique du convertisseur élévateur DC/DC

Le convertisseur est représenté par le système d'équation (2.4) :

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{dc}(1 - D) \tag{2.4}$$

$$(1 - D)I_L = C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{ch} \tag{2.5}$$

Où D est le rapport cyclique.

2.2.3 Modélisation des convertisseurs DC-DC :

Le niveau de puissance d'un convertisseur buck-boost est décrit comme sur la figure (2.7). Il est composé des commutateurs transistor Q1 et Q2, la capacité de lissage de sortie C, l'inductance de lissage L, et la charge réelle R.

Q1 est toujours fermé dans le cas du mode Buck et le courant passe du bus DC à la source hybride (batterie ou SC). Par le control de Q2, le convertisseur peut faire diminuer la tension VDC pour charger le système de stockage d'énergie.

Si le convertisseur fonctionne en mode boost, le commutateur Q2 est fermé, et la diode en Q2 permet le flux de courant dans une direction du SSE au bus DC. En contrôlant le rapport cyclique de Q1, le convertisseur peut faire augmenter la tension VSSE du système de stockage hybride pour alimenter le bus DC. [27, 28].

En mode convertisseur Buck, la tension du SSE est :

$$V_{SSE} = \frac{V_{dc}}{D} \quad (2.6)$$

En contrôlant le rapport cyclique D du convertisseur, VSSE peut être contrôlée.

En mode convertisseur de suralimentation, la tension du bus DC est :

$$V_{dc} = \frac{V_{SSE}}{1 - D} \quad (2.7)$$

Dans ce cas, V_{dc} est toujours plus élevée que la tension V_{SSE} . Le gain du convertisseur boost peut être contrôlé en faisant varier le rapport cyclique D.

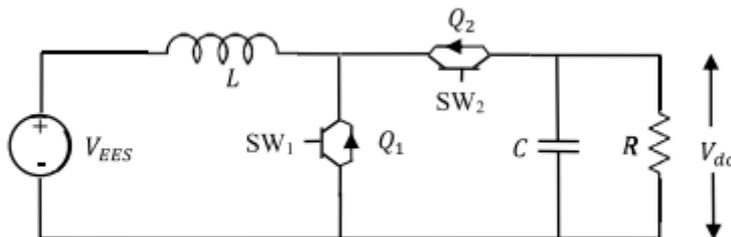


Figure 2.7 : Modèle du convertisseur buck-boost [31]

2.2.4 Schéma de contrôle proposé du système d'alimentation PV :

2.2.4.1 Contrôle du bus DC :

La figure (2.8) représente le schéma de commande de la tension du bus DC V_{dc} . La référence du courant I_{dc_ref} est obtenue à partir d'un contrôleur *PI*. Cette valeur est ensuite utilisée par la stratégie de gestion de l'alimentation pour évaluer les références actuelles I_{sc_ref} et I_{bat_ref} pour les boucles de contrôle du supercondensateur et de la batterie respectivement.

Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de régler la tension du bus DC par la distribution de courant des références I_{bat_ref} et I_{sc_ref} pour les convertisseurs statiques. La boucle de contrôle du convertisseur DC-DC buck-boost du supercondensateur est illustrée sur la figure (2.9).

La fonction de transfert de contrôle du courant SC est donnée comme suit [29] :

$$G_{sc}(s) = \frac{I_{sc}}{D_{sc}} = V_{sc} \frac{Cs + 2}{RL_{sc}Cs^2 + L_{sc}s + (1 - D_{sc})^2} \quad (2.8)$$

La fonction de transfert du contrôleur PI de la boucle de régulation du courant SC est donnée par :

$$G_{pi_sc} = \frac{D_{sc}}{I_{sc_ref}} = K_{p_sc} + \frac{K_{i_sc}}{s} \quad (2.9)$$

La fonction de transfert du courant SC à la tension de sortie est donnée par :

$$G_{scv}(s) = \frac{V_{dc}}{I_{sc}} = \frac{R(1 - D_{sc}) \left(-\frac{L\omega}{R(1 - D\omega)^2} \right) s + 1}{RCs + 2} \quad (2.10)$$

Eq. (2.11) représente la fonction de transfert du compensateur de boucle de régulation de tension :

$$G_{pi_DC} = K_{p_DC} + \frac{K_{i_DC}}{s} \quad (2.11)$$

Où C est le condensateur du bus DC, R est la résistance du bus DC, L_{sc} indique l'inductance du convertisseur DC/DC du supercondensateur, V_{sc} est la tension du supercondensateur, D_{sc} représente le rapport cyclique pour le contrôle du convertisseur DC/DC du supercondensateur.

De même, la boucle de contrôle du convertisseur DC/DC de la batterie est illustrée sur la figure (2.10).

Avec L_b l'inductance du convertisseur DC/DC de la batterie, V_b la tension de la batterie, D_b le rapport cyclique de la commande du convertisseur DC/DC de la batterie.

A tout moment, le courant de référence de la batterie I_{bat_ref} de la batterie est donné par :

$$I_{bat_ref} = I_{DC_ref} - I_{sc_ref} \tag{2.12}$$

Ces courants assurent une tension du bus DC constante sous charge variable et/ou puissance extraite des panneaux PV.

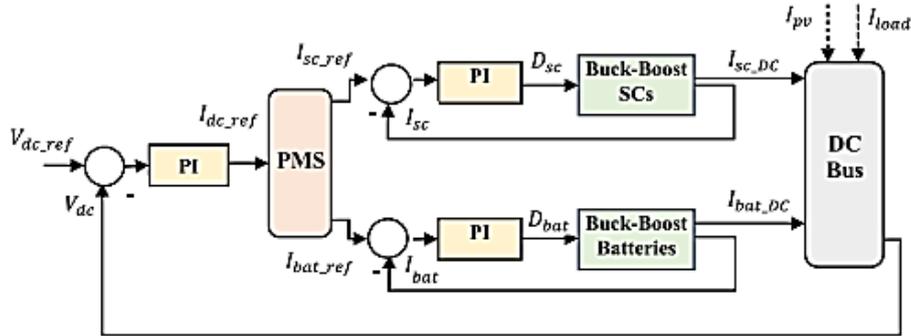


Figure 2.8 Schéma bloc de contrôle du bus DC [31]

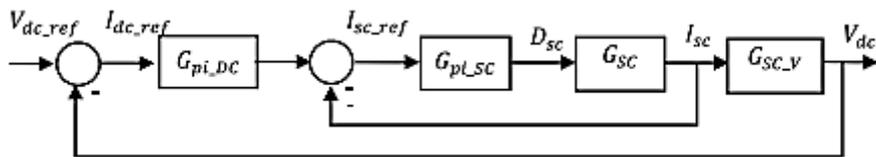


Figure 2.9 : Boucle de contrôle PI du supercondensateur [31]

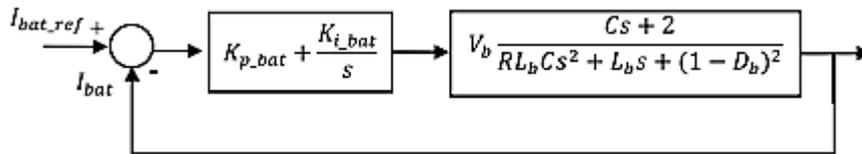


Figure 2.10: Boucle de contrôle PI de la batterie [31]

2.2.4.2 Conception du contrôleur PI :

Les convertisseurs DC/DC sont contrôlés par des contrôleurs PI. Étant donné que le SC a des taux de charge/décharge plus rapides que ceux de la batterie, les contrôleurs PI sont réglés en fonction de la platine d'alimentation SC.

Contrôleur PI par placement de poles :

L'approche classique de placement de pôles cherche à trouver le contrôleur qui donne des pôles en boucle fermée désirés. La dynamique du convertisseur buck-boost peut être décrite par la fonction de transfert de second ordre suivante [30] :

$$G_p(s) = \frac{\beta(1 - \beta)}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + (1 - \beta)^2} \quad (2.13)$$

β est le cyclique du convertisseur DC/DC. L, R et C indiquent respectivement l'inductance, la résistance et la capacité dans le circuit du convertisseur DC-DC.

Il est possible de placer arbitrairement les deux pôles du système en boucle fermée en utilisant un contrôleur PI,

qui a deux paramètres. La fonction de transfert du contrôleur PI peut s'écrire comme suit :

$$G_c(s) = \frac{K_p(1 + sT_i)}{sT_i} \quad (2.14)$$

L'équation caractéristique du système en boucle fermée devient :

$$1 + G_p(s).G_c(s) = 0 \quad (2.15)$$

$$1 + \frac{\beta(1 - \beta)}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + (1 - \beta)^2} \frac{K_p(1 + sT_i)}{sT_i} = 0 \quad (2.16)$$

L'équation caractéristique appropriée en boucle fermée d'un système de troisième ordre est :

$$(s + \alpha\omega_0)(s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2) = 0 \quad (2.17)$$

Par identification, on obtient:

$$\begin{cases} LCT_i = 1 & (2.18) \\ K_p\beta(1 - \beta) = \alpha\omega_0^3 & (2.19) \end{cases}$$

Ce qui donne:

$$\begin{cases} K_p = \frac{\alpha \omega_0^3}{\beta(1-\beta)} & (2.20) \\ T_i = \frac{1}{LC} & (2.21) \end{cases}$$

2.2.5 Stratégie de gestion de l'énergie :

La stratégie proposée est simple et facile à mettre en œuvre et à utiliser comme suit :

- Les SC commencent à se décharger lorsque la puissance PV n'est pas suffisante pour alimenter la charge ($P_{pv} < P_{load}$), et les batteries ne peuvent pas fournir cette différence de puissance à la charge.
- D'autre part, les SC commencent à se charger lorsque la puissance de sortie PV est supérieure à la puissance requise ($P_{pv} > P_{load}$), et les batteries ne peuvent pas stocker cet excès de puissance en peu de temps.

Les SC répondent directement aux besoins de la charge en fournissant ou en absorbant les courants de pics. La figure (2.11) explique la stratégie de gestion de l'alimentation pour la régulation de la tension du bus DC. La stratégie de contrôle proposée est mise en œuvre dans le bloc de commande pour gérer le flux de puissance du système de stockage hybride afin d'atteindre différents objectifs tels que :

- 1) réduire le niveau de contrainte dynamique de la batterie,
- 2) maintenir une tension DC stable,
- 3) empêcher une décharge profonde de la batterie,
- 4) améliorer l'efficacité globale du système, comme le montre la figure (2.12).

L'erreur de tension entre V_{dc_ref} et V_{dc} entrée au contrôleur PI pour avoir l'erreur de courant total, qui représente le courant total à fournir par le HESS (batteries et supercondensateurs), est définie dans l'équation (20).

$$\Delta I = I_{pv} - I_{load} = I_{bat} + I_{sc} \quad (2.22)$$

Ainsi, la valeur de ΔI se compose du composant « haute fréquence satisfait par le SC, et la « basse fréquence » atteinte par les batteries. Pour cela, l'utilisation d'un filtre passe-bas permet d'avoir la composante basse fréquence, qui est le courant de référence du déficit, équation donnée par (21) :

$$\Delta I^* = f_{LPF}(\Delta I) \quad (2.23)$$

Où, f_{LPF} désigne la fonction de transfert du filtre passe-bas. Un limiteur de charge est inclus pour fournir le courant de référence des batteries [18] qui est donné par :

$$I_{bat_ref} = f_{LPF}(\Delta I^*) \quad (2.24)$$

Cette valeur de référence I_{bat_ref} est comparée à la valeur réelle (I_{bat}), et l'erreur de courant est transmise au contrôleur PI, pour générer le D_{bat} pour le signal de commande PWM des commutateurs du convertisseur de batteries (SW_1 et SW_2)

Par conséquent, l'alimentation non compensée de la batterie est fournie comme suit :

$$P_{bat_UC} = (\Delta I - I_{bat})V_{bat} \quad (2.25)$$

Le rôle du supercondensateur est de fournir la puissance non compensée des batteries. Pour cette raison, le courant de référence du supercondensateur est donné comme suit :

$$I_{sc_ref} = \frac{P_{bat_UC}}{V_{sc}} = (\Delta I - I_{bat}) \frac{V_{bat}}{V_{sc}} \quad (2.26)$$

De même que pour le contrôle des batteries, cette valeur de référence I_{sc_ref} est comparée à la valeur réelle I_{sc} , et l'erreur du courant est transmise au contrôleur PI, qui génère le D_{sc} du cycle de service pour le signal de contrôle PWM des commutateurs du convertisseur du supercondensateur (SW_3 et SW_4).

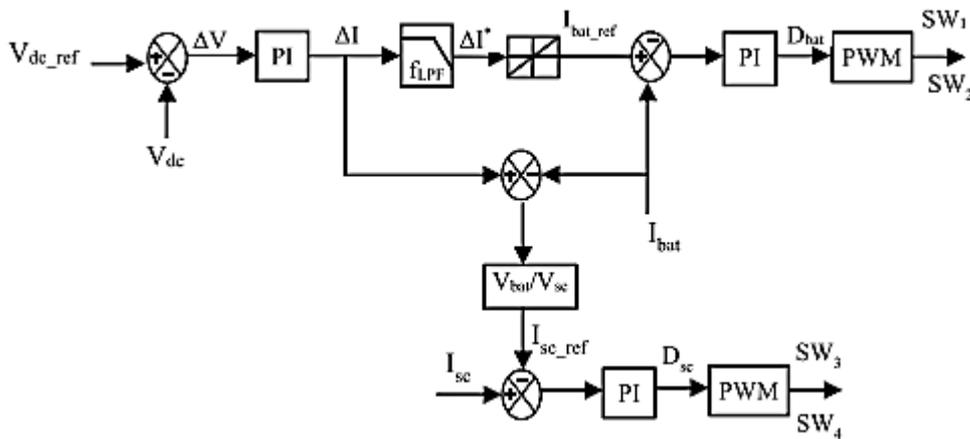


Figure 2.11: Schéma de contrôle du système de stockage d'énergie hybride

2.3 Description et modélisation du système d'alimentation éolien :

La nature variable du vent et les profils de charge fluctuants rendent l'exploitation des systèmes d'énergie éolienne difficile, en particulier lorsqu'ils fonctionnent en mode autonome. La variation aléatoire de la vitesse du vent entraîne une fluctuation du couple du générateur de l'éolienne, ce qui se traduit par des excursions de tension et de fréquence dans le système d'alimentation électrique en région éloignée. L'intégration d'un système de stockage d'énergie dans une éolienne améliore la réponse de la tension et de la fréquence, en particulier lors des variations de vent et de charge. L'application d'un système de stockage d'énergie à un système d'alimentation autonome peut être utilisée pour répondre à l'un des objectifs suivants: améliorer l'efficacité du système éolien global, réduire l'utilisation de carburant primaire (par exemple, le diesel) par la conversion d'énergie, réduire la consommation d'énergie, et fournir une meilleure sécurité d'approvisionnement en énergie. La justification de l'intégration d'un stockage d'énergie dans une application éolienne est basée sur des facteurs qui incluent l'inertie totale de l'éolienne, la capacité de transit en basse tension, les problèmes de qualité de l'énergie, etc. [32]

Pour un système éolien, un système de stockage idéal devrait être capable de fournir à la fois une énergie et une capacité de puissance élevées pour faire face à des situations telles que des rafales de vent ou des variations de charge soudaines qui peuvent exister pendant quelques secondes ou même plus. Cependant, parmi toutes les options de stockage d'énergie disponibles, un seul type de stockage d'énergie ne permet pas de satisfaire à la fois les besoins en puissance et en énergie du système, ce qui nécessite la combinaison de deux ou plusieurs systèmes de stockage d'énergie. Le choix d'une option de stockage d'énergie nécessite une bonne compréhension de ses caractéristiques opérationnelles. [32]

On considère que la batterie li-ion et le SC répondent respectivement à des besoins élevés en énergie et en puissance. Par conséquent, l'intégration d'un SC assure un fonctionnement sain de la batterie en l'empêchant de fonctionner dans des régions à forte profondeur de décharge et de fonctionner dans des régions de puissance à basse fréquence. Les générateurs synchrones à aimant permanent offrent de nombreux avantages, notamment la capacité d'auto-excitation qui permet de fonctionner avec un

facteur de puissance élevé et un meilleur rendement, une transmission sans engrenage, une grande fiabilité, de bonnes performances de contrôle, la capacité de suivi du point de puissance maximale (MPPT) et de faibles émissions sonores. Dans cette partie du chapitre, la performance des composants du système hybride sont étudiées dans des conditions de vent fluctuant et de charge variable. Le GSAP est la principale source d'énergie, tandis que le stockage d'énergie hybride et la charge de délestage sont des composants auxiliaires du système qui permettent de maintenir l'équilibre de la puissance active du système éolien et d'extraire la puissance maximale du vent. [32] voir la Figure (2.12).

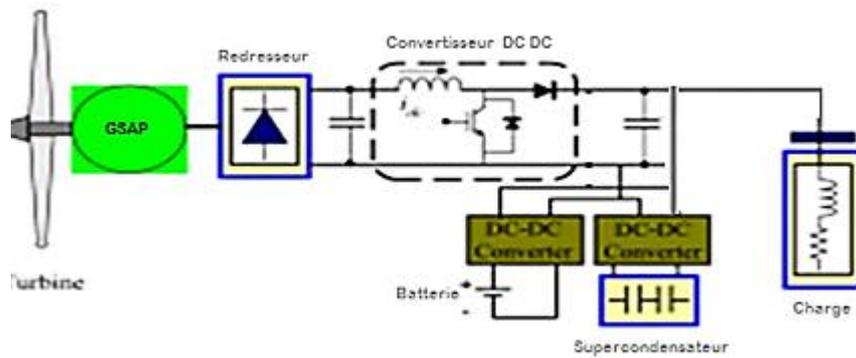


Figure 2.12 : Système éolien basé sur un GSAP avec un stockage d'énergie hybride [33]

2.3.1 Modèle de la turbine et de la Machine Synchrone à Aimant Permanent et du redresseur:

La puissance théorique appliquée à la turbine est donnée par (2.27), où ρ est la masse volumique de l'air, S est la surface circulaire balayée par la turbine; β est l'angle de calage des pales, v est la vitesse du vent en [m / s]. [32]

$$P_t = \frac{1}{2} \times C_p(\lambda, \beta) \times \rho \times S \times V^3 \quad (2.27)$$

Le rapport entre la vitesse de la turbine et la vitesse du vent est exprimé par (2.28), où Ω_m est la vitesse de rotation de la turbine; R_t est le rayon des pales. [32]

$$\lambda = \frac{\Omega_m \cdot R_t}{v} \quad (2.28)$$

Le coefficient de puissance (C_p) présente une limite théorique de 0,593 appelée "limite de Betz". Cette limite n'est jamais atteinte dans la pratique. Ce coefficient peut être estimé à l'aide de (2.29).

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = (0.35 - 0.00167) \cdot (\beta - 2) \cdot \sin(A) - 0.00184 \cdot (\lambda - 3)(\beta - 2) \\ A = \frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{14.34 - 0.3(\beta - 2)} \end{cases} \quad (2.29)$$

Le couple mécanique de l'éolienne C_m obtenu à partir de la puissance mécanique est exprimé par (2.30). [32]

$$C_m = \frac{P_t}{\Omega_m} \quad (2.30)$$

L'équation mécanique du système est exprimée par (2.31), où J_t et J_m présentent respectivement les moments d'inertie de la turbine et le générateur; f_v est le coefficient des frottements visqueux du générateur, Ω_m est la vitesse de rotation du générateur [32]

$$(J_t + J_m) \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \cdot \Omega_m = C_m - C_{em} \quad (2.31)$$

Le modèle dynamique de la MSAP dans le repère dq est présenté par (2.32), Avec la résistance statorique R_s , L_s et L_q sont les inductances dans le repère dq, I_{sd} et I_{sq} sont les courants statoriques, Ω la vitesse électrique de la MSAP et φ est le flux rémanent de la MSAP. [32]

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{\Omega \cdot L_q}{L_d} \\ -\frac{\Omega \cdot L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{sq} - \Omega \cdot \varphi \\ -U_{sd} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Le système présenté utilisé dispose d'un convertisseur statique : un redresseur du côté de la machine. Son modèle par (2.33), où C est la capacité du bus continu ; I_{S1} , I_{S2} et I_{S3} sont les courants triphasés statoriques de la génératrice, S_a , S_b et S_c sont les signaux PWM et I_{ond} est le courant onduleur.[32]

$$C \cdot \frac{dV_{DC}}{dt} = (S_a \cdot I_{S1} + S_b \cdot I_{S2} + S_c \cdot I_{S3}) - I_{ond} \quad (2.33)$$

($I_{ond} = 0$ car on n'utilise pas d'onduleur après le redresseur, notre système n'injecte pas dans le réseau et la charge utilisée est continue) [32]

2.3.2 Approche de commande coordonnée :

En général, pour obtenir une régulation solide de la tension et de la fréquence de n'importe quel système électrique, il est vital de maintenir l'équilibre actif et réactif donné par (2.34) et (2.35) respectivement [33].

$$\Sigma P_{sources} - \Sigma P_{éviers} = \frac{dE_{kE}}{dt} = \frac{d\Sigma J\omega^2}{dt} = 0 \quad (2.34)$$

$$\Sigma Q_{sources} - \Sigma Q_{éviers} = 0 \quad (2.35)$$

Où P est la puissance active, E_{kE} énergie cinétique du système, J moment d'inertie de la machine tournante, ω vitesse angulaire de la machine tournante et Q puissance réactive de la machine tournante et Q -puissance réactive. En ce qui concerne le système éolien illustré sur la figure 1, le flux de puissance active doit être coordonné entre l'aérogénérateur, le stockage par batterie, le supercondensateur, et la charge ce qui est donné par (2.36). [33]

$$P_w \pm P_b \pm P_c = P_L \quad (2.36)$$

Où P_w production d'énergie éolienne, P_b production de stockage sur batterie, P_c production de SC, et P_L puissance de la demande.

Pour assurer l'équilibre de puissance du système étudié, une approche de contrôle coordonné est développée comme l e montre la figure 2.16. Dans les conditions de surproduction où la puissance produite par l'éolienne P_w est supérieure à la demande de la charge P_L le stockage d'énergie hybride doit absorber la puissance excédentaire $P_w - P_L$, conformément à l'algorithme de gestion de l'énergie présenté dans la section V. Si les capacités du système de stockage atteignent leurs limites maximales, la charge utile est utilisée pour absorber l'excès de puissance. [33]

Si $P_w - P_L < 0$, on suppose que le stockage d'énergie hybride est capable de fournir la puissance requise au système. L'approche de coordination des contrôles présentée ci dessus a été réalisée en développant les stratégies de contrôle pour chaque système composant du système éolien. [33]

Il est supposé que les puissances de sortie du système éolien et du stockage d'énergie hybride sont suffisantes pour répondre à la demande de la charge à tout moment. En d'autres termes, les situations d'urgence telles que le fonctionnement de l'éolienne à

une vitesse inférieure à la vitesse d'entrée $v_{out} - v_{in}$ ou supérieure à la vitesse de sortie $v_{out} - v_{in}$ n'ont pas été prises en compte. [33]

2.3.2.1 Stratégie de contrôle pour le convertisseur DC/DC :

La tension du lien DC du système éolien est régulée à l'aide d'un convertisseur DC/DC. La tension de sortie redressée, (v_{ds}) (non régulée) présentée au niveau du pont de diodes du convertisseur complet est une fonction (de la vitesse du générateur, et ω_g peut être expliquée à l'aide de la figure 2.12. [33]

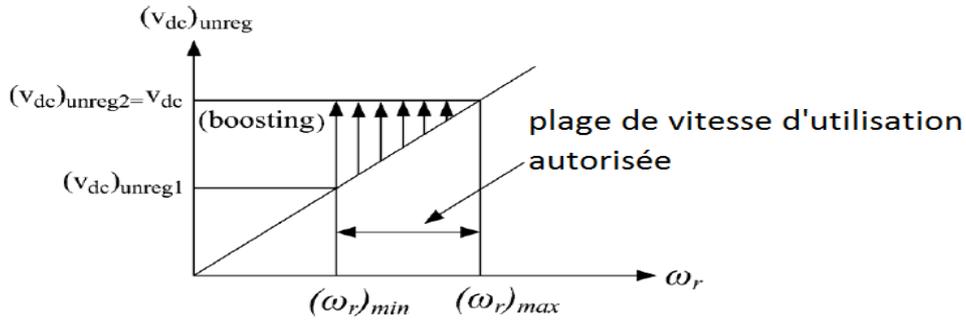


Figure 2.13 : Fonctionnement du convertisseur Boost pour réguler la tension du bus DC [33]

La boucle de commande extérieure mesure la tension V_{dc} de liaison DC, qui est comparée à la tension $(V_{DC})_{réf}$ de liaison DC de référence, et l'erreur est compensée à l'aide d'un contrôleur PI pour générer le courant de référence à travers l'inducteur du convertisseur élévateur $(i_{DC})_{réf}$ comme dans (2.37). [33]

Ce courant est ensuite comparé au courant réel i_{DC} , et l'erreur correspondante est compensée par le second contrôleur PI afin de générer le signal de commutation pour le convertisseur DC-DC. En outre, le facteur de suralimentation le plus élevé b_f du convertisseur survolteur est enregistré à la vitesse la plus faible du générateur et peut être donné comme dans (2.38). [33]

$$(i_{DC})_{réf} = \Delta V_{DC} \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \quad (2.37)$$

$$(b_f)_{max} = \frac{(V_{DC})_{réf}}{(V_{DC})_{unreg1}} \quad (2.38)$$

Où $(i_{DC})_{réf}$ est le courant de référence traversant l'inductance du convertisseur survolteur, $(V_{DC})_{réf}$ est la tension régulée du bus DC, k_p et k_i sont les composantes

proportionnelle et intégrale du contrôleur PI et $(V_{DC})_{unreg1}$ est la tension non régulée la plus basse présente à la sortie du redresseur à pont de diodes. [33]

La méthode de gestion d'énergie par batterie lithium ion et par supercondensateur est la même que celle utilisée dans le système PV. (Revoir la partie gestion d'énergie hybride précédente)

2.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a modélisé les deux systèmes de stockage hybride avec deux sources d'énergie différentes (PV et éolienne). La simulation et les résultats obtenus de cette étude seront discutés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 03:
SIMULATIONS ET RÉSULTATS

3.1 Introduction :

Dans ce chapitre, la simulation va se faire sur Matlab Simulink version 2021 avec les modèles très précis des composants du système tel que la batterie, le SC, le panneau PV, la turbine etc...les résultats seront étudiés et interprétés.

3.2 Système PV :

On considère un système PV autonome avec un système de stockage hybride batterie SC. Le réseau PV et les éléments de stockage hybride sont couplés à un bus DC commun de 50 V, via des convertisseurs DC/DC, pour fournir une charge DC variable.

Le système est dimensionné pour remplir la charge de façon régulière conformément au schéma de contrôle appliqué. Les valeurs nominales des composants du système sont indiquées dans le tableau 3.1.

Un système PV de 1000 W est appliqué avec 4 chaînes parallèles avec deux séries de modules PV d'énergie Waaree par chaîne.

Les courbes P-V de chaque module pour différentes conditions de rayonnement sont indiquées sur la figure 3.1. La tension MPP du réseau à 1000W/m² atteint 34V, ainsi un convertisseur boost est utilisé pour interfacer le réseau au bus 50V. En ce qui concerne les éléments du système de stockage, un supercondensateur 32V, 29F et une batterie Li-ion 24V, 14Ah sont appliqués, elle est choisie parmi différents types de batteries en raison de sa grande résistance aux changements climatiques et de sa longue durée de vie estimée [5].

Chacun des éléments du système de stockage est couplé au bus DC de 50 V via un convertisseur bidirectionnel pour servir les modes de charge et de décharge.

En mode de charge, le convertisseur bidirectionnel agit comme un convertisseur buck, transmettant l'énergie du côté tension supérieure (bus DC) au côté tension inférieure (dispositif SSE). Alors qu'il agit d'un convertisseur buck en mode de décharge c.-à-d. l'énergie transmise du SSE au bus DC.

$$\text{En mode buck : } V_o = V_i D \quad (3.1)$$

$$\text{En mode boost : } V_o = \frac{V_i}{(1-D)} \quad (3.2)$$

Où V_o, V_i, D sont respectivement la tension de sortie du convertisseur DC/DC, la tension d'entrée et le rapport cyclique.

Tableau 3.1 : Paramètres des composants du système PV étudié

Composants du système	Paramètres
Panneau PV Waaree 120W sous conditions standards	$V_{MPP} = 17V$ $I_{MPP} = 7.1A$ $P_{MPP} = 120.7 W$
PV array (2 × 4) en conditions standards	$V_{MPP} = 2 \times 17 = 34V$ $I_{MPP} = 4 \times 7.1 = 28.4 A$ $P_{MPP} = 1000 W$
Charge	50V, 1kW charge DC variable
Batterie	24V, 14Ah, Lithium – ion
Supercondensateur	32V, 29F
Tension du DC-link	50V
Inductances	$L_{PV} = L_B = L_{Sc} = 0.5mH$

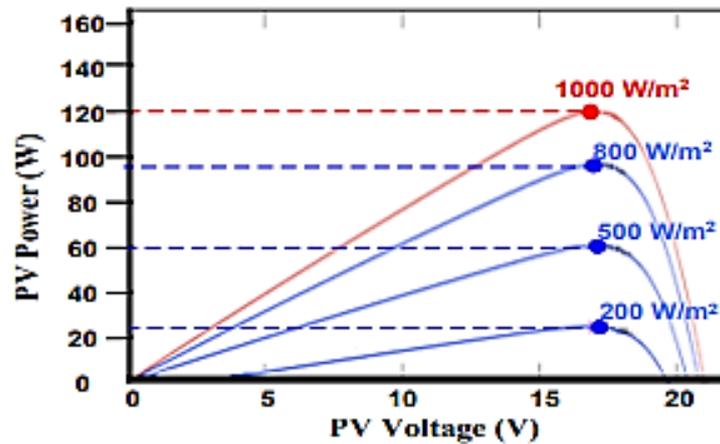


Figure 3.1 : Courbes P-V des énergies Waaree WU-120 pour différentes irradiances. (Matlab Simulink)

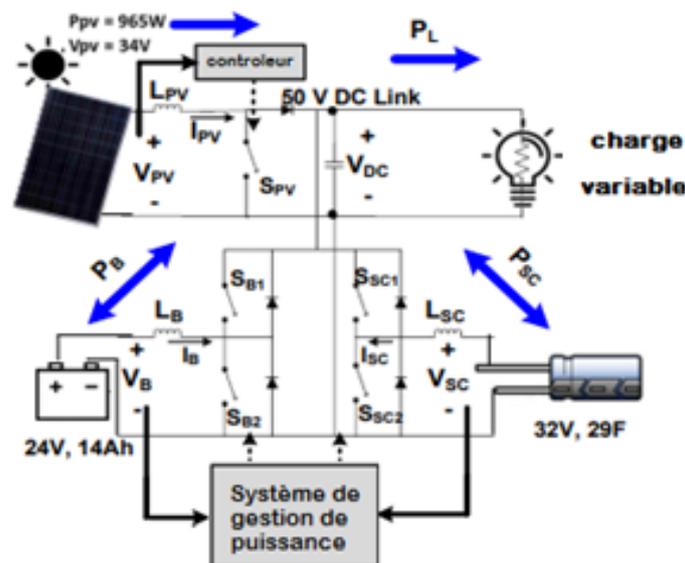


Figure 3.2: Schéma du système PV étudié [35]

3.2.1 Contrôle d'énergie:

La stratégie de contrôle d'énergie utilisée ici a pour but pour préserver l'équilibre énergétique requis entre la production et la consommation, laissant ainsi une tension stable du bus DC à 50 V. Cela comprend le contrôle des convertisseurs bidirectionnels des éléments du stockage, coordonnant ainsi le partage de puissance entre la batterie et le SC. Un contrôle du convertisseur boost PV pour atteindre PV MPPT est nécessaire.

Une modification est proposée pour passer du mode de contrôle de la tension MPPT au mode de contrôle de la tension DC lorsque la batterie est pleine afin d'éviter une surcharge de la batterie. [35]

3.2.2 Contrôle du système de stockage hybride:

Le SC est principalement ajouté pour absorber l'énergie transitoire de pointe qui résulte des changements de charge instantanés ou de fluctuations météorologiques, réduisant ainsi les contraintes de charge de la batterie. Pour ce faire, la dérive de puissance entre la production et la consommation sera divisée en deux composantes, la composante basse fréquence régulière et la composante haute fréquence transitoire. La batterie sera responsable de la première tandis que le SC s'occupera de la seconde. [21]

Ce système de gestion comprend trois boucles de contrôle comme indiqué à la figure 3.3(a).

Tout d'abord, la boucle de contrôle de tension de liaison DC pour maintenir la tension du bus DC à 50 V. La sortie de cette boucle génère le courant de référence total ($I_{réf}$) qui doit être compensé pour éliminer toute dérive de tension, c-à-d. toute dérive de puissance, maintenant ainsi l'équilibre requis. Simultanément, l' $I_{réf}$ est divisé en deux composants : le CFT et le courant haute fréquence CHF.

Ainsi, il passera d'abord par un filtre passe-bas pour extraire son LFC ($I_{réf_HF}$) qui sera la référence à la deuxième boucle qui est la boucle de la batterie. Ce dernier permet à la batterie de compenser le niveau moyen de dérive de puissance basse fréquence.

D'autre part, le courant de référence CHF ($I_{réf_HF}$) est compensé par la troisième boucle qui est la boucle de contrôle SC. La référence de cette boucle ($I_{SC\ réf}$) est calculée par $I_{réf_HF}$ et le courant d'erreur de la batterie (IB-error) comme suit [21];

$$I_{réf_HF} = I_{réf} - I_{réf\ BF} \quad (3.3)$$

La puissance ($P_{B-incomp}$) qui n'est pas compensée par la batterie et doit être remplie par le SC est donnée par :

$$P_{B-incomp} = V_B (I_{réf_HF} + I_{B-err}) \quad (3.4)$$

Ainsi, le courant de référence pour la boucle SC I_{SC-ref} :

$$I_{SC-ref} = \frac{P_{B-incomp}}{V_{SC}} \tag{3.5}$$

Où V_B , V_{SC} sont les tensions de la batterie et le SC respectivement.

Chacune des boucles discutées rencontre un contrôleur PI. La sortie de la boucle de la batterie subit alors un PWM pour produire des signaux de synchronisation de commutateurs du convertisseur bidirectionnel de la batterie (S_{B-1} est activé pour le mode de charge tandis que S_{B-2} est activé pour le mode de décharge).

De même, après PWM de la sortie de la boucle SC, des signaux de synchronisation pour les commutateurs du convertisseur bidirectionnel SC sont produits (S_{SC-1} pour la charge et S_{SC-2} pour la décharge).

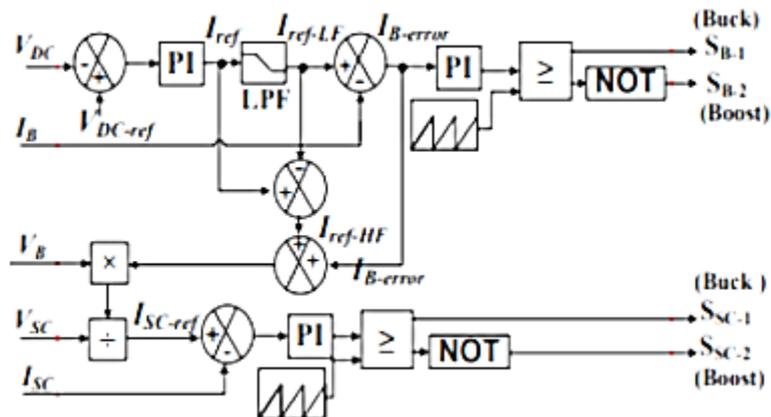


Figure 3.3(a): Schéma de contrôle du système de stockage d'énergie hybride [35]

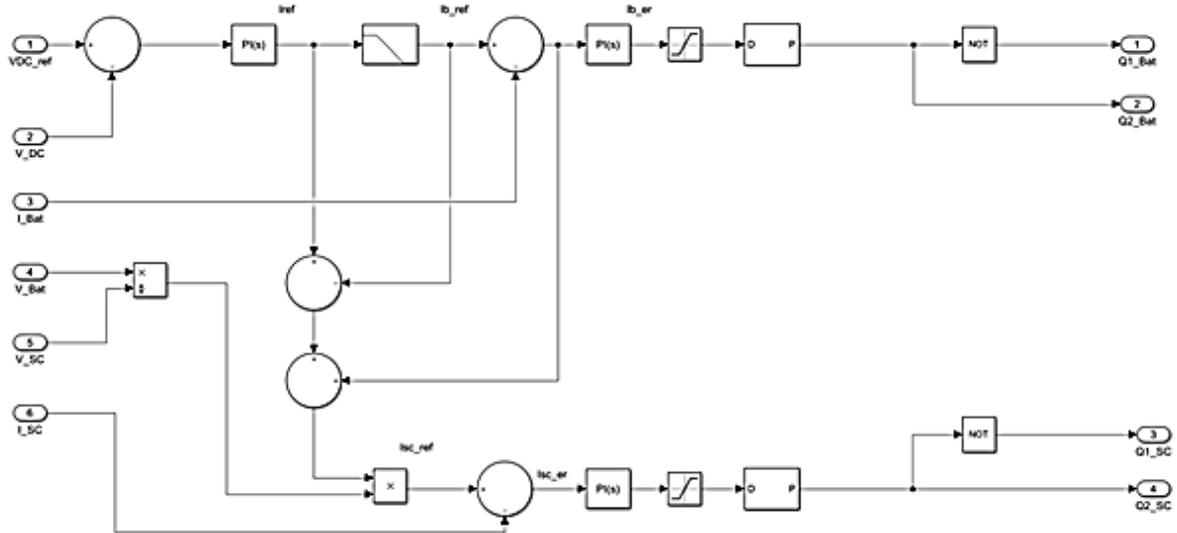


Figure 3.3 (b): Schéma du contrôle du système de stockage hybride batterie SC sous Matlab Simulink

3.2.3 Contrôle PV :

Le convertisseur de puissance du réseau PV est contrôlé à l'aide d'un contrôleur MPPT pour extraire la puissance maximale PV exacte dans diverses conditions météorologiques.

Dans ce système, un algorithme Perturb and Observe MPPT est appliqué [25]. Cependant, dans le cas d'une alimentation PV (P_{PV}) > puissance de charge (P_L), l'excès de puissance régulière sera transféré à la batterie même si elle est pleine charge. Cela causerait la dégradation de la batterie. Par conséquent, une amélioration est proposée pour résoudre ce problème comme le montre la figure ci-dessous.

En cas de batterie complètement chargée (le SOC atteint le niveau maximum), le MPPT est désactivé et la boucle de régulation de la tension du bus DC (V_{DC}) est activée. Ainsi, PV fournit juste la puissance adéquate qui stabilise V_{DC} à 50V sans interférer avec la batterie.

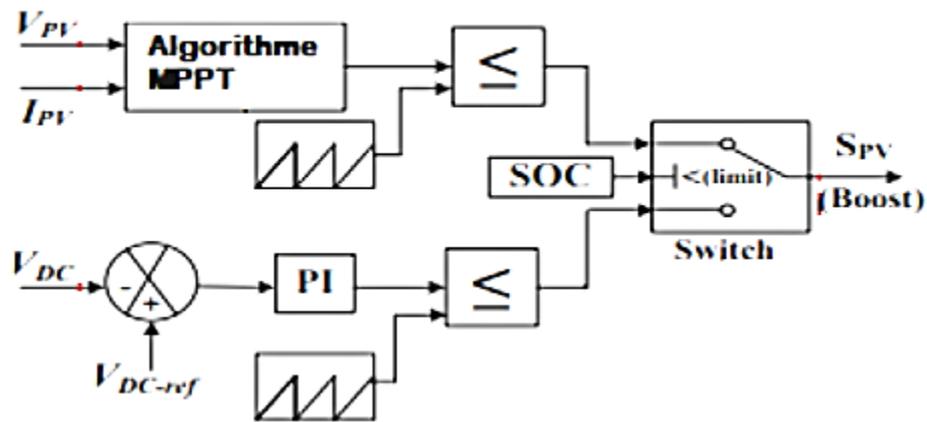


Figure 3.4 (a): Schéma du contrôle PV [35]

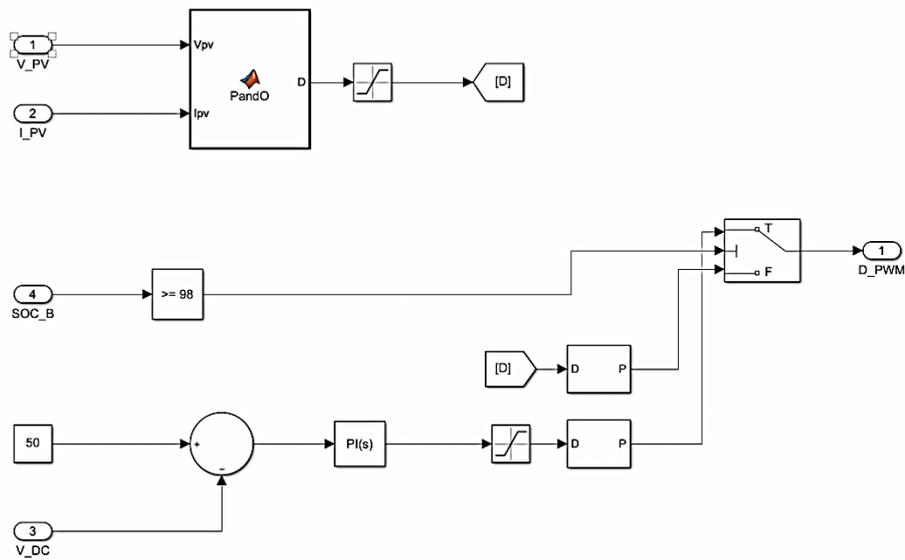


Figure 3.4 (b) : Schéma du contrôle PV sous Matlab Simulink

3.2.4 Résultats de simulation :

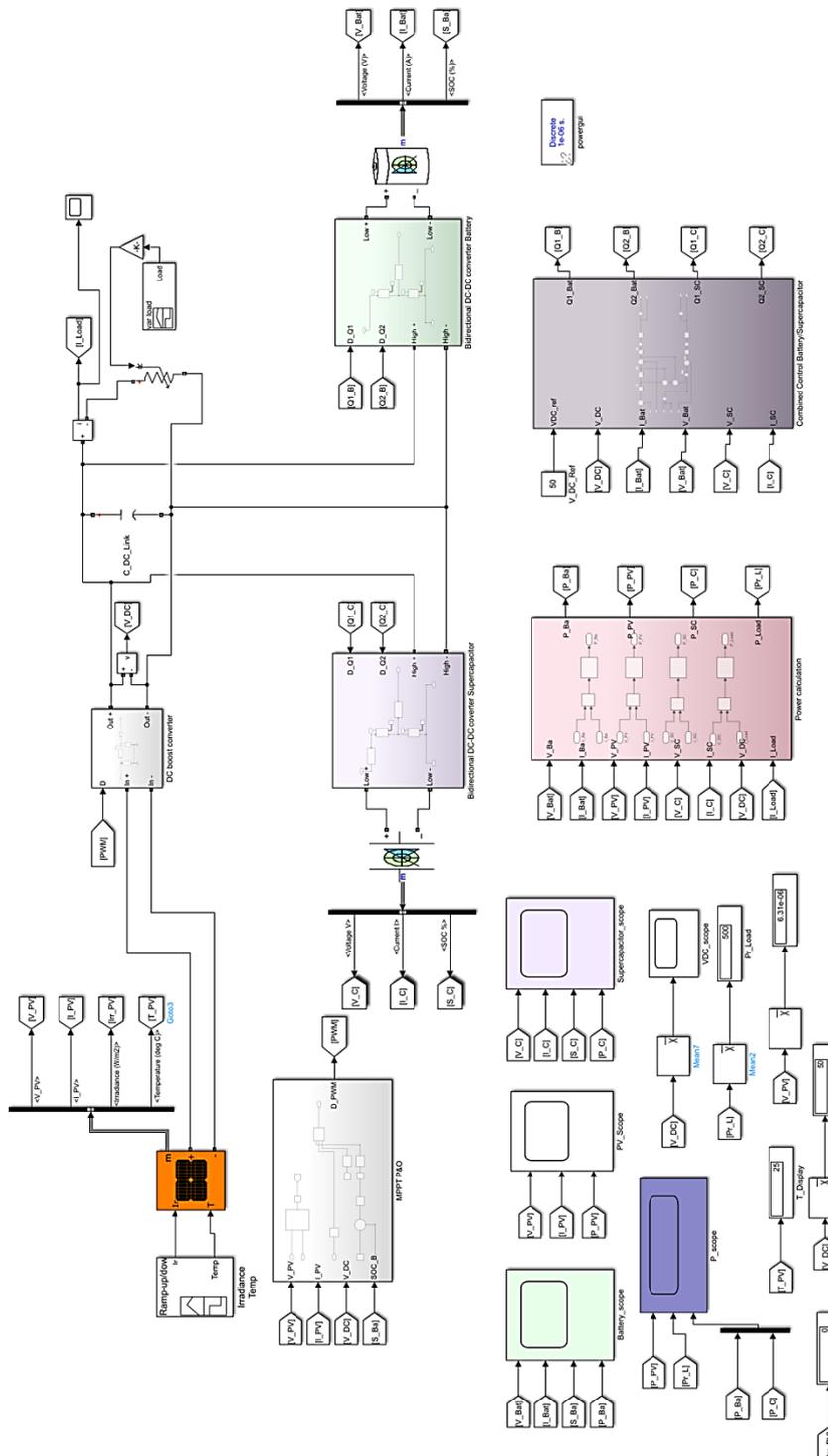


Figure 3.5 : Système PV avec stockage hybride batterie li-ion et SC sous Matlab Simulink

A. Pour une charge constante :

La valeur de charge utilisée est 600W. La simulation s'étend sur 2 secondes pour bien voir le comportement de la batterie et du SC lors de cet essai.

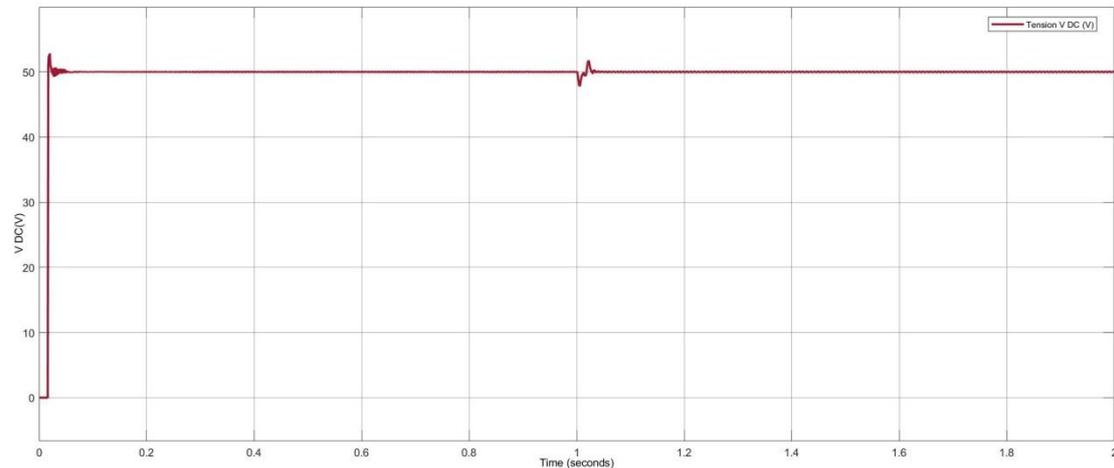


Figure 3.6 : tension de sortie du convertisseur boost V_DC

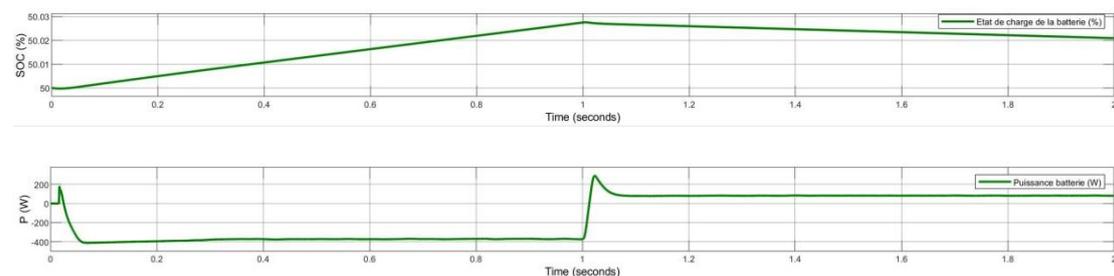


Figure 3.7 : Etat de charge (%) (en haut) et puissance de la batterie Li-ion (W) (en bas).

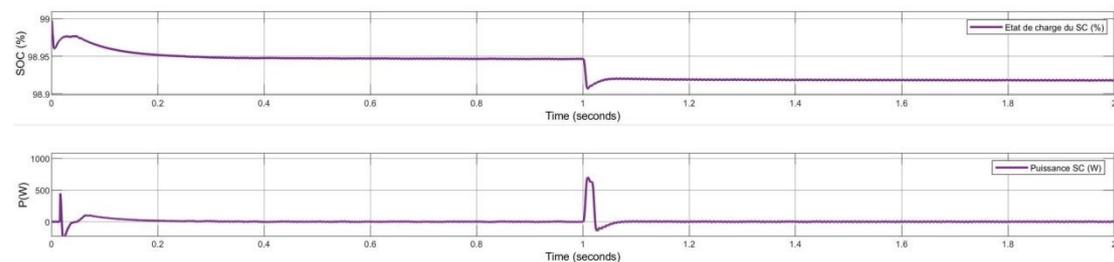


Figure 3.8 : Etat de charge (%) (en haut) et puissance (W) du supercondensateur (en bas).

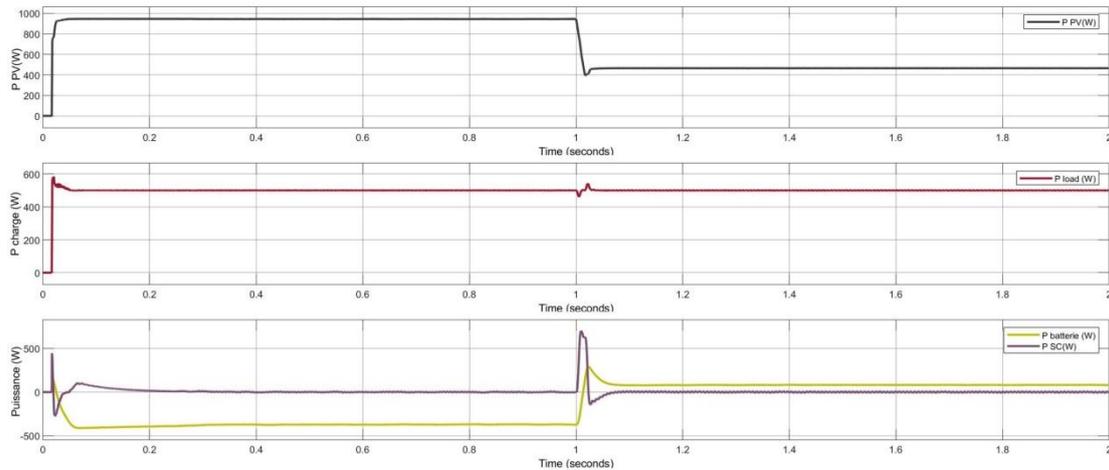


Figure 3.9 : 1)- Puissance P_{PV} 2)- Puissance de la charge P_L 3)- Puissance du SC P_{SC} (violet). 4)- Puissance de la batterie P_B (vert).

La puissance PV maximale a été suivie avec précision en fonction des irradiances autour du réseau PV pour une charge de 600W.

Il est clair que le SC montre une réponse rapide en compensant les puissances transitoires de pointe pendant les changements des irradiances, ce qui soulage la batterie de ces pics de tension.

Le supercondensateur prend les devants pour compenser toute dérive régulière entre l'alimentation et les puissances de charge.

B. Pour une charge et des rayonnements variables :

Dans cet essai, le système considéré est testé selon sept scénarios de variations de charge et de rayonnements solaires. La simulation s'étend sur 7secondes pour bien voir les changements et les comportements de chaque composants effectués lors de cette étude.

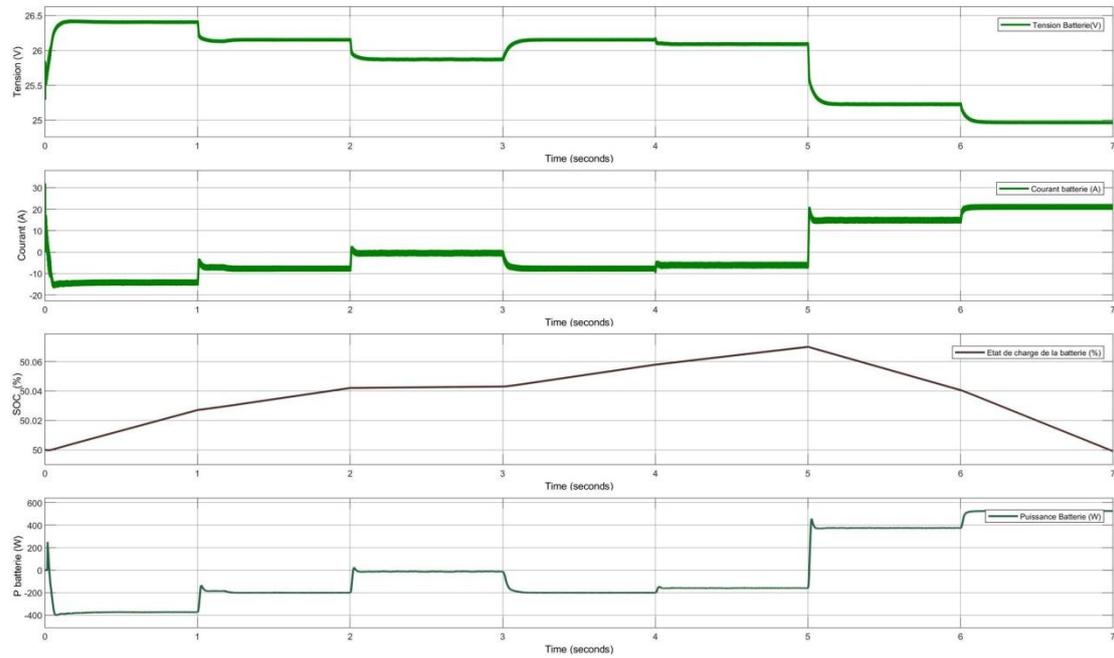


Figure 3.10 : 1) Tension de la batterie Li-ion (V), 2) Courant de la batterie Li-ion (A), 3) Etat de charge (%), 4) Puissance de la batterie Li-ion (W)

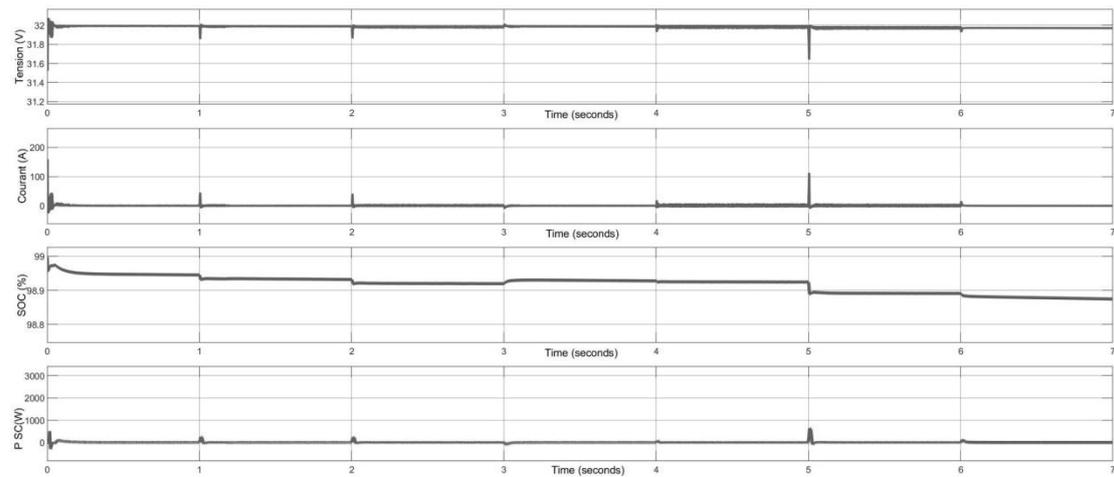


Figure 3.11 : 1) Tension V SC (V), 2) Courant I SC (A), 3) Etat de charge du SC SOC (%), 4) Puissance P SC (W)

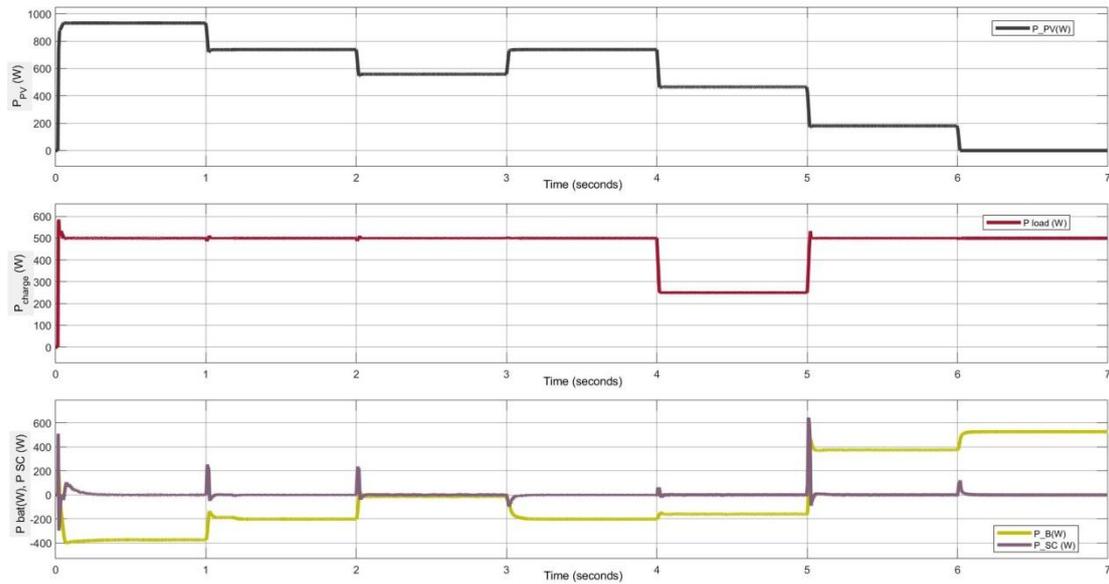


Figure 3.12 : 1)- Puissance P_{PV} (en noir). 2)- Puissance de la charge P_L (rouge). 3)- Puissance du supercondensateur P_{SC} (violet). 4)- Puissance de la batterie P_B (jaune).

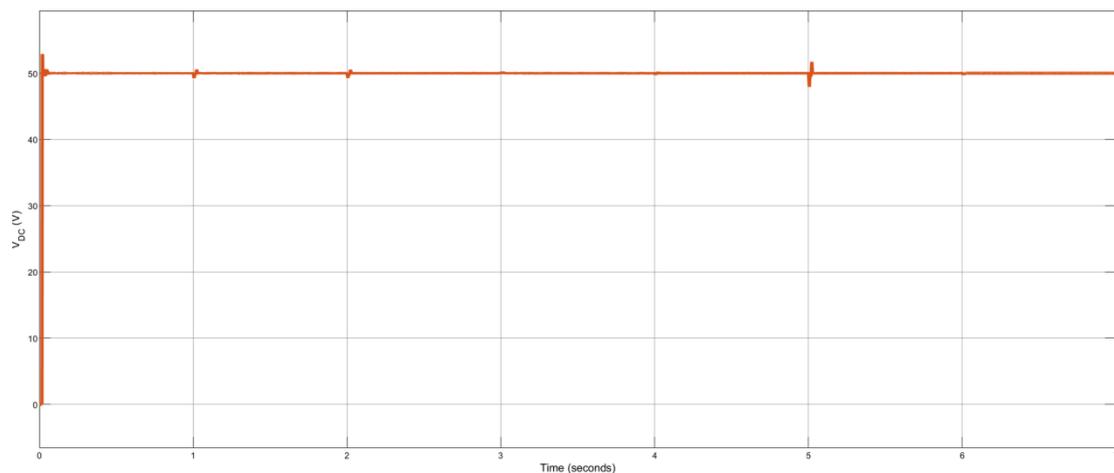


Figure 3.13 : tension V DC

La première courbe indique que la puissance P_{PV} maximale a été suivie avec précision en fonction des irradiances autour du réseau PV.

La courbe rouge montre la demande de charge et comment elle a connu une diminution soudaine de 500 à 250W à $t=3$ sec puis de nouveau à 500W à $t=4$ sec.

L'analyse des valeurs de puissance constante résultantes de PV, Charge et batterie, présentées dans la figure (3.13) pour chaque cas, il est prouvé que le bilan énergétique requis est garanti et la charge est toujours remplie.

En zoomant sur la courbe de puissances du système de stockage hybride, il est clair que le SC montre une réponse rapide en compensant les puissances transitoires de pointe pendant les changements de charge ou des irradiances, ce qui soulage la batterie de ces pics de tension pour prendre les devants et compenser toute dérive régulière entre l'alimentation et les puissances de charge.

Dans les deux premiers cas, la batterie a réussi à stocker la puissance excédentaire puisque la puissance PV extraite était supérieure à la puissance de charge totale et aux pertes du système.

Dans le cas 3, bien qu'il n'y ait eu aucune variation de l'irradiation ni de la demande de charge, la batterie est a continué à se charger.

Par conséquent, le contrôle PV a été déplacé du mode MPPT au mode de contrôle de la tension et la puissance PV a diminué pour simplement répondre à la demande de charge pour protéger la batterie contre la surcharge.

Dans le 4ème cas, la batterie a commencé à fournir de la puissance depuis la charge a augmenté au double qui était au-dessus de la capacité PV dans ce cas.

Enfin, dans les trois derniers cas, la demande de charge est revenue à sa valeur initiale (500 W). Cependant, l'irradiation a continué à diminuer jusqu'à son absence dans le dernier cas. Ainsi, la batterie a continué à partager avec PV dans l'alimentation en charge jusqu'à prendre la tête dans le dernier cas.

3.3 Système éolien :

La stratégie proposée a été mise en œuvre avec le modèle détaillé du Simulink SimPower de MATLAB et également avec les modèles très précis des composants du système.

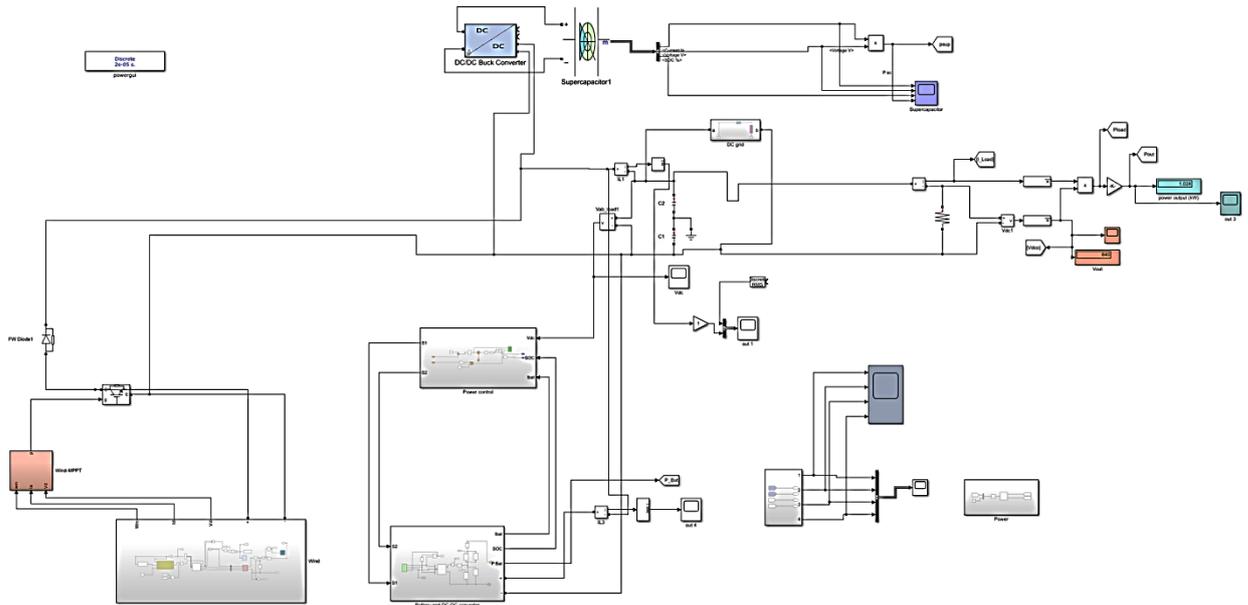


Figure (3.14- a) : système éolien avec stockage hybride par batterie Li-ion et SC

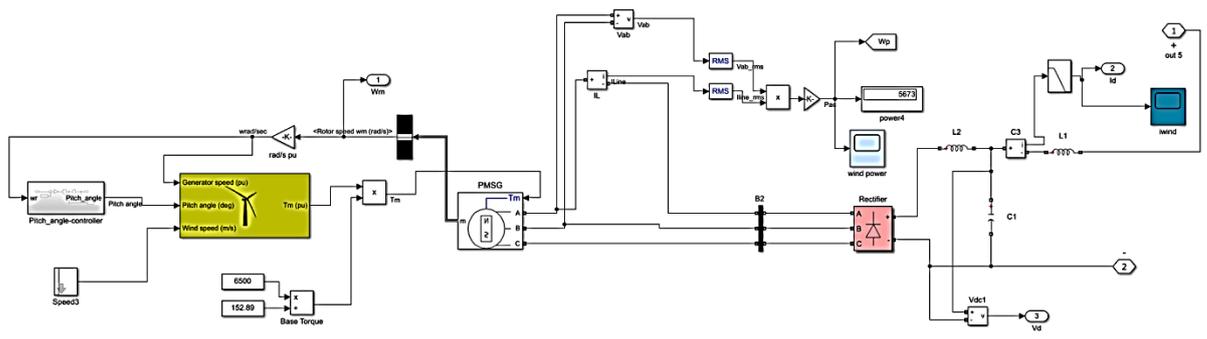


Figure (3.14-b) : Système de conversion de l'énergie éolienne par un GSAP

Le temps de simulation utilisé dans l'étude sur laquelle nous sommes basés était de 6 secondes pour voir le comportement des composants du système. Pour prouver la robustesse de la méthode proposée, des changements de rafales de vent et de pas de charge dans le profil du vent et le profil de la charge respectivement sont utilisés pour synthétiser les pires conditions du système dans un système éolien.

Les performances du système proposé sont étudiées dans des conditions (a) de charge constante et (b) de fluctuation de la vitesse du vent.

3.3.1 Paramètres de la turbine :

Parameters	
Nominal mechanical output power (W):	<input type="text" value="8.5e2"/>
Base power of the electrical generator (VA):	<input type="text" value="8.5e2/0.9"/>
Base wind speed (m/s):	<input type="text" value="12"/>
Maximum power at base wind speed (pu of nominal mechanical power):	<input type="text" value="0.8"/>
Base rotational speed (p.u. of base generator speed):	<input type="text" value="1"/>
Pitch angle beta to display wind-turbine power characteristics (beta >=0) (deg):	<input type="text" value="0"/>
Display wind turbine power characteristics	

3.3.2 Paramètres du GSAP :

Stator phase resistance Rs (Ohm):	<input type="text" value="0.425"/>
Inductances [Ld(H) Lq(H)]:	<input type="text" value="[0.0082 0.0082]"/>
Machine constant	
Specify:	<input type="text" value="Flux linkage established by magnets (V.s)"/>
Flux linkage:	<input type="text" value="0.433"/>
Inertia, viscous damping, pole pairs, static friction [J(kg.m ²) F(N.m.s) p() Tf(N.m)]:	<input type="text" value="[0.01197 0.001189 5]"/>
Initial conditions [ω_m (rad/s) θ_{em} (deg) i_a, i_b (A)]:	<input type="text" value="[0,0, 0,0]"/>
Rotor flux position when theta = 0:	<input type="text" value="90 degrees behind phase A axis (modified Park)"/>

3.3.3 Résultats de simulation :

La vitesse du vent est fixée initialement à 5 m/s. Après $t=1.5$ s, la vitesse du vent monte à 12 m/s, puis elle descend à 9 m/s à $t=3$ s. La demande de charge est fixée à 1kW.

Les changements de vent n'ont pas ou peu d'influence sur les variations de tension côté charge.

La tension du bus DC est illustrée sur la figure 3.16 et est bien régulée à sa valeur nominale (640V).

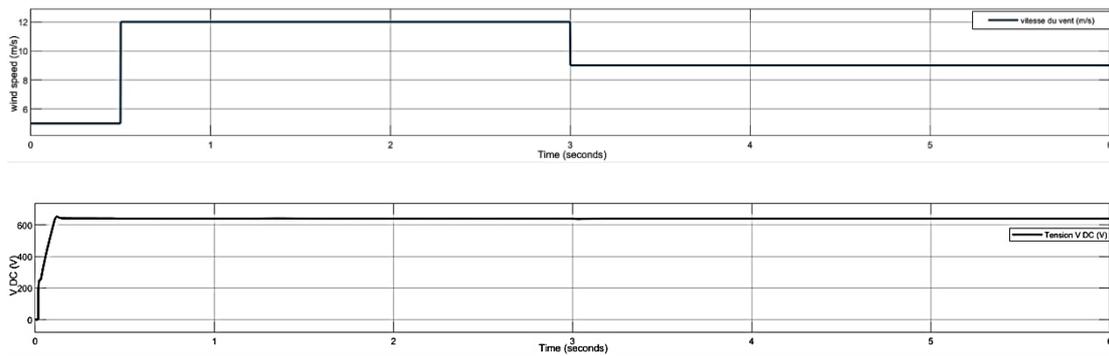


Figure 3.15. (a) Vitesse du vent (V-w), (b) Tension du bus DC (V-DC)

La variation de la puissance éolienne du système est illustrée sur la Fig. 3.16(a). Selon les caractéristiques de l'éolienne, la puissance maximale correspondante de l'aérogénérateur est de 0.8 pu à une vitesse de vent nominale de 12 m/s. Jusqu'à $t=3$ s, la puissance de sortie de le GSAP reste à 0,83 pu et pendant ce temps

Cela simule une condition de surproduction où l'excédent de puissance éolienne donné par $(P_w - P_L)$ est partagé entre le stockage d'énergie hybride et la charge. Cependant, le partage de la puissance entre les unités de stockage d'énergie hybride se fait selon l'algorithme de gestion de l'énergie discuté auparavant. La puissance de stockage de la batterie est illustrée sur la figure 3.16(c) et on constate que jusqu'à $t=3$ s, la batterie atteint sa pleine capacité, tandis que le SC absorbe la composante de puissance fluctuante élevée de l'inadéquation demande-génération, comme le montre la Fig. 3.16(d).

Lorsque la batterie atteint sa pleine capacité, la composante de puissance basse fréquence excédentaire est absorbée par la charge de décharge, comme le montre la figure 3.16(d). Après $t=3$ s, la vitesse du vent diminue à 9 m/s, ce qui réduit la production d'énergie éolienne à près de 0,375 pu, comme le montre la Fig. 3.16(a). Pendant ce temps, le système éolien est en sous-production, dans lequel la puissance déficitaire, $P_L - P_w$ est fournie par le stockage sur batterie. L'opération de décharge est désactivée comme le montre la Fig. 3.16(d)

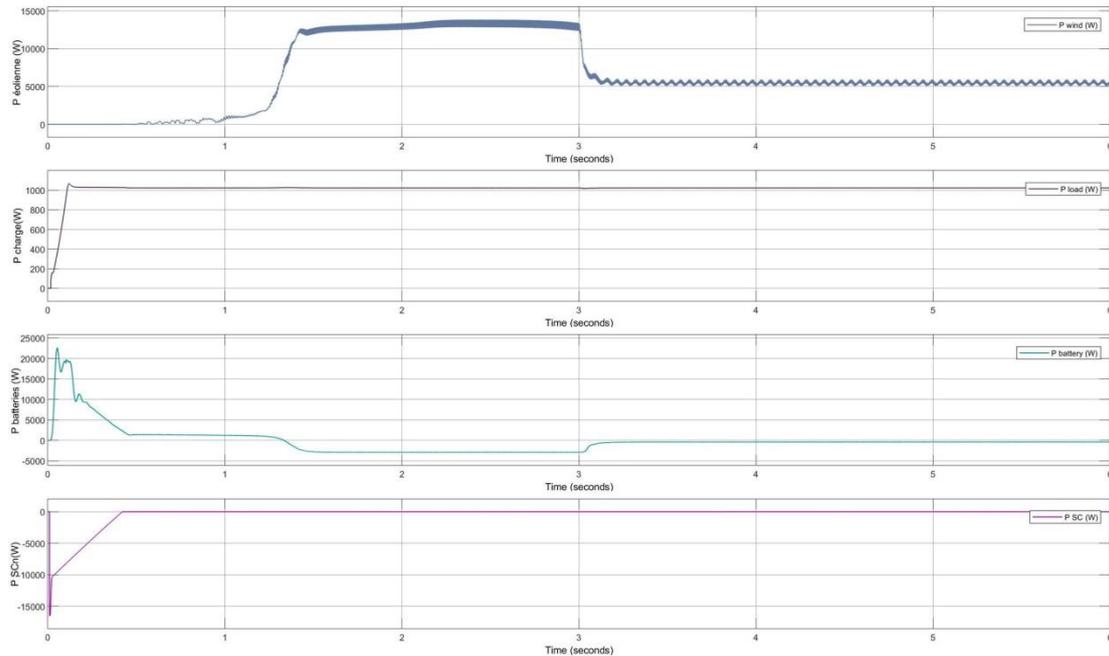


Figure 3.16: Partage de la puissance du système éolien à des conditions de vent variables et de charge constante.

Puissance éolienne (P-w), (b) Puissance de la charge résiduelle (P-load), (c) Puissance de la batterie (P-b), (d) Puissance du supercondensateur (P-sc)

De même, les changements soudains de la vitesse du vent entraînent des variations rapides de la puissance éolienne produite, qui est absorbée par le SC, comme le montre la figure 3.16 (c). Jusqu'à $t=1$ s, la demande de puissance réelle augmente pour atteindre 1kW, ce qui entraîne une condition de sous-génération pour le système éolien. Le stockage par batterie augmente son taux de décharge. Après $t=1.3$ s, la vitesse du vent augmente à 12 m/s, ce qui fait augmenter la puissance de sortie de l'éolienne. Le système connaît une condition de surproduction qui oblige le stockage par batterie à passer du mode de décharge au mode de charge pour maintenir l'équilibre de puissance du système éolien.

Le SC absorbe la composante de puissance haute fréquence de l'inadéquation entre la demande et la production pendant les conditions transitoires qui se produisent en raison du vent et des changements de charge, comme le montre la figure 3.16(d).

3.4 Conclusion :

Dans ce chapitre on a simulé deux systèmes indépendants PV et éolien avec le même système de stockage hybride par batterie Lithium ion et supercondensatur.

On a vu le comportement de ces deux composants dans des conditions variables.

Le SC est principalement ajouté pour absorber l'énergie transitoire de pointe qui résulte des changements de charge instantanés ou de fluctuations météorologiques, réduisant ainsi les contraintes de charge de la batterie. Pour ce faire, la dérive de puissance entre la production et la consommation sera divisée en deux composantes, la composante basse fréquence régulière et la composante haute fréquence transitoire. La batterie sera responsable de la première tandis que le SC s'occupera de la seconde

Conclusion générale:

Le stockage est le maillon le plus faible du domaine énergétique, mais constitue un élément clé de la croissance des énergies renouvelables. Lorsque la source d'énergie est intermittente et située dans une zone isolée qui ne peut pas être connectée au réseau de distribution, le stockage devient crucial.

Il nous a été donné comme tâche « Contribution à l'étude de la gestion de stockage d'énergie hybrides batteries lithium ion et des supercondensateurs dans les systèmes photovoltaïque et éolien ».

L'objectif de cette thèse était de proposer des systèmes de sources d'énergies renouvelables, le premier système est un générateur photovoltaïque pour convertir l'énergie du soleil et le deuxième est un générateur éolien pour convertir celle du vent.

Cette étude contribue à l'optimisation d'une source de stockage hybride couplant une batterie lithium-ion et des supercondensateurs.

La complémentarité entre batterie et supercondensateurs permet l'amélioration des performances globales du système de stockage d'énergie en termes de durée de vie et d'autonomie.

L'objectif de notre étude porte sur la mise en œuvre de techniques avancées de contrôle et de gestion de l'énergie entre ces deux sources.

Nous nous sommes tout d'abord focalisés dans le premier chapitre sur les généralités englobant le fonctionnement de l'énergie photovoltaïque et éolienne, puis le fonctionnement des batteries lithium ion et des supercondensateurs, précisant leurs applications dans le domaine des énergies renouvelables.

Dans le second chapitre, nous avons vu la modélisation de chaque système et tous ses composants allant de la source vers la charge. Ensuite nous avons consacré le dernier chapitre pour la simulation et les résultats obtenus.

Perspectives :

Cette technologie étant récente et très avantageuse en termes de puissance, de durée de vie et d'autonomie, elle est encore en voie de développement. Son utilisation devrait ouvrir les portes à plusieurs problèmes de stockage, d'économie et peut contribuer à sauver l'environnement.

Son utilisation ne va pas être uniquement centrée sur les systèmes d'énergies renouvelables, au contraire elle peut être utilisée partout ; allant des petits appareils comme les appareils photo numériques jusqu'au moyens de transports tels que les trains express.

Deux stratégies sont adoptées pour améliorer la densité d'énergie des supercondensateurs, à savoir, l'amélioration de la capacité spécifique des matériaux d'électrode et l'expansion de la fenêtre de potentiel de fonctionnement. Les électrolytes, en particulier les liquides ioniques, ont une large plage de tension de fonctionnement. Les condensateurs asymétriques ou hybrides sont également un candidat potentiel pour améliorer la fenêtre de potentiel puis la densité d'énergie. Par exemple, les systèmes MnO_2/AC (charbon actif) peuvent fonctionner dans une plage de tension de 0 à 2,2 V. Dans un électrolyte aqueux doux Li_2SO_4 , le système Li fonctionne dans une plage de tension de 0,8 à 1,8 V.

Et donc, en améliorant les matériaux constituant les batteries et les supercondensateurs on obtiendra un meilleur rendement créant ainsi une technologie plus performante que celle qui existe en ce moment.

Liste de references:

CHAPITRE 1:

- [1] International Energy Agency. “World Energy Outlook-2006”. OECD/IEA, 2007
- [2] A. Poullikkas, Implementation of distributed generation technologies in isolated power systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (1) (2007) 30–56
- [3] Applications of Lithium Ion Batteries in Grid Scale Energy Storage Systems Tianmei Chen¹ • Yi Jin • Hanyu Lv • Antao Yang • Meiyi Liu • Bing Chen¹ • Ying Xie¹ • Qiang Chen, 8 February 2020.
- [4] F. Díaz-González, A. Sumper, O.G. Bellmunt, R.V. Robles, A review of energy storage technologies for wind power applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 2154–2171.
- [5] R.M. Dell, D.A.J. Rand, Energy storage – a key technology for global energy sustainability, *Journal of Power Sources* 100 (1–2) (2001) 2–17.
- [6] Robert Soler. « L'énergie solaire des fondamentaux aux technologies d'aujourd'hui et de demain » Edition Lavoisier TEC & DOC.
- [7] essone.fr. « Cadre de vie Environnement/Environnement/Énergies renouvelables »
- [8] K. Ayache « Modélisation et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Couplé à un Réseau Électrique » Mémoire de Magister de l'Université Mohamed Chérif Messaâdia de Souk-Ahras, 2014.
- [9] Hervé Caspani. 100 mots pour comprendre « L'énergie éolienne ». Edition CANOPE Académie de Reims.
- [10] Marc Rapin, Jean Marc Noel. « L'énergie éolienne. Du petit éolien à l'éolien offshore » 3^e édition. Édition DUNOD.
- [11] N.K.C. Nair, N. Garimella, Battery energy storage systems: assessment for small-scale renewable energy integration, *Energy and Buildings* 42 (2010) 2124–2130.
- [12] N.K.C. Nair, N. Garimella, Battery energy storage systems: assessment for small-scale renewable energy integration, *Energy and Buildings* 42 (2010) 2124–2130.
- [13] R.A. Huggins, *Energy Storage*, Springer Science LLC, USA, 2010.
- [14] J. Baker, New technology and possible advances in energy storage, *Energy Policy* 36 (2008) 4368–4373.

- [15] L. El Ouatani, R. Dedryvère, J.B. Ledeuil, C. Siret, P. Biensan, J. Desbrières, D. Gonbeau, Surface film formation on a carbonaceous electrode: influence of the binder chemistry, *Journal of Power Sources* 189 (2009) 72–80.
- [16] F.W. Fergus, Recent developments in cathode materials for lithium ion batteries, *Journal of Power Sources* 195 (2010) 939–954.
- [17] G.L. Soloveichik, Battery technologies for large scale stationary energy storage, *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering* 2 (2011) 503–527.
- [18] J.N. Baker, A. Collinson, Electrical energy storage at the turn of the millennium, *Power Engineering Journal* 6 (1999) 107–112.
- [19] F.R. McLarnon, E.J. Cairns, Energy storage, *Annual Review of Energy* 14 (1989) 241–271.
- [20] E.C. Kluiters, D. Schmal, W.R. Ter Veen, Testing of a sodium/nickel chloride (ZEBRA) battery for electric propulsion of ships and vehicles, *Journal of Power Sources* 80 (1999) 261–264.
- [21] R. Bradford, Capturing grid power, *IEEE Transactions on Power and Energy Magazine* 7 (2009) 32–41.
- [22] A.P. Karpinski, B. Makovestki, S.J. Russell, Silver–zinc: status of technology and applications, *Journal of Power Sources* 80 (1999) 53–60.
- [23] A.G. Ritchie, Recent developments and future prospects for lithium rechargeable batteries, *Journal of Power Sources* 96 (2001) 1–4.
- [24] K. Zaghib, M. Dontignya, A. Guerfi, P. Charest, I. Rodrigues, A. Mauger, Safe and fast charging Li-ion battery with long shelf life for power applications, *Journal of Power Sources* 196 (2011) 3949–3954.
- [25] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas, V. Efthimiou, Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 1513–1522.
- [26] International Energy Agency. *World Energy Outlook-2006*. IEA, 2007
- [27] planète-energies.com. Décryptages/ La batterie lithium-ion : Comment ça marche ?
- [28] P. Ribeiro, B. Johnson, M. Crow, A. Arsoy, Y. Liu, Energy storage systems for advanced power applications. In: *Proceedings of IEEE*, 2001, vol. 89, No. 12, pp. 1744–1756

- [29] (http://www.electricitystorage.org/tech/technologies_technologies.htm).
- [30] F. Rafik, H. Gualous, R. Gallay, A. Crausaz, A. Berthon, Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling, *Journal of Power Sources* 165 (2007) 928–934.
- [31] H.S. Chen, T.N. Cong, W. Yang, C.Q. Tan, Y.L. Li, Y.L. Ding, Progress in electrical energy storage system: a critical review, *Progress in Natural Science* 19 (3) (2009) 291–312.
- [32] Supercapacitors' applications Guoping Wang, Hongqing Wang, Benhe Zhong, Lei Zhang, and Jiujun Zhang • December 2015.
- [33] H. Gualous, D. Bouquain, A. Berthon, J.M. Kauffmann, Experimental study of supercapacitor serial resistance and capacitance variations with temperature, *Journal of Power Sources* 123 (2003) 86–93.
- [34] A. Kusko, J. Dedad, Short-term and long-term energy storage methods for standby electric power systems, *IEEE Industry Applications Magazine* 19 (2007) 66–72.
- [35] DEBILI Narimene « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque » thèse de magister en électronique, UNIVERSITE CONSTANTINE I Faculté des Sciences de la Technologie
- [36] Photovoltaïque.GuideENR.fr. Photovoltaïque /Caractéristique courant-tension d'une cellule.
- [37] mtatprre.fr « comment ça marche l'énergie éolienne »

CHAPITRES 2 et 3:

- [1] C.L. Benson, C.L. Magee, "On improvement rates for renewable energy technologies: solar PV, wind turbines, capacitors, and batteries", *Renew. Energy*, vol. 68, 2014, pp. 745–751.
- [2] M. Hosenuzzaman, et al, "Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation," *Ren. Sustainable Energy Reviews*, vol. 47, no. 41, 2015, pp. 284–297.
- [3] K. Chao, and C. Huang, "Bidirectional DC–DC Soft-switching Converter for Stand-alone Photovoltaic Power Generation Systems", *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 6, 2014, pp. 1557–1565.

- [4] E. Kaplani, "Design and Performance Considerations in Standalone PV Powered Telecommunication Systems", *IEEE Latin America Trans.*, vol. 10, no. 3, 2012, pp.1723-1729.
- [5] B. K. Bose, "Global Energy Scenario and Impact of Power Electronics in 21st Century", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 60, no. 7, 2013, pp. 2638-2651.
- [6] T. Som, N. Chakraborty, "Studies on economic feasibility of an autonomous power delivery system utilizing alternative hybrid distributed energy resources", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 1, 2014, pp. 172–181.
- [7] X. Tan, Q. Li, H. Wang, "Advances and trends of energy storage technology in microgrid", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 44, no. 1, 2013, pp. 179–191.
- [8] F. Lamberti, et al., "Impact analysis of distributed PV and energy storage systems in unbalanced LV networks," in *Proc. 2015 IEEE PowerTech Conf.*, pp. 1-6.
- [9] S. Liu, R. E. White and R. A. Dougal, "Power and Life Extension of Battery-Ultracapacitor Hybrids," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 25, no. 1, 2002, pp. 120- 131.
- [10] W. Jing, et al., "Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System in Standalone DC Microgrids: A Review", *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 4, 2016, pp. 461-469.
- [11] R.M. Nelms, D.R., Cahela, and B.J. Tatarчук, "Modeling double-layer capacitor behavior using ladder circuits", *IEEE Trans. Aerospace Electron System*, vol. 39, no. 2, 2003, pp. 430–438.
- [12] R.M. Nelms, D.R. Cahela, and B.J. Tatarчук, "Using a Debye polarization cell to predict double-layer capacitor performance", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 37, no. 1, 2001, pp. 4-9.
- [13] S. Pay and Y. Baghzouz, "Effectiveness of battery-supercapacitor combination in electric vehicles," in *Proc. 2003 IEEE Power Tech Conf.* pp. 1-6
- [14] C. H. Li, et al, "Dynamic modeling and sizing optimization of standalone photovoltaic power systems using hybrid energy storage technologies", *J. Renewable Energy*, vol. 34, no. 3, 2009, pp. 815-826.
- [15] J. Lia , Y. Chenb and Y. Liub, "Research on a Stand-alone Photovoltaic System with a Supercapacitor as the Energy Storage Device", in *Proc. 2012 International Conference on Future Energy, Environment, and Materials*, pp. 1693-1700

- [16] M.I. Fahmi et al., "Performance of a Solar PV System Using Supercapacitor and Varying Loads", in Proc. 2014 IEEE Student Conference on Research and Development, pp. 1-6.
- [17] A. Etxeberria, et al., 'Comparison of three topologies and controls of a hybrid energy storage system for microgrids', *Energy Convers. Manag.*, vol. 54, no. 1, 2012, pp. 113–121
- [18] M. Choi, S. Kim and S. Seo, "Energy Management Optimization in a Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 1, 2012, pp. 463-472.
- [19] M. E. Sahin and F. Blaabjerg, "A Hybrid PV-Battery/Supercapacitor System and a Basic Active Power Control Proposal in MATLAB/Simulink", *Electronics*, vol. 9, no. 129, 2020, p. 1-17.
- [20] A.M. Humada, S.Y. Darweesh, K.G. Muhammed, M. Kamil, S.F. Mohammed, N. K. Kasim, T.A. Tahseen, O.I. Awad, S. Mekhilef, Modeling of PV system and parameter extraction based on experimental data: review and investigation, *Solar Energy* 199 (15) (2020) 742–760.
- [21] F. Zaouche, D. Rekioua, J.-P. Gaubert, Z. Mokrani, Supervision and control strategy for photovoltaic generators with battery storage, *Int J Hydrogen Energy* 42 (30) (2017) 19536–19555..
- [22] N. Mebarki, T. Rekioua, Z. Mokrani, Rekioua D, Supervisor control for stand-alone photovoltaic/hydrogen/battery bank system to supply energy to an electric vehicle, *Int J Hydrogen Energy* 40 (39) (2015) 13777–13788.
- [23] N. Mendalek, K. Al-Haddad, in: Photovoltaic system modeling and simulation, *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Toronto, ON, 2017, pp. 1522–1527
- [24] Teulings, W. J. A. J. C. Marpinard, A. Capel, and D. O'Sullivan : « A new maximum power point tracking system », *IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC'93*, Jun. 1993, pp. 833-838.
- [25] Salas, V. Olias, E. Barrado, A. Lazaro, A. « Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90 », 2006, pp. 1555-1578.
- [26] Thi Minh Chau LE, « Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau, aspects contrôle/commande et rejet de perturbations », Thèse de doctorat, Université de Grenoble, France, 2012.

- [27] K.V.G. Raghavendra, K. Zeb, A. Muthusamy, T.N.V. Krishna, S.V.S.V.P. Kumar, D.-H. Kim, M.S. Kim, H.G. Chao, H.-J. Kim, A Comprehensive Review of DC–DC Converter Topologies and Modulation Strategies with Recent Advances in Solar Photovoltaic Systems, *Electronics (Basel)* 9 (1) (2020) 31.
- [28] H.F. Gharibeh, A.S. Yazdankhah, M.R. Aziziani, Energy management of fuel cell electric vehicles based on working condition identification of energy storage systems, vehicle driving performance, and dynamic power factor, *Journal of Energy Storage* 31 (30) (2020), 101760.
- [29] P. Chen, M. Yang, T. Sun, in: PSO-based on-line tuning PID controller for set point changes and load disturbance, *IEEE Congress of Evolutionary Computation (CEC)*, New Orleans, LA, 2011, pp. 1887–1894.
- [30] X. Zhou, Q. He, Modeling and Simulation of Buck-Boost Converter with Voltage Feedback Control, *MATEC Web of Conference* 31 (2015) 1–6,
- [31] Hocine GUENTRI ,Tayeb ALLAOUI b , Mustafa MEKKI b , Mouloud DENAI “POWER management and control of A PHOTOVOLTAIC system with hybrid battery-supercapacitor energy storage BASED ON HEURISTICS METHODS” journal of *Journal of Energy Storage* Volume 39, July 2021, 102578
- [32] Nishad Mendis, Kashem M. Muttaqi, and Sarath Perera, Member, « Management of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage and Synchronous Condenser for Isolated Operation of PMSG Based Variable-Speed Wind Turbine Generating Systems” *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 5, NO. 2, MARCH 2014*
- [33] Morlaye Sekou CAMARA , Mamadou Baïlo CAMARA , Brayima DAKYO, Hamid GUALOUS. Modélisation et commande d’une génératrice synchrone à aimant permanent pour la production et l’injection des énergies offshore dans un réseau, *Laboratoire GREAH, Université Le Havre.*
- [34] F.E. Tahiri , K. Chikh, et M. Khafallah « Commande MPPT utilisant un contrôleur PI-Flou appliqué à un système photovoltaïque autonome » *Laboratoire d’Energie et Systèmes Electriques(LESE), Université Hassan II -ENSEM Casablanca, Maroc* 2 *Laboratoire d’Ingénierie et de Technologies Appliquées (LITA), Université Sultan Moulay Slimane-EST BéniMellal, Maroc*
- [35] N. E. Zakzouk, R. A. Lotfi. Electrical and Control Engineering Department. “Power Flow Control of a Hybrid Battery/Supercapacitor Standalone PV System under

Irradiance and Load Variations” 2020 10th International Conference on Power and Energy Systems.

Résumé :

Dans ce mémoire, nous allons présenter une contribution à l'étude du stockage d'énergie hybride par batterie lithium ion et supercondensateurs dans un système PV et éolien.

Nous avons fait une étude de deux systèmes autonomes PV et éolien, un système PV se composant d'un générateur photovoltaïque fonctionnant à sa puissance maximale raccordé avec un hacheur survolteur commandé par un algorithme MPPT ; ensuite il est raccordé avec le système de stockage hybride via deux convertisseurs DC bidirectionnels.

Le système éolien se compose d'une turbine lié à un GSAP qui est lui-même raccordé avec un hacheur élévateur, ensuite lié au système de stockage hybride.

Une commande du flux d'énergie est nécessaire pour nous informer sur le comportement du système de stockage par batterie et supercondensateur dans ces deux systèmes.

Abstract:

In this thesis we will present a contribution to the study of a hybrid energy storage by a lithium ion battery and a supercapacitor in a PV and wind system.

We did a study of standalone PV and wind systems. The PV system consists of a photovoltaic generator operating at its maximum power connected with a boost chopper controlled by an MPPT algorithm; then it is connected to the hybrid storage system by two bidirectional DC converters.

The wind system consists of a turbine linked to a permanent magnet synchronous generator that is itself connected with a boost chopper, then linked to the hybrid storage system.

A control of the energy flow is necessary to inform us about the behaviour of the battery and supercapacitor storage system in these two systems.

في هذه المذكرة التي عنوانها "مساهمة في دراسة تخزين الطاقة الكهروضوئية والريحية في نظام هجين بواسطة بطارية أيونات الليثيوم ومكثفة فائقة".

أجرينا دراسة عن أنظمة الطاقة الكهروضوئية والريحية المستقلة. حيث يتكون النظام الأول من مولد كهروضوئي يعمل بأقصى طاقته متصلاً بمروحية معززة تتحكم فيها خوارزمية MPPT ؛ ثم يتم توصيله بنظام التخزين الهجين بواسطة محولين ثنائيي الاتجاه.

يتكون نظام الرياح من مروحة هوائية مرتبطة بمولد متزامن مغناطيسي دائم متصل بمعدل التيار، ثم مرتبط بنظام التخزين الهجين.

التحكم في تدفق الطاقة ضروري لإبلاغنا بسلوك نظام تخزين البطارية والمكثفة الفائقة في هذين النظامين.

