

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila
Institut des Sciences et de Technologie
Département du génie mécanique et électromécanique



N° Ref :

**Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme
de MASTER**

Spécialité : Electromécanique

**L'impact du stockage sur la qualité de l'énergie un
réseau électrique industriel isolé alimenté par une source
Photovoltaïque.**

Réalisé par :

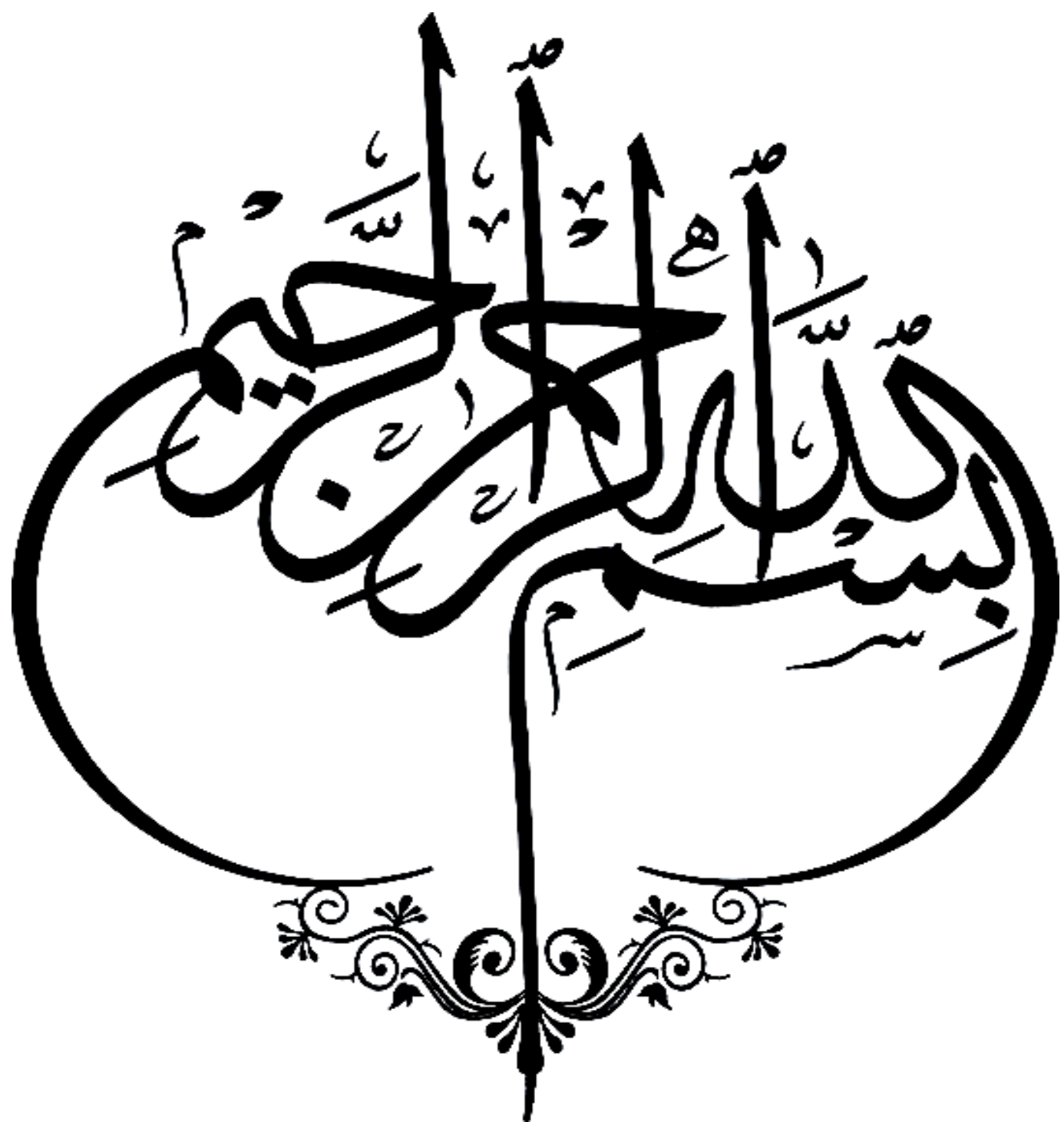
- BENZOUID Zineddine
- BENSEDDIK Seddik

Soutenu devant le jury :

M. B. KAGHOUCHE
Mme S. BOUCHEKOUF
M. H. GUENTRI

Président
Examineur
Promoteur

Année universitaire : 2021/2022





Dédicace

J'ai toujours voulu donner quelque chose à ma mère en signe de ma reconnaissance parce qu'elle a fait de moi l'homme que je suis aujourd'hui, et voici l'occasion ; A qui je la préfère à moi et pourquoi pas, car elle s'est sacrifiée pour moi et n'a ménagé aucun effort pour me rendre toujours heureux, ma chère mère, à mon père, propriétaire d'une biographie parfumée et d'une pensée éclairée, car il était le premier crédit pour mes études supérieures, que Dieu accorde la paix à son âme. A mon frère et mon soutien dans la vie Benzouid Abdesslame Omar, à toute la famille de mon père Benzouid et à la famille de ma mère Moudjed ; à mes amis ; merwane ,kamel, mahdi,djamel,bilel, ahmed ismail semar , amar, anoir,charaf, À qui ma mère n'a pas donné naissance, mais ce sont mes sœurs khadidja boultif,dib sonia,meskine hassina,bouchera mokhanche,À tous mes amis de UGEL ; Et tous ceux avec qui j'ai passé du temps.

BENZOUID ZINEDDINE



Dédicace

Je dédie ce mémoire à tout le monde et surtout à :

Mes parents :

En témoignage de leur amour et soutien

Que dieu les préserve en bonne santé

Et leur accorde longue vie

A mes frères et mes sœurs

A mes amis et mes collègues

À tous ceux qui de près ou de loin, ont collaboré à La réalisation de ce travail,

en guise de reconnaissance

je leur dédie ce modeste travail en témoignage de mon grand amour,

mes

sincères reconnaissances et ma gratitude infinie.

BENSEDDIK SEDDIK

Résumé

Résumé

En raison de la propriété intermittente des énergies renouvelables qui affecte leur instabilité et la variation de la demande de charge, les sources renouvelables ne peuvent pas à elles seules répondre aux besoins de charge. Pour assurer l'alimentation électrique et la continuité de charge avec une source d'énergie intermittente comme le solaire, les systèmes hybrides de stockage d'énergie (HESS) sont associés à des systèmes d'alimentation autonomes. Généralement, les systèmes de stockage hybride améliorent les performances de l'installation d'énergie photovoltaïque. Ce travail porte sur l'intérêt de l'association supercondensateur-batteries pour l'installation d'énergie photovoltaïque. Trois scénarios de simulation ont été testés. Dans le premier scénario, l'installation PV était utilisée directement pour alimenter la charge. Des batteries ont été introduites dans le système lors du deuxième scénario pour prouver leur importance et leur rôle efficace. Dans le troisième scénario, un supercondensateur est inséré avec les batteries pour montrer l'intérêt du système hybride de stockage électrique de l'installation PV.

Mots clés : Supercondensateur ; Photovoltaïque ; Commande, système de stockage hybride

Abstract

Due to the intermittent property of renewable energies, that effects its instability and the variation in load demand, renewable sources cannot alone meet the load needs. To assure power supply and load continuity with an intermittent power source like solar, the hybrid energy storage systems (HESSs) is associated to standalone power systems. Generally, the HESSs enhance the performances of the photovoltaic energy installation. This work is focused on the interest of the supercapacitor-batteries combination for the photovoltaic energy installation. Three simulation scenarios have been tested. In the first scenario, the PV installation was used directly to supply the load. Batteries were introduced into the system during the second scenario to prove their importance and effective role. In the third scenario, a supercapacitor is inserted to batteries to show the interest of the hybrid electrical storage system for the PV installation.

Keywords: Supercapacitor; Photovoltaic; Control, energy storage

ملخص

نظراً للخاصية المتقطعة للطاقات المتجددة التي تؤثر على عدم استقرارها اعداد الحمولة الكهربائية والتباين في الطلب على الأحمال، لا يمكن للمصادر الطاقة المتجددة وحدها تلبية احتياجات الحمل. لضمان إمداد الطاقة واستمرارية الحمل من خلال مصدر طاقة متقطع مثل الطاقة الشمسية، ترتبط أنظمة تخزين الطاقة الهجينة بأنظمة الطاقة المستقلة. بشكل عام، تعمل أنظمة تخزين الطاقة الهجينة على تحسين أداء الطاقة الكهروضوئية. يركز هذا العمل على إبراز أهمية أنظمة تخزين الطاقة الهجينة لتكوين الطاقة الكهروضوئية، هاته الأنظمة التي تعتبر في الغالب بطاريات مركبة مع مكثفات فائقة. تم اختبار ثلاثة سيناريوهات محاكاة. في السيناريو الأول، تم استخدام الطاقة الكهروضوئية مباشرة لتزويد الحمل. تم إدخال البطاريات في النظام خلال السيناريو الثاني لإثبات أهميتها ودورها الفعال. في السيناريو الثالث، يتم إدخال مكثف فائق مع البطاريات لإظهار أهمية نظام التخزين الكهربائي الهجين للتركيبات الكهروضوئية.

الكلمات المفتاحية: مكثف فائق، الطاقة الشمسية، التحكم، نظام التخزين الكهربائي الهجين

Sommaire

Introduction générale.....	01
Chapitre I : Concept des réseaux électriques industriels isolé	
I.1 Introduction.....	05
I.2 Hiérarchisation du réseau électrique Algérien.....	05
I.2.1 Réseaux de Transport.....	05
I.2.2 Réseaux de répartition.....	06
I.2.3 Réseaux de distribution.....	06
I.3 Réseau électrique industriel.....	07
I.4 Structure des réseaux de distribution	07
I. 4.1 Réseaux moyenne tension	07
I.4.2 Réseaux basse tension	08
I.5 Composition de réseau de distribution	08
I.5.1. Différentes topologies de réseaux de distribution	09
I.5.1.1. Les réseaux ruraux	09
I.5.1.2. Les réseaux urbains	09
I.5.1.2.1 Réseaux en dérivation multiples	09
I.5.1.1.2. Réseau en coupure d'artère	10
I.5.1.3. structure maillée	11
I.5.1.1.3. Réseaux bouclés	12
I.6.1 Organisation des réseaux électriques Algérien	12
I.6.2 Les différents niveaux de tension en Algérien.....	13
I.7 Les postes électriques	14
I.7.1 Les postes de livraison HTB	14
I.7.1.1 Simple antenne	14
I.7.1.2 Double antenne	14
I.7.1.3 Double antenne - double jeu de barres.....	15
I.7.2 Les postes de livraison HTA	16
I.7.2.1 Les postes de livraison HTA à comptage BT	16
I.7.2.1.1 Dérivation simple	16
I.7.2.1.2 Double dérivation	16
1.7.3 Les postes de livraison HTA à comptage HT	17
I.7.3.1 Exemple de schéma	17

Sommaire

1.7.4 Les réseaux HTA à l'intérieur du site.....	18
1.7.4.1 Modes d'alimentation des tableaux HTA.....	18
1.7.4.1.1 Un jeu de barres, une source d'alimentation.....	18
1.7.4.1.2 Un jeu de barres sans couplage, 2 sources d'alimentation	19
1.7.4.1.3 Deux demi jeux de barres avec couplage, 2 sources d'alimentations	19
1.7.4.1.4 Un jeu de barres sans couplage, 3 sources d'alimentation	20
1.7.4.1.5 Trois sections de barres avec couplages, 3 sources d'alimentation	20
1.7.4.1.6 Sources et départs en "duplex"	21
1.7.4.1.7 Deux jeux de barres, 2 attaches par départ, 2 sources d'alimentation	22
1.7.4.1.8 Deux doubles jeux de barres couplés entre eux	23
1.8 Structure des réseaux HTA	23
I.8.1 Radial en simple antenne	23
I.9 Conclusion.....	24

Chapitre II : les systèmes de stockage d'énergie électrique

II.1 Introduction.....	26
II.2 Modèles de dispositifs de stockage	26
II.2.1 Stockage direct	27
II.2.1.1 Condensateur.....	27
II.2.1.2 Supercondensateur.....	28
II.2.2 Stockage indirect	29
II.2.2.1 Accumulateurs électrochimiques	30
II.2.2.2 Stockage sous forme d'hydrogène	33
II.2.2.3 Stockage hydraulique.....	34
II.2.2.4 Stockage à air comprimé (CAES)	35
II.2.2.5 Volant d'inertie.....	36
II.2.2.6 Stockage sous forme thermique.....	37
II.3 Comparaisons entre les différentes techniques de stockage.....	39
II.4 Conclusion.....	43

Chapitre III : Commande et Modélisation des composantes

III.1 Introduction	45
III.2 Description du système	45
III.2.1 Modélisation du système PV	46
III.2.2 Modélisation des convertisseurs DC-DC	47
III.2.3 Modelisation de la batterie	47
III 2.3.1 Schéma électrique d'une batterie.....	48
III.2.3.2 Mode de fonctionnement d'une batterie.....	48
III.2.4 Modélisation d'un supercondensateur	49
III.2.4.1 Modèle RC de supercondensateur.....	49
III.2.4.2 Modèle à deux branches de supercondensateur.....	49
III.3.1 Maximum Power Point Tracking	51
III.3.2 Perturb and Observe.....	51
III.3. Schéma de commande proposé du système d'alimentation PV	52
III.3.1 Contrôle du bus DC.....	52
III.3.2 Conception des régulateurs PI.....	54
III.3.2.1 Placement des pôles Régulateur PI.....	54
III.3.2.2 Stratégie de gestion de l'alimentation	55
III.4 Conclusion	58

Chapitre IV : Simulations et résultats

IV.1 Introduction.....	60
IV.1 Cas 1 PV seul.....	60
IV.2 Cas 2 PV et batterie.....	62
IV.3 Cas 3 PV, batterie et supercondensateur.....	64
IV.4.Conclusion	66
Conclusion générale.....	68
Références bibliographiques	69

Liste des tableaux

Chapitre I : Concept des réseaux électriques industriels isolé

Tableau I-1 : Les différents niveaux de tension en Algérien, norme UTE C 18-510.....13

Chapitre II : les systèmes de stockage d'énergie électrique

Tableau 1 : TECHNOLOGIES D'ACCUMULATEURS AU LITHIUM31

Tableau 2 : Comparaison de quelques technologies d'accumulateurs électrochimiques.....32

Tableau 3 :Bilan simplifié des caractéristiques des moyens de stockage plutôt exploitables à petite échelle.....40

Tableau 4 : Bilan simplifié des caractéristiques des moyens de stockage plutôt exploitable à grande échelle.....41

Chapitre III : Commande et Modélisation des composantes

Tableau 3.1 : Logique de perturbation et d'observation.....52

Liste des figures

Chapitre I : Concept des réseaux électriques industriels isolé

Figure I-1 : Hiérarchisation du réseau électrique Algérien.....	06
Figure I.2 : ligne basse tension.....	08
Figure I-3 : Topologie du réseau rural.....	09
Figure I-4 : Topologie de réseau urbain en double dérivation.....	10
Figure I-5 : Les trois variations de la topologie en coupure d'artère.....	10
Figure I-6 : La topologie du réseau maillé (grille).....	11
Figure I-7 : Exemple d'un réseau contenant les structures bouclées : la maille et les boucles (ou pétales de marguerite).....	12
Figure I.8 : Schéma de l'organisation des réseaux électriques en fonction de leur tension en Algérien.....	13
Figure 1-9 : alimentation simple antenne d'un poste de livraison HTB.....	14
Figure 1-10 : alimentation double antenne d'un poste de livraison BT.....	14
Figure 1-11 : alimentation double antenne - double jeu de barres d'un poste de livraison HTB..	15
Figure 1-12 : alimentation en simple dérivation d'un poste de livraison HTA à comptage BT...	16
Figure 1-13 : alimentation en double dérivation d'un poste de livraison HTA à comptage BTA.....	17
Figure 1-14 : poste de livraison HTA à comptage HT.....	18
Figure 1-15 : 1 jeu de barres, 1 source d'alimentation.....	19
Figure 1-16 : 1 jeu de barres sans couplage, 2 sources d'alimentation Fonctionnement.....	19
Figure 1-17 : 2 demi-jeux de barres avec couplage, 2 sources d'alimentation.....	19
Figure 1-18 : 1 jeu de barres sans couplage, 3 sources d'alimentation.....	20
Figure 1-19: 3 sections de barres avec couplages, 3 sources d'alimentation.....	20
Figure 1-20 : sources et départs en "duplex".....	21
Figure 1-21 : 2 jeux de barres, 2 attaches par départ, 2 sources d'alimentation.....	22
Figure 1-22 : 2 doubles jeux de barres couplés entre eux.....	23
Figure 1-23 : réseau HTA radial en simple antenne.....	24

Chapitre II : les systèmes de stockage d'énergie électrique

Figure 2-1 : Classification des dispositifs de stockage.....	26
Figure 2-2 : Structure d'un condensateur plan.....	27
Figure 2-3 : Structure d'un supercondensateur.....	28
Figure 2-4 : Principaux éléments d'un dispositif de stockage d'énergie magnétique par bobine supraconductrice.....	29
Figure 2-5 : schéma de principe de fonctionnement d'un accumulateur électrochimique.....	30
Figure 2-6 : Différentes possibilités de restitution de l'électricité à partir de l'hydrogène stocké.....	33
Figure 2-7 : Fonctionnement du stockage hydraulique gravitaire	35
Figure 2-8 : Stockage mécanique par air comprimé [Multon et Ruer].....	36
Figure 2-9: principe d'un accumulateur à volant d'inertie.....	37
Figure 2-10 : Stockage d'électricité sous forme de chaleur sensible dans une centrale électrique.....	38

Chapitre III : Commande et Modélisation des composantes

Figure 3.1. Schéma de principe des systèmes PV avec stockage d'énergie.....	45
Figure3. 2. Modèles de circuits équivalents PV.....	46
Figure 3.3. Les modèles de circuit buck-boost.....	47
Figure3.4 : Schéma électrique d'une batterie.	48
Figure 3.5. Modèle de supercondensateur simple.....	49
Figure 3.6. Circuit simplifié de supercondensateur : modèle à deux branches.....	49
Figure 3.7. Modèle MATLABSimulation d'un pack de supercondensateurs.....	50
Figure 3.8: Courbe PV panneaux solaires en algeré.....	51
Figure 3.9. Schéma fonctionnel de la commande du bus DC.....	53
Figure 3.10. Boucle de régulation PI du supercondensateur.....	53
Figure 3.11. Boucle de régulation PI de la batterie.....	56
Figure 3.12. Stratégie de gestion de l'alimentation du contrôle du bus DC.....	56
Figure 3.13. Schéma de contrôle du système de stockage d'énergie hybride.....	56

Chapitre IV : Simulations et résultats

Figure. IV.1 cas de PV alimentant une charge variable.....60

Figure. IV.2 P_{PV} et P_{load} , en cas de PV seul..... 61

Figure IV.3 :Tension du bus CC, en cas de PV seul 61

Figure IV.4 :Cas de PV et batterie alimentant une charge variable.....62

Figure IV.5 P_{pv} , P_{bat} et P_{load} en cas de batterie PV63

Figure IV.6. Tension du bus DC en cas de batterie PV63

Figure IV.7. Cas de PV, batterie et supercondensateur alimentant une charge variable.....64

Figure IV.8: Tension du bus CC dans le cas d'une batterie PV-supercondensateur.....65

Figure IV.9 : P_{pv} , P_{bat} , P_{sc} et P_{load} dans le cas d'un supercondensateur de batterie PV65

Nomenclature

DC	Courant Continu (Direct Current).
P&O	Perturbation et Observation
MPPT	Maximum Power Point Tracking
GPV	Générateur photovoltaïque
PV	Photovoltaïque
AC	Courant Alternatif (Alternative Current).
I_{ph}	Le photo-courant, proportionnel à l'irradiante, avec correction selon (A)
I_0	Le courant de saturation de diode
R_s	Résistance série (ohm)
T_c	température de la cellule
N_p	Nombre des cellules en parallèle dans notre cas N_p
R_s	Résistance série (ohm)
R_p	résistance parallèle
D	rapport cyclique
V_1	Tension à vide.
R_1	Résistance interne de la batterie
I_{bat_ref}	le courant de référence de la batterie
I_{Load}	courant de Load
I_{sc}	courant de supercondensateurs
I_{bat_DC}	courant continu de la batterie
I_{sc_DC}	courant continu de la supercondensateurs
D_{bat}	rapport cyclique de la batterie
V_{dc}	Tension de capacité
V_{pv}	Tension de pv
D_{pv}	rapport cyclique de pv
D_{sc}	rapport cyclique de supercondensateurs
q	charge de l'électron
T_c	désigne la température de fonctionnement de la cellule
A	le facteur d'idéalité
k	la constante de Boltzman
T_{ref}	la température de référence de la cellule
Gr	l'isolation solaire.
soC_m	valeur maximal de l'énergie de batterie.

Nomenclature

Soc (t)	état de charge.
ns	nombre de 2V
C_1	capacité principale
Co	capacité constante (en F)
Npsc	le nombre de connexions
U_{SC}	sont respectivement la tension du pack S_C
I_{SC}	respectivement le courant du pack S_C
B	le rapport cyclique du convertisseur DC/DC
L	inductance
C	Capacité



INTRODUCTION GENERAL

Introduction générale

Depuis les premières utilisations des énergies renouvelables dans la production d'électricité, telles que l'éolien et le solaire, leur exploitation a pris une importance particulière aux niveaux domestique, rural et industriel, notamment en mode isolé pour le pompage de l'eau, l'éclairage et l'alimentation électrique des sites isolés. [1], [2]. Néanmoins, ces sources d'énergie nécessitent un système de stockage électrique par absence de garantie de continuer le service pendant la nuit pour le photovoltaïque et pendant le manque de vent pour l'éolien. [3], [4].

Les systèmes de stockage d'électricité les plus utilisés sont les batteries au plomb et au lithium [5], [6]. Plusieurs auteurs ont montré que l'utilisation d'un seul système de stockage électrique dans les sources d'énergie renouvelables n'est pas suffisant en raison de leur instabilité et des besoins de charge différents [7-8-9]. A cet effet, il recourt à l'utilisation d'un système hybride de stockage électrique ; généralement, il ajoutait un supercondensateur aux batteries [10], [11], [12]. En raison des avantages du système hybride du stockage offerts au système électrique, tels que la garantie de la continuité d'alimentation de la charge, des puissances élevées et des densités d'énergie, pour prolonger la durée de vie des systèmes de stockage [13], [14], [15].

Ce mémoire met en évidence l'importance de la combinaison supercondensateur-batteries pour l'installation d'énergie photovoltaïque. Un modèle hybride proposé se compose d'un panneau photovoltaïque et d'un assortiment de batteries au lithium avec un système de stockage d'énergie à supercondensateur. L'ensemble du système alimente une charge électrique AC via un convertisseur DC-AC. Pour cette étude, trois scénarios de simulation ont été utilisés ; dans le premier scénario, utilisation directe l'installation PV pour alimenter la charge électrique. Dans le deuxième test, les batteries sont ajoutées au système pour montrer leur intérêt. Dans le troisième scénario, un supercondensateur est ajouté aux batteries pour montrer l'intérêt du système hybride de stockage électrique pour l'installation PV.

Le présent mémoire est rédigé en quatre chapitres

Le premier chapitre est consacré à la présentation générale du concept des réseaux électriques industriels isolé, depuis les centrales de production passant par les réseaux de transports arrivant aux consommateurs.

Le deuxième chapitre est consacré à la description des différents systèmes de stockage d'énergie électrique.

Introduction générale

Dans le troisième chapitre, nous présentons la commande et les différents Modélisation des composantes.

Dans le chapitre quatre, pour contribuer à notre travail, nous l'avons simulé et démontré et comparé les résultats.

Finalement, pour clôturer, ce mémoire est achevé avec une conclusion générale faisant ressortir l'intérêt de ce travail ainsi que les perspectives et les recommandations relatives au développement futur du travail effectué.



CHAPITRE I

I.1 Introduction

Le réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques disponibles sous une forme ou une autre Permettre de diriger l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité.

Dans ce premier chapitre, nous présenterons le contexte et les objectifs proposés dans ce travail. Cet article traite principalement de la planification des réseaux de distribution. Dans un premier temps, nous décrivons également brièvement la hiérarchie du réseau électrique algérien, constitué de lignes électriques fonctionnant à différents niveaux de tension et connectées les unes aux autres.

Entre eux dans les sous-stations électriques et les sous-stations électriques permet de distribuer

L'électricité est transmise d'une tension à une autre grâce à des transformateurs.

Le réseau électrique doit également assurer la gestion dynamique de tous les processus de production -Transport - distribution - consommation, la mise en place de modifications visant à

Pour assurer la stabilité de tous.

I.2 Hiérarchisation du réseau électrique Algérien :

Dans la hiérarchie du réseau électrique algérien, le réseau peut être divisé en deux parties principales, le réseau de distribution et le réseau de transport/distribution. Les réseaux de transport et d'interconnexion transportent de grandes quantités d'énergie à très haute tension (60Kv, 220Kv ou 400kV) sur de longues distances depuis les usines de production jusqu'aux réseaux de distribution. Les réseaux de distribution régionaux distribuent l'énergie au niveau régional et alimentent les réseaux de distribution ainsi que les grands clients industriels. Le réseau de distribution dessert des consommateurs finaux moyens tension (30kV) ou basse tension (380V) (clients résidentiels, tertiaire, petite industrie). La Figure I-1 montre schématiquement la hiérarchie du réseau. [16]

I.2.1 Réseaux de Transport

La première mission assignée au réseau électrique à très haute tension est le transport de l'électricité. L'énergie électrique est produite dans un petit nombre d'installations de forte puissance- usines hydrauliques, thermiques ou nucléaires - et il faut acheminer vers les zones de consommation, sur des distances de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres, des quantités considérables d'énergie.

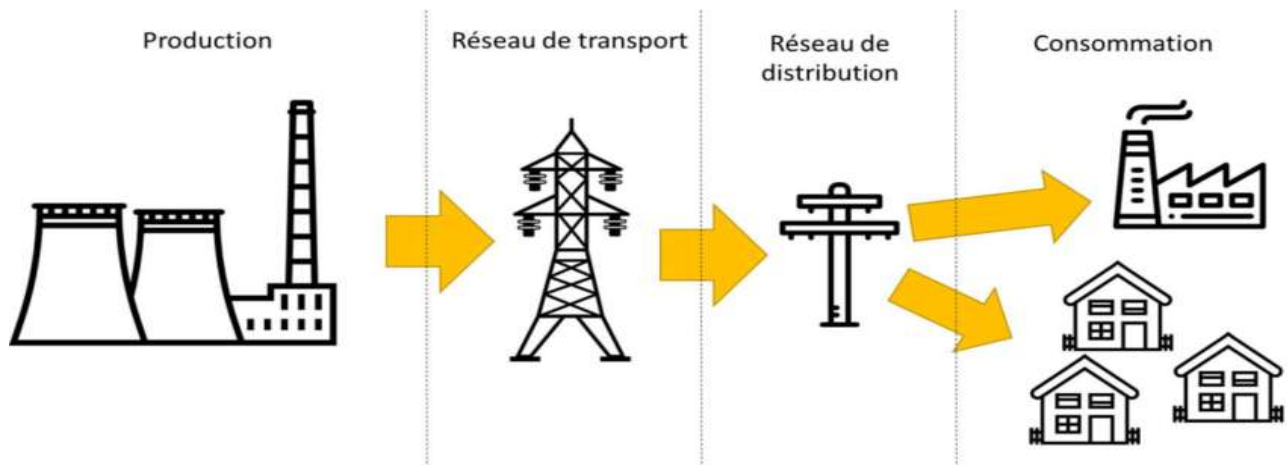


Figure I-1 : Hiérarchisation du réseau électrique Algérien

1.2.2 Réseaux de répartition :

Les réseaux de répartition ou réseaux Haute Tension ont pour rôle de répartir, au niveau régional, l'énergie issue du réseau de transport. Leur tension est supérieure à 63 kV selon les régions.

Ces réseaux sont, en grande part, constitués de lignes aériennes, dont chacune peut transiter plus de 60 MVA sur des distances de quelques dizaines de kilomètres. Leur structure est, soit en boucle fermée, soit le plus souvent en boucle ouverte, mais peut aussi se terminer en antenne au niveau de certains postes de transformation.

En zone urbaine dense, ces réseaux peuvent être souterrains sur des longueurs n'excédant pas quelques kilomètres. Ces réseaux alimentent d'une part les réseaux de distribution à travers des postes de transformation HT/MT et, d'autre part, les utilisateurs industriels dont la taille (supérieure à 60 MVA) nécessite un raccordement à cette tension.

- La tension est 90 kV ou 63 kV,
- Neutre à la terre par réactance ou transformateur de point neutre,
- Limitation courant neutre à 1500 A pour le 90 kV,
- Limitation courant neutre à 1000 A pour le 63 kV,
- Réseaux en boucle ouverte ou fermée.

1.2.3 Réseaux de distribution

Le rôle du réseau de distribution est d'irriguer le territoire en électricité et de répondre aux besoins d'un grand nombre de petits industriels et de particuliers aussi bien dans les zones

urbaines très denses que dans les zones rurales à habitat dispersé. Cela signifie que les conceptions de ces réseaux varient d'un pays à l'autre et que les solutions employées sont nombreuses dans le monde. Ils ont des caractéristiques communes

- Pour des raisons techniques et économiques structure maillée avec plusieurs classes de tension : classes HT, MT et BT.
- Topologie radiale ou arborescente des postes HT/MT ou des postes MT/BT, où ils trouvent leur source d'alimentation. Du point de vue de la tension, en particulier du point de vue de la continuité d'alimentation, les réseaux de distribution ont des problèmes opérationnels pour maintenir la qualité de service. A cet égard, outre la maintenance en temps réel, la réduction des pannes repose sur la recherche de plans d'intervention automatisés ou manuelle pour isoler un ensemble de charges et éviter ainsi la propagation de défauts.

I.3 Réseau électrique industriel

Le rôle du réseau dans le système électrique pour assurer un approvisionnement énergétique sûr et économique. Il n'est techniquement pas possible que ce rôle soit assuré par un type unique de réseau qui relierait moyens de production et utilisateurs. Une bonne solution consiste à établir une hiérarchie de trois catégories de réseaux dont les fonctions sont différentes et qui se distinguent par le niveau de tension de leurs lignes ou le niveau de puissance qui transite.

I.4 Structure des réseaux de distribution

Les réseaux de distribution Algérien sont organisés en deux parties selon le niveau de tension [19]. On distingue les réseaux moyens tension – dits réseaux HTA (30kV) – et les réseaux basse tension – dits réseaux BT (380V).

I. 4.1 Réseaux moyenne tension :

Les réseaux moyenne tension représentent plus de 613 000 km de raccordements électriques et peuvent être aériens ou souterrains [23]. Le réseau fonctionne à 30 kV (15 kV ou moins dans de rares cas) et est généralement arborescent, cyclique, mais radial à l'exception des défaillances dans le schéma du réseau [22]. Chaque embranchement s'appelle le point de départ et mesure généralement environ 30 kilomètres de long. Le réseau moyen tension transporte l'énergie électrique du réseau de transport vers les clients moyenne tension (clients de moins de 50 KV en Algérie) et le réseau basse tension. Ils sont reliés au réseau de transport par plus de 2 200 postes sources. Ce sont des sous-stations qui abaissent généralement la tension de 63 kV à

30 kV. Le poste source assure également la régulation de la tension, la protection du réseau, le comptage, etc. [18].

I.4.2 Réseaux basse tension :

Les réseaux basse tension représentent près de 700 000 km de raccordements électriques et peuvent être aériens ou souterrains [23]. Le réseau fonctionne en 400 V triphasé ou 230 V monophasé, généralement radial, sans boucles. Les départs des réseaux basse tension sont plus courts que ceux des réseaux moyenne tension. Le réseau basse tension transporte l'électricité du réseau moyenne tension jusqu'aux utilisateurs basse tension (plus de 35 millions en Algérie). Ils sont connectés au réseau moyenne tension par plus de 750 000 sous-stations de distribution, qui sont généralement abaissées de 20 kV à 400 V. [18] La figure 1.3 reprend les principaux concepts introduits dans cette introduction pour résumer la structure et le vocabulaire du réseau de distribution algérien.



Figure I.2 : ligne basse tension

I.5 Composition de réseau de distribution MT

Ces réseaux industriels contiennent de multiples composants, tels que les sous-stations ci-dessus, ainsi que des conducteurs (lignes aériennes, câbles de terre), diverses phases d'appareillage et des condensateurs. Les propriétés et caractéristiques de ces composants sont détaillées dans [21], [22].

I.5.1. Différentes topologies de réseaux de distribution :

I.5.1.1. Les réseaux ruraux :

Les réseaux ruraux ont une topologie très faiblement maillée, avec des boucles entre des différents postes source ou les ramifications, mais l'exploitation se réalise via une structure arborescente. Il existe ainsi des organes de manœuvre normalement ouverts, pouvant être manœuvrés pour isoler un défaut éventuel [29].

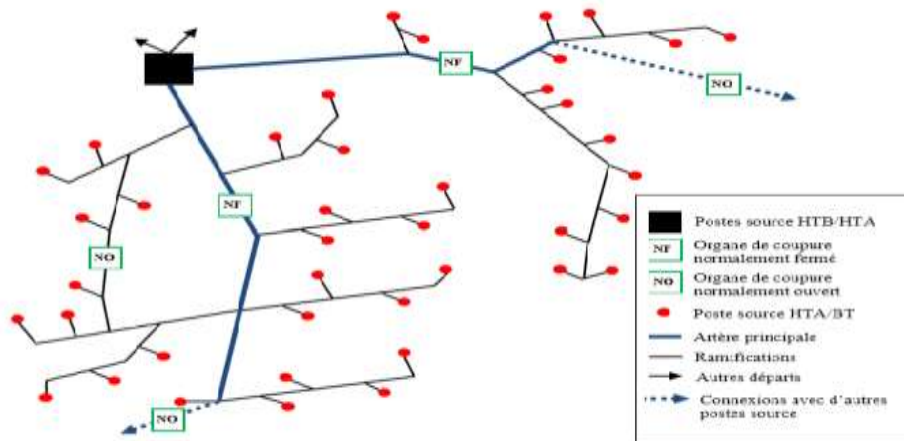


Figure I-3 : Topologie du réseau rural

I.5.1.2. Les réseaux urbains

La question du choix structurel est cruciale pour les réseaux urbains car elle détermine les conditions de la qualité de l'approvisionnement des consommateurs. La principale caractéristique des réseaux urbains est une densité de charge élevée par rapport aux réseaux ruraux. Cette caractéristique varie d'une région à l'autre et est incluse au sein d'une même région. C'est pourquoi la topologie d'un réseau urbain varie considérablement en fonction des besoins du client, des aspects historiques et des objectifs proposés lors du processus de conception du réseau. On peut distinguer trois grands groupes de topologie : les Réseaux Dérivés Multiples, les Réseaux de Coupure Artérielle (et Variantes), les Réseaux Fortement Récurrents (Maillages).

I.5.1.2.1 Réseaux en dérivation multiples

Ce type de réseaux se compose de deux postes source HTB/HTA qui sont connectés par deux (pour la double dérivation), ou plusieurs (dérivations multiples) circuits triphasés placés en parallèle. Les charges (transformateurs HTA/BTA) sont connectées soit à un circuit, soit à un second qui peut être un circuit de secours dédié. L'exploitation du réseau ayant cette structure peut être facilement automatisée. La Figure I-4 montre un réseau en double dérivation[29].

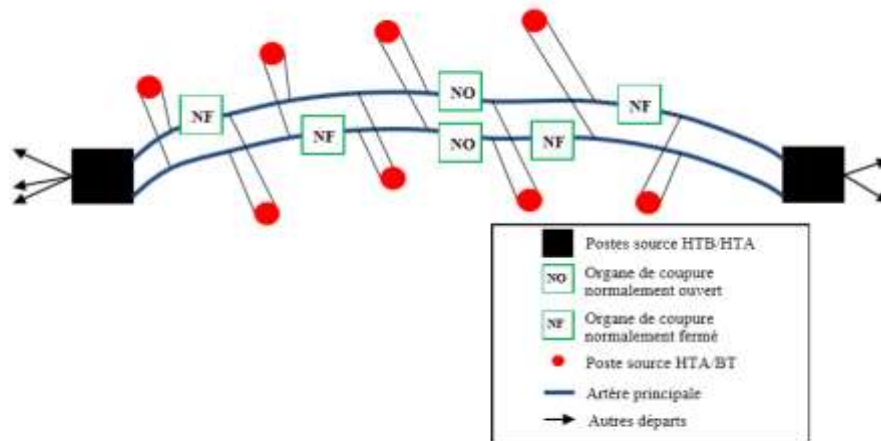


Figure I-4 : Topologie de réseau urbain en double dérivation.

I.5.1.1.2. Réseau en coupure d'artère

Dans les réseaux de ce type, les postes source HTB/HTA sont raccordés deux à deux par des circuits dit artères. Chaque charge (postes HTA/BTA) est connectée directement à une artère qui contient un ou plusieurs organes de coupure ayant l'état normalement ouvert ou fermé afin de réaliser l'exploitation dans une structure radiale. Dans certains cas, la connexion entre les postes HTB/HTA peut être renforcée par un câble de secours. Il existe les variantes de la structure en coupure d'artère appelées le fuseau et l'épi. La Figure I-6 présente les trois structures en coupure d'artère.

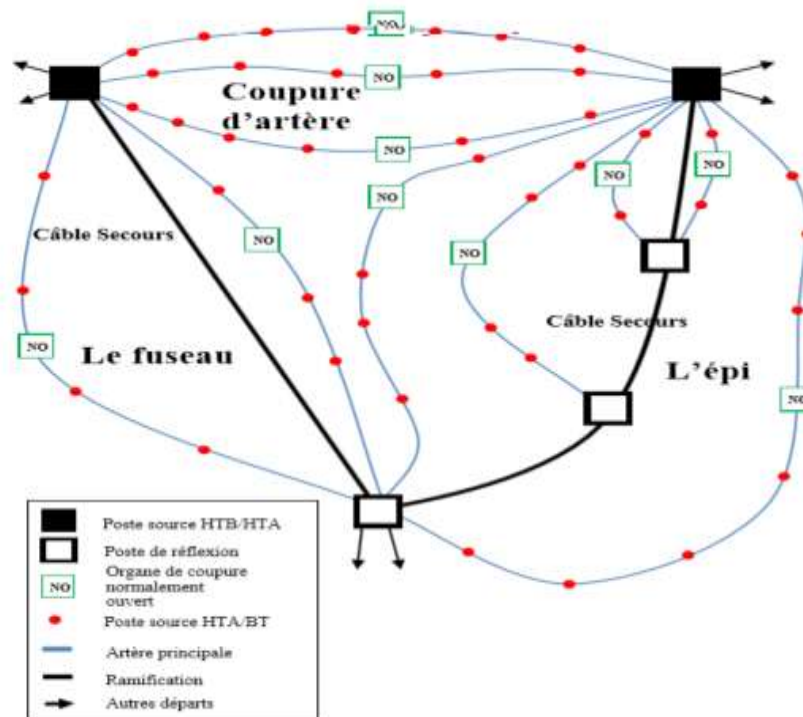


Figure I-5 : Les trois variations de la topologie en coupure d'artère.

Dans la structure en fuseau (sur la gauche de la Figure I-6), tous les câbles issus d'un même poste convergent vers un même point appelé point de réflexion [25]. Ce point peut être considéré comme un lieu privilégié pour la création, dans le futur, d'un nouveau poste source HTB/HTA. Le point de réflexion peut être aussi connecté par un câble secours (comme illustré sur la figure) avec le poste HTB/HTA. L'exploitation de cette structure simple est facile.

La structure en épi montrée sur la partie droite de la Figure I-6 se caractérise par la présence de plusieurs postes de réflexion connectés successivement par le câble de secours et ensuite par les câbles de travail avec le poste source HTB/HTA. Cette architecture permet de développer le réseau autour d'un même poste de façon plus économique et plus souple que dans le fuseau. De plus elle tient compte de la répartition réelle des charges ce qui minimise, au final, la longueur totale des lignes par rapport à la structure en fuseau [16].

I.5.1.3. Structure maillée :

Une variante de l'architecture en coupure d'artères est la structure maillée ou la grille. Elle diffère par la présence d'un grand nombre des boucles formées par des conducteurs reliant les postes source HTB/HTA entre eux, les charges et les connexions intermédiaires. L'exploitation de cette structure se réalise en radial grâce au placement de plusieurs organes de manœuvre normalement ouverts dans le réseau. L'existence de nombreuses connexions entre des lignes dans le réseau apporte une grande sécurité d'alimentation, mais rend le coût de construction de ce type d'architecture très élevé. La structure maillée est montrée sur la Figure I-7. [16]

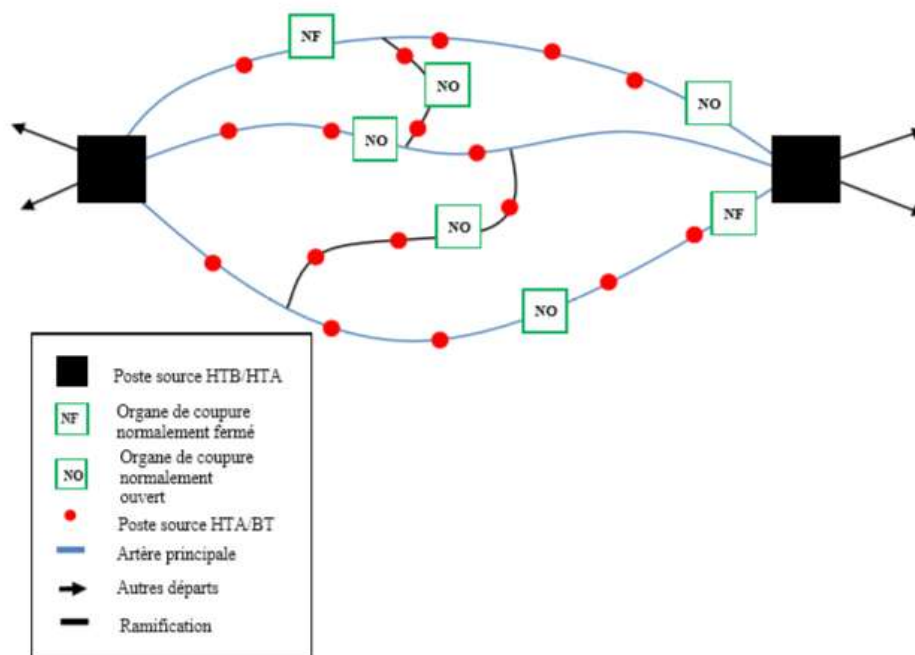


Figure I-6 : La topologie du réseau maillé (grille).

I.5.1.1.3. Réseaux bouclés

Nous montrons ici deux types d'architecture fortement bouclée : la maille et les boucles (ou pétales de marguerite). Dans ces réseaux, chaque ligne qui forme une boucle doit être alimentée à partir d'un même poste source HTB/HTA (ou à partir des postes têtes de boucle). Les postes têtes de pétales sont eux connectés aux sources HTB/HTA par des conducteurs de section importante appelés câbles de structure. La Figure I-8 représente ces structures. [16]

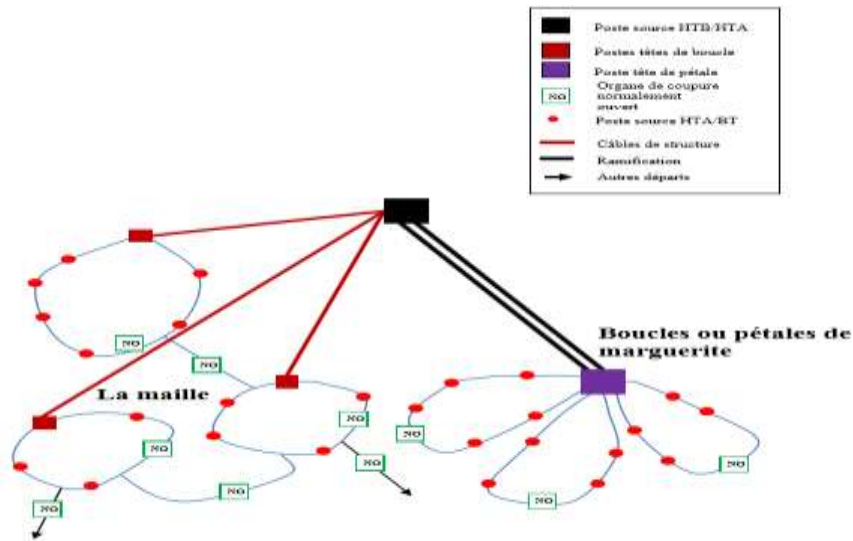


Figure I-7 : Exemple d'un réseau contenant les structures bouclées : la maille et les boucles (ou pétales de marguerite).

Dans la structure maille il existe les connexions entre des boucles afin d'avoir des secours mutuels. La structure pétales de marguerite est moins flexible au niveau de la possibilité de reporter la charge d'une boucle à l'autre en cas de défaut d'un câble de structure car toutes les boucles sont alimentées uniquement via un poste (appelé poste tête de pétales) connecté au poste source HTB/HTA. [16]

I.6.1 Organisation des réseaux électriques Algérien

Le réseau fonctionne à différents niveaux de tension et est organisé en fonction de ces niveaux de tension. En Algérie, le terme réseau de transport désigne l'ensemble des réseaux électriques fonctionnant à des tensions supérieures à 50 kV – dit niveau de tension HTB. Ils assurent que l'énergie électrique est transmise sur de longues distances à haute tension pour minimiser les pertes. Le réseau de transport relie principalement de grands groupes de production, d'autres réseaux de transport nationaux, certains clients et des réseaux de distribution. Les réseaux de distribution comprennent tous les réseaux fonctionnant à des tensions inférieures ou égales à 50 kV. Leur rôle est d'assurer la distribution de l'énergie

électrique au niveau local. Ils connectent la majorité des consommateurs Algériens. Comme le montre la figure [21], l'organisation du réseau de transport et de distribution est subdivisée selon la classe de tension.

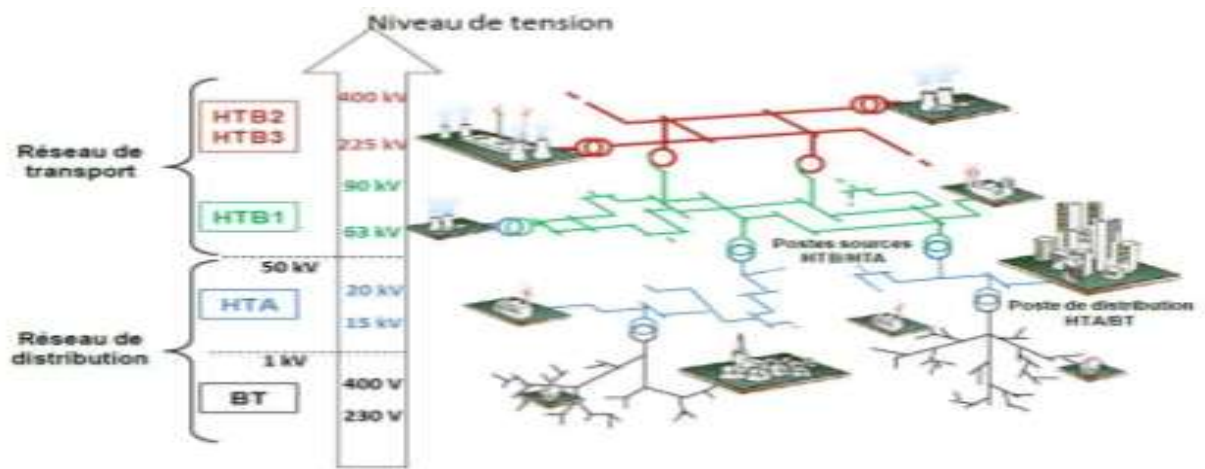


Figure I.8 : Schéma de l'organisation des réseaux électriques en fonction de leur tension en Algérien

I.6.2 Les différents niveaux de tension en Algérien

Depuis 1989, la norme réseau algérienne UTE C 18-510 définit différentes classes de tension. Ils sont illustrés à la Figure I-3. Nous utiliserons ces abréviations ci-dessous. Par conséquent, le réseau de transport et de distribution se situe au niveau HTB. Le GRT est responsable de l'équilibre production/consommation au niveau national et respecte les échanges transfrontaliers. Le réseau de distribution est aux niveaux HTA et BT. Le rôle du gestionnaire du réseau de distribution est l'entretien et la gestion de ce dernier, ainsi que la fourniture d'électricité aux petites et moyennes entreprises et aux particuliers via le réseau moyenne tension (HTA) et le réseau basse tension (BT).

Domaines de tension		Valeur de la tension composée nominal (U_n en volts)	
		Tension Alternative	Tension Continue
Très Basse Tension (TBT)		$U_n < 50$	$U_n < 120$
Basse tension	BT	$50 < U_n < 1000$	$120 < U_n < 1500$
Haute tension	HTA	$1000 < U_n < 50000$	$1500 < U_n < 75000$
	HTB	$U_n > 50000$	$U_n > 75000$

Tableau I-1 : Les différents niveaux de tension en Algérien, norme UTE C 18-510

I.7 Les postes électriques

I.7.1 Les postes de livraison HTB

Ils concernent généralement les puissances supérieures à 10 MVA.
L'installation du poste de livraison est comprise entre :

- ✚ d'une part, le point de raccordement au réseau de distribution HTB
- ✚ d'autre part, la borne aval du ou des transformateurs HTB / HTA

Les schémas électriques des postes de livraison HTB les plus couramment rencontrés sont les suivants :

I.7.1.1 Simple antenne :

❖ Architecture :

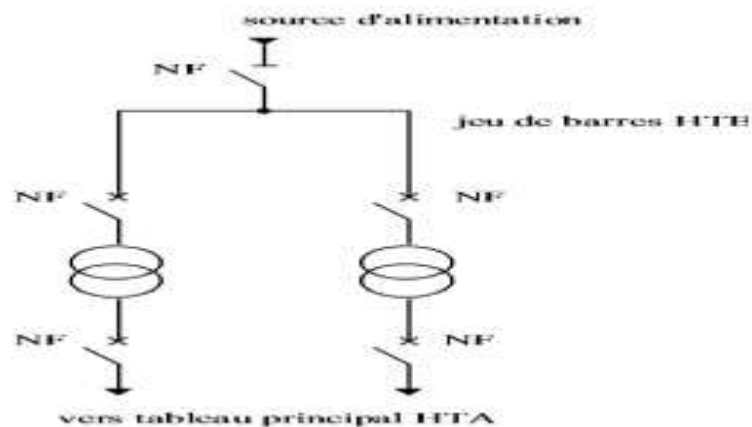


Figure 1-9 : alimentation simple antenne d'un poste de livraison HTB

I.7.1.2 Double antenne :

❖ Architecture :

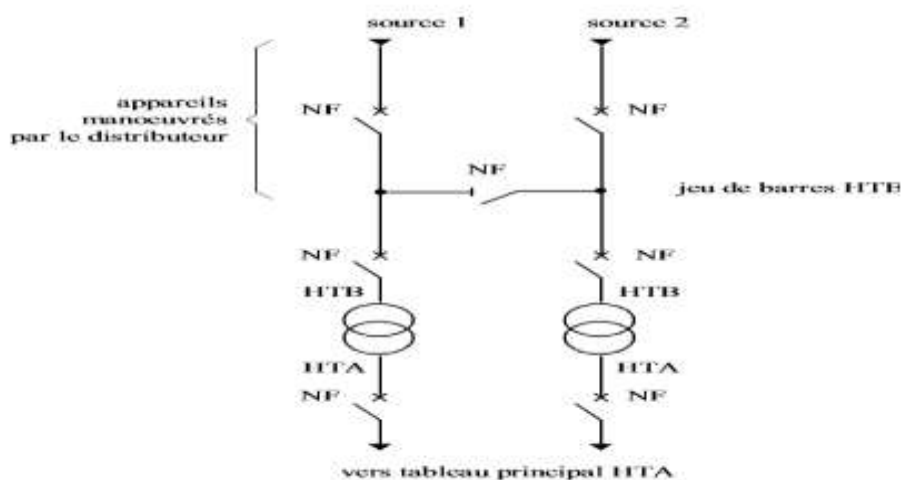


Figure 1-10 : alimentation double antenne d'un poste de livraison HTB

❖ **Fonctionnement :**

- ✓ normal : Les deux disjoncteurs d'arrivée des sources sont fermés, ainsi que le sectionneur de couplage. Les transformateurs sont donc alimentés par les 2 sources simultanément.
- ✓ perturbé : En cas de perte d'une source, l'autre source assure la totalité de l'alimentation.

I.7.1.3 Double antenne - double jeu de barres : (voir fig. 1-14)

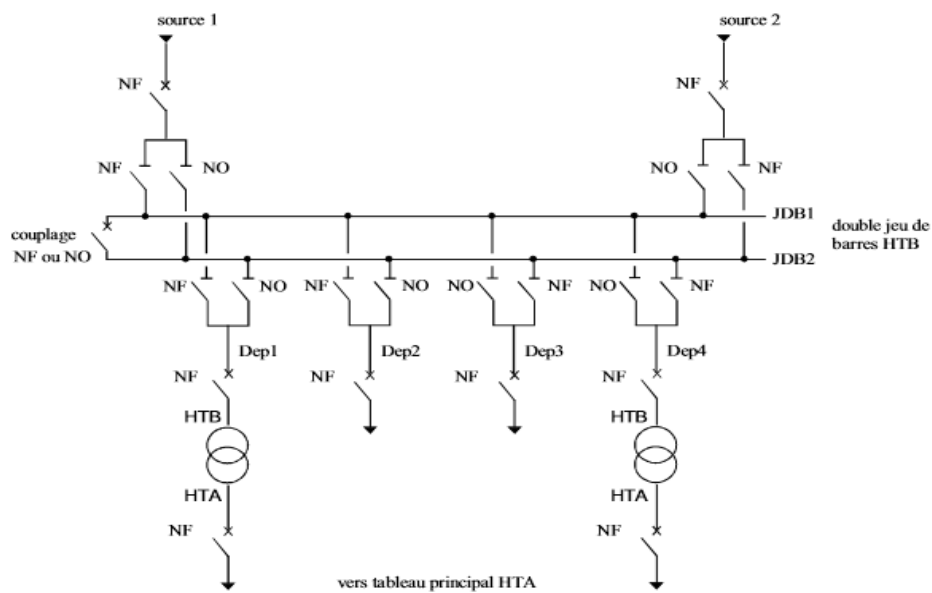


Figure 1-11 : alimentation double antenne - double jeu de barres d'un poste de livraison HTB

❖ **Fonctionnement :**

- ✓ Normal : La source 1 alimente, par exemple, le jeu de barres JDB1 et les départs Dep1 et Dep2.
- ✓ La source 2 alimente, par exemple, le jeu de barres JDB2 et les départs Dep3 et Dep4.

Le disjoncteur de couplage peut être maintenu fermé ou ouvert.

- ✓ Perturbé : En cas de perte d'une source, l'autre source assure la totalité de l'alimentation.

En cas de défaut sur un jeu de barres (ou maintenance de celui-ci), le disjoncteur de couplage est ouvert et l'autre jeu de barres alimente la totalité des départs.

I.7.2 Les postes de livraison HTA.

I.7.2.1 Les postes de livraison HTA à comptage BT

Ce type de postes ne comporte qu'un seul transformateur dont le courant secondaire est inférieur ou égal à 2000 A, soit une puissance inférieure ou égale à 1250 kVA pour une tension composée de 400 V.

I.7.2.1.1 Dérivation simple :

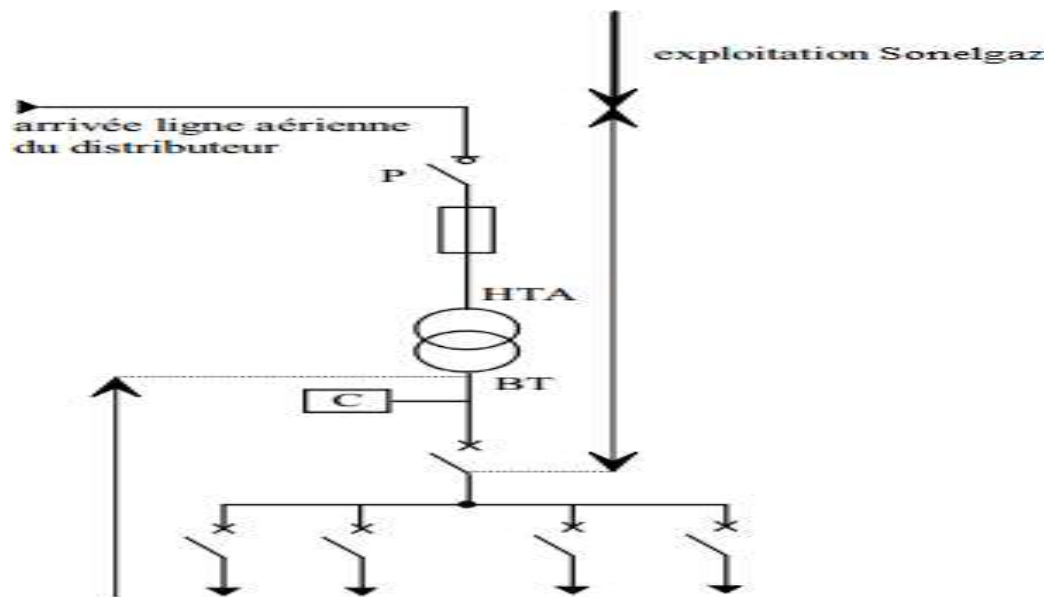


Figure 1-12 : alimentation en simple dérivation d'un poste de livraison HTA à comptage BT

La cellule protection générale P doit être un disjoncteur si le courant nominal est supérieur ou égal à 45 A (voir sone gaz). Ce type de poste est utilisé en général pour la distribution publique HTA en lignes aériennes, il comporte une seule source d'alimentation possible par le distributeur dans la figure 1.15.

I.7.2.1.2 Double dérivation : (voir fig. 1-16)

Si le courant nominal est supérieur ou égal à 45 A, l'armoire de protection universelle P doit obligatoirement être un disjoncteur (voir sone gaz). Lorsque le réseau public moyenne tension comporte deux câbles souterrains distincts connectés en parallèle, le poste peut être alimenté par l'une ou l'autre de ces deux branches. Le passage d'une source d'alimentation à une autre se produit lorsque la tension sur les câbles qui alimentent la sous-station disparaît. Elle peut être effectuée automatiquement ou manuellement. Cette solution est coûteuse pour les distributeurs et est utilisée lorsque les besoins de disponibilité sont élevés (les surcoûts sont généralement à la charge de l'utilisateur).

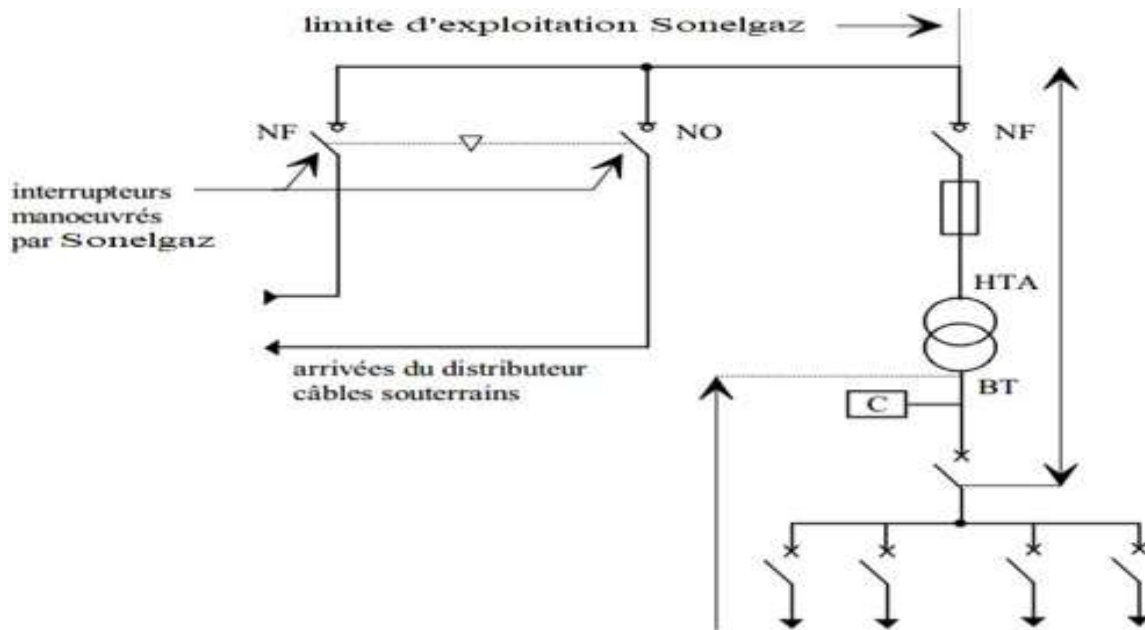


Figure 1-13 : alimentation en double dérivation d'un poste de livraison HTA à comptage BTA

1.7.3 Les postes de livraison HTA à comptage HT

Ils comportent plusieurs transformateurs, ou un seul si le courant secondaire est supérieur à 2000 A (puissance supérieure à 1250 kVA avec une tension composée de 400 V), et peuvent comporter des départs moyenne tension.

La partie de l'installation allant du point de raccordement du réseau moyenne tension au sectionneur situé en aval du disjoncteur principal est régie par la norme sone gaz ; les jeux de barres, les réseaux moyenne tension et les transformateurs sont régis par la norme sone gaz

Comme pour les postes de comptage et de livraison basse tension, le répartiteur peut être alimenté par simple by-pass, coupure artérielle ou double by-pass.

1.7.3.1 Exemple de schéma : (voir fig. 1-18)

Poste de livraison avec une alimentation en coupure d'artère comportant 2 transformateurs et 2 départs HTA.

Le comptage HT est réalisé grâce au TT (transformateur de tension) et au TC (transformateur de courant). Le transformateur de courant possède généralement un deuxième secondaire utilisé pour la protection contre les surintensités.

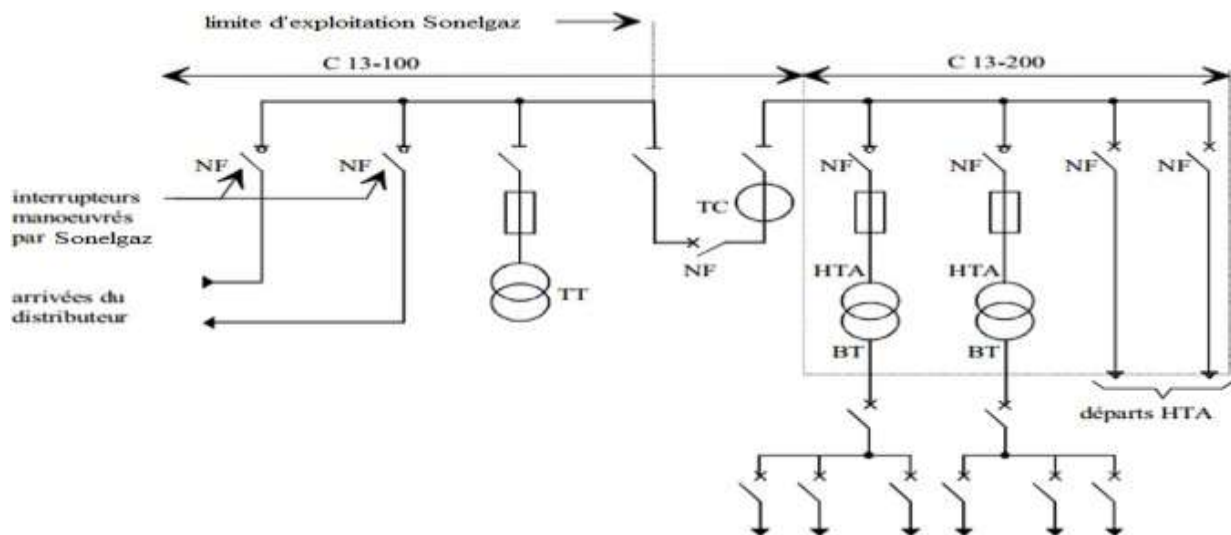


Figure 1-14 : poste de livraison HTA à comptage HT

1.7.4 Les réseaux HTA à l'intérieur du site

Un réseau moyenne tension est constitué de tableaux et des liaisons qui alimentent ces tableaux. Nous verrons d'abord les différents modes d'alimentation des tableaux puis les différentes structures de réseaux permettant à ces tableaux de fournir de l'énergie.

REMARQUE : Les sectionneurs et les systèmes débroschables utilisés pour entretenir l'installation ne sont pas illustrés.

1.7.4.1 Modes d'alimentation des tableaux HTA

Nous allons identifier les principales solutions d'alimentation d'un tableau HTA, indépendamment de son emplacement dans le réseau.

Le nombre de sources et la complexité du tableau diffèrent suivant le niveau de sûreté de fonctionnement désiré.

Les schémas sont classés dans un ordre tel que la sûreté de fonctionnement s'améliore tandis que le coût d'installation augmente.

1.7.4.1.1 Un jeu de barres, une source d'alimentation (voir fig. 1-18)

En cas de perte de la source d'alimentation, le jeu de barres est hors service jusqu'à l'opération de réparation.

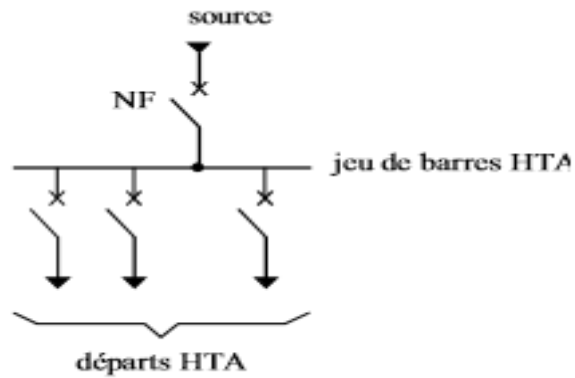


Figure 1-15 : 1 jeu de barres, 1 source d'alimentation

Fonctionnement :

1.7.4.1.2 Un jeu de barres sans couplage, 2 sources d'alimentation : (voir fig. 1-19)

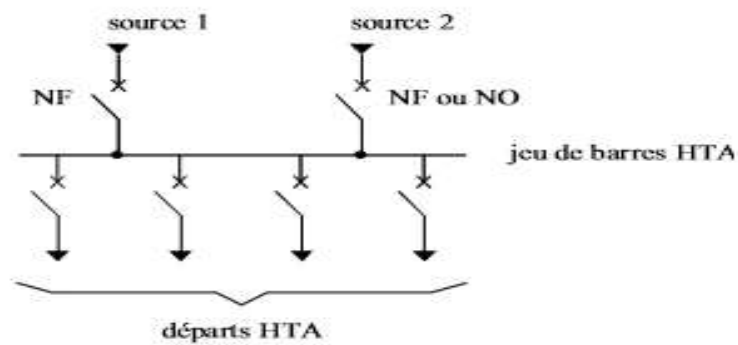


Figure 1-16 : 1 jeu de barres sans couplage, 2 sources d'alimentation

Fonctionnement :

Les deux sources peuvent fonctionner en parallèle ou l'une en secours de l'autre. En cas de défaut sur le jeu de barres (ou maintenance de celui-ci), les départs ne sont plus alimentés.

1.7.4.1.3 Deux demi jeux de barres avec couplage, 2 sources d'alimentations (voir fig. 1-20)

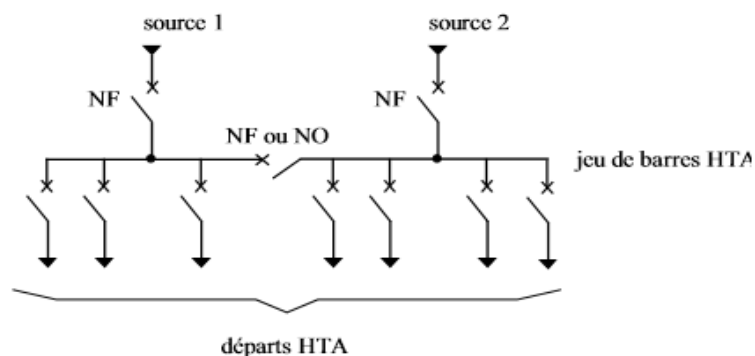


Figure 1-17 : 2 demi-jeux de barres avec couplage, 2 sources d'alimentation

Fonctionnement : Le tie breaker peut rester fermé ou ouvert. S'il est activé, chaque source fournit un demi-bus. En cas de coupure de courant, le disjoncteur de couplage est fermé et l'autre alimentation alimente les 2 demi-jeux de barres. Si la moitié du jeu de barres tombe en panne (ou la maintient), seule une partie du départ n'est plus alimentée.

1.7.4.1.4 Un jeu de barres sans couplage, 3 sources d'alimentation (voir fig. 1-21)

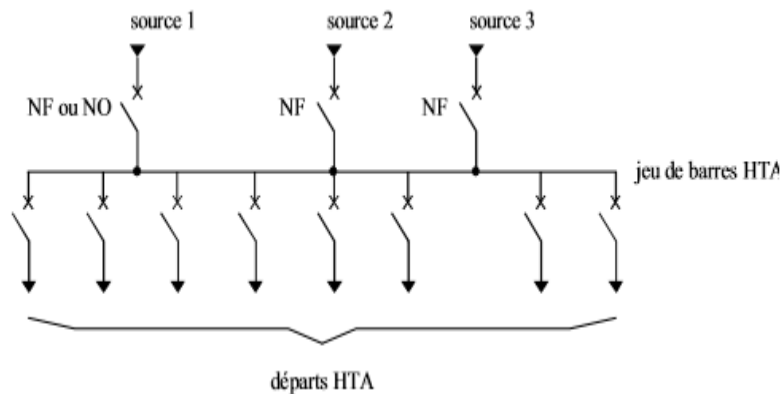


Figure 1-18 : 1 jeu de barres sans couplage, 3 sources d'alimentation

❖ Fonctionnement : les 3 sources peuvent fonctionner en parallèle ou l'une en secours des deux autres. En cas de défaut sur le jeu de barres (ou maintenance de celui-ci), les départs ne sont plus alimentés.

1.7.4.1.5 Trois sections de barres avec couplages, 3 sources d'alimentation (voir fig. 1-22)

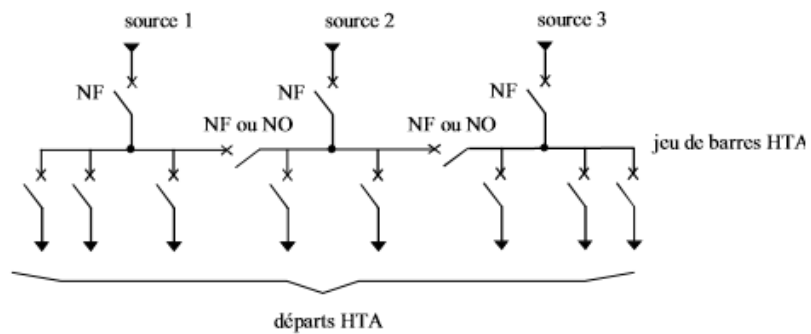


Figure 1-19: 3 sections de barres avec couplages, 3 sources d'alimentation

❖ Fonctionnement :

Les 2 disjoncteurs de couplage peuvent être maintenus ouverts ou fermés. S'ils sont ouverts, chaque source alimente sa section de barres. En cas de perte d'une source, le disjoncteur de couplage associé est fermé, une source alimente 2 sections de barres et

l'autre 1 section de barres. En cas de défaut sur une section de barres (ou maintenance de celle-ci), une partie seulement des départs n'est plus alimentée.

1.7.4.1.6 Sources et départs en "duplex" (voir fig. 1-23)

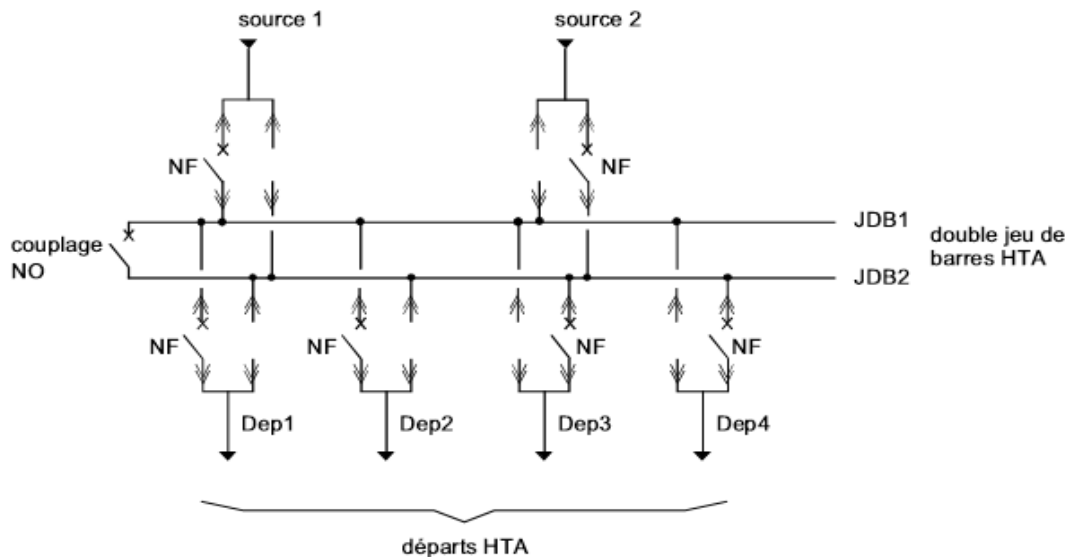


Figure 1-20 : sources et départs en "duplex"

❖ Fonctionnement :

Le disjoncteur de couplage reste ouvert pendant le fonctionnement normal. Chaque alimentation peut alimenter l'un ou l'autre jeu de barres par l'intermédiaire de ses deux armoires disjoncteurs débouchables. Pour des raisons économiques, il n'y a qu'un seul disjoncteur pour 2 armoires débouchables connectées bout à bout. Il est donc facile de déplacer le disjoncteur d'une batterie à l'autre. Par conséquent, si la Source 1 alimente le jeu de barres JDB2, le disjoncteur sera déplacé vers une autre armoire associée à la Source 1.

Le même principe s'applique au départ. Ainsi, chaque départ est associé à deux compartiments débouchables et un disjoncteur. Selon l'emplacement du disjoncteur, chaque départ peut être alimenté par l'un ou l'autre des bus. Par exemple, la source 1 alimente le bus JDB1 et les départs Dep1 et Dep2. La source 2 alimente le bus JDB2 et les départs Dep3 et Dep4.

En cas de perte d'une source d'alimentation, le disjoncteur de couplage est fermé et l'autre source d'alimentation fournit toute l'alimentation.

En cas de défaillance d'un jeu de barres (ou d'une maintenance sur celui-ci), les disjoncteurs de couplage sont ouverts et chaque disjoncteur est placé sur un jeu de barres en marche pour alimenter tous les départs.

L'inconvénient du système "duplex" est qu'il ne permet pas l'alignement automatique. En cas de panne, chaque transfert prend plusieurs minutes et nécessite la mise hors tension du bus.

1.7.4.1.7 Deux jeux de barres, 2 attaches par départ, 2 sources d'alimentation (voir fig. 1-24)

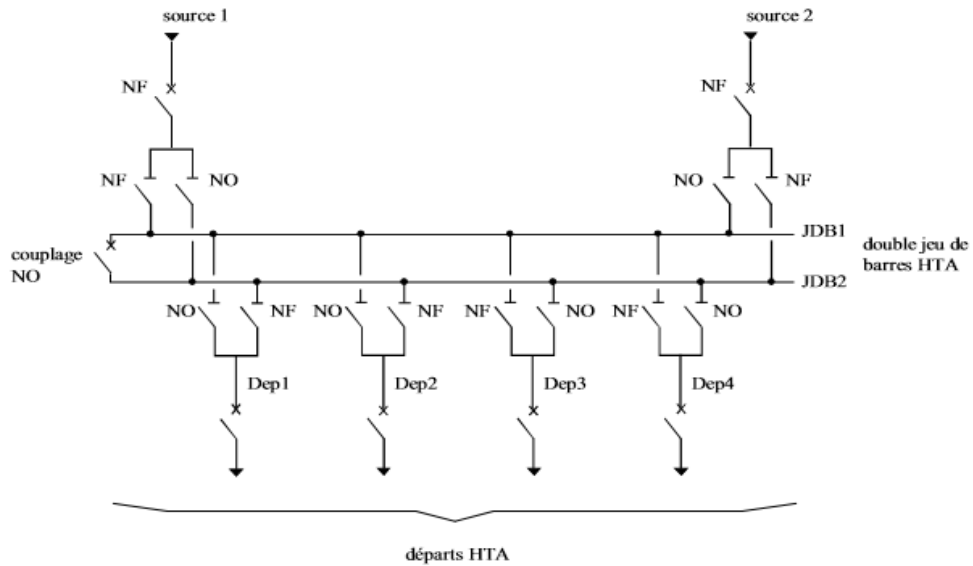


Figure 1-21 : 2 jeux de barres, 2 attaches par départ, 2 sources d'alimentation

❖ **Fonctionnement :**

Le disjoncteur de couplage est maintenu ouvert en fonctionnement normal. Chaque départ peut être alimenté par l'un ou l'autre des jeux de barres suivant l'état des sectionneurs qui lui sont associés, un seul sectionneur par départ doit être fermé.

Par exemple, la source 1 alimente le jeu de barres JDB1 et les départs Dep1 et Dep2. La source 2 alimente le jeu de barres JDB2 et les départs Dep3 et Dep4. En cas de perte d'une source, le disjoncteur de couplage est fermé, l'autre source assure la totalité de l'alimentation.

En cas de défaut sur un jeu de barres (ou maintenance de celui-ci), le disjoncteur de couplage est ouvert et l'autre jeu de barres alimente la totalité des départs

1.7.4.1.8 Deux doubles jeux de barres couplés entre eux (voir fig. 1-25)

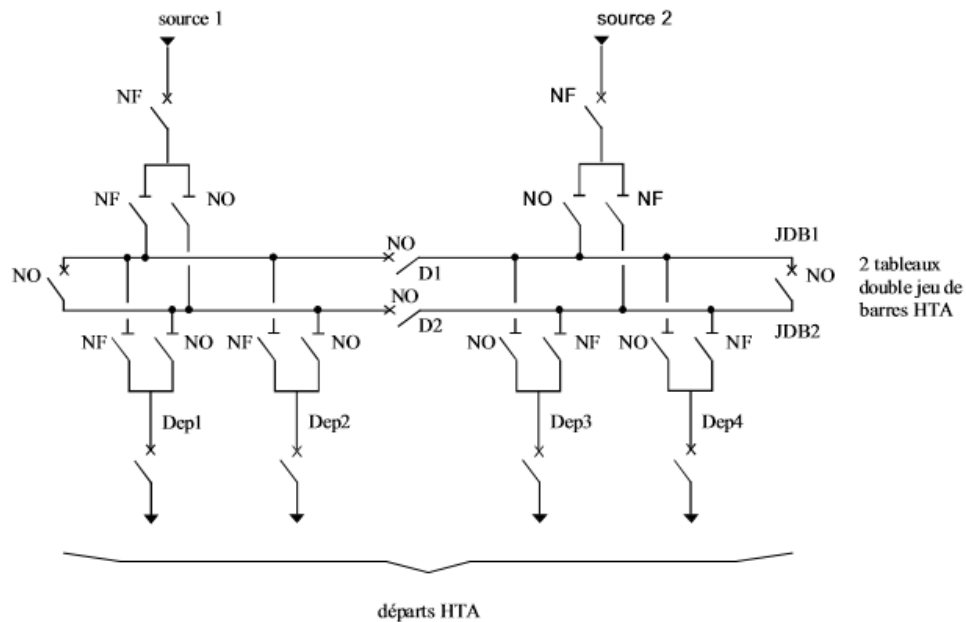


Figure 1-22 : 2 doubles jeux de barres couplés entre eux

❖ Fonctionnement :

Il est presque identique au schéma précédent (2 jeux de barres, 2 attaches par départ, 2 sources d'alimentation). La décomposition du double jeu de barres en 2 tableaux avec couplage (par D1 et D2) permet une plus grande souplesse d'exploitation. Chaque jeu de barres alimente un nombre de départs moins important en fonctionnement normal.

1.8 Structure des réseaux HTA

Nous allons identifier les principales structures de réseaux HTA permettant d'alimenter les tableaux secondaires et les transformateurs HTA / BT. La complexité de la structure diffère suivant le niveau de sûreté de fonctionnement désiré. Les schémas électriques des réseaux HTA les plus souvent rencontrés sont les suivants :

1.8.1 Radial en simple antenne :(voir fig. 1-26)

- les tableaux 1 et 2 et les transformateurs sont alimentés par une seule source, il n'y a pas de solution de dépannage
- cette structure est préconisée lorsque les exigences de disponibilité sont faibles, elle est souvent retenue pour les réseaux de cimenterie.

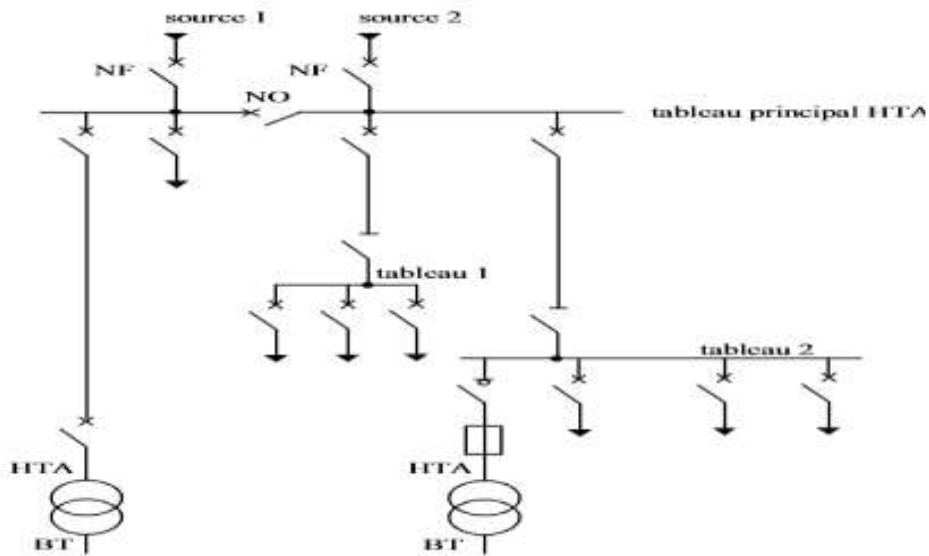


Figure 1-23 : réseau HTA radial en simple antenne

I.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude générale du réseau électrique, en étudiant les différents composants nécessaires à la production, au transport, à la distribution et à la fourniture d'énergie électrique. L'objectif principal du réseau est de pouvoir répondre aux besoins des consommateurs, car il existe une règle en matière d'énergie électrique qui dit :

$$\text{Production} = \text{consommation} + \text{perte}$$



CHAPITRE II

II.1 Introduction :

L'utilisation de sources d'énergies renouvelables induit le concept de stockage d'électricité en raison de la disponibilité intermittente de telles ressources (éclairage solaire variable, direction tournante du vent...). L'utilisation du moyen de stockage d'électricité est très diversifiée ; elle dépend de la nature des besoins et du type d'applications. En particulier, les sites géographiquement isolés et non raccordés au réseau intégrant une source d'énergie renouvelable telle que l'énergie solaire nécessitent un système de stockage décentralisé. Ainsi le problème des fluctuations, commun à la plupart des sources d'énergie renouvelable, peut être pallié. Dans cette partie introductive, le stockage de l'énergie électrique est présenté dans le cas général avant de se focaliser sur le stockage à petite échelle adapté à une utilisation sur site isolé. L'intérêt du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs est ensuite mis en avant afin de poser la problématique du mémoire.

II.2 Modèles de dispositifs de stockage :

Le stockage de l'énergie électrique est une opération qui consiste à placer une certaine quantité d'énergie traitée à un endroit donné lorsque la production est interrompue ou insuffisante. Il existe de nombreuses technologies de stockage d'énergie. Selon la nature du stockage, une distinction peut être faite entre le stockage direct et le stockage indirect. Comme le montre la figure 2.1.

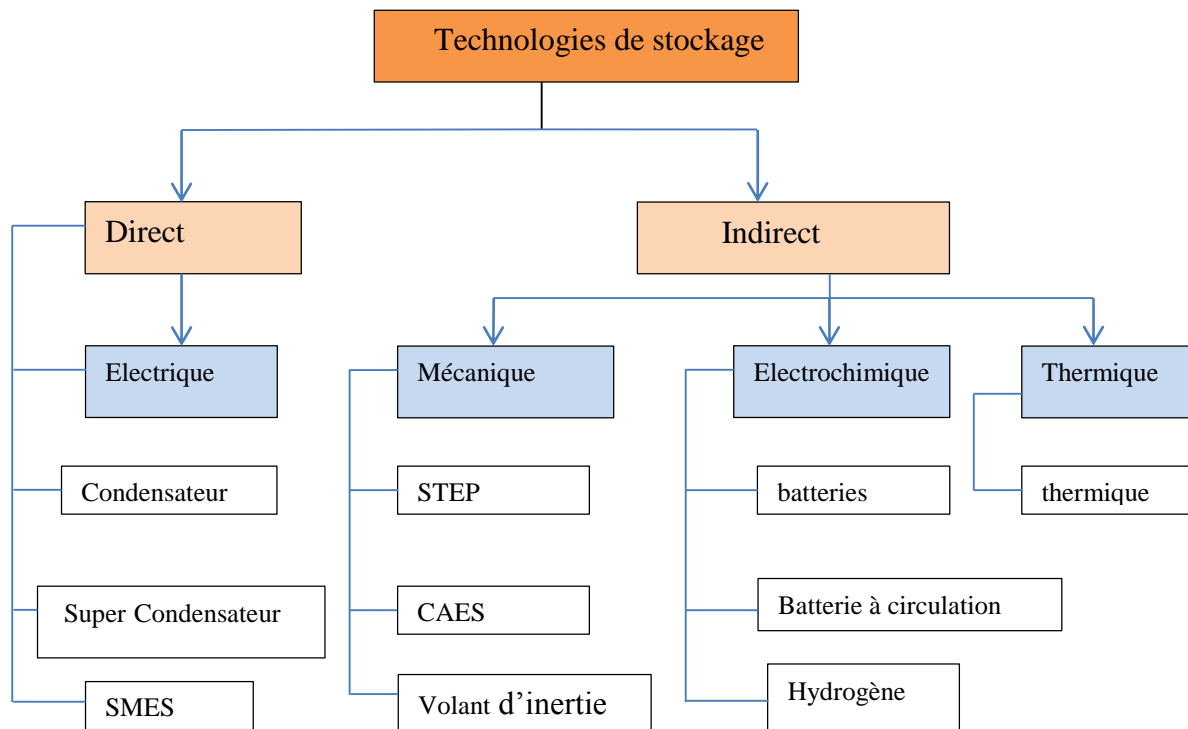


Figure 2-1 : Classification des dispositifs de stockage.

II.2.1 Stockage direct

Ce sont des technologies qui stockent l'énergie directement sous forme d'énergie électrique. Ce sont : les condensateurs, les super condensateurs et les inductances supraconductrices. Ces technologies de stockage sont considérées comme des alimentations car elles ont une puissance spécifique élevée et une faible densité.

II.2.1.1 Condensateur

Un condensateur plan est un composant électrique constitué de deux armatures conductrices parallèles séparées par un milieu diélectrique.

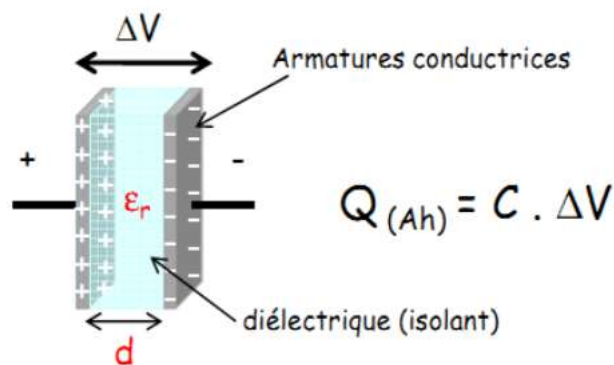


Figure 2-2 : Structure d'un condensateur plan.

L'expression de la capacité C d'un condensateur dont les armatures en regard sont planes est classiquement donnée par :

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{D} \quad (2.1)$$

Où ϵ_0 est la permittivité du vide, ϵ_r la permittivité relative du diélectrique, S la surface de chaque électrode et (D) l'épaisseur du diélectrique.

L'énergie emmagasinée, proportionnelle au carré de la différence de potentiel V entre les électrodes, s'exprime par :

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.2)$$

Les relations (2.1) et (2.2) montrent qu'il existe deux approches permettant d'accroître la capacité et donc la quantité d'énergie stockée. La première consiste à utiliser un matériau diélectrique possédant une permittivité relative élevée et une tension de service importante. La seconde, à l'origine du développement des super condensateurs, qui seront détaillés dans le prochain paragraphe, est basée sur l'accroissement du rapport S/d par le recours à des diélectriques très minces et à des armatures gravées présentant d'importantes surfaces [31].

II.2.1.2 Supercondensateur

La structure élémentaire d'un supercondensateur est constituée par des collecteurs de courant en aluminium, des électrodes généralement en charbon actif imprégné dans un électrolyte organique ou aqueux. Un séparateur est intercalé entre les deux électrodes pour les isoler.

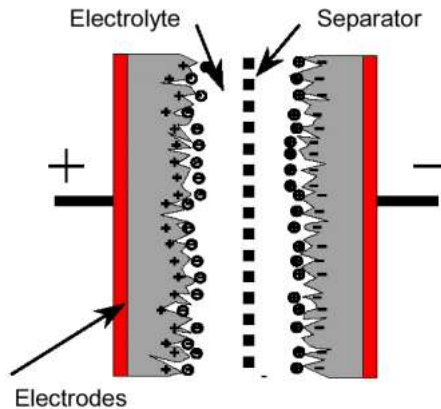


Figure 2-3 : Structure d'un supercondensateur

Le principe de fonctionnement d'un supercondensateur est basé sur le stockage de l'énergie par distribution des ions provenant de l'électrolyte au voisinage de la surface des deux électrodes. En effet, lorsque l'on applique une tension aux bornes d'un supercondensateur, on crée une zone de charge d'espace aux deux interfaces électrode-électrolyte. C'est ce que l'on appelle la double couche électrique. Le stockage de l'énergie est donc électrostatique et non pas faradique comme dans le cas des batteries, puisqu'il n'y a pas de réaction électrochimique [32]

- Propriétés et applications : les supercondensateurs ont une durée de vie de l'ordre de 8 à 10 ans, un rendement de l'ordre de 95%, une autodécharge de l'ordre de 5% par jour et une capacité pouvant atteindre 5000 F [13, 22]. Ils sont très souvent utilisés dans le domaine du transport où sa technologie satisfait généralement aux fonctions de démarrage. Aussi, ils sont utilisés comme alimentation de secours de mémoires en informatique et de récupération d'énergie de freinage (ascenseurs, tramways, métros...).

Contrairement à des enroulements conducteurs classiques, la bobine supraconductrice présente une résistance nulle au-dessous de la température critique du matériau. Si elle est refermée sur elle-même, le courant qui la parcourt se maintient. L'énergie de la bobine n'est donc pas dissipée en chaleur par effet Joule et reste stockée sous forme de champ magnétique. Le dispositif de stockage d'énergie magnétique met en jeu une bobine supraconductrice, source de courant continu, connectée au réseau 50 Hz via un convertisseur à électronique de puissance. Les principaux éléments de ce dispositif sont représentés sur la figure (2.4).

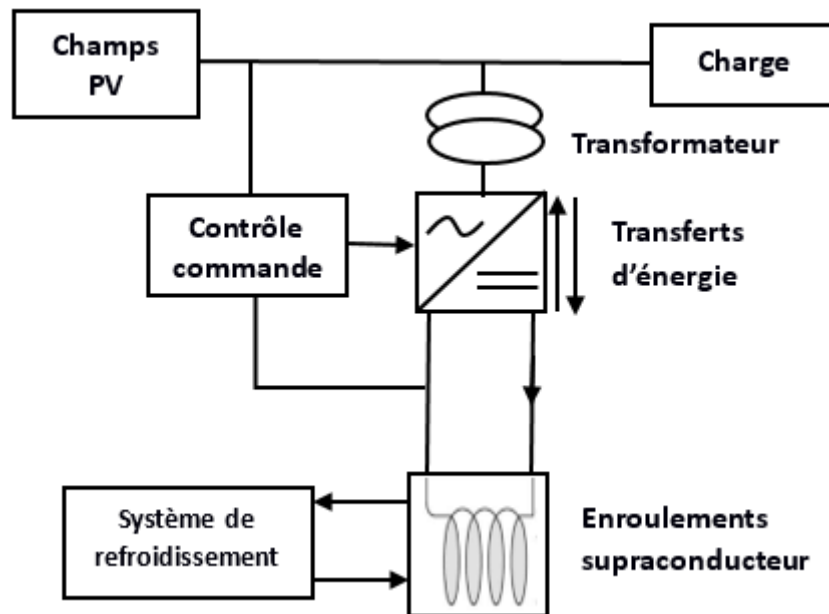


Figure 2-4 : Principaux éléments d'un dispositif de stockage d'énergie magnétique par bobine supraconductrice

Les atouts de cette technologie résident dans son excellente cyclabilité, sa durée de vie importante (20 à 30 ans), de très bons rendements (95%) et des densités de puissance élevées (bien supérieures à 1 kW/L). De la confrontation des performances de cette filière et des applications du stockage d'énergie en réseau, il ressort que la technologie est particulièrement adaptée aux cas réclamant une cyclabilité et une durée de vie élevées, tout particulièrement pour des appels de puissance de type impulsionnel supérieurs à 1 MVA. Sont donc concernées la stabilité des grands réseaux et l'amélioration de la qualité de la tension. De plus, la faisabilité de tels dispositifs était loin d'être assurée, du fait de la taille des anneaux supraconducteurs, pouvant atteindre des diamètres de plus de un kilomètre.

Enfin, des unités de plus petite taille, stockant quelques mégajoules, délivrant des puissances impulsionnelles de l'ordre de 1 MVA, sont commercialisées de façon encore restreinte. Elles sont dédiées à l'amélioration de la qualité de la tension, créneau le plus porteur pour cette technologie. Elles mettent aujourd'hui en œuvre des supraconducteurs à basse température critique. Elles sont disponibles dans des semi-remorques ou des shelters, transportables sur différents sites au gré des besoins [33].

II.2.2 Stockage indirect

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

II.2.2.1 Accumulateurs électrochimiques

Dans un accumulateur, deux électrodes, positive et négative, sont au contact de l'électrolyte (isolant électronique) qui les sépare électriquement et constituent la cellule électrochimique. A chaque interface entre électrodes et électrolyte interviennent les transferts de charges responsables des oxydations et réductions. La réaction d'oxydoréduction globale mise en jeu est renversible, ce qui permet de charger ou décharger l'accumulateur, respectivement récepteur ou générateur. [35]

Principe : Une cellule d'accumulateur électrochimique est composée de deux électrodes (conducteurs électroniques) et d'un électrolyte (conducteur ionique et isolant électronique). Les réactions chimiques sont spontanées dans un accumulateur et mettent en jeu deux couples d'oxydoréduction de potentiels différents. Durant la décharge de l'accumulateur, l'électrode positive (cathode) est le siège d'une réaction de réduction du couple de plus haut potentiel et l'électrode négative (anode) est le siège d'une réaction d'oxydation du couple de plus faible potentiel. Durant la charge, le phénomène s'inverse : l'électrode positive (anode) s'oxyde et l'électrode négative (cathode) se réduit. Par convention, on note généralement la réaction chimique d'oxydoréduction dans le sens de la décharge (\rightarrow), la flèche inverse étant le sens de la charge (\leftarrow) [34].

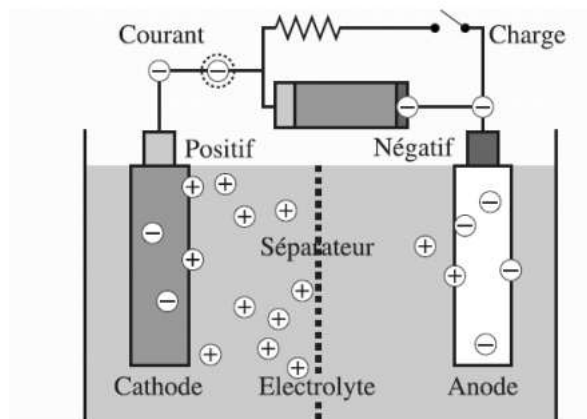


Figure 2-5 : schéma de principe de fonctionnement d'un accumulateur électrochimique

Propriétés et applications : les accumulateurs électrochimiques ont une densité énergétique pouvant atteindre 250 kWh/kg avec une durée de vie relativement faible de l'ordre de 200 à 10000 cycles [42,33]. Les accumulateurs électrochimiques notamment ceux au lithium-ion occupent la quasi-totalité du marché de la téléphonie mobile. Ils sont également utilisés dans les applications de forte puissance et dans l'aérospatiale tel que les satellites Galiléo . Les accumulateurs Ni-Cd sont aussi utilisés dans les applications demandant une forte puissance et

peuvent fonctionner sous une température relativement élevée. Pour ce qui est de la batterie au plomb, son marché est un enjeu industriel important. Il concerne les batteries de démarrage ainsi que la plupart des batteries stationnaires. En fonction de la nature des électrodes et de l'électrolyte, on rencontre différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques dont les plus utilisées sont : lithium-ion, plomb-acide et nickel-cadmium [36].

■ Accumulateurs au lithium-ion (Li-ion)

Pour les accumulateurs au lithium, on distingue quatre technologies selon la constitution de l'électrode négative (lithium métallique ou matériau à insertion de lithium) et la composition de l'électrolyte (liquide ou polymère) [37] :

Technologie	Li-métal	Li-ion	Li-métal polymère (LMP)	Li-ion polymère ou « plastique »
Electrode négative	Lithium métallique	Matériau à insertion de lithium	Lithium métallique	Matériau à insertion de lithium
Electrolyte	Liquide	Liquide	Polymère	Polymère

Tableau 01 : Technologies d'accumulateurs au lithium.

La technologie Lithium-métallique ou Lithium-métal a été commercialisée dans les années 1980.

➤ Accumulateurs au plomb-acide (Pb-ac)

Les batteries PbA, dont il existe plusieurs technologies en fonction de la géométrie des électrodes, de la manière dont le dégagement gazeux d'hydrogène est géré ou encore de la nature de l'électrolyte, font parties des plus anciennes familles de batteries. Elles présentent des intérêts liés à leurs maturités qui sont donnés par exemple dans le travail de synthèse de May et al. Faisant la revue des différentes technologies à l'heure actuelle de batterie PbA et des avancés techniques pour améliorer leurs performances. L'International Battery Council, association professionnelle américaine de fabricants, de recycleurs, de distributeurs et de détaillants de batteries automobiles et autres batteries PbA répertorie les principaux avantages des batteries PbA, une grande sécurité de fonctionnement,—une facilité d'implémentation, de par leurs sécurités, elles ne demandent pas de préconisation particulière et elles sont faciles à intégrer dans une installation,— un faible coût,—un bon taux de recyclage minimisant leur impact écologique en termes d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) ou Life Cycle Analysis (LCA). [38]

Chapitre II : les systèmes de stockage d'énergie électrique

➤ Accumulateurs au nickel cadmium (Ni-Cd)

L'accumulateur Nickel-Cadmium (Ni-Cd) a été découvert par Waldemar Jungner en 1900.

L'accumulateur est constitué de façon à éviter le dégagement d'hydrogène à l'électrode positive et à favoriser la création d'oxygène, son transfert à travers le séparateur vers l'électrode négative et sa réduction en eau (recombinaison de l'oxygène). Pour cela, on limite la capacité de l'électrode positive à la conception (excédent de capacité à l'électrode négative) [39].

Les avantages de l'accumulateur Ni-Cd sont :

- une grande capacité
- de bonnes performances à faible température
- un bon niveau de fiabilité
- une durée de vie élevée et un faible entretien
- la possibilité de charge complète rapide, de l'ordre de 15min

Ses inconvénients sont les suivants :

- coût : environ 1,5 fois plus chère que batterie Pb
- toxicité due au cadmium (recyclage), métal lourd concerné par la directive européenne 2006/66/CE, relative aux piles et accumulateurs et à leurs déchets, interdisant la mise sur le marché de piles ou accumulateurs contenant des substances dangereuses (plomb, cadmium)
- Effet mémoire

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

Tableau 2 : Comparaison de quelques technologies d'accumulateurs électrochimiques.

II.2.2.2 Stockage sous forme d'hydrogène

Le stockage par la filière hydrogène est un moyen indirect de stocker de l'énergie, au même titre que les moyens de stockage électrochimique ou électromécanique, car il nécessite une conversion de l'énergie. Cependant, la réversibilité pour passer de l'énergie électrique au dihydrogène n'est pas immédiate et les moyens de conversion à mettre en œuvre sont complexes. Le stockage par la filière hydrogène nécessite une transformation de l'énergie électrique en dihydrogène H₂ puis une deuxième transformation du dihydrogène en électricité. [34]

Ce système de stockage comprend donc trois composants clés que sont [40]:

- l'électrolyseur (permet la transformation de l'énergie électrique en dihydrogène)
- le moyen de stockage de l'hydrogène
- la pile à combustible (permet la génération d'électricité à partir de l'hydrogène et de l'oxygène de l'air)

Le principe de restitution de l'énergie à partir de l'hydrogène stocké est résumé sur la figure (2.6) :

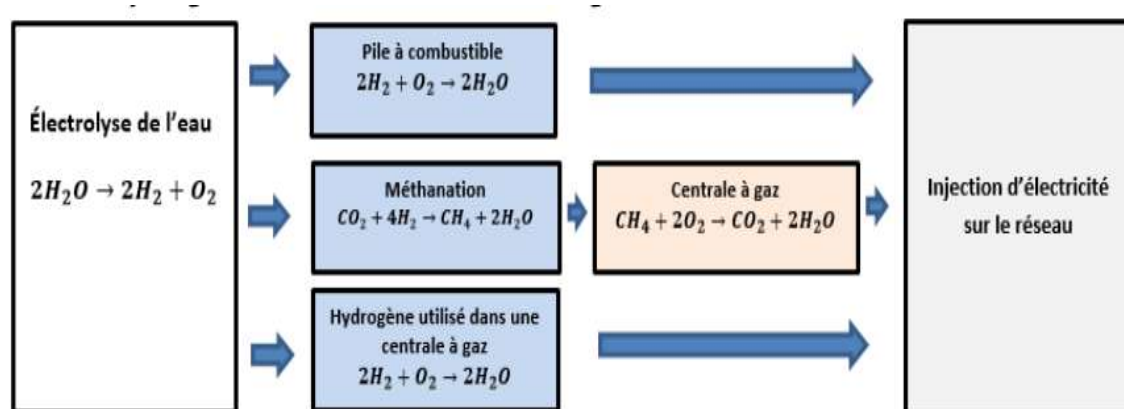


Figure 2-6 : Différentes possibilités de restitution de l'électricité à partir de l'hydrogène stocké.

- **LE STOCKAGE DE L'HYDROGENE :**

L'hydrogène peut être stocké puis distribué sous plusieurs formes [41] :

- Sous forme gazeuse, comprimée sous haute pression
- Sous forme solide : hydrure de métaux
- Sous forme liquide

Le stockage sous pression - La première étape consiste à comprimer le gaz, souvent à travers un système multiétage. Le stockage sous forme gazeuse nécessite alors des réservoirs capables

de résister à une forte pression (entre 350 et 700 bars) et à l'élévation de température due à la compression rapide du gaz. Des systèmes de refroidissement sont généralement employés. On estime que la compression du gaz consomme environ 10% de l'énergie primaire.

Le stockage sous forme liquide - L'hydrogène est sous sa forme liquide lorsque sa température est de -253°C (20K). Le stockage sous forme liquide nécessite donc un équipement cryogénique, donc de l'énergie pour maintenir l'hydrogène à cette température (de l'ordre de 30% de l'énergie stockée). Pour ce moyen de stockage, les aspects de sécurité doivent être pris en compte, ainsi que les pertes lors du stockage (autodécharge).

Stocké sous forme solide - il s'agit d'une forme de stockage d'hydrogène qui le rend approprié pour Dans le réseau cristallin des métaux, l'hydrogène a la propriété de former des liaisons covalentes ou ion. Les métaux ou alliages de ce type peuvent ainsi stocker de l'hydrogène entre leurs atomes. Traiter l'adsorption est exothermique tandis que la désorption est endothermique et nécessite un apport de chaleur, Cela dépend de la vitesse de décharge.

II.2.2.3 Stockage hydraulique

Également appelé stockage par pompage-turbinage ou Station de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP), le principe du stockage hydraulique gravitaire est d'accumuler de l'énergie sous forme d'énergie potentielle hydraulique entre un bassin en hauteur et un réservoir d'eau inférieur. L'eau du réservoir inférieur peut être ainsi pompée vers le bassin supérieur en période d'excès d'énergie et être ensuite turbinée vers le réservoir inférieur en période de demande d'énergie. Un flux à contre-courant de la demande générale révèle le fonctionnement de ces stations

A l'avantage de pouvoir délivrer cette électricité « stockée » au moment voulu (notamment en fonction des besoins et des opportunités économiques) se cumule celui d'un temps de réaction très rapide du système de stockage hydraulique gravitaire : les turbines peuvent entrer en production en quelques minutes seulement pour stabiliser la fréquence et la tension d'un réseau. [42]

Cette technique a une densité énergétique plutôt faible (1kWh pour 1m³ avec 360 m de chute) mais possède d'autres avantages :

- La possibilité de réutiliser les barrages existants ;
- Les quantités d'énergie stockables sont énormes par rapport à toutes autres technologies de stockage ;
- La puissance des turbines et maintenant des pompes également, peut varier avec une grande facilité et rapidité ;

- La technologie est éprouvée (la première réalisation date de 1933) ;
- La production d'électricité est non polluante.

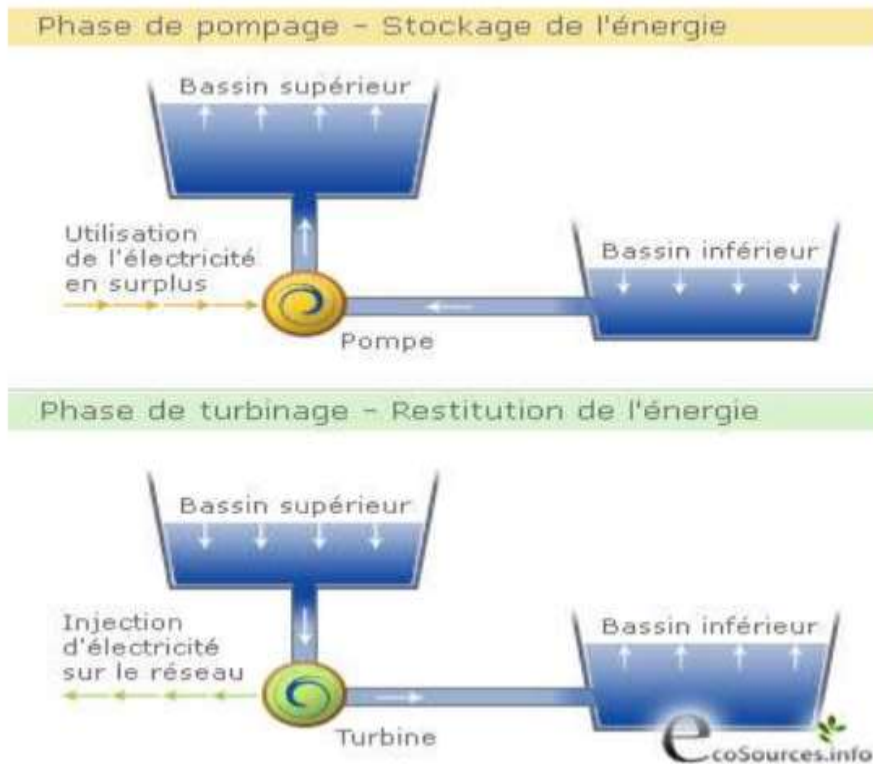


Figure 2-7 : Fonctionnement du stockage hydraulique gravitaire

Les inconvénients environnementaux de ce type de stockage sont principalement les impacts visuel et auditif engendrés par l'installation des réservoirs et de la station de pompage turbinage. Les impacts sur la faune et la flore sont faibles, si ce n'est la réduction de l'habitat de certain(e)s animaux/plantes à cause de l'emprise au sol des réservoirs et station (au maximum 1 hectare). [42]

II.2.2.4 Stockage à air comprimé (CAES)

Dans cette technologie de stockage, l'air est comprimé et stocké dans des réservoirs ou dans des cavités souterraines.

L'électricité disponible durant les heures creuses sert à comprimer de l'air avec un turbocompresseur voire la figure suivante. L'air comprimé est stocké dans des cavernes situées à grande profondeur, des mines de sel par exemple. Pour récupérer l'électricité, l'air comprimé est dirigé vers une turbine à gaz. La première unité commerciale de 290 MW à Hundorf en Allemagne a été mise en route en 1978. En 1991 en Alabama a été mise en fonctionnement une installation de 110 MW. Une installation de 2700 MW est prévue à Norton en Ohio en 2012 [31].

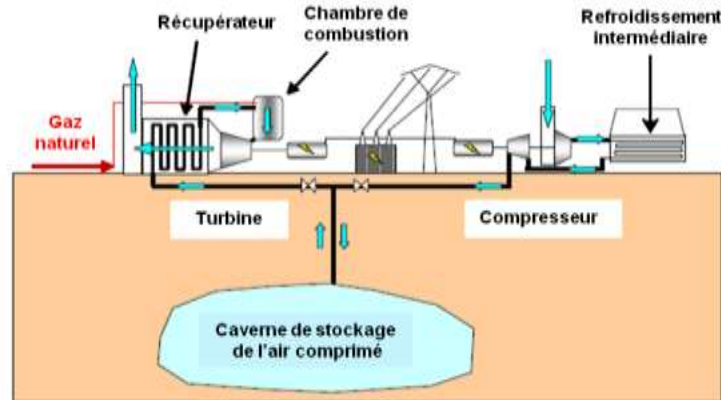


Figure 2-8 : Stockage mécanique par air comprimé [Multon et Ruer][31].

- Propriétés et applications : le stockage à air comprimé permet de stocker de grandes quantités d'énergie de l'ordre de 10 MWh à 10 GWh. Il a une autonomie pouvant atteindre plusieurs jours et un rendement d'environ 50% [43].

Sa technologie est relativement mature avec plusieurs réalisations de grandes puissances à travers le monde : en Allemagne (Huntorf 290 MW), aux États unis (Norton 2700 MW). Toutefois, la construction d'un système CAES nécessite de disposer d'une géologie favorable permettant de disposer de grandes cavités souterraines [44].

II.2.2.5 Volant d'inertie

Les accumulateurs à volants d'inertie (FES : Flywheel Energy Storage) comprennent un volant d'inertie massif ou composite (plus rapide, énergie massique supérieure) associé à un moteur générateur et à des paliers spéciaux (souvent magnétiques), le tout dans une enceinte de confinement sous très basse pression afin de minimiser les pertes d'autodécharge. La figure (2.9) montre un exemple d'architecture ainsi qu'un exemple de réalisation commercialisée. On peut ainsi atteindre des autodécharges de quelques % par heure. Ils offrent une très grande capacité au cyclage (qq 10 000 à qq 100 000 cycles) déterminée par un dimensionnement en fatigue. De façon simpliste, le volant est dimensionné en énergie et le moteur-générateur en puissance, énergie et puissance sont ainsi facilement découplables [33].

Le coût élevé de cette technologie risque d'être un obstacle à son développement. De plus, ses principaux concurrents, à savoir les batteries et les condensateurs, sont actuellement en pleine évolution. Le domaine d'utilisation du volant d'inertie risque donc d'être de plus en plus restreint (hors domaine spatial). Le stockage inertiel reste encore bien adapté lorsque des impulsions de puissance sont demandées pendant de courtes durées, de 1 seconde à 3 minutes [33].

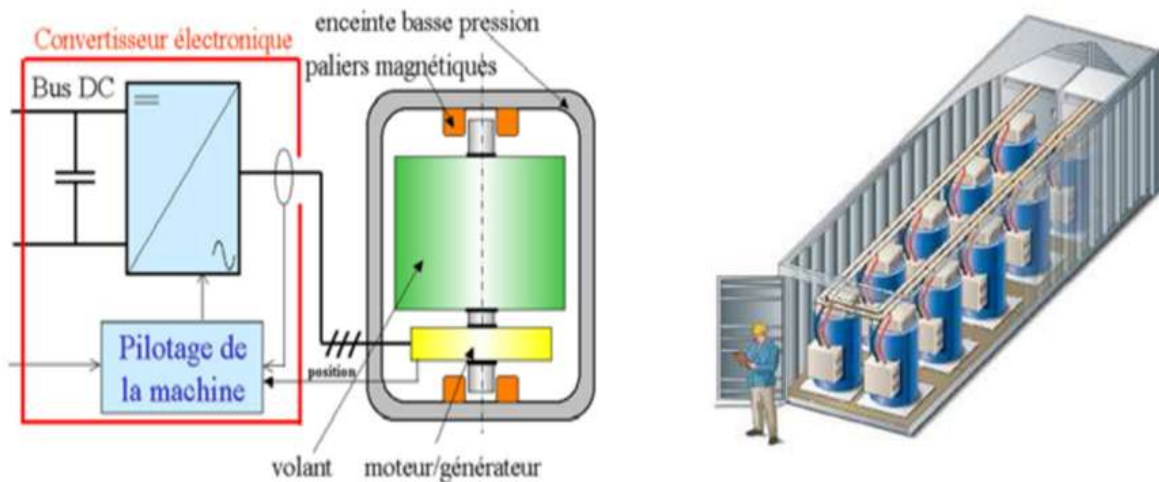


Figure 2-9 : principe d'un accumulateur à volant d'inertie.

II.2.2.6 Stockage sous forme thermique

La chaleur est une forme d'énergie particulière, notamment issue de toutes les dissipations (dégradation des autres formes d'énergie). Stockée dans la matière, elle représente l'agitation au niveau microscopique du matériau et se manifeste par la température de celui-ci au niveau macroscopique. Elle peut être convertie en travail sous certaines conditions thermodynamiques. Particulièrement, elle est d'autant plus valorisable que sa température est élevée car l'entropie associée est alors plus faible, un aspect très important.

La chaleur issue de toute source chaude (panneaux solaires thermiques, combustion, effet Joule ou toute perte de conversion), peut chauffer un matériau moins chaud, liquide ou solide, pour une utilisation ultérieure. La cogénération, sans être un moyen de stockage à proprement parler, permet de valoriser la chaleur produite dans un système de conversion [35].

Le stockage de chaleur peut se faire de deux manières différentes :

- **Stockage sous forme de chaleur sensible :**

C'est le procédé le plus simple : on chauffe un corps (sodium, sel, eau sous pression, etc.) qui ne subit pas de changement d'état pendant la phase d'accumulation ; la chaleur est ensuite récupérée pour produire de la vapeur d'eau qui entraîne un groupe turboalternateur.

L'utilisation de l'eau comme fluide de stockage est la seule envisagée pour les stockages de grande capacité énergétique, mais la production d'électricité implique des températures élevées, supérieures à 200 C, de sorte qu'il est impossible de stocker cette eau dans des nappes captives car le terrain subirait des modifications irréversibles. Il faut donc utiliser des cavités étanches de grand volume, creusées dans la roche. Pendant les heures

creuses, l'eau chaude à stocker peut provenir d'une centrale thermique, par exemple par condensation d'une partie de la vapeur à haute pression sortant de la chaudière (voir figure) ou extraite, à un niveau de pression et de température inférieur, de la turbine. La production supplémentaire d'électricité pendant les heures de pointe peut se faire en assurant, par le déstockage, le réchauffage de l'eau d'alimentation et en réduisant simultanément les soutirages de la turbine. La surpuissance alors obtenue est de 5 % grâce à une augmentation du débit de vapeur traversant la turbine [33].

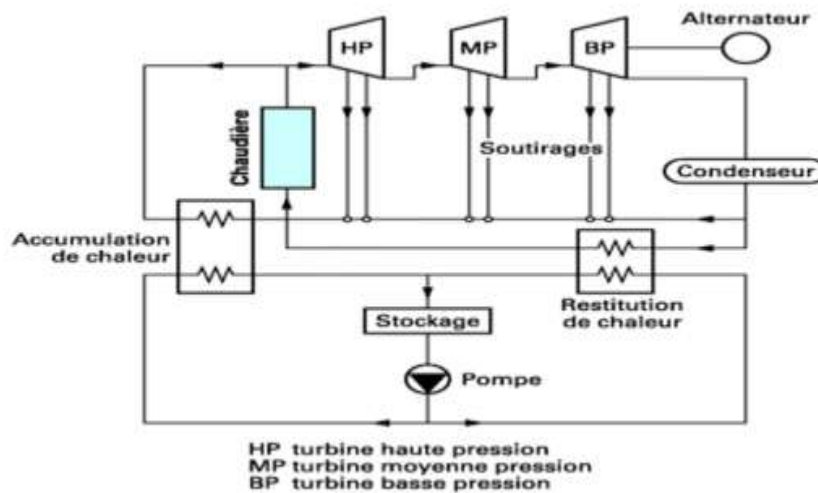


Figure 2-10 : Stockage d'électricité sous forme de chaleur sensible dans une centrale électrique.

Si l'on n'envisage plus l'eau comme fluide de stockage, il faut citer les expériences réalisées pour la conversion thermodynamique de l'énergie solaire où des stockages thermiques de courte durée (quelques heures) ont été réalisés avec du sodium, des sels fondus (Draw Salt, Hitec) ou de l'huile associée à du sable et des blocs de granit, comme à la centrale de Solar One en Californie (10 MW)[33].

• Stockage sous forme de chaleur latente :

La chaleur latente d'un changement de phase est généralement bien plus élevée que la chaleur sensible. Pour l'eau par exemple, la chaleur latente d'évaporation L_v est de 2257kJ/kg. Ainsi, une tonne d'eau peut stocker 627kWh lors de sa vaporisation, soit plus de dix fois l'énergie stockée par chaleur sensible dans l'exemple précédent. Le volume de stockage est donc moindre pour une même quantité d'énergie stockée. De plus, ce stockage s'opère sur une variation très faible de la température puisque la transformation est isotherme. Cependant, la température de changement de phase est primordiale et étroitement liée à l'application dans laquelle il intervient.

Si à ce jour, ce type de stockage ne trouve pas d'application pour le stockage de l'électricité, il existe des applications pour la régulation de la température des pièces d'habitation, par exemple. En effet, un tel stockage est utilisé avec un matériau dont la température de changement de phase est d'environ 20°C (température de confort pour l'activité humaine). Les murs qui contiennent le fluide absorbent l'énergie du jour et la restituent la nuit. Tant qu'il y a un mélange liquide-vapeur, la température du mur et donc de la pièce restera stabilisée à la température du changement d'état [35].

II.3 Comparaisons entre les différentes techniques de stockage

Le tableau comparatif (table3) suivant permet de récapituler les principales caractéristiques de quelques-unes des technologies analysées. Comme l'indique le tableau ci-dessus, ce sont encore les batteries électrochimiques qui permettent de stocker une grande énergie volumique ou massique ce qui explique leur succès. Cependant leur longévité et leur rapidité de décharge sont insuffisantes dans certaines applications.

Chapitre II : les systèmes de stockage d'énergie électrique

Technologie	Inductif Supraconducteur	Supercondensateur	Batteries	Volant Inertie	Air comprimé en bouteille	Hydrogène PAC réversible
Forme d'énergie	magnétique	électrostatique	électrochimique	mécanique	air comprimé	carburant
Densité d'énergie Wh/kg	1 à 5 Wh/kg	5 à 10 Wh/kg	20 à 120 Wh/kg	1 à 5 Wh/kg	8 Wh/kg (200 bars)	300 à 600 Wh/kg (200 à 350 bars) hors PAC
Capacité réalisable ou réalisée	qq kWh	qq kWh	qq Wh à qq MW h	qq kWh à qq 10 kWh	qq kWh à qq 10 kWh	NA
Constante de temps	qq s à 1 mn	qq s à qq mn	qq 10 mn (NiCd) à qq 10 heures (Pb)	qq mn à 1 h	1 h à qq jours (peu d'auto- decharge)	1 h à qq jours (peu d'auto- decharge)
Cyclabilité	10000 - 100000	10000 - 1000000	100- 2000	10000 - 100000	1000 - 10000	-
Rendement électrique	> 0,9	0,8 à > 0,9 selon régime	0,7 à 0,8 selon techno et régime	0,8 à > 0,9 selon régime	0,3 à 0,5 selon régime	0,3 à 0,5
Coût énergie €/kWh	500 à 72000	50 000 à 150 000 (dimensionnement en puissance)	Pb-acide : 50 à 200 Lithium : 700 à 1000	150 à 2000 (massif) . ? 25000 (composite)		15
Coût puissance €/kW	200-300	200-300	250-1500	300-350	400-600	6000
Connaissance de l'état de	Aisée (courant)	Aisée (tension)	Difficile Paramètres	Aisée (vitesse)	Aisée (pression)	Aisée (remplissage H2)

Tableau 3 : Bilan simplifié des caractéristiques des moyens de stockage plutôt exploitables à petite échelle [33]

Chapitre II : les systèmes de stockage d'énergie électrique

Le tableau 4 résume les principales caractéristiques des systèmes de stockage à grande échelle. On constate que plusieurs techniques ont été mises en œuvre grâce à leurs caractéristiques très intéressantes. Ces moyens permettent de faciliter la gestion du réseau mais surtout de favoriser la pénétration des énergies renouvelables [45].

Technologie	Hydraulique	Air comprimé	Batteries classiques	Batteries à circulation	Thermique à turbine
Densité d'énergie	1 kWh/m ³ pour une chute de 360 m	12 kWh par m ³ de caverne à 100 bars	Batterie au plomb : 33 kWh/t Batterie Li-ion : 100 kWh/t	33 kWh/ m ³	200 kWh/ m ³
Capacité réalisable	1000-100000 MWh	100-10000 MWh	1-40 MWh	10-100 MWh	1000-100000 MWh
Puissance réalisable	100-1000 MW	100- 1000 MW	1 MW- 10 MW	1- 10 MW	10-100 MW
Rendement électrique	65%-80%	50%	70%-90%	70%-90%	0.8 <> 0.9
Installations existantes	100 000 MWh 1000 MW	600 MWh 290 MW	40 MWh 10 MW	120 MWh 15 MW	?
Coût €/kWh(1)	70-150	50-80	200 (Pb)- 2000 (Li)	100-300	50
€/kW(1)	600-1500	400-1200	300 (Pb)- 3000 (Li)	1000-2000	350-1000
Maturité	Très bonne Plusieurs expériences	Plusieurs expériences au monde	Plusieurs expériences avec des technologies matures	En Développement prototypes en fonctionnement	A l'état de projet

Tableau 4 : Bilan simplifié des caractéristiques des moyens de stockage plutôt exploitable à grande échelle

Dans la catégorie des applications stationnaires de faible puissance, le point essentiel est une autodécharge la plus petite possible. En se basant sur les seuls critères techniques, le lithium-ion est alors le meilleur candidat. Dans la catégorie des petits systèmes (quelques kWh) en site isolé et faisant appel aux énergies renouvelables intermittentes, le critère essentiel est l'autonomie; la batterie plomb reste le meilleur compromis entre performances et coût. Le lithium-ion est plus performant mais d'un coût encore trop élevé.

Pour des besoins plus importants (quelques centaines de kWh), le plomb reste devant le lithium et les solutions alternatives sont soit moins performantes, soit d'un coût trop élevé : air comprimé (trop d'autodécharge), piles à combustible (coût très élevé et mauvais rendement énergétique), batteries redox (coût de maintenance).

Pour le lissage de pointes faisant appel à un stockage d'énergie élevé (plusieurs MWh), l'air comprimé et les batteries redox sont les plus appropriés avec un avantage important pour le premier en termes de coût. Mais ces technologies restent encore à démontrer sur le terrain. Pour la qualité de puissance, les critères essentiels sont la capacité de restitution de l'énergie et le cyclage. Les volants d'inertie et les supercondensateurs sont les plus adaptés ainsi que les batteries lithium-ion.

Parmi les prises en compte, les batteries au plomb satisfont aux critères techniques de toutes les catégories mais sont pénalisées par leur durée de vie limitée et leur manque de fiabilité. Les batteries à base de nickel et les piles métal-air ne sont jamais en tête de classement suivant les critères retenus (performances plus faibles, coût légèrement supérieur). Les piles à combustible/hydrogène sont pénalisées par leur manque de maturité. Enfin, certaines technologies sont aptes à apporter des solutions pour le stockage des énergies intermittentes : le stockage hydraulique, le stockage thermique pour des applications à grande échelle, les inductances supraconductrices (SMES) pour de faibles échelles.

Pour répondre aux besoins futurs d'une production de plus en plus délocalisée, le stockage va demander à court et moyen terme des améliorations technologiques. Les batteries lithium-ion ont d'excellentes performances mais le coût est actuellement prohibitif pour une application de systèmes isolés dans les pays en développement. Le recyclage et l'élimination en fin de vie de ces batteries nécessitent des actions de recherche et développement (R&D). Les batteries plomb restent le meilleur compromis coût/performances mais demeurent le point faible du système isolé ; des performances accrues en terme de durée de vie doivent être développées pour répondre plus efficacement aux besoins. Pour les applications connectées au réseau, les besoins à moyen terme comprimé, supercondensateurs, volant d'inertie) sont plus ou moins matures et peuvent être optimisées en terme de coût, de fiabilité et de rendement.

II.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de représenter les moyens de stockage et leurs caractéristiques d'une manière critique. Ces moyens ont connu un grand développement au cours de ces dernières années. Entre autres des moyens ont besoin de plus de développements.

En se basant sur les caractéristiques intéressantes de ces moyens, l'énergie électrique peut être stockée en général en n'importe quelle quantité et surtout celles produite par les ressources renouvelables. Certes le stockage a un coût, mais il apporte un service. [44]

Le stockage d'énergie représente un enjeu majeur pour permettre une réelle pénétration des immenses ressources renouvelables naturellement dispersées [45]. Pour accroître la sûreté du système, les solutions sont nombreuses mais tellement différentes dans leurs spécifications qu'elles sont difficiles à comparer. C'est la raison pour laquelle on a essayé de dégager, de façon critique, un ensemble de caractéristiques techniques et économiques qui permettraient d'améliorer les estimations de performances et coût qui conditionnent l'acceptabilité du stockage.



CHAPITRE
III

III.1 Introduction :

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. A ce niveau, la condition qui s'impose c'est de connaître les critères d'entrées (donnée de base) et les données relatives aux équipements.

Dans ce chapitre, nous représenterons d'abord le modèle mathématique d'un générateur photovoltaïque, le modèle de l'hacheur et du système de stockage (batterie et supercondensateur). Schéma de commande proposé du système d'alimentation PV et la conception des régulateurs PI en utilisant la méthode placement des pôles.

III.2 Description du système

Le modèle hybride proposé est composé d'un panneau photovoltaïque et de batteries au lithium avec un supercondensateur pour le système de stockage d'énergie électrique. Tous les composants ont été connectés à un bus DC avec des convertisseurs buck-boost, comme le montre la figure 3.1. L'ensemble du système alimente une charge AC via un convertisseur DC-AC.

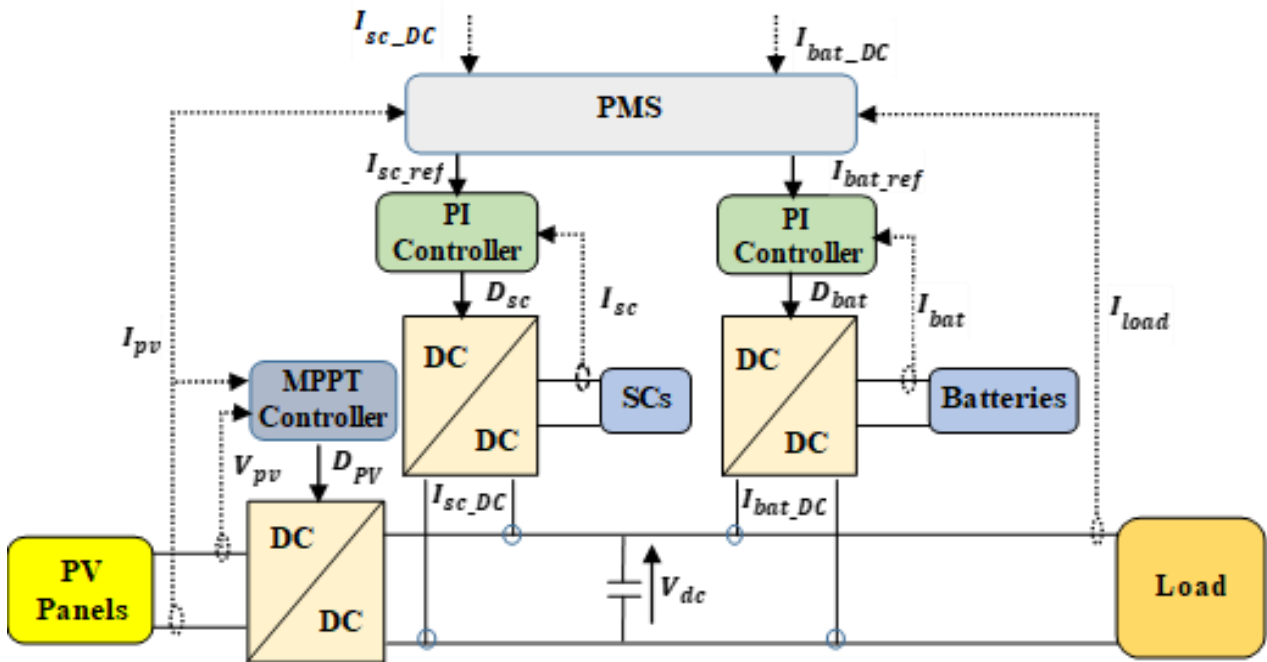


Figure 3.1 : Schéma de principe des systèmes PV avec stockage d'énergie.

III.2.1 Modélisation du système PV

Figure 3.2 montre le modèle commun du solaire PV, qui consiste en un photocourant, une diode, une résistance série R_s représentant une résistance interne au passage du courant, et une résistance parallèle R_p affichant un courant de fuite [46].

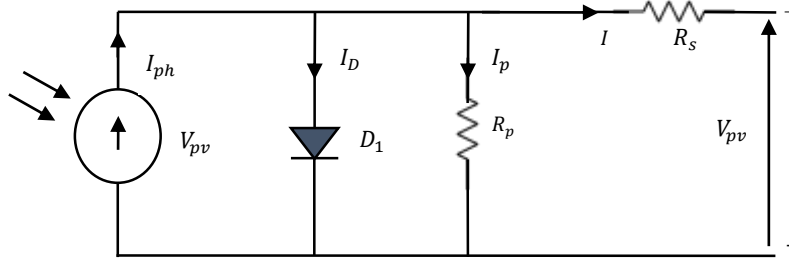


Figure3. 2 : Modèles de circuits équivalents PV.

L'équation (3.1) donne la caractéristique tension-courant d'une cellule solaire [47].

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\left(\frac{qV + IR_s}{kT_c A} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V + IR_s}{R_p} \right) \right] \quad (3.1)$$

Où I_{PH} est un photocourant, I_s est la saturation cellulaire du courant d'obscurité, q est la charge de l'électron ($q=1.6.10^{-19}C$), k est la constante de Boltzman ($k=1.3.10^{-23} J/K$), T_c désigne la température de fonctionnement de la cellule, et A est le facteur d'idéalité [48].

L'équation (3.2) décrit le courant de saturation I_s comme suit :

$$I_s = I_p \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[qG_r \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right) \cdot \frac{1}{kA} \right] \quad (3.2)$$

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

Plusieurs modules PV sont connectés électriquement dans des circuits en série et en parallèle pour former un générateur PV afin de générer le courant et la tension requis. Le courant de sortie ou de charge calculé (I), avec N_p parallèles et N_s modules en série [49]:

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s \left[\exp \left(q \left(\frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p} \right) \frac{1}{kT_c A} \right) - 1 - \left(\frac{N_p V}{N_s} + IR_s \right) \frac{1}{R_p} \right] \quad (3.3)$$

III.2.2 Modélisation des convertisseurs DC-DC

L'étage de puissance d'un convertisseur abaisseur-élevateur est décrit à la figure 3.3. Il est composé des transistors de commutation Q_1 et Q_2 , de la capacité de lissage de sortie C , de l'inductance de lissage L et de la charge réelle R .

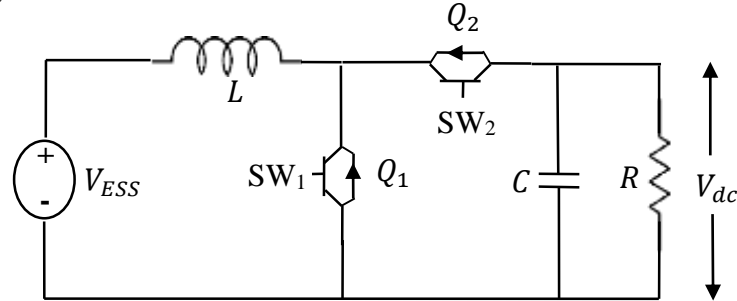


Figure 3.3 : Les modèles de circuit buck-boost.

Q_1 est toujours désactivé dans le cas du mode convertisseur abaisseur et le courant circule du bus CC vers la source ESS (batterie ou SC). En contrôlant Q_2 , le convertisseur peut diminuer la tension V_{dc} pour charger l'ESS. Si le convertisseur fonctionne en mode boost, le commutateur Q_2 est désactivé et la diode dans Q_2 permet le flux de courant dans une direction de l'ESS au bus CC. En contrôlant le rapport cyclique de Q_1 , le convertisseur peut augmenter la tension V_{ESS} de l'ESS pour alimenter le bus DC [50, 51].

En mode convertisseur abaisseur, la tension de l'ESS est:

$$V_{ESS} = \frac{V_{dc}}{D} \quad (3.4)$$

En contrôlant le rapport cyclique D du convertisseur, V_{ESS} peut être contrôlé.

En mode convertisseur élévateur, la tension du bus CC est:

$$V_{dc} = \frac{V_{ESS}}{1-D} \quad (3.5)$$

Dans ce cas, v_{dc} est toujours supérieur à V_{ESS} . Le gain du convertisseur élévateur peut être contrôlé en faisant varier le rapport cyclique D .

III.2.3 Modelisation de la batterie

Puisque la demande d'énergie dans les applications photovoltaïques ne coïncide pas toujours avec sa production, il est donc nécessaire d'avoir un élément de stockage pour stocker l'énergie produite. Cet élément est généralement constitué des batteries d'accumulateurs électrochimiques et rechargeables, capables de stocker l'énergie électrique sous forme chimique puis la restituer à chaque demande grâce à la réversibilité de la transformation.

III 2.3.1 Schéma électrique d'une batterie

Le modèle simple d'une batterie est représenté par le schéma électrique suivant :

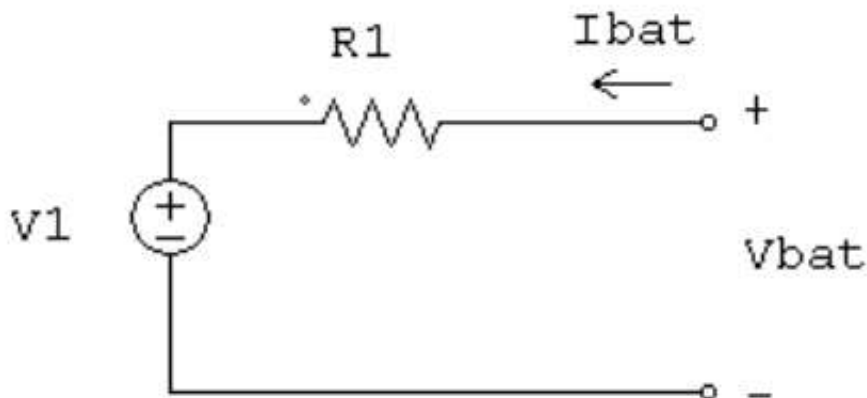


Figure3.4 : Schéma électrique d'une batterie.

L'équation la plus simple qui décrit la relation entre la tension de la batterie V_{bat} et le courant de charge I_b est donnée par [52] :

$$V_{bat} = V_1 + R_1 \cdot I_{bat} \quad (3.6)$$

Avec : R_1 : Résistance interne de la batterie.

V_1 : Tension à vide.

III.2.3.2 Mode de fonctionnement d'une batterie

On distingue de modes : charge et décharge

➤ Mode de charge :

$$V_1 = [2 + 0.148 * soc(t)] * ns \quad (3.7)$$

$$R_1 = \frac{0.758 + 0.1309/[1.06 - soc(t)] * ns}{soc_m} \quad (3.8)$$

➤ Mode de décharge :

$$V_1 = [1.926 + 0.124 * soc(t)] * ns$$

$$R_1 = \frac{0.19 + 0.1037/[soc(t) - 0.14] * ns}{soc_m}$$

soc_m : valeur maximal de l'énergie de batterie.

Soc (t) : état de charge.

ns: nombre de 2V des ce

III.2.4 Modélisation d'un supercondensateur

Les supercondensateurs sont ajoutés en tant que dispositifs de stockage haute puissance [53]. Il existe de nombreux modèles, rapportés dans la littérature, pour représenter le comportement du Sc.

III.2.4.1 Modèle RC de supercondensateur

Le circuit le plus simple du supercondensateur est donné à la figure 3.5. Il n'a qu'une branche RC dans laquelle la résistance R représente la perte ohmique du supercondensateur et le condensateur C simule la capacité du supercondensateur pendant le processus de charge et de décharge. La résistance parallèle équivalente R_F représente le courant de fuite et peut être négligée lors d'une charge/décharge rapide du supercondensateur.

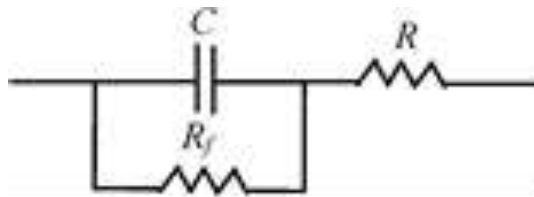


Figure 3.5 : Modèle de supercondensateur simple.

III.2.4.2 Modèle à deux branches de supercondensateur

Le circuit électrique équivalent à deux branches RC représenté sur la figure 3.6 est proposé par Zubietta et Bonert [55], Gualous et al. [56]. La capacité principale C_1 , appelée capacité différentielle, dépend de la tension V_1 . Il est constitué d'une capacité constante C_0 (en F) et d'un paramètre constant C_V (en F/v) et il s'écrit

$$C_1 = C_0 + C_V V_1 \quad (3.9)$$

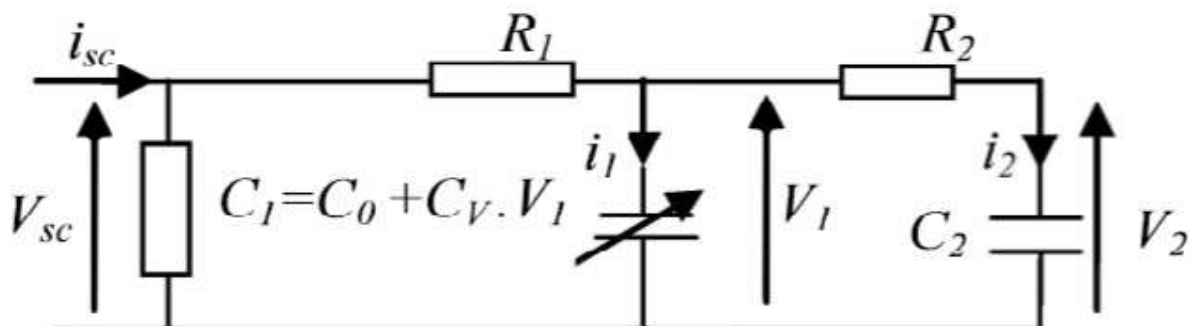


Figure 3.6 : Circuit simplifié de supercondensateur : modèle à deux branches

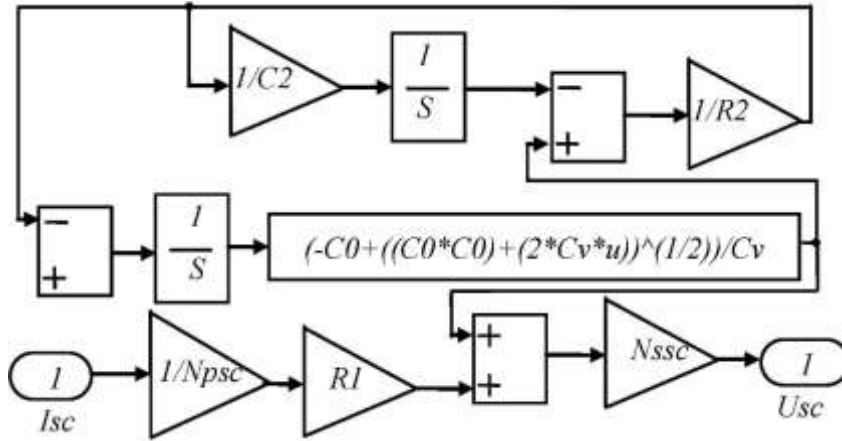


Figure 3.7 : Modèle MATLAB/Simulation d'un pack de supercondensateurs

La branche R_1C_1 détermine le comportement immédiat du supercondensateur lors de cycles rapides de charge et de décharge en quelques secondes. La cellule R_2C_2 est la branche lente. Il complète la première cellule en gamme longue durée de l'ordre de quelques minutes et décrit la répartition interne de l'énergie en fin de charge ou de décharge. En négligeant le courant de fuite, le circuit équivalent du S_C est donné par l'équation suivante

$$U_{SC} = N_{SSc}v_{sc} = N_{SSc}v_1 + R_1 \frac{I_{SC}}{N_{PSc}} \quad (3.10)$$

Où U_{SC} et I_{SC} sont respectivement la tension et le courant du pack S_C ; V_{sc} et i_{sc} sont respectivement la tension et le courant S_C élémentaires. N_{psc} et N_{ssc} sont le nombre de connexions en parallèle et en série des S_C . La tension v_2 est donnée par

$$v_2 = \frac{1}{C_2} \int i_2 dt = \frac{1}{C_2} \int \frac{1}{R_2} (v_1 - v_2) dt. \quad (3.11)$$

Le courant i_1 est exprimé en termes de charge instantanée Q_1 et C_1 comme

$$i_1 = C_1 \frac{dv_1}{dt} = \frac{dQ_1}{dt} = (C_0 + C_v y_1) \frac{dv_1}{dt} \quad (3.12)$$

où la charge Q_1 est donnée par

$$Q_1 = C_0 \cdot v_1 + \frac{1}{2} C_v \cdot v_1^2 \quad (3.13)$$

Alors la tension v_1 est définie comme suit

$$V_1 = \frac{-C_0 + \sqrt{C_0^2 + 2C_v Q_1}}{C_v} \quad (3.14)$$

La simulation de ce modèle dans l'environnement MATLAB\Simulink est illustrée à la figure

3.7.

III.3.1 Maximum Power Point Tracking

Maximum Power Point Tracking, MPPT, est une étape essentielle dans les systèmes PV. Fonctionne à puissance maximale en agissant sur le panneau. tels que le pouvoir et Tension, PV, courbe, Figure 3.8, a une valeur maximale pour un éclaircissement et une température donnés puissant [57].

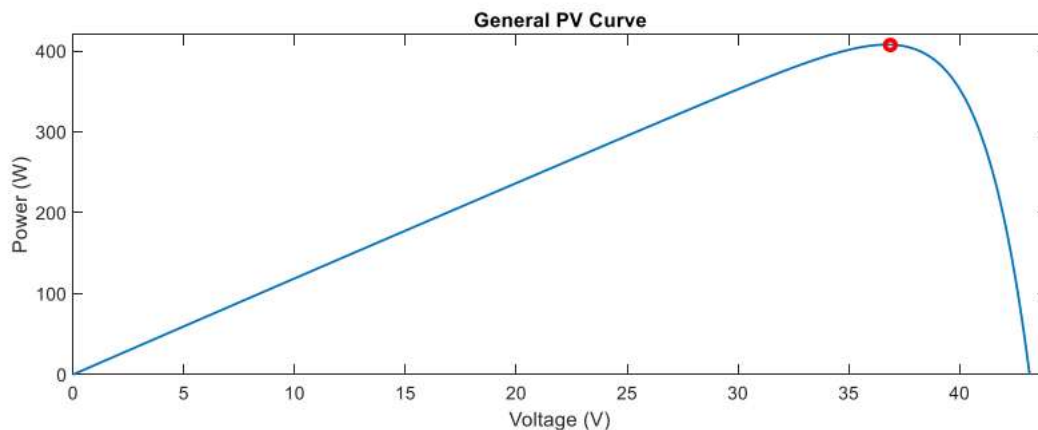


Figure 3.8 : Courbe PV panneaux solaires

Cette valeur de puissance maximale correspond à une tension et un courant de fonctionnement spécifiques illustré par la figure.

La nature du photovoltaïque dépend entièrement du soleil et des conditions météorologiques qui changent continuellement. Même un jour sans nuage, il y a l'inévitable lever et coucher du soleil. Par conséquent, en réaction à différentes valeurs de température et d'éclaircissement, la courbe de puissance, tout en conservant une forme similaire, se redimensionnera en conséquence. De plus, la puissance maximale le point change constamment. Cela illustre l'avantage de pouvoir suivre ce maximum power point et contrôler le point de fonctionnement dans un système dynamique [58].

III.3.2 Perturb and Observe

La méthode Perturb and Observe manipule le rapport cyclique et réagit à la façon dont cette perturbation affecte la tension et finalement la puissance. Une réduction du rapport cyclique entraîne une tension plus faible. A l'inverse, une augmentation du rapport cyclique se traduit par une tension plus élevée.

Au centre de la méthode PO se trouve que le système sera perturbé, et le changement de puissance qui en résulte est ce qui détermine la prochaine perturbation. Cette méthode est également appelée méthode « d'escalade ». La forme de la courbe PV, figure 2, ressemble à une seule colline. Pour fonctionner au MPP, le système fait constamment un pas, puis vérifie

si le courant est supérieur ou inférieur à son étape précédente. La logique de l'OP peut être résumée dans le tableau 1, il n'y a que quatre chemins que l'on peut emprunter [56].

Perturbation précédente	Effet sur la puissance	Prochaine perturbation
augmenter	augmenter	augmenter
augmenter	Diminuer	Diminuer
Diminuer	augmenter	Diminuer
Diminuer	Diminuer	augmenter

Tableau 3.1 : Logique de perturbation et d'observation

Cette exigence de diminuer ou d'augmenter à chaque étape révèle un problème avec le PO en état stable. Lorsque le MPP est atteint et que le système est en régime permanent, la valeur de la puissance ne sera pas constante, mais la puissance oscillera autour de la valeur du MPP [57].

III.3. Schéma de commande proposé du système d'alimentation PV

III.3.1 Contrôle du bus DC

Figure 3.9 présente le schéma de contrôle de la tension du bus continu v_{dc} . La référence de courant I_{dc_ref} est obtenue à partir d'un régulateur PI. Cette valeur est ensuite utilisée par la stratégie de gestion de l'alimentation (PMS) pour évaluer les références de courant I_{bat_ref} et I_{sc_ref} pour les boucles de contrôle du supercondensateur et de la batterie respectivement.

Pour remplir cet objectif, il est nécessaire de réguler la tension du bus continu par la répartition en courant des références I_{bat_ref} et I_{sc_ref} pour les convertisseurs statiques. La boucle de contrôle du convertisseur abaisseur-élevateur DC-DC du supercondensateur est illustrée à la figure 10.

La fonction de transfert du courant SC est donnée comme suit [58]:

$$G_{sc}(s) = \frac{I_{sc}}{D_{sc}} = V_{sc} \frac{Cs + 2}{RL_{sc}Cs^2 + L_{sc}s + (1 - D_{sc})^2} \quad (3.15)$$

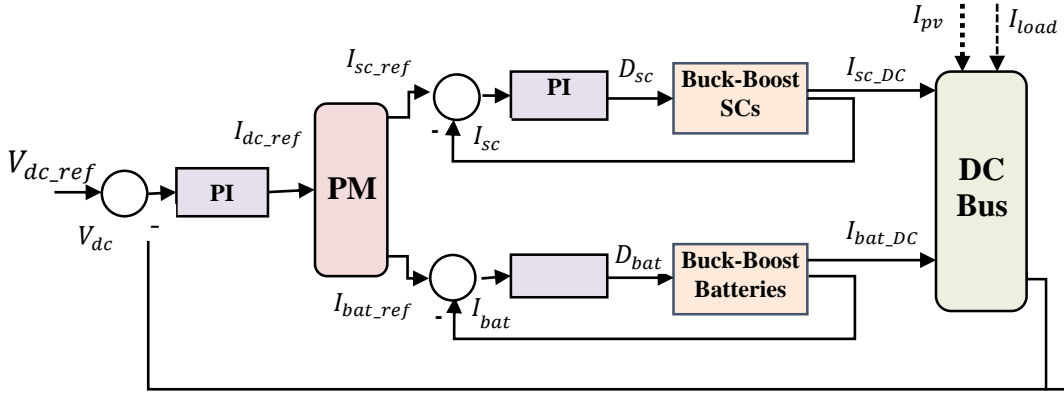


Figure 3.9 : Schéma fonctionnel de la commande du bus DC.

La fonction de transfert du régulateur PI de la boucle de régulation de courant SC est donné par

$$G_{pi_sc} = \frac{D_{sc}}{I_{sc_ref}} = K_{p_sc} + \frac{K_{i_sc}}{s} \quad (3.16)$$

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

$$G_{scv}(s) = \frac{V_{dc}}{I_{sc}} = \frac{R(1-D_{sc})\left(-\frac{L_{sc}}{R(1-D_{sc})^2}\right)s+1}{RCs+2} \quad (3.17)$$

L'équation (9) présente la fonction de transfert du compensateur de boucle de contrôle de tension.

$$G_{pi_DC} = K_{p_DC} + \frac{K_{i_DC}}{s} \quad (3.18)$$

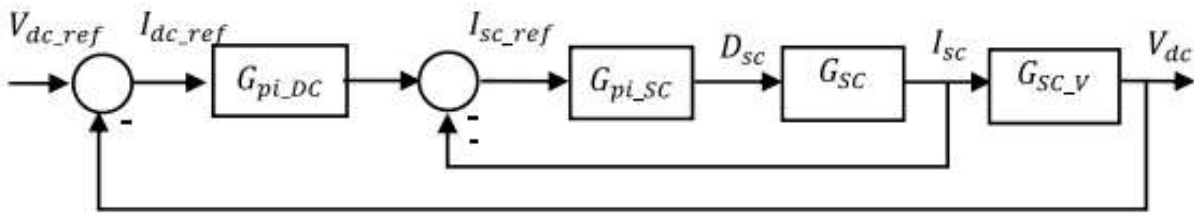


Figure 3.10 : Boucle de régulation PI du supercondensateur.

Où C'est le condensateur du bus DC, R est la résistance du bus DC, L_{sc} désigne 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 régulation du convertisseur DC/DC de la batterie est illustrée en Figure 6.

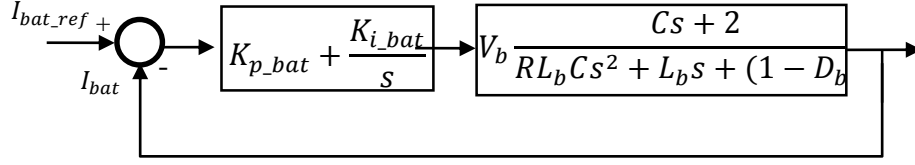


Figure 3.11. Boucle de régulation PI de la batterie.

Où 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 :

$$I_{bat_ref} = I_{dc_ref} - I_{sc_ref} \quad (3.19)$$

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

III.3.2 Conception des régulateurs PI

Les convertisseurs DC/DC sont contrôlés par des régulateurs PI. Étant donné que le SC a des taux de charge/décharge plus rapides que la batterie [60], les contrôleurs PI sont réglés en fonction de l'étage de puissance du SC. Dans ce travail, nous allons présenter la méthode de réglage placement des pôles. Cette méthode de réglage est décrite dans la section suivante.

III.3.2.1 Placement des pôles Régulateur PI

L'approche classique de conception de placement de pôles cherche à trouver le contrôleur qui donne les pôles en boucle fermée souhaités. La dynamique du convertisseur buck-boost peut être décrite par la fonction de transfert de second ordre suivante [61]:

$$G_p(s) = \frac{\beta(1 - \beta)}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + (1 - \beta)^2} \quad (3.20)$$

β est le rapport cyclique du convertisseur DC/DC, L, R et C désignent respectivement l'inductance, la résistance et la capacité dans le circuit 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 régulateur PI peut s'écrire :

cet excès de puissance en peu de temps. Les SC répondent directement au besoin de la charge en fournissant ou en absorbant des courants de pointe. La figure 9 explique la stratégie de gestion de l'alimentation pour la régulation de la tension du bus CC.

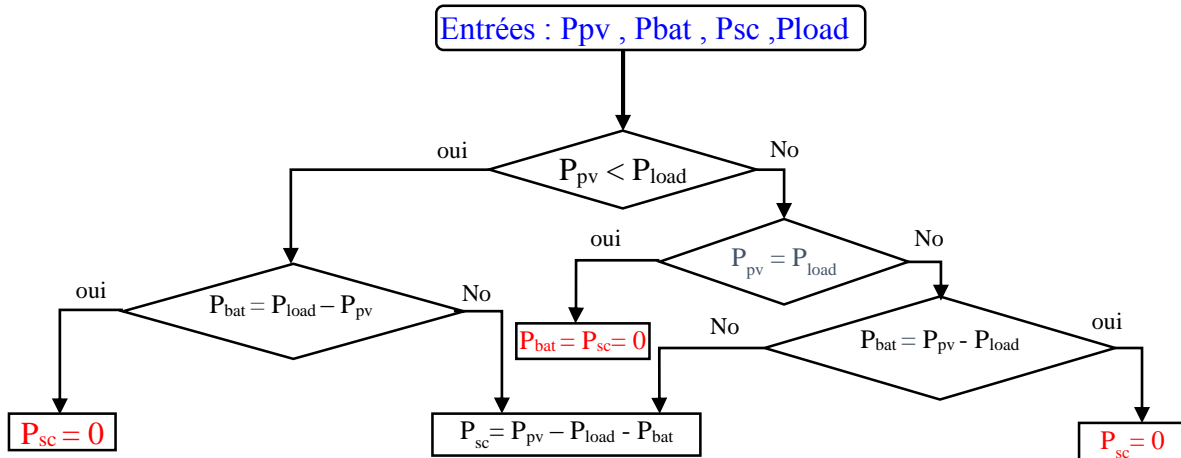


Figure 3.12 : Stratégie de gestion de l'alimentation du contrôle du bus DC.

Le PMS est implémenté dans le bloc de contrôle proposé dans [60], pour gérer le flux de puissance du HESS pour atteindre différents objectifs tels que :

- ✚ Réduire le niveau de stress dynamique de la batterie,
- ✚ Maintenir une tension continue stable,
- ✚ Empêcher décharge profonde de la batterie,
- ✚ Améliorent l'efficacité globale du système,

Comme illustré dans la Figure 3.14.

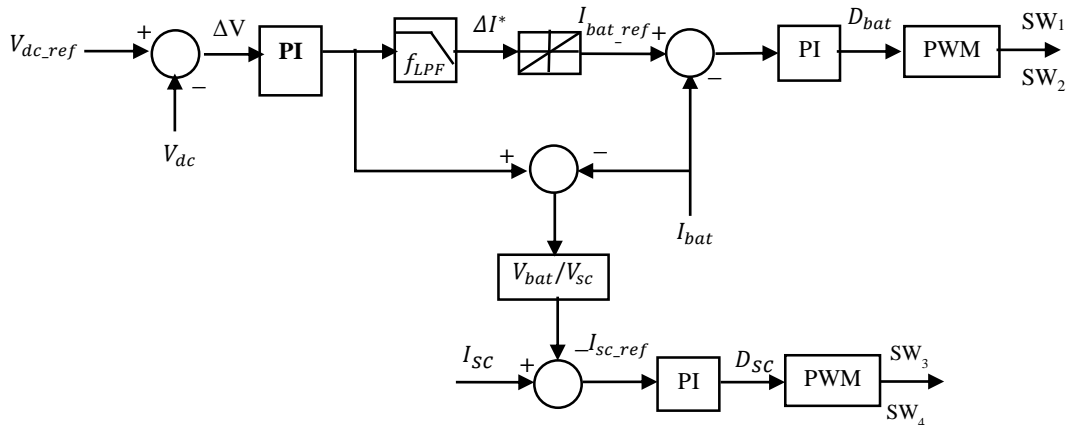


Figure 3.13 : Schéma de contrôle du système de stockage d'énergie hybride.

L'erreur de tension entre V_{dc_ref} et V_{dc} , entrée du 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 (29).

$$\Delta I = I_{pv} - I_{load} = I_{bat} + I_{sc} \quad (3.29)$$

Ainsi, la valeur de ΔI est constituée de la composante haute fréquence satisfaite par le SC, et de 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 déficitaire, équation donnée par (30).

$$\Delta I^* = f_{LPF}(\Delta I) \quad (3.30)$$

Où, f_{lpe} désigne la fonction de transfert du filtre passe-bas. Un limiteur de charge est inclus pour fournir le courant de référence des batteries [60] qui est donné par:

$$I_{bat_ref} = f_{LPF}(\Delta I^*) \quad (3.31)$$

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 rapport cyclique D_{bat} pour le signal de commande PWM des interrupteurs du convertisseur de batteries ($S\omega_1$ et $S\omega_2$).

Par conséquent, la puissance non compensée de la batterie est fournie comme :

$$P_{bat_{UC}} = (\Delta I - I_{bat})V_{bat} \quad (3.32)$$

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 :

$$I_{sc_ref} = \frac{P_{bat_{UC}}}{V_{sc}} = (\Delta I - I_{bat}) \frac{V_{bat}}{V_{sc}} \quad (3.33)$$

De même, pour le contrôle des batteries, cette valeur de référence I_{sc_ref} est comparée à la valeur réelle (I_{sc}), et l'erreur de courant est transmise au régulateur PI. Après cela, le contrôleur PI qui génère le rapport cyclique D_{sc} pour le signal de commande PWM du convertisseur de supercondensateur commute ($S\omega_3$ et $S\omega_4$).

III.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, une représentation explicite de la loi de commande qui permet d'avoir un fonctionnement optimal du système hybride a été décrit. En fait, son algorithme de contrôle, une fois implémenté, gère la quantité de puissance fournie par chaque alimentation.



CHAPITRE
IV

IV.1 Introduction

Dans cette section de simulation, nous simulons trois cas pour justifier l'intérêt du système hybride de stockage électrique. Le premier cas consiste à alimenter la charge variable directement par une source PV. Dans le second cas, nous fournissons la même charge électrique variable avec la même source PV à l'aide de la batterie. Dans le troisième cas, nous alimentons la même charge électrique avec la même source électrique PV et la batterie, en insérant le supercondensateur.

IV.1 Cas 1 PV seul

Dans ce cas, la puissance électrique est fournie directement à partir de la source électrique PV. La figure 6 présente respectivement la tension P_{pv} , P_{load} et la tension du bus DC.

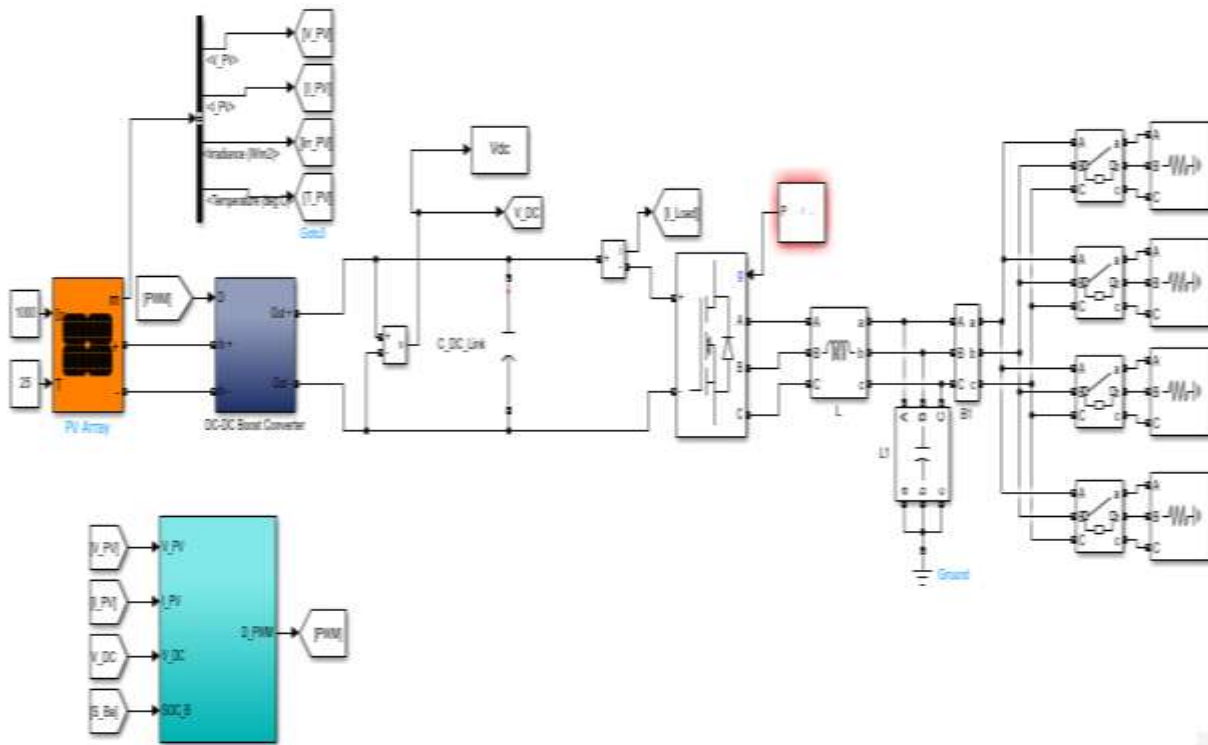


Figure. IV.1 : Cas de PV alimentant une charge variable.

Dans ce cas, nous pouvons observer clairement que la tension du bus continu n'est pas stable car elle est affectée par la variation de la charge électrique. De plus, le flux de puissance du système n'est pas équilibré. Nous observons que lorsque la charge électrique augmente à des valeurs qui ne peuvent pas être satisfaites par la source PV, le système s'arrête. Si ce phénomène persiste, il peut entraîner des coupures de courant dans le système par manque de moyens pour équilibrer production et consommation.

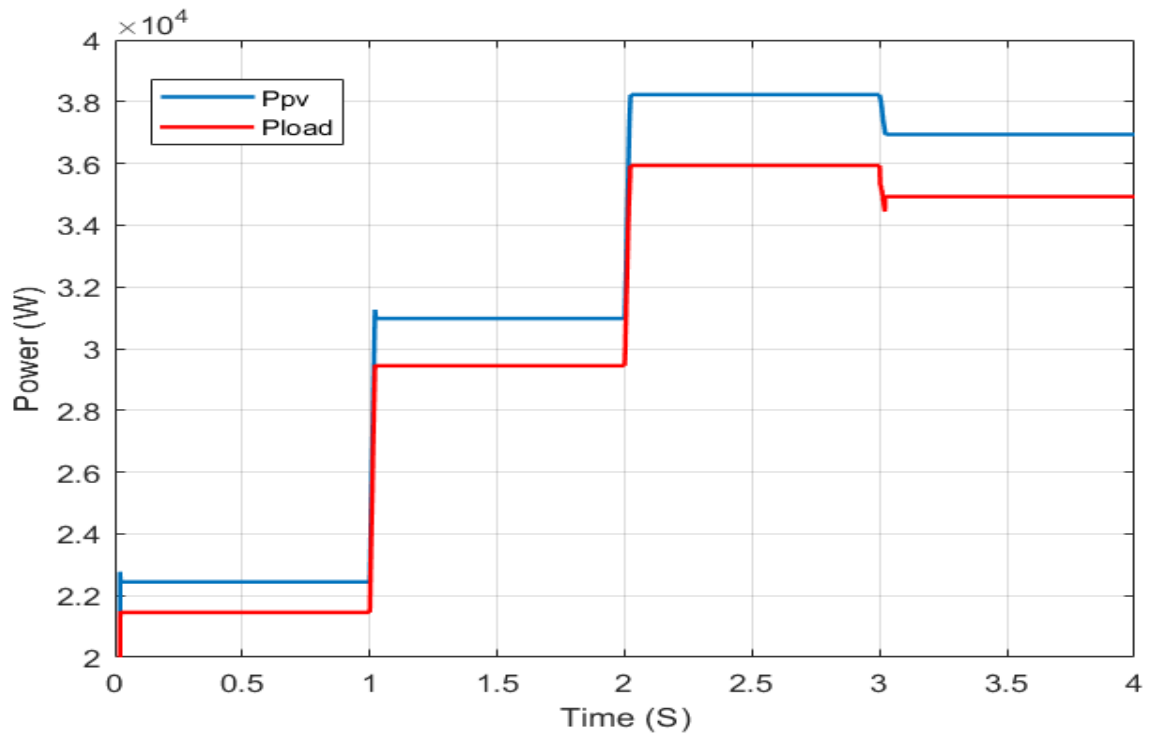


Figure. IV.2 : P_{PV} et P_{load} , en cas de PV seul.

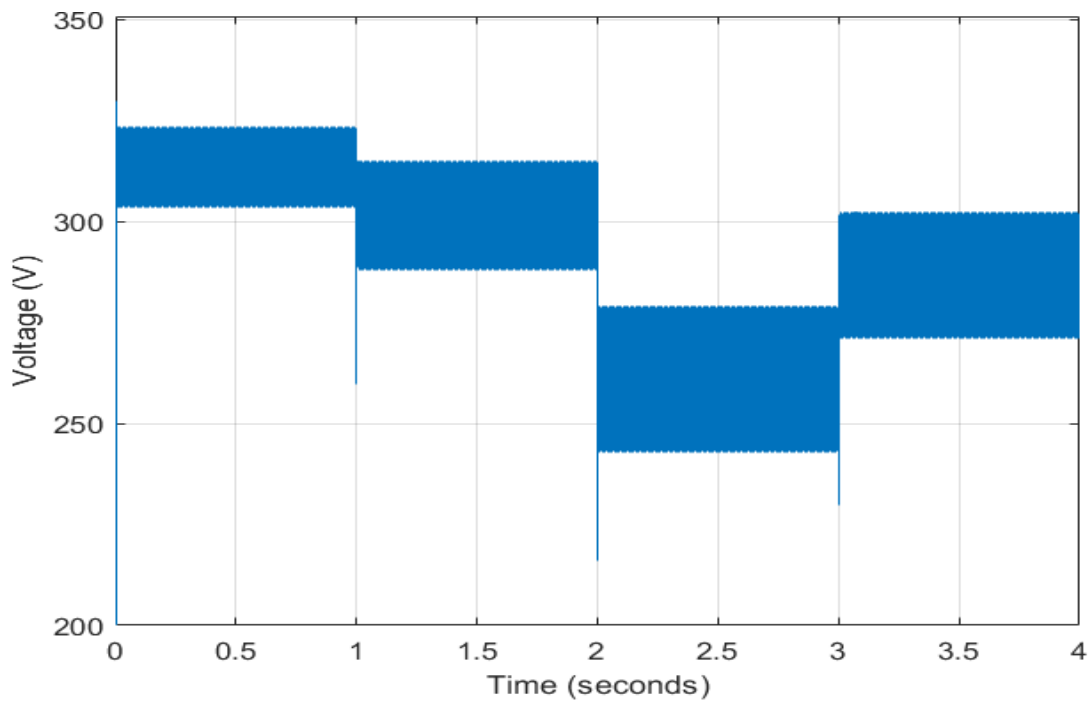


Figure IV.3: Tension du bus courant continu, en cas de PV seul.

IV.2 Cas 2 PV et batterie

Dans ce cas, l'énergie électrique est fournie à la source électrique PV à l'aide des batteries. La figure 5.5 présente respectivement la tension P_{pv} , P_{load} , P_{bat} et la tension du bus CC.

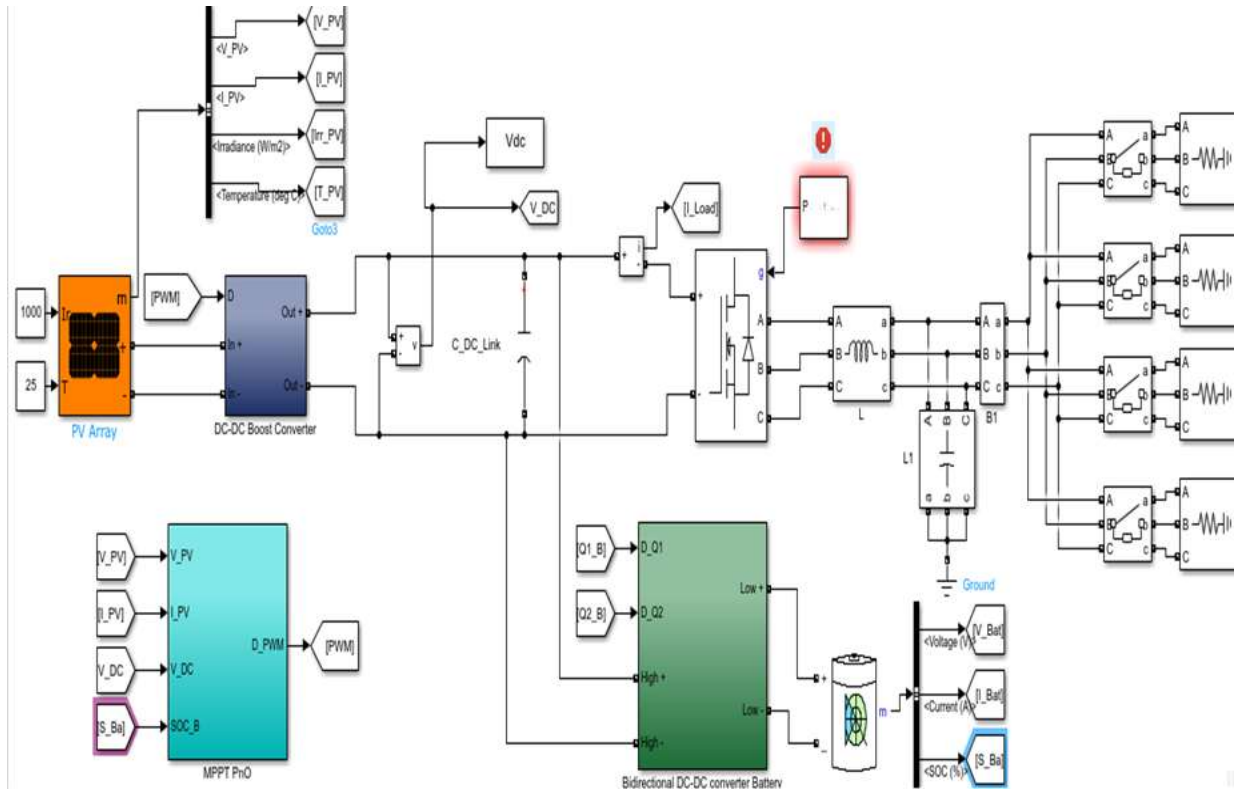


Figure IV.4: Cas de PV et batterie alimentant une charge variable.

Dans ce cas, on remarque la stabilité de la tension du bus continu. De plus, il existe un équilibre entre la production et la consommation. Par exemple, entre 0 et 1 seconde, le surplus de la source PV est consommé par la batterie. Alors qu'à partir de 2 et 3 secondes le manque de puissance est assuré par les piles. Dans ce cas, la batterie joue un rôle primordial dans l'équilibrage de la source de production PV et de la charge électrique.

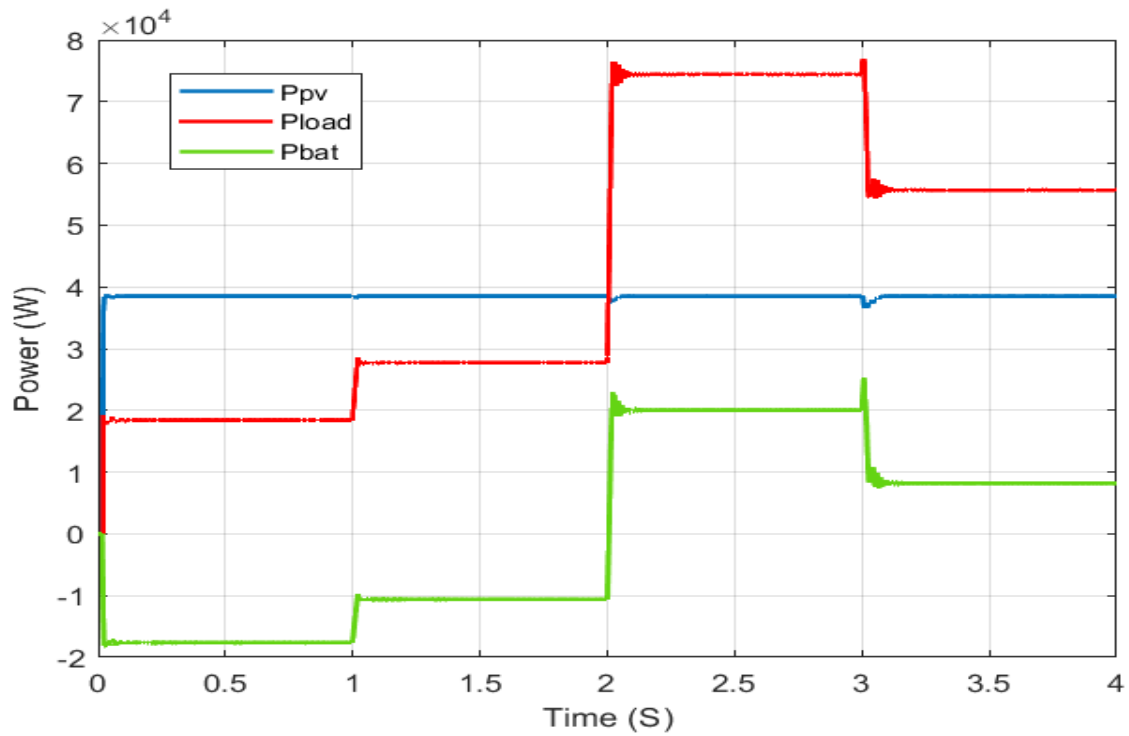


Figure IV.5 : P_{pv} , P_{bat} et P_{load} en cas de batterie PV.

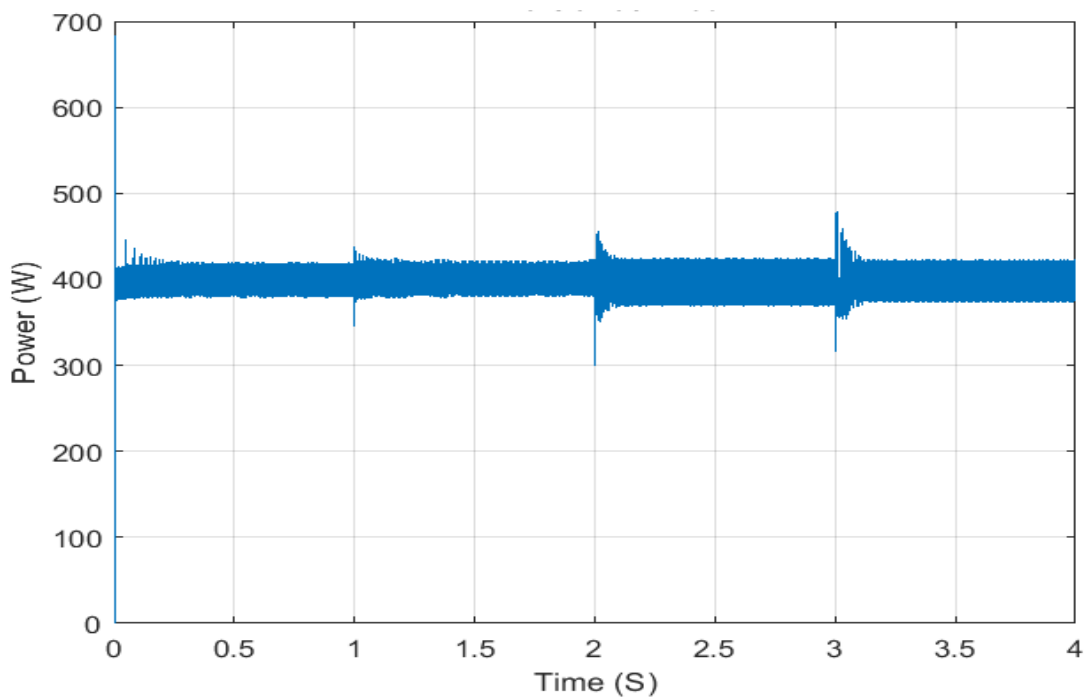


Figure IV.6 : Tension du bus DC en cas de batterie PV.

IV.3 Cas 3 PV, batterie et supercondensateur

Dans ce cas, la puissance électrique est fournie par la source électrique PV à l'aide du système hybride de stockage d'énergie électrique composé de batteries et d'un supercondensateur. La figure 8 présente les tensions de bus P_{pv} , P_{load} , P_{bat} , P_{sc} et DC.

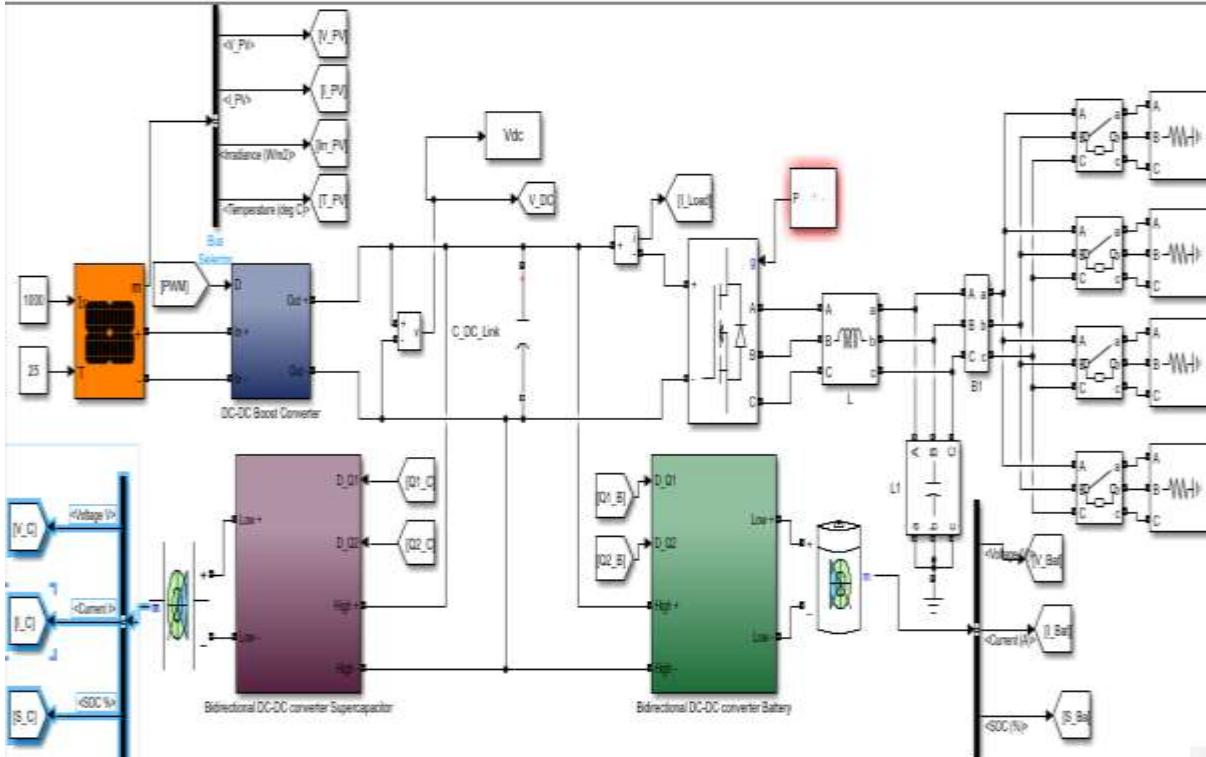


Figure IV.7 : Cas de PV, batterie et supercondensateur alimentant une charge variable.

Comme illustré sur la figure 8, nous pouvons voir que le système est bien amélioré par rapport aux autres cas. La tension du bus CC est plus stable. Les batteries équilibrent la production et la consommation et consomment le dépassement et fournissent le manque de puissance. Le supercondensateur couvre le retard de la batterie, réduit le temps transitoire et élimine l'exemple de sélection à 3 secondes. Le pic est de 25 kW, le supercondensateur étant supprimé lors d'une transition de charge.

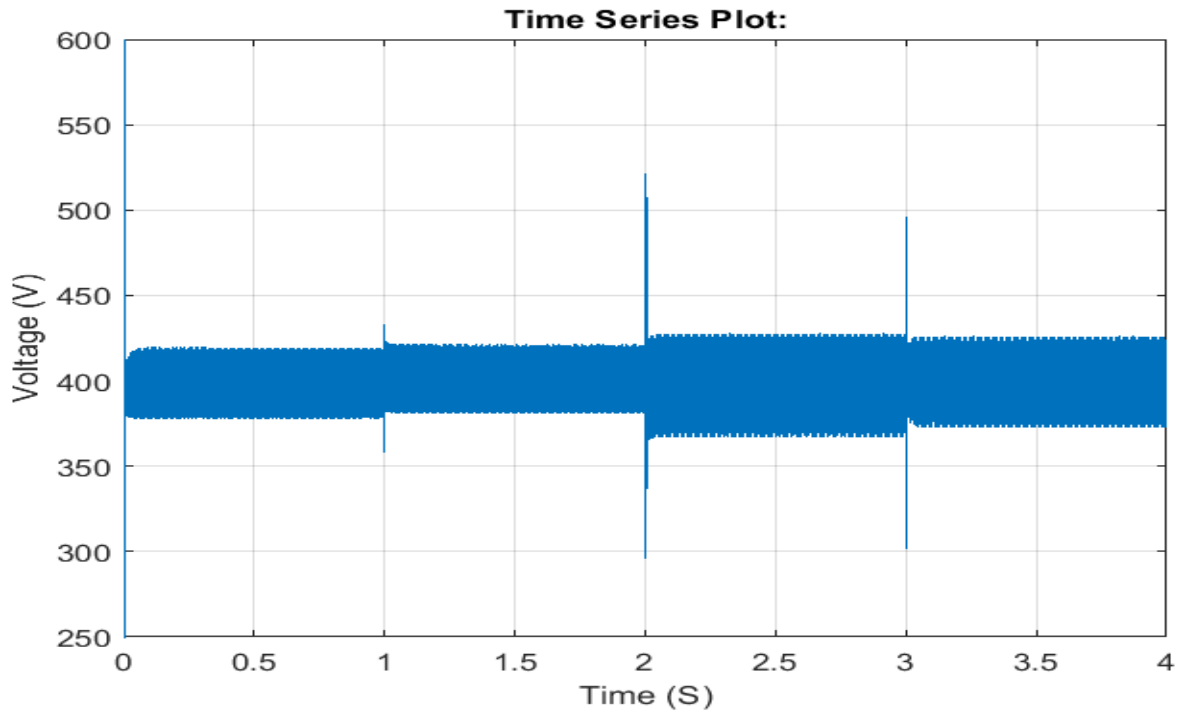


Figure IV.8: Tension du bus CC dans le cas d'une batterie PV-supercondensateur.

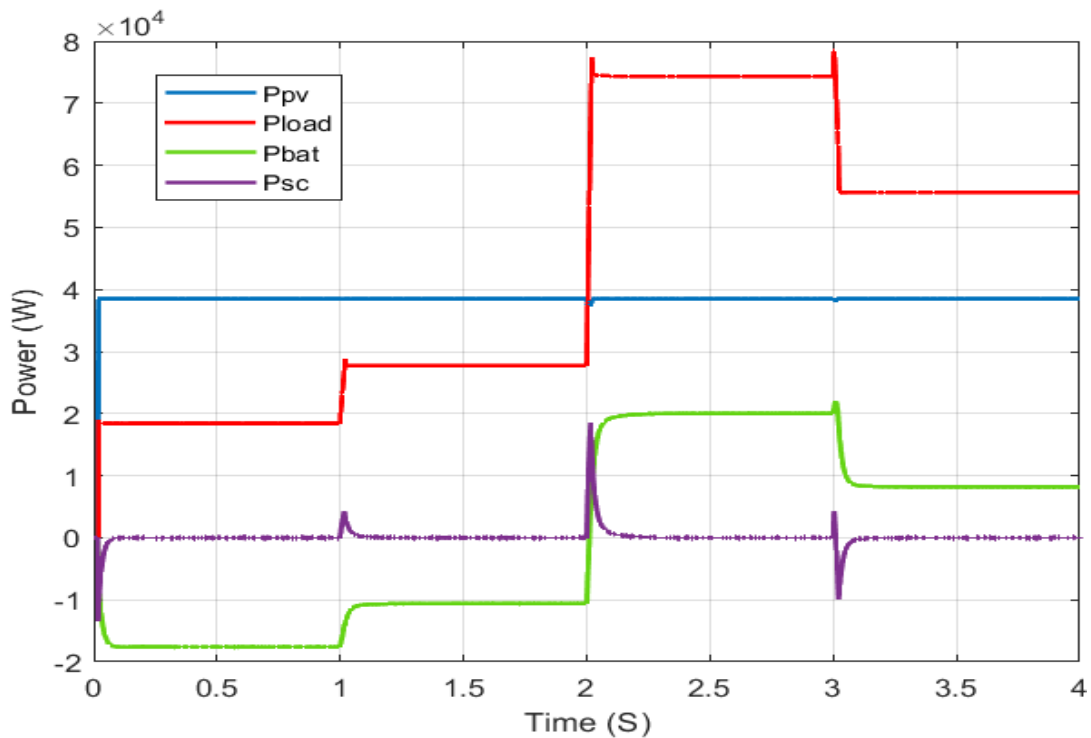


Figure IV.9 : P_{pv} , P_{bat} , P_{sc} et P_{load} dans le cas d'un supercondensateur de batterie PV.

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous réaliserons trois expériences de simulation. Dans la première expérience, nous utiliserons directement l'énergie photovoltaïque pour alimenter la charge. Et dans la deuxième expérience, nous insérons les piles dans le système afin de prouver l'importance de la pile. Dans la troisième et dernière expérience, un supercondensateur est inséré avec les batteries pour démontrer l'importance du système de stockage électrique hybride pour les installations photovoltaïques.



**CONCLUSION
GENERALE**

Conclusion générale

L'objectif principal du présent mémoire était d'identifier l'intérêt du stockage d'énergie électrique hybride dans une installation d'énergie avec une source PV. Pour atteindre cet objectif, nous commençons par un bref aperçu des énergies renouvelables dans le chapitre 1, dans le chapitre 2 nous avons illustré les systèmes de stockage électriques et ces différents types. A travers le chapitre 3, nous avons présenté les modèles mathématiques des différentes composantes de notre système, à savoir le générateur PV, le hacheur buck-boost, les deux systèmes de stockage utilisés la batterie et le supercondensateur ainsi que le MPPT. Au cours du quatrième et dernier semestre, nous avons présenté les résultats de la simulation, trois cas ont été proposés. Le premier cas, nous avons utilisé un générateur PV alimente directement une charge, pour le deuxième cas, nous avons utilisé une batterie pour soutenir le générateur qui alimente la charge. Tandis que dans le troisième cas, nous avons ajouté un supercondensateur à la batterie pour rendre le système de stockage hybride.

Les trois cas de simulation montrent que le stockage d'énergie électrique hybride proposé est adéquat et peut fournir la puissance souhaitée avec la continuité et la stabilité de la tension du bus continu.

Concernant les batteries, elles jouent un rôle essentiel dans l'équilibre de la production et de la consommation en consommant l'excédent de la production PV et en produisant le manque de la charge électrique. Il est également montré qu'un supercondensateur peut réduire la contrainte sur les batteries en absorbant rapidement les changements de puissance et réduire la période transitoire des batteries lorsqu'il y a une transition dans la charge électrique.

Références bibliographiques

- [1] Kempener R, Lavagne O, Saygin D, Skeer J, Vinci S, and Gielen D. Off-Grid Renewable Energy Systems: Status and Methodological Issues. 2015. [Online]. Available: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Off-grid_Renewable_Systems_WP_2015.pdf.
- [2] Lynch R et al., Energy Storage Options and Their Environmental Impact, Royal Soci. 2018.
- [3] Ekren O, Ekren BY. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing. *Appl. Energy*, vol. 87, no. 2, pp. 592–598, 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.05.022.
- [4] Ahmed NA, Miyatake M, and Al-Othman AK. Power fluctuations suppression of standalone hybrid generation combining solar photovoltaic/wind turbine and fuel cell systems. *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, no. 10, pp. 2711–2719, 2008, doi: 10.1016/j.enconman.2008.04.005.
- [5] Joseph A, Shahidehpour M. BATTERY STORAGE SYSTEMS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS. in IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006, pp. 1279–1286.
- [6] Poullikkas A. A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 27, pp. 778–788, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.07.017.
- [7] Dubal DP, Ayyad O, Ruiz V, Gómez-Romero P. Hybrid energy storage: The merging of battery and supercapacitor chemistries. *Chem. Soc. Rev.*, vol. 44, no. 7, pp. 1777–1790, 2015, doi: 10.1039/c4cs00266k.
- [8] Kouchachvili L, Yaïci W, and Entchev E. Hybrid battery/supercapacitor energy storage system for the electric vehicles. *J. Power Sources*, vol. 374, no. November 2017, pp. 237–248, 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.11.040.
- [9] Guentri H, Allaoui T, Mekki M and Denai M. POWER management and control of A PHOTOVOLTAIC system with hybrid battery-supercapacitor energy storage BASED ON HEURISTICS METHODS. *Journal of Energy Storage*, Vol.39, pp.102578, 2021.
- [10] Zuo W, Li R, Zhou C, Li Y, Xia J, and Liu J. Battery-Supercapacitor Hybrid Devices: Recent Progress and Future Prospects. *Adv. Sci.*, vol. 4, no. 7, 2017, doi:

Références bibliographiques

- 10.1002/advs.201600539.
- [11] Mesbahi T, Rizoug N, Bartholomeüs P, Sadoun R, Khenfri F, and Le Moigne P. Optimal energy management for a Li-ion battery/supercapacitor hybrid energy storage system based on a particle swarm optimization incorporating nelder-mead simplex approach. *IEEE Trans. Intell. Veh.*, vol. 2, no. 2, pp. 99–110, 2017, doi: 10.1109/TIV.2017.2720464.
- [12] Jing W, Lai C H, Wong W S H, and Wong M L D. A comprehensive study of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for standalone PV power system in rural electrification. *Appl. Energy*, vol. 224, no. January, pp. 340–356, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.106.
- [13] Kollimalla S K, Mishra M K, and Member S. DC Grid Voltage Regulation Using New HESS Control Strategy. *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 772–781, 2016, doi: 10.1109/TSTE.2016.2619759.
- [14] Hu J, Jiang X, Jia M, and Zheng Y. Energy management strategy for the hybrid energy storage system of pure electric vehicle considering traffic information. *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 8, 2018, doi: 10.3390/app8081266.
- [15] Luo X, Wang J, Dooner M, and Clarke J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 511–536, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.09.081.
- [16] Egor Gladkikh . 2015. Optimisation de L'architecture des réseaux de distribution de l'énergie électrique. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes.
- [17] T.Saber,T.Hicham. Etude d'une installation électrique industrielle dans l'usine SPA Biskria ciment. Mémoire de Master. Université Mohamed Khider, Biskra.
- [18] M.Cosson.2016. Stabilité du réseau électrique de distribution. Analyse du point de vue automatique d'un système complexe. Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay.
- [19] A. Doulet.2010. Réseaux de distribution d'électricité - présentation. *Techniques de l'ingénieur : Réseaux électriques et applications*, Mai 2010.
- [20] Enedis. Le réseau électrique : vue d'ensemble. Dernière consultation : 01/06/2016.
- [21] *Technique de l'ingénieur, Condensateurs de puissance (d4 710)*, 1996.
- [22] *Technique de l'ingénieur, Postes à moyenne tension (d 4600)*, 1996.
- [23] B. Enacheanu. 2007. Outils d'aide à la conduite pour les opérateurs des réseaux de distribution, Grenoble.
- [24] M. C. Alvarez-Hérault.2009. Architectures des réseaux de distribution du futur en présence de production décentralisée.Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.

Références bibliographiques

- [25] P. Carrive et A. Doulet, Réseaux de distribution, Ed. Techniques Ingénieur. [En ligne].
- [26] Commission de Régulation de l'Energie. Description générale des réseaux électriques. Dernière consultation : 01/06/2016.
- [27] Damien Thirault. 2009. Architectures des Réseaux de Distribution pour l'Electrification rurale des Pays en Développement. Thèse de doctorat, institut polytechnique de grenoble.
- [28] S.Hamidi. 2018. Etudes et essais pratique des protections numériques installées au niveau de poste d'interconnexion. Mémoire Master, Université Aklimoand Oulhadje, Bouira.
- [29] C.Prévu, R.Jeannot, Schneider «guide de conception des réseaux électrique industriels», Février 1997
- [30] Eric Korsaga , Zacharie Koalaga , Dominique Bonkougou , François Zougmore «Comparaison et détermination des dispositifs de stockage appropriés pour un système photovoltaïque autonome en zone sahéenne » Journal International de Technologie, de l'Innovation, de la Physique, de l'Energie et de l'Environnement vol. 4, n°1, 3
- [31] Mohamed Ansoumane CAMARA 2011 «Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs » Thèse de doctorat, Université Paris-Est
- [32] H. Gualous, R. Gallay, A. Berthon «Utilisation des supercondensateurs pour les stockage de l'énergie embarquée» Laboratoire L2ES, UFC-UTBM-INRETS Bat F, UTBM, rue Thiery-Mieg 90 010 Belfort
- [33] Yasser Diab 2010 «Utilisation de stockage d'énergie pour améliorer les performances des énergies renouvelables» 1 ère conférence Franco-Syrienne sur les énergies renouvelables, Université de Damas, Syrie
- [34] Nathalie Devillers 2012 «Caractérisation et modélisation de composants de stockage électrochimique et électrostatique» HAL Id: tel-00838733
- [35] Frédéric GAILLY 2011 «Alimentation électrique d'un site isolé à partir d'un générateur photovoltaïque associé à un tandem électrolyseur/pile à combustible (batterie H₂/O₂)» Thèse de doctorat, L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE
- [36] A. EDDAHECH (2013) « Modélisation du vieillissement et détermination de l'état de santé de batteries lithium-ion pour application véhicule électrique et hybride » thèse de doctorat, Université bordeaux1.
- [37] M. Doublet, «Batteries Li-ion - Conception théorique», Techniques de l'Ingénieur, Traité de l'électronique, vol. AF6612, p. 14, 2009.

Références bibliographiques

- [38] Margot GAETANI-LISEO 2021 «Prise en compte des systèmes de stockage de l'énergie et de leurs dégradations dans la gestion et le dimensionnement des micro-réseaux : influence de la précision des modèles» Thèse de doctorat, l'Université Toulouse 3 - Paul Sabatier
- [39] G. Caillon, «Accumulateurs portables», Techniques de l'Ingénieur, Traité d'Electronique, vol. E2140, p. 34, 2001.
- [40] H. Ibrahim, A. Ilinca et J. Perron, «Energy storage systems - Characteristics and comparisons», Renewable and sustainable energy reviews, vol. 12, pp. 1221-1250, 2008.
- [41] M. Nehrir et C. Wang, «Modeling and control of fuel cells - Distributed generation applications», IEEE Press, 2009.
- [42] Cédric FERLAT 2009 «Le stockage hydraulique gravitaire et la production hydroélectrique sur les pentes réunionnaises – Etude du stockage de l'énergie photovoltaïque» ARER - Agence Régionale Energie Réunion - Association loi 1901 à but non lucratif – Organisme de formation agréé
- [43] H. Ibrahim (2010) « Etude et conception d'un générateur hybride d'électricité de type éolien-diesel avec élément de stockage d'air comprimé » Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi.
- [44] (25_1) J.I. S. Martín, I. Zamora, J.J. S. Martín, V. Aperribay, P. Eguía (2011) « Energy storage technologies for electric applications » RE&PQJ, Vol.1, No .9, pp. 593-598
- [45] B. MULTON et J. RUER, “Stocker l'Electricité : oui, C'est Indispensable et c'est Possible.Pourquoi, où, Comment ?,” *Publication ECRIN, Contribution au Débat National sur l'Energie.*
- [46] 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. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.068>.
- [47] F. Zaouche, D. Rekioua, J. -P. Gaubert, Z. Mokrani, Supervision and control strategy for photovoltaic generators with battery storage, International Journal of Hydrogen Energy, 42 (30) (2017) 19536-19555. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.107>.
- [48] N. Mendalek, K. Al-Haddad, Photovoltaic system modeling and simulation, IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Toronto, ON. (2017) 1522-1527. doi: 10.1109/ICIT.2017.7915592.
- [49] N. Mebarki, T. Rekioua, Z. Mokrani, D. Rekioua, Supervisor control for stand-alone photovoltaic/hydrogen/ battery bank system to supply energy to an electric vehicle,

Références bibliographiques

International Journal of Hydrogen Energy, 40 (39) (2015) 13777-13788.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.03.024>.

[50] 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*, 9 (1) (2020): 31. <https://doi.org/10.3390/electronics9010031>.

[51] 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. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101760>.

[52] FADLOUN Fadila ,BELKADI Nawel 2009 , Modélisation d'un système énergétique hybride (Photovoltaïque + Batterie) , MÉ MOIRE DE FIN D'É TUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME MASTER EN ELECTROTECHNIQUE-ELECTRONIQUE –AUTOMATIQUE , FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIQUES AIN BEIDA

[53] ALahyani, P. Venet, AGuermazi, andATroudi" Battery ISupercapacitors Combination in Uninterruptible Power Supply (UPS)" iIEEE transactions on power electronics, vol. 28, n04. pp 0885-8993,ApriI2013

[54] L. Zubieta and R. Bonert, "Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 1, pp. 199-205, Jan. IFeb. 2000.

[55] H. Gualous, D. Bouquain, A. Bertbon, and IM. Kauffinann, "Experimental study of supercapacitor serial resistance and capacitance variations with temperature," *J. Power Sources*, vol. 123, pp. 86-93,2003

[56] Kelsey Zenko , 2017 , MPPT Control for Solar Splash Photovoltaic Array , Mechanical Engineering Undergraduate Honors Theses. 67

<https://doi.org/10.1007/s12555-018-0642-4>.

[57] M. G. Villalva, J. R. Gazoli and E. R. Filho, "Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays," 2009 Brazilian Power Electronics Conference, Bonito-Mato Grosso do Sul, 2009, pp. 1244-1254.

[58] P. Chen, M. Yang, T. Sun, PSO-based on-line tuning PID controller for set point changes and load disturbance, *IEEE Congress of Evolutionary Computation (CEC)*, New Orleans, LA. (2011) 1887-1894. doi: 10.1109/CEC.2011.5949845.

Références bibliographiques

- [59] S. K. Kollimalla, M. K. Mishra, N. L. Narasamma, Design and Analysis of Novel Control Strategy for Battery and Supercapacitor Storage System, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 5 (4) (2014) 1137-1144. doi: 10.1109/TSTE.2014.2336896.
- [60] X. Zhou, Q. He, Modeling and Simulation of Buck-Boost Converter with Voltage Feedback Control, *MATEC Web of Conference*. 31 (2015) 1-6. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20153110006>.
- [61] J. J. E. Oviedo, T. Boelen, P. van Overschee, Robust advanced PID control (RaPID): PID tuning based on engineering specifications, *IEEE Control Systems Magazine*. 26 (1) (2006) 15-19. doi: 10.1109/MCS.2006.1580148.
- [62] H. Du, X. Hu, C. Ma, Dominant Pole Placement with Modified PID Controller, *International Journal of Control, Automation and Systems*. 17 (2019) 2833-2838.

Résumé

En raison de la propriété intermittente des énergies renouvelables qui affecte leur instabilité et la variation de la demande de charge, les sources renouvelables ne peuvent pas à elles seules répondre aux besoins de charge. Pour assurer l'alimentation électrique et la continuité de charge avec une source d'énergie intermittente comme le solaire, les systèmes hybrides de stockage d'énergie (HESS) sont associés à des systèmes d'alimentation autonomes. Généralement, les systèmes de stockage hybride améliorent les performances de l'installation d'énergie photovoltaïque. Ce travail porte sur l'intérêt de l'association supercondensateur-batteries pour l'installation d'énergie photovoltaïque. Trois scénarios de simulation ont été testés. Dans le premier scénario, l'installation PV était utilisée directement pour alimenter la charge. Des batteries ont été introduites dans le système lors du deuxième scénario pour prouver leur importance et leur rôle efficace. Dans le troisième scénario, un supercondensateur est inséré avec les batteries pour montrer l'intérêt du système hybride de stockage électrique de l'installation PV.

Mots clés : Supercondensateur ; Photovoltaïque ; Commande, système de stockage hybride

Abstract

Due to the intermittent property of renewable energies, that effects its instability and the variation in load demand, renewable sources cannot alone meet the load needs. To assure power supply and load continuity with an intermittent power source like solar, the hybrid energy storage systems (HESSs) is associated to standalone power systems. Generally, the HESSs enhance the performances of the photovoltaic energy installation. This work is focused on the interest of the supercapacitor-batteries combination for the photovoltaic energy installation. Three simulation scenarios have been tested. In the first scenario, the PV installation was used directly to supply the load. Batteries were introduced into the system during the second scenario to prove their importance and effective role. In the third scenario, a supercapacitor is inserted to batteries to show the interest of the hybrid electrical storage system for the PV installation.

Keywords: Supercapacitor; Photovoltaic; Control, energy storage

ملخص

نظراً للخاصية المتقطعة للطاقات المتجددة التي تؤثر على عدم استقرارها اعداد الحمولة الكهربائية والتباين في الطلب على الأحمال، لا يمكن للمصادر الطاقة المتجددة وحدها تلبية احتياجات الحمل. لضمان إمداد الطاقة واستمرارية الحمل من خلال مصدر طاقة منقطع مثل الطاقة الشمسية، ترتبط أنظمة تخزين الطاقة الهجينة بأنظمة الطاقة المستقلة. بشكل عام، تعمل أنظمة تخزين الطاقة الهجينة على تحسين أداء الطاقة الكهروضوئية. يركز هذا العمل على إبراز أهمية أنظمة تخزين الطاقة الهجينة لتكوين الطاقة الكهروضوئية، هاته الأنظمة التي تعتبر في الغالب بطاريات مركبة مع مكثفات فائقة. تم اختبار ثلاثة سيناريوهات محاكاة. في السيناريو الأول، تم استخدام الطاقة الكهروضوئية مباشرة لتزويد الحمل. تم إدخال البطاريات في النظام خلال السيناريو الثاني لإثبات أهميتها ودورها الفعال. في السيناريو الثالث، يتم إدخال مكثف فائق مع البطاريات لإظهار أهمية نظام التخزين الكهربائي الهجين للتركيبات الكهروضوئية.

الكلمات المفتاحية: مكثف فائق، الطاقة الشمسية، التحكم، نظام التخزين الكهربائي الهجين