



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة العربي التبسي - تيسة
Université Larbi Tebessi - Tébessa
معهد المناجم
Institut des Mines
قسم الإلكتروميكانيك
Département Electromécanique



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master

Filière : Electromécanique

Option : Electromécanique

Modélisation et simulation d'un système de stockage photovoltaïque

SAYOUD RASSIM et ALLOUCHE SALAH Eddine

Devant le jury :

DOUADI RABAH	MAA	Président	Université Larbi TebessiTébessa
MELKIA CHAOUKI	MAA	Encadreur	Université Larbi TebessiTébessa
ATTIA MOUSSA	MAA	Examineur	Université Larbi TebessiTébessa

Promotion 2020-2021

Remerciements

Nous remercions a Dieu tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience afin d'aboutir à la réalisation de notre projet Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos remerciements les plus chaleureux à notre promoteur Dr. Melkia, chaouki qui n'ai jamais épargné ni de leur temps ni de leur effort pour nous aider à la réalisation de ce projet, Nous tenons à remercier toute l'équipe du laboratoire de recherche STI, les doctorants Sayoud Ali et Hatti Rachid . Université Chikh Larbi Tébessi de Tébessa , Nous remercions aussi les membres du jury Mr, Daoudi Rabah et Mr, Attia Moussa pour avoir accepté de corriger et de juger notre travail Que ceux que nous n'avons pas cités, trouvent ici l'expression de notre sincère reconnaissance.

Dédicaces

A Nos parents

A Nos frères et sœurs

A Nos Amis(E)

A Tout être cher à nos cœurs

Sommaire

Table des matières.....(I)

Liste des figures.....(IV)

Liste des tableaux.....(VIII)

Introduction générale

Introduction générale..... .01

Chapitre I : Etat de l'art de stockage.

I.1. Introduction.....03

I.2. Généralités sur le stockage d'énergie électrique.....04

I.2.1 Définition.....04

I.2.2 Historique sur les différents systèmes de stockage.....04

I.3. Types de stockage.....06

I.3.1 Classification de moyens de stockage.....06

I.3.2 Besoins centralisés et décentralisé.....07

I.4. Les technologies de stockage.....08

I.4.1 stockage direct.....08

I.4.2 Stockage indirect.....11

I.4.3. Méthodologie de comparaison.....19

I.4.4. Critères de choix des technologies de stockage pour les applications photovoltaïques

.....23

I.4.5. Choix des dispositifs de stockage.24

I.4.6. Comparaison selon l'indice de performance... ..24

I.5. Conclusion.....30

Chapitre II : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage.

II.1. Introduction.....31

II.2. Système autonome avec stockage.....33

II.2.1. Description du système à étudier.....33

II.3. Généralité sur la production d'énergie photovoltaïque.....34

Sommaire

II.3.1. L'énergie solaire	34
II.3.2. Le générateur photovoltaïque.....	35
II.3.2.1. Principe photovoltaïque.....	35
II.3.2.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	38
II.3.2.3. Facteurs influençant le fonctionnement d'une cellule Photovoltaïque.....	42
II.3.3. Le panneau solaire.....	44
II.3.4. Point de puissance maximale, rendement, facteur de forme.....	46
II.4. La commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT)).....	48
II.4.1. La méthode perturbation & Observation (PO).....	48
II.5. Les convertisseurs statiques	51
II.5.1. Convertisseur DC/DC (Hacheur).....	51
II.5.2. Modélisation du hacheur survolteur (BOOST)	51
II.6. Le dispositif de stockage.....	54
II.6.1. Le modèle électrique simple de la batterie	54
II.6.2. Le modèle « CIEMAT »	55
II.6.3. Autonomie du système	56
II.7. Gestion d'énergie photovoltaïque	57
II.8. Conclusion	57
Chapitre III : Dimensionnement et gestion de système photovoltaïque.	
III.1. Introduction.....	58
III.2. Schéma global du système à étudier	58
III.3. Dimensionnement du système photovoltaïque	58
III.3.1. Choix de la méthode de dimensionnement.....	59
III.3.2. Dimensionnement du champ photovoltaïque.	59
III.3.3. Dimensionnement du stockage.....	60
III.4. Gestion de l'énergie entre les différents composants du système.....	61
III.5. Gestion des batteries de stockages.....	61
III.6. Algorithme de gestion.....	62
III.7. Bloc de gestion sous Matlab/Simulink.....	64
III.8. Intérêt du stockage.....	65

Sommaire

III.9. Résultats de la simulation du système.....	65
III.9.1. Simulation du système global.....	65
III.9.2. Résultats de simulation pour une journée ensoleillée.....	68
III.10. Conclusion.....	75
Chapitre IV : présentation et étude de stage.	
IV.1. Présentation de stage.....	76
IV.2. Energie solaire.....	78
IV.3. Etude d'un projet photovoltaïque avec stockage	79
IV.3.1. Cahier de charge de récepteurs	81
Conclusion générale	87
Références bibliographiques	88
Annexe	92
Résumé	94

Liste des figures :

Chapitre I

Figure. I.1 : a) la pile de Volta, b) la Pile de Leclanché, c) La première batterie de Gaston planté.....	05
Figure. I. 2 : Chronologie de l'évolution des différents systèmes de batteries.....	06
Figure. I. 3 : Classification des dispositifs de stockage.....	08
Figure.I.4 : Structure d'un condensateur.....	09
Figure.I.5 : Structure d'un supercondensateur.....	09
Figure.I.6 : Principaux éléments d'un dispositif de stockage d'énergie sous forme magnétique par bobine supraconductrice.....	10
Figure.I.7 : Principe d'un accumulateur électrochimique.....	11
Figure.I.8 : schéma de principe de la batterie lithium-ion Li-ion.....	12
Figure.I. 9 : principe de fonctionnement d'un accumulateur plomb-Acide.....	13
Figure.I.10 : Batterie au plomb pour stockage de l'énergie pour application photovoltaïque.....	13
Figure. I.11 : Vue éclatée d'une batterie nickel-cadmium Ni-Cd industrielle [Robert et Anzieu 2005]	14
Figure.I.12 : Différentes possibilités de restitution de l'électricité à partir de l'hydrogène stocké.....	15
Figure.I.13 : Schéma de principe de fonctionnement au cas où il est associé aux PV.....	16
Figure.I.14 : Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé.....	17
Figure.I.15 : Principaux composants d'un système de stockage électromécanique inertiel.....	18
Figure. I.16 : Schéma de principe d'une installation de stockage thermique.....	19
Figure.I.17 : Autonomie des technologies de stockage en fonction de leur puissance.....	20
Figure.I.18 : Comparaison en termes de puissance et de capacité en fonction du temps de décharge.....	21
Figure.I.19 : Comparaison entre l'efficacité énergétique et la durée de vie.....	21
Figure.I.20 : Comparaison entre les coûts d'investissements par unité de puissance et par unité d'énergie.....	22
Figure.I.21 : Comparaison selon les coûts d'investissements calculés par cycle.....	22

Liste des figures

Figure. I.22 : Niveau de maturité technologique des différentes technologies de stockage d'énergie.....	23
Figure.I.23 : Répartition des différents critères.....	25
Figure.I.24 : Répartition des différents critères pour une application autonome à grande échelle.....	28
Figure.I.25 : Indices de performances des technologies de stockage applicables aux systèmes suivant deux catégories d'applications.....	29

Chapitre II

Figure.II.1 : chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque par batteries et supercondensateurs.....	32
Figure. II.2 : Schéma de système.....	33
Figure.II.3 : spectres solaires selon.	34
Figure. II.4 : Principe de la conversion photon-électron dans un système à deux niveaux D'énergie.....	37
Figure. II.5 : Production d'électricité par la séparation électron-trou.....	37
Figure II.6 : Modèle simplifié d'une cellule PV.....	38
Figure. II.7 : Modèle de la cellule PV avec prise en compte de perte en tension et courant de fuit.....	39
Figure.II.8 : Caractéristiques I-V, P-V, d'un module PV (MPP).....	41
Figure. II.9 : Test de la cellule PV sous Simulink.....	42
Figure.II.10 : Caractéristique $I=f(V)$ d'un module de cellules photovoltaïque au silicium pour une variation d'ensoleillement.....	43
Figure.II.11 : Caractéristique $I=f(V)$ d'un module de cellules photovoltaïque au silicium pour une variation de la température.....	44
Figure. II.12 : Modèle Simulink d'un panneau PV de 60W.....	45
Figure. II.13 : Mise en évidence du MPP.....	46
Figure. II.14 : Caractéristique idéale d'une cellule P-V.....	47
Figure. II.15 : Caractéristique $P=f(V)$ et fonctionnement de la méthode PO.....	49
Figure II.16 : Organigramme de l'algorithme MPPT de la méthode PO.....	50
Figure II.17 : Schéma bloc de mppt P&O sous Simulink.....	50
Figure II.18 : Schéma de convertisseur élévateur « Boost »	51

Liste des figures

Figure. II.19 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.....	52
Figure. II.20 : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.....	52
Figure II.21 : Schéma électrique boost ouvert.....	53
Figure II.22 : Schéma bloc d'un hacheur survolteur.....	53
Figure. II.23 : Schéma bloc d'une batterie R_C.....	54
Figure. II.24 : Modèle R-C de la batterie.....	54
Figure. II.25 : Schéma équivalent de nb éléments en série.....	55

Chapitre III

Figure.III.1 : Schéma de l'installation.....	58
Figure.III.2 : Plage de fonctionnement pour les batteries utilisées.....	61
Figure.III.3 : Diagramme de l'algorithme de gestion proposé.....	63
Figure. III.4. Schéma bloc présente les modes du système.....	63
Figure. III.5 : Bloc de gestion en Simulink.....	64
Figure. III.6 : Schéma Matlab/Simulink du système global.....	66
Figure. III.7 : Tension du générateur photovoltaïque.....	67
Figure. III.8 : Courant du générateur photovoltaïque.....	67
Figure. III.9 : Puissance du générateur photovoltaïque.....	68
Figure. III.10 : Ensoleillement d'une journée.....	68
Figure. III.11 : Tension de la batterie.....	69
Figure. III.12 : Courant de la batterie.....	69
Figure. III.13 : Allure de la puissance disponible.....	70
Figure. III.14 : Allure de la puissance de charge.....	70
Figure. III.15 : Allures des puissances (Photovoltaïque, charge, disponible)	71
Figure. III.16 : Fonctionnement de l'interrupteur (K1)	72
Figure. III.17 : Fonctionnement de l'interrupteur (K2)	72
Figure. III.18 : Fonctionnement de l'interrupteur (K3)	72
Figure. III.19 : Fonctionnement du mode 1.....	73

Liste des figures

Figure. III.20 : Fonctionnement du mode 2.....	73
Figure. III.21 : Fonctionnement du mode 3.....	73
Figure. III.22 : Fonctionnement du mode 4.....	74

Chapitre IV

Figure. IV.1 : la direction de la cimenterie de Tébessa.....	77
Figure. IV.2 : panneaux photovoltaïques exemplaires.....	78
Figure. IV.3 : Bilan des puissances Auberge du Charmant Som (Isère).....	80
Figure. IV.4 : Représente le choix des câbles.....	83
Figure. IV.5 : Branchement et couplage des panneaux et les batteries.....	85
Figure. IV.6 : Banc d'essai Système PV avec stockage (batteries plomb acide)	86

Liste des tableaux :

Chapitre I : Etat de l'art de stockage

Tableau.I.1 : Formes d'énergie intermédiaires de stockage [Marquet 1998]	06
Tableau.I.2 : Les différentes situations de stockage de l'énergie électrique.....	07
Tableau.I.3 : Comparaison de quelques technologies d'accumulateurs électrochimique...15	
Tableau.I.4 : Données technico-économiques pour les principales technologies de stockage...20	
Tableau.I.5 : Matrice élémentaire de décision pour le critère de coût.....26	
Tableau.I.6 : Matrice de décision élémentaire pour le critère de cyclabilité.....26	
Tableau.I.7 : Matrice globale de décision (petite échelle)	27
Tableau.I.8 : Matrice globale de décision (moyenne échelle)	29

Chapitre III : Dimensionnement et gestion de système photovoltaïque

Tableau.III.1 : Schéma de l'installation.....	60
Tableau.III.2 : Les différents modes de fonctionnement.....	62

Chapitre IV : présentation et étude de stage

Tableau. IV.1 : Récepteur alimentée par onduleur.....	81
Tableau. IV.2 : Récepteur alimentée par groupe électrogène.....	81

Liste des symboles et abréviations

Symboles :

VD :	tension de diffusion sur une jonction.
ND :	concentration des donneurs
Ni :	concentration intrinsèque
NA :	concentration des trous
Voc :	La tension en circuit ouvert.
Isc :	le courant de court circuit
Rs :	Resistance en série.
Tr :	température de référence de cellule.
K :	constante de Boltzmann.
Q :	charge élémentaire.
MPP	Maximum power point
V _{pv} :	la tension de la diode
Q _{batt} :	la quantité de charge électrique en Coulomb,
I :	le courant a travers la capacité,
t :	le temps de fonctionnement,
C :	la valeur de la capacité en Farad,
V :	la différence de potentiel correspondant a une plage de l'état de charge de la batterie allant de 0% a 100%. Nous considérons V=2V pour une batterie au plomb de 12V.
E :	est la puissance du rayonnement solaire reçu par le capteur.

Liste des symboles et abréviations

AC:	est la surface du capteur.
Ppv :	Puissance photovoltaïque.
Pmpp :	Puissance au point de puissance maximale (W)
Pch :	Puissance de la charge
Pdisp :	Puissance disponible
d :	le rapport cyclique du hacheur
p&O :	perturbation et observation.
Vi :	la tension d'entrée.
Vo :	la tension de sortie.
Vl :	la tension travers L.
Ii :	le courant d'entrée.
Io :	le courant de sortie
L :	l'inductance.
C1 :	capacité 1.
C2 :	capacité 2.
Bj :	les besoins énergétiques journaliers [Wh].
Aut :	le nombre de jour d'autonomie.
Ubat :	la tension nominale des batteries [V].

Liste des symboles et abréviations

η_b :	le rendement énergétique des batteries.
Db :	la profondeur de décharge des batteries.
Npv :	nombre de panneaux photovoltaïques.
Ppv :	Puissance des panneaux photovoltaïques
Ppv, u :	Puissance du panneau photovoltaïque unitaire
ENT :	Entier
Eele :	Energie électrique requise pour le pompage.
SOC :	state of charge
Nj :	Nombre de jour d'autonomie.
PDD :	Profondeur de décharge de la batterie.
η_{bat} :	Rendement de la batterie.
Ubatt :	Tension de la batterie.
Nb :	Nombre de batterie.
Cbatt :	Capacité unitaire.

Abréviation :

AC : Alternatif Current (Courant Alternatif (CA)).

DC : Direct Current (courant continu (CC))

MPPT : Maximum Power Point Tracking

MPP : anglais, Maximum Power Point

Introduction

Générale

Introduction générale

La demande croissante en énergie et l'appauvrissement des énergies fossiles impliquent de trouver de nouvelles sources d'énergie propres et durables. Les énergies renouvelables, notamment d'origine solaire et éolienne, pourraient répondre à cette attente. Des systèmes permettant la conversion de l'énergie solaire ou éolienne en énergie électrique utilisable prennent une part de plus en plus grande même si elle reste mineure par rapport à l'électricité produite par les centrales thermiques et nucléaires. Les systèmes de conversion sont divers, ils peuvent être reliés au réseau, ou bien alimenter un dispositif sur un site isolé. Les sources d'énergies renouvelables ont l'avantage d'être gratuites et inépuisables mais présentent une intermittence qu'il est nécessaire de pallier avec un dispositif de stockage de l'énergie électrique, qui doit également être adapté à la restitution de l'énergie électrique à travers la charge utilisée.

Ces dernières années, l'installation de dispositifs de conversion photovoltaïque est en pleine progression. Ces dispositifs trouvent des applications très diverses comme la fourniture d'électricité domestique, l'alimentation en électricité de capteurs ou de pompes solaires. Le stockage de l'énergie photovoltaïque est principalement assuré par les batteries, même si d'autres moyens sont envisageables. **Les batteries** ont une énergie massique élevée. Mais elles nécessitent un entretien assez contraignant avec une durée de vie relativement faible (compter 5 à 10 ans) et surtout ne sont pas toujours adaptées à l'usage effectué. Ainsi, des applications photovoltaïques nécessitant des pics de puissance ou la régulation d'une puissance électrique ne peuvent pas être envisagées par de simples batteries ayant une dynamique trop lente. Les appels de puissance importants peuvent être obtenus par la nouvelle génération des supercondensateurs, de densités de puissance plus élevées, apparue dans les années 90. Les **supercondensateurs** ont commencé à être utilisés pour alimenter de manière ponctuelle et importante des composants à faible énergie spécifique dans les domaines informatique et des télécommunications. Plus récemment, grâce à leurs temps de réponse de l'ordre de 1 à 10 s et à leur puissance active élevée, les supercondensateurs ont permis le développement des véhicules hybrides, l'énergie de freinage étant récupérée par les supercondensateurs qui la restitue pour les pics de puissance nécessaires au démarrage du moteur.

Fabriqués avec des matériaux moins polluants que les batteries, de maintenance plus légère avec une durée de vie plus importante, l'intégration des supercondensateurs dans les systèmes de conversion de l'énergie photovoltaïque semble inéluctable. Malgré tout, les supercondensateurs sont difficilement utilisables seuls et sont généralement couplés à des batteries ou à d'autres sources d'énergie comme dans les véhicules hybrides.

Cette thèse s'efforce de répondre à cette problématique en ayant comme objectif **l'établissement d'un modèle de stockage de l'énergie photovoltaïque par des différents moyens de stockage** à la fois suffisamment précis et accessible afin

Introduction générale

d'envisager l'intégration des **supercondensateurs et les batteries** dans des chaînes de conversion de l'énergie solaire.

Pour atteindre cet objectif, **quatre chapitres** sont proposées :

Dans notre travail, nous allons nous intéresser à l'étude de stockage d'un système photovoltaïque (autonome) avec la commande de Poursuite du Point de Puissance Maximale (PPPM) connu en anglais par le terme Maximum Power Point Tracking (MPPT), et la gestion de cette énergie pour une optimisation d'un système de pompage.

Pour atteindre cet objectif quatre chapitres sont proposées :

Dans le chapitre I, nous présentons une généralité sur l'état de l'art de stockage ; les différentes technologies de stockage de l'énergie électrique sont présentées, notamment celles du stockage à petite échelle et grande échelle. L'intérêt du stockage d'électricité photovoltaïque par batterie et super condensateur.

Dans le chapitre II, nous présentons des généralités sur le photovoltaïque, sur les convertisseurs ainsi que les commandes MPPT les plus utilisées, et système de stockages .et on a consacré à la modélisation, et la simulation de tous les éléments du système étudié (le panneau photovoltaïque, le hacheur «Boost», la batterie).

Le chapitre III, nous présenterons des méthodes de dimensionnement et à la conception d'un algorithme de gestion pour l'ensemble de l'installation. Puis nous avons donnez l'interprétation des résultats de simulation. Nous terminons notre mémoire par une conclusion générale et des perspectives.

Le chapitre VI, est consacré à une étude sur un petit projet qui nous proposons dans notre stage guidé par le maître de stage qui contient une partie de calcul a propose des produits et matériels d'électricité à travers d'un système photovoltaïque avec stockage alimenté a des différents composants (pompe, lampes, pc) de société (sct).

Enfinement, nous terminerons ce manuscrit par les conclusions générales et quelques perspectives pour des travaux futur dans ce domaine.

Chapitre 01 :

Etat de l'art de stockage

I.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. Le stockage de l'énergie est aujourd'hui reconnu comme un élément clé de la chaîne d'approvisionnement énergétique moderne.

Cela est principalement dû au fait qu'il peut renforcer la stabilité du réseau, augmenter la pénétration des ressources énergétiques renouvelables, améliorer l'efficacité des systèmes énergétiques, conserver les ressources énergétiques fossiles et réduire l'impact de la production d'énergie sur l'environnement. Bien que de nombreuses technologies de stockage d'énergie aient déjà été passées en revue dans la littérature, ces technologies ont actuellement différents niveaux de maturité technologique et quelques-unes ont déjà fait leurs preuves pour une application à l'échelle commerciale.

La plupart des travaux de synthèse sur le stockage de l'énergie évoquent toutefois en détail ces technologies qu'il en reste peu d'informations sur l'application réelle de ces technologies à des fins de stockage d'énergie.

I.2.GENERALITES SUR LE STOCKAGE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

I.2.1. Définition :

Le stockage de l'énergie est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Il permet d'ajuster la « production » et la « consommation » d'énergie en limitant les pertes. L'énergie, stockée lorsque sa disponibilité est supérieure aux besoins, peut être restituée à un moment où la demande s'avère plus importante. Face à l'intermittence ou la fluctuation de production de certaines énergies, par exemple renouvelables, cette opération permet également de répondre à une demande constante.

I.2.2. Historique sur les différents systèmes de stockage :

Intéressons-nous tout d'abord à l'histoire de la batterie, depuis son invention jusqu'à nos jours, les références [1.2] nous ont permis d'avoir un large aperçu sur le sujet. En effet, en 1800, Alessandro Volta fut le premier à réaliser un système de stockage d'électricité avec sa célèbre « pile » de rondelles métalliques alternant le cuivre et le zinc, et entre lesquelles un tissu imbibé de saumure assurait le rôle de séparateur et d'électrolyte. Une photographie de la pile de Volta est représentée sur la (figure 1- a). En 1829, le français Antoine César Becquerel proposa une évolution de la pile de Volta, permettant d'éviter les phénomènes de polarisation provoquant la formation de petites bulles d'hydrogène sur l'électrode de cuivre, entravant le passage du courant électrique. Pour ce faire, il élaborait un agencement différent : la plaque de zinc baignant dans de l'eau acidulée était enfermée dans un sac de baudruche, fabriqué à partir du gros intestin d'un bœuf, ce qui permettait d'obtenir une pellicule très fine.

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

La première pile secondaire, c'est-à-dire rechargeable, que nous appelons plus communément « batterie », fut inventée par Gaston Planté, chimiste français, en 1859. Il réussit une succession de cycles de décharge/charge en reliant les accumulateurs entre eux de façon à obtenir une batterie au plomb. Malgré son prix attractif, cette batterie présentait des utilisations assez limitées du fait de sa faible énergie spécifique (c'est-à-dire la quantité d'énergie stockée par unité de masse) et du nombre de cycles assez limité qu'elle

ETAT DE L'ART DE STOCKAGE

permettait d'atteindre. Ce dispositif est, de ce fait, principalement utilisé dans les voitures utilisant un moteur thermique.

C'est en 1899 que Waldemar Jungner inventa la première batterie au nickel-cadmium. Plusieurs versions dérivées de cette pile suivirent, comme par exemple les nickel-zinc, nickel-fer ou encore nickel-hydrogène. Ces batteries permettent d'atteindre de bien meilleures performances en termes de nombre de cycles réalisables ainsi que d'énergie spécifique. En 1988, une nouvelle batterie dérivée du nickel-cadmium voit le jour : la batterie nickel-métal-hydrure. Ce principe ouvre la voie aux batteries lithium-ion qui sont énormément utilisées à l'heure actuelle. En effet, ce type de batterie a amené l'utilisation d'une électrode d'insertion, cela signifie qu'au lieu de

« **consommer** » une des électrodes au cours de la réaction, une électrode, dans ce cas l'anode, est capable d'absorber et de désorber les ions actifs dans les réactions électrochimiques. Cela permet de ne pas consommer de métal. Cette technologie a été utilisée pour la première voiture hybride, la Toyota Prius, malgré son coût plus élevé et son énergie spécifique inférieure.

La première batterie alcaline primaire a été développée au milieu des années 1960.

Dans cette pile, le charbon de la pile Leclanché est remplacé par du dioxyde de manganèse et le chlorure d'ammonium par de l'hydroxyde de potassium, le potassium étant un élément alcalin. Cette batterie présente certains avantages par rapport à celle proposée par Georges Leclanché elle permet de fournir une intensité plus élevée pendant une plus longue période.

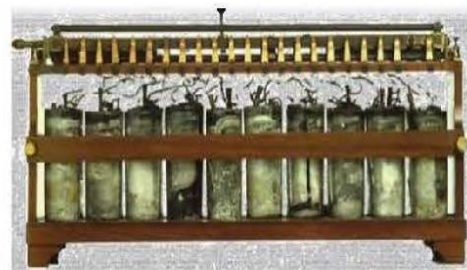
Les premières batteries au lithium métallique sont alors apparues en 1973. Grâce au développement des électrodes d'intercalation, le matériau actif est absorbé ou désorbé à l'intérieur même de l'électrode au lieu de consommer celle-ci ; le lithium s'est avéré être un bon matériau étant donné qu'il s'agit du plus petit des métaux. L'énergie spécifique d'une batterie lithium-métal est plus que doublée par rapport aux chimies précédemment utilisées. Ainsi une telle batterie peut présenter une énergie spécifique de 200 Wh/kg, là où une batterie au plomb présentera une énergie spécifique de 20 à 35 Wh/kg, 50 à 80 Wh/kg pour une batterie nickel-cadmium et 80 Wh/kg pour une batterie nickel-métal hydrure. La production de ces batteries lithium-métal a cependant été arrêtée suite à certains problèmes de sécurité. Cependant des solutions ont été trouvées : la batterie lithium-polymère et la batterie lithium ion.



a)



b)



c)

Figure. I.1 a) la pile de volta, b) la pile de Leclanché, c) la première batterie de Gaston planté

[2]

ETAT DE L'ART DE STOCKAGE

C'est la compagnie Sony qui lança la production en masse des batteries lithium-ion en 1991. Elles sont, depuis lors, largement utilisées dans toute une série de domaines tels que les Smartphones, les ordinateurs portables, les caméras ...

Notons que la plupart de ces batteries sont toujours utilisées à l'heure actuelle, le choix de la chimie dépendant de l'application qui sera faite de la batterie. Ainsi certaines applications préféreront un coût plus faible, d'autres une sécurité optimale ou encore une capacité plus grande [3].

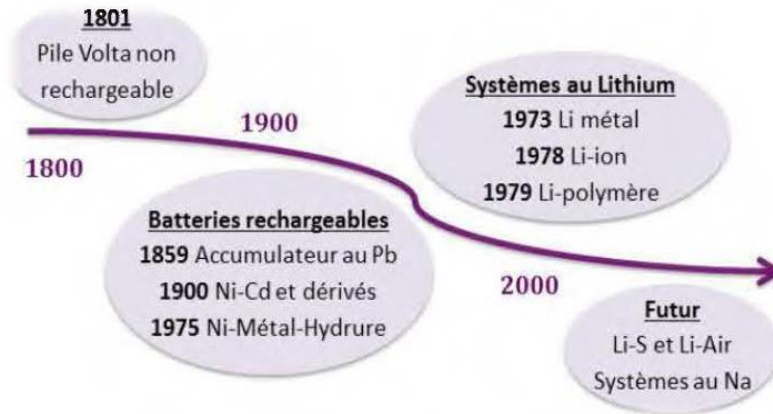


Figure. I. 2. Chronologie de l'évolution des différents systèmes de batteries [3]

I.3. Les types de stockage

I.3.1. Classification de moyens de stockage :

Le stockage de l'énergie électrique passe le plus souvent par une **forme d'énergie intermédiaire** (gravitaire, de compression, chimique, cinétique, thermique...) que l'on accumule, puis transforme à nouveau en électricité. Seules l'énergie électrostatique avec les condensateurs ou supercondensateurs, et l'énergie électrodynamique avec le stockage magnétique supraconducteur, font quelque peu exception en stockant des charges électriques statiques ou en mouvement. Les systèmes de stockage et les différentes formes d'énergies intermédiaires sont présentés dans le tableau I.1 suivant. Ils seront détaillés dans le titre suivant (technologie de stockage).

Énergie intermédiaire	Systèmes de stockage
Gravitaire	Pompage hydraulique
Thermique	Stockage de chaleur latente ou sensible avant production électrique
De pression	Compression d'air
Chimique	Batteries d'accumulateurs électrochimiques
	Stockage H ₂ par électrolyse et pile à combustible
Cinétique	Volant d'inertie
Electromagnétique	Courant permanent à bobine supraconductrice
Electrostatique	Condensateur classique
	Supercondensateur à électrolyte double couche

Tableau. I.1. Formes d'énergie intermédiaire de stockage [3].

ETAT DE L'ART DE STOCKAGE

I.3.2. Besoins centralisés et décentralisés :

Le stockage de l'énergie électrique a deux objectifs : économique (recherche du coût minimum de l'énergie électrique) et technologique (équilibre de la production et de la consommation de l'énergie). Le stockage de l'énergie électrique produite est le seul moyen de gérer en temps réel, avec la sécurité maximale, la production d'énergie électrique sur un réseau de transport.

Les besoins et technologies de stockage d'énergie diffèrent suivant qu'ils sont centralisés et massifs, ou décentralisés et de quantité modeste [4]. Le tableau I.2-donne les ordres de grandeur pour la puissance et la durée de stockage pour ces différentes situations [5].

Les besoins centralisés : apparaissent dans le cas où la gestion, sur le réseau de transport, de l'énergie électrique produite par les centrales actuelles, permet d'équilibrer en temps réel la production et les demandes variables journalières, hebdomadaires et saisonnières. Ils servent par ailleurs à sécuriser la production face aux fluctuations d'une production importante et nécessairement intermittente d'énergie électrique d'origine renouvelable.

Les besoins décentralisés : sont variés et répondent à des applications stationnaires précises comme l'alimentation électrique sans coupure possible ou le stockage pour pallier localement à l'intermittence d'une source d'énergie renouvelable ou bien encore pour des applications mobiles (transports).

Parmi les besoins centralisés, les **applications stationnaires** concernent les équipements de production de l'énergie électrique alimentant un réseau de transport d'énergie. Ainsi que les équipements locaux de production d'énergie électrique à partir de sources d'énergies renouvelables (éoliennes, solaires...). Ces équipements sont isolés ou connectés à un réseau électrique dans le but de pallier l'intermittence aléatoire ou journalière de l'énergie produite. Les quantités d'énergie mises en jeu sont de l'ordre de quelques MWh. Pour un site isolé, la rétention de la charge en énergie intermédiaire doit être suffisamment grande pour l'application et le type d'énergie renouvelable.

<p style="text-align: center;">Besoin en stockage pour une ferme connectée au réseau</p> <p>Puissance : 100 KW à quelques 10 MW Durée : quelques minutes à plusieurs heures Sollicitation : en continu et/ou plusieurs fois/jour Qualité de la tension : absence de creux de tension, coupures brèves de quelques secondes</p>
<p style="text-align: center;">Besoin en stockage pour un site isolé</p> <p>Puissance : quelques 100 W à plusieurs kW Durée : quelques secondes à plusieurs heures Sollicitation : en continu et/ou plusieurs fois/jour (si source d'énergie renouvelable non disponible)</p>
<p style="text-align: center;">Besoin en stockage pour applications mobiles</p> <p>Puissance : quelques 100 W à quelques 100 kW Durée : quelques secondes à plusieurs heures Sollicitation : en continu et/ou plusieurs fois/jour</p>

Tableau. I.2. Les différentes situations de stockage de l'énergie électrique [5].

I.4. Les technologies de stockage

Le stockage de l'électricité peut être réalisé efficacement. Initialement, il doit être transformé en une autre forme d'énergie stockable et être reconverti en cas de besoin. Il existe de nombreuses techniques possibles de stocker de l'énergie, que l'on retrouve dans pratiquement toutes les formes d'énergie: mécanique, chimique et thermique. Les technologies de stockage répondant à des critères techniques et économiques spécifiques, qui varient considérablement en fonction des applications et des besoins, seront évidemment de types différents. Les technologies sont nombreuses, mais une étude comparative est rendue difficile par le fait que, entre autres, leur niveau de développement varie considérablement.

Il existe différentes technologies de stockage d'énergie électrique, chacune adaptée à leur domaine d'application. En général, plusieurs critères sont analysés lors de la considération et du choix des technologies du système de stockage pour une application spécifique. Ces critères incluent la durée de vie, le cycle de vie, la puissance et l'énergie, les taux d'autodécharge, l'impact sur l'environnement, l'efficacité du cycle, le coût en capital, la durée de stockage et la maturité technique, Selon la nature du stockage, on peut distinguer le stockage direct et le stockage indirect comme l'illustre la classification suivante; tandis que leur comparaison est détaillée par le (tableau I-3) ci-dessous.

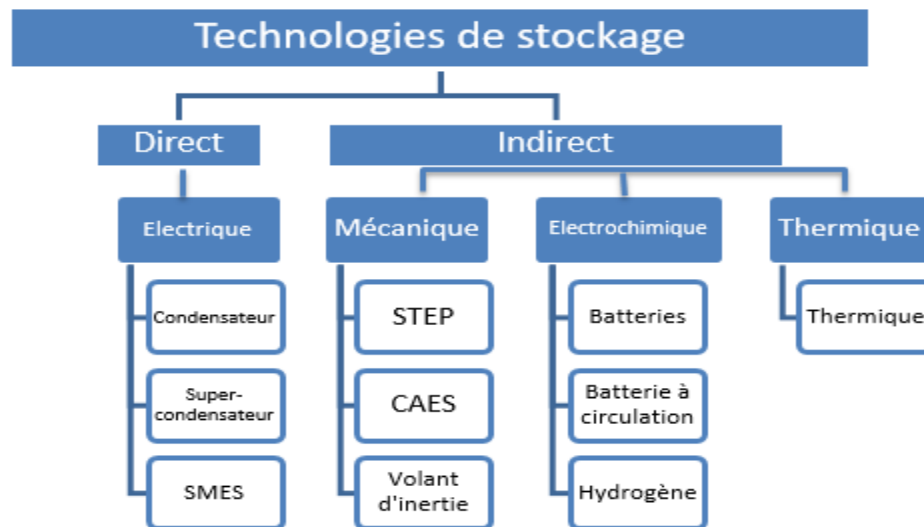


Figure. I. 3 : Classification des dispositifs de stockage [11].

I.4.1. Stockage direct

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

a. Condensateur

Un condensateur est un composant de stockage électrostatique. La structure d'un condensateur est donnée par la Figure I.4.

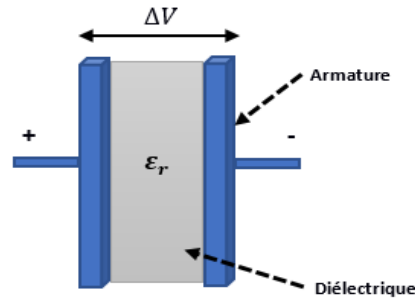


Figure. I.4 : Structure d'un condensateur [11].

***Principe :** le condensateur permet d'emmagasiner transitoirement une charge électrique entre deux électrodes séparées par un isolant diélectrique. En fonction de la nature des électrodes et de l'isolant, on peut distinguer plusieurs familles de condensateurs : le condensateur céramique, le condensateur électrochimique ou électrolytique et le condensateur à film plastique.

***Propriétés et applications :** les condensateurs ont une capacité de stockage très faible (de 1 pF à 1 F), une densité énergétique volumique de l'ordre de 0,1 à 0,2 Wh/l et un faible temps de décharge de l'ordre de quelques fractions de millisecondes [6].

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

b. Supercondensateur

Un supercondensateur est formé de deux collecteurs métalliques généralement en aluminium, de deux électrodes conductrices électroniques à très haute surface spécifique plongées dans un électrolyte et d'une membrane de séparation poreuse (Figure I.5).

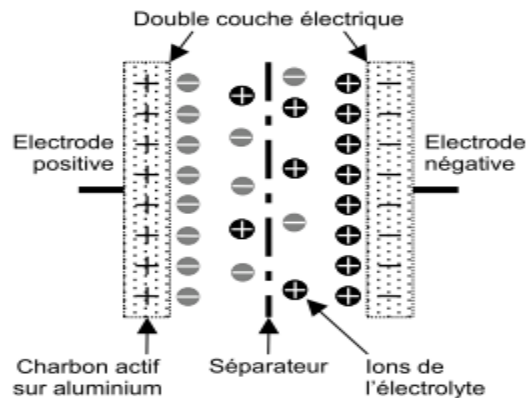


Figure. I.5 : Structure d'un super-condensateur [12].

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

ETAT DE L'ART DE STOCKAGE

* **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 [6, 7].

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

c. Inductances supraconductrices

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

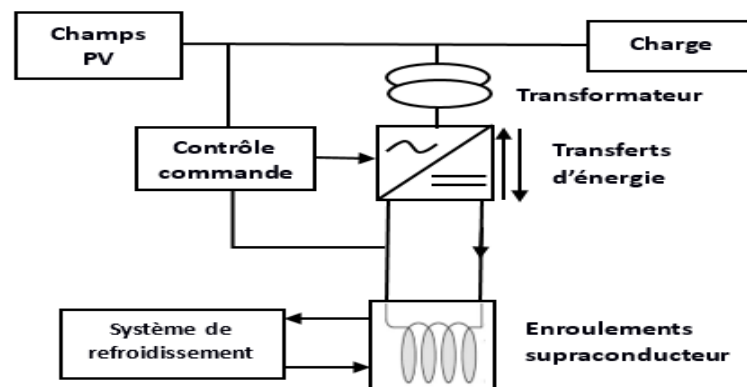


Figure. I.6 : Principaux éléments d'un dispositif de stockage d'énergie sous forme magnétique par bobine supraconductrice [6,7].

* **Principe** : le stockage d'énergie dans une inductance supraconductrice est fait sous forme de champ magnétique, lorsqu'on fait passer un courant électrique continu dans une bobine supraconductrice court-circuitée. Le courant circule sans perte par effet Joule dans la bobine supraconductrice et stocke ainsi une certaine quantité d'énergie pour une durée théoriquement infinie. La bobine est réalisée en matériau supraconducteur (matériau à très basses températures proches du zéro absolu 4,2 K) dans le but que l'énergie stockée ne soit pas dissipée par effet joule. La résistance ohmique du supraconducteur étant nulle, les seules pertes sont dues aux résistances de contacts et à la puissance nécessaire pour maintenir la bobine froide (environ -269,5 oC). Pour récupérer l'énergie stockée, il suffit d'ouvrir le circuit et de le brancher sur un récepteur électrique à alimenter. L'énergie stockée dans la bobine supraconductrice est transférée en un temps très court (50% en moins d'une seconde) [8, 9,10].

***Propriétés et applications** : avec une très grande puissance, les inductances supraconductrices ont la possibilité de décharge 50% de leur capacité en moins d'une seconde [11].

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

I.4.2. Stockage indirect

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

a. Accumulateurs électrochimiques :

Une batterie est constituée d'un assemblage en série et/ou en parallèle d'accumulateurs électrochimiques. Chaque accumulateur est constitué de deux électrodes, l'une positive et l'autre négative séparée par un électrolyte (Figure I.5). L'accumulateur est un générateur électrochimique capable de fournir une énergie électrique à partir d'une énergie stockée chimiquement. Cette conversion d'énergie est réversible pour un accumulateur, contrairement à une pile [8].

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

-au niveau de l'anode (électrode négative en décharge), s'effectue une réaction d'oxydation suivant la relation $M1 \rightarrow M1^{n+} + ne^-$ de potentiel redox $E1$;

-à la cathode (électrode positive en décharge), les électrons libérés à l'anode transitent par le circuit extérieur pour atteindre la cathode où s'opère une réaction de réduction suivant l'équation $M2^{n+} + ne^- \rightarrow M2$ de potentiel redox $E2$.

$M1$ et $M2$ représentent respectivement les espèces actives à l'anode et à la cathode.

L'électrolyte assure le transport des espèces ioniques mises en jeu dans la réaction globale d'oxydoréduction, qui s'écrit $M1 + M2^{n+} \rightarrow M1^{n+} + M2$. Le transport engendre une force électromotrice $E = E2 - E1$. Durant la charge, le phénomène s'inverse. La Figure I.7 montre le principe de fonctionnement d'un accumulateur électrochimique.

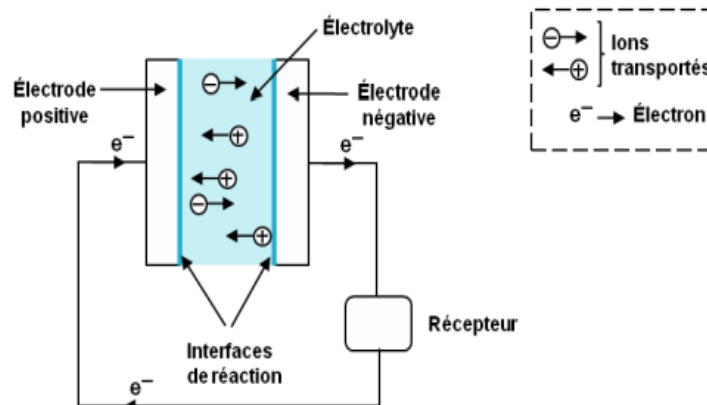


Figure .I.7 : Principe d'un accumulateur électrochimique [8].

* **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 [6, 11].

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 telle que les satellites Galiléo [12]. 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 [6].

■ Accumulateurs au lithium-ion (Li-ion) :

Durant la charge, les ions lithium viennent s'insérer dans la structure de l'électrode négative en carbone graphité. Lors de la décharge, l'anode libère ces ions qui viennent se placer dans la structure de la cathode. L'équation électrochimique globale est la suivante : $Li+MI \rightarrow LiMI$

MI le matériau d'insertion (graphite, coke ...) placé à l'électrode positive. Par rapport aux batteries au plomb, les batteries au lithium-ion n'ont pas besoin de maintenance. Elles ont une durée de vie assez importante et présentent une plus grande résistance aux conditions extérieures [12]. La tension d'un accumulateur lithium-ion varie de 2,5V (état de charge minimum) à 3,7V (état de charge maximum) [13, 14]. la figure I.8 montre le principe de la batterie lithium-ion.



Figure. I.8 : schéma de principe de la batterie lithium-ion Li-ion[13].

■ Accumulateurs au plomb-acide (Pb-ac) :

La batterie au plomb-acide est la technologie la plus ancienne et la plus utilisée dans le monde [15]. Son électrolyte est une solution aqueuse d'acide sulfurique, l'électrode positive est constituée d'oxyde de plomb PbO_2 et l'électrode négative de plomb Pb . La réaction mise en jeu est la suivante : $Pb+PbO_2+2H_2SO_4 \rightleftharpoons 2PbSO_4+2H_2O$.

La tension aux bornes d'un accumulateur varie de 1,7V (état de charge minimum) à 2,5V (état de charge maximum) [13, 14]. La figure I.9 montre le principe de fonctionnement d'accumulateur plomb-acide.

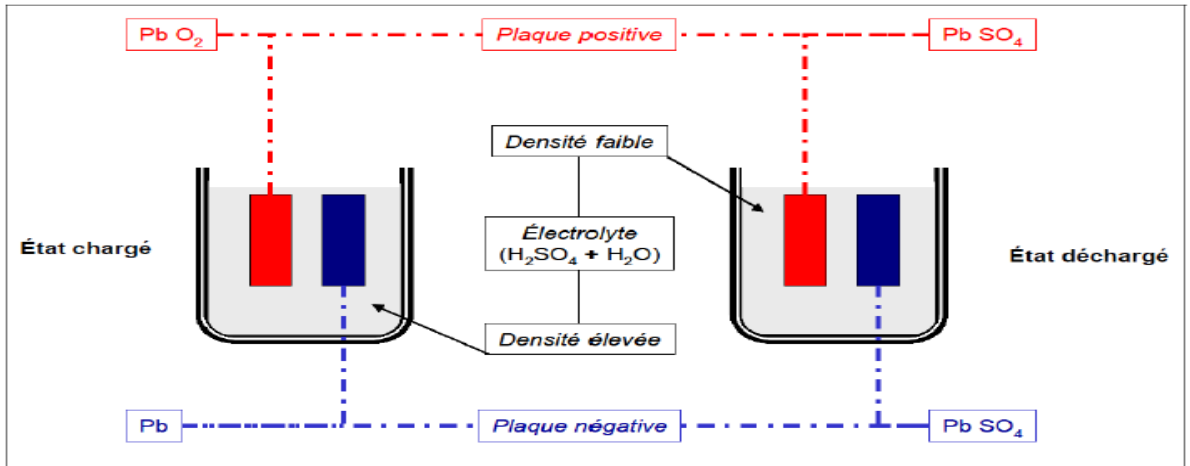


Figure. I. 9 : principe de fonctionnement d'un accumulateur plomb-Acide [14].

Les accumulateurs au plomb sont divisés en deux grandes familles qui sont :

- **les batteries « classiques » ou ouvertes (Vented Batteries)** : pour ce type de batteries, la cellule n'est pas fermée. La quantité d'électrolyte (composé typiquement de 65% d'eau et de 35% d'acide sulfurique) peut diminuer en raison des occurrences successives du phénomène de « gassing » ainsi que de l'évaporation naturelle. La batterie nécessite donc une maintenance au cours de laquelle le niveau de l'électrolyte doit être réajusté avec de l'eau désionisée pour le bon fonctionnement de l'accumulateur. Enfin, ces batteries doivent se trouver dans un emplacement suffisamment ventilé car le dégagement gazeux qu'elles peuvent produire devient explosif lorsque la proportion d'hydrogène dans l'air atteint 4% en volume.
- **les batteries scellées VRLA (Valve Regulated Lead-Acid)** : ces batteries sont aussi appelées batteries « sans entretien ». Ici, la cellule est fermée. L'électrolyte y est immobilisé sous forme de gel (ajout de silice à haute surface spécifique), ou encore retenu dans un séparateur en fibre de verre à haut pouvoir capillaire (AGM, Absorbent Glass Mat). Les gaz produits durant le gassing restent donc « prisonniers » dans le gel et sont recombinaisonnés (reconsommés) durant la décharge. La consommation d'eau et l'émission de gaz sont donc extrêmement faibles. Sur la figure 10 se trouve un exemple de batterie au plomb de cette famille, de marque « Solar Haze », destinée aux applications liées à l'énergie photovoltaïque. Cette batterie est de type étanche au recombinaison de gaz, sans entretien et en technologie « gel » [16].



Figure. I.10 : Batterie au plomb pour stockage de l'énergie pour application photovoltaïque [16].

■ Accumulateurs au nickel cadmium (Ni-Cd) :

Les accumulateurs au nickel-cadmium offrent des performances supérieures au plomb en termes de capacité et de durée de vie (Tableau I.3). Cependant leur prix est nettement plus élevé et leur tension plus faible (1,15V à 1,45V) que ceux des batteries au plomb [13, 14]. L'électrolyte est à base de potasse, l'électrode positive est composée d'hydroxyde de nickel et l'électrode négative de cadmium. Ces éléments réagissent de la manière suivante : $2(OH)+Cd+2H_2O \rightleftharpoons 2Ni(OH)_2+Cd(OH)_2$.

Le marché offre aujourd'hui un **large éventail de produits**, depuis les batteries spiralées, de capacité comprise entre 10 mAh et 15 Ah, jusqu'aux batteries stationnaires ouvertes de 1000 Ah et au-delà. Les prix du nickel et du cadmium, ainsi que ceux des procédés de fabrication, conduisent à un coût de l'énergie stockée largement supérieur à celui associé à l'accumulateur au plomb. La manipulation du cadmium n'est pas sans danger pour la santé, et la mise au rebut des batteries usagées présente un risque pour l'environnement. Dans ces conditions, pour l'Europe de l'Ouest et l'Amérique du Nord, le marché de l'accumulateur nickel-cadmium représente aujourd'hui environ 10 % de celui de l'accumulateur au plomb.



Figure. I.11 : Vue éclatée d'une batterie nickel-cadmium Ni-Cd industrielle [17].

Le Tableau I.3 donne une comparaison des caractéristiques de quelques accumulateurs électrochimiques [11-14].

ETAT DE L'ART DE STOCKAGE

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. I.3 : Comparaison de quelques technologies d'accumulateur électrochimique [11].

b. Stockage sous forme d'hydrogène

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

* **Principe :** l'excès de l'énergie produit par le système PV est utilisé par un électrolyseur (passage d'un courant continu à travers deux électrodes immergées dans un électrolyte liquide ou solide) pour décomposer l'eau en oxygène et en hydrogène suivant l'équation : $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$.

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

- le premier consiste à alimenter une pile à combustible qui utilise l'hydrogène et l'oxygène comme couple électrochimique ;
- le deuxième consiste à synthétiser du gaz naturel selon un procédé de la méthanation qui consiste à utiliser l'hydrogène produit par l'électrolyseur pour produire du méthane. Le méthane ainsi obtenu peut certes être injecté directement dans le réseau de gaz ou être utilisé pour alimenter une centrale à gaz « classique », produisant de l'électricité ;
- le troisième consiste à utiliser l'hydrogène directement dans une centrale à gaz spécialement conçue à cet effet, afin de produire de l'électricité. Le principe de restitution de l'énergie à partir de l'hydrogène stocké est résumé sur la Figure 1.12.

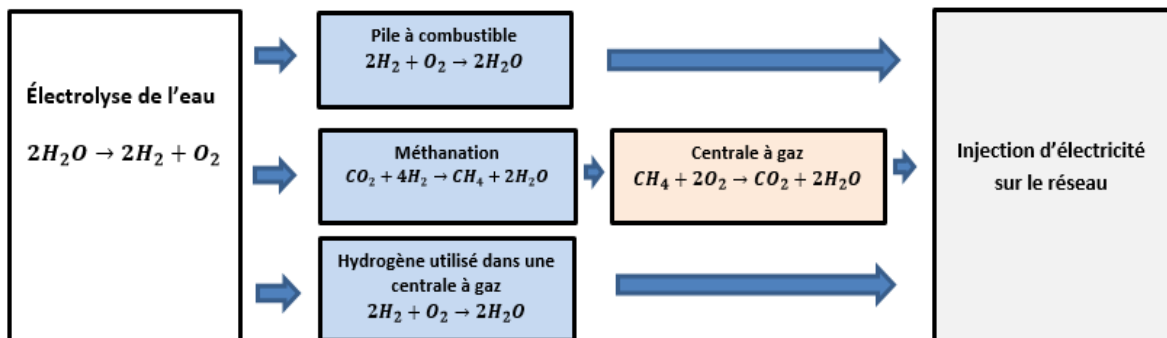


Figure. I.12 : Différentes possibilités de restitution de l'électricité à partir de l'hydrogène stocké [11].

Propriétés et applications : l'hydrogène obtenu peut être stocké sur de longues périodes. Toutefois, son efficacité énergétique est faible.

Au-delà de ses applications comme carburant, l'hydrogène, vecteur énergétique, pourrait constituer une source d'électricité pour les milieux isolés où il est difficile voire coûteux, d'installer des lignes électriques. Il existe peu d'installations de stockage d'énergie sous forme hydrogène. Actuellement, la plus grande installation est celle d'Utsira en Norvège.

c. Stockage hydraulique

Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) sont composées de deux retenues d'eau situées à des hauteurs différentes et reliées par un système de canalisation. Elles sont équipées d'un système de pompage permettant de transférer l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur. La Figure I.13 montre le principe de fonctionnement d'une STEP.

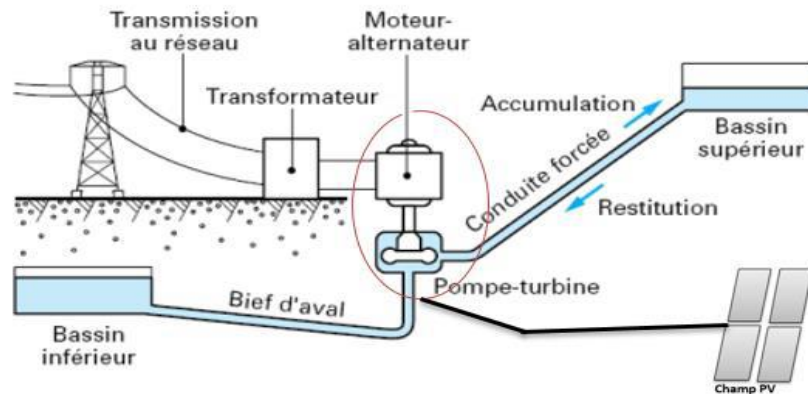


Figure. I.13 : Schéma de principe de fonctionnement au cas où il est associé aux PV [18].

* **Principe** : durant les périodes de forts ensoleillements, lorsque le champ photovoltaïque fournit un surplus d'électricité, l'eau du bassin inférieur est pompée et conduite vers le bassin supérieur. Sous l'effet de la pesanteur, cette masse d'eau représente une future capacité de production électrique. Lorsque le réseau connaît un déficit de production électrique, une partie du réservoir supérieur, est vidée et par gravité, l'eau fait tourner une turbine hydraulique qui alimente un alternateur et produit de l'électricité comme indiqué sur la figure I.9. Le stock d'énergie potentielle est ainsi reconstitué indéfiniment.

***Propriétés et applications** : la taille importante des installations permet de stocker de grandes quantités d'énergie (1-10GWh). Également, en fonction de la hauteur d'eau, les installations peuvent délivrer de grandes puissances : de quelques dizaines de MW à plusieurs GW [18]. Toutefois, l'installation d'une STEP nécessite une géographie adaptée.

Le stockage hydraulique représente la technologie de stockage à grande échelle la plus utilisée dans le monde. Jusqu'en 2015, la capacité totale installée à travers le monde était près de 1210089 GWh délivrant une puissance d'environ 3995935 MW [19].

d. Stockage à air comprimé (CAES)

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

* **Principe** : l'énergie produite par une centrale photovoltaïque peut d'une part être injectée dans le réseau et d'autre part être utilisée pour comprimer (grâce à un

ETAT DE L'ART DE STOCKAGE

turbocompresseur) l'air ambiant à haute pression (100 à 300 bars) pendant les périodes de faibles consommations. L'air est ensuite stocké à une pression moyenne de 40 à 70 bars et à une température proche de l'ambiante. Pour récupérer l'énergie stockée, l'air comprimé est dirigé vers une machine semblable à une turbine à gaz. Dans laquelle, il est chauffé grâce à un apport d'énergie venant de l'extérieur ; ce qui augmente sa pression. Puis, il est détendu dans une turbine. La turbine a pour rôle de convertir l'énergie cinétique issue de la combustion de l'air en travail mécanique. L'énergie mécanique obtenue est ensuite convertie en énergie électrique grâce à un alternateur. Le principe de fonctionnement est résumé dans la Figure I.14 [20, 21]. La chaleur résiduelle de la compression peut être récupérée et utilisée pour chauffer l'air (stockage adiabatique).

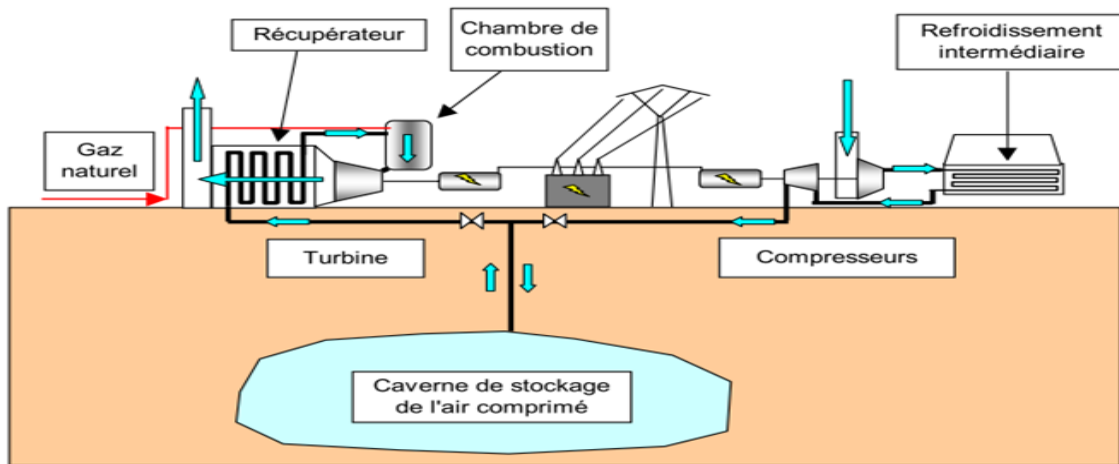


Figure. I.14 : Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé [22].

* **Propriétés et applications :** le stockage à air comprimé permet de stocker de grandes quantités d'énergie de l'ordre de 10 MWh à 10 GWh. Il a une autonomie pouvant atteindre plusieurs jours et un rendement d'environ 50% [21]. Sa technologie est relativement mature avec plusieurs réalisations de grandes puissances à travers le monde : en Allemagne (Huntorf 290 MW), aux États unis (Norton 2700 MW). Toutefois, la construction d'un système CAES nécessite de disposer d'une géologie favorable permettant de disposer de grandes cavités souterraines [22].

e. Volant d'inertie

Un volant d'inertie stocke l'énergie fournie par un générateur photovoltaïque sous forme d'énergie cinétique de rotation. Il est constitué d'une masse (anneau ou tube) en fibre de carbone entraînée par un moteur électrique comme illustré sur la Figure I.15.

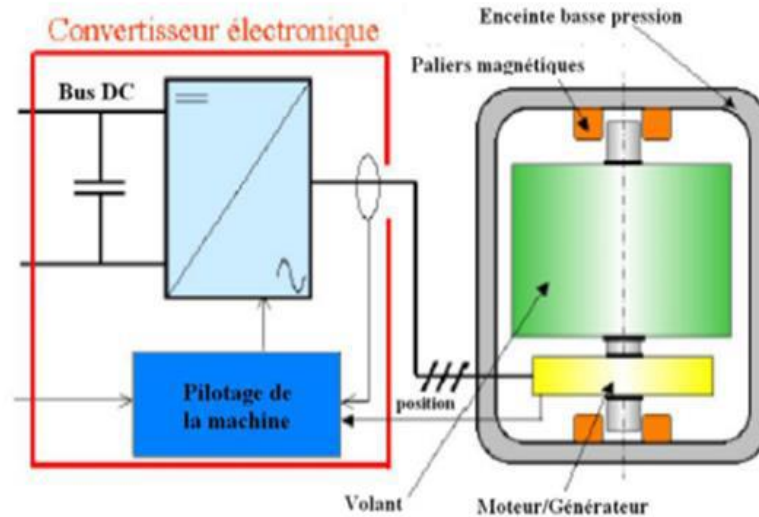


Figure .I.15 : Principaux composants d'un système de stockage électromécanique inertiel [23].

***Principe** : l'apport d'énergie électrique permet de faire tourner la masse à des vitesses très élevées (entre 8 000 et 16 000 tour/min) en quelques minutes. Une fois lancée, la masse continue de tourner, même si aucun courant ne l'alimente. L'énergie stockée dans le volant d'inertie est donc sous forme d'énergie cinétique. Elle pourra être restituée en utilisant un moteur comme génératrice électrique, entraînant la baisse progressive de la vitesse de rotation du volant d'inertie [24].

***Propriétés et applications** : les systèmes de stockage par volant d'inertie ont en général un rendement de charge-décharge de l'ordre 85% et d'une grande longévité. Ils ont un rendement global d'environ 78% au bout de 5 heures de fonctionnement et de 45% au bout d'une journée de fonctionnement [25]. Les stockages de longues durées, avec un tel dispositif, ne sont donc pratiquement pas envisageables. Ces systèmes sont adaptés pour des applications de régulation, d'optimisation énergétique et d'amélioration de qualité (microcoupures, coupures brèves, etc.). Par exemple, les volants d'inertie sont utilisés dans l'industrie comme réserve énergétique en cas de défaillance des générateurs et pour stabiliser les fluctuations des sources énergétiques.

f. Stockage sous forme thermique

Une grande partie de la conversion ou du transport énergétique se fait sous forme de chaleur, il est alors important d'examiner le potentiel du stockage thermique.

***Principe** : le stockage de chaleur peut se faire de deux manières différentes :

-le stockage thermique par chaleur sensible : consiste à chauffer un corps (sodium, sel, eau sous pression, etc.) qui ne subit pas de changement d'état pendant la phase d'accumulation de la chaleur. La quantité d'énergie stockée est alors directement proportionnelle à la variation de la température et à la quantité de matière concentrée ;

-le stockage thermique par chaleur latente de fusion : consiste à stocker de l'énergie thermique dans un matériau qui subit un changement d'état à une température donnée. En effet, l'excès de l'énergie fournit par un générateur photovoltaïque peut être utilisé pour élever la température d'un matériau. Le matériau tel que : Al, Mg, Si ou Zn possède des propriétés appropriées à cet effet [25]. Lorsque la température du matériau atteint la température de changement d'état, le matériau initialement solide passe à l'état liquide

ETAT DE L'ART DE STOCKAGE

grâce à la chaleur absorbée. L'énergie thermique accumulée par le matériau est restituée avec une baisse progressive de la température lorsque le générateur photovoltaïque connaît un déficit. Le matériau passe alors de l'état liquide à l'état solide en restituant la chaleur absorbée [15]. Au-delà, du changement d'état solide-liquide, il peut y avoir d'autres changements d'états de la matière : gaz-solide, gaz-liquide... ; la figure I.16 montre le principe d'une installation de stockage thermique.

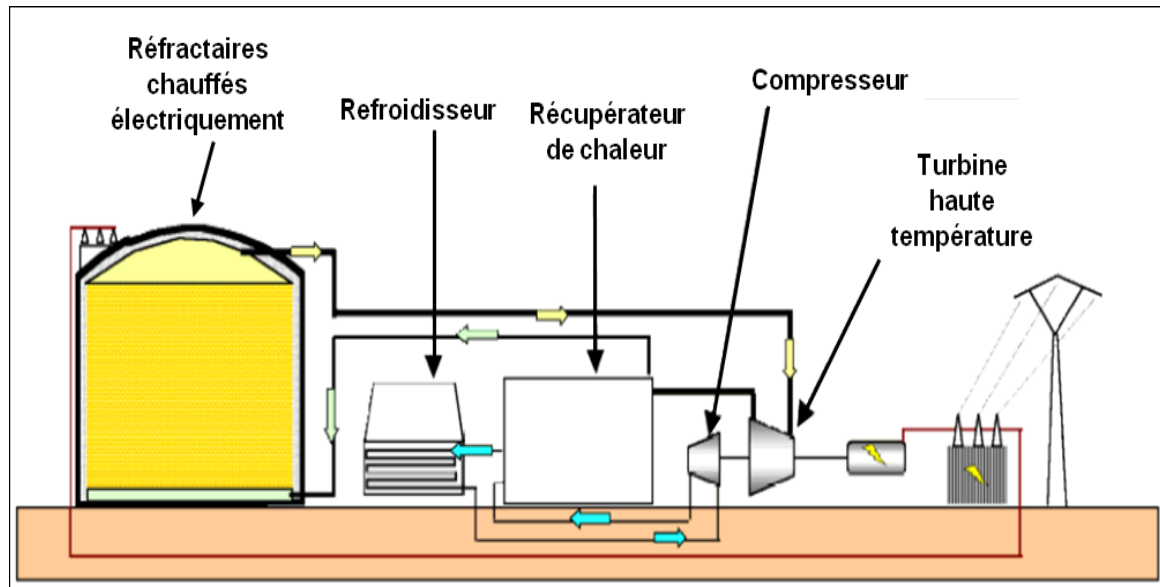


Figure. I.16 : Schéma de principe d'une installation de stockage thermique [25]

***Propriétés et applications :** les systèmes de stockage d'énergie sous forme thermique ont un rendement pouvant atteindre 90% et une autonomie assez élevée (plusieurs semaines).

Par rapport à la technologie de stockage d'énergie par chaleur latente, la technologie de stockage par chaleur sensible est plus mature. Elle est utilisée industriellement dans plusieurs centrales solaires thermodynamiques. Cependant, la technologie de stockage par chaleur latente n'est pas encore développée industriellement. La majorité des études menées sur ce type de technologie a été faite à l'échelle de laboratoire.

I.4.3. Méthodologie de comparaison

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

Le Tableau 4 présente quelques données technico-économiques chiffrées pour les principales technologies de stockage d'énergie [20, 28, 29, 30].

ETAT DE L'ART DE STOCKAGE

Technologies	Densité d'énergie (Wh/kg)	Puissance	Capacité	Autonomie	Rendement (%)	Durée de vie	Coût (FCFA/kWh)	Maturité
STEP	1kWh/m ³ pour une chute de 360 m	0,1-1GW	1-100GWh	Qlq jours	65-80	> 40 ans	47500-97500	Très bonne
CAES	12kWh/m ³ pour une caverne de 100 bars	100-1000MW	10MWh-10GWh	1h-qlq jours	50	> 30 ans	32500-52000	Moyenne
Volant d'inertie	1-5 kWh/kg	2-40MW	0.5-10MWh	Qlq mn-1h	80-90	10000-100000 cycles	98250-1310000	Moyenne
Inductances supraconductrices	1-5 Wh/kg	10kW- 5MW	1-10 kWh	Qlq s- 1mn	> 90	20-30 ans	> 6550000	Moyenne
Supercondensateur	5-10 kWh/kg	10kW- 5MW	1-5 kWh	Qlq mn	90- 95	10000-500000 cycles	10480000	Moyenne
Accumulateurs électrochimiques	20- 120 kWh/kg	10kW- 1000MW	10kWh- 1000MWh	10mn- 10h	70- 80	500- 4000 cycles	32750- 655000	Très bonne
Batterie à circulation	33 kWh/m ³	1- 10MW	10- 100MWh	> 1 mois	70	2000- 12000 cycles	65500- 196500	Prototype
Hydrogène et pile à combustible	300- 600Wh/kg	1kW- 10MW	10kWh- 10GWh	1h-qlqs jours	30- 50	5-10ans	325000- 975000	Moyenne

Tableau. I.4 : Données technico-économiques pour les principales technologies de stockage [26].

a. Comparaison selon l'autonomie, la puissance et la capacité

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

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

La Figure 17 montre que les technologies permettant la gestion de fortes puissances sur des longues périodes concernent principalement les STEP, les CAES et le stockage sous forme thermique. Toutefois, la batterie à circulation (redox-flow) possède une capacité assez élevée lui permettant de stocker d'importantes quantités d'énergie de l'ordre de deux (2) MWh.

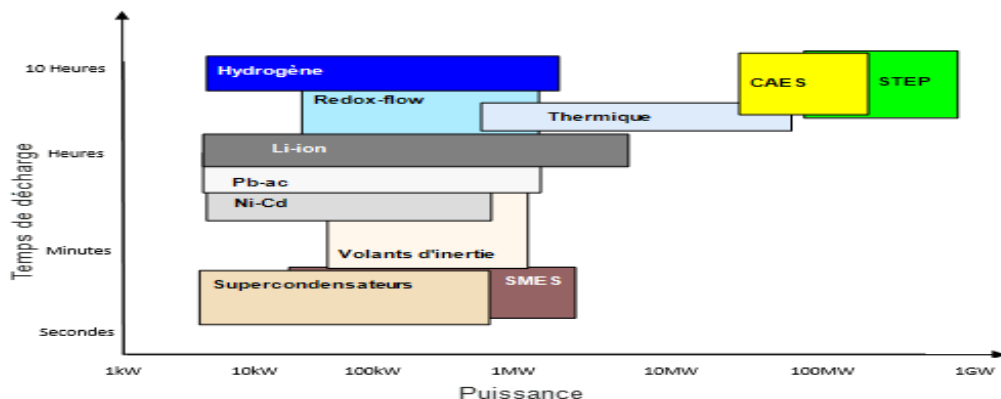


Figure. I.17 : Autonomie des technologies de stockage en fonction de leur puissance [32].

La Figure I.18 compare les différentes technologies de stockage d'énergie en termes de puissance, de capacité et de temps de décharge [18]. Pour les applications à grandes échelle, les STEP et les CAES sont les procédés les mieux adaptés car, ils ont une

ETAT DE L'ART DE STOCKAGE

puissance, une capacité et un temps de décharge très élevés.

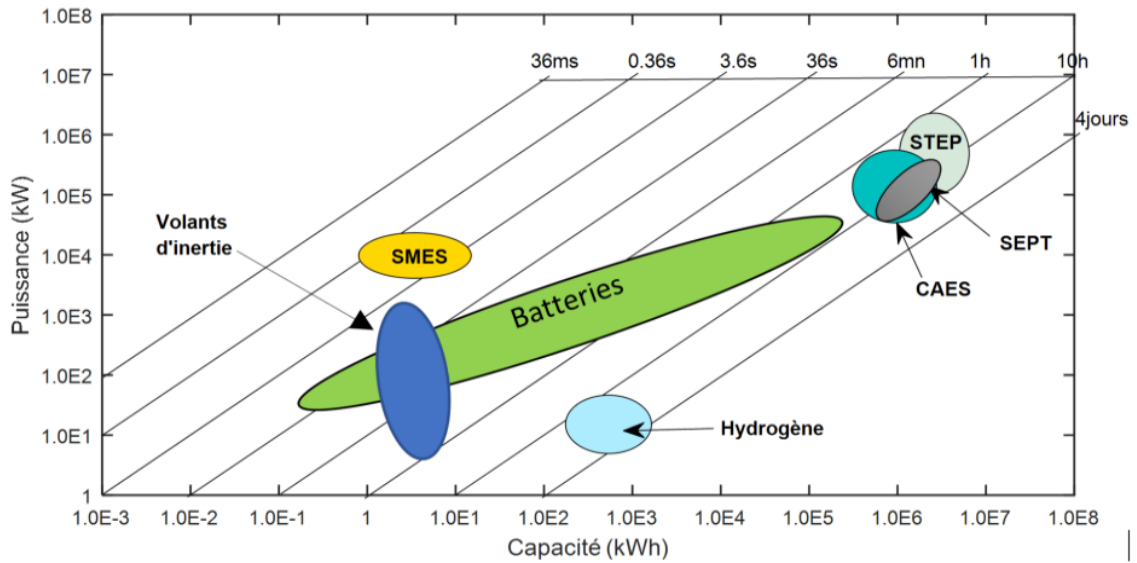


Figure. I.18 : Comparaison en termes de puissance et de capacité en fonction du temps de décharge [18].

b. Comparaison selon l'efficacité énergétique et la durée de vie

Le moyen de stockage idéal disposerait à la fois d'une efficacité énergétique et d'une durée de vie élevées. Sur la Figure I.19 seuls le supercondensateur et le volant d'inertie présentent ces deux propriétés. Quant à la batterie au Li-ion, il a une efficacité énergétique élevée mais avec une durée de vie relativement faible.

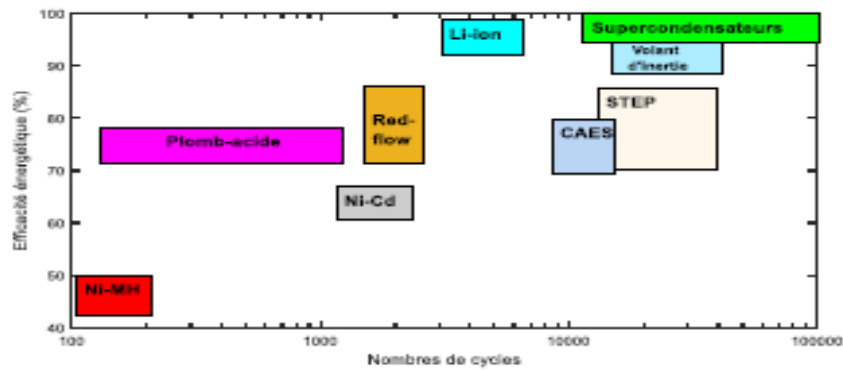


Figure. I.19 : Comparaison entre l'efficacité énergétique et la durée de vie [8].

c. Comparaison selon les coûts

Les coûts d'investissements représentent un paramètre économique très important car ils conditionnent le coût global de la production énergétique. La Figure I.20 nous montre que le CAES, la STEP et les accumulateurs au plomb ont un coût d'investissement par unité de puissance et d'énergie faible. Cependant, ceux des accumulateurs au nickel-cadmium, au lithium-ion et redox-flow sont élevés. L'intégration de ces derniers comme technologie de stockage va augmenter le coût global du système photovoltaïque.

ETAT DE L'ART DE STOCKAGE

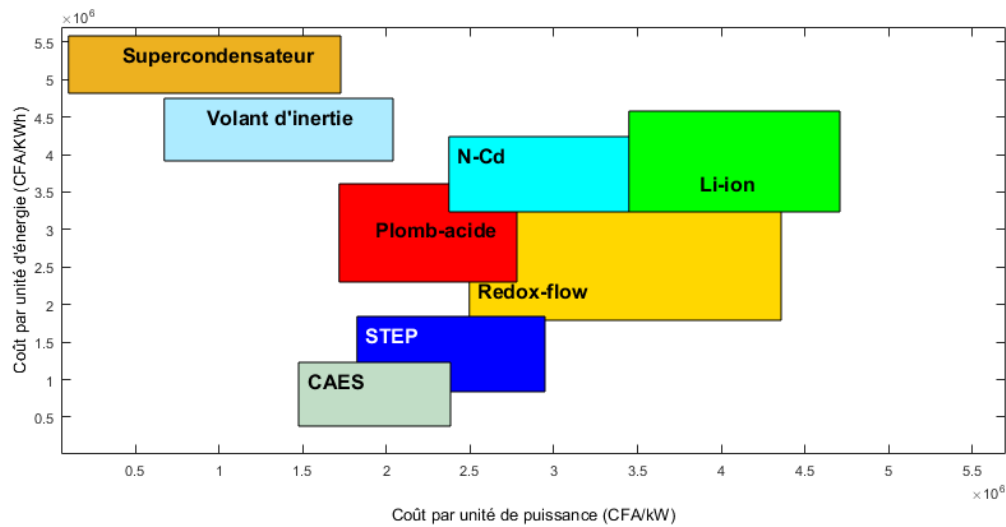


Figure. I.20 : Comparaison entre les coûts d'investissements par unité de puissance et par Unité d'énergie [8]

Lorsque l'application à une fréquence de charge/décharge élevée, le coût par cycle peut être la meilleure façon d'évaluer le coût du dispositif de stockage. La Figure (I.21) donne une comparaison des coûts d'investissement des dispositifs de stockage calculés par cycle. On remarque que la STEP et le CAES ont un coût d'investissement par cycle parmi les plus bas.

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

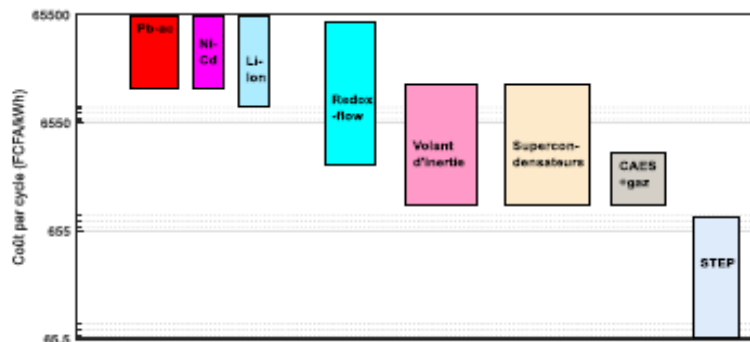


Figure. I.21 : Comparaison selon les coûts d'investissements calculés par cycle [31].

d. Comparaison selon le niveau de maturité technologique

Malgré sa grande capacité énergétique, le stockage d'énergie sous forme thermique est toujours

ETAT DE L'ART DE STOCKAGE

Au stade de recherche. Par contre, les STEP, les CAES, les inductances supraconductrices et les accumulateurs électrochimiques tels que : le plomb-acide, le lithium-ion, le nickel-cadmium ont une maturité technologique très avancée (Figure I.22).

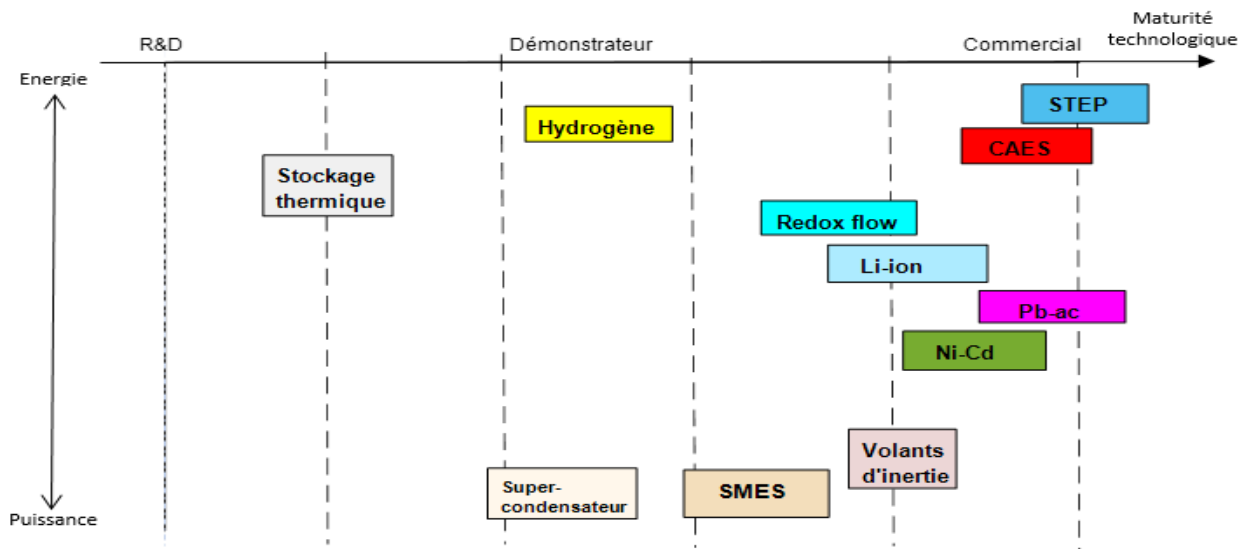


Figure. I.22 : Niveau de maturité technologique des différentes technologies de stockage d'énergie [31].

I.4.4. Critères de choix des technologies de stockage pour les applications photovoltaïques autonomes

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

- une autonomie assez élevée : la moyenne d'insolation dans la sous-région est d'environ 8,3 heures par jour [32]. Durant les périodes non ensoleillées, c'est l'énergie apportée par le dispositif de stockage qui doit assurer la fourniture de la charge.
- une capacité énergétique et une puissance disponible assez élevées : il faut au moins une capacité énergétique de 400 kWh et une puissance d'une centaine de kW.
- un rendement et une durée de vie élevés : ce sont des paramètres importants à considérer car ils influencent le coût global de la production d'énergie. En effet, un faible rendement du système de stockage augmente le coût d'utilisation car seulement une petite partie de l'énergie stockée est utilisée. Également, une faible espérance de vie fait augmenter le coût global en raison de la fréquence de remplacement des équipements.
- des coûts d'investissement et de fonctionnement des dispositifs de stockage faibles : leur accessibilité à toutes les couches de la population en dépend.
- une température de fonctionnement élevée : le dispositif doit être capable de fonctionner normalement dans un climat sahélien (climat chaud et sec).
- une technologie mature : elle doit être largement diffusée et ne doit pas représenter un danger pour la santé humaine et environnementale.

I.4.5. Choix des dispositifs de stockage

A l'issue des différentes comparaisons entre les techniques de stockage (Figures I.17 à I.22) et en tenant compte des caractéristiques propres aux systèmes PV, il ressort que les technologies de stockage tels que :

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

La représentation du diagramme de Ragone est une technique très fréquemment utilisée pour comparer directement les performances des dispositifs de stockage (Figure 17 à 22) [6, 31]. Il s'agit d'un moyen de comparaison adapté pour les applications mobiles dans lesquelles la masse est un critère très important. Cependant dans le cas d'une application PV, la capacité, l'autonomie, la durée de vie et le coût total représentent des critères encore plus importants. Ainsi, les comparaisons effectuées dans les paragraphes précédents sont excessivement simplistes. Ils ne permettent donc pas de dégager une conclusion définitive à propos du choix de la technologie de stockage la plus appropriée pour chaque type d'application. Pour une comparaison plus efficace, nous allons utiliser une méthode de comparaison basée sur la détermination de l'indice de performance.

I.4.6. Comparaison selon l'indice de performance

Les dispositifs de stockage sont généralement spécifiques pour des applications données. Afin de comparer les performances des différentes solutions de stockage et déterminer la technologie la plus efficace pour les systèmes PV en fonction de la nature d'application, nous avons développé une approche qui s'inspire de celle d'Ibrahim et al [33,34] et utilisée dans le cas d'un générateur éolien. Elle se base sur l'indice de performance qui permet de comparer les performances des dispositifs de stockage en utilisant des critères basés sur leurs caractéristiques et associés à des coefficients de pondération. Dans la suite du travail, selon les caractéristiques, nous considérons les critères associés au coût le plus faible, l'autonomie la plus élevée, l'autodécharge la plus faible, la cyclabilité la plus élevée, l'adaptabilité la plus élevée, l'efficacité la plus élevée, la capacité la plus élevée, la maturité la plus élevée, l'aspect écologique la plus élevée, la sécurité la plus grande et le temps de réponse le plus faible.

Pour une comparaison plus fine par rapport à ce qui est généralement fait [35-36, 37], nous regroupons d'abord les techniques de stockage en deux catégories d'applications autonomes suivant la valeur de la puissance fournie. Ensuite nous définissons les

ETAT DE L'ART DE STOCKAGE

coefficients de pondération pour chaque catégorie et calculons l'indice de performance. Sa détermination se fait à l'aide d'une matrice de décision qui permet de pondérer l'importance, par des coefficients variant de 5 à 10%, de chaque caractéristique du système de stockage en fonction des exigences spécifiques de l'application considérée.

*Catégorie 1 : applications autonomes à petite échelle

Ce sont des applications autonomes dont la puissance installée est inférieure à 100 kWc. La mise en œuvre de la matrice de décision prend en considération l'interaction entre les critères de choix cités dans le paragraphe 3, les données de références du système de stockage ainsi que les caractéristiques d'une application PV autonome et surtout le principal objectif dans cette **catégorie** : une technologie de stockage pouvant satisfaire aux besoins d'une charge de puissance 100 W à 100 kW. Ainsi, plus d'importance a été accordée au coût, à l'autonomie, à l'autodécharge, à la cyclabilité et à l'adaptabilité au système PV. Un coefficient de pondération de 10% a été attribué pour chacun de ces critères. Par ailleurs, l'efficacité, la capacité de stockage, la diminution des GES et la maturité étant considérés comme des critères moins importants ont chacun été pondéré par un coefficient de 7,5%. Enfin, l'aspect écologique, la sécurité, le temps de réponse et la simplicité ont chacun été pondérés par un coefficient de 5% car ils n'ont pas assez d'influence sur le choix de la technologie (Figure I.23).

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

- 1 ou 0 lorsque l'un des dispositifs de stockage est respectivement plus ou moins performant que les autres ;
- 0,5 lorsque les dispositifs de stockage sont en égalité de performances [38] ;
- la case reste vide quand la comparaison est faite entre la même technologie.

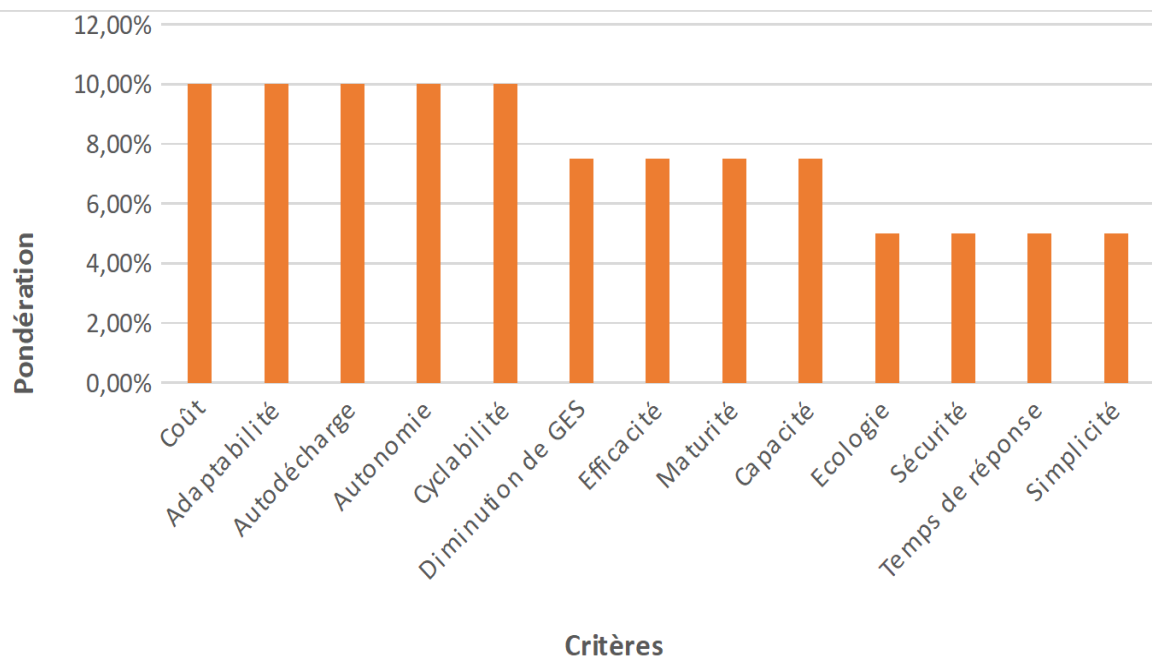


Figure. I.23 : Répartition des différents critères[32].

ETAT DE L'ART DE STOCKAGE

Ainsi, nous avons obtenu 13 matrices de décision élémentaires correspondant aux 13 critères repartis sur la Figure I.23. Les Tableaux I.5 et I.6 donnent des exemples de matrices élémentaires de décision pour une application autonome à petite échelle.

Coût	STEP	CAES	Hydrogène	Redox	Pb-ac	Li-ion	Total
STEP		0,5	0	0	0	0	0,5
CAES	0,5		0	0	0	0	0,5
Hydrogène	1	1		0	0	0	2
Redox	1	1	1		0	0	3
Pb-ac	1	1	1	1		0,5	4,5
Li-ion	1	1	1	1	0,5		4,5

Tableau. I.5 : Matrice élémentaire de décision pour le critère de coût [32].

La matrice globale de décision (Tableau I.7) est construite à l'aide des coefficients de préférence globale qui ont été attribués pour chaque technologie de stockage et à partir des 13 matrices élémentaires de décision. En effet, la multiplication des totaux obtenus dans les matrices de décision élémentaire de chaque technologie par son coefficient de pondération et la sommation des résultats obtenus permet de classer les différents dispositifs de stockage par ordre de performance.

Cyclabilité	STEP	CAES	Hydrogène	Redox	Pb-ac	Li-ion	Total
STEP		0,5	1	1	1	1	4,5
CAES	0,5		1	1	1	1	4,5
Hydrogène	0	0		0,5	1	1	2,5
Redox	0	0	0,5		1	0,5	2
Pb-ac	0	0	0	0		0	0
Li-ion	0	0	0	0,5	1		1,5

Tableau. I.6 : Matrice de décision élémentaire pour le critère de cyclabilité [30].

ETAT DE L'ART DE STOCKAGE

	Pondération	STEP	CAES	Hydrogène	Redox	Pb-ac	Li-ion
Adaptabilité aux PV	0,1	0,05	0,05	0,25	0,25	0,45	0,45
Coût	0,1	0,05	0,05	0,2	0,3	0,45	0,45
Autonomie	0,1	0,3	0,3	0,25	0,25	0,15	0,25
Autodécharge	0,1	0,4	0,4	0,4	0,15	0,05	0,15
Cyclabilité	0,1	0,45	0,45	0,25	0,2	0	0,15
Efficacité	0,075	0,1875	0	0,075	0,1875	0,3375	0,3375
Capacité	0,075	0,1875	0,1875	0,1875	0,1875	0,1875	0,1875
Diminution des GES	0,075	0,3	0,3	0,3	0,075	0,075	0,075
Maturité	0,075	0,225	0,0375	0,15	0,1125	0,375	0,3
Sécurité	0,05	0,175	0,175	0	0,175	0,05	0,175
Aspect écologique	0,05	0,2	0,2	0,2	0,075	0,05	0,05
Temps de réponse	0,05	0	0,05	0,1	0,2	0,2	0,2
Simplicité	0,05	0,05	0,05	0,075	0,15	0,225	0,225
Total	1	2,575	2,25	2,4375	2,3125	2,6	3
Rang		3	6	4	5	2	1

Tableau. I.7 : Matrice globale de décision (petite échelle) [30].

Cette matrice globale de décision montre que les accumulateurs au lithium-ion se placent au premier rang, suivi des accumulateurs au plomb-acide en termes de performances.

*Catégorie 2 : applications autonomes à moyenne échelle

Ce sont des applications autonomes dont la puissance installée est supérieure ou égale à 100 kWc. Dans cette catégorie, l'élaboration de la matrice de décision s'effectue pratiquement de la même manière que dans la première catégorie. La seule différence est liée à l'objectif principal ; il s'agit dans cette partie d'avoir un système de stockage dont la puissance peut satisfaire aux besoins d'une charge de plus de 100 kW. Ainsi, les critères basés sur : la capacité, l'efficacité, le coût, la cyclabilité et l'adaptabilité au système PV ont été retenus comme étant les plus importants. Chaque critère a donc été pondéré par un coefficient de 10%. L'autonomie, l'autodécharge, la maturité et la diminution des GES étant considérés comme des critères moins importants que les premiers. Un coefficient de 7,5% leur a été attribué. Quant à l'aspect écologique, la sécurité, le temps de réponse et la simplicité, une pondération de 5% a été attribuée à chacun des critères associés car ils n'ont pas assez d'influence sur le choix de la technologie. La Figure I.24 montre la répartition des différents critères.

ETAT DE L'ART DE STOCKAGE

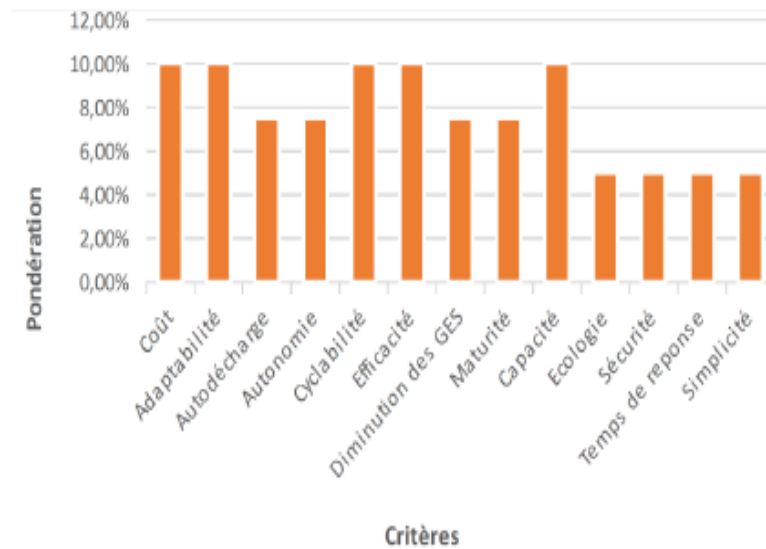


Figure. I.24 : Répartition des différents critères pour une application autonome à grande échelle [29].

Le Tableau I.8 illustre la matrice de décision globale pour le cas d'une application à moyenne échelle. Cette matrice est obtenue en suivant le même procédé que celle obtenue dans le cas d'une application à petite échelle.

Le Tableau 6 montre en termes de performance, que pour une application à moyenne échelle, les STEP viennent en première position et les CEAS en seconde position.

A partir des deux matrices de décision globales (Tableaux I.7 et I.8), pour les deux types d'applications, nous avons déterminé l'indice de performance (Figure I.25).

Dans la catégorie 1, les accumulateurs au lithium-ion et plomb-acide affichent de meilleures performances par rapport aux autres techniques de stockages. Les supercondensateurs, les inductances supraconductrices et les volants d'inertie ayant une dynamique plus rapide peuvent aussi être associés à ces accumulateurs (lithium-ion ou plomb-acide) pour réguler l'énergie lors des appels de puissances élevées. Cela permettra d'éviter le surdimensionnement des batteries et d'augmenter leurs performances.

Pour les applications à grandes échelles (catégorie 2), ce sont : la STEP et le CAES qui sont les plus appropriés. Toutefois, ces technologies de stockages nécessitent des sites adaptés. Les anciens sites miniers sous-terrain peuvent être utilisés pour stocker l'air comprimé. Pour les STEP, Les barrages hydroélectriques existants peuvent être transformés en STEP.

ETAT DE L'ART DE STOCKAGE

	Pondération	STEP	CAES	Hydrogène	Redox	Pb-ac	Li-ion
Adaptabilité aux PV	0,1	0,15	0,15	0,15	0,25	0,45	0,45
Coût	0,1	0,4	0,5	0,05	0,25	0,25	0,05
Autonomie	0,075	0,3	0,3	0,3	0,075	0	0,15
Autodécharge	0,075	0,375	0,225	0,225	0,225	0	0,075
Cyclabilité	0,1	0,4	0,4	0,4	0,15	0	0,15
Efficacité	0,1	0,25	0	0,1	0,25	0,4	0,5
Capacité	0,1	0,45	0,45	0,25	0,25	0,05	0,05
Diminution des GES	0,075	0,1875	0,1875	0,1875	0,1875	0,1875	0,1875
Maturité	0,075	0,2625	0,075	0,1125	0,075	0,3375	0,1875
Sécurité	0,05	0,175	0,175	0	0,175	0,05	0,175
Aspect écologique	0,05	0,2	0,2	0,2	0,075	0,05	0,05
Temps de réponse	0,05	0	0,05	0,1	0,2	0,2	0,2
Simplicité	0,05	0,125	0,125	0,025	0,025	0,225	0,225
Total	1	3,275	2,8375	2,1	2,1875	2,2	2,45
Rang		1	2	6	5	4	3

Tableau. I.8 : Matrice globale de décision (moyenne échelle) [28].

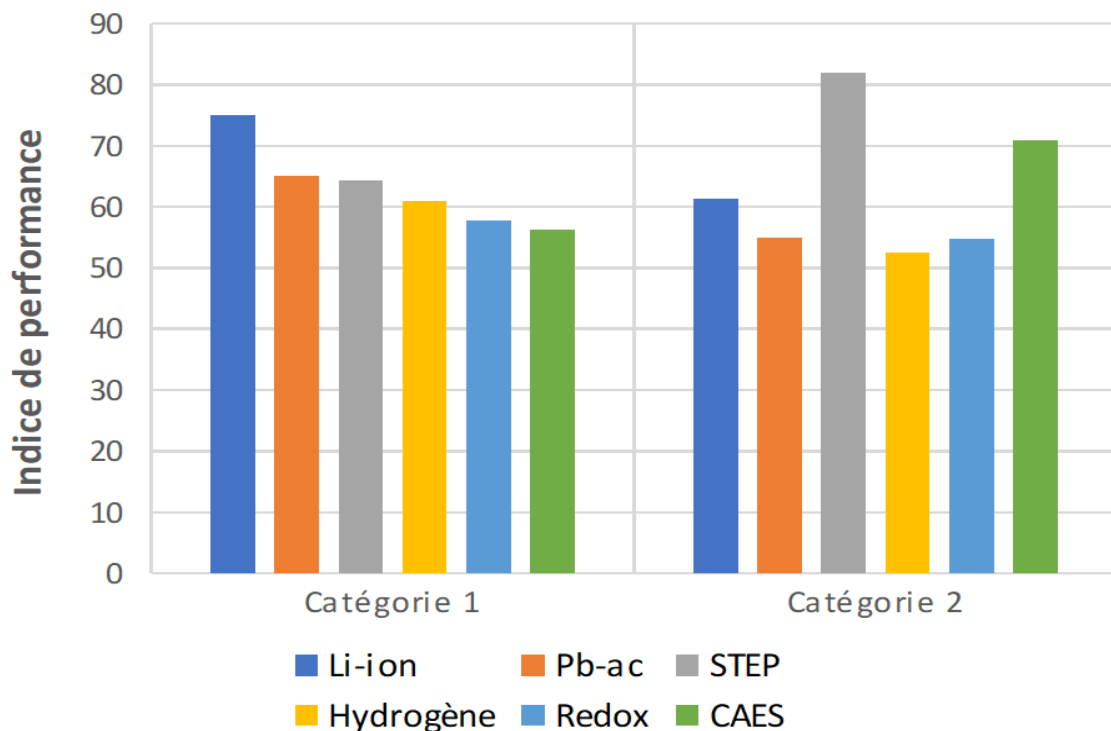


Figure. I.25 : Indices de performances des technologies de stockage applicables aux systèmes suivant deux catégories d'applications [32].

I.5. Conclusion

Le réseau électrique fait face à de grands défis en matière de transmission et de distribution d'énergie pour répondre à la demande avec des variations quotidiennes et saisonnières imprévisibles. Le stockage de l'énergie électrique (SEE) est reconnu comme un potentiel technologique majeur pour relever ces défis, selon lequel l'énergie est stockée dans un certain état, en fonction de la technologie utilisée, et convertie en énergie électrique en cas de besoin. Cependant, la grande variété d'options et les matrices de caractéristiques complexes rendent difficile l'évaluation d'une technologie de stockage spécifique pour une application particulière. Il existe différents types de méthodes de stockage, dont certaines sont déjà utilisées, tandis que d'autres sont encore en développement. Nous avons examiné les principales caractéristiques des différentes techniques de stockage d'électricité et leur domaine d'application (permanent ou portable, stockage à court ou long terme, puissance maximale requise, etc.). Ces caractéristiques serviront à faire des comparaisons afin de déterminer la technique la plus appropriée pour chaque type d'application.

Une étude comparative a été faite, et le stockage par batterie été retenu selon des critères de choix spécifiques nécessaires à notre étude validant notre choix.

Chapitre 02 :

*Modélisation et
simulation d'un
système*

*photovoltaïque avec
stockage*

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

II.1.INTRODUCTION

Pour envisager l'intégration des supercondensateurs et les batteries dans une **chaîne de conversion de l'énergie solaire**, une étude par **modélisation**, peu coûteuse et immédiate, est intéressante à effectuer, encore faut-il disposer d'un outil fiable et relativement aisé à instruire. C'est ce que l'on a étudié et cité les différents composants de système à étudier, nous procédons à la modélisation de ce dernier, ce qui nécessite un ensemble d'équations caractérisant chaque élément du système.

Dans ce chapitre, nous représenterons d'abord une généralité sur l'énergie photovoltaïque puis nous donnerons une modélisation des différents composants de système à étudier (à commencer par le modèle du générateur photovoltaïque) puis le système de gestion de celui-ci muni de batteries. Cette modélisation sera faite utilisant l'environnement (Matlab/Simulink).

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

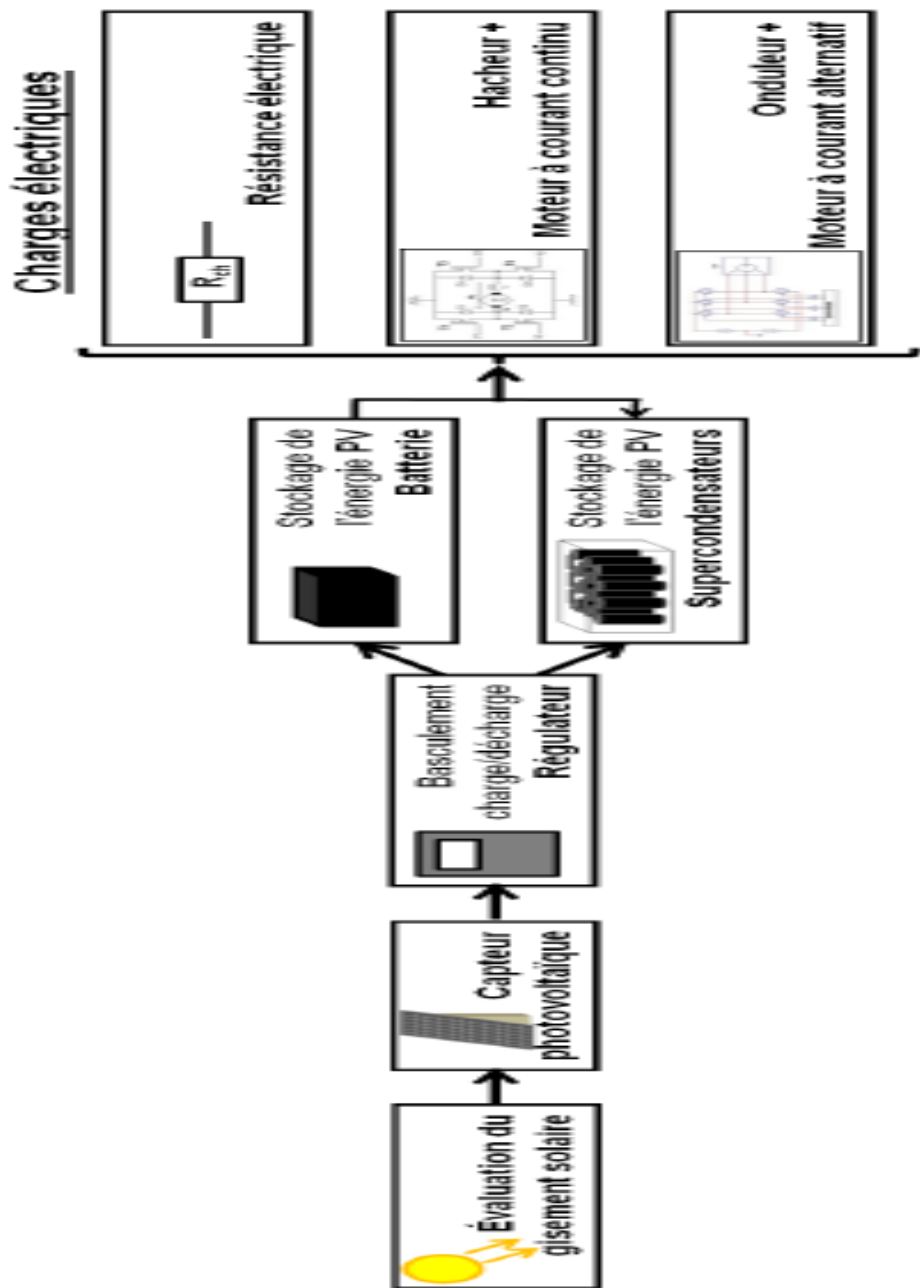


Figure. II.1 : chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque par batteries et super-condensateurs [39].

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

II.2. Système autonome avec stockage :

C'est le système le plus répandu. Le composant de stockage permet d'emmagasinier de l'énergie et de la restituer à la charge lorsque le rayonnement solaire est faible ou absent (pendant la nuit). Il existe divers composants de stockage dont les plus répandus, les batteries électrochimiques, le stockage d'hydrogène, les volants d'inerties, les surcapacités, ont été présentes au chapitre I.

Nous nous intéresserons à ce type de système dans la suite.

II.2.1. Description du système à étudier :

Le système a étudié est constitué de modules photovoltaïques, un convertisseur DC/DC (de type survolteur), ce dernier est commandé par un signal provenant du bloc MPPT, une batterie et un bloc de gestion reliée a une charge continue.

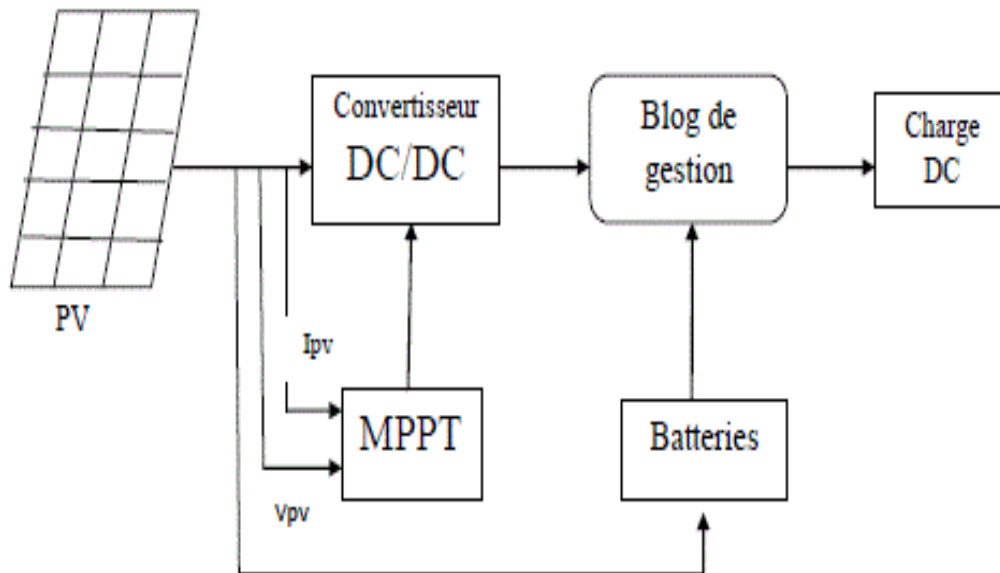


Figure. II.2 : Schéma de système [40].

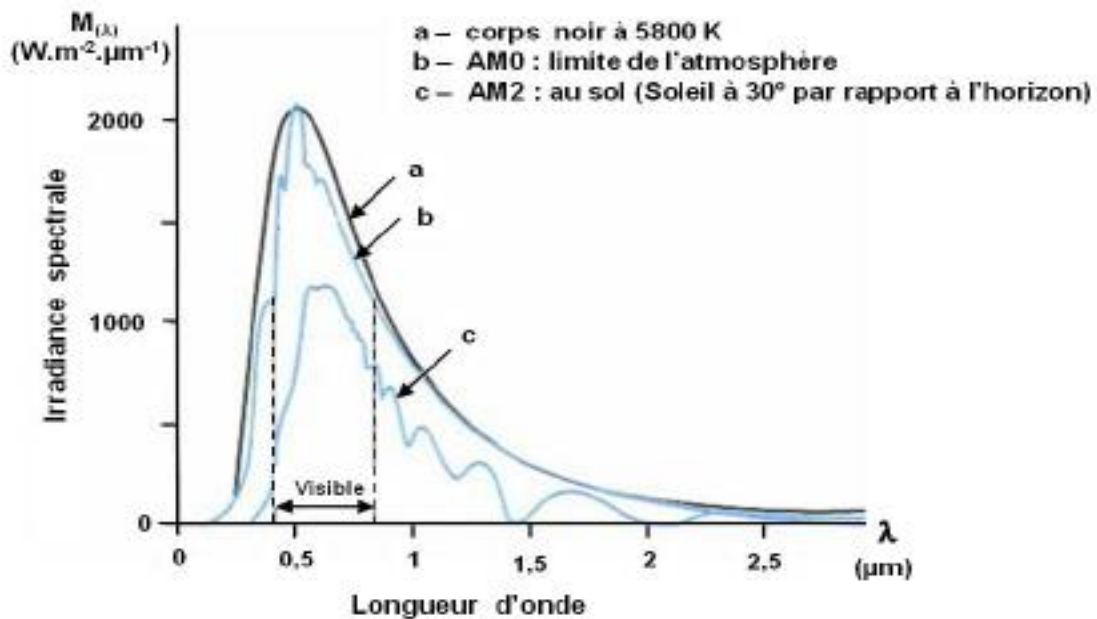
- Les panneaux photovoltaïques: permettent l'alimentation de la charge
- Le convertisseur DC/DC: permet d'obtenir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe.
- La commande MPPT: permet d'extraire la puissance maximale produite par les modules photovoltaïques.
- Le système de gestion: assure la gestion du flux d'énergie en alimentant la charge et en protégeant la batterie contre la surcharge et la décharge profonde.

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

II.3. Généralité sur la production d'énergie photovoltaïque :

II.3.1. L'énergie solaire :

L'énergie dégagée par le Soleil, distant de 150 millions de kilomètres de la Terre est évacuée dans l'espace par rayonnement électromagnétique. Les réactions thermonucléaires qui ont lieu dans le cœur du Soleil entretiennent et renouvellent en permanence cette source d'énergie [39]. Une partie de cette énergie radiative atteint l'atmosphère terrestre. La surface du soleil se comporte comme un corps noir à la température d'environ 5800 K dont le spectre est donné par la figure 2.2. Le spectre réel hors atmosphère est donné par la courbe b et le spectre au sol, modifié par l'atmosphère terrestre, est représenté par la courbe c pour un cas donné. Les longueurs d'onde du rayonnement solaire sont comprises entre 0,2 μm (ultraviolet) et 4 μm (infrarouge). 97,5% de l'énergie est comprise dans la zone des longueurs d'onde inférieures à 2,5 μm , notamment dans la zone du rayonnement visible comprise entre 0,4 et 0,78 μm .



L'éclairement moyen I_0 reçu par une surface disposée perpendiculairement aux rayons solaires à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (masse d'air AM0) est égale à $I_0 = 1366 \text{ W m}^{-2}$, valeur communément utilisée. Cet éclairement varie au cours de l'année au maximum de $\pm 7\%$ en raison des légères variations de la distance Terre-Soleil dues à la trajectoire elliptique de la Terre. Cette valeur a été déterminée dans le cadre de la norme ASTM E-490 réalisée par la Société Américaine de Tests et des Matériaux (ASTM : American Society for Testing and Materials) à partir de données provenant de satellites, et de missions effectuées avec des navettes spatiales, des avions à haute altitude et des

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

fusées, ainsi que des télescopes solaires basés au sol et des modèles d'irradiance spectrale [40].

Seule **une fraction modifiée du rayonnement solaire** parvient à la surface terrestre car le rayon solaire est partiellement réfléchi, absorbé et diffusé par les différentes molécules de l'atmosphère. Le rayonnement arrivant dans l'atmosphère est d'abord diffusé par les molécules gazeuses (dioxyde de carbone, vapeur d'eau, ozone), par les aérosols et les poussières ainsi que par les nuages. Une partie de l'ensemble de ces trois diffusions est renvoyée vers l'espace (34%). L'autre partie, renvoyée vers le sol, constitue le rayonnement diffus (18%). Le reste du rayonnement incident (48%) subit :

- une absorption, par les molécules gazeuses, responsable de l'échauffement de l'atmosphère,

Ainsi que par les aérosols et les poussières (6%) ;

- une absorption par les nuages (12%) ;

- une transmission parvenant directement au sol (30%).

Le sol reçoit, en définitive, un rayonnement diffus (18%) et un rayonnement direct (30%). L'ensemble de ces deux rayonnements constituent le rayonnement global (48%) dont 90% sont absorbés par le sol et 10% rétrodiffusés vers l'espace. Une fraction du rayonnement reçu par le sol, en provenance de l'atmosphère, est diffusée vers celle-ci. Ce pouvoir de diffusion s'appelle l'albédo (symbolisé par a). Les transferts énergétiques entre le sol et l'atmosphère se font par évaporation et par des turbulences. L'atténuation du rayonnement solaire est difficile à connaître en raison du **caractère aléatoire de la météorologie** en un lieu et un moment considéré. Cependant, des **expressions empiriques** permettent une estimation de l'énergie reçue au sol. Le rayonnement global au sol est fonction de la composition et de l'épaisseur d'atmosphère traversée par les rayons au cours de la journée en un lieu donné peuvent ainsi être estimés pour un capteur plan.

II.3.2. Le générateur photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est l'élément constitutif des modules Photovoltaïques. Un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs modules, ces derniers étant constitués de plusieurs cellules en série afin d'obtenir une tension souhaitée. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque consiste en une conversion d'énergie lumineuse (solaire) en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque, une des propriétés électriques des semi-conducteurs [41].

II.3.2.1. Principe photovoltaïque :

a - Jonction PN :

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

Une jonction P-N est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dope N (donneurs d'électron) et d'un semi-conducteur dope P (compose de trous). L'interface entre ces deux régions s'appelle une jonction.

Pour réaliser des cellules photovoltaïques, il existe trois configurations de jonctions :

- _ Une jonction PN (homo-jonction, i.e. : les deux régions sont constituées d'un même matériau semi-conducteur, du silicium dans la majorité des cas)
- _ Une hétérojonction (jonction entre deux semi-conducteurs différents)
- _ Une jonction métal-semi-conducteur.

Dans ces trois configurations, les phénomènes physiques intervenant dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques sont similaires [42].

Les électrons de la jonction se déplacent vers la région P et les trous vers la région N. Il ne reste que des atomes ionisés fixes. Cette zone (dite de déplétion) de porteurs libres est appelée « zone de charge d'espace » créant un champ électrique. En dehors, le champ électrique est nul. Dans une homojonction à l'équilibre thermodynamique, à la frontière des deux régions, il s'est formé pendant le processus de déplétion, une barrière de potentiel (V_D) (tension de diffusion).

$$V_D = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_D N_A}{N_i^2}\right) \quad (2.1)$$

V_D [V] tension de diffusion sur une jonction.

$k=1,380662 \cdot 10^{-23}$ J. K^{-1} constante de Boltzmann.

T [°K] température absolue du cristal.

$q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ charge élémentaire.

N_D [cm^{-3}] concentration des donneurs.

N_A [cm^{-3}] concentration des trous.

N_i [cm^{-3}] concentration intrinsèque.

Avec $V_T = kT/q = 26$ mV à la température ambiante.

Les cellules solaires photovoltaïques sont souvent des jonctions dissymétriques, c'est-à-dire qu'un dopage est plus fort que l'autre. Dans ce cas, la zone de charge d'espace se trouve pratiquement dans la région la plus faiblement dopée.

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

b - Production d'électricité :

La cellule solaire est le lieu où la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique se produit. La puissance électrique résultant de cette conversion dépend du flux et de la répartition spectrale de l'énergie spectrale.

Dans une cellule photovoltaïque basée sur une jonction PN une excitation lumineuse crée, aux alentours de la jonction, des paires électron-trou qui se déplacent sous l'influence du champ électrique de la jonction.

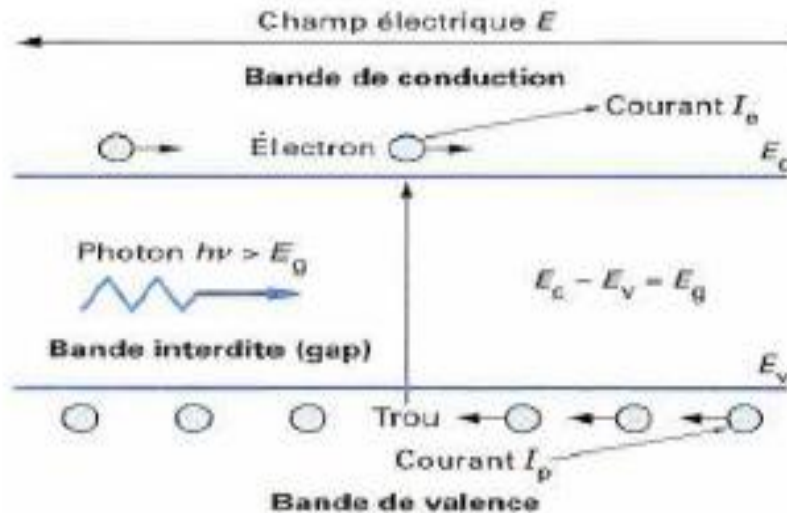


Figure. II.4 : Principe de la conversion photon-électron dans un système à deux niveaux d'énergie [42].

c - Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

La naissance d'une différence de potentiel lorsque les porteurs de charges sont créés dans les environs de la jonction par excitation lumineuse, permet à la cellule de fonctionner comme un générateur électrique quand les deux faces de la cellule sont électriquement reliées à une charge, par exemple une résistance R .

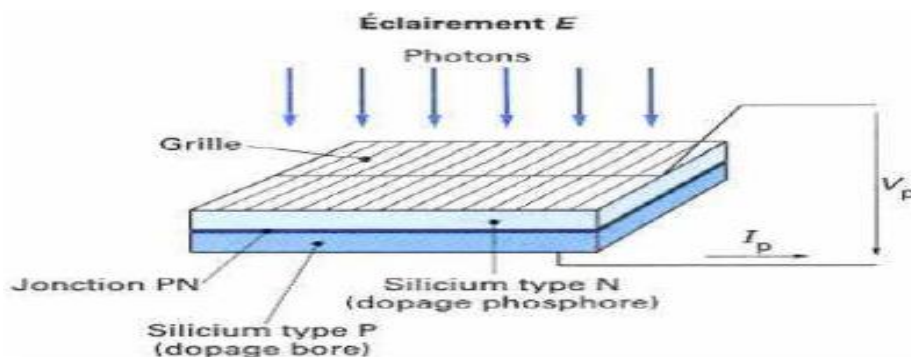


Figure. II.5 : Production d'électricité par la séparation électron-trou [42].

Les contacts de la face éclairée de la cellule ont la structure d'une grille afin de n'occulter qu'une faible partie de la surface (5 à 10%). La face arrière peut être entièrement

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

métallisée. Afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident, une couche antireflet recouvre uniformément toute la face avant.

La puissance maximale pouvant être délivrée par le module photovoltaïque est définie sur sa caractéristique I-V par le point de puissance maximale (MPP en anglais, Maximum Power Point). Une transformation de la caractéristique de la charge connectée permet donc de bénéficier du maximum de puissance du module.

II.3.2.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

- **Générateur photovoltaïque idéal :**

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{Ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV. Si l'on connecte une charge résistive aux bornes du générateur photovoltaïque, ce dernier y débite une part de courant I et le reste, le courant I_D , dans la diode. On a alors la relation :

$$I = I_{Ph} - I_D \quad (2.2)$$

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_D \quad (2.3)$$

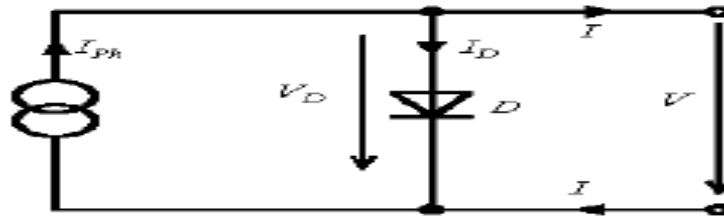


Figure II.6 : Modèle simplifié d'une cellule PV [41].

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_D = I_S \left(\exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (2.4)$$

Avec :

I_S courant de saturation inverse de la diode

$V_T = kT/q$, potentiel thermique

Le courant débité équivaut à :

$$I = I_{Ph} - I_D = I_{Ph} - I_S \left(\exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (2.5)$$

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans des conditions réelles. Toutefois, il reste valable sous certaines hypothèses (non prise en compte de perte de tension, courant de fuite...). Il existe d'autres modèles, certes théoriques, mais qui rendent plus fidèlement compte du comportement de la cellule photovoltaïque.

- **Générateur photovoltaïque "réel" :**

Le modèle photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_{sh} .

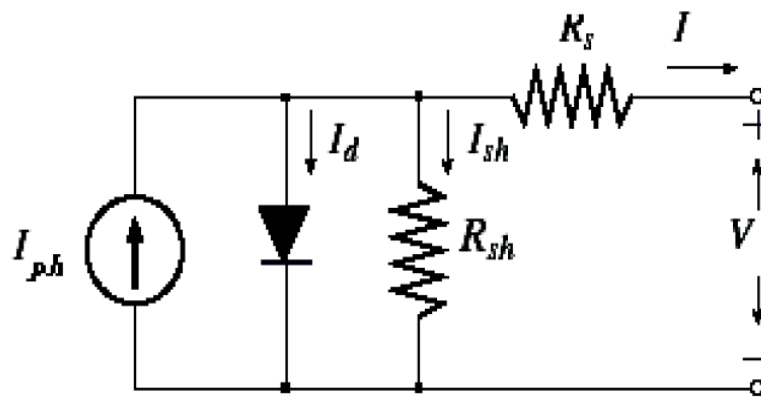


Figure. II.7 : Modèle de la cellule PV avec prise en compte de perte en tension et courant de fuit [41].

L'équation qui régit ce modèle est :

$$I = I_{ph} - I_d - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(\exp \left[\frac{e}{\alpha \cdot K \cdot T} (V + I \cdot R_s) \right] - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}}$$

Où a :

α : Le facteur d'idéalité.

T : la température de la cellule en degré Kelvin.

e : la charge de l'électron $e = 1.6021 \cdot 10^{-19}$ Cb.

K : la constante de Boltzmann $K = 1.3854 \cdot 10^{-23}$ J.K-1.

I : le courant de sortie de la cellule.

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

V : la tension de sortie de la cellule.

I_0 : le courant de saturation inverse de la diode.

I_{ph} : le courant photovoltaïque généré par la cellule

- **Paramètres d'une cellule solaire :**

La cellule photovoltaïque est caractérisée par plusieurs paramètres :

Le courant de court-circuit I_{sc} : c'est le courant maximal généré par la cellule ; il est produit lorsqu'elle est soumise à un court-circuit, dans ce cas on peut écrire $I_{ph} \approx I_{sc}$ du fait que $R_s \ll R_{sh}$

Tension à circuit ouvert V_{oc} : c'est la tension aux bornes de la cellule sans charge.

Point de puissance maximale (PPM) : c'est le point de fonctionnement (V_{mp} , I_{mp}) où la cellule solaire génère sa puissance maximale. La figure II.7 montre les courbes typiques I-V, et P-V pour un module PV de 60W.

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

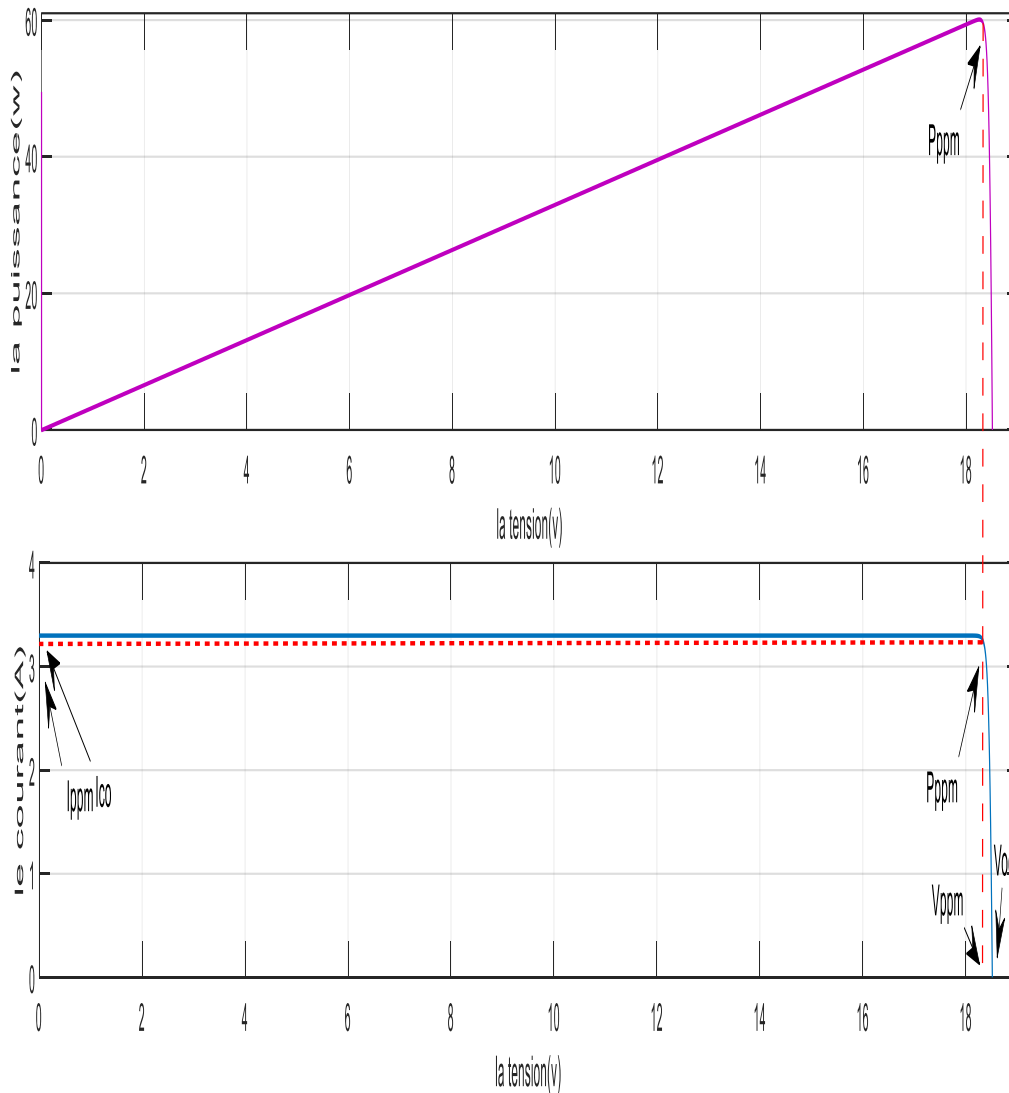


Figure. II.8 : Caractéristiques I-V, P-V, d'un module PV (MPP).

La résistance de shunt R_{sh} a une valeur très grande. Donc le terme $(\frac{V+I.R_s}{R_{sh}} \approx 0)$.et donc l'expression (I.1) peut s'écrire :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(\exp \left[\frac{e}{\alpha \cdot K \cdot T} (V + I \cdot R_s) \right] - 1 \right) \quad (2.7)$$

En court-circuit : $I_{ph} \approx I_{sc}$

En circuit ouvert : $V = V_{oc} = \left(\frac{\alpha \cdot K \cdot T}{e} \right) \cdot \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) = V_{th} \cdot \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right)$; avec $V_{th} = \frac{\alpha \cdot K \cdot T}{e}$.

Où : V_{th} la tension thermique.

Par ailleurs on a : $\exp \left[\frac{e}{\alpha \cdot K \cdot T} (V + I \cdot R_s) \right] \gg 1$; car $\frac{e}{K} \approx 10^4$

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

$$I = I_{sc} - I_0 \cdot \left(\exp \left[\frac{e}{\alpha \cdot K \cdot T} (V + I \cdot R_s) \right] \right) \quad (2.8)$$

Ou encore : l'équation courant-tension de la cellule s'écrit donc :

$$I = I_{sc} - \left(1 - \left(\exp \left[\frac{V - V_{oc} + I \cdot R_s}{V_{th}} \right] \right) \right) \quad (2.9)$$

Ce modèle qui permet de tenir compte de l'influence de la température et de l'ensoleillement a été implémenté sous Matlab Simulink (fig. II.8.) ; il a comme paramètres d'entrée : la tension aux bornes des panneaux PV, l'ensoleillement et la température [41].

Notons que lors des simulations, la tension des panneaux est calculée chaque instant et réutilisée comme paramètre d'entrée. Les figure (II.9 ; II.10). Montre l'influence de l'ensoleillement sur la caractéristique courant – tension (I-V) d'une cellule unitaire. Pour obtenir ces différentes caractéristiques, un balayage de la tension des panneaux de 0 a V_{co} (tension en circuit ouvert) a été effectuée.

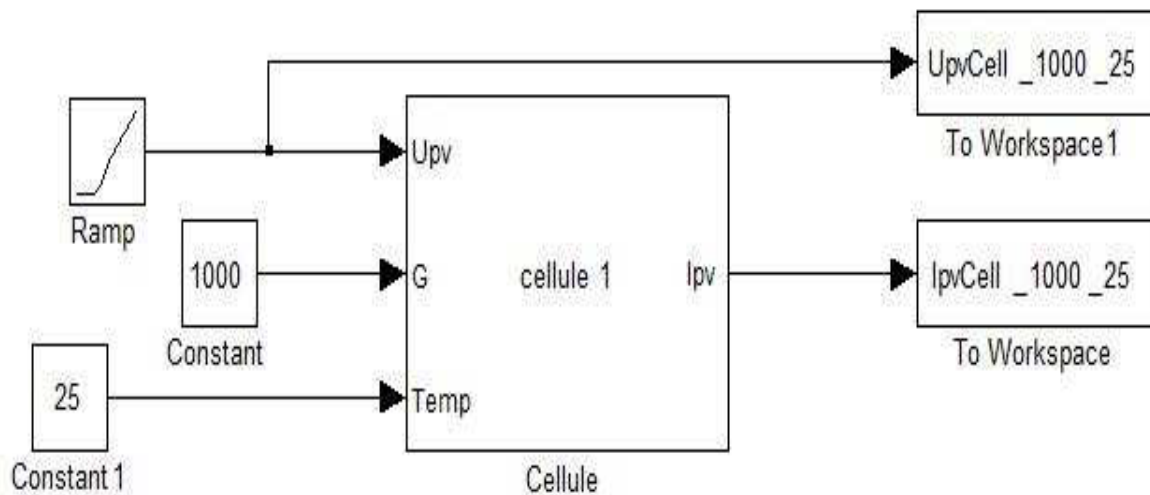


Figure. II.9 : Test de la cellule PV sous Simulink.

II.3.2.3. Facteurs influençant le fonctionnement d'une cellule Photovoltaïque ;

- **Influence de l'ensoleillement ou irradiation :**

L'apport d'énergie permettant la séparation électron-trou étant assuré par l'énergie lumineuse, il est donc normal que l'augmentation de l'ensoleillement E entraîne automatiquement l'augmentation des paires électron-trou séparées. Le courant débité I_{Ph} est donc proportionnel à l'ensoleillement E :

$$I_{Ph} \propto E \quad (2.10)$$

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

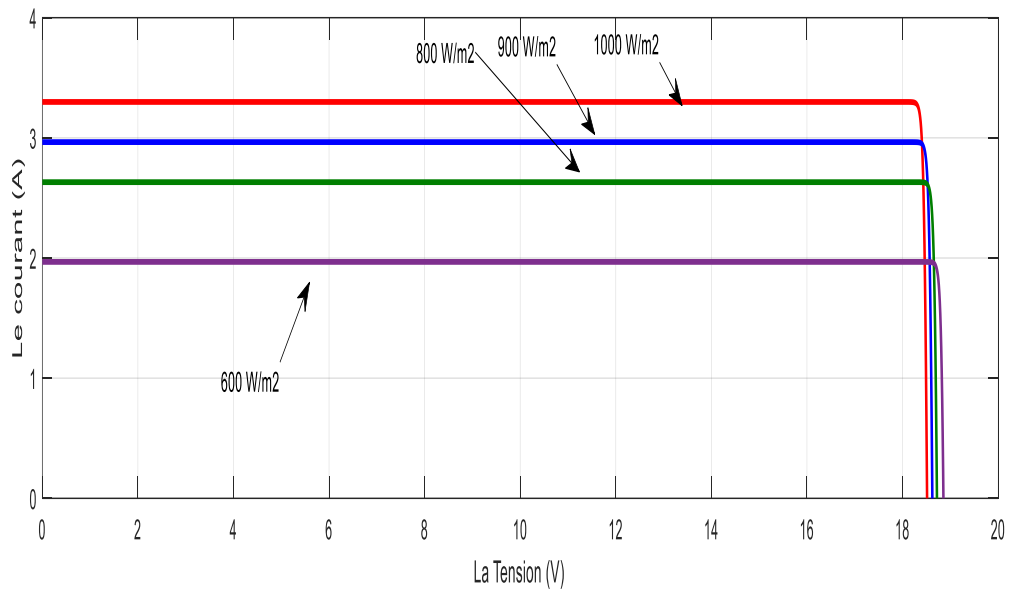


Figure. II.10 : Caractéristique I=f (V) d'un module de cellules photovoltaïques au silicium pour une variation d'ensoleillement.

- **Influence de la température :**

La température a une influence notable sur le rendement d'une cellule photovoltaïque.

De manière générale, nous pouvons définir le coefficient de température pour une variable y de la façon suivante :

$$TC(y) = \frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial t} \quad (2.11)$$

Expérimentalement, on remarque que le courant de court circuit varie peu avec la température tandis que la tension à vide est beaucoup plus influencée (de l'ordre de -0.4%/K). La température a donc une influence non négligeable sur le rendement d'une cellule photovoltaïque (perte de puissance de l'ordre de 9-15% pour une augmentation de 30°). Pour le même éclairage, les courbes I-V changent avec la température des cellules,

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

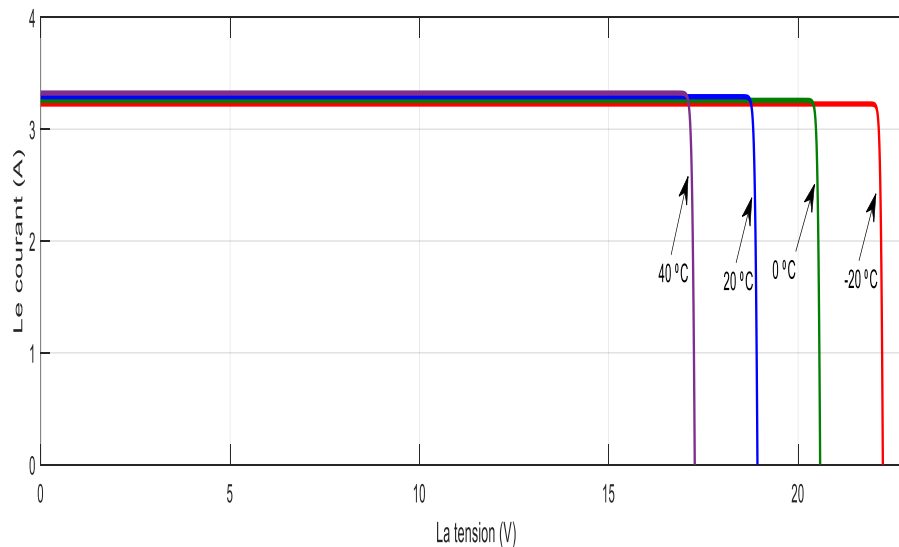


Figure. II.11 : Caractéristique $I=f(V)$ d'un module de cellules photovoltaïques au silicium pour une variation de la température.

Nous remarquons que le courant débité par la cellule est proportionnel à l'ensoleillement tandis que la tension des panneaux est inversement proportionnelle à la température. La cellule PV étant le composant unitaire d'un module PV, nous verrons dans le prochain paragraphe la modélisation des panneaux PV.

II.3.3. Le panneau solaire :

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de plusieurs modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise.

Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.

Considérant le cas d'un panneau photovoltaïque composé de N_p modules montés en parallèle, chaque module étant composé de N_s cellules solaires en série. Le courant délivré par ce panneau sous des conditions atmosphériques constantes est donné par :

$$I^P = I_{sc}^P - (1 - \exp\left[-\frac{V^P - V_{oc}^P + I^P \cdot R_s^P}{N_s \cdot V_{th}^c}\right]) \quad (2.12)$$

$$\text{Avec } \begin{cases} I_{sc}^P = N_p \cdot I_{sc}^c \\ V_{oc}^P = N_s \cdot V_{oc}^c \\ R_s^P = R_s^c \cdot N_s \end{cases}$$

Le symbole 'P' est utilisé pour indiquer que la valeur concerne le panneau, alors que 'C' - la cellule.

La formule donnant le courant du panneau nous servira ensuite à établir le modèle du panneau.

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

Les équations donnant la variation de la tension de circuit ouvert V_{oc} et le courant de court-circuit I_{sc} (en fonction d'éclairement G_a (W/m^2) et de la température de jonction T_c ($^{\circ}C$) par rapport aux conditions standards STC ($25^{\circ}C$, $1000 W/m^2$) sont les suivantes :

$$I_{sc} = C_1 \cdot G_a [1 + (T - T_{STC}) \cdot 5 \cdot 10^{-4}] \quad (2.13)$$

Avec:

$$C_1 = \frac{I_{sc(STC)}}{G_a(STC)}$$

$$V_{oc} = V_{oc(STC)} + C_3 \cdot (T - T_{STC}) + V_{th} \cdot \ln \left[\frac{G_a}{G_a(STC)} \right] \quad (2.14)$$

Où C_3 représente le coefficient du facteur de correction de la tension de circuit ouvert en fonction de la température. La valeur type de ce facteur est $C_3 = -2.3 \cdot 10^{-3} V/^{\circ}C$.

La température des cellules T_c dépend exclusivement de l'ensoleillement G_a et de la température ambiante T_a :

$$T_c = T_a + C_2 \cdot G_a \quad (2.15)$$

Où C_2 est approximativement $0.03^{\circ}C \cdot m^2/W$

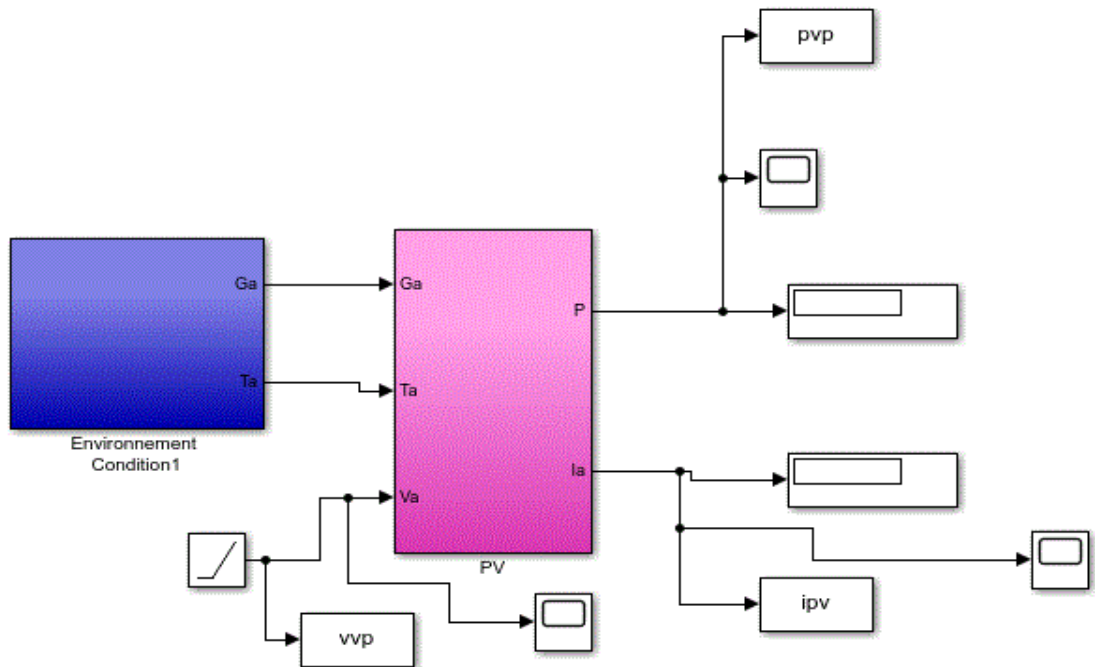


Figure II.12 : Modèle Simulink d'un panneau PV de 60W.

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

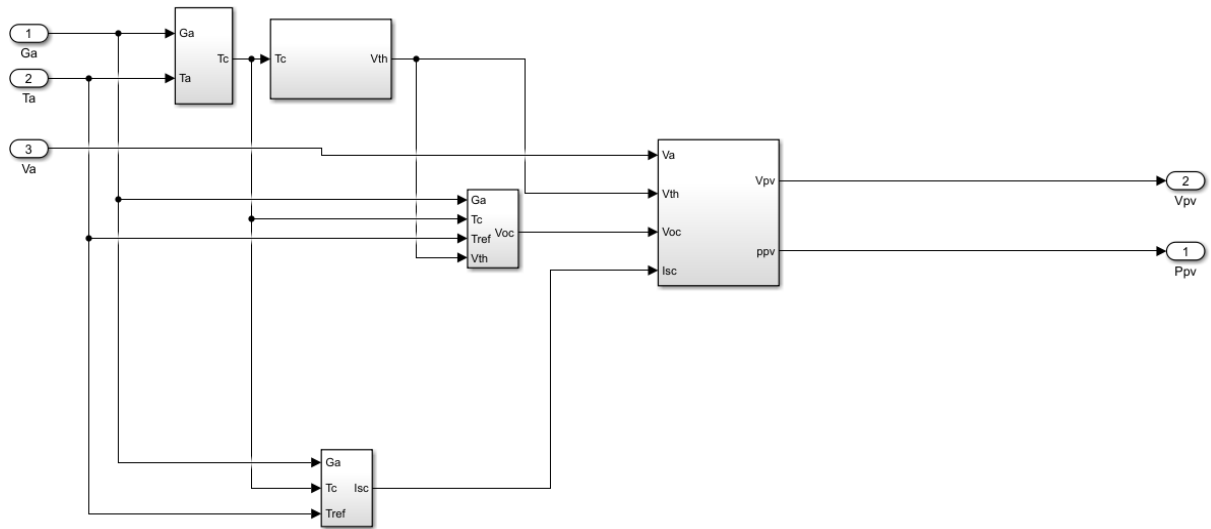


Figure II.12 : Modèle Simulink d'un panneau PV de 60W

II.3.4. Point de puissance maximale, rendement, facteur de forme :

- **Point de puissance maximale :**

Pour une cellule PV, nous pouvons définir le courant de court circuit ISC et la tension a vide VOC. Le courant ISC correspond à la valeur du courant débité lorsque la cellule est court circuitée, alors que VOC est la tension a ses bornes en l'absence de charge.

Si nous traçons la courbe de puissance P (avec $I \times V \hat{=} [0, ISC] \times [0, VOC]$), nous obtenons un point de fonctionnement PMPP ou la puissance est maximale.

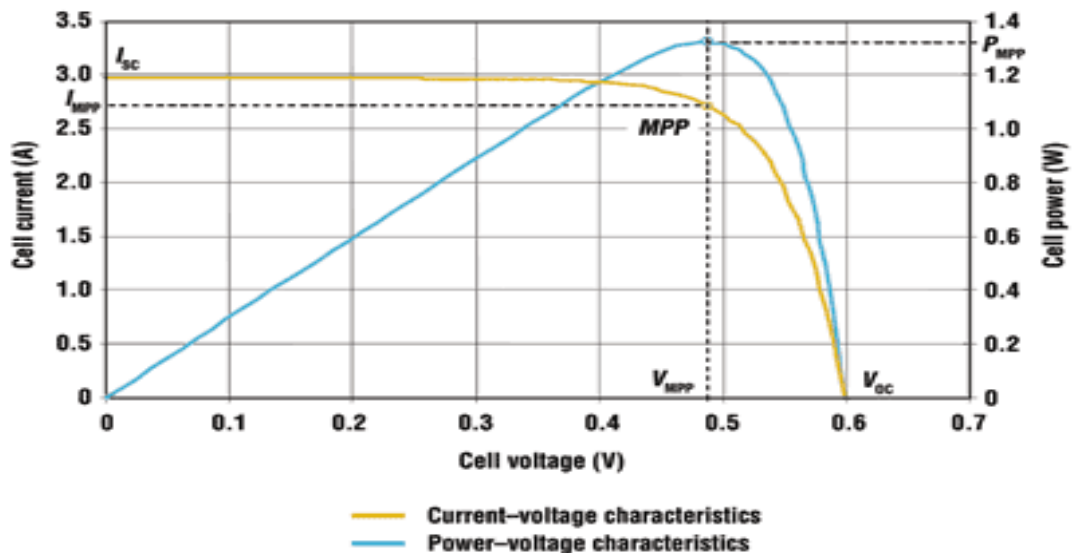


Figure. II.13 : Mise en évidence du MPP.

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

- **Rendement :**

Nous pouvons définir le rendement d'une cellule photovoltaïque comme le quotient de la puissance maximale et de la puissance lumineuse reçue par la cellule. Cette puissance lumineuse correspond au produit de l'aire de la cellule par l'ensoleillement.

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{A_c \cdot E} \quad (2.16)$$

Où :

- P_{MPP} : (W) est le point de puissance maximale ou le point de charge maximale de la photopile U_m (V) et I_m (A) désignent respectivement la tension et le courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

- E : (W/m²) est la puissance du rayonnement solaire reçu par le capteur.

- A_c : (m²) est la surface du capteur.

- **Facteur de forme :**

Il permet de juger de la qualité d'une cellule photovoltaïque. Il est défini comme le rapport entre le point de puissance maximum et la puissance à courant de court-circuit et tension en circuit ouvert.

$$FF = \frac{P_{MPP}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{\eta \cdot A_c \cdot E}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.17)$$

A partir de cette définition, pour une cellule dont la caractéristique I-V est rectangulaire (source de courant), le facteur de forme sera donc unitaire. Le facteur de forme d'une bonne cellule photovoltaïque devra être compris entre 0,75 et 0,85.

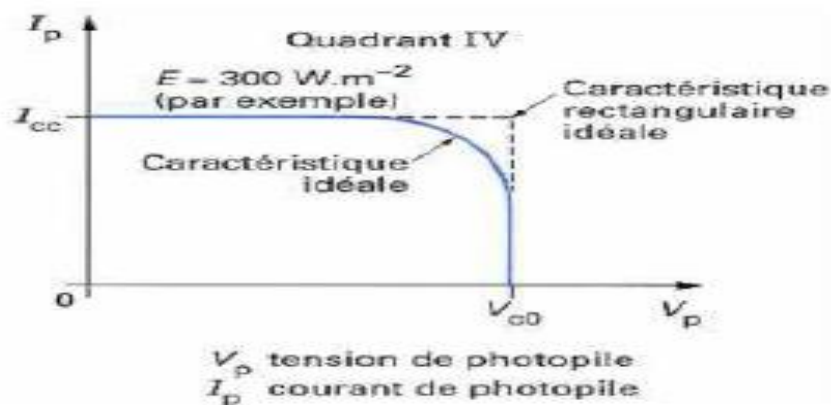


Figure. II.14 : Caractéristique idéale d'une cellule P-V42].

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

C'est dans ce quatrième quadrant, où la jonction PN fonctionne en générateur, que la tension à vide est celle de la diode en polarisation directe (0,5 à 0,8 V pour Si). La caractéristique dans le quatrième quadrant de la jonction est donc celle de la cellule photovoltaïque. L'intersection de cette caractéristique avec celle de la charge donne le point de fonctionnement de la cellule.

II.4. La commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT)) :

La commande du système MPPT consiste en l'ajustement de convertisseur (dans notre cas un convertisseur continu/continu « DC/DC ») à récupérer le maximum d'énergie produite par le photo-générateur, c'est à dire minimiser voire éliminer les pertes d'énergie. Le modèle de la caractéristique courant-tension est non linéaire, avec des contraintes de température et l'ensoleillement qui varient d'une manière aléatoire ce qui nous confronte à un problème d'optimisation non linéaire [43]. Afin d'optimiser la puissance produite par le champ photovoltaïque, plusieurs méthodes peuvent être utilisées [44] :

- La méthode d'ajustement de courbe
- La méthode de circuit ouvert de générateur
- La méthode de court-circuit
- La méthode perturbation & observation (PO)
- La méthode d'incrément de conducteur
- Les méthodes avancées (logique floue, réseaux de neurones)
- La méthode <<look-up table>>.

II.4.1. La méthode perturbation & Observation (PO) :

La méthode Perturbation & observation (PO) est l'une des méthodes les plus utilisées [45,46]. C'est une méthode itérative permettant d'obtenir le PPM : en mesurant les caractéristiques du panneau PV puis on induit une petite perturbation sur la tension afin d'analyser la variation de puissance qui en résulte.

La figure (II.15) présente le diagramme de l'algorithme PO. Le principe de commande MPPT de type PO consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte. On peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a déjà dépassé le PPM. Un raisonnement peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

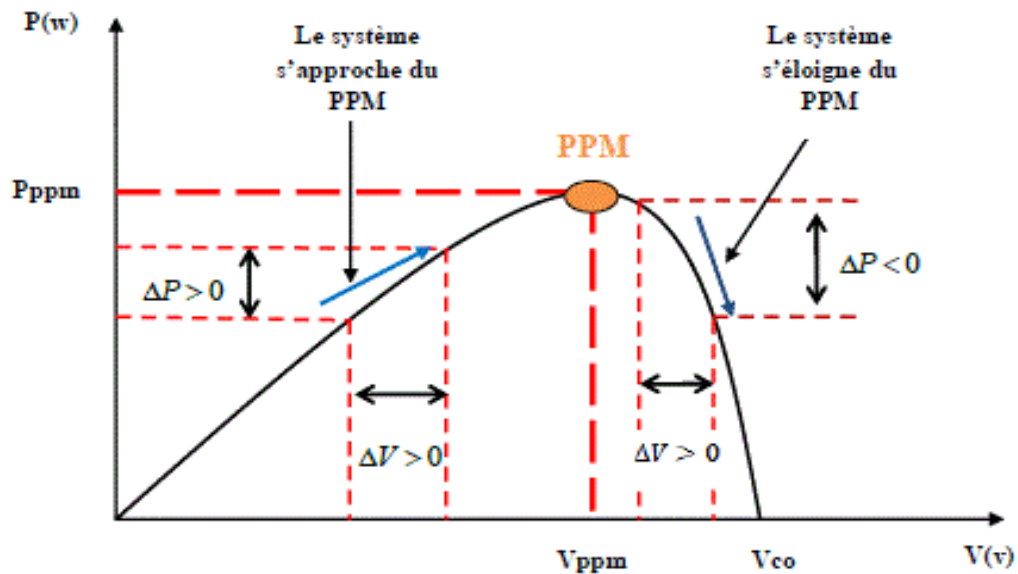


Figure. II.15 : Caractéristique $P=f(V)$ et fonctionnement de la méthode PO [47.48]

La figure (II.16) représente l'algorithme classique à une commande MPPT de type PO, où l'évolution de la puissance est analysée à chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (mesurant le courant et la tension des panneaux PV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

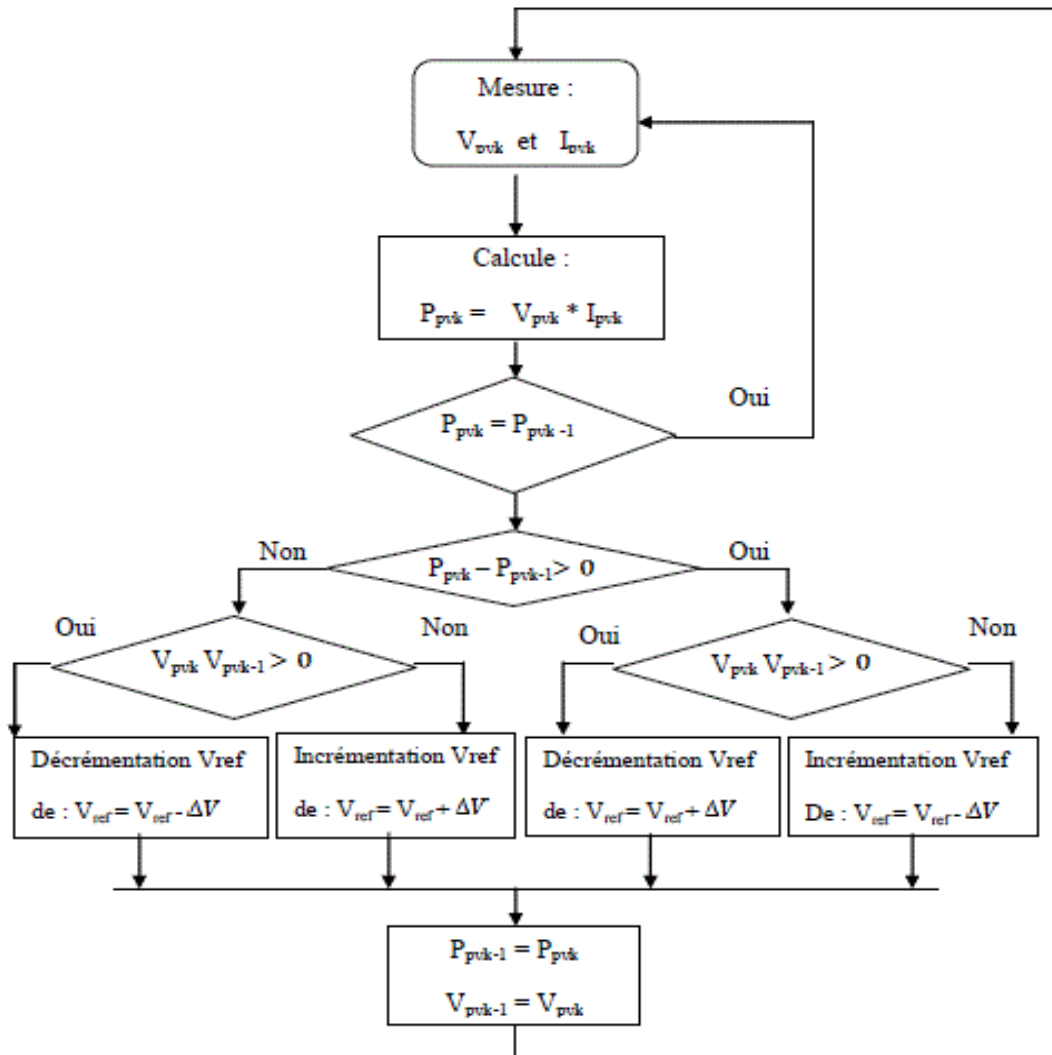


Figure II.16 : Organigramme de l'algorithme MPPT de la méthode PO [48].

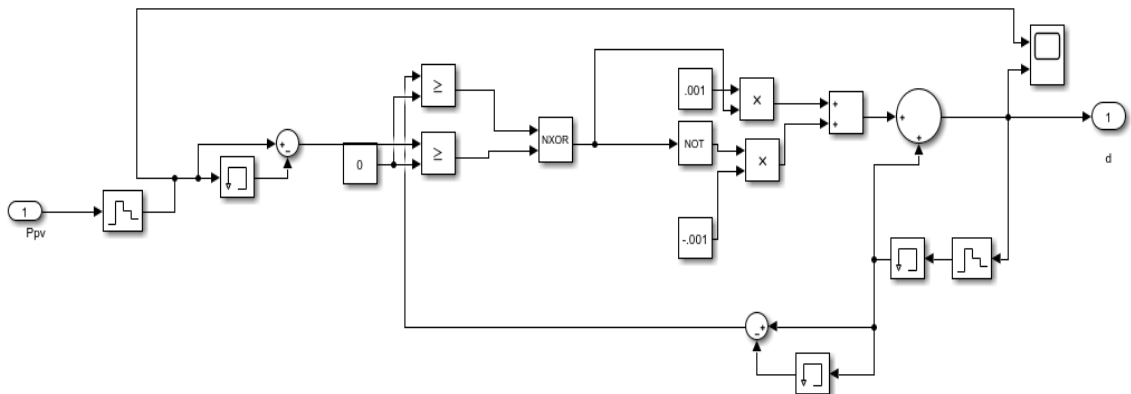


Figure.III.17 : Schéma bloc de MPPT (P&O) sous Simulink.

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

II.5. Les convertisseurs statiques :

Les convertisseurs sont des appareils servent à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative.

II.5.1. Convertisseur DC/DC (Hacheur) :

Les convertisseurs DC/DC permettent d'adapter la source d'énergie électrique a un récepteur donné, ils ont pour fonction de fournir une tension continue variables à partir d'une tension continue fixe. Cette conversion d'énergie s'effectue grâce un "découpage" haute fréquence caractérisée par un rendement élevé [44]. Ces convertisseurs peuvent être de type éleveurs de tension <<Boost>> ou abaisseur de tension <<Buck>> ou abaisseur-éleveur <<Buck-Boost>>, le convertisseur <<Boost>> est choisi puisqu'il a d'excellentes caractéristique telles que les possibilités des tensions élevées et de rendement important ; la petite taille et le bas prix.

II.5.2. Modélisation du hacheur survolteur (BOOST) :

II.5.3.1. Convertisseur éleveur « BOOST » :

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant-continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). Connue aussi sous le nom de « Boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la (Figure II.18).

Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure

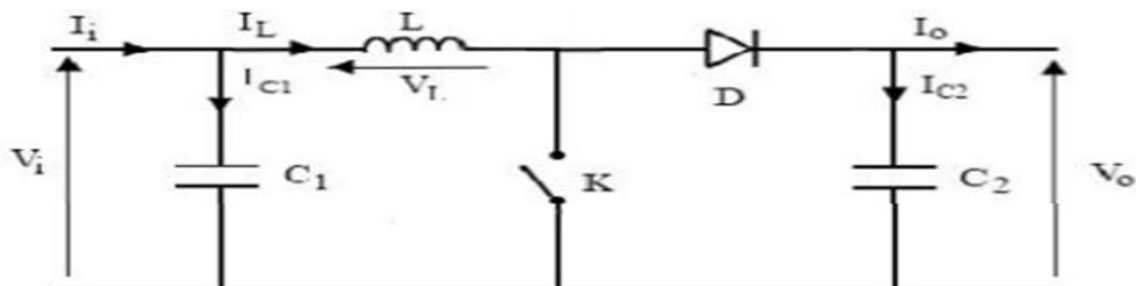


Figure II.18: Schéma de convertisseur élévateur « Boost » [44]

II.5.3.2. Principe de fonctionnement :

Lorsque l'interrupteur 'K' est fermé, l'inductance se charge et le courant $i(t)$,

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

provenant du module solaire, augmente progressivement et ce durant $t \in [0, dT_s]$. Quand 'K' s'ouvre, la rupture du courant provoque une surtension d'où l'utilité de la diode qui protège K en empêchant le retour du courant.

Le condensateur sert à lisser la tension de sortie. L'inductance L libère une énergie qui s'ajoute à celle de la source pour alimenter la charge via la diode D durant $t \in [dT_s, T_s]$.

Le rapport de conversion $M(d)$ est donc écrit sous la forme suivante :

$$M(d) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{d'} = \frac{1}{1-d} \quad (2.18)$$

En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à :

$$V_0(1-d) = V_i \quad (2.19)$$

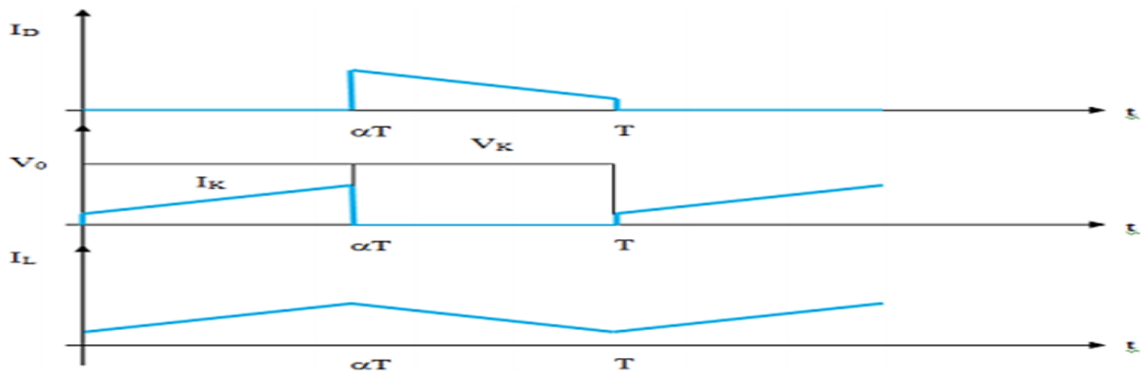


Figure II.19: Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost [44]

II.5.3.3. Modèle mathématique équivalent :

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur

K. celui de la (Fig. II.20) présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c.-à-d. d'entre $[0, \alpha T_e]$.

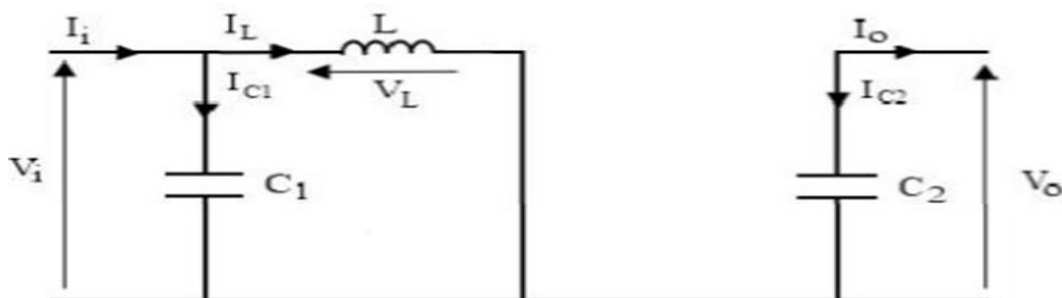


Figure II.20 : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé [44].

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donnent les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 I_{c1}(t) &= C1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \\
 I_{c2}(t) &= C2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \\
 VL &= L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t)
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

L'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant :

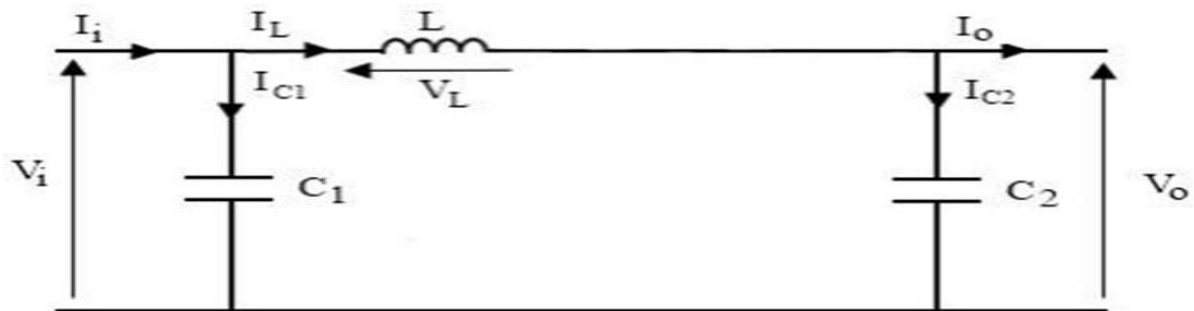


Figure II.21: Schéma électrique boost ouvert [44].

D'après la loi de Kirchhoff :

$$\begin{aligned}
 I_{c1}(t) &= C1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \\
 I_{c2}(t) &= C2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \\
 I_L(t) &= C1 \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t)
 \end{aligned}
 \tag{2.21}$$

Hacheur survolteur sous Simulink comme suivante :

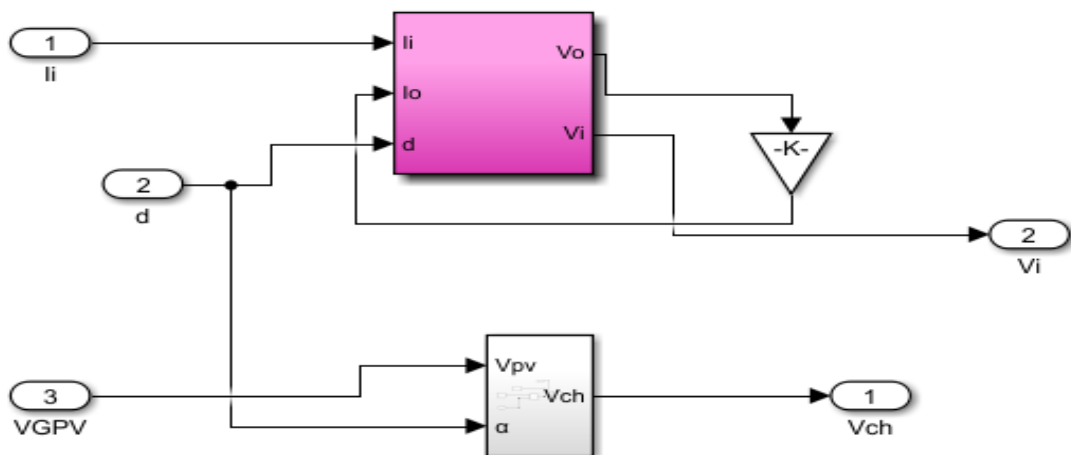


Figure. II.22. Schéma bloc d'un hacheur survolteur.

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

II.6. Le dispositif de stockage :

Il existe plusieurs modèles de batterie au plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment, et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances. Notre choix s'est porté sur deux modèles : le modèle dit « CIEMAT » (Research Center for Energy, Environnement and Technology, Espagne) relativement complet, malgré quelques imperfections comme le saut de tension lorsqu'on passe d'un cycle de charge à un cycle de décharge, et le modèle R-C, utilise lors des simulations avec des pas de temps très petits (de l'ordre de 10-6s pour permettre de tenir compte de la fréquence de « hachage » des convertisseurs).

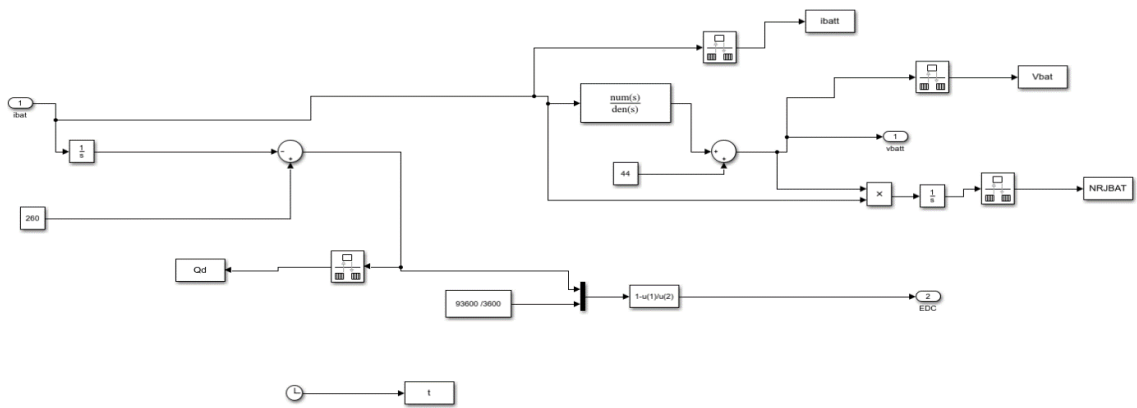


Figure. II.23. Schéma bloc d'une batterie R_C.

II.6.1. Le modèle électrique simple de la batterie :

Le modèle électrique simple comprend une fem E_0 modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie (C_b) et une résistance interne (R_s).

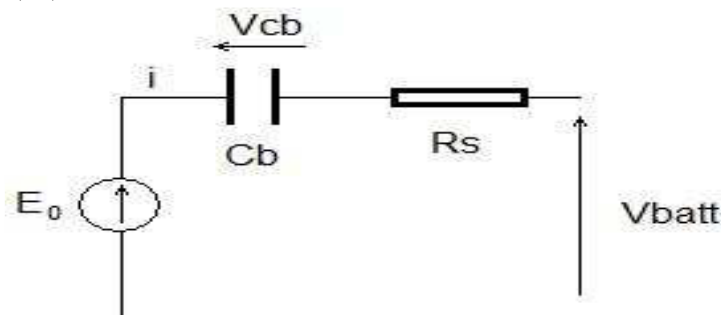


Figure. II.24 : Modèle R-C de la batterie [49].

Nous avons donc :

$$V_{bat} = nb \times E_b + nb \times R_i \times I_{bat} \quad (2.22)$$

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (2.23)$$

Avec C_{bat} la capacité (Ah) nominale de la batterie et Q_d la quantité de charge manquante par rapport à C_{bat} .

D'après le modèle R-C de la batterie présentée au § 2-4-3. La capacité en ampères heure est modélisée par C_{bat} dont la valeur est donnée par l'expression suivante :

$$Q_{bat} = I \times t \quad (2.24)$$

$$C = \frac{Q_{bat}}{V} \quad (2.25)$$

Avec :

Q_{bat} : la quantité de charge électrique en Coulomb,

I : le courant à travers la capacité,

t : le temps de fonctionnement,

C : la valeur de la capacité en Farad,

V : la différence de potentiel correspondant à une plage de l'état de charge de la batterie allant de 0% à 100%. Nous considérons $V=2V$ pour une batterie au plomb de 12V.

II.6.2. Le modèle « CIEMAT » :

Ce modèle est basé sur le schéma suivant (Fig. II.25) où la batterie est décrite par seulement deux éléments, une source de tension et une résistance interne, dont les valeurs dépendent d'un certain nombre de paramètres :

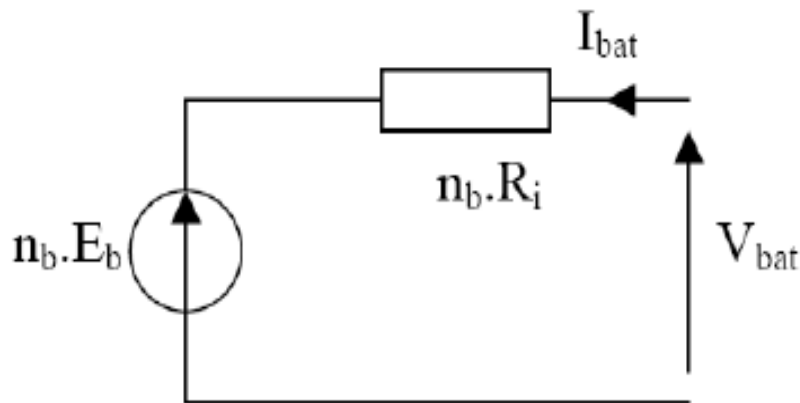


Figure. II.25 : Schéma équivalent de n_b éléments en série [49].

Ce modèle définit la tension aux bornes de l'accumulateur en fonction du courant imposé, de son état de charge et de la température. Il tient compte du rendement faradique en charge pour calculer l'évolution de son état de charge et intègre la phase de dégazage (dégagement d'hydrogène).

L'étude de ce modèle a été réalisée dans la thèse d'O. Gergaud [49]. Elle a montré que par rapport à une consigne en tension, la consigne en puissance permettait de reproduire fidèlement le profil du courant :

$$I_b = \frac{P_b}{U_b} \quad (2.26)$$

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

Nous ne tenons pas compte de l'évolution de la capacité interne de la batterie ni du rendement faradique. Les expressions des grandeurs de la batterie sont exprimées ci-dessous.

L'expression générale de la tension batterie :

$$V_{bat} = nb \times Eb + nb \times Ri \times I_{bat} \quad (2.27)$$

L'expression de l'état de charge :

$$EDC = 1 - \frac{Qd}{C_{bat}} \quad (2.28)$$

Les tensions en décharge et en charge sont modélisées par deux équations différentes [49] :

• **Tension en décharge:**

$$V_{bat_d} = nb \times [1,965 + 0,12 \times EDC] - nb \times \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \times \left(\frac{4}{1+|I_{bar}|^{1.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) \times (1 - 0.007 \times \Delta T) \quad (2.29)$$

• **Tension en charge :**

$$V_{bat_c} = nb \times [2 + 0,16 \times EDC] - nb \times \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \times \left(\frac{6}{1+|I_{bar}|^{0.86}} + \frac{0.48}{EDC^{1.2}} + 0.036 \right) \times (1 - 0.025 \times \Delta T) \quad (2.30)$$

II.6.3. Autonomie du système :

L'autonomie d'un système PV est la durée pendant laquelle peut fonctionner le système sans que les panneaux PV ne produisent de l'électricité. Cette autonomie est fixée par la taille des batteries et on devra tenir compte de quelques principes élémentaires lors du dimensionnement comme par exemple l'énergie consommée, la puissance moyenne... En effet, un sous-dimensionnement des batteries sera moins coûteux mais ces dernières seront exposées à de profondes décharges et donc à une durée de vie plus courte tandis qu'un surdimensionnement sera plus onéreux. Dans ce dernier cas, du fait du surdimensionnement, les batteries seront rarement complètement chargées avec pour conséquence des phénomènes de sulfatation et au final une durée de vie plus courte [50]. Nous voyons ainsi qu'un sous dimensionnement aussi bien qu'un surdimensionnement des batteries conduisent au même résultat : la réduction de la durée de vie des batteries, d'où l'importance d'un dimensionnement optimal.

Le dimensionnement des batteries requiert donc une attention particulière afin d'augmenter la durée de vie de ces dernières et par la même occasion diminuer le coût global du système. Dans notre cas et afin de ne pas avoir un investissement trop coûteux en stockage, nous souhaitons obtenir une autonomie de 2 jours avec une profondeur de décharge de 60% pour des besoins journaliers de 3kWh. La capacité nominale des batteries est donnée par la relation suivante :

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec stockage

$$Cb = \frac{Bj \times Aut}{U_{bat} \times nb \times Db} \quad (2.31)$$

C_b : la capacité nominale des batteries [Ah]

B_j : les besoins énergétiques journaliers [Wh]

Aut : le nombre de jour d'autonomie

U_{bat} : la tension nominale des batteries [V]

η_b : le rendement énergétique des batteries

D_b : la profondeur de décharge des batteries.

Les batteries devront ainsi avoir une capacité de **255,2 Ah** afin de faire face aux contraintes de fonctionnement précisées dans le cahier des charges.

II.7. Gestion d'énergie photovoltaïque :

Dans un système photovoltaïque il est primordial de gérer de façon optimale le flux d'énergie entre les différents composants. Le module supervision a pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre les différent composant du système d'une part mais aussi de réguler le processus de charge/décharge de stockage d'un pad, son choix est guidé par un cahier de charge qui tien compte du prix, de la consommation d'énergie, de la fiabilité et de l'intégration au système photovoltaïque. La complexité du système de supervision dépend aussi du fait que l'on ait ou pas un système de stockage et de la composition de ce dernier vers les modules PV a des algorithmes complexes incluant des convertisseurs avec recherche de point maximum.

II.8. Conclusion:

Ce chapitre a été consacré à la modélisation et la simulation du système étudié. Nous avons présenté une recherche bibliographique sur la conversion photovoltaïque, puis nous avons commencé par le module photovoltaïque, cité deux modèles mathématiques (modèle idéaliste modèle réelle). Puis nous avons présenté les caractéristiques courant/tension et puissance/tension du module photovoltaïque dans différentes conditions météorologiques. Pour finaliser nous avons modélisé les différents éléments de notre système photovoltaïque (panneau photovoltaïque, convertisseur DC/DC, la batterie). Nous avons simulé le module photovoltaïque avec MPPT (PO), Dans ce qui suit nous allons faire le dimensionnement et la gestion de notre système

Chapitre 03 :

*Dimensionnement et
gestion de système
photovoltaïque.*

III.1. Introduction :

Pour la conception d'un système de pompage photovoltaïque avec stockage, une étude dimensionnelle est nécessaire, ainsi qu'une application de commande MPPT pour le bon fonctionnement de ce système. Dans ce chapitre, nous présenterons en premier lieu une méthode de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque, qui nous permettra de définir les éléments du système à étudier, de déterminer le nombre de panneaux nécessaires, ainsi que le nombre de batteries, pour satisfaire les besoins quotidiens en eau.

Nous allons aussi présenter un système de gestion, qui a pour but de contrôler l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques et de contrôler les échanges d'énergies entre les différents composants. Ce système de gestion permet aussi le contrôle de l'état de charge de la batterie, pour une protection contre les surcharges et les décharges profondes.

III.2. Schéma global du système à étudier :

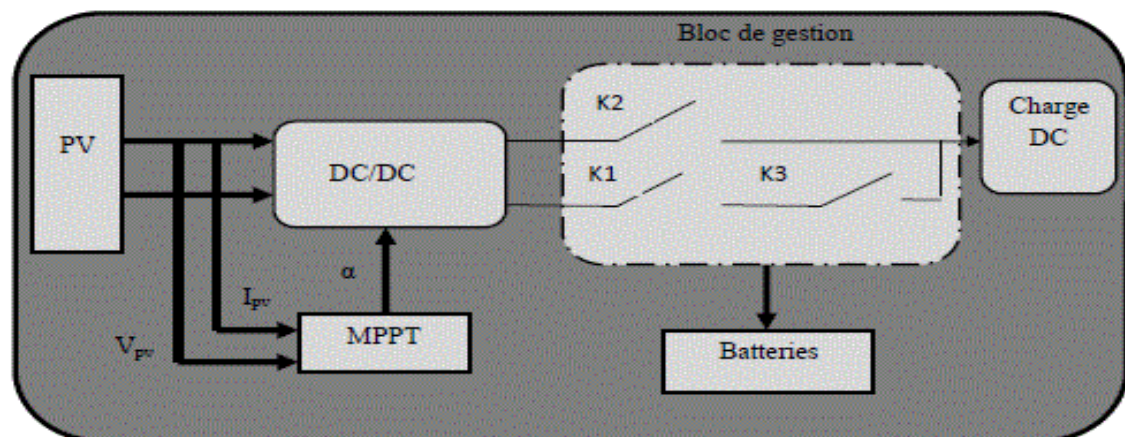


Figure.III.1 : Schéma de l'installation [51].

* Les différents éléments du système :

- Modules photovoltaïques.
- Convertisseur DC/DC (Hacheur).
- Trois interrupteurs (K1, K2, K3).
- Batteries.

III.3. Dimensionnement du système photovoltaïque [51] :

Le dimensionnement ayant une incidence sur le prix, la qualité et la pérennité du système

Photovoltaïque en site isolé, il constitue donc une étape cruciale et dépend :

- De l'ensoleillement sur le site au cours de l'année;
- De l'énergie requise par chaque récepteur à alimenter;
- Du rendement énergétique de l'ensemble des composants y compris le stockage;

D'une manière générale, le dimensionnement devra suivre les étapes suivantes :

- Évaluation des besoins énergétique;

- Estimation de l'ensoleillement;
- Dimensionnement des panneaux photovoltaïques;
- Dimensionnement du stockage;

III.3.1. Choix de la méthode de dimensionnement [51] :

Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement d'un système photovoltaïque.

➤ La méthode de probabilité d'erreurs dans la consommation :

Cette méthode permet d'optimiser le dimensionnement d'un système dans des conditions complexes (fluctuation saisonnière de l'irradiation, ciel nuageux pour plusieurs jours...etc.) grâce à un logiciel bien adapté. L'inconvénient de cette méthode est qu'il faut connaître l'irradiation qui correspond aux données horaires sur le site de l'installation pour un nombre d'années trop grand (10 à 20ans).

➤ La méthode de mois le plus défavorable :

Dans cette méthode, on estime l'énergie récupérable pour une période critique d'un mois, appelé le mois le plus défavorable ce mois correspond au mois pendant lequel la valeur de l'irradiation moyenne mensuelle est la plus faible de l'année ou dans certains pays où la période d'hiver est rude (le mois de décembre est le mois le plus défavorable en Algérie)

➤ Méthode de la moyenne annuelle :

Cette méthode très proche de celle du mois le plus défavorable, elle utilise l'irradiation journalière [KWh/m². j] mais pour une moyenne qui s'étend pour toute une année au lieu d'un seul mois. Donc on calcule la moyenne mensuelle de l'énergie (irradiation) récupérable sur un site pour les 12 mois de l'année et on effectue la moyenne annuelle de celle-ci.

III.3.2. Dimensionnement du champ photovoltaïque :

Pour le site de Bejaia, le mois de décembre est le mois où l'ensoleillement est le plus faible, c'est à dire un maximum de 2,2 heures de soleil par jour. En supposant des pertes de 20% attribuables à la température, à la poussière et au rendement de l'onduleur [51], dans ce

Cas la puissance crête (Ppv) du champ photovoltaïque se calculera comme suit :

$$P_{pv} = \frac{E_{ele}}{h(\text{ensoleillement}) \times (1 - \text{pertes})} \quad (3.1)$$

Le nombre de panneaux utilisés peut se calculer de la manière suivante :

Dimensionnement et gestion de système photovoltaïque

$$N_{pv} \geq ENT \left[\frac{P_{pv}}{P_{pvu}} \right] \quad (3.2)$$

Avec :

N_{pv} : nombre de panneaux photovoltaïques

P_{pv} : Puissance des panneaux photovoltaïques

$P_{pv,u}$: Puissance du panneau photovoltaïque unitaire

ENT : Entier.

III.3.3. Dimensionnement du stockage :

Le calcul de la capacité (C_{batt}) des batteries dépend de plusieurs données, elle peut être calculée comme suit :

$$C_{batt} = \frac{E_{ele} \times N_j}{U_{batt} \times \eta_{bat} \times PDD} \quad (3.3)$$

Le nombre de batteries utilisées peut se calculer de la manière suivante :

$$N_b \geq \frac{C_{batt}}{C_{batt} \times U} \quad (3.4)$$

(3.4)

Avec :

E_{ele} : Energie électrique requise pour le pompage.

N_j : Nombre de jour d'autonomie.

PDD : Profondeur de décharge de la batterie.

η_{bat} : Rendement de la batterie

U_{batt} : Tension de la batterie.

N_b : Nombre de batterie.

C_{batt} : Capacité unitaire.

Le calcul des différentes puissances, le nombre de panneaux et le nombre de batteries à utiliser est présenté sur le tableau ci-dessous :

L'énergie quotidienne requise	704 Wh/j
Puissance du générateur photovoltaïque	300W
Nombre de panneaux nécessaires N_{pv}	5
Capacité de la batterie	260AH
Nombre de batteries N_{batt}	4

Tableau.III.1 : Schéma de l'installation.

III.4. Gestion de l'énergie entre les différents composants du système :

Afin de faire fonctionner le système d'une manière parfaitement autonome, il est primordial de gérer de façon optimale le flux d'énergie entre les différents composants du système. Il est donc nécessaire d'introduire un système de gestion. Pour superviser toute l'installation photovoltaïque, on suppose que les batteries sont initialement chargées. Le système de gestion s'occupe principalement de l'alimentation de la charge et de la protection des batteries (on prend un état de charge minimum $EDC_{min} = 30\%$ et un état de charge maximum $EDC_{max} = 95\%$). Nous avons différents modes qui régissent le fonctionnement du système proposé et qui sont :

- **MODE 1** : Les batteries sont chargées $EDC_{max} \geq 95\%$

Le générateur photovoltaïque est suffisant pour satisfaire la charge $P_{pv} \geq P_{ch}$.

- **MODE 2** : P_{pv} est insuffisante pour alimenter la charge $P_{pv} < P_{ch}$

La batterie ajoute sa puissance pour satisfaire la charge $P_{ch} = P_{pv} + P_{batt} \geq EDC_{min}$ EDC.

- **MODE 3** : Seule la batterie qui alimente la charge $P_{batt} = P_{ch}$ EDC \geq EDC_{min}

- **MODE 4** : La P_{pv} suffisant pour alimenter la charge $P_{pv} = P_{ch}$

- **MODE 5** : Les batteries complètement déchargées $EDC < EDC_{min}$

Pas de production photovoltaïque $P_{pv} = 0$

III.5. Gestion des batteries de stockages :

Les batteries sont sollicitées dans une plage de charge (EDC) par rapport toute l'énergie emmagasinée. En effet, on doit assurer leurs protections en évitant d'atteindre trop fréquemment des états de charge extrême, en partie responsable de vieillissement prématuré des batteries, dans le cas d'un système réel la protection des batteries est généralement assurée par un contrôle de leur tension. Elles sont déconnectées si leur tension est excédent leur borne EDC_{min} et EDC_{max} fixée préalablement. Aussi un état de charge minimale EDC_{min} a été fixé à 30% de la capacité totale des batteries. De même un état de charge maximale EDC_{max} a été fixé à 95%.

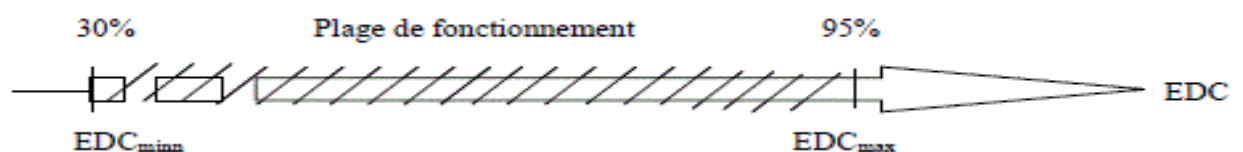


Figure.III.2 : Plage de fonctionnement pour les batteries utilisées[51].

Dimensionnement et gestion de système photovoltaïque

Nous présentons un tableau qui nous permet d'analyser et étudié les différents modes qu'on puisse distinguer lors du fonctionnement du système présenté sur la figure III.1.

Mode	Etas des interrupteurs (0 ou 1)			Courant de charge
	K1	K2	K3	$I_{ch} = I_{batt} + I_{pv}$
Mode 1	ON	ON	OFF	$I_{ch} = I_{pv}$
Mode 2	OFF	ON	ON	$I_{ch} = I_{batt} + I_{pv}$
Mode 3	OFF	OFF	ON	$I_{ch} = I_{batt}$
Mode 4	OFF	ON	OFF	$I_{ch} = I_{pv}$
Mode 5	OFF	OFF	OFF	$I_{ch} = 0$

Tableau. III.2 : Les différents modes de fonctionnement [52].

III.6. Algorithme de gestion :

L'algorithme de gestion qui est présenté sur la figure (III.2) a pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants d'une part mais aussi de réguler le processus de charge/décharge du stockage (protection contre les surcharges et les décharges profondes), pour préserver les propriétés physico-chimiques des batteries et de prolonger leur durée de vie. L'algorithme de gestion quand peut appelée aussi algorithme de supervision est basé sur trois scénario :

- Alimentation du consommateur et du stockage par les panneaux photovoltaïques si l'énergie photovoltaïque est suffisante ;
- Alimentation du consommateur uniquement par le stockage si énergie photovoltaïque est absente.
- Alimentation du consommateur uniquement par l'énergie photovoltaïque.

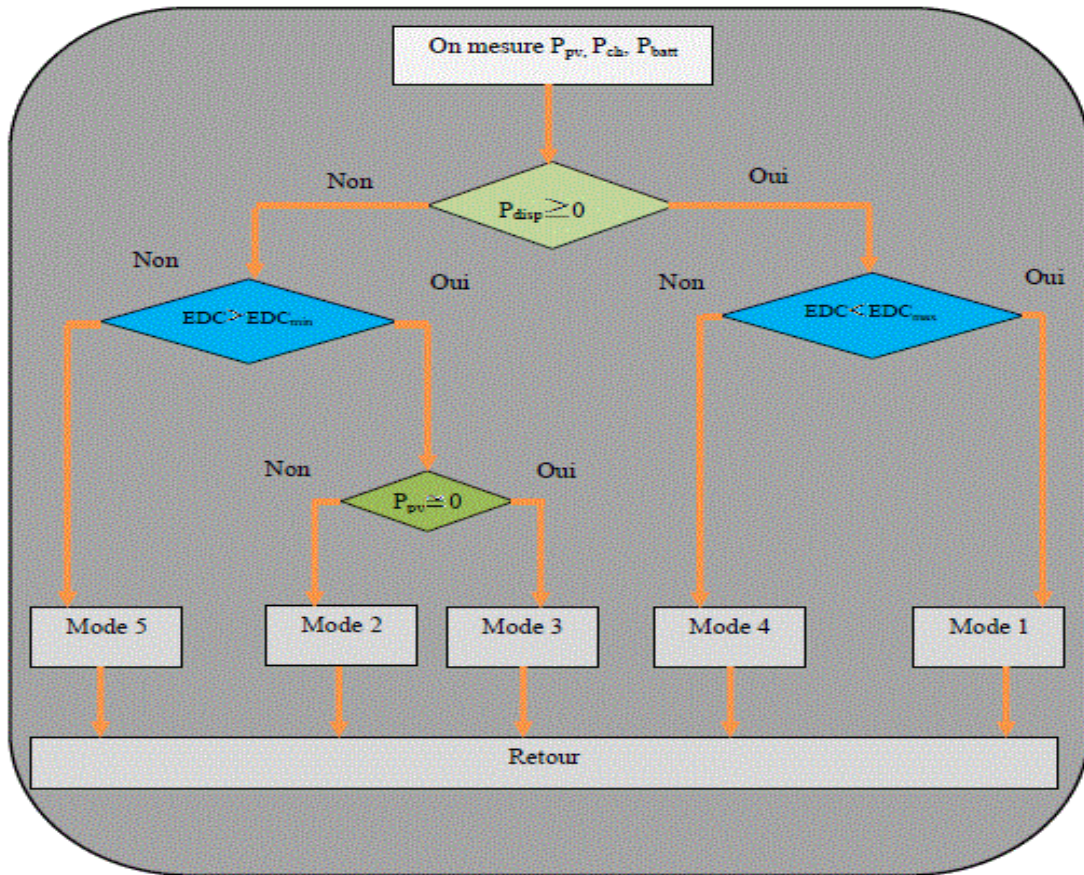


Figure.III.3 : Diagramme de l’algorithme de gestion proposé [52].

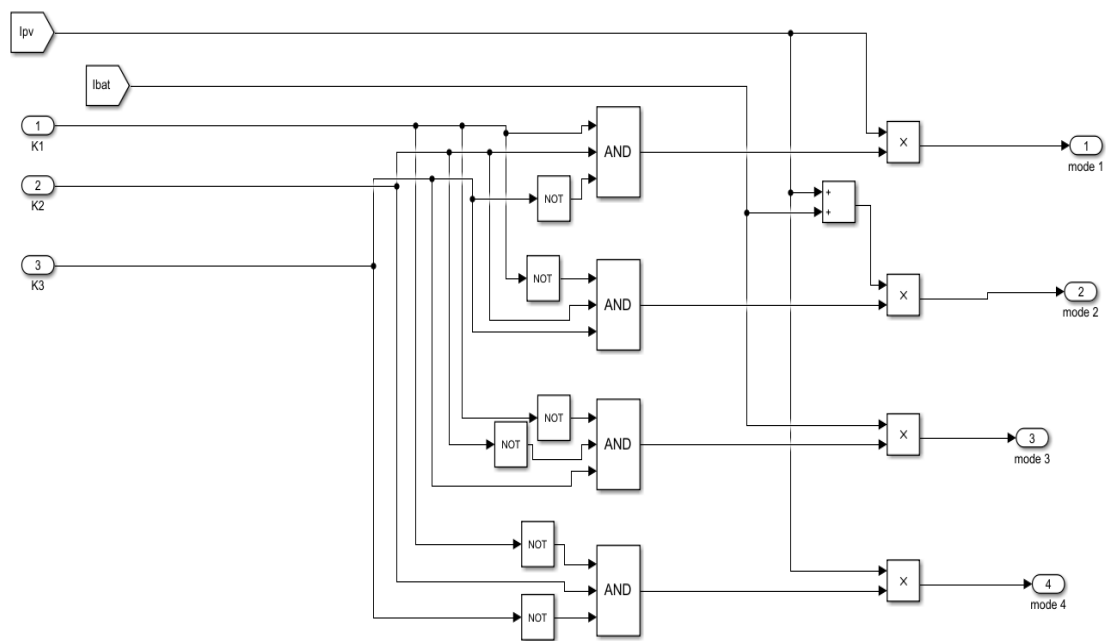


Figure III.4. Schéma bloc présente les modes du système.

III.7. Bloc de gestion sous Matlab/Simulink :

En suivant l'organigramme précédent, nous avons réalisé un bloc de gestion en Simulink à partir de celui-ci en utilisant des portes logiques.

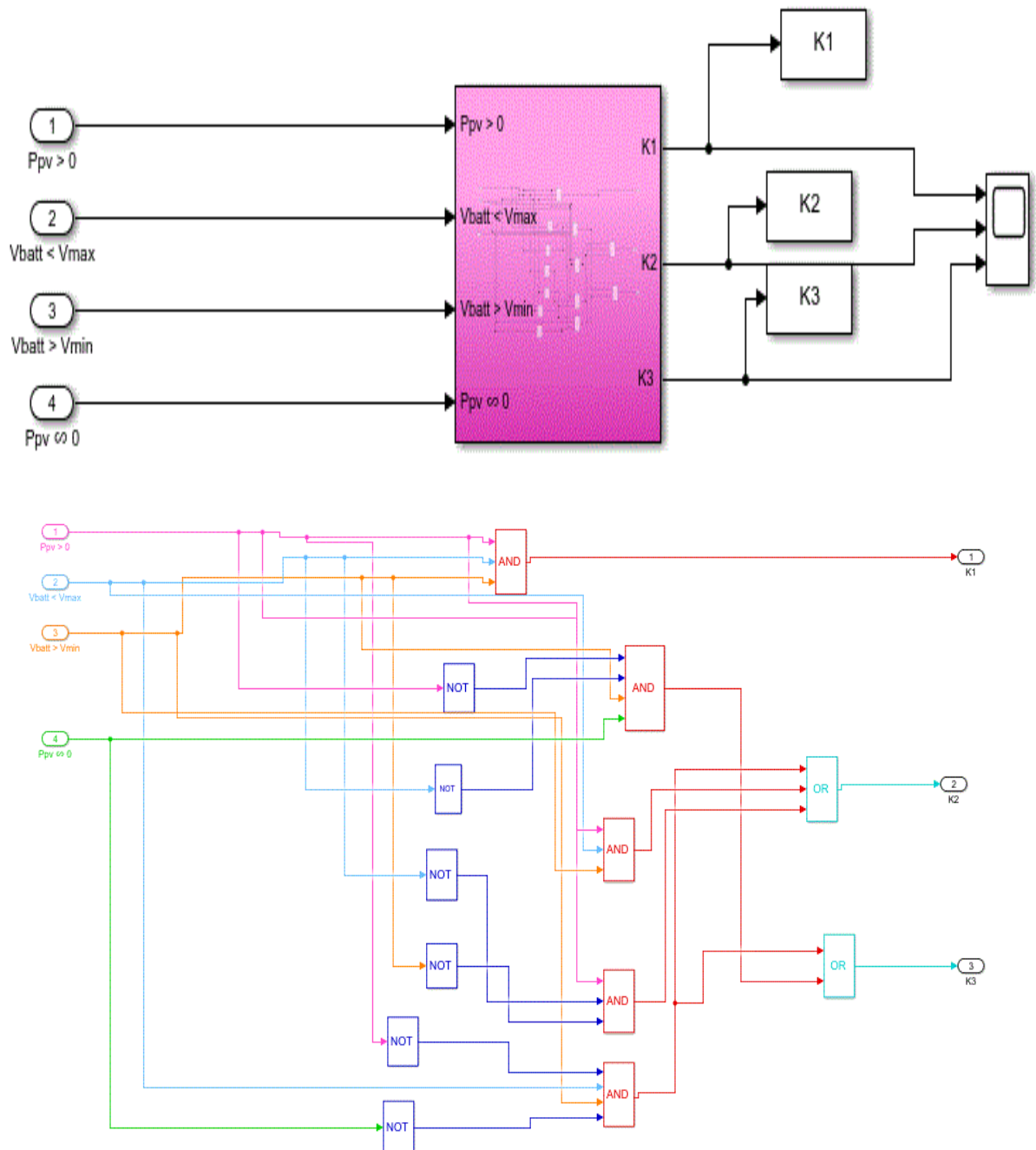


Figure. III.5 : Bloc de gestion sous Simulink.

III.8. Intérêt du stockage :

Quand le générateur photovoltaïque n'a pas la puissance suffisante pour alimenter la charge, les batteries ajoutent leur puissance pour compléter le manque de puissance de générateur photovoltaïque.

Le système de stockage est un élément crucial de l'installation photovoltaïque du point de vue technique, mais aussi du point de vue économique car il représente 40 à 50 % du coût de l'installation.

III.9. Résultats de la simulation du système :

Les différents composants de l'installation photovoltaïque ont été déjà modélisés dans les chapitres précédents. Le panneau photovoltaïque sera simulé avec la commande d'optimisation perturbation & observation (PO) pour l'extraction de la puissance maximale.

Après avoir présenté l'algorithme de gestion du système photovoltaïque, nous l'avons implémenté dans le système global puis nous l'avons simulé sous l'environnement Matlab/Simulink sous différentes conditions météorologiques pour permettre de retrouver les différents modes de fonctionnements possibles auxquels nous pouvons être confrontés.

III.9.1. Simulation du système global :

Le système photovoltaïque autonome est composé de cinq (05) panneaux photovoltaïques de 60Wc, de quatre batteries de stockage (02) de 12V, 260 Ah et d'un profil de charge pour un système de pompage. Différentes simulations ont été effectuées pour évaluer les performances du système.

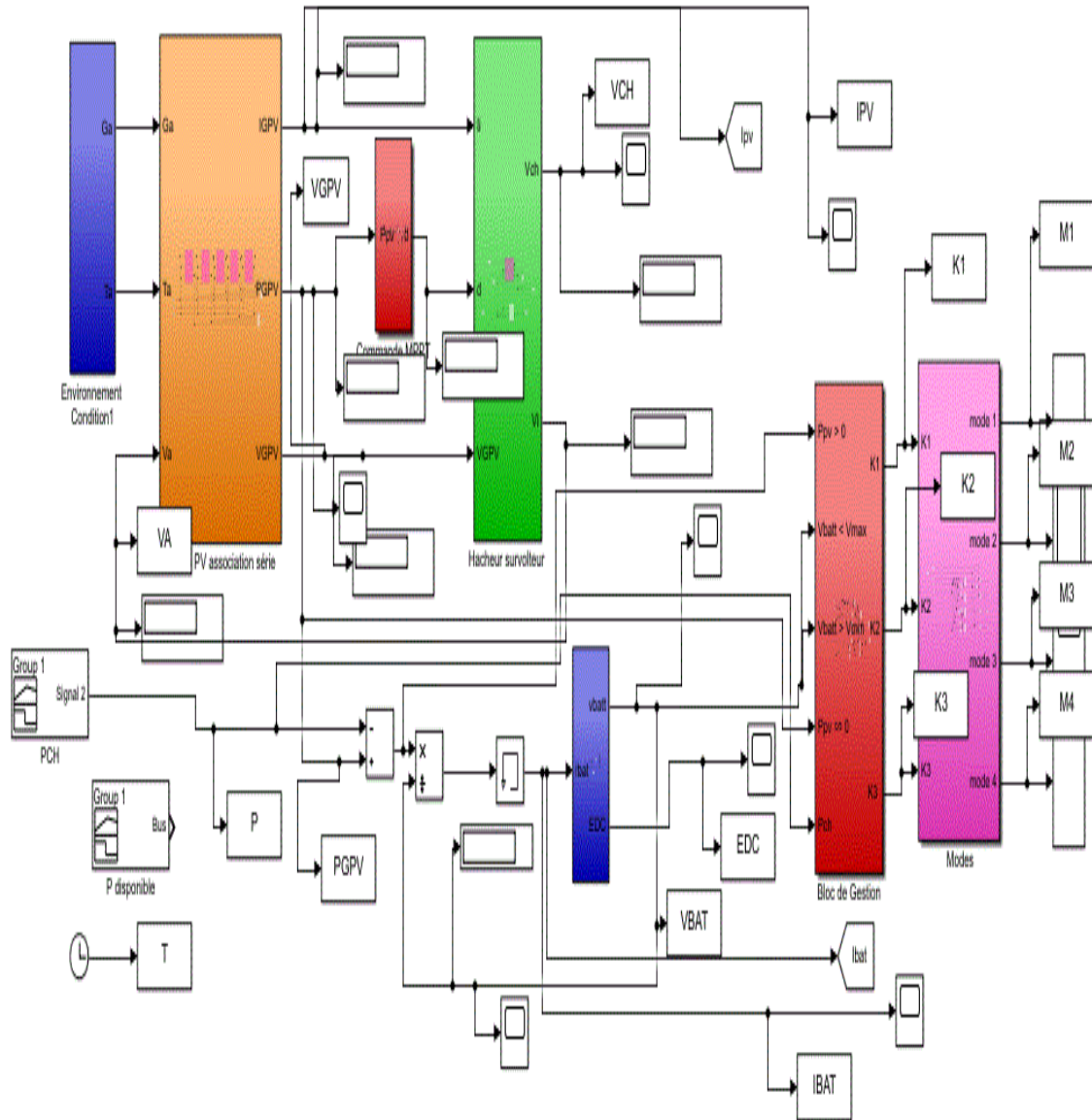


Figure. III.6 Schéma Matlab/Simulink du système global.

Les figures (III.7 et III.8) présentent le courant et la tension photovoltaïque ainsi que la puissance du générateur photovoltaïque avec la méthode perturbation & observation (PO) pour un fonctionnement dans des conditions d'ensoleillement d'une journée et un profil de charge constant durant une journée.

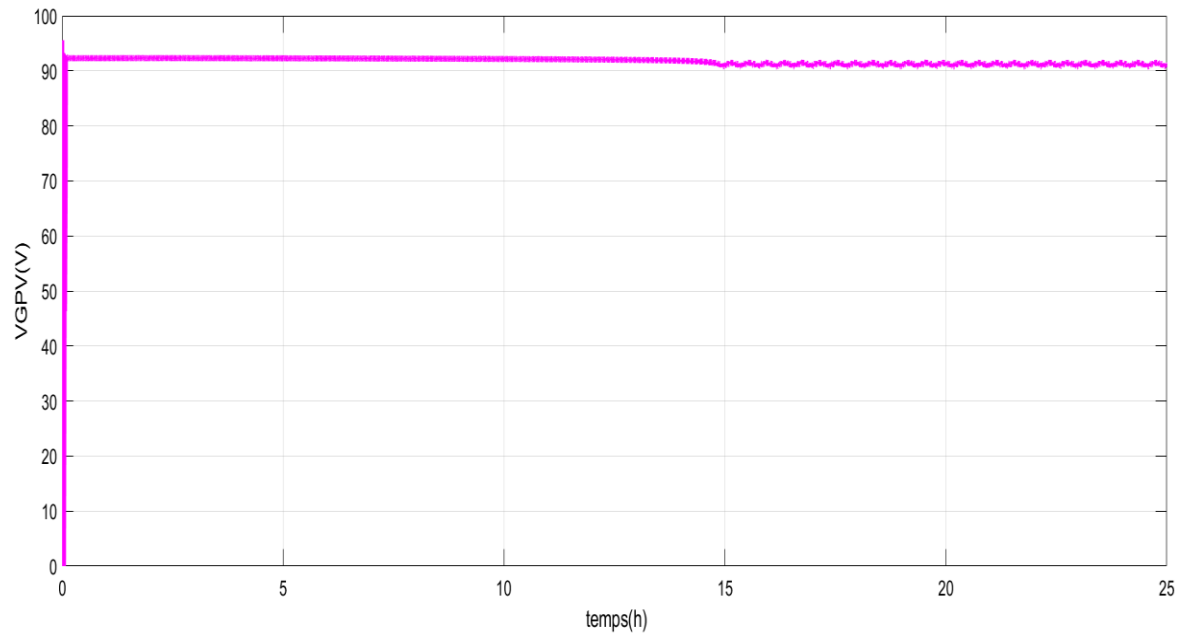


Figure. III.7 : Tension du générateur photovoltaïque

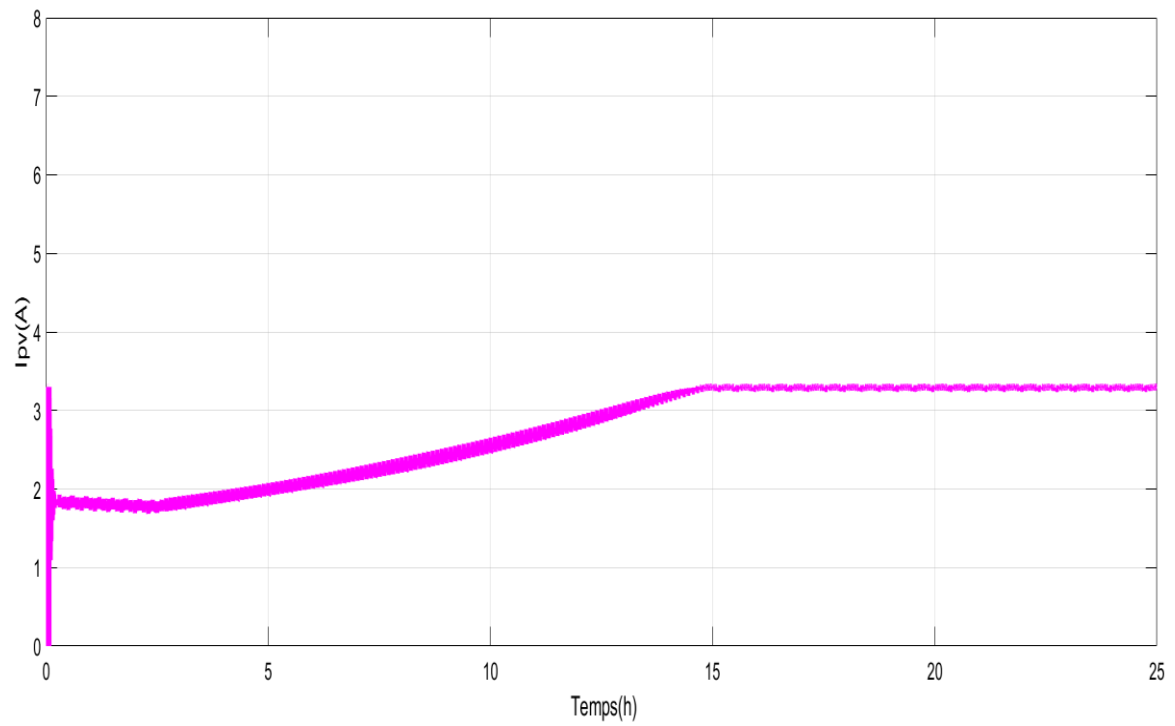


Figure. III.8 : Courant du générateur photovoltaïque

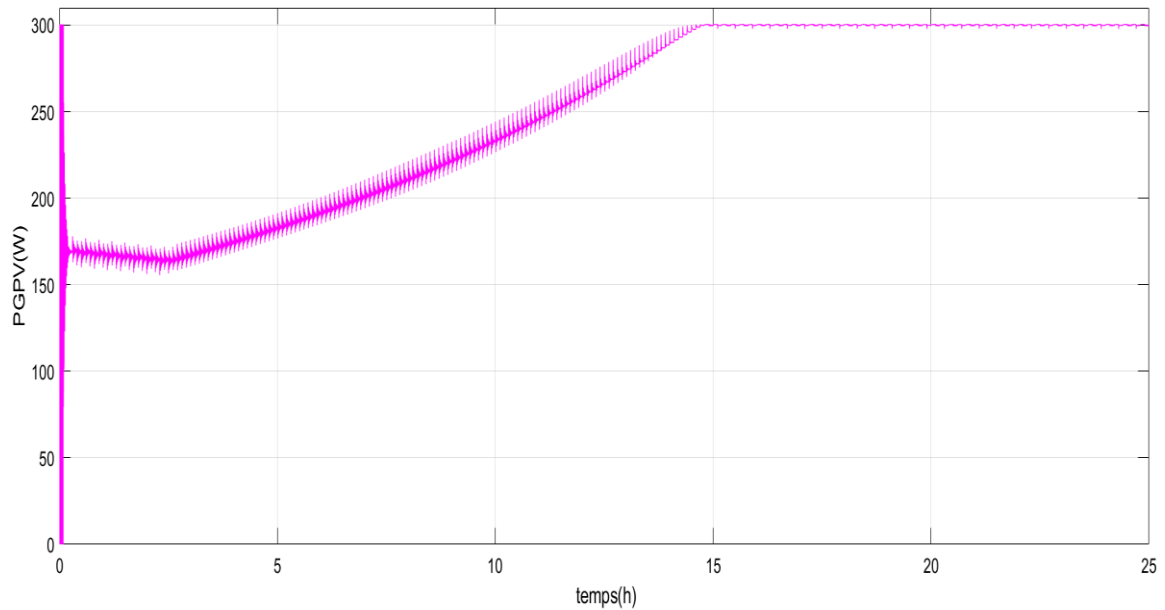


Figure. III.9 : Puissance du générateur photovoltaïque

Nous avons procédé à la simulation du système global pendant 24h. Afin de montrer l'efficacité de l'algorithme de gestion.

III.9.2. Résultats de simulation pour une journée ensoleillée :

Afin de visualiser les différents modes qui puissent apparaître pendant une journée d'été, on introduit les valeurs d'ensoleillement d'une journée atteignant un ensoleillement de $1000\text{W}/\text{m}^2$ et un état initial de charge de la batterie de 100%.

Les figures (III.10), représentent respectivement l'ensoleillement pour une journée d'été, l'allure de la puissance maximale extraite des panneaux photovoltaïques.

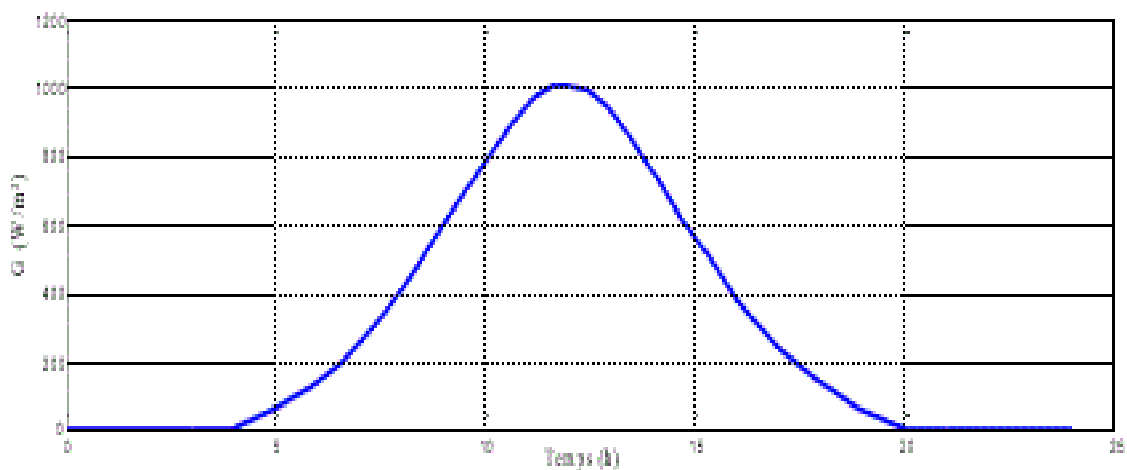


Figure. III.10 : Ensoleillement d'une journée.

Les figures (III.11), (III.12) montrent l'évolution de la tension, et du courant des batteries :

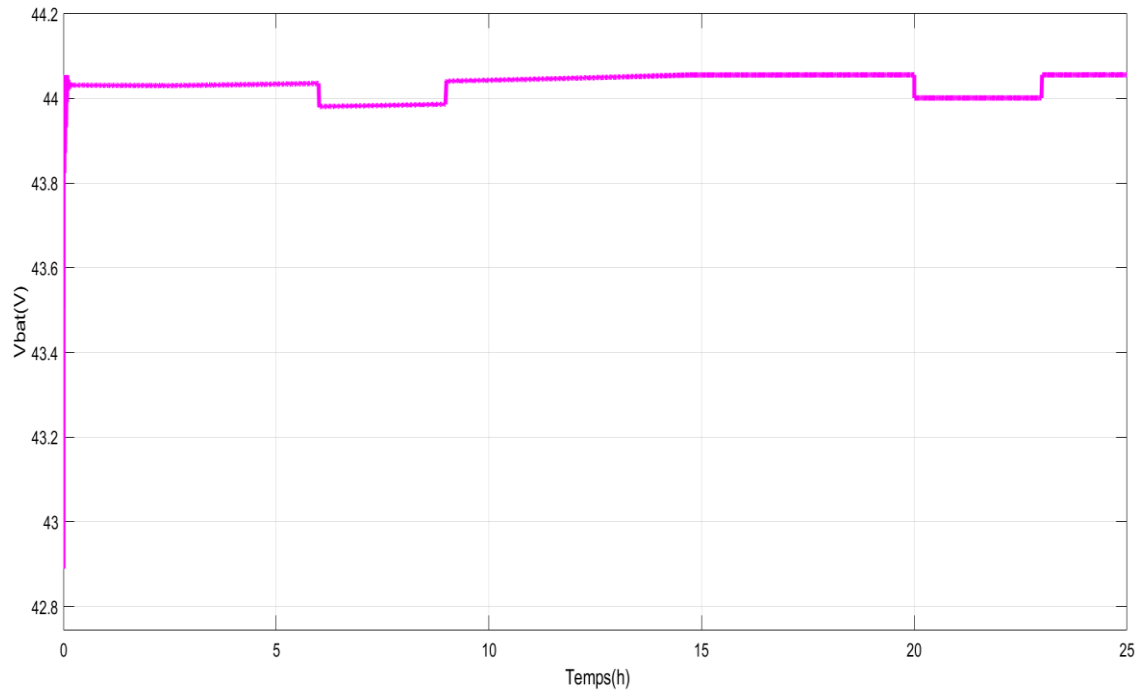


Figure. III.11 : Tension de la batterie

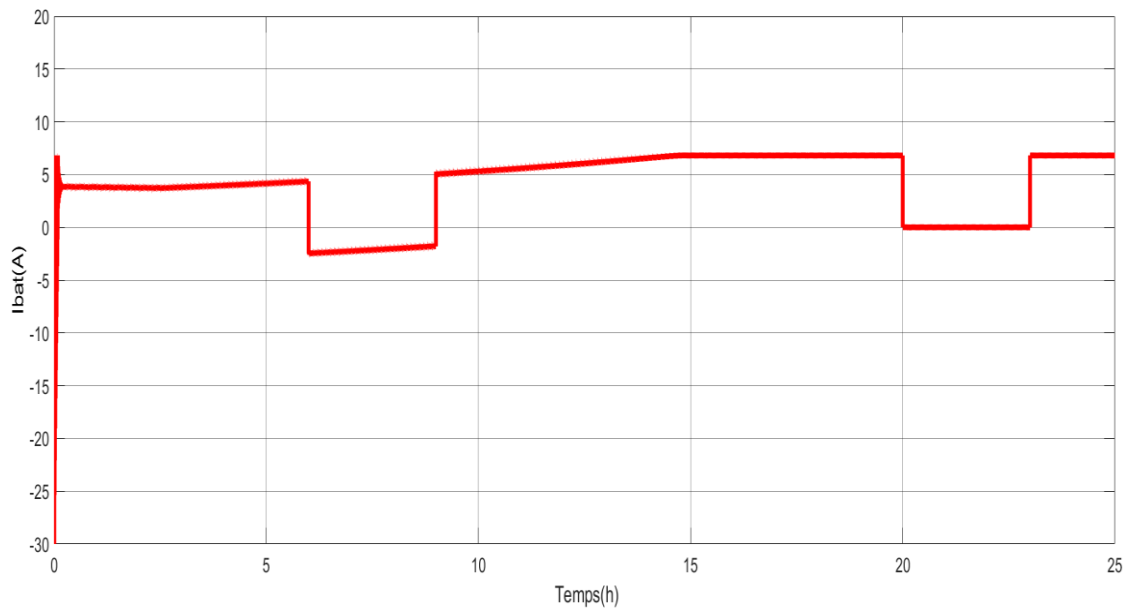


Figure. III.12 : Courant de la batterie

La figure (III.13) représente la puissance disponible qui correspond à la différence entre la puissance photovoltaïque et celle de la charge. La figure (III.14) représente le profil de puissance de la charge

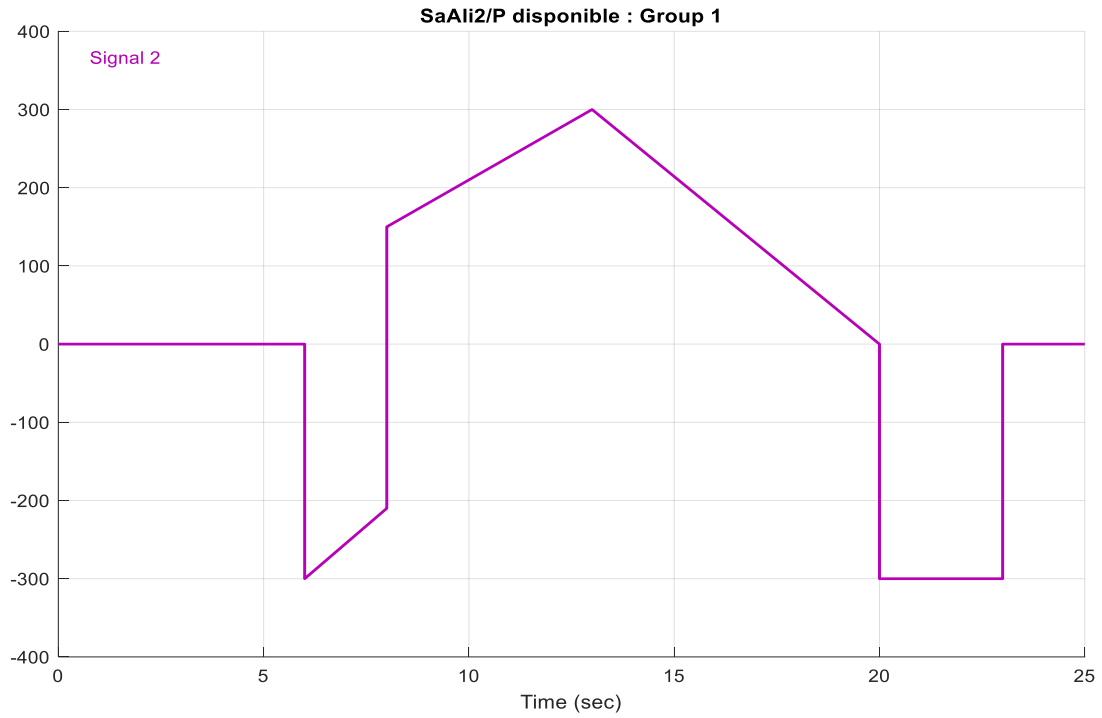


Figure. III.13 : Allure de la puissance disponible

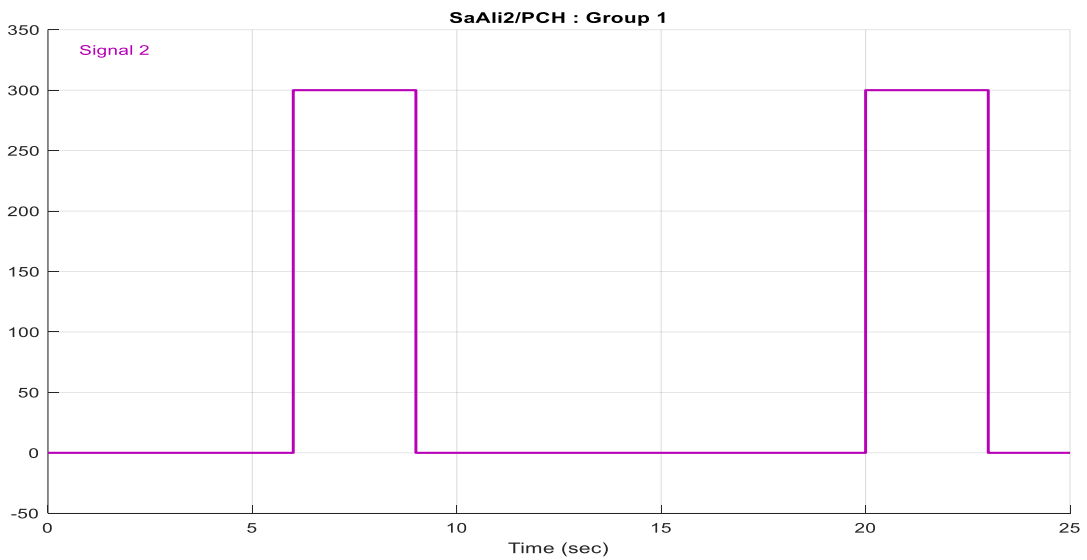


Figure. III.14 : Allure de la puissance de charge

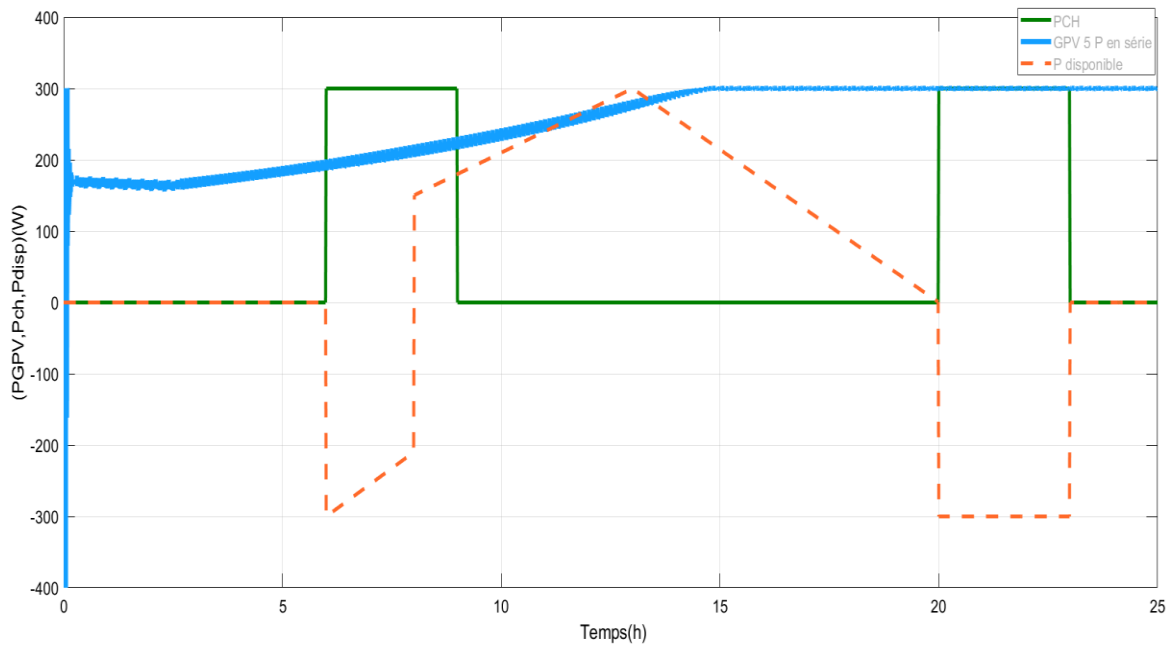


Figure. III.15 : Allures des puissances (Photovoltaïque, charge, disponible)

Sur la figure (III.15) la superposition des différentes puissances (P_{pv} , P_{ch} , P_{disp}) est présentée.

Quant aux figures (III.16), (III.17), (III.18) montrent les instants de fonctionnements ouverts (État ON) ou fermé (état Off) des interrupteurs, on peut remarquer que les trois interrupteurs fonctionnent à des instants différents :

➤ Interrupteur (K1) :

Se ferme dans l'intervalle du temps $t \in ([4h, 6h], [9h, 20h])$

Celui là est en On uniquement pour le mode 1, il a donc la même allure que ce dernier.

➤ Interrupteur (K2) :

Se ferme dans l'intervalle de temps $t \in ([4h, 20])$

Celui là est en On en plusieurs modes de fonctionnement mode 1, 2 et 4 (tableau III.3).

➤ Interrupteur (K3) :

Se ferme dans l'intervalle de temps $t \in ([6h, 9h], [20h, 23h])$.

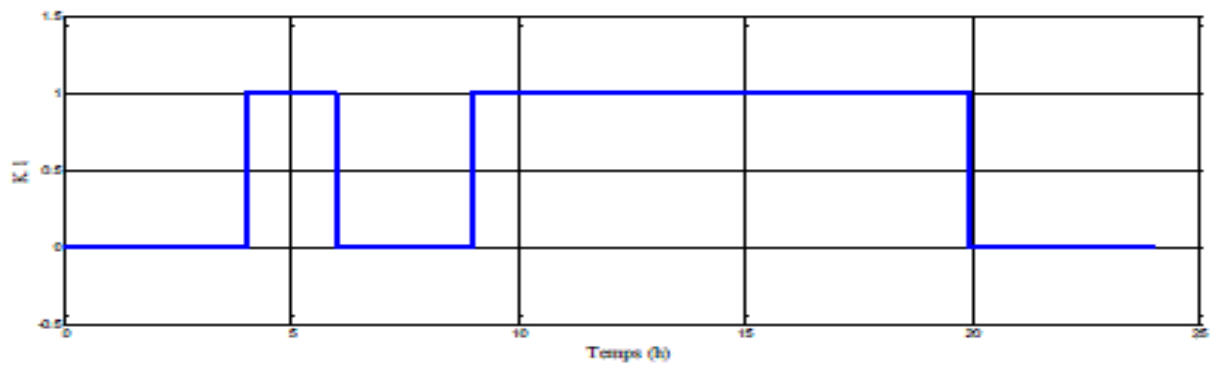


Figure. III.16 : Fonctionnement de l'interrupteur (K1)

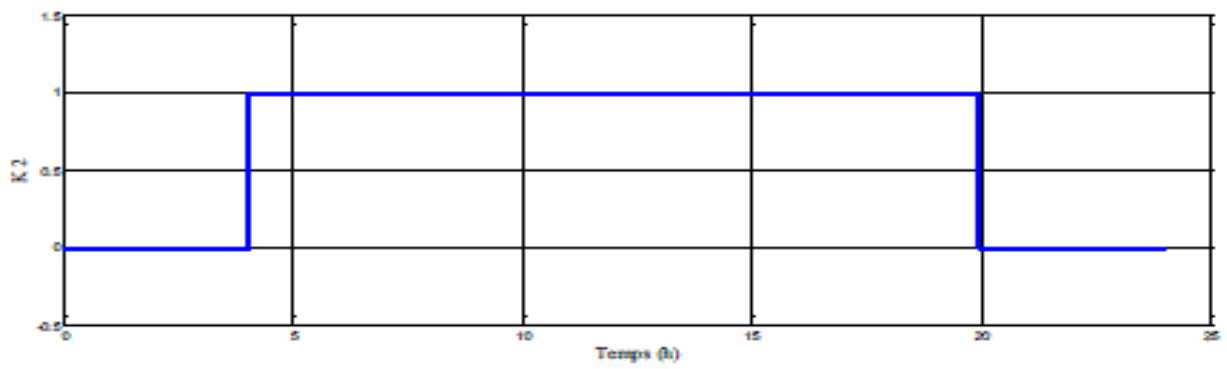


Figure. III.17 : Fonctionnement de l'interrupteur (K2)

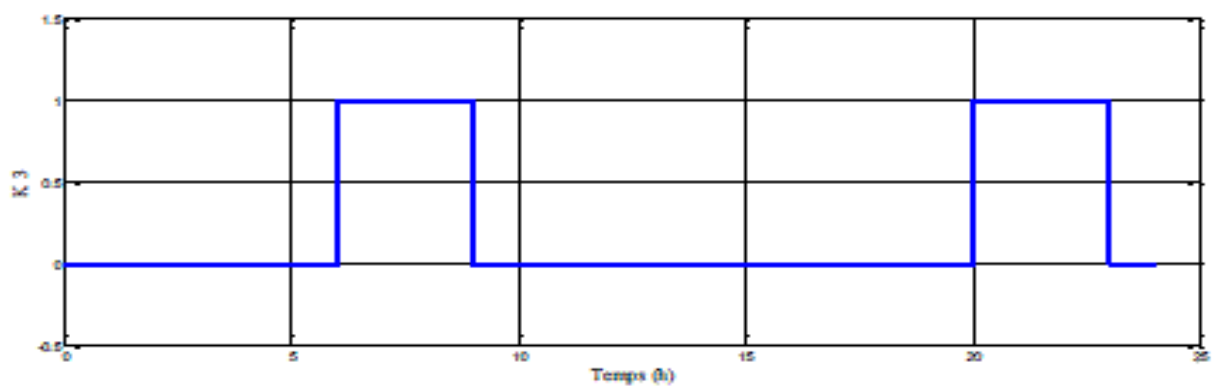


Figure. III.18 : Fonctionnement de l'interrupteur (K3).

Les différents modes sont alors les suivants :

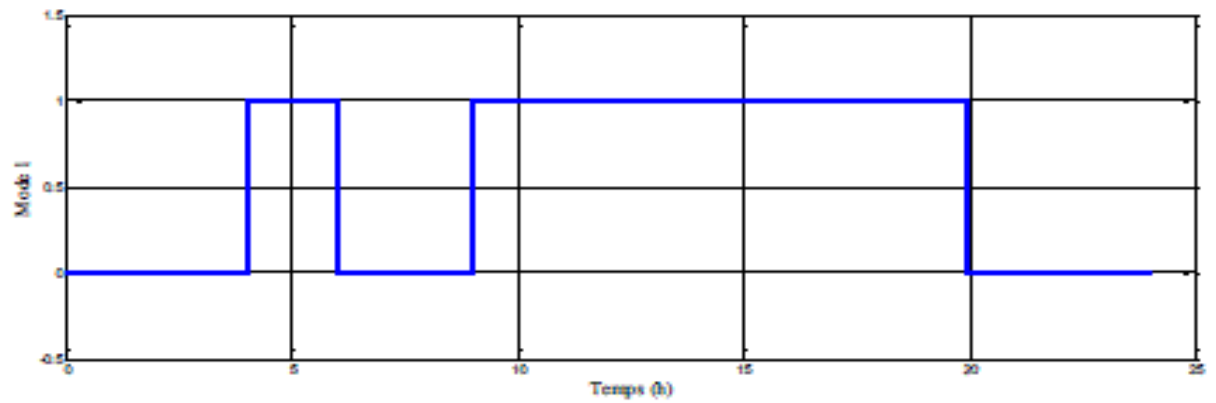


Figure. III.19 Fonctionnement du mode 1.

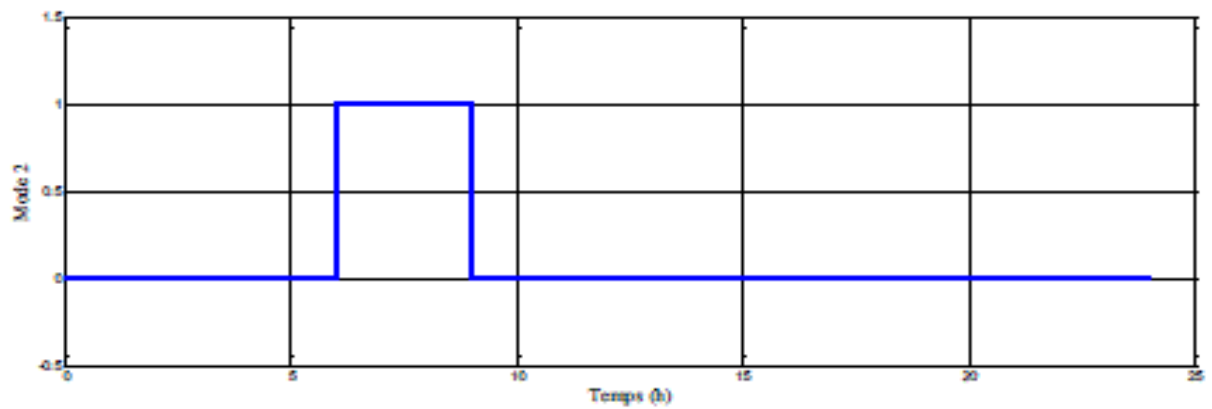


Figure. III.20 Fonctionnement du mode 2

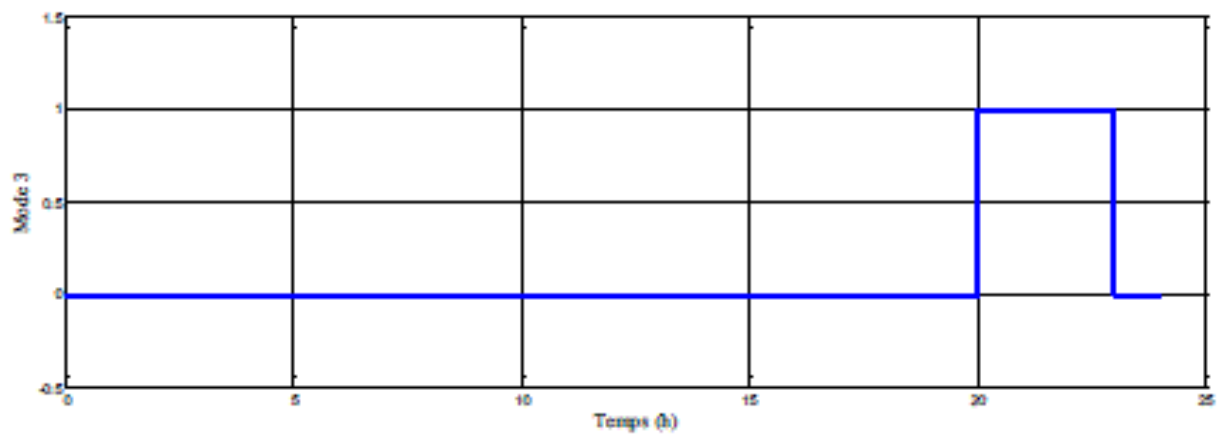


Figure. III.21 Fonctionnement du mode 3

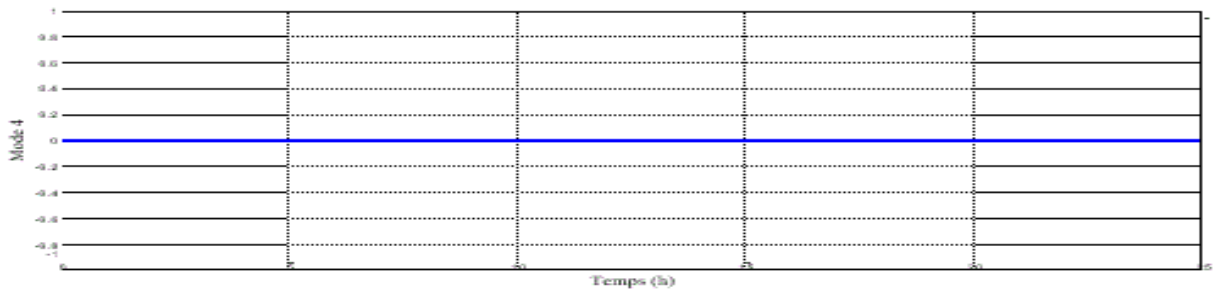


Figure. III.22 Fonctionnement du mode 4.

Les figures (III.19, III.20, III.21, III.22) représentent les différents modes de fonctionnement.

- Synthèse sur le fonctionnement par phase du système photovoltaïque avec l'algorithme de gestion.

D'après la figure (IV.15) des puissances représentées, on déduit les différentes phases :

- Phase 1 $t \in [4h, 6h]$: L'ensoleillement commence à 4h du matin, l'algorithme de gestion détecte que P_{pv} est supérieure à P_{ch} et la tension des batteries est inférieure à EDC_{min} alors le mode 1 commence à fonctionner. Les interrupteurs K1 et K2 (IV.12 et IV.13) sont à l'état « ON ». (voir le Tableau.III.3)
- Phase 2 $t \in [6h, 9h]$: Durant cette période le système de gestion détecte que $P_{disp} < 0$ (P_{pv} inférieure à P_{ch}) la demande de la charge à ce moment-là est de 400W et la puissance photovoltaïque à elle seule est insuffisante pour alimenter la charge et $EDC > EDC_{min}$ dans ce cas, la puissance des batteries va s'ajouter afin de satisfaire la charge. C'est le mode de compensation (fonctionnement mode 2). Quant aux interrupteurs K2 et K3 sont à l'état ON.
- Phase 3 $t \in ([9h, 20h])$: Cette situation présente le cas où la puissance PV est disponible et il n'y a aucune demande de la charge, alors les batteries se chargent vu que la tension des batteries est inférieure à EDC_{min} le mode 1 reprend.
- Phase 4 $t \in ([20h, 23h])$: à cette durée de temps la demande de la charge reprend et le PV ne produit plus ($P_{pv}=0$) alors les batteries alimentent la charge c'est le fonctionnement du mode 3.

Enfin le mode 4 est toujours en Off car on n'atteint pas l'état de charge de la batterie EDC_{max} .

III.10.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons fait une étude dimensionnelle d'un système de pompage photovoltaïque a un présenté les résultats de simulation du système étudié. Nous avons utilisé une méthode MPPT pour extraire le maximum de puissance et d'énergie. Globalement la simulation nous a permis d'évaluer le comportement général de l'ensemble des composants pour une journée d'été.

L'utilisation d'un système de gestion permet de faire fonctionner le système dans les meilleurs délais, avec la stratégie de contrôle qui a été établie, il détermine la puissance disponible par le générateur photovoltaïque et la puissance de charge demandée. Quand le générateur photovoltaïque n'a pas la puissance suffisante pour alimenter la charge, les batteries ajoutent leurs puissances pour compléter le manque de puissance du générateur photovoltaïque.

Nous remarquons que les résultats de simulation sont logiques et satisfaites (durée de la charge des batteries, les modes, les puissances moins importantes) pour une journée d'été, ceci est dû à la durée d'ensoleillement qui est différent lors de chaque journée. Le mode du chargement des batteries qui est le mode 1 dure très longtemps en été. L'intervention de la batterie représentée par le mode 3 dure très longtemps aussi vu le manque de puissance requise pendant la journée.

Les résultats montrent la flexibilité et le bon fonctionnement du système de gestion proposé, sous conditions météorologiques.

Chapitre 04 :

*Présentation et
étude de stage.*

IV. Présentation de stage :

Lieu de stage : SCT TEBESSA

Présentation de la société :

Fiche technique de la société

IV.1. Présentation :

La Société des Ciments de Tébessa, Entreprise Publique Economique Spa, est une filiale créée

Initialement entre les trois entreprises des ciments : ERCE : 60%, ERCE : 20%, ECDE : 20% ;

Et rachetée à 100% par le groupe ERCE en 1997.

Date de création 28 novembre 1993.

Capital social (KDA) a la création : 800 000

Recapitalisée en 1997 : 1 200 000

Et en 2002 : 2 700 000

Siège social : Rue BELKACEMI YUCEF Tébessa

Cimenterie : ELMA -Labiod

Produit : Ciment Gris

Capacité : 525 000 tonnes de CPA

• Investissement

Mise en vigueur du contrat 15 Août 1990

Part Devises : 119 443 840 USD

Part Dinars : 2 782 107 238 DA

• Réalisation :

La cimenterie a été réalisée par :

1. F.L. Smidth pour l'engineering, la fourniture, la supervision, la mise en service et Merlin Gerin pour le montage électrique.
2. COSIDER pour la réalisation du génie civil.
3. BATIMETAL pour la fabrication et le montage de la charpente métallique.
4. ENCC et ETTERKIB pour le montage mécanique.
5. Délais d'exécution : 40 mois
6. Date de réception provisoire : 22 Mars 1995

Présentation et étude de stage

7. Date de réception définitive : 21 novembre 1996

• **Mise en service :**

Allumage du four : 11 Octobre 1994

Production du premier Clinker : 14 Octobre 1994

Production du premier Ciment : 12 Janvier 1995

Première Expédition : 12 Mars 1995

INFRASTRUCTURES ET UTILITES

Eau industrielle : Nappe phréatique 16L/sec.

Electricité : Deux lignes H.T 90 KV.

Gaz : Gazoduc transméditerranéen.

Route Nationale : RN 16.

Voie ferrée : Annaba – Djebel Onk.

L'Activité principale : Production et commercialisation des ciments.

Secteur : Matériaux de construction. Statut juridique : Société par actions au capital social de 2.700.000.000 DA, réparti sur 16 615 000 actions entièrement détenues par le Groupe GICA.

Actionnaire unique : Groupe Industriel des Ciments d'Algérie (GICA).

Banque : Banque Extérieure d'Algérie

Capacité contractuelle : 500 000 Tonnes de clinker par an.



Figure IV.1. La direction de la cimenterie de Tébessa

Date de stage

25/03/2021 a 12/04/2021

IV.2. Energie solaire :

Introduction

1. Contexte. Energie renouvelable et énergie solaire.

Les sources d'énergie conventionnelles telles que le nucléaire ou les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) sont issues de stocks limités de matières extraites du sous-sol de la terre. Chacune d'elles provoquent dans leurs utilisations des conséquences à long terme plus ou moins importantes sur l'environnement et qui tendent à être mieux maîtrisées : pollution atmosphérique, changement climatique, contamination radioactive.... A l'opposé, les sources d'énergie renouvelables ont recours à des flux naturels qui traversent de façon plus ou moins permanente la Biosphère. Dans le cas d'une utilisation d'une infime partie de ces flux, alors ces énergies resteront inoffensives pour l'environnement naturel aussi bien localement que globalement. Toutes les énergies renouvelables sont issues directement ou indirectement du soleil. Son rayonnement direct peut être utilisé de deux manières :

- sa chaleur peut être concentrée pour chauffer de l'eau sanitaire, des immeubles, des séchoirs, ou bien un liquide en circulation afin de produire de l'électricité par l'intermédiaire d'un alternateur ou d'une dynamo. **C'est le solaire thermique.**
- sa lumière peut être transformée directement en courant électrique grâce à **l'effet photovoltaïque**



Figure IV.2.panneaux photovoltaïques exemplaires

IV.3. Etude d'un projet photovoltaïque avec stockage :

IV.3.1 Problématique :

Mon stage est déroulé au sein de différents machines électriques et hydrauliques qui nécessitent évidemment une source d'énergie permanente. la consommation élevée de ces machines et l'endurance de marche de l'usine devient une problématique nous conduit à trouver des solutions de stockage d'énergie pour but économique et écologique.

Avec le développement de la capacité de production d'électricité à partir d'énergie solaire et éolienne dont la disponibilité est intermittente et en partie aléatoire, le stockage est devenu une composante plus cruciale que jamais du système électrique.

Mais l'électricité n'est stockable en tant que telle que pour des quantités limitées et des usages très spécifiques elle doit donc être stockée sous forme d'énergie mécanique, thermique, chimique, électrochimique, dans des installations qui incluent des convertisseurs en compléments des moyens de stockage proprement dit.

Les caractéristiques technique clés d'une installation de stockage d'électricité sont la capacité (quantité maximale d'énergie qui peut être emmagasinée et restituer), la puissance (débit) et la durée de charge ou décharge, le nombre de cycles de charge/décharge qu'il peut supporter, ainsi que le rendement (quantité d'électricité restituée, rapportée à la quantité prélevée). Le délai de réaction est également crucial pour les applications de stabilisation du réseau

IV.3.2 Résolution du problème :

Après une étude trop approfondit on a constaté un besoin permanent qui puisse dans l'avenir être l'outil maitresse en source d'Energie moins couteuse et d'une grande réserve d'Energie pour un éventuel stockage toujours en besoins.

En l'occurrence d'une consultation avec son excellence le maitre du stage s'est énergie d'aborder le thème de notre projet le stockage d'Energie dans un système photovoltaïque la probabilité de créer et réaliser ce projet en cours

L'étude concerne la création d'une petite station équiper des panneaux photovoltaïques qui puisse donner une énergie fiable et moins couteuse qui représente la potence de stockage et même temps alimente un premier lieu l'éclairage de notre site en utilisant des moyens d'éclairage a "LED" et aide aussi en cas de besoin l'alimentation les moteurs principaux tel que les grands moyens de fonctionnement ex ; moteur de fours les tapis roulants enfin les salles de contrôles de notre unité.

A cet effet tous ses études approfondissent nous mènent à faciliter de produire une énergie propre et fiable dans le cote écologique, économique et pratique plus important aussi de garder l'environnement propre et sein éco système.

IV.3.3 Structure d'un système étudié :

L'élément central de l'installation est un onduleur-chargeur qui gère pratiquement tout le transfert de l'énergie électrique :

- La charge des batteries à partir des panneaux ou du 230 V généré par le groupe électrogène.
- La conversion de la tension continue de la batterie en 230 V AC destiné aux récepteurs.
- La surveillance de l'état de charge des batteries et éventuellement le démarrage du groupe électrogène.

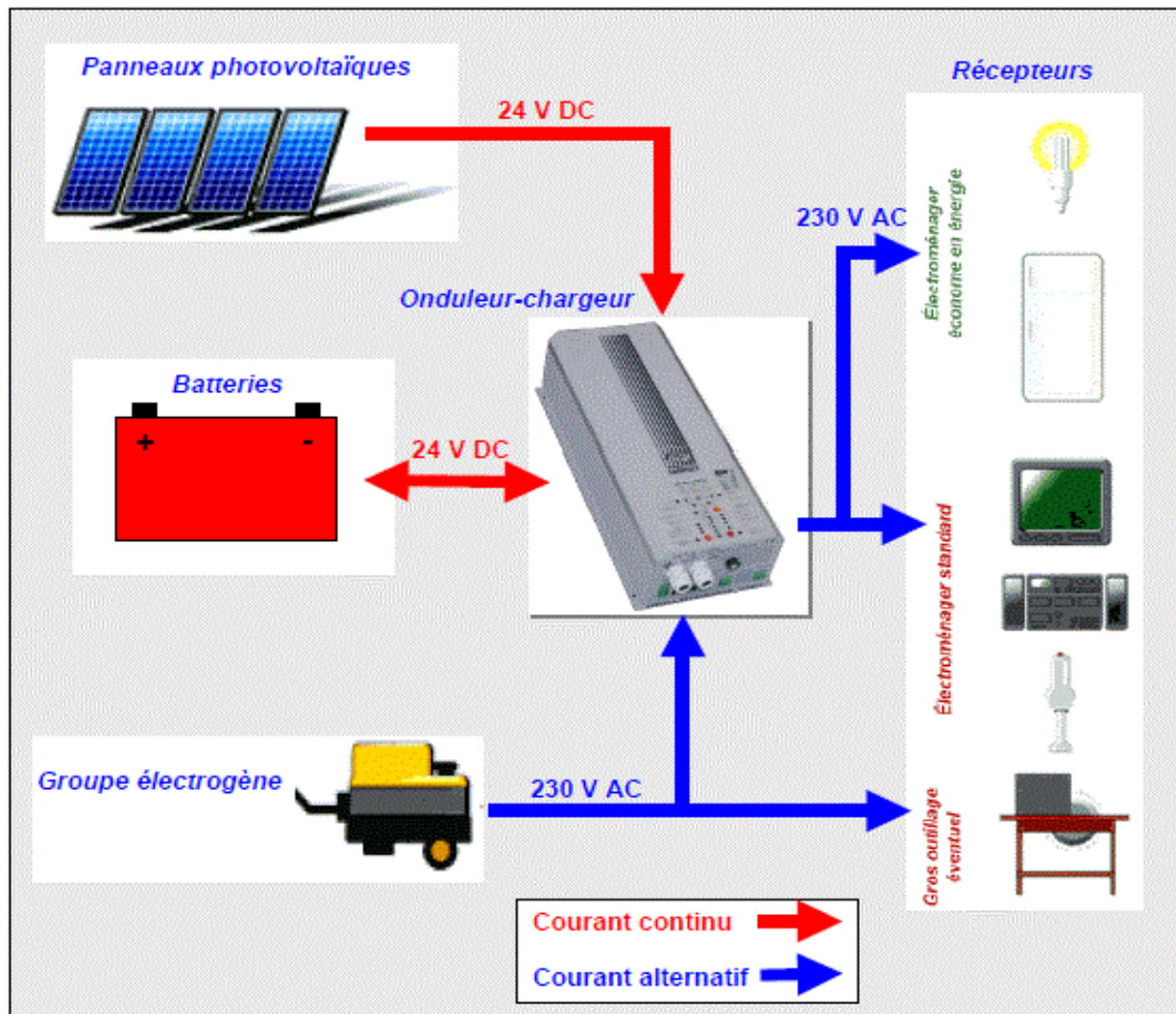


Figure IV.3. Bilan des puissances Auberge du Charmant Som (Isère).

Présentation et étude de stage

IV.3.3.1 Cahier de charge de récepteurs :

Récepteur alimentée par onduleur					
Appareils	Nombre	Puissance Unitaire	Fréquence ou durée D'utilisation Quotidienne	puissance	Énergie
Des lamps (bureau)	5	18	Fonctionnement permanent 12h	90	1080
Des lamps 'LED'(platform)	10	20	Fonctionnement 12h	200	240
Des pc	3	30	Fonctionnement 24h	90	2160
Des camera de surveillance	2	20	Fonctionnement 1 jour(24h)	40	960
imprimante	2	27	Fonctionnement 3h	54	162
				PT = 474	Ec = 4602

Tableau IV.1. Récepteur alimentée par onduleur.

Récepteurs alimentés par groupe électrogène 6,5 kVA				
Appareils	Nombre	Puissance unitaire	Fréquence ou durée d'utilisation quotidienne	Puissance total
Surpresseur	1	800w	Fonctionnement occasionnel 1h/j	800w
Pompe auxiliaire	1	750w	Fonctionnement occasionnel 1h/j	750w
Malaxeur	1	2500w	Fonctionnement occasionnel 1h/j	2500w
				4050w

Tableau IV.2. Récepteur alimentée par groupe électrogène.

Présentation et étude de stage

Cahier des charges et données complémentaires :

- Site : La Société des Ciments de Tébessa,
- Pente de toit : 33° par rapport à l'horizontale / l'orientation des panneaux est plein sud (180°)
- L'utilisateur prévoit d'utiliser le groupe électrogène 1 heure par jour
- Le site est prévu pour fonctionner de début mai à fin septembre.
- L'autonomie doit être de 5 jours en cas de mauvais temps.
- Les batteries seront du type accumulateurs au plomb, stationnaire. (Chaque accumulateur Génère une tension de 2V)
- L'onduleur sera de type onduleur-chargeur (type Studer Inno Compact) ; compte tenu de la Puissance mise en jeu l'ensemble batteries, panneaux et onduleur fonctionnera en 24 V CC.
- Les panneaux seront du type BP Solar 3125.

IV.3.3.2 Bilan des puissances :

Calculez la puissance totale et l'énergie totale quotidienne nécessaire à l'installation (Donnez votre réponse sur le tableau de la page précédente)

IV.3.3.3 Calculs et choix des éléments du système :

Pour vous aider à répondre aux questions suivantes vous vous servirez des fiches de calculs Données en annexe.

a) Calculez l'énergie à produire **Ep** :

$$EP = \frac{Ec}{k} \quad Ep = \frac{4602}{0.65}$$

$$EP = 7080 \text{ W}$$

b) Calculez la puissance crête **Pc** du générateur photovoltaïque nécessaire :

(On prendra une irradiation moyenne de 5 kWh/m² /jour pour la période estivale de fonctionnement)

$$Pc = Ep / Ir = 7080 / 5 = 1416 \text{ watts crête}$$

$$Pc = 1416 \text{ Wc}$$

A partir de la puissance crête des panneaux BP Solar 3125U déterminer le nombre de panneaux solaire nécessaires à l'installation.

Puissance crête d'un panneau BP 3125U (cf p 14)

$$N = Pc / \text{puissance crête unitaire panneau} = 1416 / 125 = 11,3$$

$$\text{Nbre} = 12 \text{ panneaux}$$

Présentation et étude de stage

c) Calculer la capacité des accumulateurs nécessaires à ce système ainsi que leur nombre :

$$C = \frac{EC \times N}{D \times U}$$

C : capacité de la batterie en ampère-heure (Ah)

EC : énergie consommée par jour (Wh/j)

N : nombre de jour d'autonomie

D : décharge maximale admissible (0,8 pour les batteries au plomb)

U : tension de la batterie (V)

$$(4602 \times 5) / (0,8 \times 24) = 1198 \text{ Ah}$$

$$C \approx 1200 \text{ Wh}$$

Le parc batterie sera constitué d'accumulateur de 2 V chacun, le système fonctionnant sous 24 V les accumulateurs seront couplés en série.

$$\text{Nbre} = 24 / 2 = 12 \text{ accumulateurs}$$

$$\text{Nbre} = 12 \text{ accus}$$

IV.3.3.4 Choix des câbles :

C'est sur la partie courant continu de l'installation que les intensités sont les plus importantes, c'est donc dans cette partie que se pose le problème des pertes joules et des chutes de tensions dans les câbles.

On vous demande donc de déterminer les sections des câbles entraînant le moins de chute de tension possible entre les panneaux et l'onduleur-chargeur, mais aussi entre les batteries et l'onduleur-chargeur.

Données complémentaires :

- Chute de tension maximale entre panneaux –Ⓜ boîte de raccordement ; boîte de raccordement –Ⓜ onduleur et batterie –Ⓜ onduleur = DU = 2%
- Puissance nominale de l'onduleur P NOM = 2300 W
- Conducteurs en cuivre ($r = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ N.m}$).

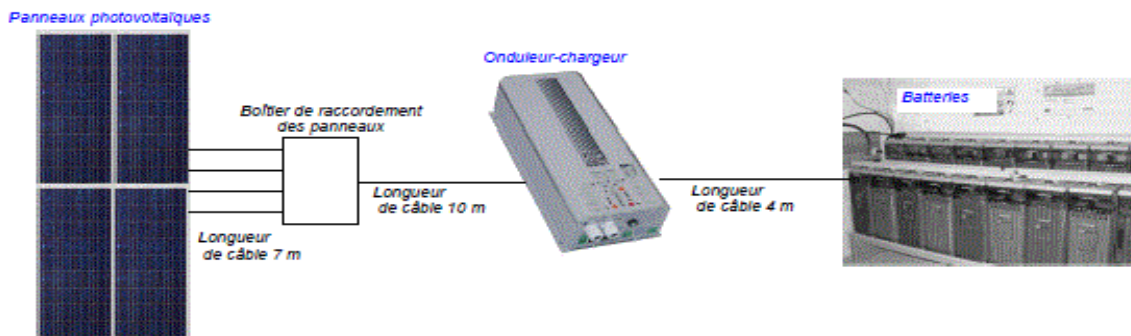


Figure IV.4. Représente le choix des câbles.

Présentation et étude de stage

Partie du calcul :

a) Calculez le courant de sortie d'un panneau à sa puissance nominale :

$$I = P/U = 125 / 24 = \mathbf{5,2 \text{ A.}}$$

b) Déterminez la section des conducteurs entre les panneaux et le boîtier de raccordement :

$$DU = 24 \times 0,02 = 0,48 \text{ V donc R max de la ligne : } R = DU / I = 0,48 / 5,2 =$$

$$S = (r.L) / R = (1,6 \cdot 10^{-8} \cdot 14) / 0,092 = 2,10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ soit un câble d'une section de } 2 \text{ mm}^2 \text{ on}$$

Prendra donc des câbles de 2,5 mm².

c) Calculez le courant circulant entre le boîtier de raccordement et l'onduleur :

$$\text{La puissance crête du champ photovoltaïque } P_c = 12 \times 125 = 1500 \text{ W}$$

$$I = P_c / U = 1500 / 24 = \mathbf{62,5 \text{ A.}}$$

d) Déterminez la section des conducteurs entre le boîtier de raccordement et l'onduleur :

$$DU = 24 \times 0,02 = 0,48 \text{ V donc R max de la ligne } R = DU / I = 0,48 / 62,5 = 0,00768 \text{ W}$$

$$S = (r.L) / R = (1,6 \cdot 10^{-8} \cdot 20) / 0,00768 = 42 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Soit un conducteur d'une section minimale de 42 mm² (section normalisée 50 mm²).

e) Calculez le courant circulant entre les batteries et l'onduleur lorsque celui-ci débite sa Puissance nominale :

$$I \text{ max batteries} = P \text{ max onduleur} / U \text{ batterie} = 2300 / 24 = \mathbf{95,33 \text{ A.}}$$

f) Déterminez la section des conducteurs entre le parc batterie et l'onduleur :

$$DU = 24 \times 0,02 = 0,48 \text{ V donc R max de la ligne } R = DU / I = 0,48 / 95 = 0,00505 \text{ W}$$

$$S = (r.L) / R = (1,6 \cdot 10^{-8} \cdot 8) / 0,00505 = 25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Soit un conducteur d'une **section minimale de 25 mm²**.

IV.3.3.5 Schéma électrique :

Complétez le schéma électrique de l'installation :

- Branchements des panneaux.
- Couplage des batteries et raccordement à l'onduleur.

Présentation et étude de stage

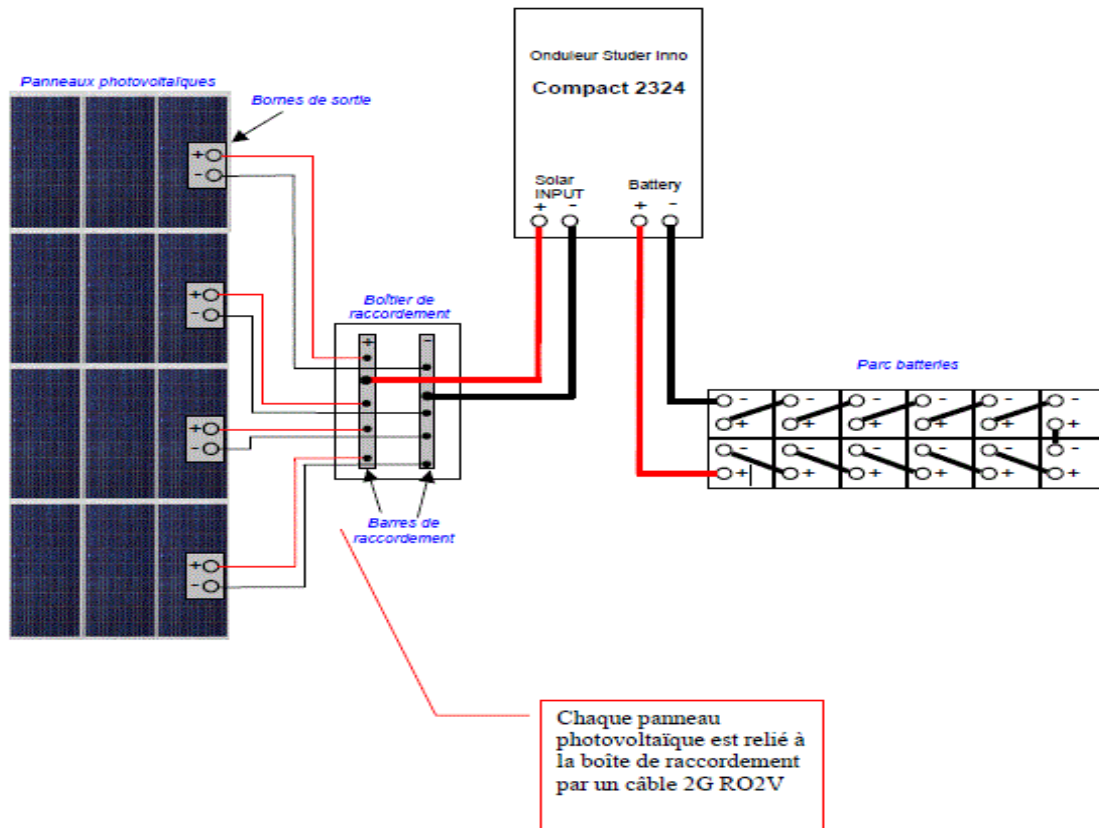


Figure IV.5. Branchement et couplage des panneaux et les batteries.



Figure. IV.6. Banc d'essai Système PV avec stockage (batteries plomb acide).

Conclusion

Générale

Conclusion générale

Dans notre travail présenté dans ce mémoire nous avons étudié le stockage d'un système photovoltaïque avec stockage.

Dans le premier chapitre nous avons donné un aperçu sur l'état de l'art de stockage d'énergie et leur différent type, nous avons aussi présenté les technologies de stockage d'électricité et les moyens de stockage

Dans le deuxième chapitre on a présenté une généralité sur l'énergie photovoltaïque et sur tout le système photovoltaïque autonome. Leur principe de fonctionnement et leur différente cellule qui constituent le module photovoltaïque, puis nous avons choisi un modèle pour la modélisation du générateur photovoltaïque .la modélisation des différents composants du système photovoltaïque (hacheur (boost DC/DC), la batterie) a été présenté

Afin d'exploiter les générateurs photovoltaïques au maximum, et l'extraction de la puissance maximale dans ce dernier, un algorithme a été utilisé pour la recherche du point de puissance maximale. Il s'agit de la commande P&O « Méthode de perturbation et d'observation », Le principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α à la valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du panneau photovoltaïque.

Dans le troisième chapitre, nous avons fait le dimensionnement du système PV et des batteries. Cette méthode permet de calculer le nombre de panneaux et le nombre de batteries qui sont associé au besoin énergétique de la charge, et nous avons présenté un algorithme de gestion qui a pour rôle de gérer l'énergie produite par le générateur photovoltaïque puis on a procédé à la simulation du système photovoltaïque global. Et on a montré l'importance d'un système de stockage et l'efficacité d'un algorithme de gestion dans ce type d'installation. Comme on a pu voir à partir des résultats de simulation, la diversification des modes de fonctionnement.

Nous pouvons conclure que les résultats de simulation concordent avec la gestion proposée.

Dans le quatrième Chapitre : nous avons fait une étude sur un petit projet qui nous proposons dans notre stage guidé par le maitre de stage qui contient une partie de calcul a proposé de produit l'électricité à travers d'un système photovoltaïque avec stockage alimenté a des différents composants (pompe, lampes, pc) de société (sct).

En perspective, nous souhaitons étudier d'autres méthodes MPPT tel que la méthode logique floue avec d'autres modèles mathématiques du panneau photovoltaïque Concrétisation pratique de ce travail sur un banc d'essai expérimental.

Références

- [1] Baiwir, R., *Modélisation de systèmes de stockage électrique et leur intégration dans un réseau électrique intelligent*. 2017.
- [2] Hémary, C.-V., *Study of thermal phenomena in Li-ion batteries*. 2013, Université de Grenoble
- [3] CARBONI, M.C.M., *Stockage de l'énergie : évolution des batteries* culturesciencesChimie, 2017
- [4] <http://www.academie-technologies.fr/>, *Dix (10) questions à J. Dhers sur le stockage de l'énergie électrique*, 2006.
- [5] B. Dakyo, Conférence UPMC, 09 novembre 2010
- [6] 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
- [7] 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
- [8] S. Pelissier (2012) « *Introduction au vieillissement des batteries Lithium-ion et aux protocoles expérimentaux de test de durée de vie* », hal-01228457, IFSTTAR.
- [9] H. Chen, T.N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, Y. Ding (2009) « *Progress in electrical energy storage system : A critical review* », Progress in natural science, Vol. 19, pp. 291-312.
- [10] S. M. Ingale, A. P. Chaudhari, G. K. Mahajan (2013) « *A review on advance energy storage technology for microgrid and smartgrid* », International Journal of Science, Vol. 2.
- [11] N. Dellivers (2013) « *Caractérisation et modélisation de composants de stockage électrochimique et électrostatique* », Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté
- [12] I. Baboselac, Ž. Hederić, T. Benšić (2017) « *Matlab simulation model for dynamic mode of the lithium-ion batteries to power the ev* », Technical journal, Vol. 11, pp. 7-13, ID: TG-20170126230213
- [13] C. Mondru, D.V. A. Kumar, R. Kiranmayi (2017) « *Batteries comparative analysis and their dynamic model for electric vehicular technology* », International journal of pure and applied mathematics, Vol. 114, No. 12, pp. 453-467.
- [14] 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.
- [15] J. Gustavsson (2016) « *Energy storage technology comparison* » Bachelor of science thesis, KTH school of industrial engineering and management.
- [16] www.europa-batteries.com
- [17] J. Robert, J. Alzieu, *Accumulateurs au lithium*, Technique de l'ingénieur. D3354, 2005.

Références

- [18] B. C. Cheung, R. Carriveau, D. S-K. Ting (2014) « *Parameters affecting scalable underwater compressed air energy storage* » *Applied Energy*, Vol. 134, pp 239–247.
- [19] 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
- [20] H. Hamouche (2010) « Système inertiel de stockage d'énergie à palier supraconducteur », *Revue des énergies renouvelables*, Vol. 10, pp. 189-193.
- [21] K. Aydin, M. T. Aydemir (2016) « Sizing design and implementation of a flywheel energy storage system for space applications », *Turkish journal of electrical engineering & computer sciences*, Vol. 24, pp. 793-806, doi :10.3906/elk-1306-206
- [22] S. Khare, M. D. Amico, C. Knight, S. McGarry (2012) « Selection of materials for high temperature latent heat energy storage », *Solar energy materials & solar cells*, No. 107, pp. 20-
- [23] M. E. Amiryar, K. R. Pullen (2017) « A review of flywheel energy storage system technologies and their applications », *Applied science*, Vol. 7, No.286; doi :10.3390/app7030286
- [24] S. Khare, M. D. Amico, C. Knight, S. McGarry (2012) « Selection of materials for high temperature latent heat energy storage », *Solar energy materials & solar cells*, No. 107, pp. 20-27.
- [25] B. Multon, G. Robin, E. Erambert, H.B. Ahmed (2004) « Stockage de l'énergie dans les applications stationnaires », *Colloque Energie électrique : besoins, enjeux, technologies et applications*, pp. 64-77.
- [26] R. Kabouche, S. Harrouni, A. Talha (2012) « Etude comparative des différentes techniques de stockage de l'énergie photovoltaïque », *Revue des énergies renouvelables*, pp. 115 –129.
- [27] R. Kabouche, S. Harrouni, A. Talha (2012) « Etude comparative des différentes techniques de stockage de l'énergie photovoltaïque », *Revue des énergies renouvelables*, pp. 115 –129.
- [28] D. Meekhum (2010) « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fils autonomes pour l'application aéronautique », Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- [29] L. M. Jacquelin, A. G. Bader (2013) « Le stockage souterrain de l'énergie », *Géosciences*, pp.100-107.
- [30] G. Dillenseger (2004) « caractérisation de nouveaux modes de maintien en charge pour batteries stationnaires de secours », Thèse de doctorat, Université Montpellier II.
- [31] H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron (2008) « Energy storage systems-Characteristics and comparisons » *ScienceDirect, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.12, pp. 1221–1250. doi : 10.1016/j.rser.2007.01.023.
- [32] M. Waongo, Z. Koalaga, F. Zougmore (2012) « A guideline for sizing Photovoltaic panels across different climatic zones in Burkina Faso » *IOP science*, vol.29, doi:10.1088/1757-899X/29/1/012014.

Références

- [33] M. Waongo, Z. Koalaga, F. Zougmore (2012) « A guideline for sizing Photovoltaic panels across different climatic zones in Burkina Faso » IOP science, vol.29, doi:10.1088/1757-899X/29/1/012014.
- [34] H. Ibrahim, M. Dimitrova, D. Rousse, A. Ilinca, J. Perron (2011) « Générateur éolien-diesel avec stockage d'énergie : critères de choix du système de stockage », CIFQ / ÉnergRenouv01
- [35] G. Robin, M. Ruellan, B. Multon, H. B. Ahmed, P.Y. Glorennec (2012) « Solutions de stockage de l'énergie pour les systèmes de production intermittente d'électricité renouvelable », Hal-00676109
- [36] J.I.S Martin, I. Zamora, J.J.S. Martin, V. Aperribay, P. Eguía (2011) « Energy storage technologies for electric applications » RE&PQJ, No.1, Vol.9.
- [37] I. Baboselac, Ž. Hederić, T. Benšić (2017) « Matlab simulation model for dynamic mode of the lithium-ion batteries to power the ev », Technical journal, Vol. 11, pp. 7-13, ID: TG-20170126230213
- [38] H. Ibrahim, M. Dimitrova, D. Rousse, A. Ilinca, J. Perron (2011) « Générateur éolien-diesel avec stockage d'énergie : critères de choix du système de stockage », CIFQ / ÉnergRenouv01
- [39] A. Laugier, J.A. Roger, Les photopiles solaires, du matériau au dispositif, du dispositif aux applications, Éditions Technique et Documentation, Paris, 1981.
- [40] ASTM, Standard solar constant and zero air mass solar spectral irradiance tables. Standard E490-00. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2000.
- [41] ASTM, *Standard solar constant and zero air mass solar spectral irradiance tables*. Standard E490-00. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2000.
- [42] "Convertisseurs photovoltaïques" Ludovic Protin, Stephane Astier, Traite Genie Electrique D 3360, Techniques de l'ingenieur
- [43] D. Bellala. « Contribution A L'optimisation Des Systèmes De Conversion D'énergie Application Aux Systèmes Photovoltaïques », Thèse Doctorat, Université De Batna, 2006
- [44] A. Singo. «<Système D'alimentation Photovoltaïque Avec Stockage Hybride Pour L'habitat Énergétiquement Autonome >>. Thèse Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I France; 3 Février 2010.
- [45] C. L. H, J. Wu, M. Zhang, J. M. Yang and J.P. Li. «Application of adaptive algorithm of solar cell battery charger ». Proceeding IEEE International Conference on Electric Utility de regulation Restructuring Power Technologies, pp. 810-813, 2004.
- [46] M. Akbaba, I. Qamber et A. Kamal. « Matching of separately excited DC motors to photovoltaic generators for maximum power output », Solar Energy, Vol. 63(6), pp.375-385,1998.

Références

[47] O. Gergaud, « modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur »; Thèse Doctorat. Ecole Normale Supérieure de Cachan-France, 9 décembre 2002.

[48] C. Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédiée à la conversion photovoltaïque. », thèse doctorat, Université Toulouse III – Paul Sabatier-France, 15 décembre 2008.

[49] “Modelisation energetique et optimisation economique d'un systeme de production eolien et photovoltaïque couple au reseau et associe a un accumulateur”, O. Gergaud, Ecole Normale Supérieure de Cachan, These soutenue le 9 septembre 2002

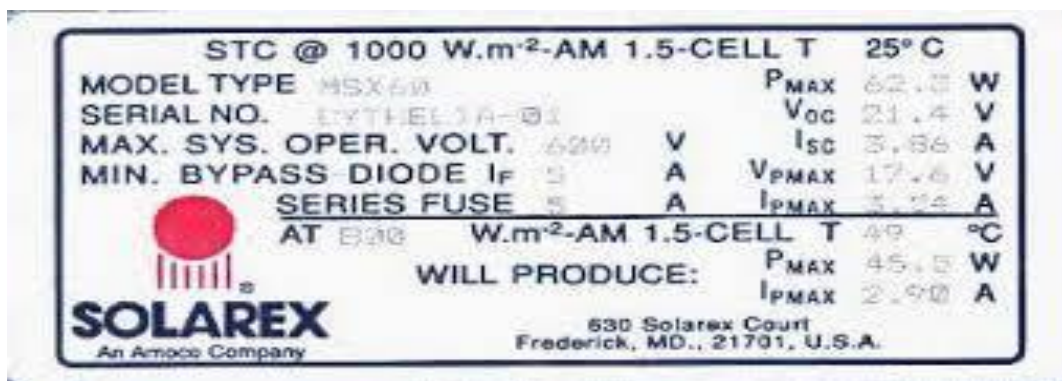
[50] Julia Schiffer , Dirk Uwe Sauer , Henrik Bindner , Tom Cronin, Per Lundsager, Rudi Kaiser “Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems” Journal of Power Sources n°168 (2007), pp. 66–78

[51] Anne Labouret-Michel Villos, « Energie solaire photovoltaïque le manuel professionnelle », édition dunot, Paris2003

ANNEX

Paramétre de panneau:

Symbole	Nom	Valeur	unité
Rs	La Résistance série	0.08	Ω
Ns	Nombre de cellules	36	–
Voc_STC	Tension de circuit ouvert STC	0.583	V
Isc_STC	Courant de court -circuit	3.25	A
Vsc_STC	Tension de court -circuit	18.47	V
C1	Constant1	0.00325	$^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{W}$
C2	Constant2	0.03	$^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{W}$
C3	Constant3	$-2.3 \cdot 10^{-3}$	$\text{V}/^{\circ}\text{C}$
K	Constant de Boltzmann	$1.3854 \cdot 10^{-23}$	J.K ⁻¹
e	La charge d'électron	$1.6021 \cdot 10^{-19}$	Cb
Ga	Fonction d'éclairement	1000	W/m^2
Tc	Température de jonction	25	$^{\circ}\text{C}$



Plaque signalétique de panneau 60 W.

Paramètre de convertisseur DC/DC :

symbol	Nom	valeur	unite
L	Inductance	$35 * 10^{-3}$	H
C1	Capacité1	$5.60 * 10^{-3}$	F
C1	Capacité2	$5.60 * 10^{-3}$	F

Paramètre de batterie:

symbol	Nom	valeur	Unite
Ubatt	Tension de batterie	12	V
Aut	Nombre de jours d'autonomie	1	-
nb	Rendement électrique des batteries	80	-
NB	Nombre des batteries	4	-
Cb	Capacité nominale des batteries	260	Ah



Batterie de 256 Ah

Résumé

L'énergie photovoltaïque connaît actuellement un fort développement dans le monde. Vu son caractère écologique, elle apparaît comme une source importante, elle se résulte en transformant la lumière du soleil en énergie électrique. Dans ce mémoire on s'intéresse à l'étude d'un système de gestion photovoltaïque avec stockage assurant la disponibilité d'énergie de façon continue, un système de gestion a été développée à fin d'optimiser la durée de vie de système de ce dernier. Ce système fonctionne à une puissance optimale avec l'utilisation d'un convertisseur DC/DC commandé par MPPT. Grâce à l'étude et la simulation de système les résultats obtenue on put valider l'étude théorique.

Mots clé : Système photovoltaïque avec stockage. Gestion d'un système photovoltaïque. Stratégie de poursuite de point de puissance maximale MPPT, perturbation & observation (PO), Incrémentale.

Abstract: Photovoltaic energy is currently experiencing strong growth worldwide. Given its ecological character, it appears as an important source, it results in transforming sunlight into electrical energy. In this paper we are interested in the study of a photovoltaic system with storage management ensuring the availability of energy continuously, a management system has been developed to optimize system end of the life of this latest. This system operates at an optimal power with the use of a DC / DC converter controlled by MPPT Thanks to the design and system simulation results obtained theoretical study we could confirm.

Keywords: photovoltaic system with storage. Managing a PV system. Maximum power point tracking MPPT strategy, perturbation & observation (PO) Incremental.