



# INTRODUCTION GENERALE

Une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse, il est estimé qu'elles seront épuisées vers 2030 si ce rythme de consommation n'est pas radicalement modifié.

Face à cette déplétion et aux menaces du réchauffement climatique liées à l'activité humaine. Il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais, la contrainte imposée est d'utiliser une source d'énergie disponible, économique, peu polluante et qui constitue une source illimitée, Parmi les moyens de production prometteurs le photovoltaïque (PV) apparaît aujourd'hui comme le plus approprié et le plus abouti à la production d'électricité car elle est la source la plus abondante sur la Terre.

Les lieux privilégiés où le rayonnement solaire est important sont l'Afrique du nord l'Arabie saoudite l'Australie la côte ouest des états unis et le nord du Pérou.

L'Algérie est un pays très ensoleillé, 3500 heures d'ensoleillement par an, encourage le développement des énergies renouvelables, En effet le 14 juillet 2011 a été inaugurée la première centrale électrique de type hybride gaz et solaire à HASSI R'MEL avec une puissance de 150Mw permettant d'économiser 7 millions de mètres cubes de gaz pour d'autres applications et de réduire la quantité des gaz brûlés soit environ 33000 tonnes de CO<sub>2</sub> émis par an. L'Algérie, puissance en matière d'énergie solaire, le potentiel équivalent à 8 fois les réserves de gaz.

Les sites géographiquement isolés et non raccordés au réseau intégrant une source d'énergie solaire sont généralement alimentés par un système comprenant un champ photovoltaïque, et un stockage batteries pour assurer la continuité de la production en raison de la disponibilité intermittente (jour/nuit) aléatoire (orages et passages de nuages), et décalée par rapport aux demandes énergétiques quotidiennes.

Les batteries d'accumulateurs constituent le maillon faible des installations PV à cause de la faible durée de vie des batteries électrochimiques (3 à 5 ans en moyenne). Ceci engendre des remplacements répétés des batteries au cours de la durée de vie de l'installation et donc des dépenses additionnelles. En effet, certaines études ont montré que les dépenses causées par les batteries peuvent représenter à terme jusqu'à 40% du coût global du système dans une installation photovoltaïque. Il apparaît donc que la question du stockage mérite d'être regardée de près si l'on veut réduire le coût de production de l'électricité photovoltaïque.

Dans ce contexte, la problématique scientifique de la thèse est ainsi posée : Comment produire de l'électricité décentralisée de façon durable et rentable à partir des systèmes PV tout en protégeant la batterie et Améliorée leur durée de vie.

Dont l'objectif est de contribuer à une meilleure compréhension des performances des convertisseurs DC-DC lors qu'ils sont intégrés dans une chaîne de conversion photovoltaïque, adaptés par les différents algorithmes de contrôle tel que MPPT numérique ; commande hystérésis ; Régulateur PI classique ; Régulateur PI flou ; Et de comparer les résultats obtenus lors de la simulation sous l'environnement MATLAB/SIMULINK®.

Outre l'introduction et la conclusion générales, ce mémoire comprend quatre (04) chapitres.

**Le chapitre I** fait une description générale, et le principe de fonctionnement de chaque élément constituant le système photovoltaïque à étudier.

**Le chapitre II** est consacré à la modélisation et la simulation du système photovoltaïque sans stockage .L'objectif ici est d'étudier l'impact du L'algorithme de commande le plus utilisé (P&O) sur l'optimisation de l'énergie produite par le générateur photovoltaïque via le convertisseur DC/DC

**Le chapitre III** porte sur la présentation du système de stockage d'un accumulateur, un convertisseur bidirectionnel DC/DC commandé par un régulateur PI et à hystérésis. Les résultats en simulation sous l'environnement Matlab/Simulink® des deux lois de commandes(PI\_Hystérésis) sont présentés dans les différents modes de fonctionnements, dans le but de valider nos calculs sur l'ensemble du dimensionnement.

**Le chapitre IV** est consacré à la détermination des paramètres deux correcteurs par la logique floue dans le but de déduire le modèle le plus performant.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et simulation des résultats. Des perspectives pour ce travail sont également exposées.

# CHAPITRE I

## I.1 Introduction

La recherche des ressources d'énergie alternatives est devenue une question cruciale de nos jours. Beaucoup de recherches scientifiques ont été menées dans le secteur des sources d'énergie illimitées, telles que la production d'électricité par le vent et la transformation d'énergie solaire. [HMA07]

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, feu de bois, traction animale, bateaux à voile ont largement contribué au développement de l'humanité.

Les chocs pétroliers successifs depuis les années 70 ont démontré les risques économiques et géopolitiques de la production d'énergie reposant sur l'exploitation des ressources fossiles, dont les réserves sont mal réparties et épuisables.

Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres [GER02] :

- \* elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement ;
- \* ne produisent pas de déchets ;
- \* elles sont inépuisables ;
- \* elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux ;
- \* elles offrent une importante indépendance énergétique.

Dans ce chapitre on introduit le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique reposant sur l'effet photoélectrique des semi-conducteurs.

## I.2 Système photovoltaïque

### I.2.1 Définition

Le mot « photovoltaïque » vient du grec « phôtos » signifiant lumière et de « Volta » du nom du physicien italien qui, en 1800, découvrit la pile électrique. Mais c'est en 1839 que le français Edmond Becquerel fut le premier à mettre la conversion particulière d'énergie [KAM08].

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé « effet photovoltaïque » qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la

lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) [ALA06].

## I.2.2 Type de système photovoltaïque

Les systèmes PV sont classés en deux grandes catégories selon la manière dont l'énergie est utilisée [YAN09] :

- Systèmes isolés et autonomes ;
- Systèmes raccordés au réseau.

### I.2.2.1 Systèmes isolés et autonomes

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs qui se situent dans une zone isolée du réseau électrique, et assurent quelques services de base tels que l'éclairage, la télécommunication, et le pompage de l'eau comme nous le voyons sur la figure I.1

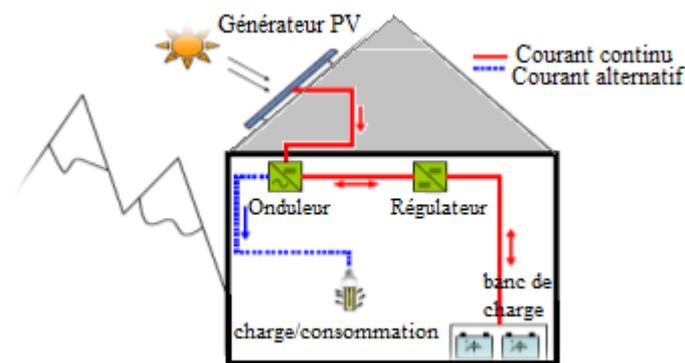


Figure I. 1 Exemple de la structure d'un système PV autonome.

### I.2.2.2 systèmes raccordés au réseau

Leur rôle principal est de contribuer à la production d'électricité d'origine renouvelable tout en les raccordant au réseau [YAN09]. Ce système est représenté par la figure I.2

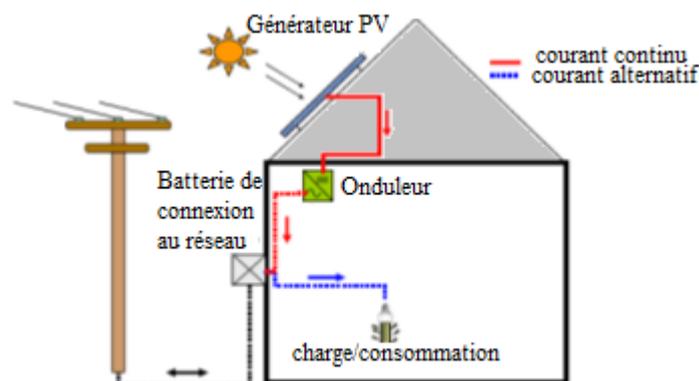


Figure I. 2 Exemple de la structure d'un système PV connecte au réseau.

## I.3 Différents composant d'une chaîne de conversion photovoltaïque

### I.3.1 Cellules solaires

Une cellule solaire, autrement appelée photopile, sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Ce phénomène est appelé «effet photovoltaïque».

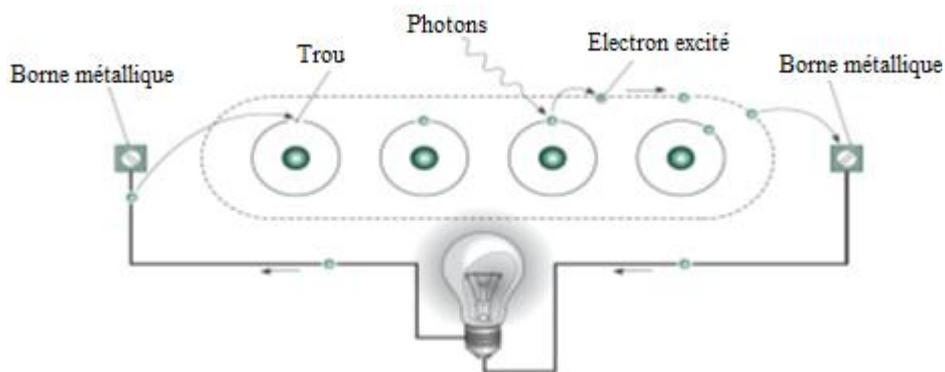


Figure I. 3 Représentation d'une photopile en silicium.

#### I.3.1.1 Principe de fonctionnement des photopiles

La conversion photovoltaïque basée sur trois phénomènes physiques :

##### a) - L'absorption de la lumière dans le matériau.

Pour cela, le matériau doit avoir des propriétés électriques et optiques spécifiques tel que les semi-conducteurs (le silicium qui est le plus utilisé) [KAM08].

##### b) - transfert d'énergie des photons aux charges électriques.

Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques s'appelle la photoconductivité. Le silicium contient quatre électrons relativement mobiles dotés d'une faible énergie de liaison. Ces électrons tournent autour du noyau sous l'effet de la lumière, les électrons de la couche périphérique des atomes sont « arrachés » sous l'action du choc d'un photon. Les électrons « décrochés » des atomes créent ainsi un courant continu directement utilisable aux bornes de la cellule photovoltaïque, sous une tension électrique continue. Comme représenté sur la figure I.4.

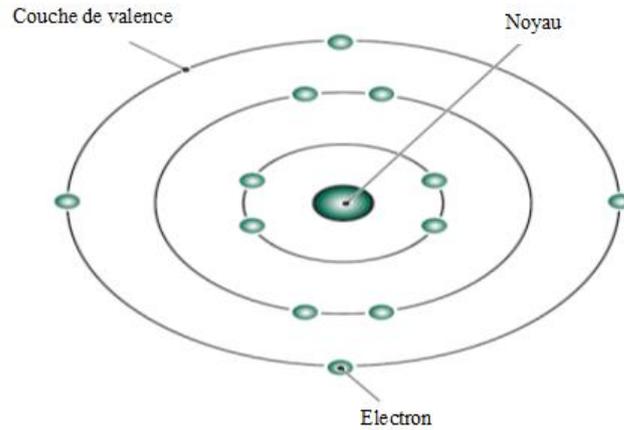


Figure I. 4 Représentation d'un atome de silicium et ses quatre électrons de valence sur la couche périphérique.

### c)- collecte des charges

La cellule est composée de deux différentes couches. La couche supérieure est dopée N et la couche inférieure est dopée P créant ainsi une jonction PN. Cette jonction PN crée une barrière de potentiel [STE10].

- \* Un dopage de type « N » (négatif), est réalisé par adjonction de phosphore (P), dont les atomes possèdent un électron périphérique de plus que ceux du silicium ;
- \* Un dopage de type « P » (positif), est réalisé par adjonction de bore (B), dont les atomes possèdent un électron périphérique de moins que ceux du silicium [KAM08].

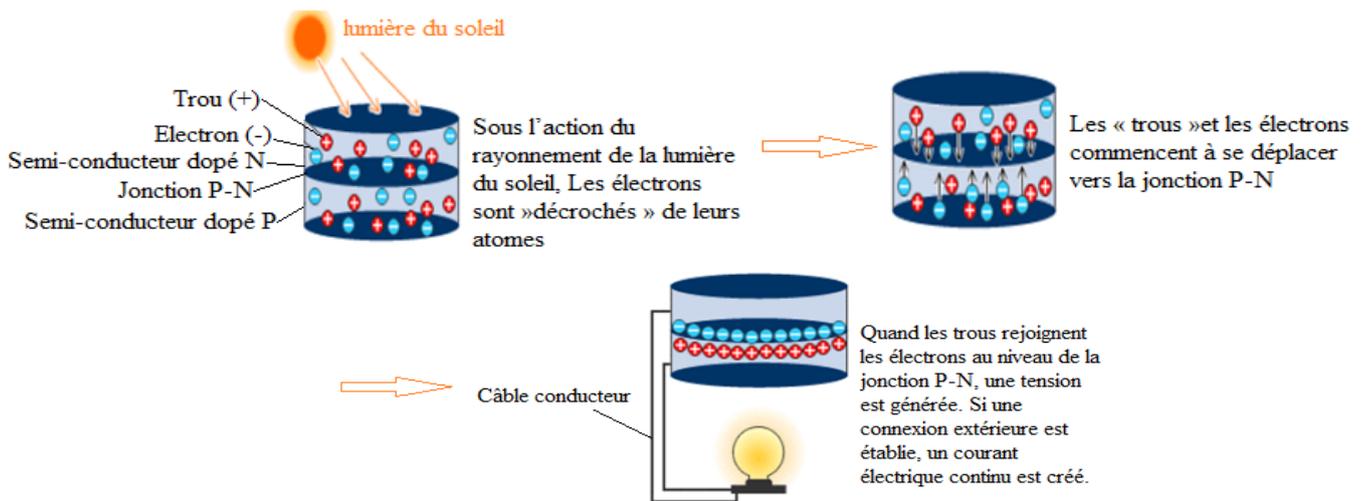


Figure I. 5 Schéma de principe du champ électrique interne.

### **I.3.1.2 différents types de cellules solaires et leur rendement**

Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle

#### **I.3.1.2.a Cellules monocristallines**

Elles sont difficiles à obtenir, elles nécessitent un taux de pureté très élevé et donc plusieurs étapes de purification. Ces étapes sont délicates et donc coûteuses, cependant leur rendement est meilleur (12-16%) [STE10].

#### **I.3.1.2.b Cellules poly cristallines**

Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible : (11% -13%) [STE10].

#### **I.3.1.2.c Cellules amorphes ou à couche mince**

Elles ont un faible rendement (8% - 10%), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans les produits de petite consommation tel que les calculatrices solaires ou encore les montres.

### **I.3.2 Module photovoltaïque [ANG06], [KAM08]**

Un module photovoltaïque est un convertisseur d'énergie lumineuse en électricité. Formalisé par un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique suffisante.

Une photopile seule ne génère qu'une tension faible : de 0,5 à 1,5 V selon les technologies. Il est donc nécessaire d'associer plusieurs photopiles en série pour pouvoir produire une tension exploitable.

Ce module sera aussi un assemblage fragile et sensible au changement du climat et de l'environnement (variations de température, humidité, poussière, etc.). Il conviendra donc d'assurer les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques

Les cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyl- acétate) comme sur la figure (6), leur surface avant est protégée d'un verre trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et la surface arrière d'un polyéthylène.

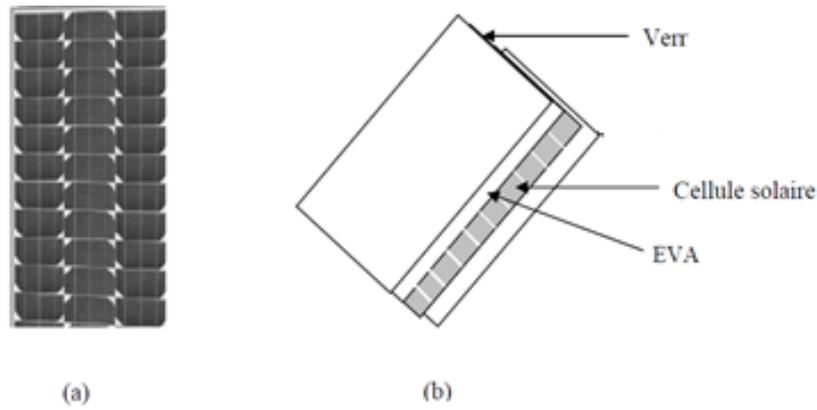


Figure I. 6 Module photovoltaïque.

- Protection mécanique et support ;
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

### I.3.2.1 Caractéristiques d'un module photovoltaïque [STE10]

Le module photovoltaïque est caractérisé par plusieurs facteurs :

- \* La puissance de crête,  $P_c$  : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards ( $25^\circ\text{C}$  et un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$ ).
- \* La caractéristique I/V : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- \* Tension à vide,  $V_{CO}$  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- \* Courant de court-circuit,  $I_{cc}$  : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- \* Point de fonctionnement optimum,  $(U_m, I_m)$  : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m = U_m * I_m$
- \* Rendement : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- \* Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :  $V_{co} * I_{cc}$ .

Ces caractéristiques sont illustrées par la figure suivante :

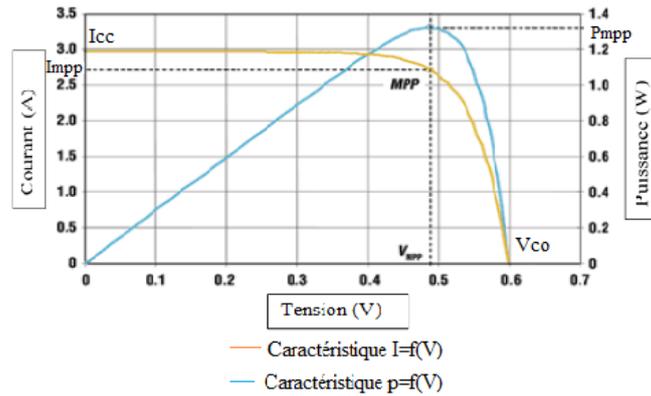


Figure I. 7 Caractéristique  $I(V)$  et  $P(V)$  d'un panneau photovoltaïque.

### I.3.3 Panneau solaire

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.



Figure I. 8 Panneaux photovoltaïques.

Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque.

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

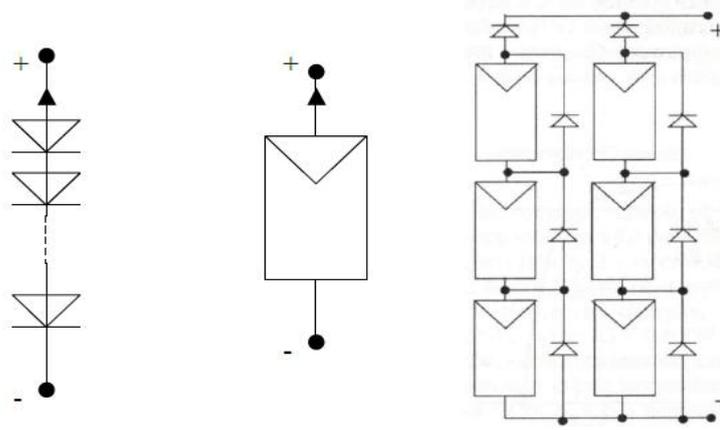


Figure I. 9 Cellules, module et panneau photovoltaïques.

Chaque panneau a besoin d'une boîte de dérivation. Cette boîte fixée sur une structure du montage dans le rôle est d'effectuer des connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie [PEL08].

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend :

- des besoins en électricité ;
- la taille du panneau ;
- L'ensoleillement du lieu d'utilisation ;
- La saison d'utilisation.

La puissance délivrée par un panneau est importante dans les heures d'ensoleillement maximal, ce qui nécessite un élément de stockage.

## I.4 Système de stockage

La demande énergétique est fonction de la charge à alimenter, les Appareils utilisés fonctionnent soit en continu, soit à la demande. L'apport énergétique solaire est périodique (alternance jour/nuit, Été/hiver) et aléatoire (conditions météorologiques).

Ce décalage entre la demande et l'apport énergétique nécessite un Stockage d'électricité pour assurer une fourniture d'énergie quasi permanente quelles que soient les séquences d'ensoleillement. Cette fourniture d'énergie sera assurée, par des batteries.

La batterie est un ensemble de cellules électrochimiques capables de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique (pendant la charge), puis de la restituer par la suite (pendant la décharge) grâce à la réversibilité des réactions mises. Ces réactions consistent en des oxydations et des réductions (oxydoréductions en abrégé, soit perte ou gain d'un ou plusieurs électrons) au niveau des électrodes [KAM08].

### I.4.1 Principe général de fonctionnement d'une batterie

Deux électrodes, l'une positive et l'autre négative, sont séparées par un électrolyte. Aux deux interfaces électrode-électrolyte interviennent des réactions électrochimiques.

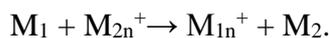
A l'anode (électrode négative en décharge) s'opère une réaction d'oxydation selon la formule suivante :

$M_1 \rightarrow M_{1n}^+ + n e^-$ , de potentiel redox  $E_1$  ;  $M_1$  étant l'espèce active de l'anode.

Les électrons libérés transitent dans le circuit extérieur pour atteindre finalement la cathode (électrode positive en décharge) où s'opère une réaction de réduction selon :

$M_{2n}^+ + n e^- \rightarrow M_2$ , de potentiel redox  $E_2$  ;  $M_2$  étant l'espèce active de la cathode.

L'électrolyte assure le transport des espèces ioniques mises en jeu dans la réaction globale d'oxydoréduction, qui s'écrit :



La force électromotrice  $E$  de ce convertisseur se calcule selon :  $E = E_2 - E_1$

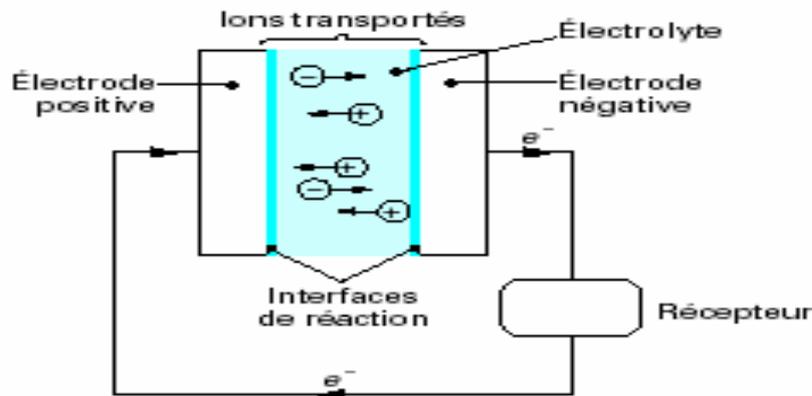


Figure I. 10 Principe de production d'électricité dans un convertisseur électrochimique.

### I.4.2 Les Caractéristiques principales d'une batterie sont [BEL08]

Capacité en Ampère heure : Les Ampères heure d'une batterie sont le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant.

Il existe des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie tels que :

- ❖ Rapports de chargement et déchargement : Si la batterie est chargée ou est déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer.

- ❖ Température : la température est un facteur qui influence la capacité de la batterie. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles réduisent leur capacité. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie.
- ❖ La durée de vie : Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois quel que soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles)
- ❖ Profondeur de décharge : La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge.
- ❖ La tension d'utilisation : C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.
- ❖ Le rendement : C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.
- ❖ Le taux d'autodécharge : L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

#### **I.4.3 Différents Dispositifs de stockage [CAM13]**

- \* Les inductances supraconductrices [stockage magnétique]
- \* Les volants d'inertie [stockage mécanique]
- \* Les batteries d'accumulateurs [stockage électrochimique]
- \* L'hydrogène [stockage pneumatique/conversion électrochimique]
- \* L'air comprimé en bouteille [stockage pneumatique]
- \* Les super-capacités ou super-condensateurs [stockage électrostatique]

Le dispositif le plus utilisé pour les systèmes photovoltaïques est la batterie d'accumulateurs électrochimiques [MAH07].

#### **I.4.4 accumulateurs**

Les accumulateurs et les piles sont des systèmes électrochimiques servant à stocker de l'énergie sous forme d'énergie électrique exprimée en wattheure (Wh).

Des réactions électrochimiques se produisent au niveau de l'accumulateur, elles sont activées au sein d'une cellule élémentaire entre deux électrodes baignant dans un électrolyte. Ces réactions génèrent une énergie dite chimique.

Un accumulateur, quelle que soit la technologie utilisée, est pour l'essentiel défini par trois grandeurs :

Sa densité d'énergie massique (ou volumique) qui correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse (ou de volume) dans l'accumulateur.

Sa densité de puissance massique, en watt par kilogramme (W/kg), qui représente la puissance (énergie électrique fournie par unité de temps) que peut délivrer l'unité de masse d'accumulateur.

Sa cyclabilité, exprimée en nombre de cycles, qui caractérise la durée de vie de l'accumulateur, c'est-à-dire le nombre de fois où il peut restituer un niveau d'énergie supérieur à 80 % de son énergie nominale.

### I.4.5 Types d'accumulateurs

Il existe plusieurs types de stockage actuellement. Mais le seul stockage d'énergie électrique possible dans le système PV est le stockage électrochimique

Les deux principaux types d'accumulateurs utilisés sont :

#### I.4.5.1 Accumulateurs au plomb acide [BEL08]

Inventé en 1859 par Gaston Planté, l'accumulateur au plomb reste actuellement l'accumulateur le plus répandu, en raison de son coût qui est relativement faible et d'une large disponibilité.

##### I.4.5.1.a Composition [BEL08]

Ces batteries sont composées de plusieurs plaques de plomb dans une solution d'acide sulfurique. La plaque consiste en une grille d'alliage de Plomb avec une pâte d'oxyde de plomb marquée sur la grille. La solution acide sulfurique et l'eau est appelée électrolyte.

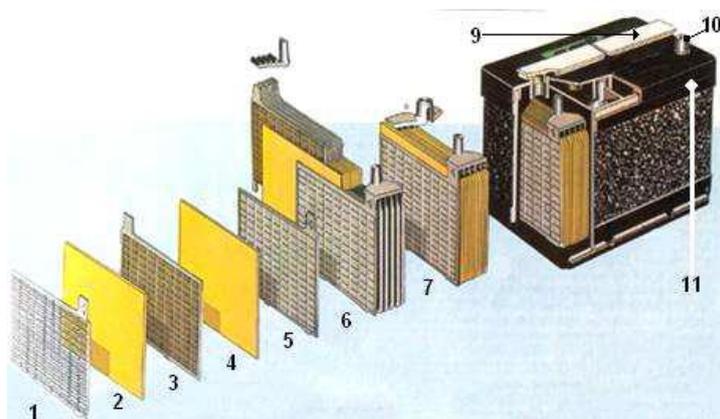


Figure I. 11 Construction d'une batterie monobloc [14].

1 : Grille.	7 : Élément complet
2 : Séparateur.	8 : Pont
3 : Plaque positive.	9 : Rampe de bouchons.
4 : Plaque négative.	10 : Borne.
5 : Barrette.	11 : Bac.
6 : Faisceau négatif.	

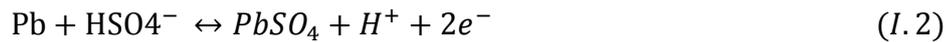
#### I.4.5.1.b Principe de fonctionnement [BEL08] [JUL06]

Il est basé sur la réaction d'oxydoréduction suivante :

Electrode positive



Electrode negative:



Reaction:



Lors de la décharge, le plomb de l'électrode négative s'oxyde en  $\text{Pb}^{2+}$  et perd deux électrons. A la cathode, l'oxyde de plomb  $\text{PbO}_2$  gagne deux électrons lors de sa réduction en  $\text{Pb}^{2+}$ . Les protons produits à l'anode et les ions hydroxydes produits à la cathode se recombinent en eau  $\text{H}_2\text{O}$ .

Lors de la charge, il se produit des réactions inverses à celle de la décharge.

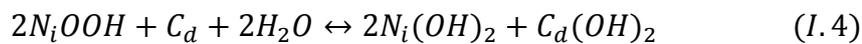
#### I.4.5.2 Accumulateurs au Nickel- cadmium

Le Nickel- cadmium découvert en 1899 par Jungner. Les batteries de nickel- Cadmium ont une structure physique semblable à celles du plomb- Acide. Toute fois elles sont plus chères, puisqu'au lieu du Plomb elles utilisent de l'hydroxyde de Nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de Cadmium pour les plaques négatives. L'électrolyte est de l'hydroxyde de Potassium [BEL08].

La batterie au nickel-cadmium est utilisée dans les applications où la fiabilité est vitale, elle a été conçue pour répondre à un besoin prolongé de stockage d'énergie dans des conditions de fonctionnement extrême et de maintenance minimale. La tension de ce type d'accumulateur varie entre 1,15 et 1,17 Volts par élément suivant l'état de charge. Le rendement énergétique est de l'ordre de 70% [SAI04] [BEL08].

### I.4.5.2.a Principe de fonctionnement

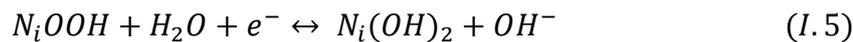
Les accumulateurs au nickel-cadmium (Ni-Cd) sont conçus pour les cas où l'on a besoin d'un dispositif de stockage d'énergie robuste et de longue durée exigeant peu d'entretien. Le matériau actif de l'électrode positive (cathode) est une plaque d'oxi-hydroxyde de nickel (NiOOH) qui, pendant la décharge accepte les électrons provenant du circuit externe et passe ainsi à une valence moindre. L'électrode négative (anode) est constituée d'une plaque de cadmium, et l'électrolyte est une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH) à concentration variant entre 20 % et 35%. La tension de l'accumulateur est nominale de l'ordre de 1,2 volt. La réaction réversible est :



En recharge

En décharge

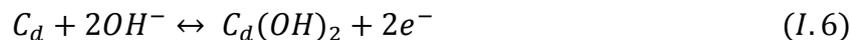
La cathode :



En recharge

En décharge

Anode :



En recharge

En décharge

Les systèmes de régulation de charge sont des éléments d'un système photovoltaïque qui ont pour but de contrôler la charge et la décharge d'une batterie et assure de ce fait le bon fonctionnement de la batterie ainsi que la gestion du système PV afin d'en maximiser la durée de vie. Son rôle principal est de réduire le courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée.

Lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complète, de petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives. A partir de ce moment, il vaut mieux réduire le courant de charge non seulement pour éviter des dégâts mais aussi afin de mieux atteindre l'état de charge complète. Un courant trop élevé peut provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui pourrait créer un court-circuit.

Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :

- la protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes ;
- L'optimisation du transfert d'énergie du champ PV pour l'utilisation.

## I.6 Système de conversion

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (convertisseur continu continue), soit entre la batterie et la charge (convertisseur continu alternatif) [BEL08].

### I.6.1 Convertisseur continu -continu

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal [BEL08]. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking).

#### I.6.1.1 Convertisseurs DC-DC (hacheurs) [BEN12]

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Le hacheur se compose de Condensateurs, d'inductance et de commutateurs.

Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) travaillant en mode bloqués-saturés sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance dans le cas idéal, c'est pour cette raison que les hacheurs ont de bons rendements.

Le commutateur du convertisseur est commandé par un signal PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (Modulation Largeur d'Impulsion), avec une fréquence de commutation  $F_s$  fixe et un rapport cyclique  $\alpha$  variable. Pour la commande PWM du commutateur on ferme d'abord le commutateur pendant un temps de fermeture égal à  $\alpha.T_s$ , ensuite on l'ouvre durant un temps d'ouverture égal à  $(1-\alpha).T_s$ , où :

- $T_s$  est la période de commutation qui est égale à  $1/F_s$  ;
- $\alpha$  est le rapport cyclique du commutateur  $\alpha \in ] 0, 1[$ .

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi les quels, on présente le principe des deux types des convertisseurs (dévolteur, et survolteur) utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires.

### I.6.1.1.a Hacheur dévolteur (Buck)

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur « buck » ou hacheur « série ». Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion  $M=V_0/V_i$  change avec le rapport cyclique du commutateur [BEN12].

Le hacheur dévolteur sous sa forme de base est composé d'inductance (L), de commutateur (transistor) (S), de diode (D) et de condensateur (C). Ce dernier se charge par le commutateur (S) et maintient la tension à ses bornes jusqu'à l'ouverture de (S) qui fait décharger son énergie à travers la diode sur la charge (R) pour un cycle de période de fonctionnement [ABB11].

Le commutateur peut être un transistor MOSFET ou un IGBT qui peut se commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement. Introduire l'IGBT

La tension de la source ( $V_i$ ) doit être plus grande que la tension ( $V_s$ ) aux bornes de la charge.

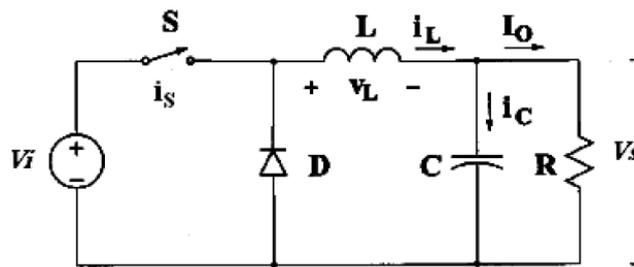


Figure I. 12 Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur.

### I.6.1.1.b Hacheur survolteur (Boost) [ABB11] [BEN12]

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension ou hacheur parallèle son schéma de principe de base est celui de la figure I.13. Dans un premier temps ( $\alpha T$ ), le transistor (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, ensuite au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Après le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'oppose à la diminution de courant ( $i_L$ ), ce qui génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D).

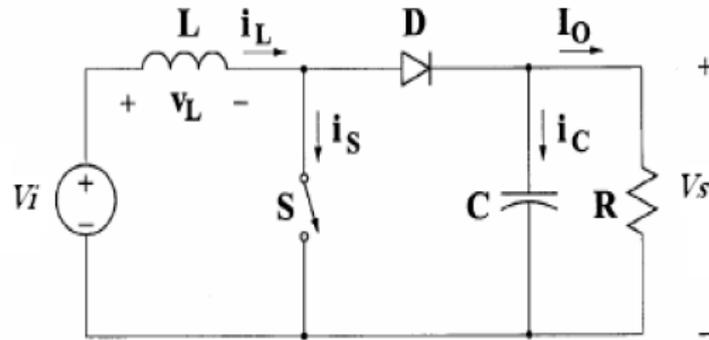


Figure I. 13 : circuit électrique de base du hacheur survolteur.

La tension et le courant de la charge du convertisseur Boost dans le cas de la conduction continue sont donnés par :

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} \times V_i \quad (I.7)$$

Et

$$I_0 = (1 - \alpha) \times I_i \quad (I.8)$$

Lorsque l'interrupteur du transistor (S) est sur la position (on), le courant de l'inductance du hacheur augmente linéairement et au même instant la diode (D) est bloquée (off) [ABB11].

Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [BEN12].

Le hacheur Boost possède de nombreux avantages décisifs pour cette application :

- Le Boost est élévateur de tension, critère primordial pour notre application ;
- Il présente une entrée inductive apte à réduire le filtrage capacitif en sortie des cellules ;
- Il possède un bon rendement ;
- Il est de structure simple et peu coûteuse ;
- Il est fiable ;
- Il peut réaliser la fonction de MPPT [STE10].

#### 1.6.1.1.c Hacheur dévolteur-survolteur (buck-boost)

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée ;il permet de faire remonter l'énergie depuis la sortie à

cause de réversibilité des interrupteurs (cellule de commutation réversible)) son schéma de base est illustré par la figure I.14

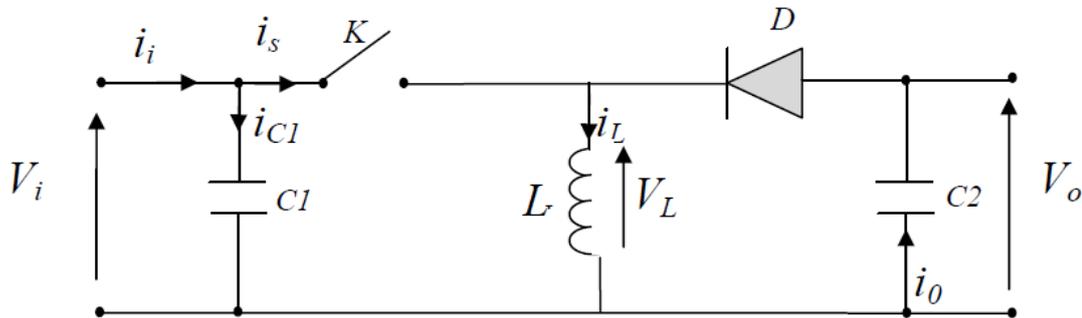


Figure I. 14 Convertisseur buck-boost.

## I.7 Commande MPPT

La cellule photovoltaïque a un point de puissance maximale (PPM) qui varie en fonction de l'ensoleillement et de la température ainsi que de la charge. Pour que le PV fournisse sa puissance maximale il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque [BEN12]. Comme le montre la figure I.15

Cette adaptation s'effectue par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur Boost) contrôlé par un mécanisme de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (MPPT).

La commande MPPT place le système au point de fonctionnement maximums ( $V_m$ ,  $I_m$ ). Pour cela, plusieurs systèmes ont été publiés dans la littérature [ANG06].

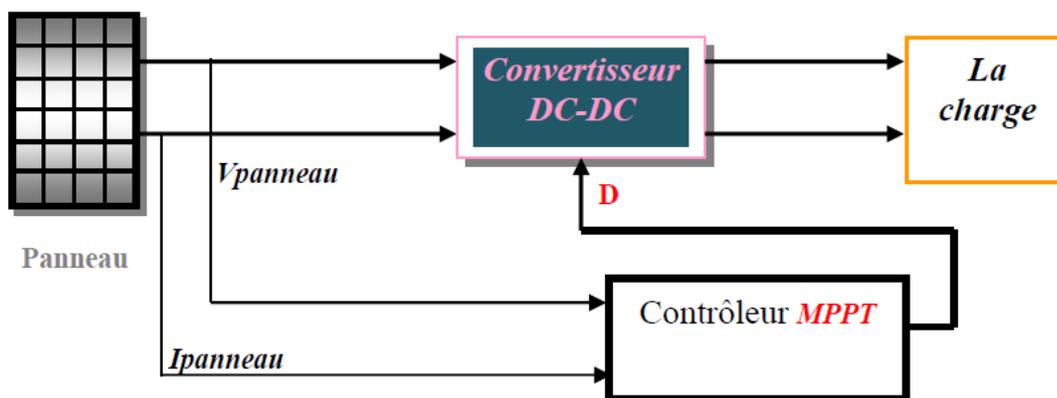


Figure I. 15 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque contrôlée par une commande MPPT sur charge DC.

### I.7.1 Principe de la recherche du point de puissance maximale (PPM)

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) de telle sorte que la puissance fournie par le GPV soit la puissance maximale  $P_{max}$  disponible à ses bornes.

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le PPM, mais en général il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique jusqu'à se placer sur le PPM en fonction des évolutions des paramètres d'entrée du Convertisseur ( $I_{pv}$  et  $V_{pv}$ ) [ANG06]

Actuellement, des commandes MPPT, analogiques et numériques, sont proposées :

1/Dans le cas des commandes MPPT analogiques, se pose le problème de la divergence de l'encombrement des composants électronique utilisés ;

2/Dans le cas des commandes MPPT numériques, plusieurs méthodes et algorithmes ont été utilisés.

## I.7.2 Méthodes de commande MPPT

### I.7.2.1 Méthode à contre réaction de tension

Ce genre de mécanisme repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par comparaison de cette tension avec une référence [OUG09]. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la MLI de la commande afin d'annuler cette erreur comme le montre la figure I.16

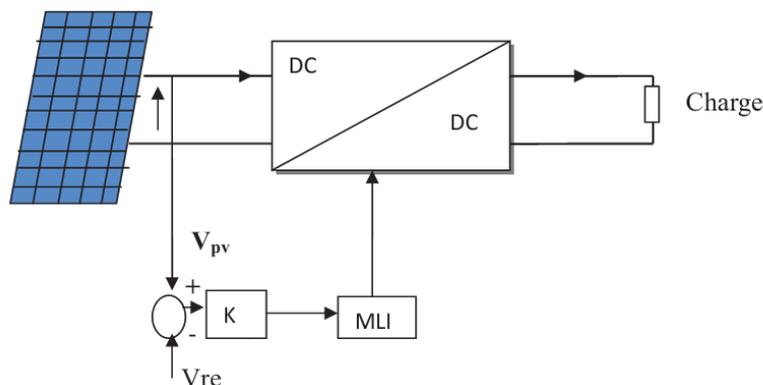


Figure I. 16 Méthode contre réaction de la tension.

Les inconvénients de cette configuration sont le système ne peut pas s'adapter aux conditions variables d'environnement, telles que l'irradiance et la température.

Les avantages de cette technique c'est une technique simple, économique et emploie seulement une commande de boucle de feedback.

### I.7.2.2 Méthodes à contre réaction de courant

Cette méthode utilise une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel et actuel du système figure I.17.

L'avantage de cette méthode est qu'elle est simple, contrairement aux méthodes mentionnées précédemment.

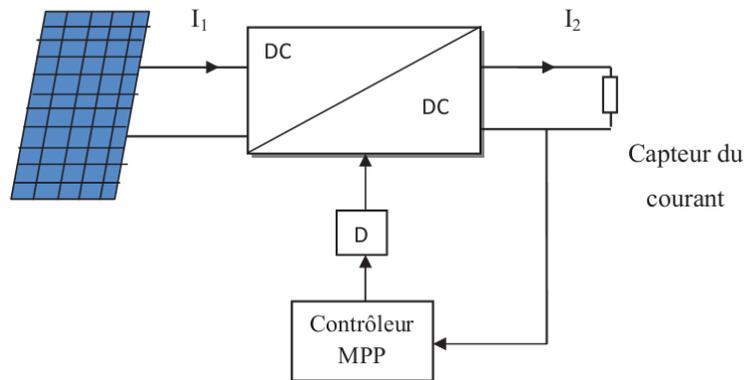


Figure I. 17 Méthode à contre réaction de courants.

### I.7.2.3 Méthodes à contre réaction de puissance

Cette méthode est basée sur la maximisation permanente de la puissance générée par les PV «  $P=I*V$  ».

## I.7.3 Algorithmes de MPPT

### I.7.3.1 Méthode d'incrémentation de la conductance (INC)

L'algorithme par incrémentation de conductance se résulte en dérivation la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro.

Cette dérivée est nulle au point de puissance maximale, positive à gauche du point MPP et négative à droite [BEN12].

Elle est basée sur les relations suivantes [20]

$$\frac{dpV}{dVp} = \frac{d(Vp \times Ipv)}{dVp} = Ipv + vp \frac{dIpv}{dVp} = 0 \quad (I.9)$$

$$\frac{dIpv}{dVp} = -\frac{Ipv}{Vp} \quad (I.10)$$

Le terme  $\frac{Ipv}{vp}$  représente l'opposé de la conductibilité instantanée du panneau photovoltaïque.

Et  $\frac{dIpv}{dVp}$  représente le terme d'incrément de conductance. Par conséquent pour le point de puissance maximum (PPM), ces deux termes peuvent être égaux mais de signes opposés. Si le point de fonctionnement ne correspond pas avec le point (PPM), l'inégalité de l'équation I.10

indique la position de la tension de fonctionnement si elle est plus grande ou inférieure à la tension du point de puissance maximum (PPM).

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}, \left(\frac{dP}{dV} = 0\right) \quad (I.11)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}, \left(\frac{dP}{dV} > 0\right) \quad (I.12)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}, \left(\frac{dP}{dV} < 0\right) \quad (I.13)$$

L'organigramme de cet algorithme est donné par la figure suivant :

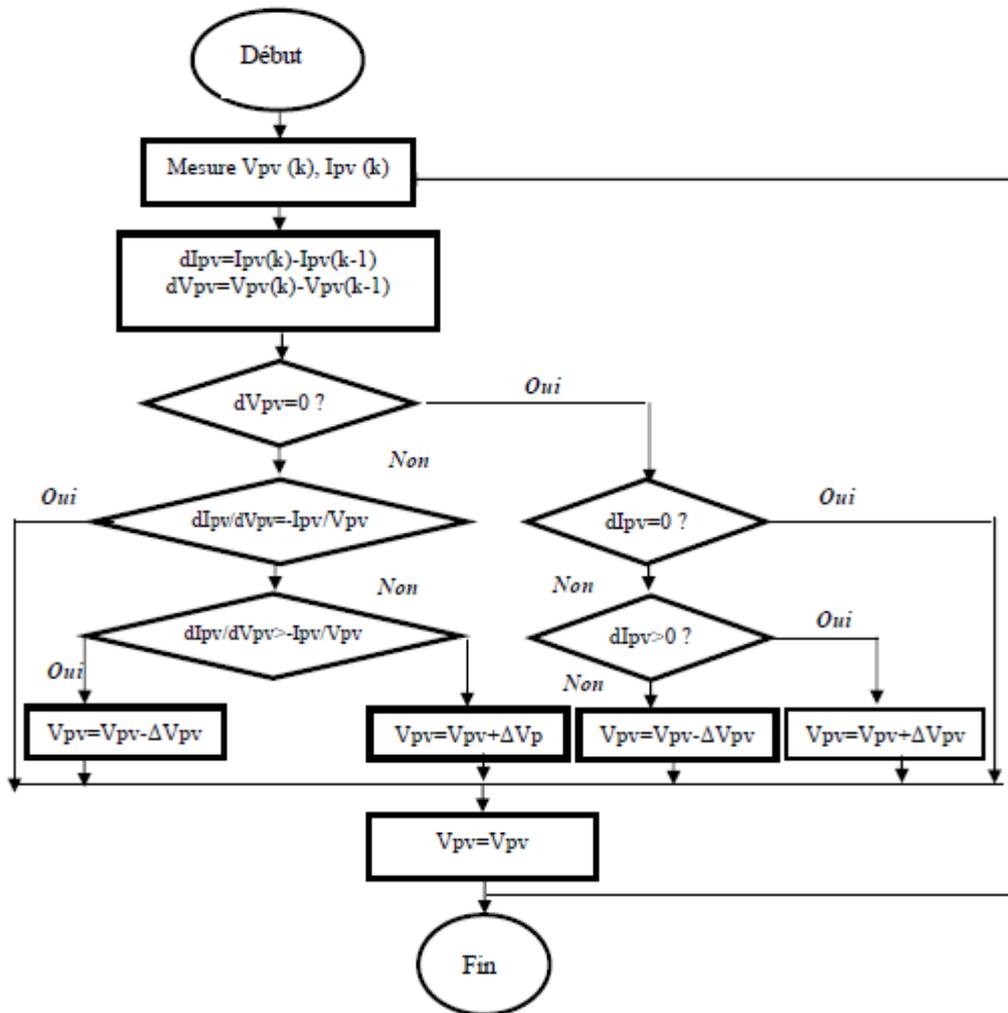


Figure I. 18 L'organigramme de la méthode d'incrément de conductance.

Il peut être plus difficile de mettre en application cette méthode que les méthodes précédentes parce qu'elle implique des divisions dans lesquelles le dénominateur peut être égal à zéro. Alors il faut ajouter un pas (assez petit  $\cong 0.01$ ) au dénominateur pour éviter cet inconvénient.

### I.7.3.2 Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

La méthode de perturbation et d'observation est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  respectivement. Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température.

Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension  $V_{pv}$  et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du générateur PV.

À chaque cycle,  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  sont mesurés afin de calculer  $P_{pv}(k)$ . Cette valeur de  $P_{pv}(k)$  est comparée à la valeur  $P_{pv}(k-1)$  calculée au cycle précédent. Si la puissance de sortie a augmentée,  $V_{pv}$  est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminué,  $V_{pv}$  est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent.  $V_{pv}$  est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT.

Quand le point de puissance maximale est atteint,  $V_{pv}$  oscille autour de la valeur optimale  $V_{pv-mp}$  [ZAR10].

Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas d'incrémention de la perturbation. Si ce pas d'incrémention est large, l'algorithme du MPPT qui est représenté par la figure I.19 répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement. Le rendement de cette technique est d'environ 85%.

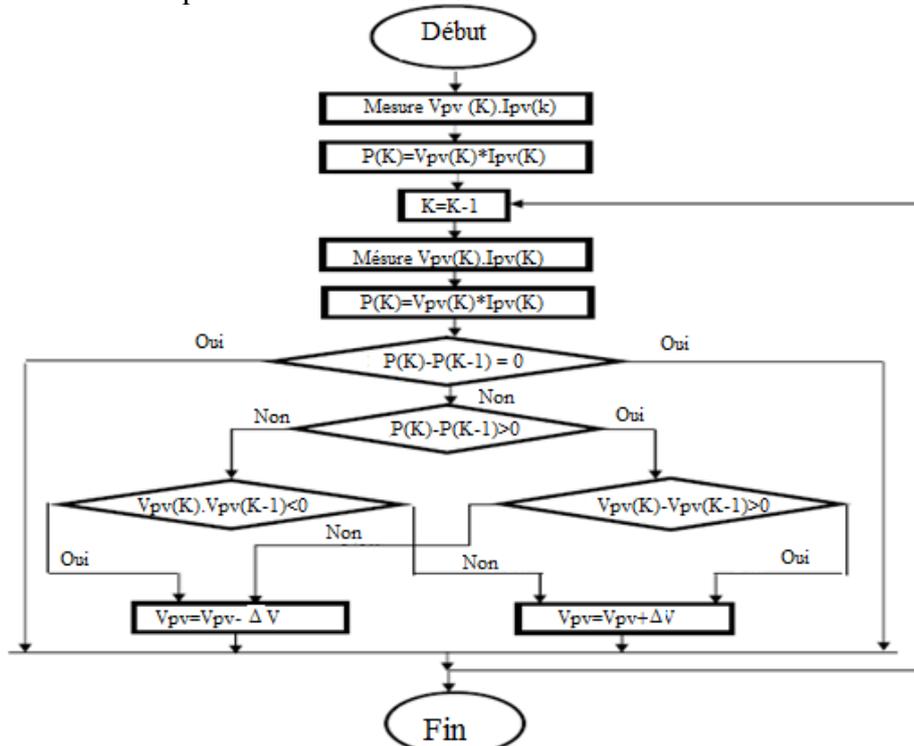


Figure I. 19 Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O).

L'inconvénient de la technique de P&O réside dans le cas de changement rapide des conditions atmosphériques.

Ainsi, l'algorithme de P&O continuera à déplacer le point de fonctionnement du convertisseur plus loin du point réel de puissance maximale, et il y aura plus de puissance perdue.

## **I.8 charge**

La charge est l'équipement électrique alimenté par le système. Elle peut être continue comme des équipements de télécommunications, le pompage d'eau, ou bien alternative dans les cas d'usage domestique (maison solaire), ce cas nécessite un onduleur.

## **Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système de captage photovoltaïque, ainsi les principes de fonctionnement de chaque élément. Le prochain chapitre sera consacré à la modélisation mathématique des différents sous-systèmes qui composent notre système de conversion photovoltaïque.

# CHAPITRE II



## II.1 Introduction

Pour déterminer une stratégie de gestion appropriée d'un système photovoltaïque il faut, dans un premier temps, connaître le comportement du système en fonction des données d'entrée. Cette connaissance passe par la modélisation des composants du ce système.

Dans ce chapitre, on développe les différents modèles mathématiques implémentés dans notre logiciel de calcul scientifique Matlab – Simulink, Entre autre le modèle du générateur photovoltaïque (GPV), le modèle de conversion (Hacheur Boost) ; l'algorithme MPPT et on terminera par le modèle complet de notre système en discutant ses performances.

## II.2 Système photovoltaïque proposé

La structure de la topologie d'interconnexion proposée est montrée dans la figure II.1 Cette topologie est constituée d'un :

- **Générateur PV' KC200GT'** : est en silicium poly cristalline, constitué de 54 cellules photovoltaïques élémentaires et de 10 modules insérées série -parallèles. Il peut délivrer dans les conditions standards de test (CST) une puissance de 200.143 W, un courant de 7.61A, sous une tension optimale de 26.3V.
- **Le quadripôle d'adaptation** est un convertisseur d'énergie de type – hacheur survolteur pour des applications nécessitant des tensions supérieures à 72 V. permettant d'alimenter le bus continu et de poursuivre le point de puissance maximum.
- **La commande MPPT** (Maximum Power Point Tracking) : est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV qui dépend des conditions météorologiques et de la variation de la charge stables [BEN12]. Son principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D à la valeur appropriée de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau PV.
- **Une Charge DC** : modélisée par une charge résistive.

Le schéma fonctionnel du notre système se présente alors comme suit :

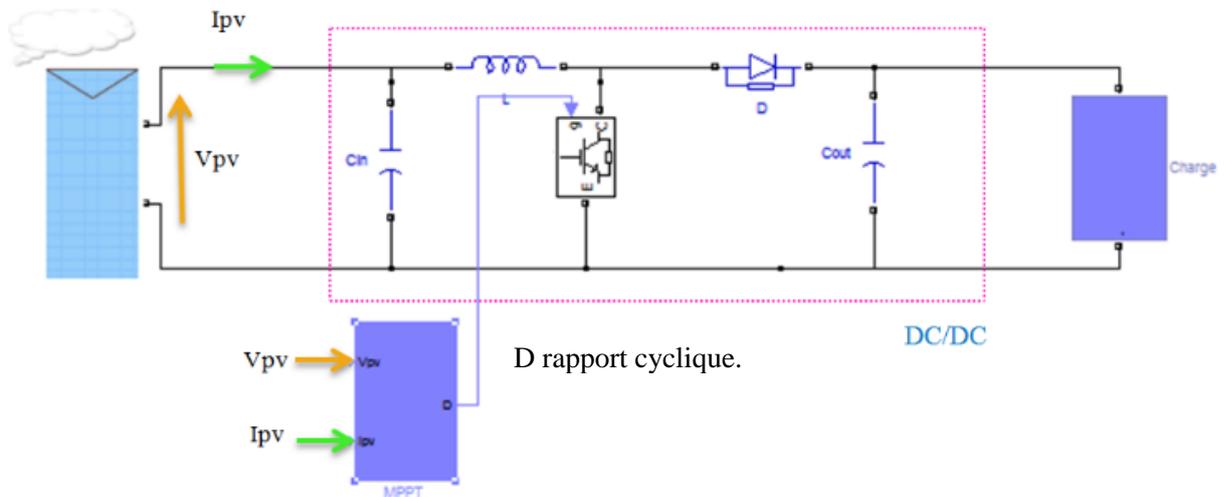


Figure II. 1 schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) et une charge (DC).

## II.3 Modélisation et simulation du Générateur Photovoltaïque

### II.3.1 Modélisation du Générateur Photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque [DJE11]. composée d'un ou plusieurs modules. Ces modules sont formés d'un assemblage série /parallèle de cellules photovoltaïques, qui réalise la conversion d'énergie solaire en électricité afin de satisfaire les besoins en charge [MAH07].

Nous nous intéressons uniquement aux propriétés électriques des générateurs photovoltaïques, et particulièrement à leur comportement en puissance qu'on le considère identique à celui d'une cellule [YAN09]. La figure II.2 représente le modèle électrique de littérature de Kaiser et Reiser standard à une seule diode (empirique) qui modélise la jonction PN défini par son courant de saturation  $I_0$  et son facteur d'idéalité ( $A$ ), une résistance série  $R_s$  représentant les diverses résistances de contacts et de connexions et une résistance parallèle  $R_p$  représente le courant de fuite.

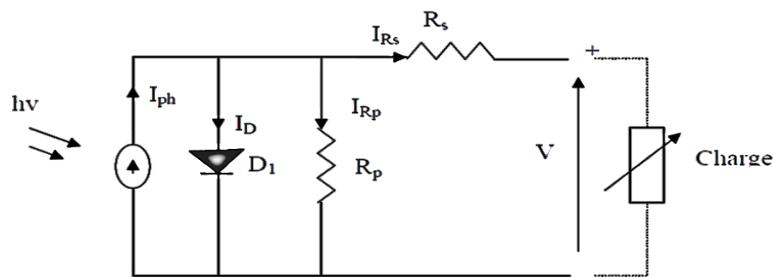


Figure II. 2 Schéma équivalent du modèle à une seule diode d'un GPV.

Ce model permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante) [YAM08].

Cet équilibre s'écrit [KEM02] [BEL08] :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{Rp} \quad (\text{II.1})$$

. Le courant  $I_{Rp}$  correspond au courant des connexions parallèles est donné par :

$$I_{Rp} = \frac{(V+I_{Rs})}{R_p} \quad (\text{II.2})$$

. Le courant direct  $I_d$  d'obscurité de la jonction est donné par :

$$I_d = I_0 [e^{\frac{(V+I_{Rs})}{AV_t}} - 1] \quad (\text{II.3})$$

Avec  $I_0$  courant de saturation de diode qui donnée par

$$I_0 = K_1 T^3 e^{E_g/KT} \quad (\text{II.4})$$

Donc l'expression de la caractéristique I-V est :

$$I = I_{ph} - I_0 [e^{\frac{q(V+I_{Rs})}{mKT}} - 1] - \frac{(V+I_{Rs})}{R_p} \quad (\text{II.5})$$

$$\text{Ou : } V_t = \frac{KT}{q}$$

A : le facteur d'idéalité de la jonction ( $1 < A < 3$ ).

K : constante de Boltzmann ( $1,38.10^{-23}$  J/K).

$k_1$  : Constante ( $1.2 \text{ A/cm}^2 \text{K}^3$ )

q : Charge d'électron ( $1,6.10^{-19}$  C)

$I_{ph}$  : Courant photo généré crée dans la structure par une partie de rayonnement

$I_0$  : Courant de diode, représente le courant de fuite interne à une cellule causée par la jonction PN

T: Température absolue.

$E_g$  : Énergie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV)

L'équation de  $I_{ph}$ ,  $I_0$ , est donnée dans par [GRV09] :

$$I_{ph} = (I_{ph,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (\text{II.6})$$

$$I_0 = I_{0,n} \left(\frac{T_n}{T}\right)^3 \exp\left[\left(\frac{qE_g}{AK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right)\right] \quad (\text{II.7})$$

Si on pose  $N_{ss}$ , le nombre de modules connectés en série et  $N_{pp}$ , le nombre de modules connectés en parallèles ; le model du module PV est devient :

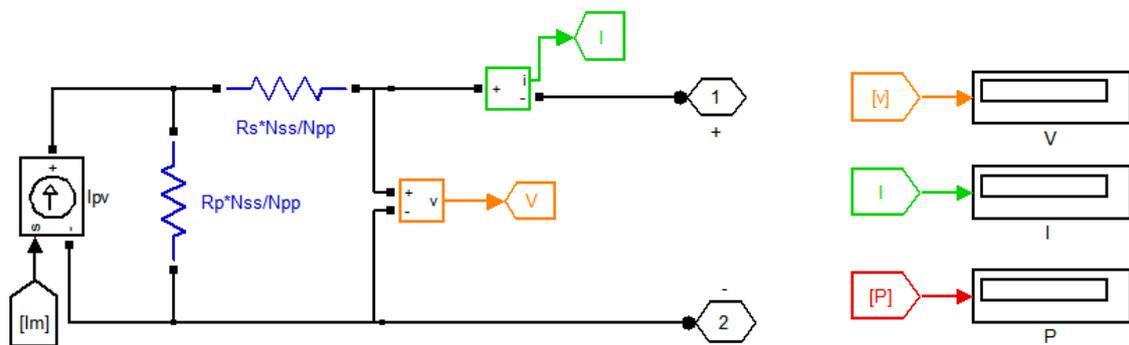


Figure II. 3 Schéma synoptique d'un module photovoltaïque.

La fiche technique du panneau KC200GT que nous avons choisi donne les spécifications suivantes [GRV09].

Tableau II. 1 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau KC200GT Dans les conditions standards «CST»

<b>Imp</b>	7.61 A
<b>Vmp</b>	26.3 V
<b>Pmax</b>	200.143 W
<b>Isc</b>	8.21 A
<b>Voc</b>	32.9 V
<b>I<sub>0</sub></b>	$9.845 \cdot 10^{-8}$ A
<b>I<sub>pv</sub></b>	8.214 A
<b>A</b>	1.3
<b>R<sub>p</sub></b>	415.405 $\Omega$
<b>R<sub>s</sub></b>	0.221 $\Omega$

### II.3.2 Simulation du GPV

Le générateur photovoltaïque (GPV) peut présenter par un schéma bloc figure II.4 comportant quatre paramètres. Deux variables d'entrées qui sont [BLS09] : l'Ensoleillement

$G_s$ (W/m<sup>2</sup>) ; Température  $T_j$  (°C) et deux variables de sortie : Courant fourni  $I_{pv}$ (A) ; Tension aux bornes du GPV.

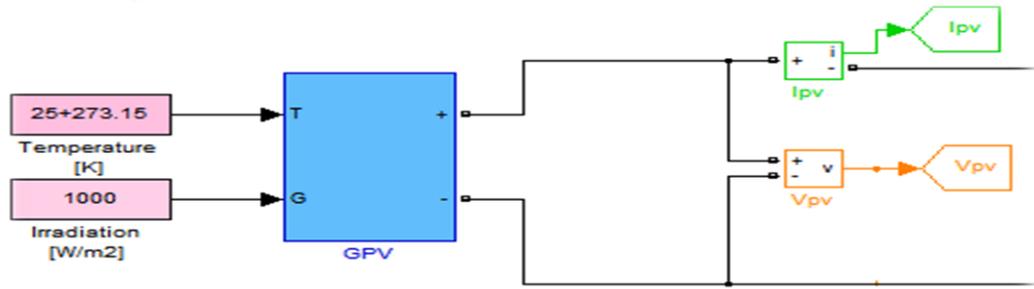


Figure II. 4 Schéma bloc du générateur photovoltaïque.

L'expression du courant débité par le générateur PV est donnée par l'équation suivante :

$$I_m = (I_{pv} \times N_p - I_0 \times N_{pp} \times \exp\left[\frac{qTN_{SS}}{AKN_S} \times \left(V + \frac{I \times R_S}{N_{PP}} \times N_{SS}\right) - 1\right]) \quad (II.8)$$

Avec :

$N_{SS}$  : Nombre de module connecté en série

$N_{pp}$  : Nombre de module connecté en parallèle

$N_s$  : Nombre de cellule connecté en série (dans notre cas =54)

$N_p$  : Nombre de cellule connecté en parallèle (dans notre cas =1)

Le calcul de la géométrie optimale du champ photovoltaïque consiste à modifier les configurations des associations série parallèle des modules PV de façon à faire fonctionner la charge dans la zone de puissance maximale. Pour atteindre les valeurs nominales requises pour un fonctionnement optimal  $P=2000W$ , il faut brancher les modules selon la relative à un groupement formé de la mise en parallèles de 5 modules, et de de la mise en séries de 2 modules, On obtient dans ce cas :

$$V_G = N_{SS} * V_{PV} \quad (II.9)$$

$$I_G = N_{PP} * I_{PV} \quad (II.10)$$

### II.3.2.1 Définition des caractéristiques de I-V

La conception d'une installation photovoltaïque efficace nécessite la prise en compte de plusieurs paramètres ayant une influence directe sur la performance du système. Parmi lesquels [SOF11] :

- l'irradiation globale disponible  $G$  (W/m<sup>2</sup>) ;
- la température ambiante  $T$  (K).

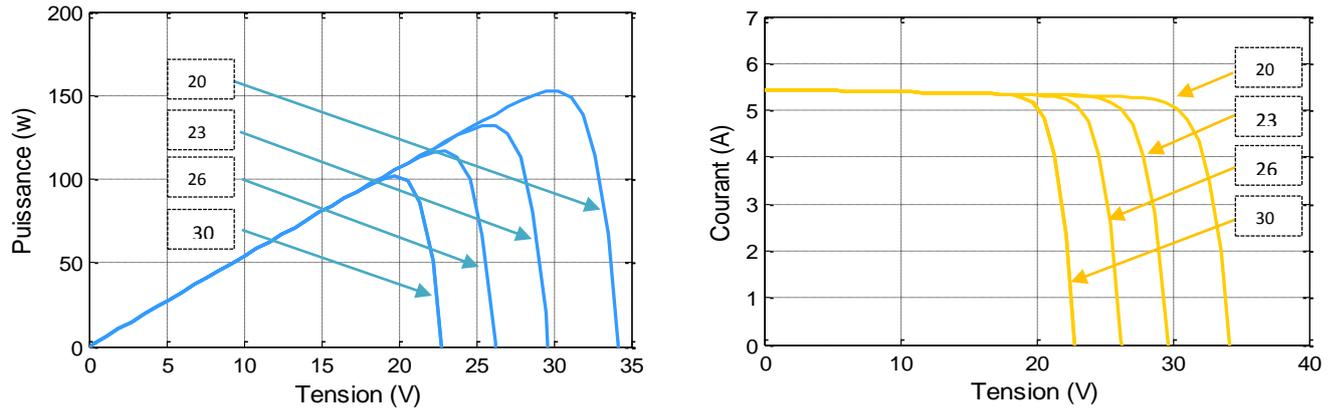


Figure II. 5 L'influence de la température sur la caractéristique I (V) et P (V) d'une cellule PV.

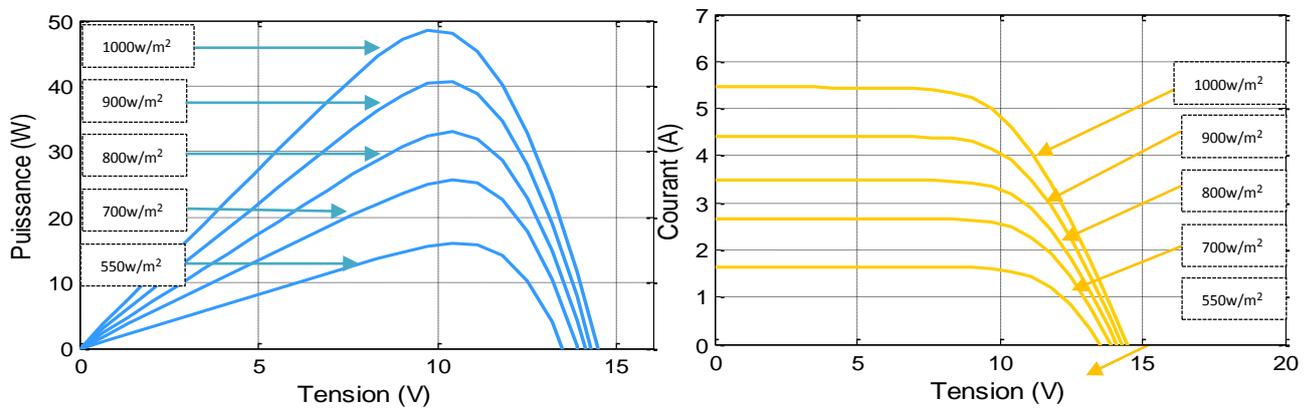


Figure II. 6 L'influence de l'ensoleillement sur la caractéristique P (V) et P (V) d'une cellule PV.

### II.3.2.2 Résultats de simulation

La symbolisation du module KC200GT dans l'environnement Matlab-Simulink, montrant le comportement électrique de ce dernier par rapport à la variation d'une charge électrique connecté directement à ses bornes, permet de déterminer les caractéristiques I (V) et P (V) ; Les mesures sont effectuées dans les conditions  $T=25^\circ$ ,  $G=1000$ .

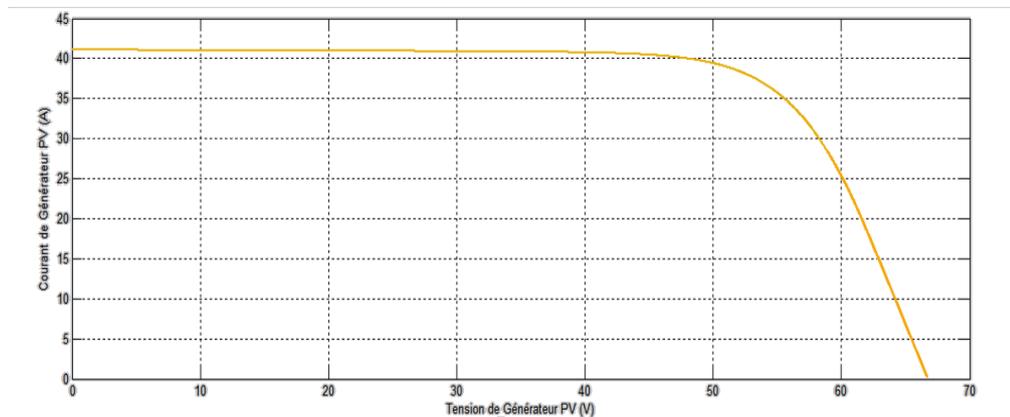
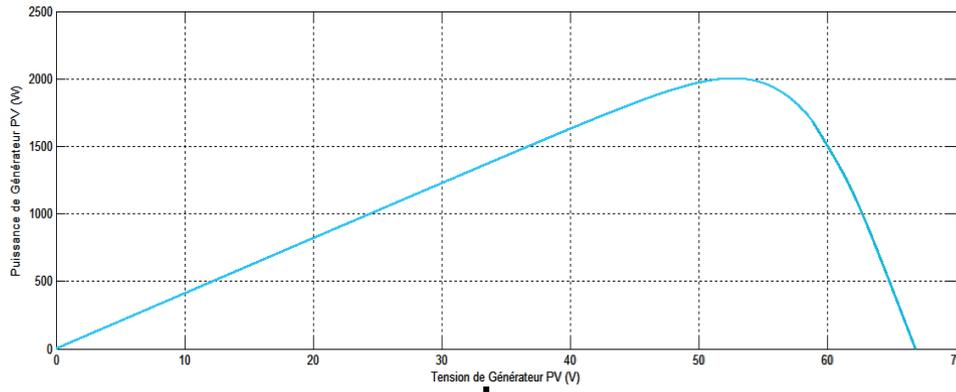


Figure II. 7 Caractéristique I\_V.



**Figure II. 8** Caractéristique  $P_V$ .

Ce que nous permet de déduire les différentes grandeurs électriques du générateur PV.

**Tableau II. 2** caractéristiques électriques du Générateur PV.

<b>Npp</b>	5
<b>Nss</b>	2
<b>Ns</b>	54
<b>Tension optimale <math>V_{opt}</math></b>	52(V)
<b>Courant optimal <math>I_{opt}</math></b>	37.5 (A)
<b>Puissance optimal <math>P_{max}</math>.</b>	2000W
<b>Courant de court-circuit <math>I_{cc}</math></b>	41(A)
<b>Tension de circuit-ouvert <math>V_{co}</math></b>	67(V)

On peut constater qu'un panneau se comporte comme un générateur de tension près de la tension de circuit ouvert et comme un générateur de courant près du courant de court-circuit.

## II.4 Modélisation et simulation de l'étage d'adaptation du GPV avec la charge

### II.4.1 Modélisation de hacheur survolteur

Le système PV que nous voulons modéliser, comprend un hacheur Boost inséré entre le générateur photovoltaïque GPV et le reste de la chaîne de conversion dont la fonction essentielle est double: d'une part adapter la forme de l'énergie aux besoins d'une charge (typiquement en transformant une tension fixe en une tension continue variable et en augmentant le niveau de la

tension [AKA10,]) et d'autre part stabiliser ce flux d'énergie en filtrant autant que possible les fluctuations de la source [CME13].

Nous considérons qu'un dispositif MPPT est intégré à la commande du hacheur son circuit de base est celui de la figure II.9.

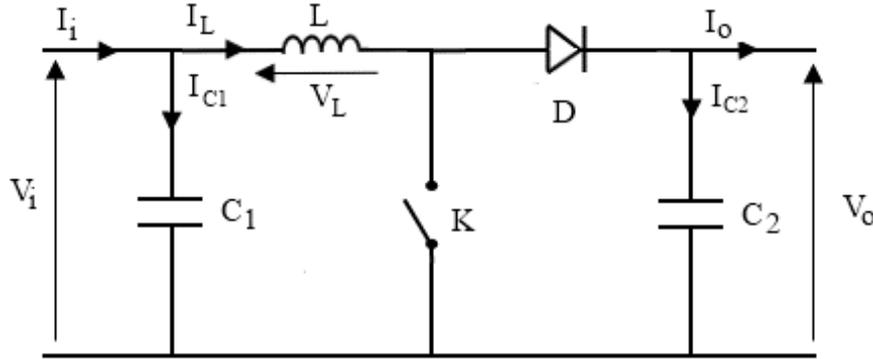


Figure II. 9 Schémas équivalents du hacheur survolteur.

Son principe de fonctionnement est basé sur la position du commutateur **K** ouvert/fermé,

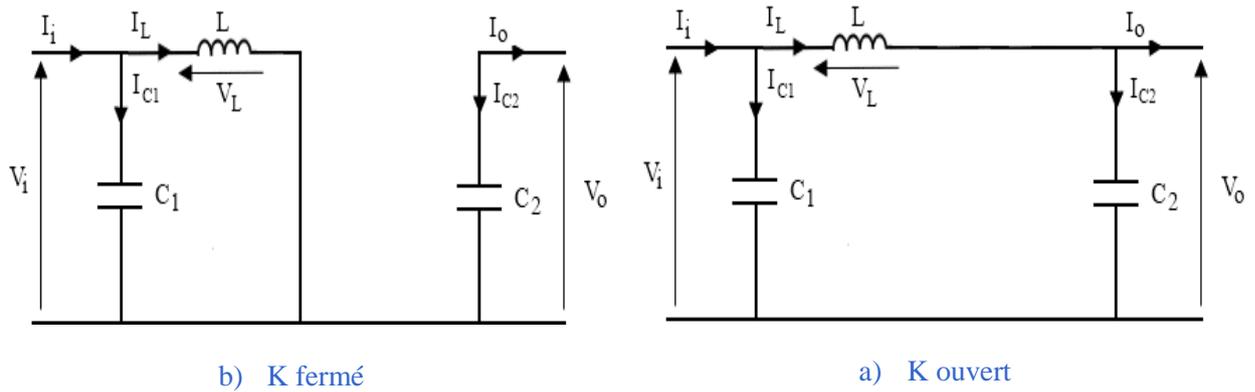


Figure II. 10 Schéma de principe d'un Boost.

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur figure II.10 des deux phases de fonctionnement donne [KAD07] :

Pour la première période  $D T_s$ :

$$\begin{cases}
 i_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I(t) - I_L(t) & \text{(II. 11)} \\
 i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) & \text{(II. 12)} \\
 V_{L1}(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = -V_i(t) & \text{(II. 13)}
 \end{cases}$$

Pour la deuxième période (1-D)  $T_s$

$$i_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I(t) - I(t) \quad (II.14)$$

$$i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \quad (II.15)$$

$$V_{L1}(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) = V_0(t) \quad (II.16)$$

Pour une étude en régime continu, en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et par une approximation de ces grandeurs à leurs valeurs moyennes, on obtient une forme simplifiée des équations (III.9) à (III.14) comme suit :

$$i_{C1} = I - I_L \quad (II.17)$$

$$i_{C2} = -I_0 \quad (II.18)$$

$$V_L = V_i \quad (II.19)$$

Tandis que les équations (II.16) à (II.18) donnent naissance aux équations simplifiées suivantes :

$$i_{C1} = I - I_L \quad (II.20)$$

$$i_{C2} = I_L - I_0 \quad (II.21)$$

$$V_L = V_i - V_0 \quad (II.22)$$

En régime permanent  $i_{C1}$ ,  $i_{C2}$  et  $V_L$  sont approchés à leurs valeurs moyennes donc :

$$d \cdot i_{C1,ON} = (1 - D)i_{C1,OFF} \rightarrow d \cdot i_{C1,ON} - (1 - d)i_{C1,OFF} = 0 \quad (II.23)$$

$$d \cdot i_{C2,ON} = (1 - D)i_{C2,OFF} \rightarrow d \cdot i_{C2,ON} - (1 - d)i_{C2,OFF} = 0 \quad (II.24)$$

$$d \cdot V_{L,ON} = (1 - D)V_{L,OFF} \rightarrow d \cdot V_{L,ON} - (1 - d)V_{L,OFF} = 0 \quad (II.25)$$

Le système d'équations devient. De l'équation(II.20) et (II.23)

$$D(I - I_L) + (1 - D)(I - I_L) = 0 \rightarrow I = I_L \quad (II.26)$$

De l'équation (II.18) et(II.24)

$$D(-I_0) + (1 - D)(I_L - I_0) = 0 \rightarrow I_0 = (1 - D)I_L \quad (II.27)$$

De l'équation (II.19) et(II.23) ; (II.26)

$$DV_i + (1 - D)(V_i - V_0) = 0 \rightarrow V_i = (1 - D)V_0 \quad (II.28)$$

Le rapport de conversion est déduit :

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{(1-D)} \quad (II.29)$$

La tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique moyen  $D$ . Son expression est donnée par l'équation (II.29).

$$V_0 = \frac{V_i}{(1-D)} \quad (\text{II.29})$$

La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique  $D$ .

### III.4.2 Simulation de hacheur survolteur

La figure II.11 montre le schéma du circuit du Boost alimentant une charge résistive  $R$ .

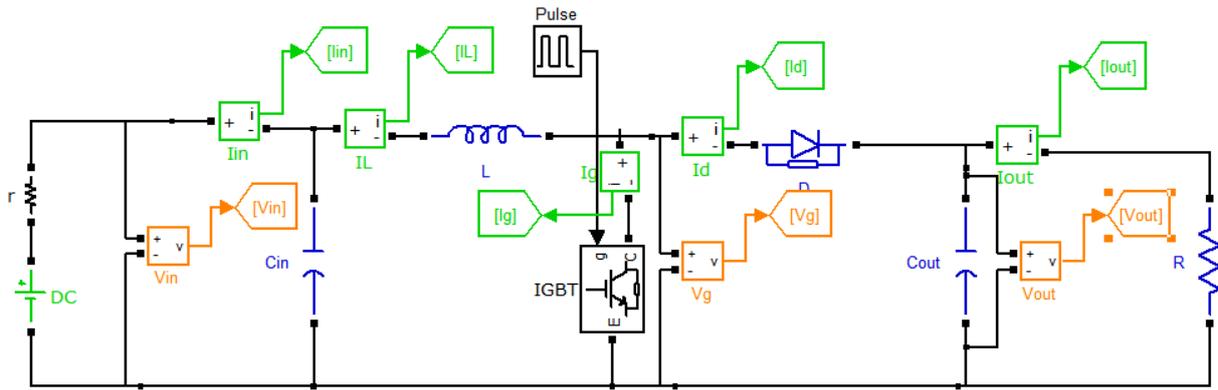


Figure II. 11 Schéma block d'un convertisseur survolteur.

#### II.4.2.1 Dimensionnement des composants

Pour le dimensionnement des différents composants du circuit afin de diminuer les ondulations des courants et des tensions sans faire un surdimensionnement ce qui accroîtrait le poids et le prix des circuits, un calcul de ces composants en fonction des ondulations voulues est nécessaire. Cette remarque est très importante pour le dimensionnement de l'inductance  $L$  afin de respecter le courant admissible par le transistor IGBT [CME13].

Le calcul des composants  $L$  et  $C$  se fait grâce aux expressions suivantes :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha \times V_e}{L f} \rightarrow L = \frac{\alpha \times V_e}{\Delta I_L \times f} \quad (\text{II.31})$$

$$\Delta V_s = \frac{\alpha \times I_s}{C f} = \frac{\alpha \times V_e}{(1-\alpha) R C \times f} \rightarrow C = \frac{\alpha \times V_e}{(1-\alpha) \Delta V_s R \times f} \quad (\text{II.32})$$

Pour  $\Delta I=1A$  et  $\Delta V=0.1V$ , les oscillations du courant dans l'inductance et de la tension de sortie autour de leurs valeurs moyennes, et une fréquence de commutation de 20kHz,

Nous obtenons ainsi le tableau récapitulatif suivant avec le rapport cyclique  $D=28\%$  qui permet de passer de la tension des panneaux ( $V_{in}=52V$ ) à la tension du bus continu ( $V_{out} \geq 72V$ ) :

Tableau II. 3 Récapitulatif des paramètres du système.

Tableau II. 4 Récapitulatif des paramètres du système.

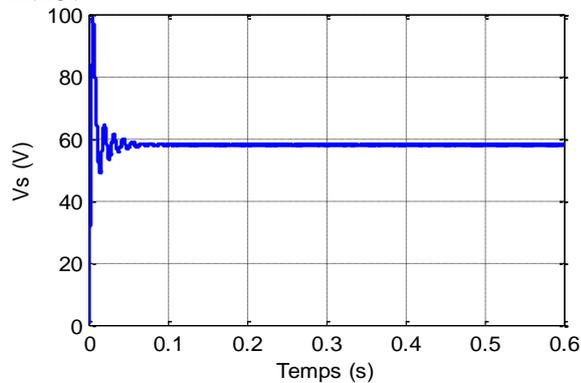
Vin	Vout	Iin	Iout	D	Cs	L
52 V	72.3 V	37.5	27 A	0.28	0.0053 F	$0.73001 \cdot 10^{-3}$ H

### II.4.2.2 Résultats de simulation

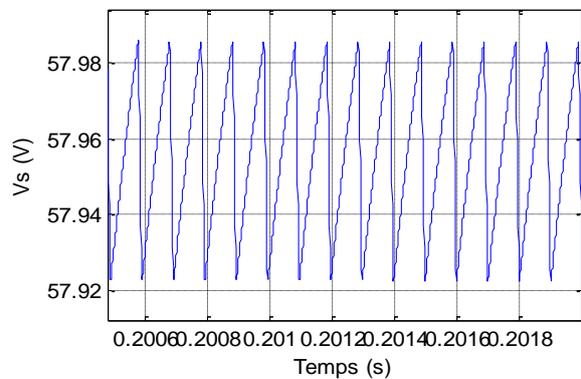
Les figures suivantes représentent les résultats de simulation de convertisseur Boost pour  $R=2.67\Omega$  :

Les résultats de simulation du convertisseur survolteur représentent par les figures II.12 à

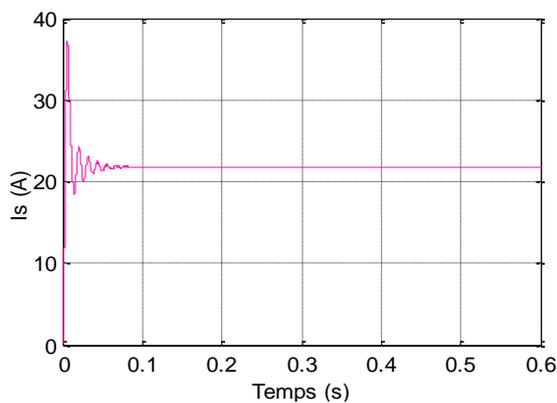
II.15.



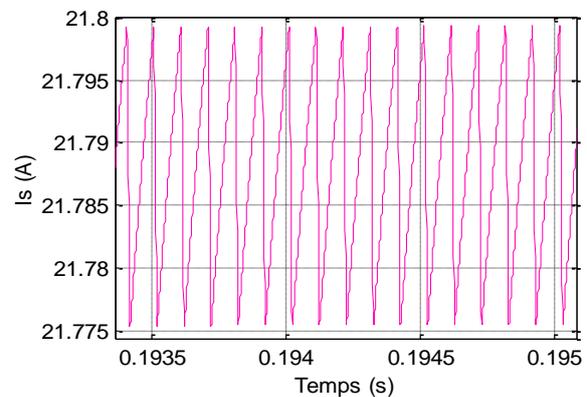
Tension de sortie du hacheur Boost



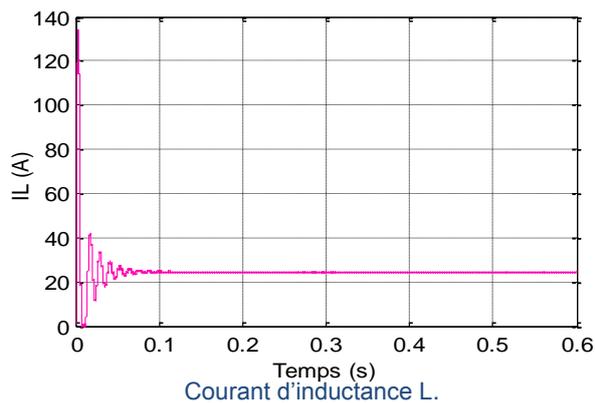
Ondulation de la tension de sortie du hacheur Boost



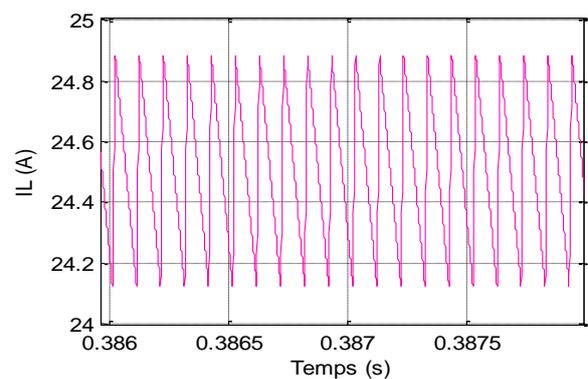
Courant de sortie du hacheur



Ondulation du courant de sortie du hacheur Boost



Courant d'inductance L.



Ondulation du Courant d'inductance L.

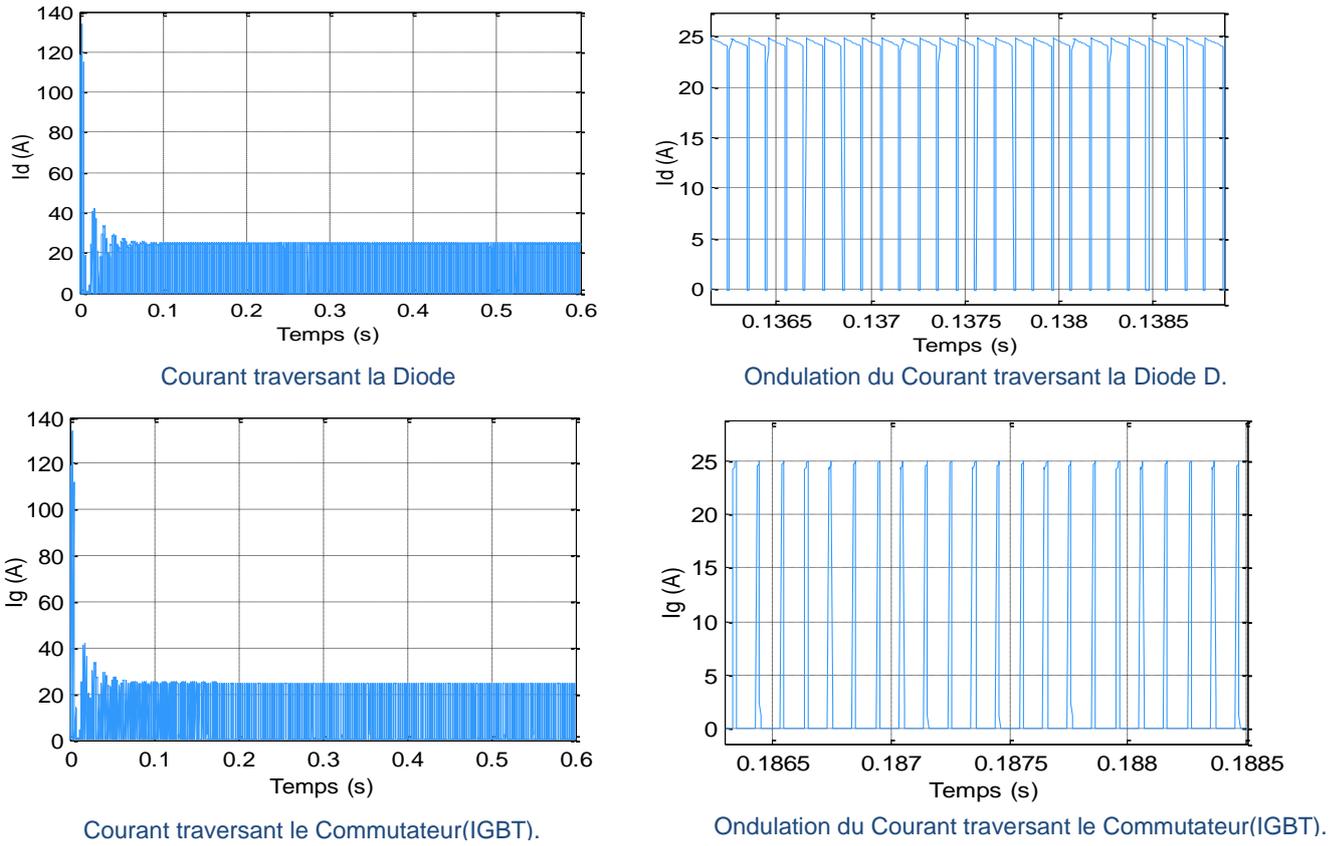


Figure II. 12 Les performances du hacheur Boost.

Les tensions de sortie d'hacheur survolteur pour des tensions d'entrée  $V_e=52, 70, 100$  (V)

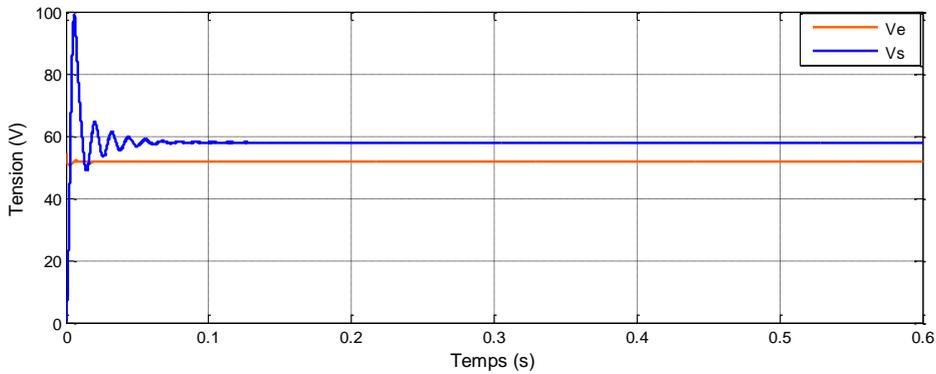


Figure II. 13 Tension de sortie d'hacheur Boost pour des tensions d'entrée  $V_e=52$  V.

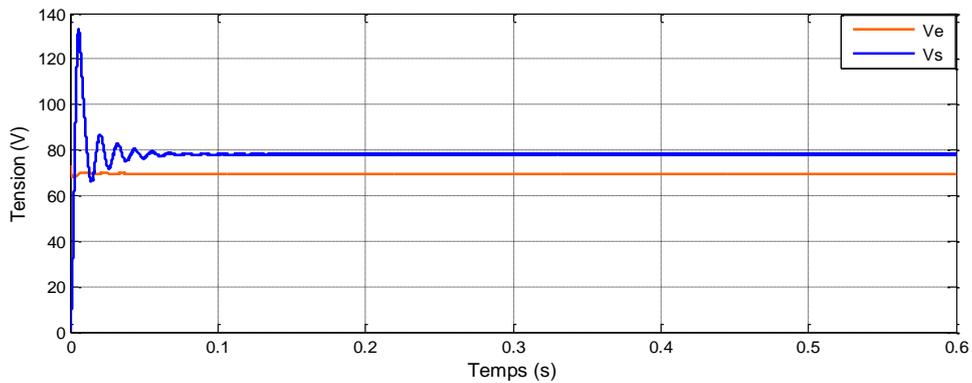
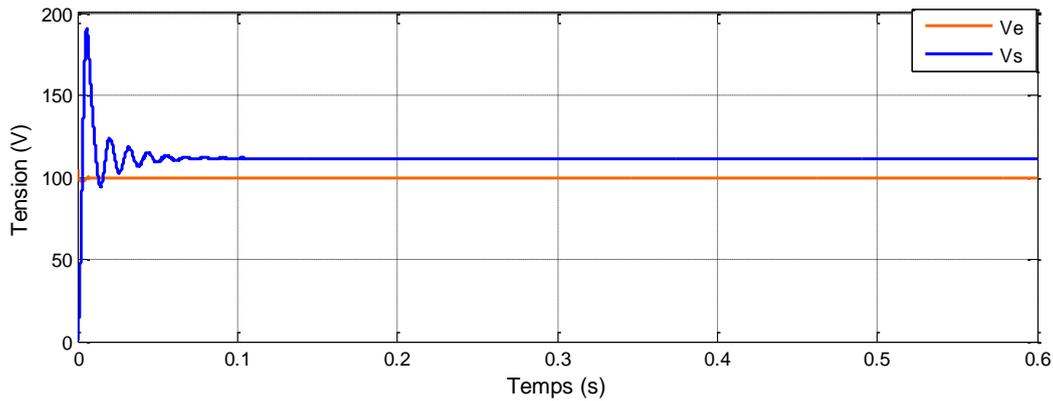


Figure II. 14 Tension de sortie d'hacheur Boost pour des tensions d'entrée  $V_{in}=70$  V.



**Figure II. 15** Tension de sortie d'hacheur Boost pour des tensions d'entrée  $V_e=100V$ .

Ces résultats montrent que la tension de sortie d'hacheur survolteur est supérieure à celle d'entrée. Donc le hacheur survolteur effectue correctement son rôle.

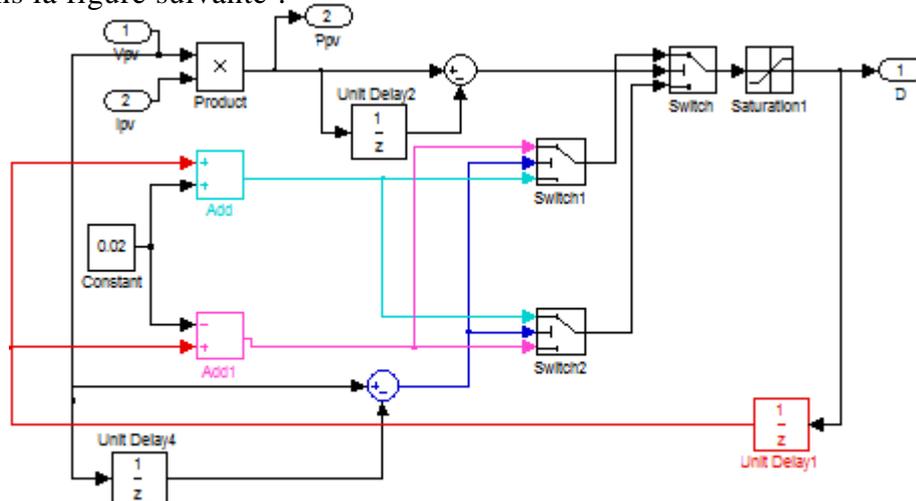
## II.5 Commande MPPT

Comme expliqué dans la section précédente, L'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) est utilisé pour contrôler les variations de la caractéristique courant-tension des cellules [DJE11] .Il indique à un contrôleur de MPPT comment déplacer la tension d'opération. Puis, l'apporter à un niveau désiré et de la maintenir [AOI05] induisant une amélioration globale du rendement du système.

Dans le cadre de ce travail, on analyse la conception et la simulation d'une commande MPPT numérique « perturbation-observation » qu'on applique aux convertisseurs DC-DC survolteur, assurant l'interface de puissance du générateur photovoltaïque et la charge.

### II.5.1 Simulations du MPPT

L'implantation de cet algorithme sous l'environnement MATLAB/SIMULINK est présentée dans la figure suivante :



**Figure II. 16** Modèle SIMULINK de la commande MPPT (P&O).

## II.6 Simulation du Système globale (GPV, Convertisseur, MPPT, la charge)

Les différents composants ont été modélisés et simulés séparément, il s'agit dès lors de les intégrer afin d'obtenir le système complet. La source d'énergie de notre système est assurée par des panneaux photovoltaïques de 2000W, la figure II.17 illustre le schématic de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT «perturbation et observation » et alimente à son tour une résistive  $R=2.67 \Omega$ .

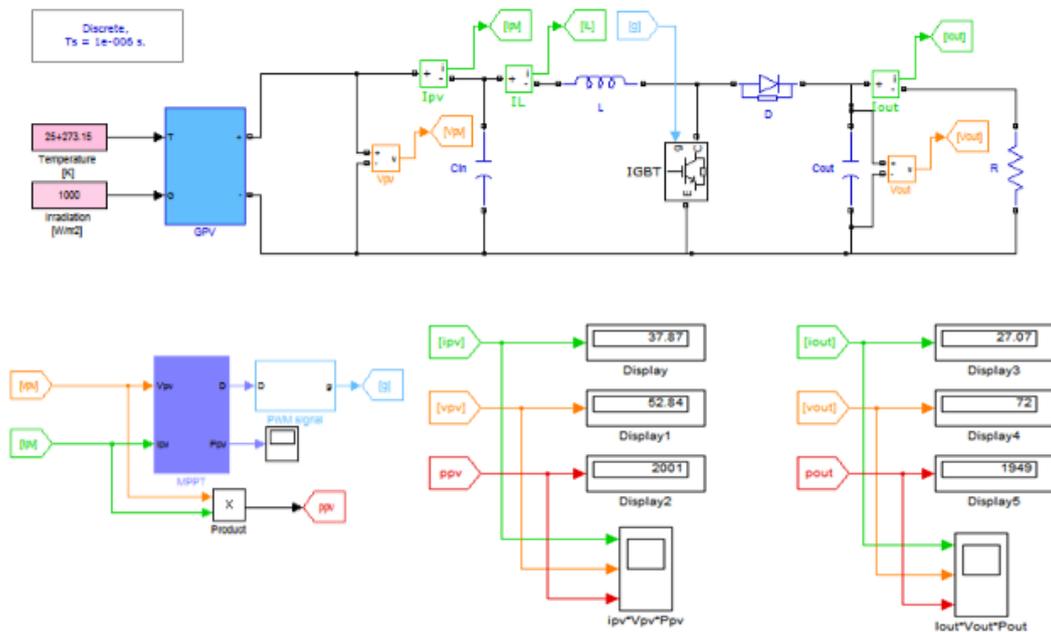


Figure II. 17 Modèle SIMULINK du système.

### II.6.1 Résultats de simulation

On commande le rapport cyclique (D) à l'aide d'un comparateur on fait la comparaison avec signal de la porteuse et un autre en dent de scie, on obtient en sortie le signal de commande(g) illustré dans la figure II.18.

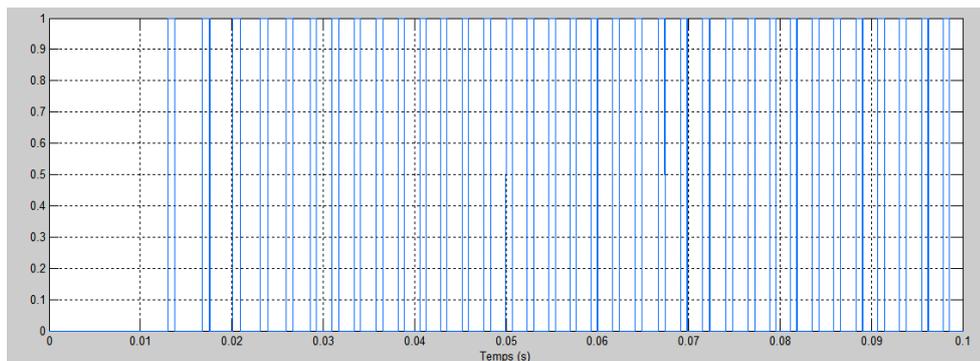


Figure II. 18 le signal de commande.

Les figures suivantes représentent les résultats de simulation de l'association panneau/ convertisseur DC-DC pour  $G=1000$  avec  $T=25C^{\circ}$  et  $R=2.67\Omega$  :

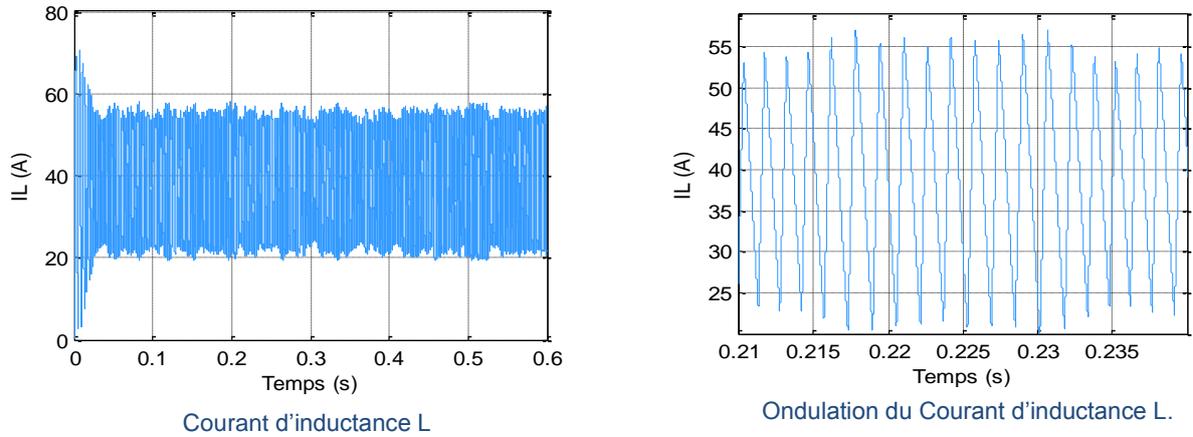


Figure II. 19 Courant traversant l'inductance L (P&O).

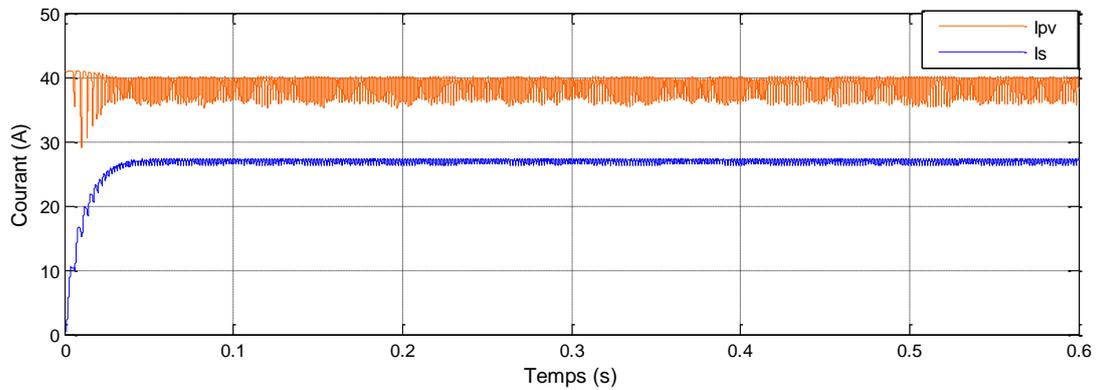


Figure II. 20 Courant de L'entrée et de sortie du convertisseur Boost (P&O).

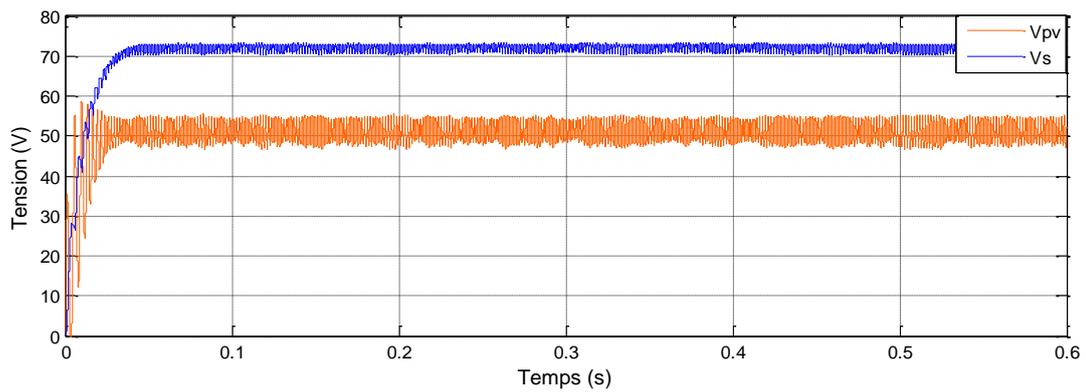


Figure II. 21. Tension de l'entrée et de sortie du convertisseur Boost (P&O).

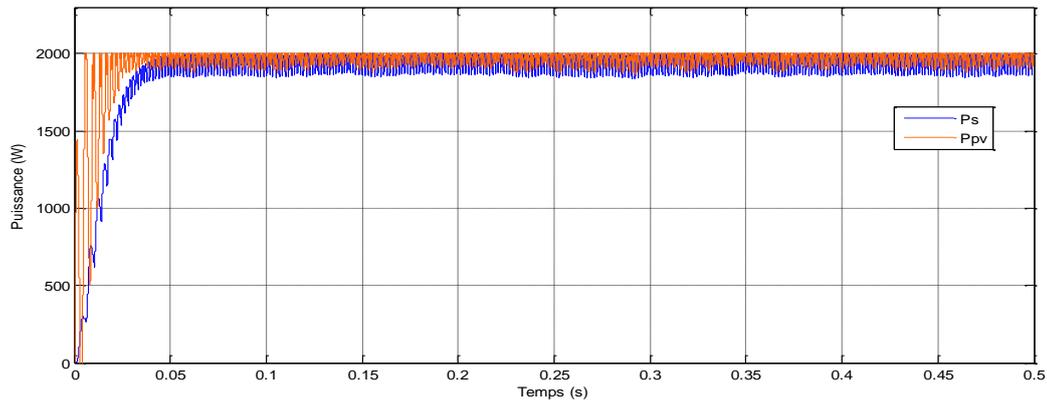


Figure II. 22 Puissance d'entrée et de sortie du convertisseur Boost (P&O).

- L'efficacité d'un algorithme MPPT(P&O) se juge par rapport à sa capacité à suivre le maximum de puissance ; Notre algorithme suit parfaitement le point de puissance maximale du Générateur qui est de 2000W tout en permettant aux panneaux d'être à leur tension optimale  $V_{opt}=52$  V, et leur courant optimal  $I_{opt}=37.5$  A avec un temps de convergence très court et avec une très bonne stabilité puisque les panneaux sont toujours à leur puissance optimale malgré la variation brusque de la charge R.
- Le hacheur survolteur adapté par la commande MPPT (P&O) soulève la tension du générateur photovoltaïque, typiquement de 52Volts, à une tension au-dessus de 72.3V qui est le potentiel maintenu au bus continu. Et donne un courant de sortie  $I_s=27$  A correspond à les valeurs calculées.
- Cette simulation permet donc de visualiser les courbes de  $V_{pv}(t)$ ,  $I_{pv}(t)$ ,  $P_{pv}$ ,  $V_s(t)$ ,  $I_s(t)$  et  $I_L(t)$  avec plus de précision.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté le schéma global de conversion photovoltaïque. Chaque partie de ce schéma a été modélisée. On a vu que l'optimisation de la puissance entre la production et la charge peut être assurée par un étage d'adaptation constituant d'un hacheur BOOST contrôlé par un algorithme MPPT. La qualité intermittente de l'énergie solaire nécessite un Stockage d'électricité pour assurer une fourniture d'énergie quasi permanente quelles que soient les séquences d'ensoleillement. La modélisation et le contrôle de ce système sera détaillé dans le troisième chapitre.

# CHAPITRE II



## III.1 Introduction

Nous avons énuméré les différents composants d'une chaîne de conversion photovoltaïque dans la partie précédente, à savoir : le PV, l'algorithme MPPT et le hacheur boost. Cette chaîne doit être reliée à un élément de stockage afin de stabiliser l'offre et la demande,

Nous présentons donc ici dans un premier temps le processus de stockage d'énergie électrique, ensuite on va voir le système de conversion (Buck-Boost) accompagné de ses blocs de commande, le premier bloc pour le mode « buck » (commande hystérésis) et le second pour le mode « boost » qui inclut le régulateur PI, pour permettre une analyse pertinente de leurs performances.

## III.2 Élément de stockage

### III.2.1 Modélisation de l'élément de stockage

Le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle pendant la nuit [DJE11].

Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière. On équipe alors le système de batteries d'accumulateur au plomb qui correspond à la conservation de l'énergie produite et de la restituer en temps voulu [JIM99]. Et à fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur photovoltaïque [YAM08].

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.[AKA10] Notre choix s'est porté sur le modèle « battery » de Simulink utilisé lors de simulation qui a été développé par le modèle dit « CIEMAT » (Research Center for Energy, Environment 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 [AKA10] il permet de calculer la capacité de stockage en fonction de la puissance produite par le générateur photovoltaïque et la charge demandée [BEL08].

### III.2.1.1 Modèle de la charge de la batterie

Quand la puissance de générateur PV est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, la capacité des batteries au temps  $t$  peut être décrite par [PSA96] :

$$C_{Bat}(t) = C_{Bat}(t-1) \cdot (t - \sigma) + (P_{pv}(t) - P_L(t)/\eta_{inv}) \cdot \eta_{Bat} \quad (III.1)$$

$C_{Bat}(t)$  et  $C_{Bat}(t-1)$  sont les quantités de la charge et la décharge des batteries au temps  $(t)$  et  $(t-1)$  respectivement,  $\sigma$  est le taux horaire de la charge spontanée,  $P_{pv}$  est la puissance du générateur PV,  $P_L$  est la charge demandée au temps  $t$ ,  $\eta_{inv}$  et  $\eta_{Bat}$  sont les rendements du convertisseur et de la batterie successivement.

Pendant la charge de la batterie, le rendement est entre 0.65 et 0.85 selon le chargeant courant, par contre pendant le processus de décharge, le rendement de batterie a été mis égal à 1.

### III.2.1.2 Modèle de la décharge de la batterie

Quand la demande de charge est plus grande que la puissance produite, la capacité des batteries au temps  $t$  peut être exprimée comme suite [BEL08] :

$$C_{Bat}(t) = C_{Bat}(t-1) \cdot (t - \sigma) + (P_L(t)/\eta_{inv} - P_{pv}(t)) \quad (III.2)$$

A tout moment, la quantité de charge des batteries est sujette aux contraintes suivantes :

$$C_{Batmin} \leq C_{Bat}(t) \leq C_{Batmax} \quad (III.3)$$

Ici, la capacité de la batterie maximale prend la valeur de la capacité nominale de la batterie ( $C_{Batmax} = C_{Batmin}$ ), et la capacité minimum est déterminée par la profondeur de la charge (DOD) [CHI94] :

$$C_{Batmin} = DOD \cdot C_{Bat-N} \quad (III.4)$$

La valeur maximale de l'état de charge (SOC) est égale à 1, et le minimum est déterminé par le maximum de profondeur de décharge,  $SOC_{min} = 1 - DOD$

Selon les caractéristiques des fabricants, la durée de vie des batteries peut être prolongée au maximum si DOD prend les valeurs de 30-50% [BEL08].

La capacité de stockage est une fonction de la charge demandée et de son autonomie.

Elle peut être estimée par la relation suivante :

$$C_{Bat} = \frac{E_L \cdot N_a}{\eta_{Bat} \cdot F_{dech} \cdot DOD} [Wh] \quad (III.5)$$

$$C_{Bat} [ Ah ] = \frac{C_{Bat}}{v_b} [ Wh ] \quad (III.6)$$

$C_{Bat}$  : La capacité de stockage de la batterie.

$N_a$  : Le nombre de jours d'autonomie.

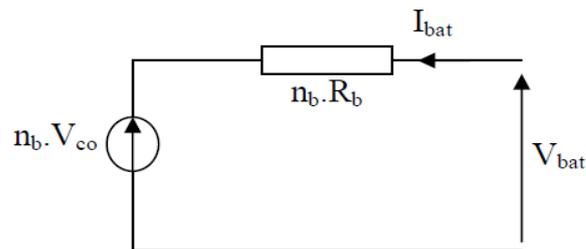
$v_b$  : La tension du système.

$DOD$  : La profondeur de décharge

### III.2.1.3 Tension de la batterie

Le modèle suivant, décrit la relation entre le voltage, courant et l'état de charge.

Ce modèle basé sur le schéma électrique de la figure III.1



**Figure III. 1** Schéma électrique de batterie.

Pour  $n$  batteries en séries, nous pouvons écrire l'équation [AKA10] :

$$v_{bat}(t) = n_b \cdot V_{co}(t) + n_b \cdot I_{bat}(t) \cdot R_{bat}(t) \quad (III.7)$$

Où  $v_{bat}(t)$  bat est la tension de circuit ouvert au temps  $t$ , et  $R_{bat}(t)$  est la résistance interne de batterie, Ohms ; la tension de circuit ouvert est exprimée comme un logarithme de la fonction de l'état de charge :

$$V_{co}(t) = VF + b \cdot \log(SOC(t)) \quad (III.8)$$

Où  $VF$  est la force électromotrice ;  $b$  est un constant empirique.

Les tensions en décharge et en charge sont modélisées par deux équations différentes [BEL08], [KAD07].

Tension en décharge :

$$V_{bat\_D} = n_b \cdot [1,965 + 0,12 \cdot EDC] - n_b \cdot \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \cdot \left( \frac{4}{1+|I_{bat}|^{1,3}} + \frac{0,27}{(1-EDC)^{1,5}} + 0,02 \right) \cdot (1 - 0,007 \cdot \Delta T) \quad (III.9)$$

Tension en charge :

$$V_{bat\_C} = n_b \cdot [2 + 0,16 \cdot EDC] + n_b \cdot \frac{I_{bat}}{C_{10}} \cdot \left( \frac{6}{1+I_{bat}^{0,86}} + \frac{0,48}{(1-EDC)^{1,2}} + 0,036 \right) \cdot (1 - 0,025 \cdot \Delta T) \quad (III.10)$$

La variation de la résistance interne d'une batterie  $R_{bat}(t)$ , est principalement due à deux composants, à savoir, la résistance de l'électrode,  $R_{\text{électrode}}$  et la résistance de l'électrolyte,  $R_{\text{électrolyte}}$

$$R_{bat}(t) = R_{\text{électrode}} + R_{\text{électrolyte}} \quad (III.11)$$

La variation de  $R_{\text{électrode}}$  et  $R_{\text{électrolyte}}$  en fonction de l'état de charge SOC peut être exprimée par :

$$R_{\text{électrode}} = r_1 + r_2 \cdot (SOC(t)) \quad R_{\text{électrolyte}} = [r_3 - r_4 \cdot (SOC(t))]^{-1} \quad (III.12)$$

Où  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ , et  $r_4$  sont des constantes empiriques, ces constantes ont des valeurs différentes pour le mode de charge et décharge.

#### III.2.1.4 Courant de batterie

Quand la puissance du générateur PV est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, le courant de charge des batteries au temps  $t$  peut être décrit par :

$$I_{Bat} = \frac{P_{pv}(t)}{V_{bat}(t)} - \frac{E_L(t)/\eta_{inv}}{V_{bat}(t)} \quad (III.13)$$

Quand la puissance du générateur PV ne peut pas rencontrer la demande de la charge, le courant de décharge des batteries est :

$$I_{Bat} = \frac{E_L(t)/\eta_{inv}}{V_{bat}(t)} - \frac{P_{pv}(t)}{V_{bat}(t)} \quad (III.14)$$

### III.2.1.5 Rendement de la Batterie

Le rendement de la batterie se calcule par la relation suivante :

$$\eta_{\text{Bat}} = \frac{P_{\text{fourni}}(t)}{P_{\text{pv}}(t)} \tag{III.15}$$

Le rendement est considéré constant égale à 85%, la tension nominale est de 2V et la capacité de l'ordre de 100A/h. donc la puissance fournie par une batterie peut s'écrire comme suit [BEL08] :

$$P_{\text{fourni}} = P_{\text{pv}} * \eta_{\text{Bat}} \tag{III.16}$$

### III.2.2 Simulation de la Batterie

#### III.2.2.1 Bloc disponible sous Simulink

Le bloc « Battery » figure III.2 présente un modèle générique et dynamique servant à représenter les batteries les plus couramment utilisées (Plomb-acide, Lithium-Ion, Nickel-cadmium, et Nickel-Metal-Hydrure). Les paramètres du modèle sont déduits des caractéristiques de décharge et sont supposés être les mêmes pour la charge,

Ces paramètres sont approximatifs et dépendent de l'exactitude des points de la courbe de décharge.

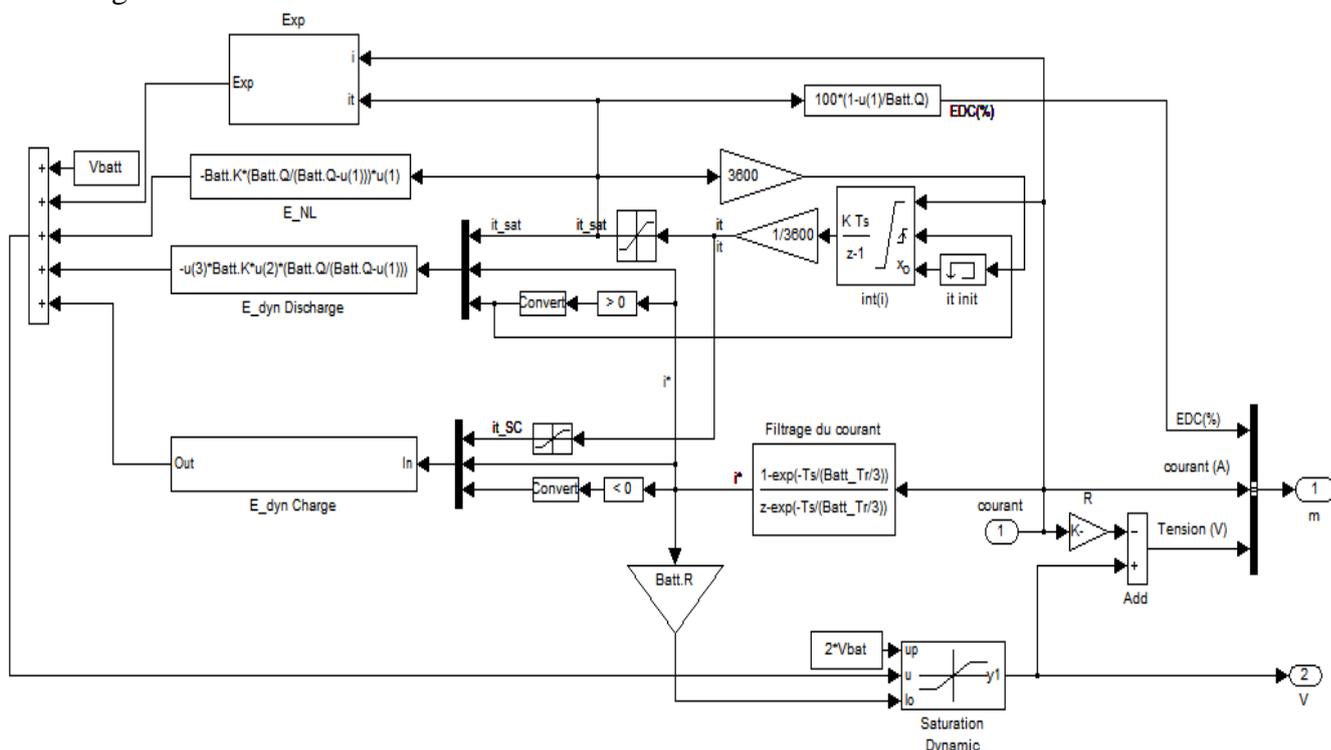


Figure III 2 Bloc de la batterie sous Matlab/Simulink.

### a) Hypothèses

Un certain nombre d'hypothèses sont sous-jacente au modèle « battery » de Simulink.

- La résistance interne est supposée être constante pendant la charge et les cycles de décharge, et ne varie pas avec l'amplitude du courant.
- Les paramètres du modèle sont déduits des caractéristiques de décharge et sont supposés être les mêmes pendant la charge.
- La capacité de la batterie ne change pas avec l'amplitude du courant (pas d'effet Peukert).
- La température n'affecte pas le comportement du modèle.
- L'autodécharge de la batterie n'est pas représentée. Elle peut être représentée par l'ajout d'une grande résistance en parallèle aux bornes de la batterie ( $R_{shunt}$ ).
- La batterie n'a pas d'effet mémoire.

### b) Limites

- La tension minimale à vide de la batterie est de 48 V et la tension maximale n'a pas de valeur limite.
- La capacité minimale de la batterie est de 6.5 Ah et la capacité maximale n'est pas limitée.
- Ainsi, le "SOC" (State Of Charge, niveau de charge) maximal peut être supérieur à 100% si la batterie est surchargée.

### c) Courbe de décharge/décharge

Les paramètres du circuit équivalent peuvent être modifiés en fonction du type de batterie à représenter, en tenant compte de ses caractéristiques de décharge. Une courbe de décharge typique est composée de trois sections, comme le montre la figure III.3

- La première partie représente la chute exponentielle de tension lorsque la batterie est chargée. Selon le type de batterie, cette zone est plus ou moins large.
- La deuxième partie représente la charge qui peut être extraite de la batterie jusqu'à ce que la tension soit inférieure à la tension nominale de la batterie.
- Enfin, la troisième partie représente la décharge totale de la batterie, lorsque la tension chute rapidement.

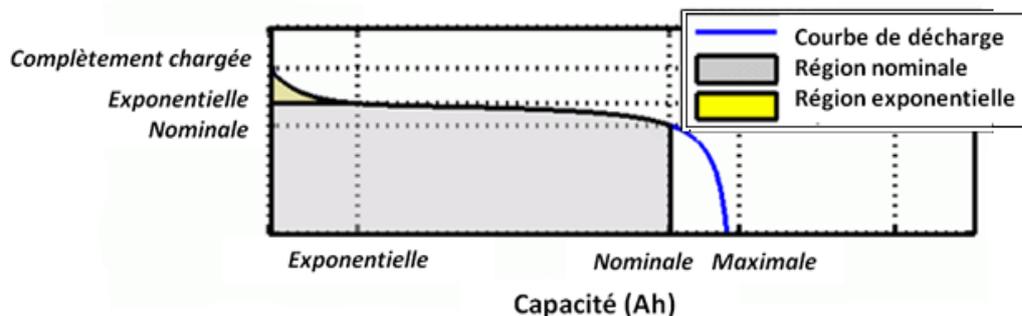


Figure III.3 Courbe de décharge d'une batterie.

La tension augmente de façon exponentielle lorsque la batterie est en charge, quel que soit son état initial de charge. Lorsque la batterie se décharge, la tension initialement à la valeur « A » diminue immédiatement de façon exponentielle, comme indiqué sur la figure III.4.

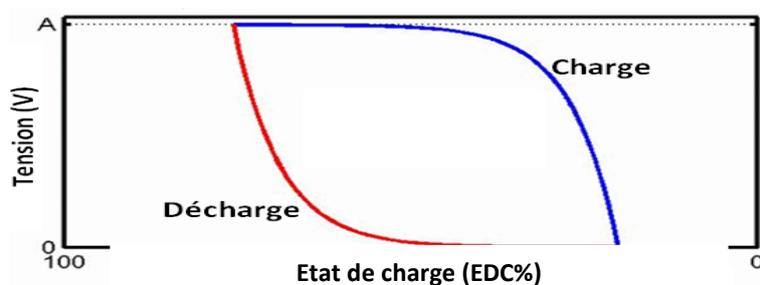


Figure III.4 Caractéristique tension versus état de charge.

Le type de la batterie choisi sous Simulink est **plomb-acide (Lead-Acid)**.

Les caractéristiques prises sont données dans l'annexe (voir l'annexe). Ce choix correspond à la dominance de la technologie des batteries au plomb dans le domaine du stockage photovoltaïque. Même si leur capacité par kilogramme est de 30 à 40 Wh/kg, plus faible que les autres technologies (nitrure de cadmium (CdNi) : 50 à 70 Wh/kg, Lithium ion (Li-ion) : 150 Wh/kg), leur prix d'achat est de deux à quatre fois moins cher par kWh stocké que le CdNi et dix à vingt fois moins cher que le nickel-hydrure métallique (NiMh) ou lithium [Web- DDE].

Les paramètres de la batterie du bloc Simulink ci-dessus sont les suivants :

- Tension nominale : 48 V
- Capacité nominale : 6.5 Ah
- État de charge initial (Soc) : 90 %

En fonction du type de batterie choisi, les paramètres suivants du bloc Simulink restent fixes le courant de décharge nominal (5 % de la capacité nominale), tension de charge complète (108

%), la résistance interne ( $0,76923 \Omega$ ), la capacité correspondant à la tension nominale (50 % de la capacité nominale).

### III.3 Hacheur Buck-Boost

Le hacheur buck-boost est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif permet l'adaptation de la tension du bus continue à celle de la tension de la batterie.

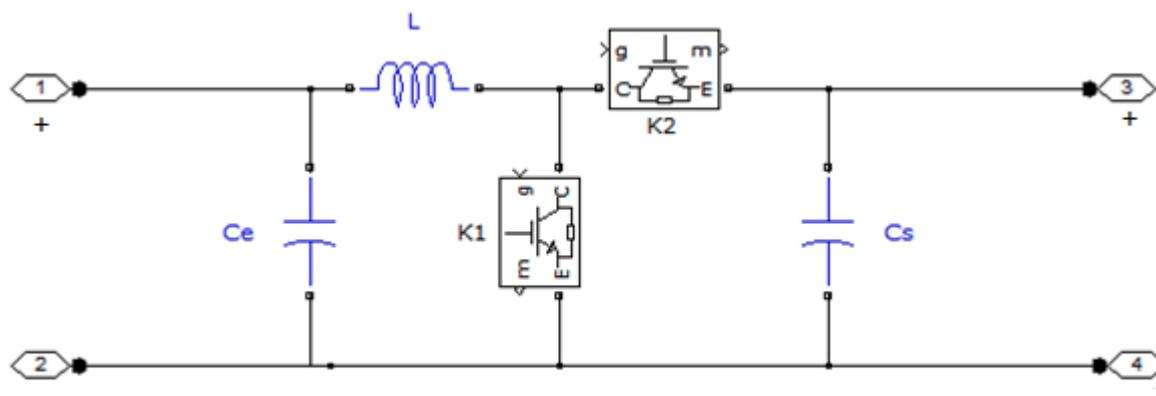


Figure III. 5 Schéma de fonctionnement d'un hacheur buck- boost.

#### III.3.1 Principe de fonctionnement du convertisseur

- En condition normale ( $P_{pv} > P_{charge}$ )

Dans ce cas, le panneau photovoltaïque alimente la charge et l'ensemble { convertisseur\_ Batterie }. Le maintien en charge de Batterie est géré par la commande « buck » du convertisseur.

- Perte d'alimentation ( $P_{pv} < P_{charge}$ )

Dans ce cas, le convertisseur assure le maintien sans interruption de l'alimentation aux bornes de la charge, en utilisant comme source l'énergie provenant de la Batterie, par une commande « boost ».

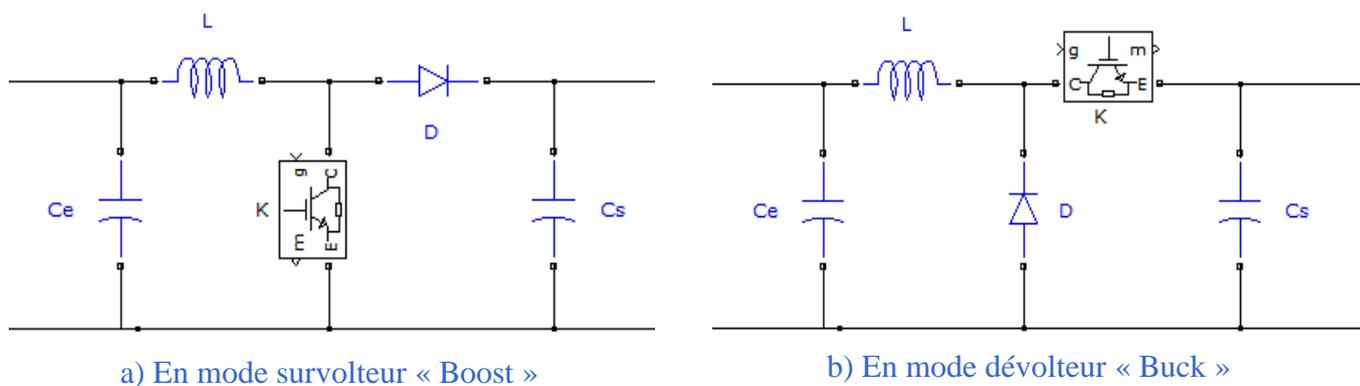


Figure III.6 Circuit électrique de base du Hacheur survolteur –dévolteur.

Le modèle d'équation du convertisseur dans cette configuration s'écrit de la manière suivante :

$$a) \left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_L}{dt} = -(1 - \alpha) \frac{V_e}{L} + \frac{V_s}{L} \\ \frac{dV_e}{dt} = (1 - \alpha) \frac{I_L}{C} - \frac{V_s}{RC} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{(III. 17)} \\ \text{(III. 18)} \end{array}$$

$$b) \left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_L}{dt} = -(1 - \alpha) \frac{V_s}{L} + \frac{V_s}{L} \\ \frac{dV_e}{dt} = (1 - \alpha) \frac{I_L}{C} - \frac{V_s}{RC} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{(III. 19)} \\ \text{(III. 20)} \end{array}$$

### III.3.2 Dimensionnement des composants

Le convertisseur est constitué d'une inductance, d'un condensateur, le choix des valeurs de ces composants se base sur les objectifs visés par ce travail à savoir la poursuite de références du courant.

Dans notre simulation, nous avons choisi des valeurs théoriques de l'inductance et du condensateur qui donne des résultats de simulation probants, ainsi les valeurs données par le tableau III.1 ont été retenues.

Le calcul des composants L et C se fait grâce aux expressions suivantes :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha \times V_e}{L f} \rightarrow L = \frac{\alpha \times V_e}{\Delta I_L \times f} \quad \text{(III.21)}$$

$$\Delta V_s = \frac{\alpha \times I_{max}}{C f} \rightarrow C = \frac{\alpha \times I_{max}}{\Delta V_s \times f} \quad \text{(III.22)}$$

Les paramètres de simulation sont donnés par le tableau suivant :

**Tableau III.1** Paramètres du convertisseur.

<i>F</i>	<i>I<sub>max</sub></i>	<i>α</i>	<i>L</i>	<i>C</i>	<i>V<sub>e</sub></i>
20KHZ	29.4 A	0.28	4.95 e-4H	4.2 e-3F	35V

### III.4 Commande du hacheur BUCK-BOOST

L'objectif principal de la commande est de maîtriser l'évolution d'une ou plusieurs grandeurs physiques à partir d'une ou plusieurs variables de contrôle, dans un environnement perturbé par l'introduction d'un algorithme de contrôle ayant des performances satisfaisantes pour

s'affranchir les perturbations. Cet algorithme de contrôle est appelé un correcteur ou parfois un régulateur [ZEN14].

Ce travail est consacré à la gestion des ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs ( $K_1$ ,  $K_2$ ) de sorte que le courant crée par le convertisseur soit la plus proche du courant de référence. Deux méthodes de commande sont utilisées [ABB11].

- Commande par Hystérésis,
- Commande par un correcteur de type Proportionnel Intégral (PI).

### III.4.1 Commande par Hystérésis

Le principe de contrôle des courants par Hystérésis consiste à maintenir chacun des courants générés dans une bande enveloppant les courants de référence [ABB11].

La recharge du Batterie se fait à courant moyen constant comme indiqué à la figure III.9 qui schématise la technique qu'on l'utilise.

L'information du courant  $I_L$ , mesurée ensuite comparée par hystérésis à aux références min et max du courant de recharge. Le résultat 0-1 de cette comparaison fournit directement l'ordre de commande d'interrupteur  $K_2$ . « buck ». [ $K_1$  « boost », toujours bloqué ici] [NOR10].

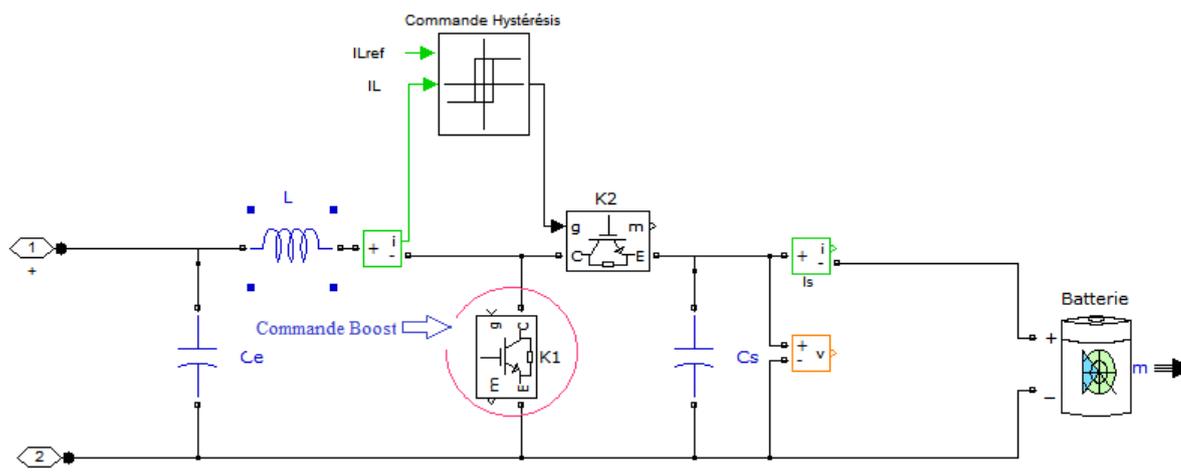


Figure III.7 Commande du courant par hystérésis.

La simplicité de la mise en œuvre de cette stratégie est son avantage, tandis que la fréquence de commutation variable peut être inconvenient. Celui-ci peut être remédié par une autre version de contrôle par hystérésis avec une fréquence de commutation fixe [ABB11].

### III.4.2 Commande par un correcteur de type Proportionnel Intégral (PI)

Ce type de contrôle très répandu dans l'industrie rentre dans la classe des commandes linéaires qui se basent sur un modèle linéaire du système pour synthétiser le contrôleur. [NOR10]

Nous retenons la structure à une seule boucle de contrôle (boucle de courant) qui impose la valeur du rapport cyclique  $\alpha$ . Son avantage est qu'elle améliore les performances dynamiques et la robustesse du contrôleur. La structure de la commande est représentée par la figure III.9.

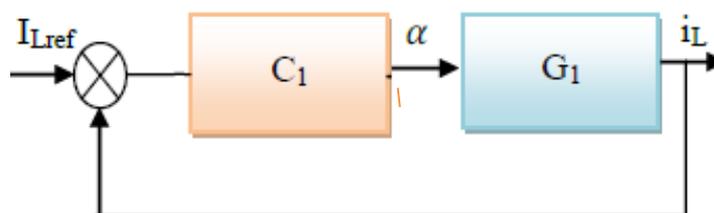


Figure III.8 Structure de la commande du mode Boost.

$I_L^{\text{ref}}$  : Courant de référence.

$C_1$ : correcteur de la boucle de courant.

$G_1$  : processus  $\frac{i_L}{\alpha}$

$\alpha$ : Rapport cyclique de la commande PWM.

Pour la boucle de contrôle présenté par la figure III.9 nous avons besoin de déterminer la fonction de transfert  $G_1$ .

Après un développement au premier ordre et une transformation de Laplace des équations du système, En mode Boost, (III.17 ; III.18) on obtient la Fonctions de transfert en conduction continue :

$$\bullet \quad G_1 = \frac{i_L}{\alpha} = \frac{2.V_e}{R(1-\alpha)^3} \frac{1 + \frac{R.C}{2}S}{1 + \frac{L}{R.(1-\alpha)^2}S + \frac{L.C}{(1-\alpha)^2}S^2} \quad (\text{III.23})$$

Avec :

$$\bullet \quad C_1(s) = K_{pc} \cdot \frac{1 + \tau_c \cdot s}{\tau_c \cdot s \left( \frac{1}{w_{pc}} + 1 \right)} \quad (\text{III.24})$$

Pour toutes les variables, nous notons :  $X = X_0 + \hat{x}$  où  $X_0$  est la valeur de  $X$  en régime permanent et  $\hat{x}$  une petite variation de  $X$ .

Dans les paragraphes suivants, nous décrivons le fonctionnement du hacheur avec sa commande PI sur une charge  $R$ .

Le montage de la figure III.18 est composé de correcteur PI(s) qui est  $C1(s)$ , de filtre passe-bas  $Kc$  et le modulateur de largeur d'impulsion (PWM) qui reçoit à son entrée une consigne  $\alpha$  variant de 0 à 1 et fournissant en sortie des créneaux de 0-1.

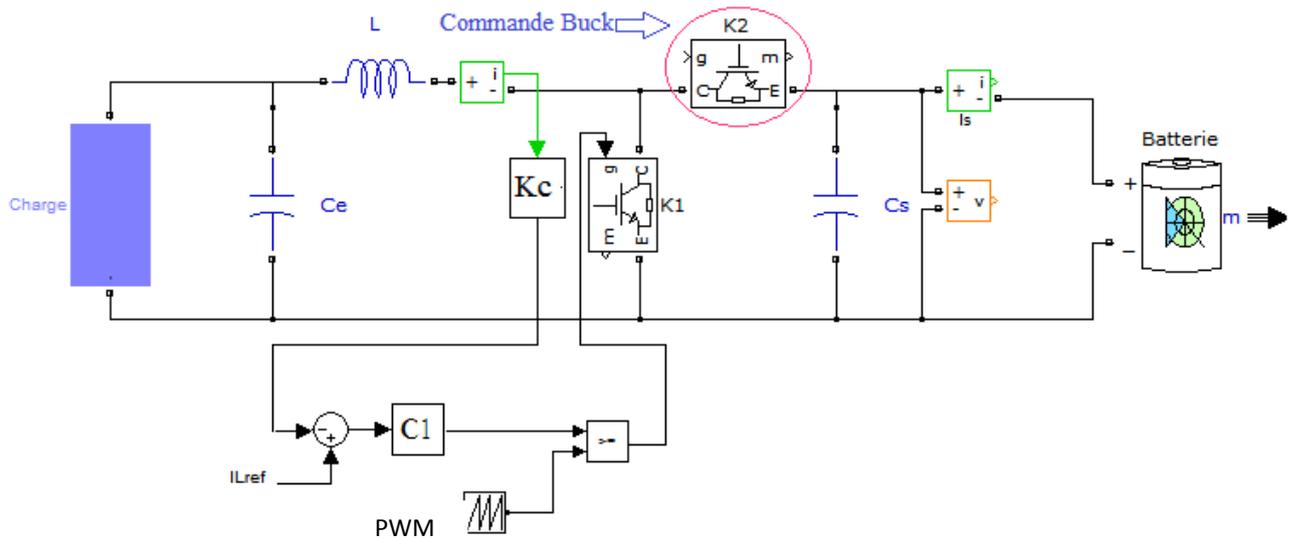


Figure III.9 Structure de la commande du mode Boost avec sa commande.

Nous obtenons en boucle ouverte, la fonction de transfert de la boucle du courant  $G1$  en série avec  $C$  :

$$G = \frac{\hat{i}_{Lmea}(s)}{\hat{i}_{Lref}(s)} = K_c \cdot \frac{2 \cdot V_{in0}}{R \cdot (1 - \alpha_0)^3} \cdot \frac{\left(1 + \frac{R \cdot C}{2} s\right)}{\left(1 + \frac{L}{R(1 - \alpha_0)^2} s + \frac{L \cdot C}{(1 - \alpha_0)^2} s^2\right)} \cdot \frac{1}{V_p} C_1(s) \quad (\text{III.25})$$

$$V_p = V_{ref} + 40 ;$$

### III.4.2.1 Synthèse des paramètres du correcteur

Le point de référence retenu pour la synthèse des correcteurs est le point le plus critique au niveau de la stabilité. Pour la détermination du correcteur  $C1(s)$ , nous utilisons le diagramme de Bode en boucle ouverte. On déduira Les valeurs de  $K_{PC}$  ;  $K_c$  et de  $T_i$ .

Pour assurer la stabilité au convertisseur, nous devons avoir une marge de phase comprise entre  $45^\circ$  et  $70^\circ$ . Le tracé du diagramme de Bode nous permet de trouver les paramètres du correcteur PI.

Le diagramme de Bode obtenue pour le système en boucle ouverte est présenté par la figure III.11.

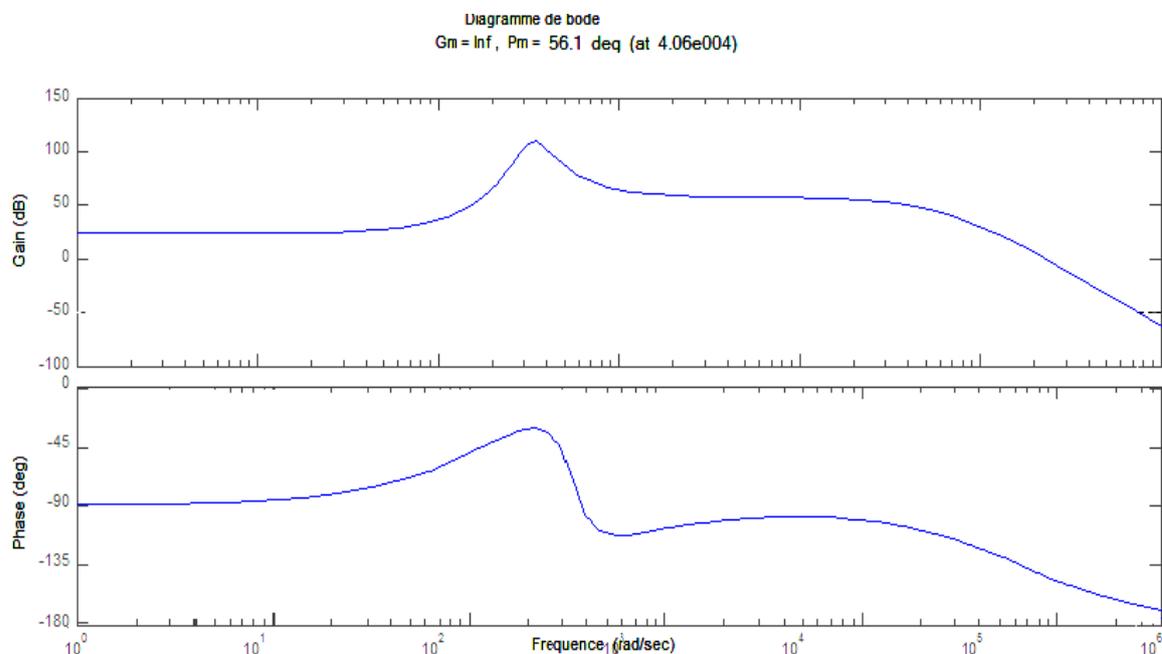


Figure III.10 Diagramme de Bode de G1.

Nous remarquons qu'avec une marge de phase de  $56^\circ$ , nous respectons les critères de stabilité du convertisseur. Nous allons donc limiter dans ce cas la fréquence de coupure à 100 000 rd/s, le correcteur C<sub>1</sub> est :

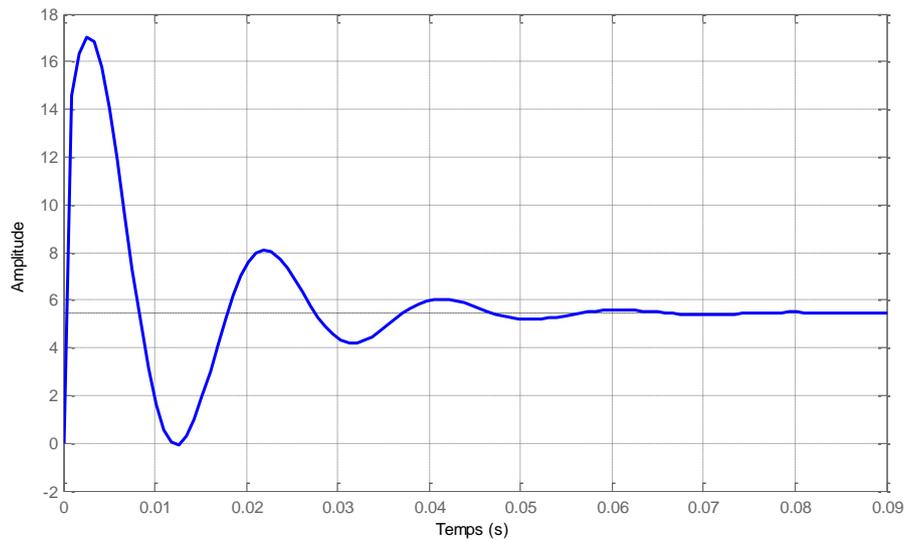
$$C_1 = \frac{K_c(1+T_c s)}{s} \quad (\text{III. 26})$$

Tableau III. 2 Paramètre du correcteur PI.

$$K_c = K_{pc}/\tau_c$$

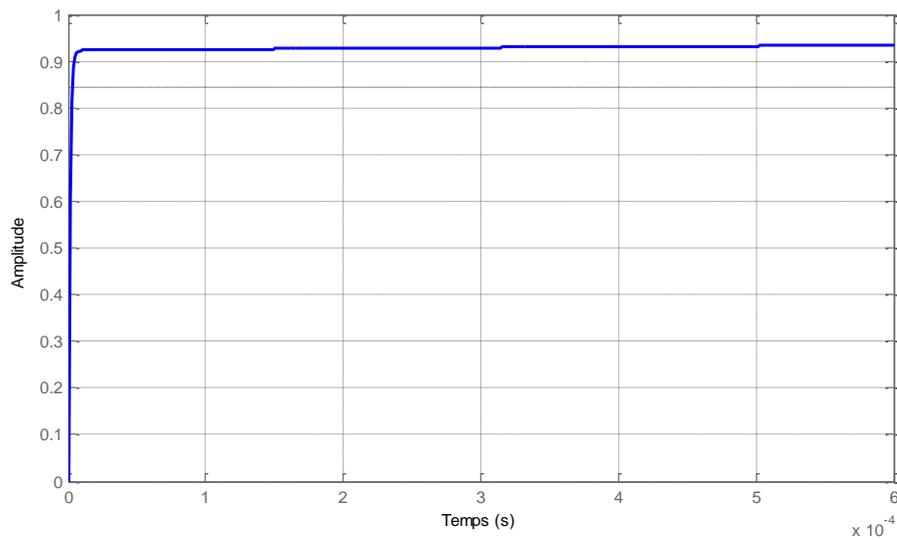
$w_{pc}$	6,28.104 rad/s
$K_{pc}$	10
$\tau_c$	$6.10^{-4}$
$K_c$	166.66

La figure III.11 présente la réponse indicielle de la fonction de transfert en boucle ouverte.



**Figure III.11** Réponse indicielle de la fonction de transfert  $G$  en BO.

La figure III.12 présente la réponse indicielle de la fonction de transfert en boucle fermée.



**Figure III.12** Réponse indicielle de la fonction de transfert  $G$  en BF.

### III.5 Résultats de simulation du hacheur «Buck\_Boost » avec ses blocs de commande

Afin de voir le comportement transitoire du hacheur avec ses blocs de commande, on va effectuer deux tests, le premier test concernera la poursuite sans disque le deuxième on considère la consigne constante pour juger la régulation de système.

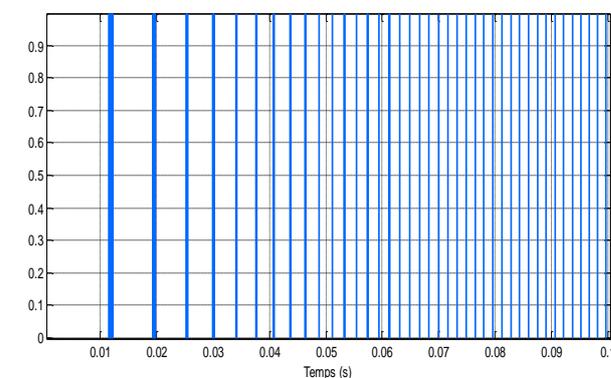
Les figure III.13, III.14 résument les variations de tension observées en simulation, lors d'une référence fixe et lors d'un brusque changement de courant de référence, avec les commandes à régulateur PI et hystérésis.

➤ **Premier test : Test de la dynamique du système (poursuite)**

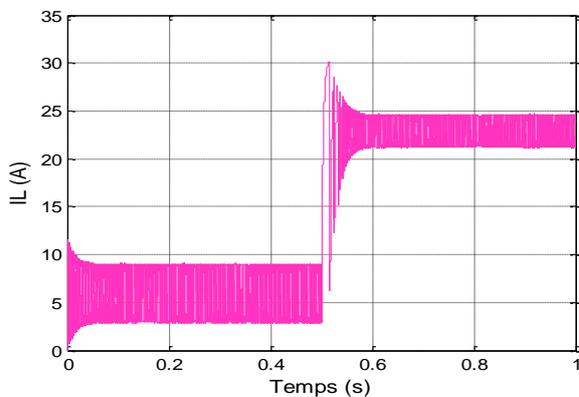
La simulation effectuée consiste à faire varier la référence du courant d'une valeur minimale (6A) à une valeur maximale (23A) à l'instant 0.5 sec.

Les résultats obtenus sont présentés sur la figure III.12.

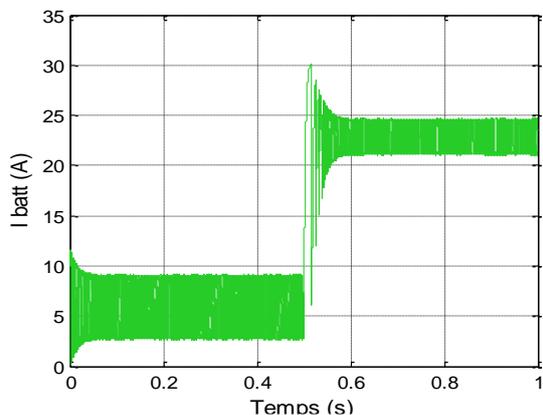
(a) En mode Boost.



Signal de commande (K1)

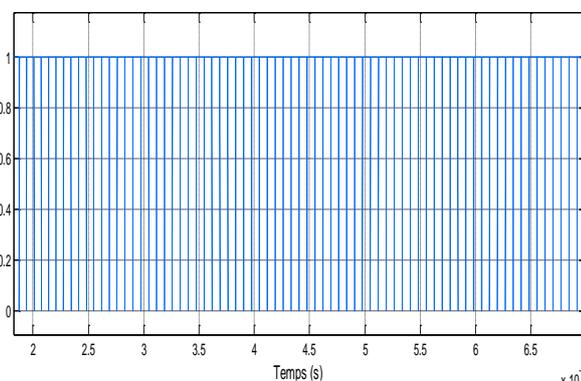


Courant de l'Inductance.

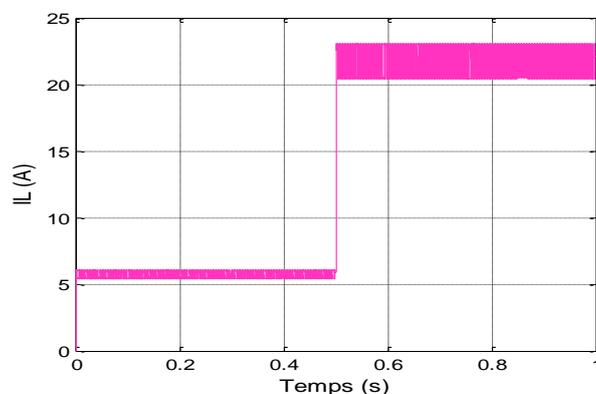


Courant du Batterie.

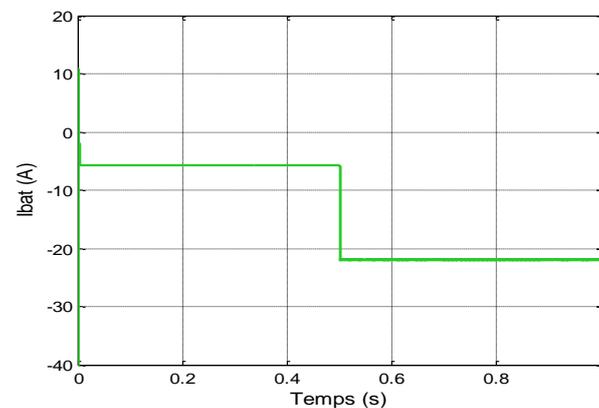
(b) En mode Buck.



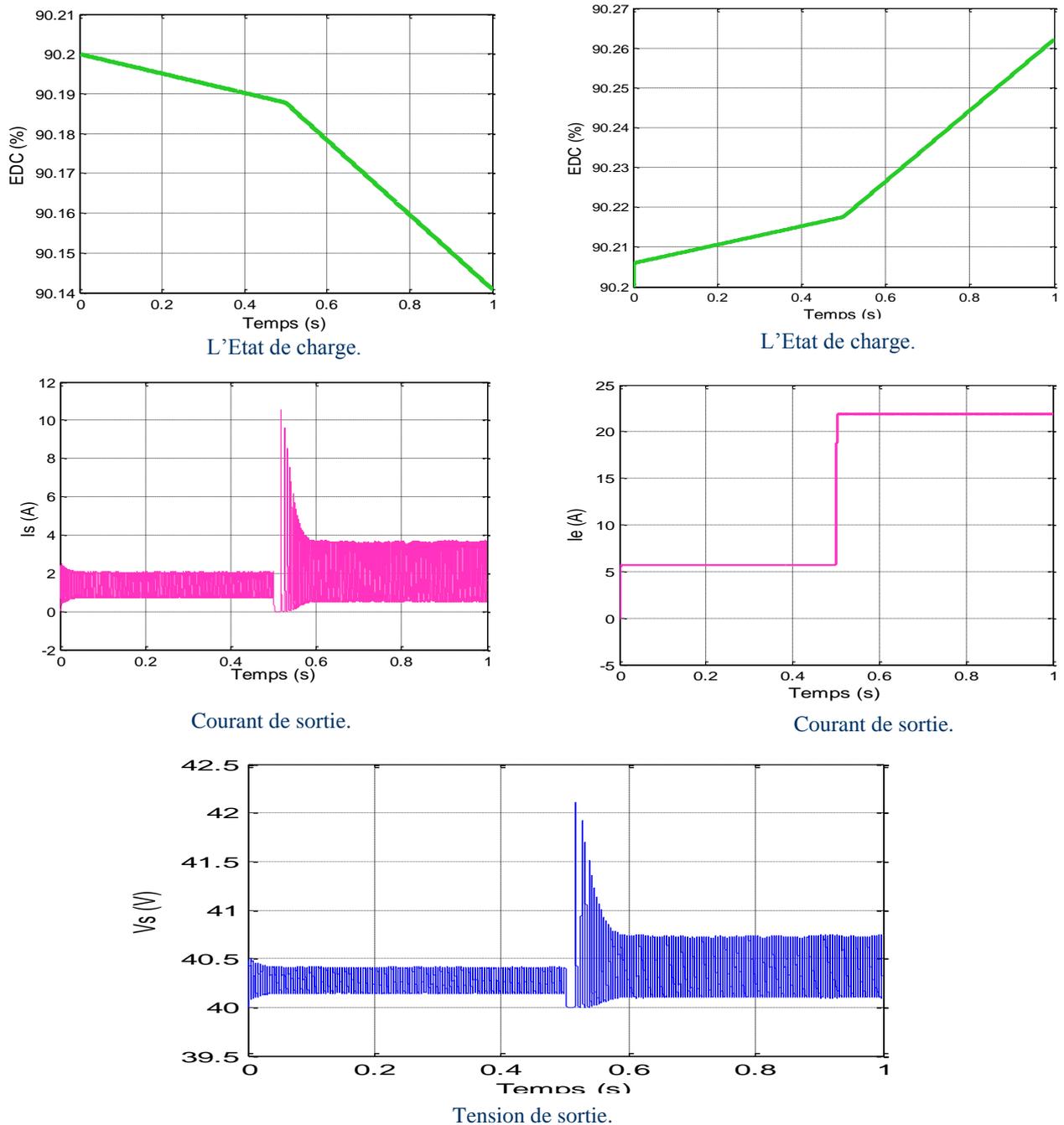
Signal de commande (K2)



Courant de l'Inductance.



Courant du Batterie.



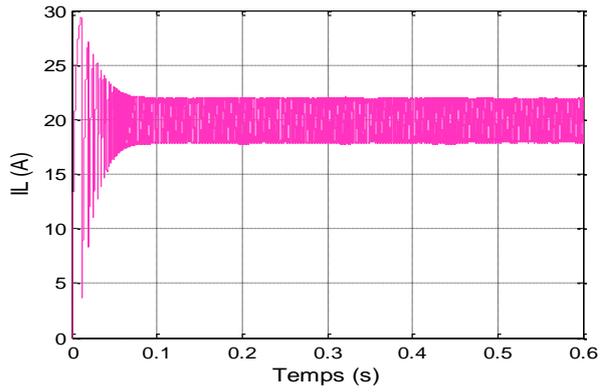
**Figure III.13** Simulation PI (a) et Hystérésis (b) (variation de la référence de 6 à 23A).

On peut remarquer d'après la figure III.13 que le courant de l'inductance suit leur référence avec une bonne dynamique. Et on peut constater ainsi que la tension de sortie du hacheur est influencée par le changement de consigne du courant. Ceci nous permet de dire qu'on peut optimiser la puissance fournie par le hacheur en engendrant la référence du courant convenable.

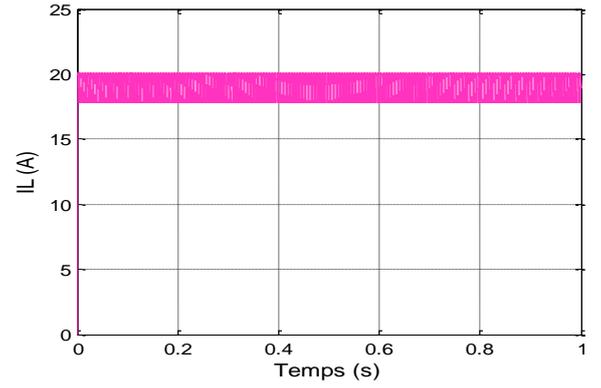
➤ **Deuxième test : Test de la régulation**

La référence est fixée à une valeur vaut 20 A.

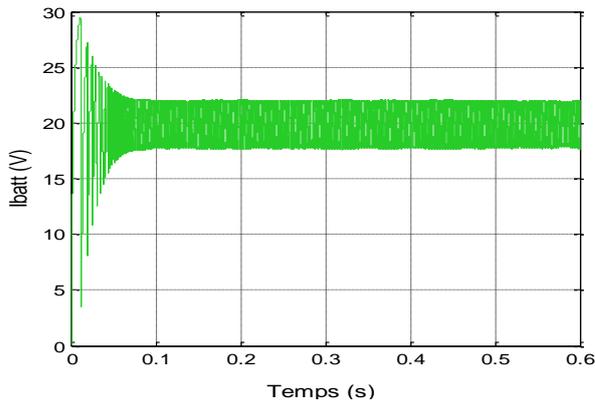
(a) En mode Boost.



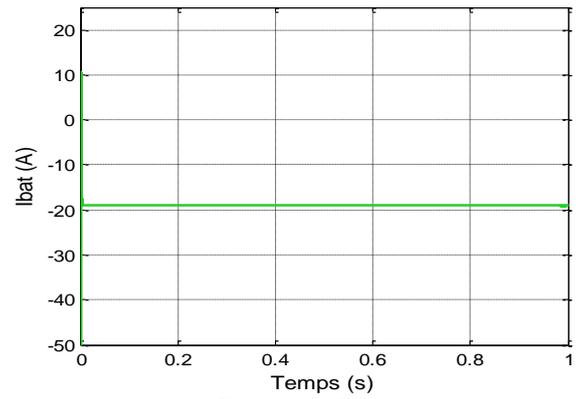
(b) En mode Buck.



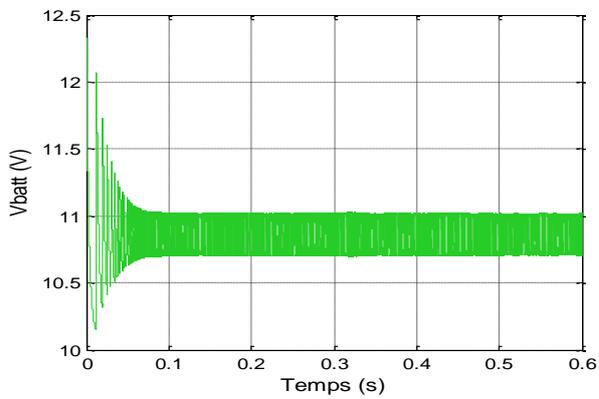
Courant de l'Inductance.



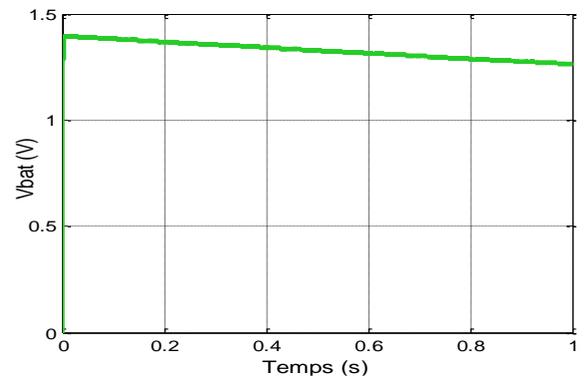
Courant de l'Inductance.



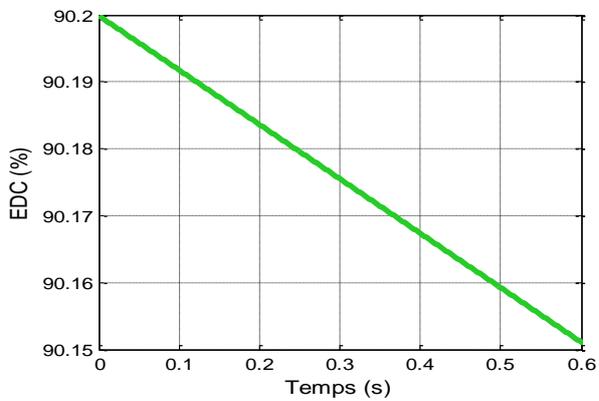
Courant du Batterie.



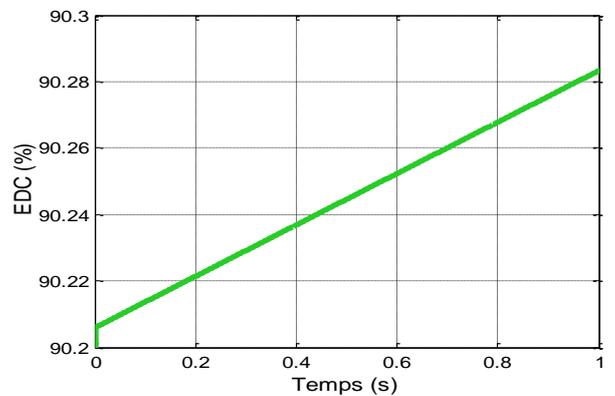
Courant du Batterie.



Tension du Batterie.

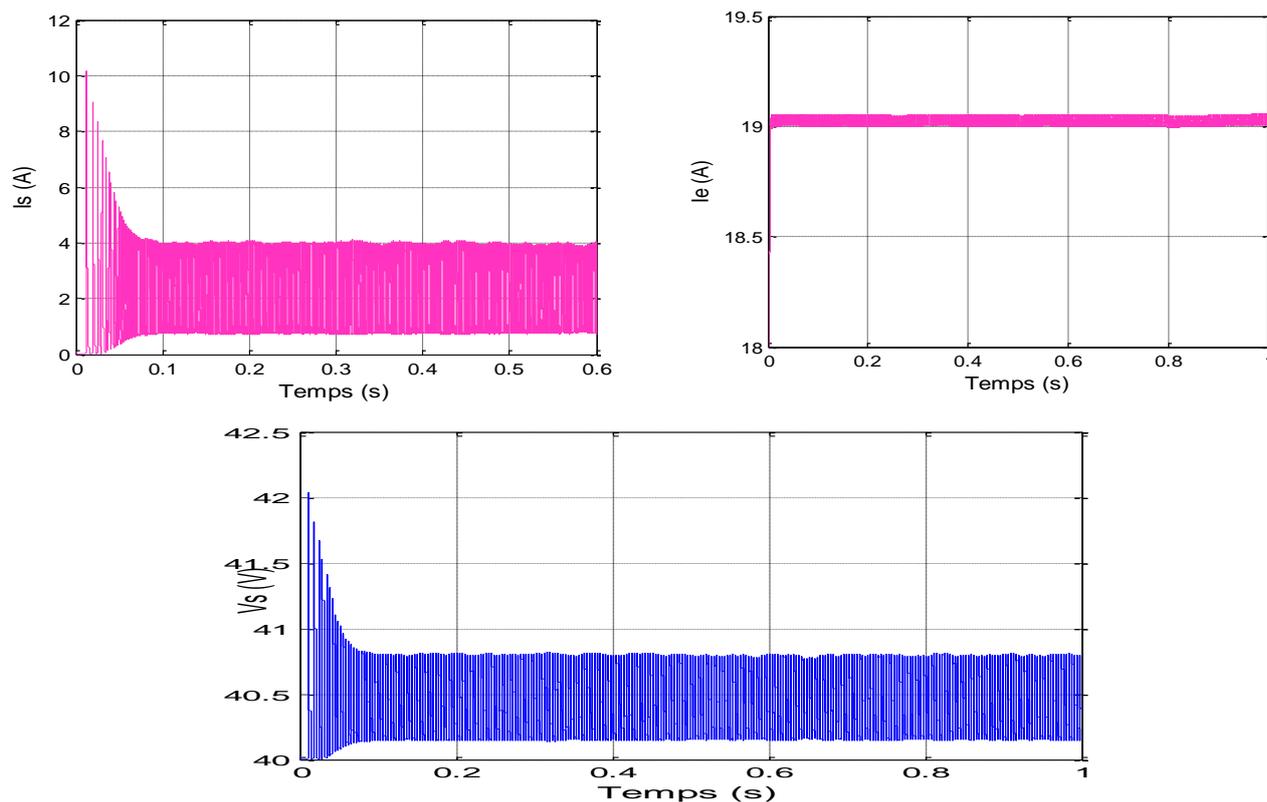


Tension du Batterie.



L'Etat de charge.

L'Etat de charge.



**Figure III.14** Simulation PI (a) et Hystérésis (b) (référence=20A).

On peut bien remarquer d'après la figure III.14 que le courant de l'inductance suit cette référence (20A) mais avec des ondulations qui dues au phénomène de commutation.

La tension de sortie de le hacheur atteinte le régime permanent après un régime transitoire un peu prononcé.

Nous pouvons constater que les correcteurs arrivent à bien réguler le courant de l'inductance lors des deux tests, pour le mode « buck » et « boost ».

La simulation met en évidence que le correcteur linéaire PI classique offre une régulation correcte de la valeur moyenne du courant de l'inductance. Néanmoins, les performances dynamiques du système sont limitées du fait de la linéarisation autour d'un point de fonctionnement unique.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons vu les batteries de stockage, leur modélisation et les différents types existants. Le comportement dynamique de la batterie pendant les deux régimes (charge et décharge) en utilisant un hacheur bidirectionnel, a été analysé et les résultats des simulations sont présentés sous l'environnement MATLAB.

Les performances d'un contrôleur PI et un contrôleur à hystérésis ont été examinés et évalués. Les résultats de la simulation montrent que les deux contrôleurs donnent des meilleures performances avec un temps de réponse inférieur et un dépassement réduit. Néanmoins, les performances dynamiques du système sont limitées du fait de la linéarisation autour d'un point de fonctionnement unique, le seul point pour lequel les performances des boucles sont optimales.

Pour améliorer et maintenir ces performances lorsque les paramètres du système varient considérablement, on va appliquer un contrôleur basé sur la logique floue, chose qu'on va présenter dans le chapitre suivant.

# CHAPITRE IV



## IV.1 Introduction

Aujourd'hui, la LF fait l'objet de nombreuses recherches dans plusieurs domaines. En fait, plusieurs recherches proposent de nouvelles approches basées sur les concepts de la LF pour aborder leurs problématiques. Un nombre croissant de domaines est concerné par l'exploitation de la théorie de la LF.

Ce chapitre présente un aspect bibliographique sur la logique floue et la synthèse des systèmes flous qui sont la base de la conception d'un régulateur flou de type PI

## IV.2 Historique de la logique floue [THE09]

C'est en 1965, à l'université de Berkeley, que Lofti Zadeh a développé la logique floue (LF) en s'appuyant sur sa théorie mathématique des ensembles flous (Fuzzy set) pour modéliser les connaissances imprécises et incertaines. Dès cet instant, plusieurs chercheurs voient dans les travaux de Zadeh une nouvelle méthode technologique permettant la création de machines intelligentes. C'est le cas de Mamdani qui fut le premier, au début des années 1970, à employer la LF pour contrôler le fonctionnement d'une machine à vapeur et des chaudières.

Après un développement académique, c'est dans les années 1980 que les premières applications industrielles de cette nouvelle méthode technologique font leur apparition au Japon dans le domaine de la commande industrielle. Depuis cette époque, la méthode a gagné l'Europe et les États-Unis et a été mise en œuvre dans de nombreux projets industriels.

## IV.3 Concept fondamentaux de la logique floue

### IV.3.1 Définition

La LF est une technologie pour le traitement de connaissances imprécises basées sur des termes linguistiques ; elle s'approche donc de la démarche humaine en ce sens que les variables traitées ne sont pas des variables logiques binaires, mais plutôt des variables linguistiques se rapprochant du langage humain. Elle a recourt le plus souvent aux connaissances d'experts ou d'opérateurs qualifiés travaillant sur le processus à contrôler.

Aujourd'hui, la LF fait l'objet de nombreuses recherches dans plusieurs domaines. En fait, plusieurs recherches proposent de nouvelles approches basées sur les concepts de la LF pour aborder. leurs problématiques. Un nombre croissant de domaines est concerné par l'exploitation de la théorie de la LF.

La LF a été conçue pour permettre aux ordinateurs d'effectuer des distinctions valables entre des niveaux de gris, en travaillant de façon similaire au raisonnement humain. Les technologies floues sont ainsi conçues pour incorporer la théorie de la LF dans le traitement de données moderne, de façon à créer des systèmes et des produits plus conviviaux.

### IV.3.2 Systèmes flous

Un système flou est une relation non linéaire qui permet de prendre des données numérique (entrée nettes) les fais passer dans un domaine flou, puis avoir une sortie scalaire (sortie nette).

La conception d'un système flou est constituée de trois étapes principales : la conversion des entrées en valeurs floues, l'évaluation des règles et la conversion du résultat des règles en une valeur numérique de sortie. La première étape, appelée la *fuzzification*, permet de découper une entrée en zones - fonctions d'appartenance que l'on désignera par des variables linguistiques. La seconde, soit l'inférence des règles, consiste en une évaluation des règles d'inférence entre les entrées et les sorties. La troisième étape, soit la *défuzzification*, consiste à convertir le résultat flou de l'inférence des règles en une valeur de sortie finale précise (nette). La structure générale de ce traitement est donnée par la figure IV.1

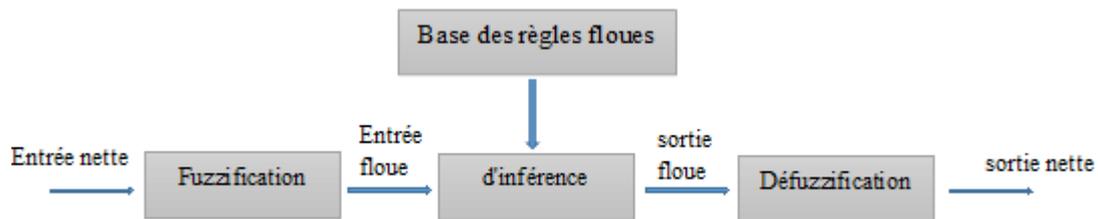


Figure IV. 1 Système flou.

### IV.3.3 Théorie des ensembles flous

La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques [Zad-65] est une théorie mathématique dont l'objectif principal est la modélisation des notions vagues et incertaines du langage naturel. Cette théorie permet d'exprimer l'idée d'une appartenance partielle d'un élément à un ensemble figures IV.2. La notion d'appartenance stricte est mal adaptée lorsqu'on manipule :

- Des données incertaines dont la validité est entachée de doute.
- Des données imprécises dont l'expression verbale est difficile.

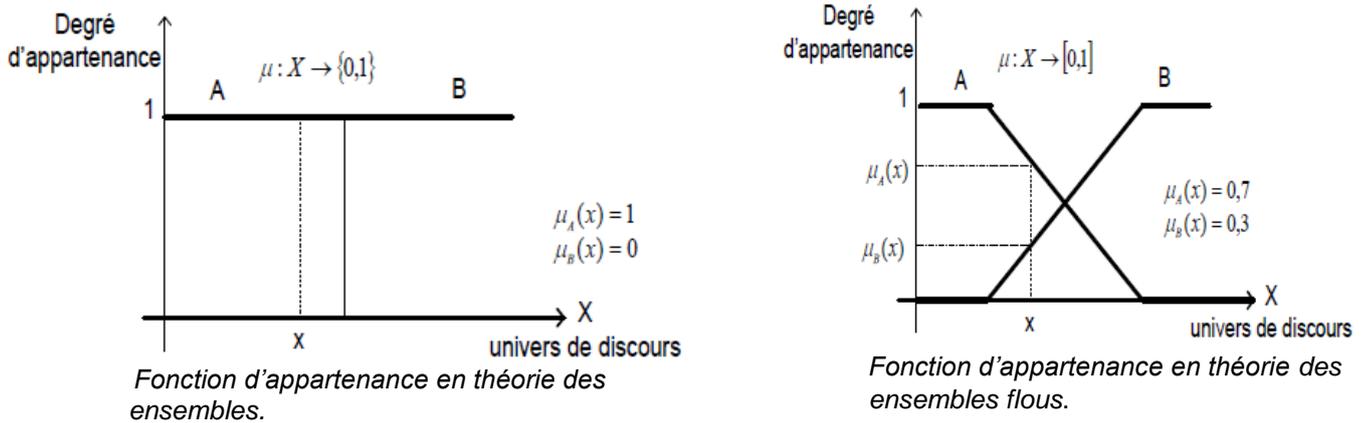


Figure IV. 2 Présentation des fonctions d'appartenance.

Dans le but de distinguer la LF de la logique classique, nous présentons un bref rappel de la théorie des ensembles classiques. La structure de la logique classique est limitée, étant donné qu'on ne peut exprimer des faits qu'avec vrai ou faux (0 ou 1). En effet, la logique classique ne considère pas la représentation intermédiaire ; par contre, la théorie des ensembles flous donne une représentation de ces catégories vagues. En conclusion, la logique classique présente l'avantage de la simplicité, mais est assez éloignée de la logique utilisée naturellement par l'être humain.

. Un ensemble flou sera alors utilisé pour modéliser l'incertitude et les imprécisions dans la connaissance.

#### IV.3.3.1 Notions caractéristiques d'un ensemble flou [THE09] [FRA11] [OUG09]

Pour un ensemble flou, il existe diverses notions complémentaires qui sont utilisées dans les applications courantes. Il s'agit de sa hauteur, son support et son noyau.

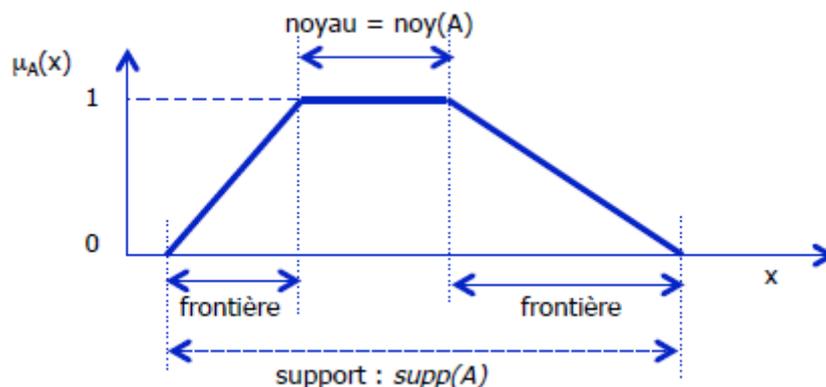


Figure IV. 3 Notions caractéristiques d'un ensemble flou.

**La hauteur** d'un ensemble flou  $A$ ,  $ht(A)$ , dans un univers du discours  $U$  est la borne supérieure de la fonction d'appartenance, qui est définie comme suit :

$$ht(A) = \max(\mu_A(x); x \in U)$$

**Le support** d'un ensemble flou A,  $\text{supp}(A)$ , dans un univers du discours U, est l'ensemble des éléments du domaine pour lesquels la réponse,  $\mu_A(x)$ , est non nulle, par rapport à A. Le support d'un ensemble flou est défini comme suit :

$$\text{supp}(A) = \{x \in U; \mu_A(x) \neq 0\}$$

**Le noyau** d'un ensemble flou A,  $\text{noy}(A)$ , dans un univers du discours U est l'ensemble des éléments du domaine pour lesquels le degré d'appartenance est égal à 1, par rapport à A. Le noyau d'un ensemble flou est défini comme suit :

$$\text{noy}(A) = \{x \in U; \mu_A(x) = 1\}$$

Un ensemble flou A est caractérisé par une fonction d'appartenance  $\mu_A(x)$  qui prend ses valeurs dans l'intervalle  $[0,1]$ , cette fonction nous donne le degré d'appartenance d'un élément à l'ensemble A.

L'ensemble flou constitué de l'élément X et de la valeur de sa fonction d'appartenance

$$A = \{(X, \mu_A(x))/x \in U\}$$

1-continu : A est noté sous la forme suivante :

$$A = \int_u \mu_A(x)/x$$

2-Discret : A est noté sous la forme suivante :

$$A = \sum_u \mu_A(x)/x$$

### IV.3.3.2 Variables linguistiques

La description d'une situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en général des variables dont les valeurs ne sont pas des nombres, mais des mots ou des phrases exprimés en langage naturel ou artificiel, la raison pour laquelle on utilise des mots ou des phrases à la place des nombres, est que le caractère linguistique est moins spécifique que le caractère numérique.

Elle est définie par le triplet suivant :  $(V, X, T_V)$  où V est le nom de la variable linguistique, X est le domaine physique associé à la variable V appelé aussi l'univers de discours et  $T_V$  est l'ensemble des caractéristiques floues de la variable V

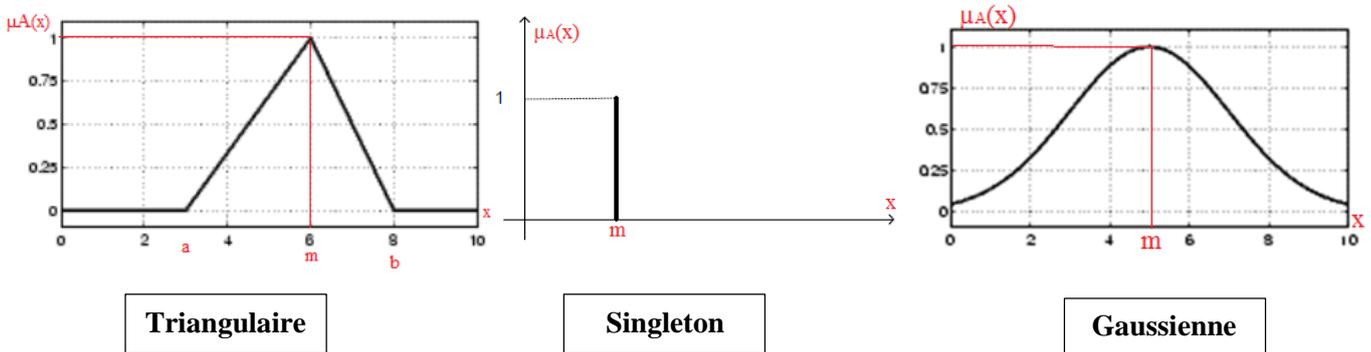
### IV.3.3.3 Fonction d'appartenance

L'approche floue se base sur des descriptions qualitatives du comportement d'un système. Ces descriptions, appelées **fonctions d'appartenance**, sont représentées par des variables linguistiques

On définit une fonction d'appartenance à un ensemble flou  $A$  comme une application qui accorde à tout élément  $x$  de l'univers  $U$  ( $A \subseteq U$ ) un degré d'appartenance entre 0 et 1 pour lequel  $x$  appartient à cet ensemble. Cette application généralise le concept d'appartenance classique et notée par :  $\mu_A(x)$ .

Selon le type de la fonction d'appartenance, différents types d'ensembles flous seront obtenus. Les fonctions d'appartenance pourraient être classées en deux groupes : celles qui sont faites de lignes droites et celles dont la forme est gaussienne. Les fonctions couramment utilisées sont :

- **Fonction d'appartenance triangulaire** : Elle est définie par une valeur inférieure  $a$ , une valeur supérieure  $b$  et une valeur modale  $m$  de sorte que :  $a < m < b$  :
- **Fonction d'appartenance singleton** : La fonction d'appartenance prend la valeur 0 dans tout l'univers de discours sauf au point  $m$  où il prend la valeur 1 :
- **Fonction d'appartenance gaussienne** : Elle est définie par sa moyenne  $m$  et son écart type  $\sigma$  :



Plusieurs opérations peuvent être appliquées aux ensembles flous tels que l'intersection, l'union, le complément, la T-norme ou intersection floue.

#### IV.3.3.4 Univers de discours

L'univers du discours d'une variable couvrira l'ensemble de la gamme d'une variable d'entrée ou de sortie. La LF est basée sur des variables floues dites variables linguistiques à valeurs linguistiques dans l'univers du discours  $U$ . L'univers du discours est partitionné en plusieurs sous-ensembles flous représentés par leurs fonctions d'appartenance. À chaque fonction d'appartenance, une valeur linguistique est associée. Chaque valeur linguistique constitue alors un ensemble flou de l'univers du discours.

#### IV.4 Systèmes à commande floue

Les méthodes de réglage et de commande de régulation industrielle sont des domaines d'application fréquents de la logique floue. Ces méthodes permettent d'obtenir une loi de commande efficace, sans faire appel à des développements théoriques importants. Elle incorpore des connaissances linguistiques sur la manière de piloter un processus difficile en prenant compte les expériences acquises par les utilisateurs et les opérateurs du processus à commander. La figure IV.5 représente une commande floue simplifiée.

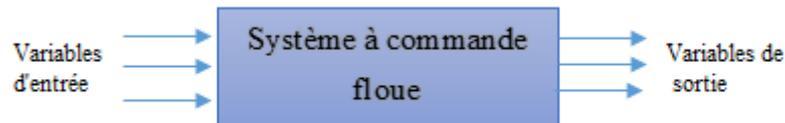


Figure IV. 4 Représentation simplifiée d'une commande floue.

#### IV.5 Contrôleurs flous

Les grandeurs de sortie d'un processus à commander et éventuellement d'autres mesures déterminantes pour saisir l'évolution dynamique du processus ainsi que les consignes définissent les variables d'entrée du contrôleur flou. Les variables de sortie de ce contrôleur sont les commandes à appliquer au processus.

Le contrôleur flou est constitué de 4 blocs principaux figure IV.6 : la base de connaissance, le système d'inférence, l'interface de fuzzification et l'interface de défuzzification. La base de connaissance est composée d'une base des données et d'une base de règles. La base des données contient des faits de la forme : pour les variables linguistiques d'entrée et de sortie du contrôleur flou. La base des règles contient des propositions de la forme : Si  $x_1$  est  $A_1$  et  $x_2$  est  $A_2$  alors  $y$  est  $B$ . Elle caractérise la stratégie de commande émise par l'expert sous forme de règles linguistiques.

Le système d'inférence est capable de raisonner à partir des informations contenues dans la base de connaissance et de faire des déductions.

Si B est une valeur linguistique, le contrôleur est dit de type Mamdani. Si est une valeur numérique ou une équation mathématique, alors le contrôleur est dit de type Takagi-Sugeno.

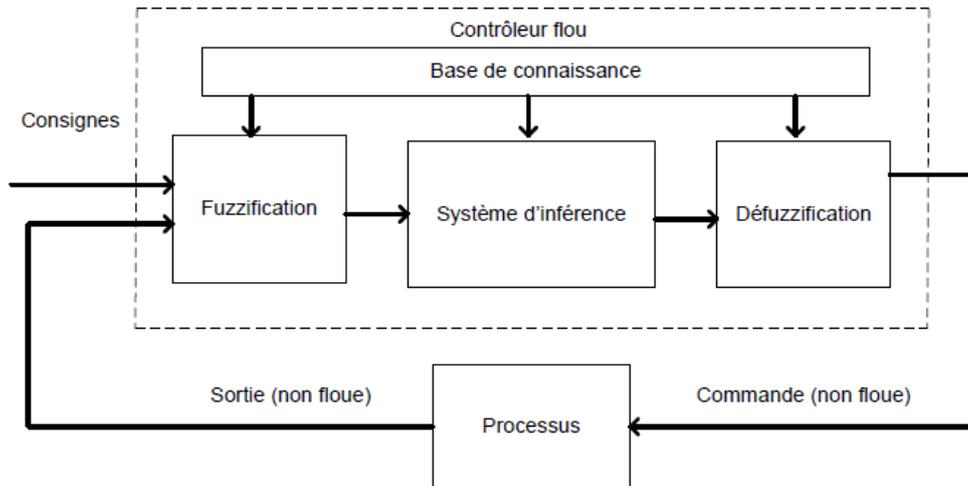


Figure IV. 5 Schéma synoptique d'un contrôleur flou.

Un contrôleur flou passe généralement par les étapes suivantes :

- \* Choix de la stratégie de fuzzification ;
- \* Etablissement de la base de règles ;
- \* Choix de la méthode d'inférence ;
- \* Choix de la stratégie de défuzzification.

#### IV.5.1 Fuzzification

La fuzzification est le premier traitement qui entre en compte dans la structure d'un système flou. Elle consiste à donner un degré d'appartenance à une valeur réelle d'entrée en fonction des ensembles flous.

Pour le système flou, la *fuzzification* des variables est une étape importante du processus de mise en œuvre. Les caractéristiques de cette étape sont habituellement déterminées par des experts ou des opérateurs qualifiés travaillant sur le processus et recourant le plus souvent à leurs connaissances.

Les étapes de la fuzzification consistent à :

1. Etablir les variables linguistiques ;

2. Établir les quantificateurs flous (nombre de valeurs linguistiques) ;
3. Attribuer une signification numérique à chaque quantificateur flou : fonction d'appartenance.

### IV.5.2 base de règles

Une base de règles floues est une collection de règles qui permet de lier les variables floues d'entrée et de sortie. La description de la commande se fait par l'intermédiaire de ces règles qui ont la forme suivante :

Si  $x_1$  est  $A_1$  et  $x_2$  est  $A_2$  Alors  $y$  est  $B$

Où  $x_1, x_2$  et  $y$  sont les grandeurs physiques caractéristiques du système.  $A_1, A_2$  et  $B$  sont les termes linguistiques. Le ET de conjonction est réalisé en effectuant le minimum entre les degrés de vérité des propositions floues  $x_1$  est  $A_1$  et  $x_2$  est  $A_2$ .

### IV.5.3 Méthode d'inférence floue [THE09] [OUG09]

Elle permet de calculer l'ensemble flou associé à la commande et se fait par les opérations d'inférence floue et l'agrégation des règles.

L'inférence floue repose sur l'utilisation d'un opérateur d'implication floue pour chaque règle à analyser. Cet opérateur quantifie la force de liaison entre la prémisse et la conclusion de la règle.

Dans la littérature, il existe plusieurs types de systèmes d'inférence floue qui peuvent être mis en œuvre dans les systèmes flous. Par exemple, la méthode de Mamdani qui utilise les opérateurs min et max pour l'implication et l'agrégation, ou encore la méthode de Larsen qui utilise un produit et l'opérateur max, ou celle de Sugeno qui utilise une fonction linéaire ou une constante pour les signaux de sortie.

La principale différence entre les méthodes de Mamdani et Sugeno est que les fonctions d'appartenance des sorties de type Sugeno sont soit linéaires ou soit constantes.

### IV.5.4 Défuzzification

Le système d'inférence fournit une sortie floue par l'évaluation des règles à la suite d'une ou plusieurs entrées réelles. Se pose alors le problème de lui donner une représentation floue approximative ou une valeur précise, c'est la défuzzification.

L'étape de défuzzification consiste à transformer l'ensemble flou résultant de l'agrégation des règles en une grandeur de commande précise à appliquer au processus. Dans la littérature, il existe plusieurs stratégies pour réaliser cette opération telle que :

- la méthode du centre de gravité ;
- la méthode des maximums ;
- la méthode des surfaces ;
- la méthode des hauteurs.

La méthode de défuzzification par le centre de gravité est la méthode la plus utilisée en commande floue du fait qu'elle fournit intuitivement la valeur la plus représentative de l'ensemble flou issu de l'agrégation des règles.

## IV.6 Conception d'un CF

Les étapes principales pour concevoir un CF sont les suivantes :

- choix des variables linguistiques ;
- choix des fonctions d'appartenance ;
- choix de la méthode d'inférence ;
- choix de la stratégie de défuzzification.

### IV.6.1 Application du contrôleur PI –flou à la régulation de l'hacheur

Les contrôleurs à structures variables basés sur l'idée du contrôle par mode glissant sont apparus dans un but d'apporter des améliorations au contrôleur classique PI.

La technique du contrôle adaptatif peut être classée comme : contrôle auto-adaptatif, par modèle de référence, par mode glissant ou à structure variable.

Les contrôleurs adaptatifs donnent de meilleures performances face aux variations paramétriques et aux perturbations telles que les applications de charges relativement aux régulateurs classiques PI. Mais ils demandent un calcul plus complexe.

La commande adaptative effectue une identification en temps réel pour actualiser le modèle du système.

Il existe deux types de structures de commande sont utilisées d'une manière générale :

- Indirecte où on estime les paramètres en ligne par un mécanisme d'adaptation. La loi de commande est calculée à partir des paramètres estimés comme nous le voyons sur la figure IV.9.
- Directe où on peut également calculer les paramètres du régulateur à partir du mécanisme d'adaptation paramétrique.

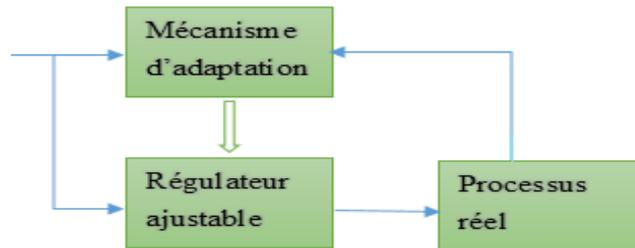


Figure IV. 6 Structure de base de la commande adaptative utilisée.

### IV.6.1.1 Description du contrôleur flou adaptif

#### IV.6.1.1.a Fuzzification

Les entrées du correcteur LF sont :

$e$  : l'erreur elle est définie par :

$$e = I_{L\text{ref}}(t) - I_L(t)$$

$$\Delta e = e(t) - e(t-1) / T_e ; T_e = \text{Temps d'échantillonnage.}$$

On considère pour chaque variable d'entrée (l'erreur  $e$ , la dérivé d'erreur) sous-ensemble flous notés  $\{Nb, Nm, Ns, ZR, Ps, Pm, Pb\}$  sur l'univers de discours avec : Grand Négatif, Négatif moyen, Petit Négatif, Zéro, Petit Positive, Positif Moyen, Grand Positif. Ils sont définis sur l'ensemble des réels. De plus, on admet 2 actions possibles pour la variation des sorties qui sont les poids attribuées aux paramètres du régulateur PI définies par les sous-ensembles flous  $\{B, S\}$  sur l'univers de discours avec

Les figures IV.7, IV.8 présentent l'allure de ces différents sous-ensembles flous.

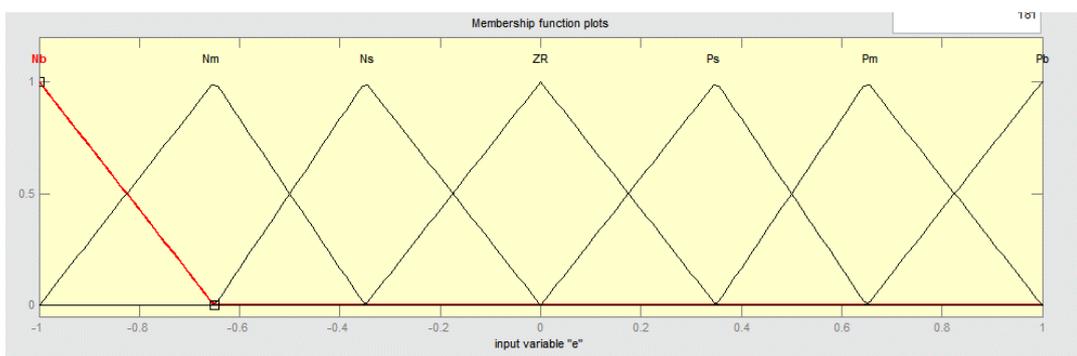


Figure IV. 7 Formes des fonctions d'appartenances des entrées du régulateur flou adaptatif.

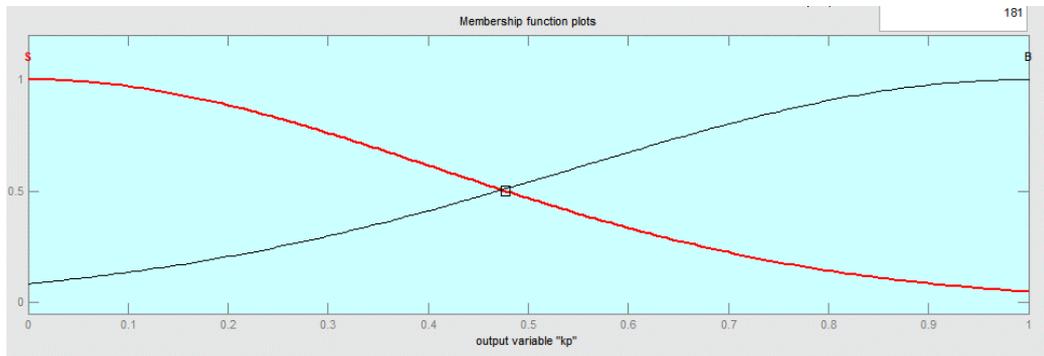


Figure IV. 8 Formes des fonctions d'appartenances des sorties du régulateur flou adaptatif.

### IV.6.1.1.b Inférence

La stratégie de réglage dépend essentiellement des inférences adoptées. Il s'agit souvent d'inférence avec plusieurs règles qui peuvent être activées en même temps. Ces règles doivent tenir compte du comportement du système à régler, ainsi que des buts du réglage envisagé.

Les matrices d'inférence prendront les formes suivantes :

Tableau IV. 1 Matrice d'inférence pour la sortie  $k_p$ .

$K_p$	Nb	Nm	Ns	Zr	Ps	Pm	Pb
Nb	B	S	S	S	S	S	B
Nm	B	B	S	S	S	B	B
Ns	B	B	B	S	B	B	B
Zr	B	B	B	B	B	B	B
Ps	B	B	B	S	B	B	B
Pm	B	B	S	S	S	B	B
Pb	B	S	S	S	S	S	B

Tableau IV. 2 Matrice d'inférence pour la sortie  $k_i$ .

Ki	Nb	Nm	Ns	Zr	Ps	Pm	Pb
Nb	B	S	S	S	S	S	B
Nm	B	B	S	S	S	B	B
Ns	B	B	B	S	B	B	B
Zr	B	B	B	B	B	B	B
Ps	B	B	B	S	B	B	B
Pm	B	B	S	S	S	B	B
Pb	B	S	S	S	S	S	B

IV.6.1.1.c Défuzzification

La méthode d'inférence utilisée est la méthode MAX-MIN, on prendre comme critère de Défuzzification la méthode de centre de gravité.

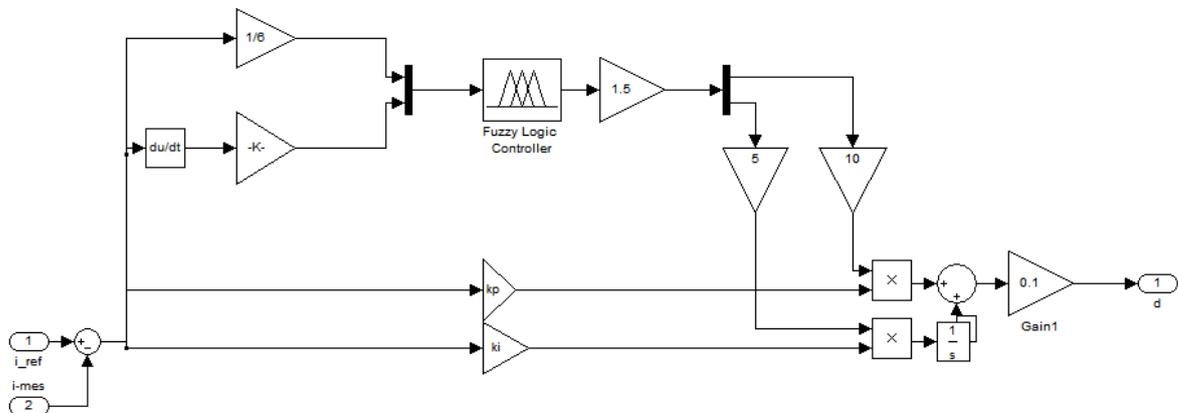
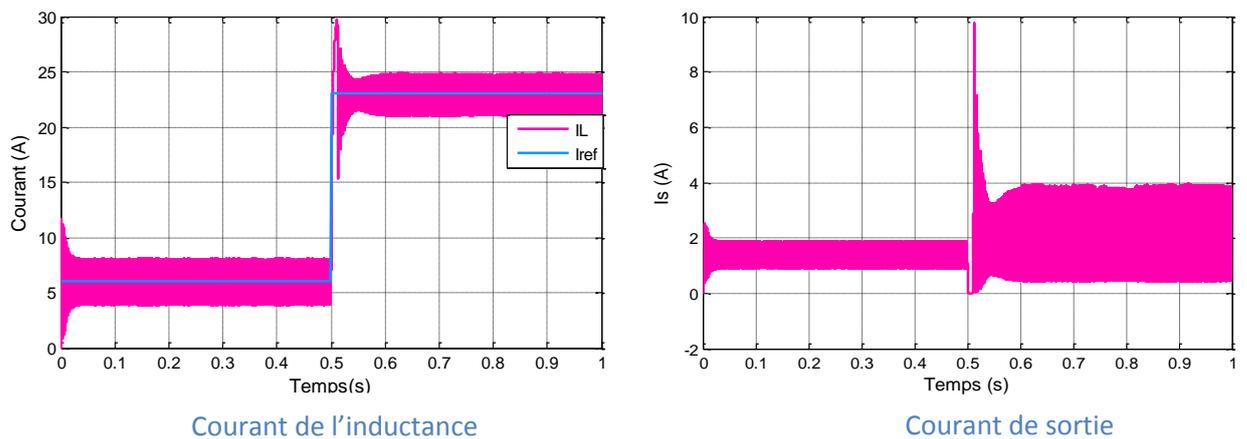
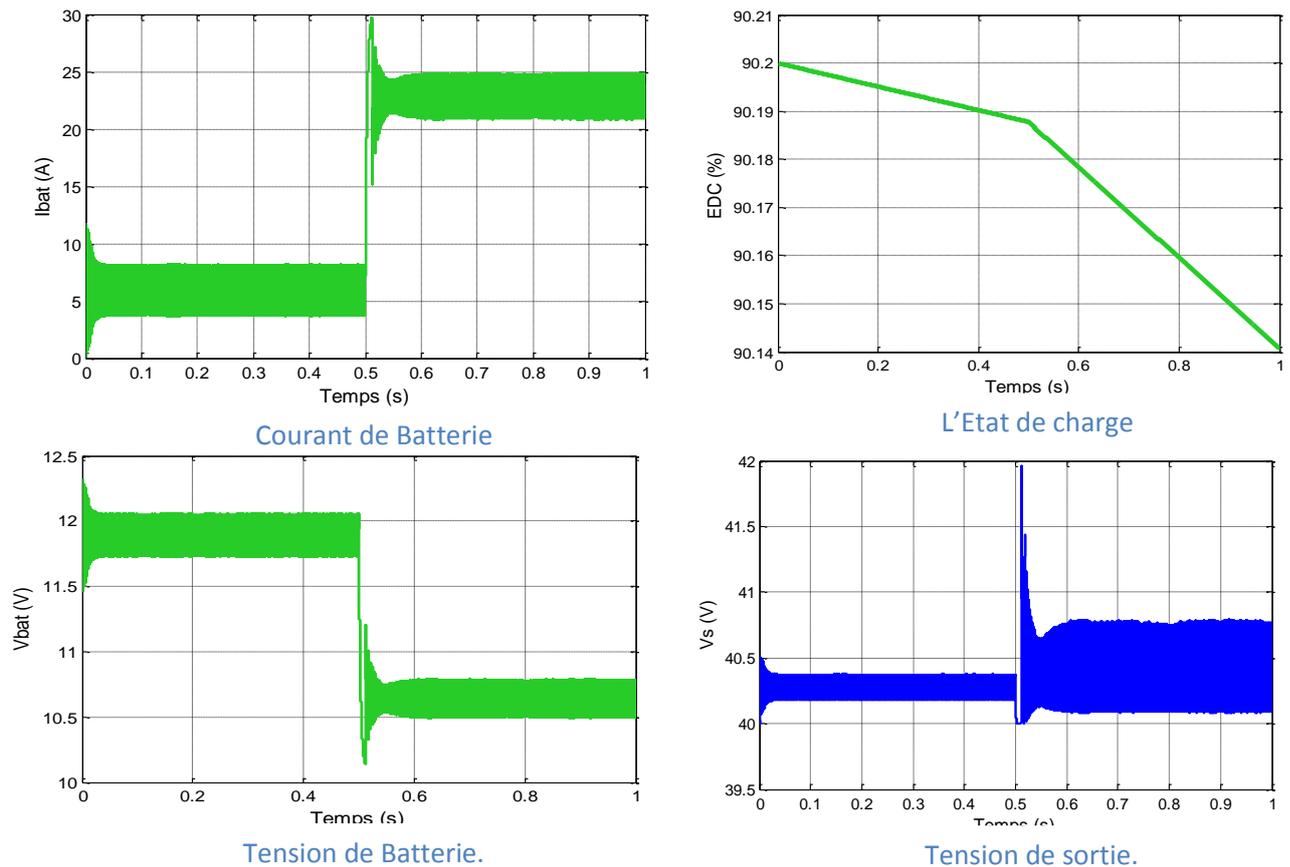


Figure IV. 9 Schéma bloc Simulink du contrôleur flou adaptatif utilisé.

IV.6.1.1.d Résultats de simulation





**Figure IV.** Résultats de simulation d'un régulateur PI adaptatif.

On peut bien remarquer d'après la Figure IV.12 que le courant de l'inductance suit la référence qui varie d'une valeur de 6 A à 23 A, mais avec des ondulations faibles par rapport à celles obtenues dans le cas de réglage classique.

#### IV.6.1.2 Description du contrôleur flou incrémental

##### IV.6.1.2.a Fuzzification

Les entrées du correcteur sont l'erreur et la dérivée de l'erreur, Le régulateur admet les 5 ensembles  $\{GN, PN, Z, PP, GP\}$  pour chaque variable d'entrée Grand Négatif, Négatif, Zéro, Positif et Grand Positif. et Pour la sortie on a les mêmes ensembles sur l'univers de discours.

Les Figures IV.10, IV.11 présentent l'allure de ces sous-ensembles flous.

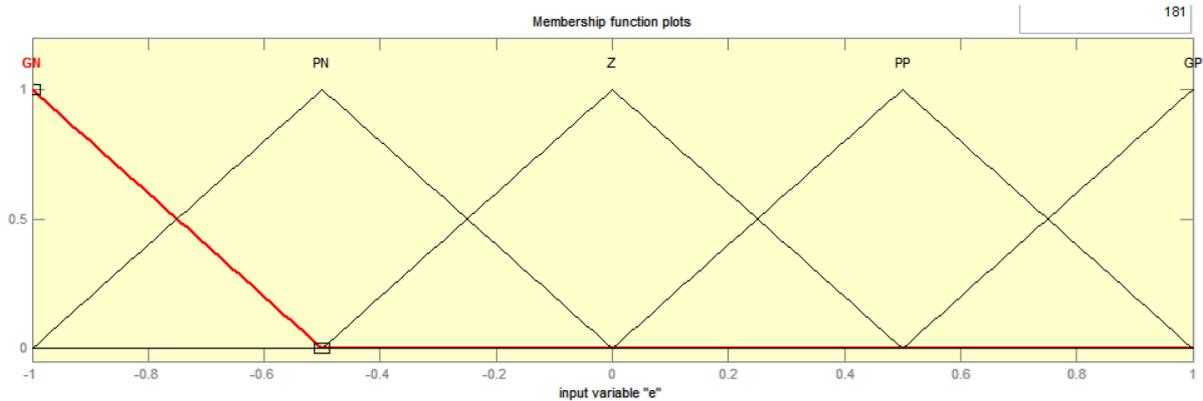


Figure IV. 10 Formes des fonctions d'appartenances des entrées du régulateur flou adaptatif.

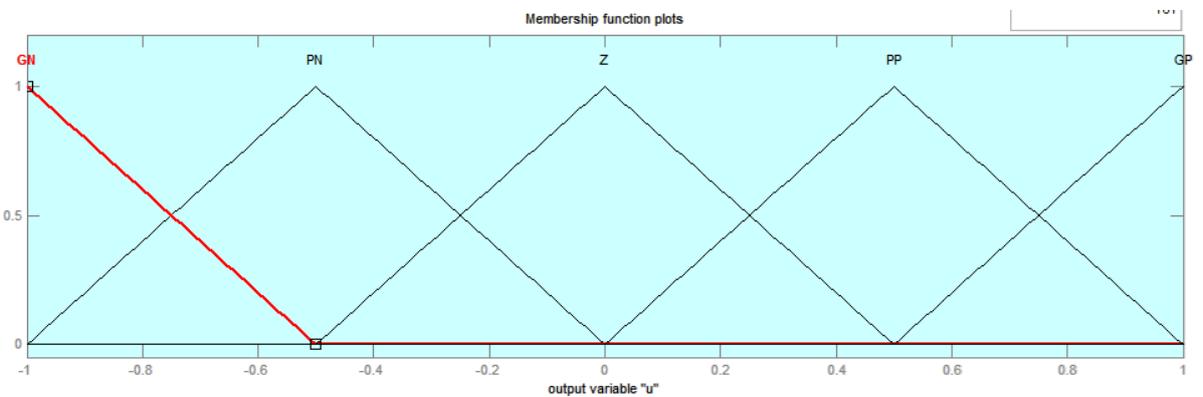


Figure IV. 11 Formes des fonctions d'appartenances des sorties du régulateur flou adaptatif.

### IV.6.1.2.b Inférence

Notre matrice d'inférence prendra la forme suivante :

Tableau IV. 3 Matrice d'inférence pour la sortie de la commande.

U	GN	PN	Z	PP	GP
GN	GN	GN	GN	GN	Z
PN	GN	PN	PN	Z	PP
Z	PN	PN	Z	PP	PP
PP	PN	Z	PP	PP	GP
GP	Z	GP	GP	GP	GP

### IV.6.1.2.c Défuzzification

La méthode d'inférence utilisée est la méthode MAX-MIN, on prendre comme critère de Défuzzification la méthode de centre de gravité.

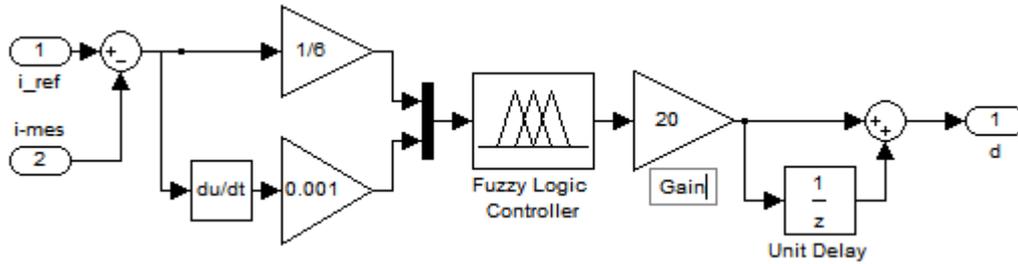
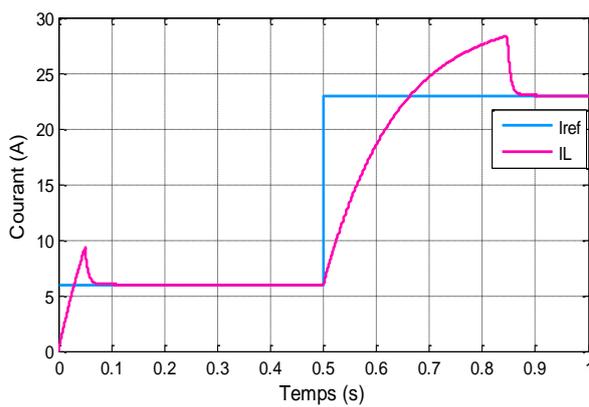


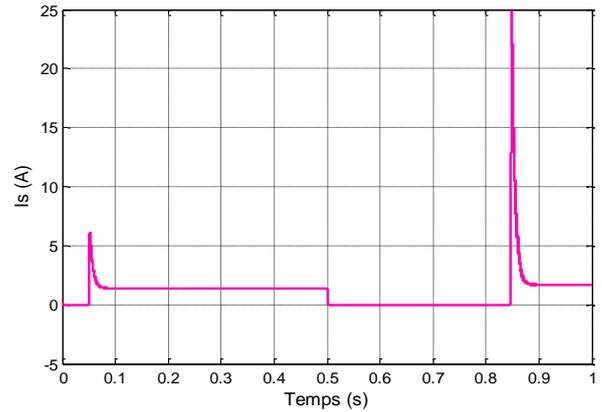
Figure IV. 12 Schéma bloc Simulink du contrôleur flou incrémentale utilisé.

### IV.6.1.2.d Résultats de simulation

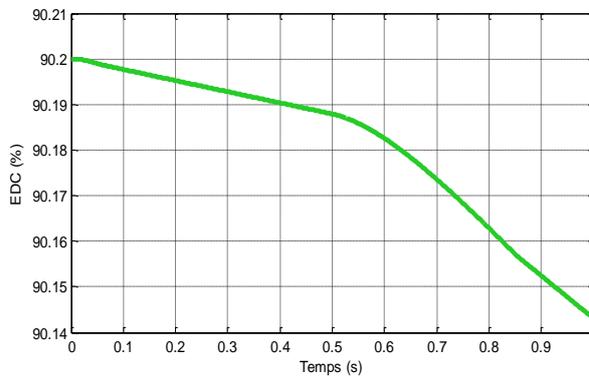
La figure IV.17 suivante représente les résultats de simulation d'un régulateur PI incrémentale.



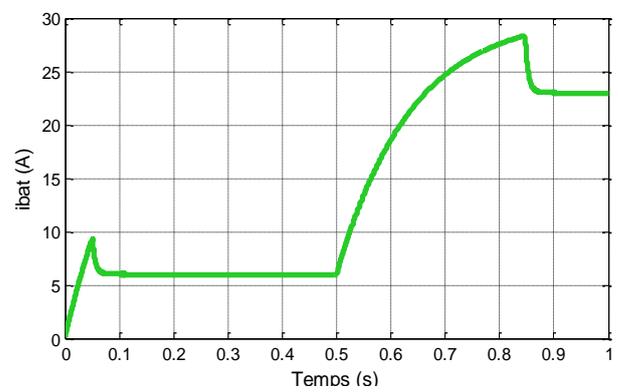
Courant de l'inductance



Courant de sortie



L'Etat de Charge



Courant de Batterie.

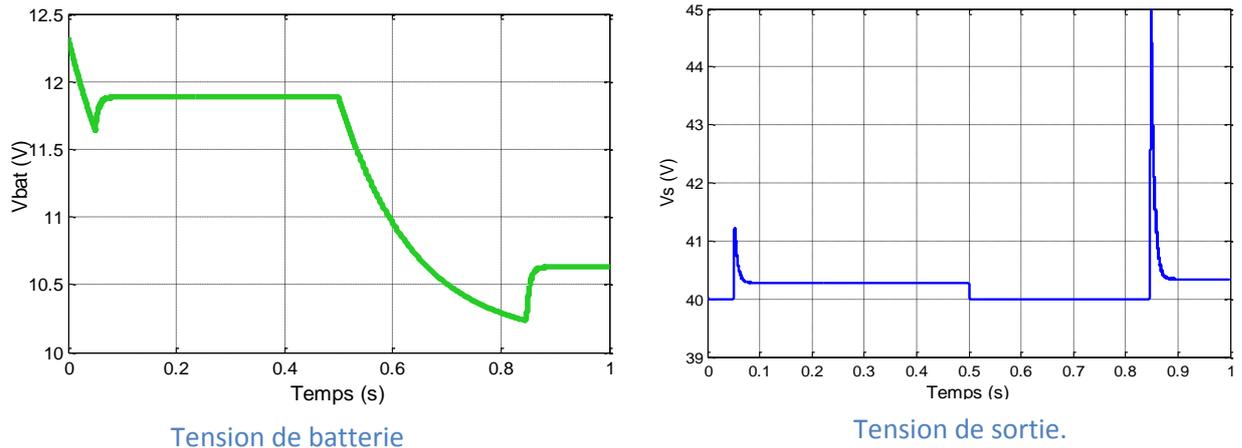


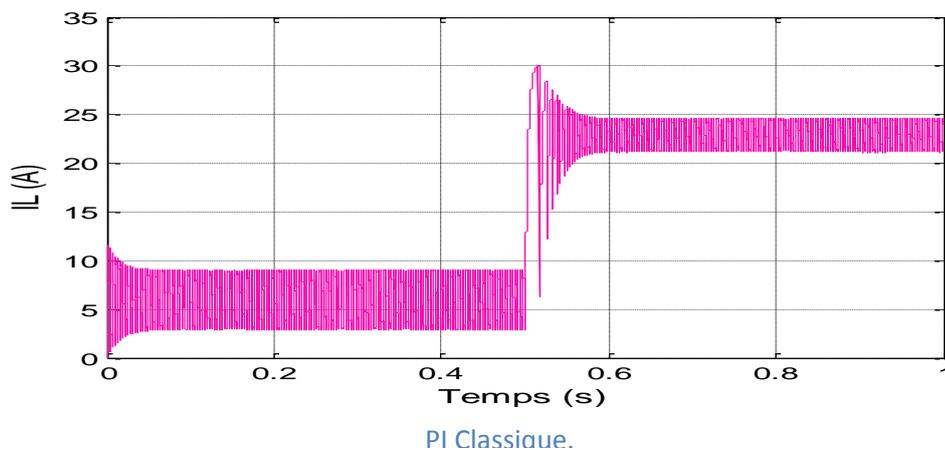
Figure IV. 13 Résultats de simulation d'un régulateur PI incrémental (performances).

On peut remarquer d'après la Figure IV.13 que le courant de l'inductance suit leur référence avec une bonne dynamique (un temps de réponse très rapide et un dépassement réduit). On peut constater que cette courbe présente des oscillations très faibles comparativement à celle obtenue par la commande classique.

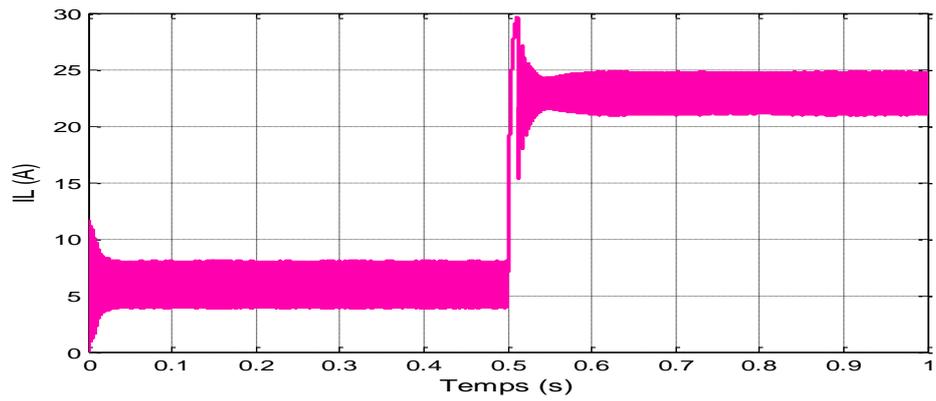
#### IV.6.2 Test de robustesse

La robustesse peut être décrite par la façon à maintenir le système stable malgré les variations du comportement du système.

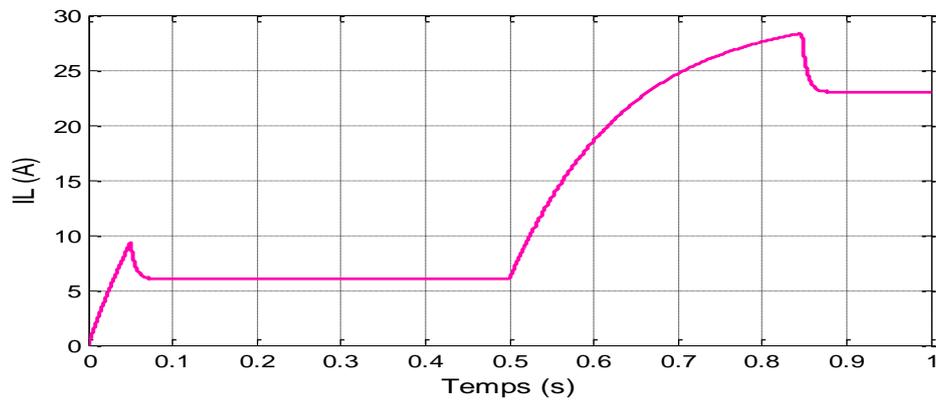
Pour tester la robustesse de la commande floue vis-à-vis la variation paramétrique, on va varier la résistance  $R$  et l'inductance  $L$ , on sait bien que les régulateurs sont dimensionnés en fonction de ces paramètres, donc leur variation affectera directement les performances de régulateur.



PI Classique.

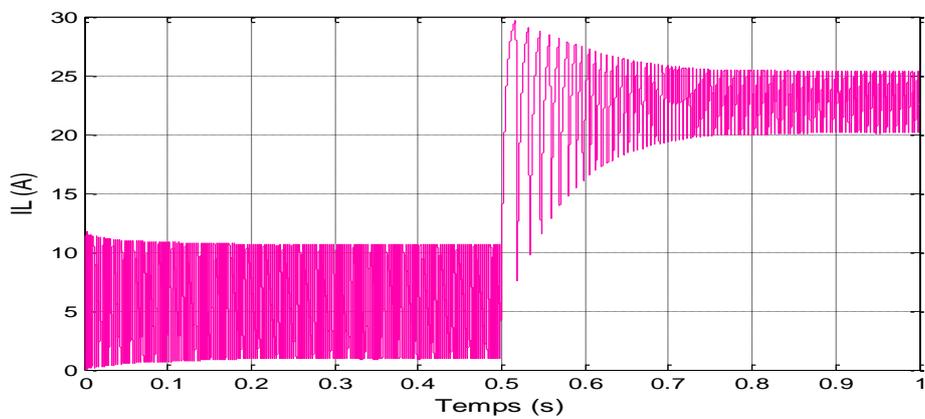


PI Adaptatif.

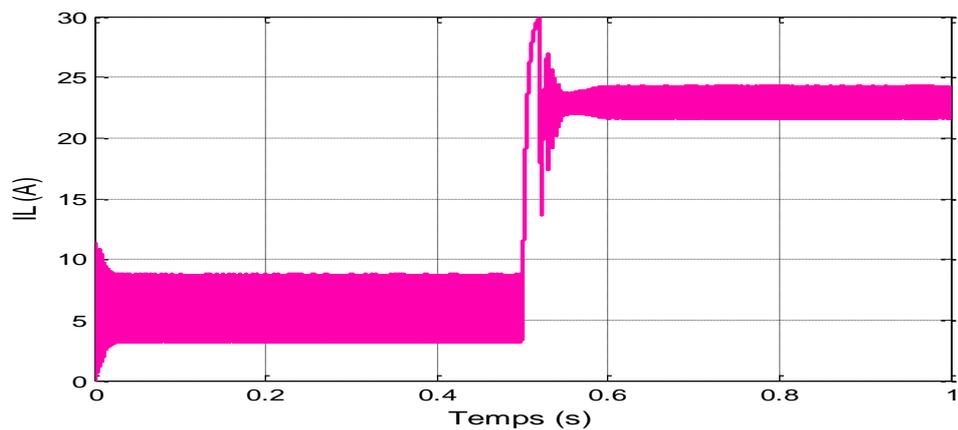


PI incrémental

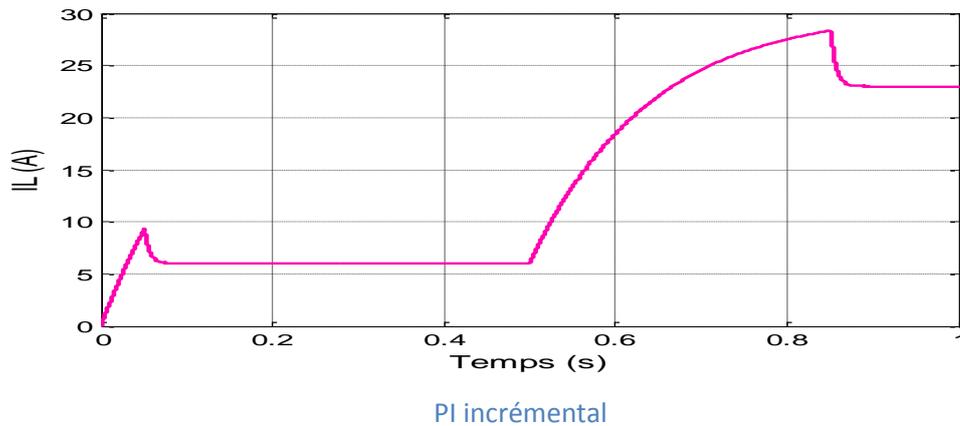
Figure IV. 14 Test de robustesse pour la variation de la résistance ( $R+50\%R$ ).



PI Classique.



PI Adaptatif.



**Figure IV. 15** Test de robustesse pour la variation de l'inductance ( $L+50\%L$ ).

Les figures **IV.14** et **IV.15** illustrent le comportement transitoire du courant de l'inductance, respectivement lors de la variation de la résistance et l'inductance. On peut constater que les deux régulateurs flous donnent des meilleures performances dynamiques, ce qui montre leur robustesse vis-à-vis la variation paramétriques.

## Conclusion

Dans ce chapitre on a démontré l'efficacité de la commande floue par rapport à la commande classique dans la mesure où nous permet d'optimiser et contrôler la chaîne de conversion solaire. Les résultats des simulations montrent que les contrôleurs (Flou adaptatif et incrémental) donnent une meilleure réponse transitoire par rapport au PI avec un temps de réponse inférieur et un dépassement réduit. D'autre part, ils arrivent à maintenir de bonnes performances et une bonne stabilité en présence de variation paramétrique comparativement au régulateur PI.



# CONCLUSION

Les systèmes photovoltaïques autonomes représentent une solution idéale pour la fourniture de l'électricité pour les sites isolés.

Ce travail a porté sur l'utilisation des techniques d'intelligences artificielles pour le stockage d'énergie photovoltaïque. Il était intéressant de penser à l'utilisation de cette technique dans le domaine des énergies renouvelables tenant compte les bons résultats obtenus au cours des dernières années dans différents domaines (robotique, traitement de l'image etc.),

L'adaptation des niveaux de tension et de courant des éléments de l'énergie électrique constituent un système photovoltaïque (panneaux solaires, charge, batterie) nécessite un convertisseur statique DC-DC (boost et buck-boost).

En effet, plusieurs commandes ont été proposées et validées à travers les résultats de simulation.

Dans un premier temps, on a étudié le premier type des convertisseurs DC-DC le hacheur survolteur couplé à un générateur PV et commandé par l'algorithme de contrôle MPPT numérique (P&O). On peut conclure que l'optimisation de la puissance entre la production et la charge peut être assurée par un étage d'adaptation constituant d'un hacheur boost contrôlé par un algorithme MPPT.

Nous avons présenté, dans un deuxième temps, la modélisation et la commande du convertisseur buck-boost tenant compte des différentes topologies de la structure de convertisseur durant les deux phases de fonctionnement (charge et décharge de la batterie). Pour cela, on a élaboré les deux techniques de commande (PI en mode boost, Hystérésis en mode buck).

La commande par logique floue a été choisie dans ce mémoire. Comme il s'agit d'une méthode de commande nouvelle, les notions de bases ont été présentées. Les principes de cette commande ont été introduits tout en orientant notre choix de cette méthode pour commander l'hacheur boost.

La technique de commande floue pour les deux contrôleurs, flou adaptatif et incrémental, est aussi testée pour des variations paramétriques du système. Les résultats obtenus ont permis de juger que ces techniques présentent une bonne robustesse en présence des variations paramétriques comparativement au régulateur PI qui ne se tolère pas vis-à-vis ces variations.

Enfin, ce travail est un prolongement des études réalisées sur la conversion photovoltaïque et a besoin d'une continuation dans plusieurs directions. D'après les résultats obtenus, il serait intéressant d'envisager les perspectives et suggestions suivantes :

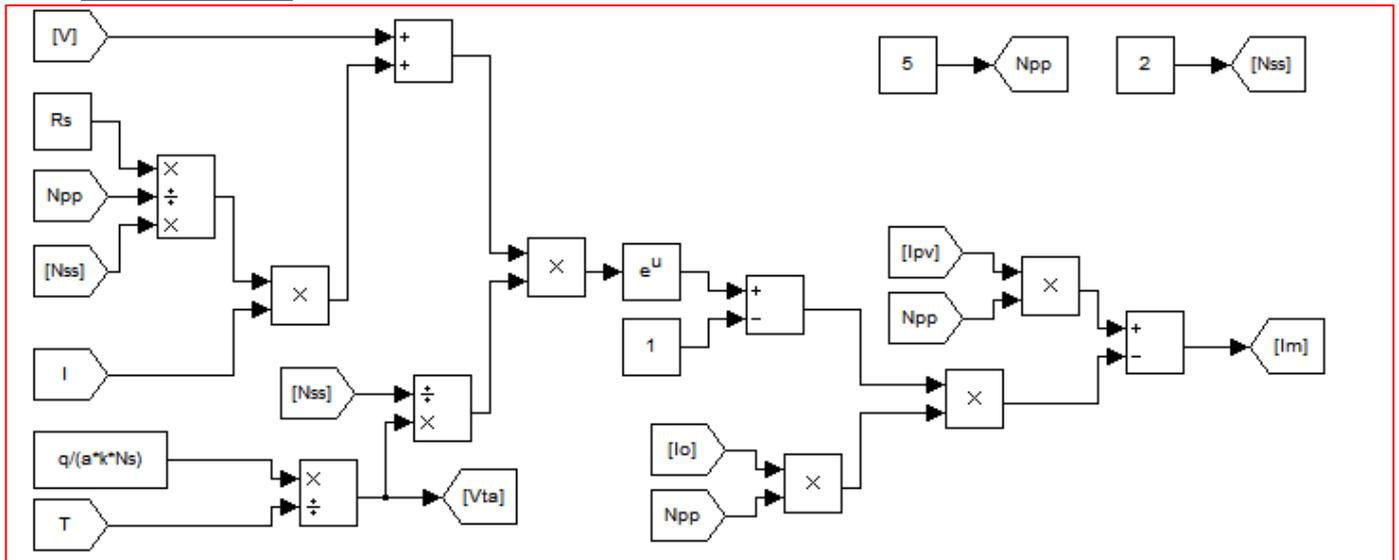
- Réalisation pratique d'un banc de laboratoire présente le système de stockage solaire.
- Application d'autres techniques de commandes basées sur l'intelligence artificielle (les réseaux de neurones, neuro-flou et les algorithmes génétiques).
- Gestion énergétique et supervision globale des différents éléments constituant ce système.

# ANNEXES

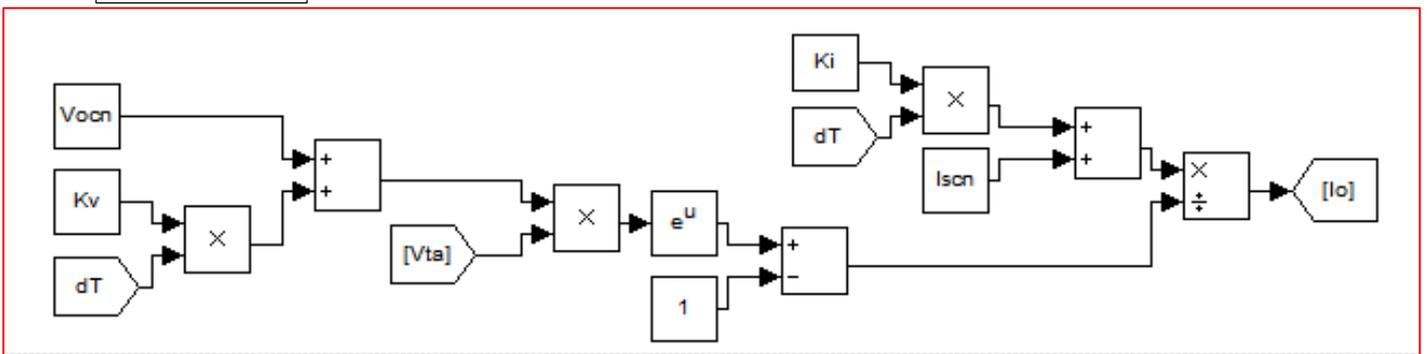
ANNEXES A

Le modèle mathématique du GPV utilisé calcule tous les paramètres du GPV.

Courant  $I_m$  :



Courant  $I_o$  :



Courant  $I_{pv}$  :

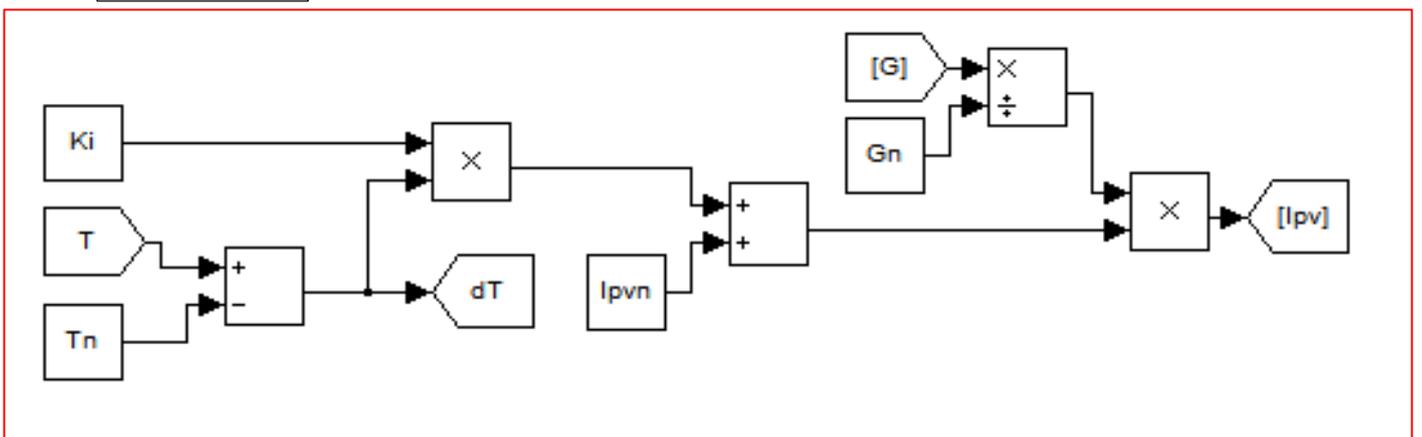


Figure A. 1 Vue de l'ensemble du modèle du GPV.

ANNEXES B

Estimation d'irradiation solaire :

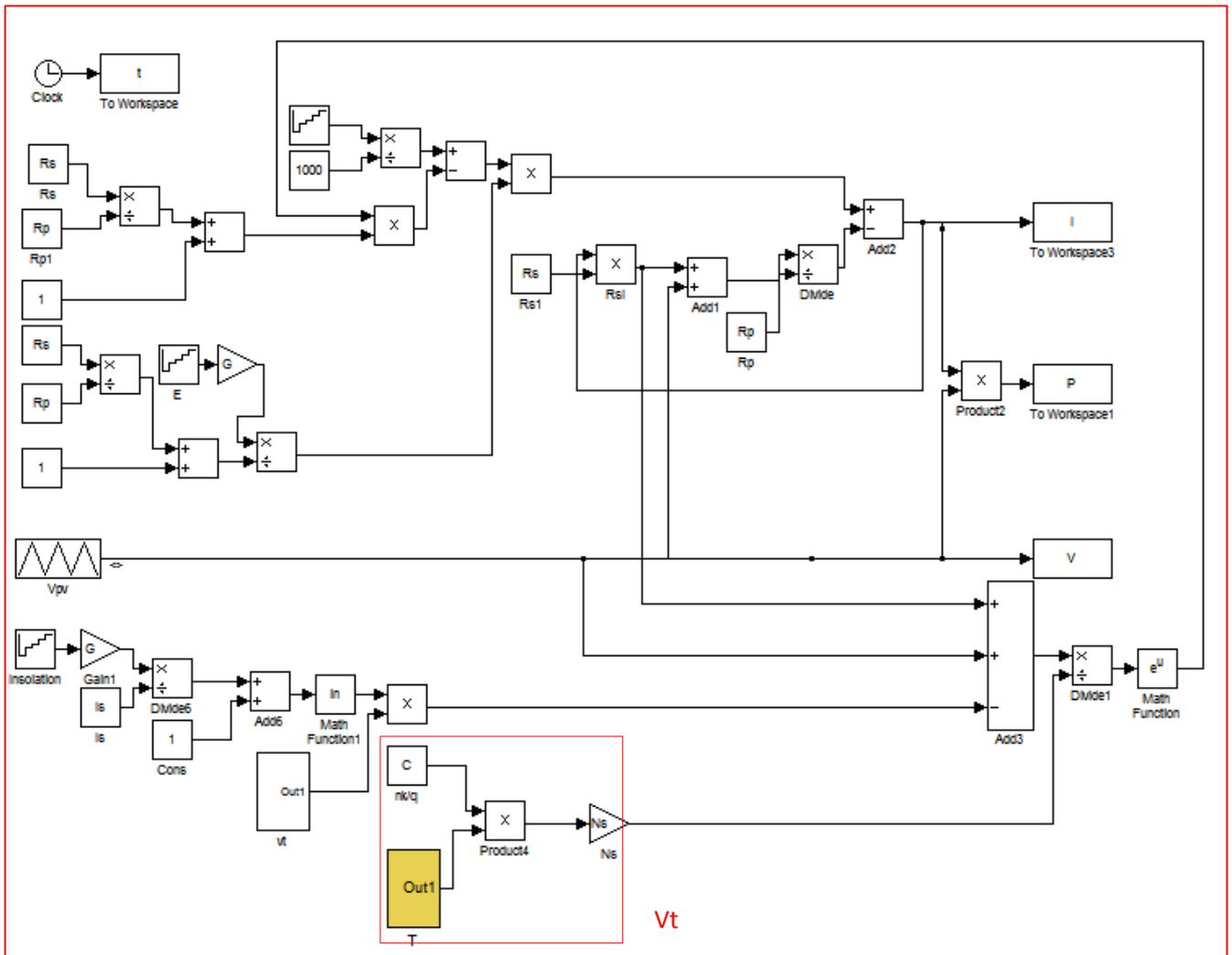


Figure B. 1 Schéma bloc sous Matlab/Simulink..

**Programme de simulation**

```
Npp=5;

Nss=2;

Rs=0.2210*Nss/Npp;

Rp=415.4050*Nss/Npp;

Ns=54;           %Nombre de cellules en série

% constants

k=1.3807e-023;

a=1.3;           %Le coefficient de non idéalité

q=1.6022e-019;  % C=ak/q

Ta=20;          %Température ambiante, (K)

Tfn=43          %Température de fonctionnement
                normale du module, (K)

Is=9e-8;        %Courant de saturation
                inverse de la diode, (A)

G=5.45e-3;      %Rapprot entre Iph
                et l'irradiation solaire

vpv1=35;

vpv=Npp*vpv1;

vref=100;

vp=vref+40;

ipv=7.6
```

## ANNEXES C

## Estimation de la température

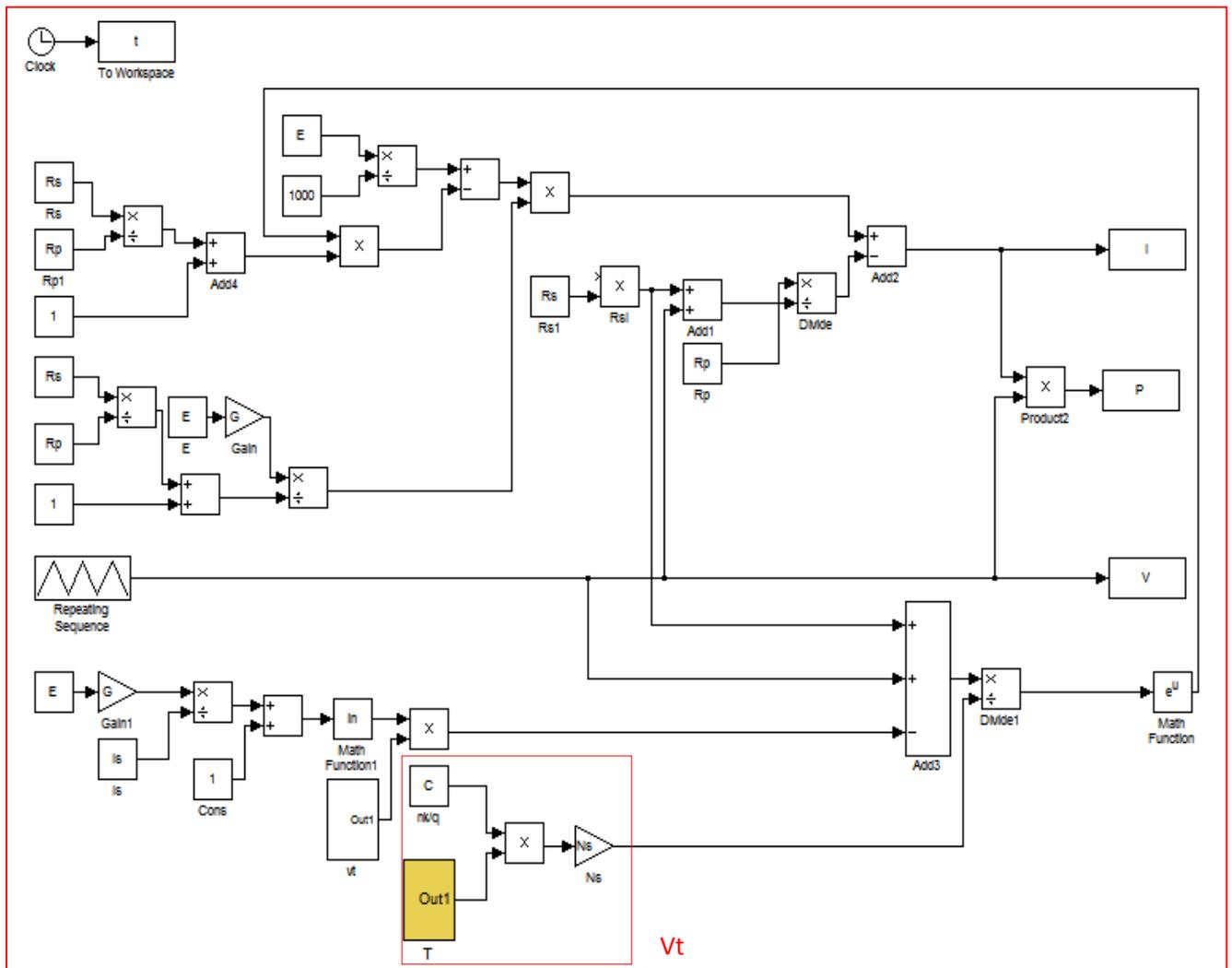


Figure C. 1 Schéma bloc sous Matlab/Simulink..

Programme de simulation

```
Npp=5;

Nss=2;

Rs=0.2210*Nss/Npp;

Rp=415.4050*Nss/Npp;

Ns=54;                                %Nombre de cellules en série

%% Constants

k=1.3807e-023;

a=1.3;

q=1.6022e-019;                        % C=ak/q

Tfn=43                                %Température de fonctionnement
                                       Normale du module, (K)

Is=9e-13                               %Courant de saturation
                                       inverse de la diode, (A)

G=5.45e-3                              %Rapport entre Iph et
                                       L'irradiation solaire

E=1000
```

## ANNEXES D

## Programme de simulation de système PV (Paramètres de dimensionnement)

```

%%Paramètres du module PV
Rs =0.2210;
Rp = 415.4050;
Ns=54;
Vmp=26.3;           %Tension maximal[V]
Imp=7.61;           %Courant maximal[A]
Pmax=200.143;       %Puissance maximale [W]
Vocn =32.9000;     %Voc Tension à circuit
                    ouvert[V]
Iscn =8.2140;       %Icc Courant de
                    court-circuit) [A]
Ki = 0.0032;        %Courant/température
                    coefficient [A/K]
Kv = -0.1230;       %Tension/température
                    coefficient [V/K]

%% Constants
k= 1.3807e-023;
a= 1.3;
q =1.6022e-019;     %La charge d'électron
%% Nominales valeurs
Gn=1000;
Tn =273+25;
Npp=5;              %Nombre de module
                    connecté en parallèle
Nss=2;              % Nombre de module
                    connecté en série
Ns=54;              %Nombre des cellules
                    connectés en série
f = 20000;          %Fréquence de commutation
T= 1/f;             %Période de commutation

```

```

% Paramètre du Boost
Vin=52;
Vout=72.3;
Iout=27;
Iin=37.5;
F=20e003;
T=1/f
d=1-(Vin/Vout)           %la valeur du rapport
                          cyclique

T=d*Ts;
R=Vout/Iout
di=1;                   %les oscillations du
                          courant dans l'inductance
dv=0.1;                 %les oscillations de
                          la tension du sortie

Cout=(d*Iin)/(Fs*Dv)
Cin=202e-005;
L=(d*Vin)/(f*di)
% Paramètre du Batterie
R_bat= 0.0004;
C_bat= 500e-3;
VC_init= 48
% Paramètre du Buck-Boost
vin=35;
vref=48;
vp=vref+40;
ibatt=29.4;
I_nom=30;
imax=1*ibatt
a=1-(vin/vref)          %La valeur du rapport
                          cyclique

iref=(1-a)*ibatt
l=a*vp/(f*di)          % l=4.95e-4

```

---

```

c=a*imax/(f*dv) % c=4.2e-3

kc=2.6e-3; % kc=10e-2;
wpc=6.28e4
kp=10
ti=6e-4
ki=1666.666
M=2*kc*vin
N=kc*vin*R1*c
H=vp*R1*(1-a)^3
Z=vp*l*(1-a)
P=vp*R1*l*c*(1-a)
G1=tf([N M],[P Z H]) %La fonction du transfert
                        du boost en courant
C1=tf([kp*ti kp],[ti/wpc ti]) %la fonction du transfert
                                du régulateur pi
G=series(C1,G1) %FTBO du système.
G2=feedback(G,+1)
bode(G)
step(G)
margin(G)
k=solve('log10(k)=35.5') % le gain statique pour
w=0

```

## ANNEXES D

Caractéristiques de la batterie plomb-acide choisie sous Matlab/Simulink

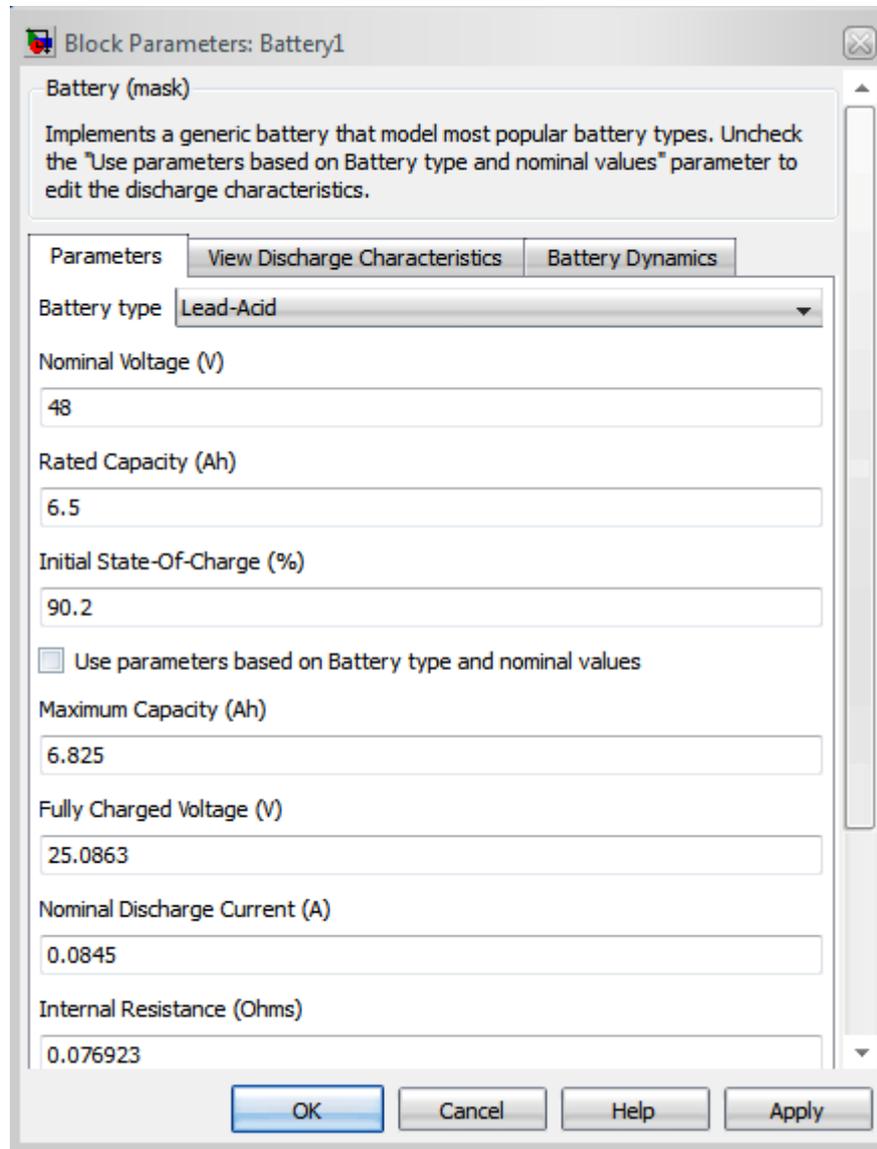


Figure D. 1 Caractéristiques de la batterie plomb-acide choisie sous Matlab/Simulink



