



Université ABBES LAGHROUR Khenchela
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Industriel
جامعة عباس لغزور خنشلة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة الصناعية



N° Série :

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commandes Electriques

Présenté par

Hoggas Rabei

Khadraoui Rochdi

THEME

**Modélisation et commande d'un système
Hybride GSAP-Photovoltaïque.**

Soutenu le : Septembre 2020 devant la commission d'examen composée de :

Mr. LABDANI Rafik	PROF	à l'Université de Khenchela	Président
Mr. BEDDIAF Yassine	MCB	à l'Université de Khenchela	Encadreur
Mr. KHEMIS Abderrahmane	MCB	à l'Université de Khenchela	Examineur

Promotion 2019/2020

Dédicace

Je tiens à dédier ce modeste travail, en guise de gratitude et respect à :

Mon père : HOGGAS LARBI et ma mère : HOGGAS MERIEM

Pour m'avoir soutenu le lent de ma formation.

Ma petite famille :

Mon Marie : HOGGAS NASSIMA

Mes enfants : NOUFEL, THAOUAB, ILINE

Le nouveau-né à venir (إنشاء الله)

Pour son aide, sa patience et ses encouragements

Dédicace

Je tiens à dédier ce modeste travail, en guise de gratitude et respect à :

Mon père : KHADRAOUI LAKHMISSI

Ma mère : BOULEBIAR ZARFA

Pour m'avoir soutenu le lent de ma formation.

Ma petite famille :

Mon Marie : MAAMRI NASSIMA

Mes enfants : SIRINE, YASMINE

Pour son aide, sa patience et ses encouragements

Remerciement

Nous tenons à remercier vivement tous nos enseignants, particulièrement notre encadreur Mr : Beddiaf Yassine. A pour leur aide et conseils qui nous ont été très précieux.

Nous remercions les membres de jury pour avoir accepté de juger notre travail.

Non remerciement vont aussi à tous ceux qui contribués de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Hoggas Rabei et Khadhraoui Rochdi

Liste des Figures

Figure (I-1) : Machines synchrones à aimants permanents montés en surface.	02
Figures (I-2) : Machines synchrones à aimants permanents insérés.....	02
Figures (I-3) : Machines synchrones à aimants permanents chapeautés.....	03
Figures (I-4) : Machines synchrones à aimants permanents enterrés.....	03
Figures (I-5) : Rotation du rotor par-rapport au stator.....	04
Figures (I-6) : Représentation de la GSAP dans le repère triphasé (abc).....	05
Figure (I.7) : Transformation du système triphasé à un système biphasé.....	07
Figure (I.8) : Représentation du référentiel mobile (d, q) par-rapport au référentiel fixe (α, β).....	11
Figure (I.9) : Schéma de simulation sous Matlab/Simulink.....	15
Figure (I.10.a) : Tensions statoriques délivrées par la GSAP.....	15
Figure (I.10.b) : Tensions statoriques délivrées par la GSAP (Zoom-1).....	15
Figure (I.10.c) : Tensions statoriques délivrées par la GSAP (Zoom-2).....	16
Figure (I.11.a) : Courants triphasés délivrés par la GSAP.....	16
Figure (I.11.b) : Courants triphasés délivrés par la GSAP (Zoom-1).....	16
Figure (I.11.c) : Courants triphasés délivrés par la GSAP (Zoom-2).....	17
Figure (I.12) : Vitesse de rotation	17
Figure (II.1) - Spectre du rayonnement solaire reçu	21
Figure (II.2) - Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.....	21
Figure (II.3) : Spectre de rayonnement à l'extérieur de l'atmosphère terrestre comparé au spectre d'un corps noir à 5800 K.	22
Figure (II.4) : Rayonnement global total au niveau du sol et ses composantes directes, diffuses et réfléchives.....	23
Figure (II.5) : Variations diurnes du flux radiatif solaire global un jour nuageux et annuellement.....	24
Figure (II.6) : Distribution spatiale du rayonnement solaire annuel sur la Terre.....	24
Figure (II.7) : Schéma de principe de la terre et des angles rentrant dans le calcul de l'irradiante.....	25
Figure (II.8) : Courbe bleu clair (G^*) : Energie solaire qui arrive sur le capteur. Courbe $I^* +$ D^* (vert clair) : cas d'un capteur solaire motorisé. En moyenne suivant la courbe G^* , il est récupéré 14,2% de E_{sol} sur l'année et 28,6% sur la journée. (E_{sol} : rayonnement solaire, I^* : rayonnement solaire direct, D^* : rayonnement solaire diffus, G^* : rayonnement solaire global,	

Liste des Figures

S* rayonnement solaire direct sur le capteur.....	26
Figure (II.9) : Elévation en fonction de l'azimut (heure de la journée) et de la période de l'année (latitude 43°)	27
Figure (II.10) : Représentation des angles projetés terre-soleil et capteur-Horizon.....	28
Figure (II.11) : Schéma de principe de conversion photovoltaïque.....	28
Figure (II.12) : Schéma de la matière cas sans et avec dopage.....	29
Figure (II.13) : Cellules solaires monocristallines, poly cristallines, amorphes.....	31
Figure (II.14) : Rendement des différentes technologies.....	32
Figure (II.15) : Principe de la cellule à hétérojonction.....	32
Figure (II.16) : Courbes caractéristiques courant tension d'une cellule pour différents éclairagements et pour différentes technologies.....	33
Figure (II.17) : Caractéristiques majeures d'une cellule photovoltaïque.....	33
Figure (II.17) : Evolution de la puissance fournie par une cellule PV lorsque sa température de fonctionnement augmente.....	34
Figure (II.18) : Montage électrique équivalent.....	35
Tableau 2 : Exemple de valeurs des paramètres.....	35
Figure (II.19) : Schéma bloc du Générateur Photovoltaïque.....	36
Figure (II.20) : Notion de facteur de forme FF pour une cellule photoélectrique.....	37
Figure (II.21) : schéma de principe de le hacheur.....	38
Figure (II.22) : Schéma de principe d'un hacheur réversible en tension.....	39
Figure (II.23) : Schéma de principe d'un hacheur réversible en courant.....	40
Figure (II.24) : Schéma de principe d'un hacheur réversible en courant et en tension.....	40
Figure (II.25) : Schéma de principe d'un hacheur Buck.....	40
Figure (II.26) : Schéma de principe d'un hacheur Boost.....	41
Figure (II.26) : Schéma de principe d'un hacheur Buck-Boost.....	41
Figure (II.27) : Schéma de principe d'un hacheur Çuk.....	41
Figure (II.28) : Représentation générale des hacheurs non réversibles.....	42
Tableau 2-2 Caractéristique du panneau photovoltaïque.....	42
Figure (II.29) Schéma de simulation sous Matlab/Simulink.....	43
Figure (II.30) : Caractéristique Courant- Panneau en fonction de la Tension convertisseur.....	43
Figure (II.31) : Caractéristique Puissance-Panneau en fonction de la Tension-onvertisseur.....	43
Figure (II.32) : Caractéristique Puissance-convertisseur.....	44

Liste des Figures

Figure (III.1) : Opérateurs logiques a : A et B , b : $A \cap B$, c : $A \cup B$, d : \bar{A}	49
Figure (III.2) : Configuration de base d'un bloc floue (<i>BLF</i>).....	51
Figure (III.3) : Représentation graphique du principe de la méthode d'inférence Max-Min..	52
Figure (IV.1) : Structure d'un système de jumelage (hybride).....	54
Figure (IV.2) : Structure du système de jumelage entre deux sources d'énergie renouvelables.....	55
Figure(IV.3) : Circuit équivalent de la batterie rechargeable.....	58
Figure (IV.4) : Caractéristique d'évolution de la décharge de la batterie.....	59
Figure (IV.5) : Caractéristique de charge et décharge de la batterie.....	60
Figure (IV.6) : Schéma fonctionnel d'un onduleur.....	61
Figure (IV.7) : Tension du panneau photovoltaïque.....	65
Figure (IV.8) : Rapport cyclique du panneau photovoltaïque.....	66
Figure (IV.9) : Puissance du panneau photovoltaïque.....	66
Figure (IV.10) : Vitesse de la GSAP.....	67
Figure (IV.11) : Etat de l'interrupteur S1.....	67
Figure (IV.12) : Puissance de la Batterie.....	68
Figure (IV.13) : Etat de l'interrupteur S2.....	68
Figure (IV.14) : Puissance renouvelable, puissance de la batterie et puissance demandée....	69
Figure (IV.15-a) : Tension fournie à la charge.....	69
Figure (IV.15-b) : Tension fournie à la charge (Zoom).....	70

Introduction

Introduction générale

Depuis quelques années, le contexte environnemental et/ou écologique devient une donnée importante voire prépondérante. En effet, le coût des énergies ainsi que les pollutions diverses qui résultent de leurs utilisations doivent être pris en compte à de nombreux niveaux. De plus, ces dernières années, la demande mondiale d'énergie augmente de plus en plus, et la raréfaction des sources d'énergie fossile dans un avenir proche est prévisible. Le contexte énergétique actuel, caractérisé par l'appauvrissement des réserves d'énergie fossile, le réchauffement de la planète en partie dû à l'émission de gaz à effet de serre et le concept de développement durable, nous pousse à trouver des solutions énergétiques alternatives. Un recours systématique aux carburants fossiles permet d'avoir des coûts de production relativement "faibles" mais conduit à un dégagement massif de gaz polluants.

Toutes les énergies renouvelables (solaire, éolienne hydraulique, biomasse...) viennent du soleil transformées ensuite par l'environnement terrestre. Ainsi, les énergies solaire et éolienne sont les plus développées et présentent de nombreux avantages. En effet, ce sont des énergies complètement propres.

Cependant, il faut distinguer plusieurs problèmes en fonction des sites et des utilisations de l'énergie renouvelable. La disponibilité intermittente de telles ressources entraîne le problème de stockage et de bon dimensionnement pour diminuer le coût d'investissement mais encore assurer la demande du consommateur. Elle pose aussi le problème de couplage entre plusieurs sources pour compenser l'une à l'autre. La qualité de l'électricité par ces sources qu'on peut injecter dans le réseau global présente également une problématique à traiter.

Une des applications intéressantes de l'énergie renouvelable est l'électrification des régions éloignées, situées loin de centrales électriques. Dans ce cas, une approche pratique pour la production d'énergie est d'utiliser un système hybride composé de plusieurs sources renouvelables et un système de stockage afin de créer une installation autonome. Un tel système permet une meilleure stabilité et une autonomie plus grande.

L'objectif principal de notre travail est d'optimiser la production de l'électricité à partir de deux sources renouvelables : GSAP (entraînée par une turbine éolienne) et photovoltaïque. Pour ce faire, le mémoire est organisé en quatre chapitres. Le premier chapitre aborde la modélisation de la GSAP. Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter la modélisation et la simulation d'un panneau photovoltaïque. Le troisième chapitre est dédié à la présentation de la technique de la logique floue. Le quatrième chapitre, qui représente la partie essentielle de notre mémoire, est consacré à la commande du système de jumelage par un superviseur flou.

Chapitre I

*Modélisation de la génératrice Synchrones
à aimants permanents*

Introduction

Les alternateurs triphasés sont la source primaire de toute l'énergie électrique. Entraînés par des turbines hydrauliques, à vapeur ou éoliennes, ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie. Elles transforment l'énergie mécanique en énergie électrique avec des puissances allant jusqu'à 1500 MW [1].

L'utilisation des aimants permanents a été une vraie révolution dans le domaine de l'utilisation de ces machines, car elle a permis d'éliminer le bobinage rotorique et son excitation ainsi que les balais et les contacts glissants. Ce qui induit moins de maintenance et plus de robustesse pour la machine. Cet avantage a couvert le coût élevé des aimants permanents [2].

L'avantage le plus important de ces machines dans le domaine éolien est l'absence de multiplicateur de vitesse pour des machines de grand nombre de paires de pôles, réduisant ainsi le volume de l'éolienne et la maintenance du système [2].

I.1 Description

L'alternateur est formé d'un stator fixe, et d'un rotor tournant. Le stator ou l'induit se compose d'un noyau feuilleté ayant la forme d'un cylindre vide et comportant des encoches dans lesquelles sont logés les conducteurs d'un enroulement triphasé à $2p$ pôles. Les bobines constituant cet enroulement sont décalées de $2\pi/3$ et toujours raccordées en étoile et le neutre est accessible. Le rotor ou l'inducteur comporte p pôles Nord et p pôles Sud intercalés. Ces pôles sont créés par des bobines alimentées en courant continu ou par des aimants permanents. Il existe deux types de rotor : à pôles saillants ou à pôles lisses

1.1.1 Génératrice synchrones à aimants permanents montés en surface (GSAPS)

Cette structure est la plus simple à construire parce que des aimants permanents à aimantation radiale sont disposés directement sur la périphérie du rotor, voir figure (I-1) les aimants sont collés sur une culasse cylindrique. Cette structure de machine rentre dans la catégorie des machines à pôles lisses. La tenue mécanique des aimants est facilitée par la force centrifuge [2].

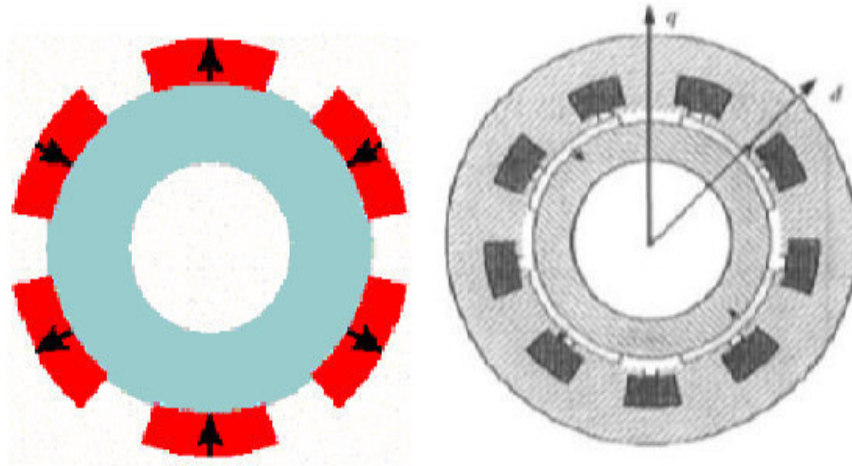
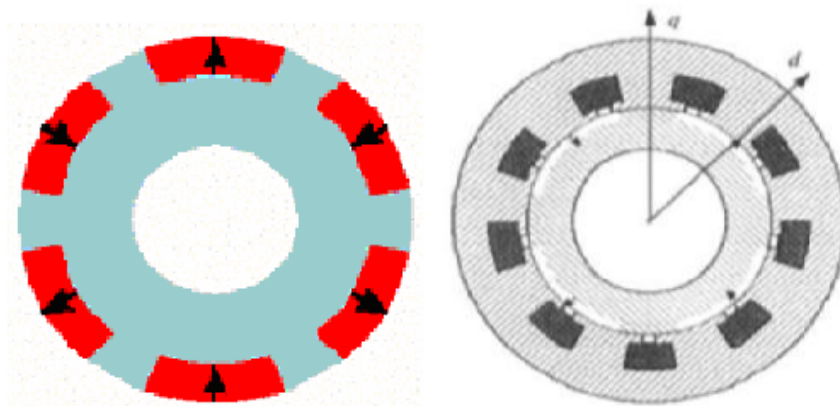


Figure (I-1) :Machines synchrones à aimants permanents montés en surface.

1.1.2 Génératrice synchrones à aimants permanents insérés (GSAPI)

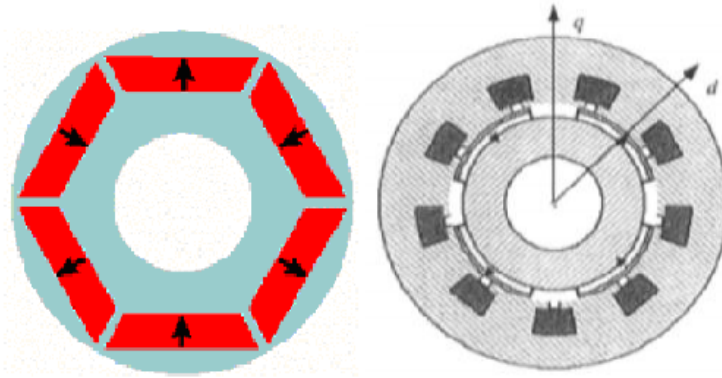
A partir de la structure précédente, nous entaillons des logements pour insérer les aimants permanents dans le rotor afin de faciliter l'assemblage mécanique voir figure (I-2) les parties de fer entre les aimant permanents sont des espaces inter polaires qui ajoutent de la saillance. Toutefois, les caractéristiques de cette structure restent fondamentalement proches de la GSAPS[2]



Figures (I-2) :Machines synchrones à aimants permanents insérés.

1.1.3 Génératrice synchrones à aimants permanents chapeautés (GSAPC)

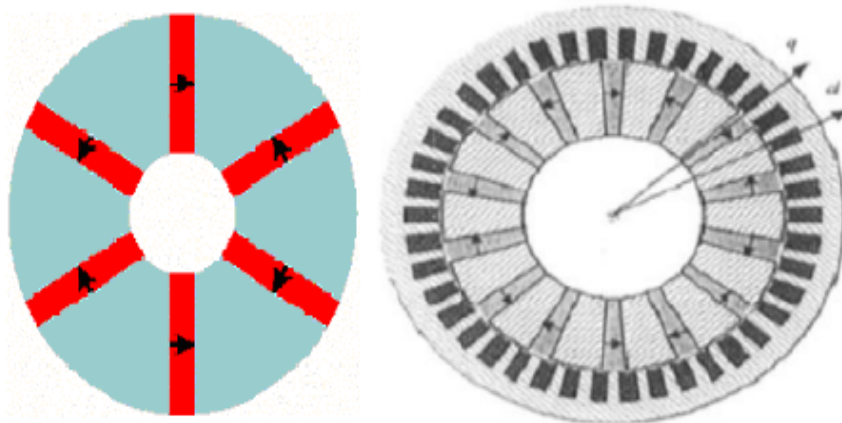
Cette structure est déduite de celles avec des aimants permanents montés en surface. Nous plaçons sur les aimants des pièces polaires généralement en acier doux. La combinaison des aimants et des pièces polaires crée une anisotropie du rotor et rajoute une saillance. Les pièces polaires permettent de contrôler la forme de la f e m au stator en agissant sur le profil de la pièce [2]



Figures (I-3) :Machines synchrones à aimants permanents chapeautés

1.1.4 Génératrice synchrones à aimants permanents enterrés (GSAPE)

Le principe de cette structure est d'augmenter l'induction magnétique dans l'entrefer par rapport à l'induction rémanente des aimants permanents voir figure (I-4). En fait, les pièces polaires canalisent le flux généré par les aimants permanents à aimantation tangentielle dont la surface latérale est supérieure à la demi-surface de la pièce polaire prise au niveau de l'entrefer [2]

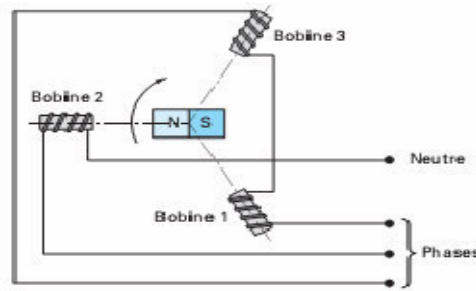


Figures (I-4) :Machines synchrones à aimants permanents enterrés.

1.2 Principe de fonctionnement d'une génératrice synchrone a aimant permanent :

L'ensemble des génératrices synchrones triphasées utilisent un champ magnétique tournant. Le rotor de ces machines (inducteur) à 'aimant permanent tourne à une vitesse constante qui est synchrone avec la rotation du champ magnétique crée au stator, figure (I.5).

Le principe de fonctionnement est basé sur la création d'une variation de flux magnétique par la rotation du rotor passant devant les faces de trois bobines fixes du stator (c'est la loi de Lenz, Faraday).



Figures (I-5) :Rotation du rotor par-rapport au stator

Le nombre de pôles magnétiques au rotor d'un générateur synchrone influe sur la vitesse de rotation à fournir.

$$N = \frac{60f}{p} \quad (I.1)$$

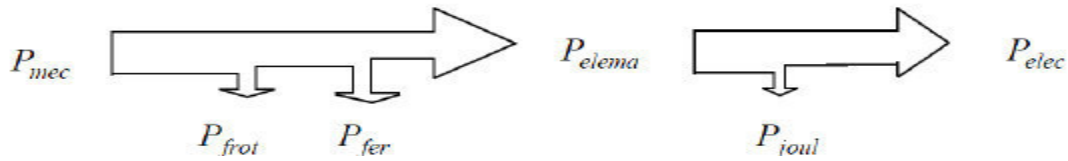
Le nombre de pôles de la génératrice influe directement sur sa taille, et il faut mentionner que le couple moteur que peut supporter une GSAP dépend de son volume. Habituellement, les GSAP à quatre ou six pôles sont les plus utilisées, car leur encombrement permet des économies au niveau de la taille de la nacelle qui doit les accueillir.

Les GSAP utilisées dans le domaine éolien, sont ceux de 500 KW à 2 MW elles sont bien plus chers que les génératrices à induction de la même taille, Ces génératrices peuvent être directement connectées au réseau, leurs vitesses de rotation sont fixes et proportionnelles à la fréquence du réseau. En conséquence de cette connexion génératrice -réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance jusqu'à la puissance électrique produite. Pour ces raisons, on place systématiquement un interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [3]. Dans ce cas, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance. Dans la plupart des cas, le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté En courant continu (roue polaire) par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode excitation entraîne la présence de contacts glissants au rotor, c'est pourquoi on remplace souvent ce bobinage par des aimants permanents. Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix. De plus, les variations importantes de couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des

Chapitre I : Modélisation de la génératrice Synchrones à aimants permanents

aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de leur durée de vie. [3]

I.2.1 Bilan énergétique



I.3 Modélisation de génératrice synchrone à aimants permanents

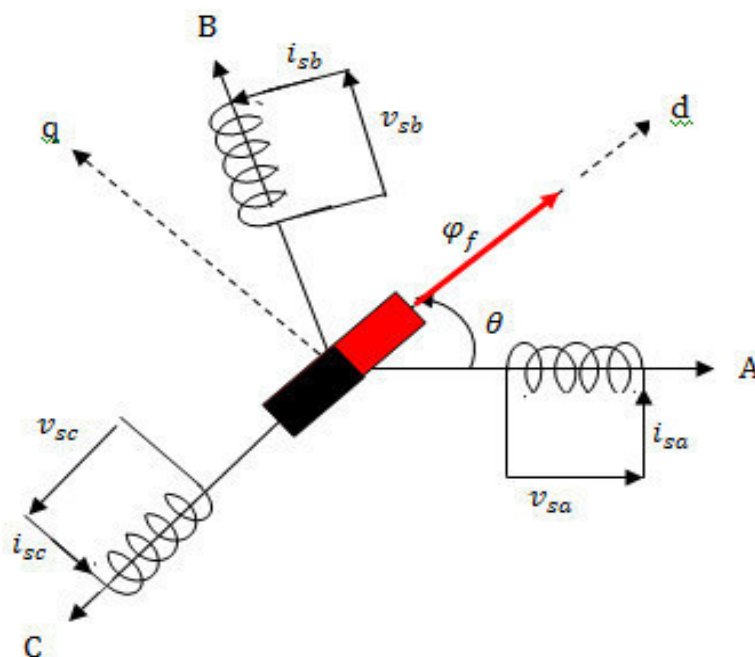
I.3.1 Hypothèses simplificatrices

Afin de simplifier la modélisation de la machine synchrone, il est nécessaire de poser les hypothèses simplificatrices suivantes [4, 5] :

- La saturation du circuit magnétique est négligée ce qui mène à exprimer les flux magnétiques comme des fonctions linéaires des courants des phases.
- La répartition des forces magnétomotrices est supposée sinusoïdale.
- Les pertes par hystérésis et par courants de Foucault sont négligées.
- Courants de Foucault, l'effet de peau ainsi que l'effet d'hystérésis sont négligés.
- L'effet de la température sur les résistances des enroulements est négligé.

I.3.2 Mise en équation

La génératrice synchrone à aimants permanents peut être représentée par la figure (I.6).



Figures (I-6) : Représentation de la GSAP dans le repère triphasé (abc).

Chapitre I : Modélisation de la génératrice Synchrone à aimants permanents

Le modèle mathématique dans le repère triphasé (abc), est défini par les équations électriques suivantes :

Au stator :

$$[V_s] = [-R] \cdot [i_s] - \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (I.2)$$

$$\text{Avec : } [V_s] = \begin{bmatrix} V_{sA} \\ V_{sB} \\ V_{sC} \end{bmatrix}; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{sA} \\ i_{sB} \\ i_{sC} \end{bmatrix}; [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sA} \\ \varphi_{sB} \\ \varphi_{sC} \end{bmatrix}; [R] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

Les flux totaux sont donnés par :

$$[\varphi_s] = [L_s] \cdot [i_{sABC}] + [\varphi_{fABC}] \quad (I.3)$$

$$\text{Avec : } [L_s] = \begin{bmatrix} L_{ss} & M_s & M_s \\ M_s & L_{ss} & M_s \\ M_s & M_s & L_{ss} \end{bmatrix} = [L_{ss}] + [M_s] :$$

$[L_{ss}]$: Représente la matrice des inductances propres entre les enroulements statoriques.

$[M_s]$: Représente la matrice des inductances mutuelles

Au rotor :

le vecteur flux rotorique $[\varphi_f]$ créé par les aimants permanents à travers les enroulements statoriques est donné par :

$$[\varphi_{fABC}] = \begin{bmatrix} \varphi_{fA} \\ \varphi_{fB} \\ \varphi_{fC} \end{bmatrix} \quad (I.4)$$

D'après la figure (I.6), on peut déduire les expressions des flux φ_{fABC} :

$$\begin{cases} \varphi_{fA} = \varphi_f \cos \theta \\ \varphi_{fB} = \varphi_f \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \varphi_{fC} = \varphi_f \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (I.5)$$

I.3.3 Modèle de la GSAP dans le repère biphasé

La transformation du référentiel triphasé vers le référentiel biphasé permet de faciliter l'étude du modèle mathématique des machines électriques triphasées, et bien évidemment leurs

commandes. Cette transformation exige que le champ électromagnétique tournant soit créé par des forces magnétomotrices égales.

a. Transformation de Park

Soit un vecteur tournant \vec{I} qui représente la force magnétomotrice créée par les courants des trois phases. La figure (1) montre la représentation d'un tel vecteur dans le référentiel biphasé et triphasé.

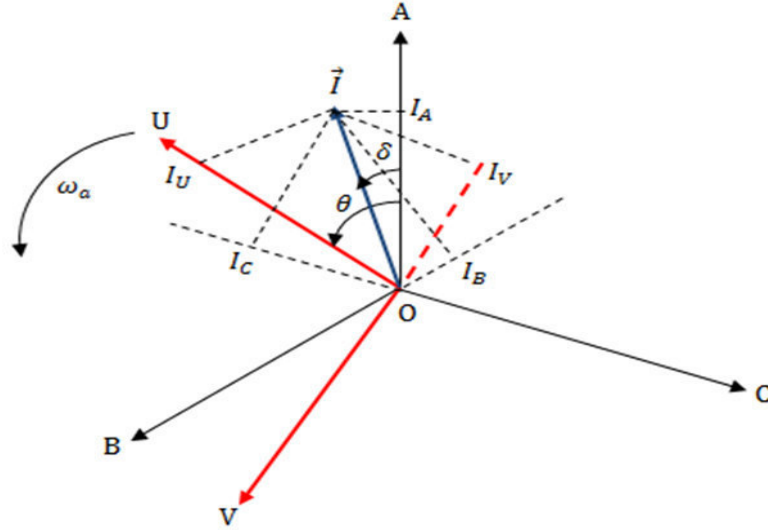


Figure (I.7) : Transformation du système triphasé à un système biphasé.

L'angle θ est donné par : $\theta = \int \omega_a dt = \omega_a t$ (I.6)

Avec : ω_a est la vitesse angulaire du système biphasé par rapport au système triphasé.

La projection du vecteur \vec{I} sur l'axe triphasé ABC donne :

$I_A = I \cos \delta$ (I.7)

$I_B = I \cos \left(\delta + \frac{2\pi}{3} \right)$ (I.8)

$I_C = I \cos \left(\delta + \frac{4\pi}{3} \right)$ (I.9)

La projection du vecteur \vec{I} sur l'axe biphasé UV donne :

$I_U = I \cos(\theta - \delta)$ (I.10)

$I_V = -I \sin(\theta - \delta)$ (I.11)

Appliquons la transformation trigonométrique suivante :

$\cos(a - b) = \frac{2}{3} \left(\cos a \cdot \cos b + \cos \left(a - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \cos \left(b - \frac{2\pi}{3} \right) + \cos \left(a - \frac{4\pi}{3} \right) \cdot \cos \left(b - \frac{4\pi}{3} \right) \right) \sin(a - b) = \frac{2}{3} \left(\sin a \cdot \cos b + \sin \left(a - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \cos \left(b - \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left(a - \frac{4\pi}{3} \right) \cdot \cos \left(b - \frac{4\pi}{3} \right) \right)$ (I.12)

Nous obtenons :

$$I_U = \frac{2}{3}I \left(\cos\theta \cdot \cos\delta + \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\delta - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\delta - \frac{4\pi}{3}\right) \right) \quad (I.13)$$

$$= \frac{2}{3} \left(I_A \cos\theta + I_B \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + I_C \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \right)$$

$$I_V = \frac{2}{3}I \left(\sin\theta \cdot \cos\delta + \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\delta - \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\delta - \frac{4\pi}{3}\right) \right)$$

$$= -\frac{2}{3} \left(I_A \sin\theta + I_B \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + I_C \sin\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \right) \quad (I.14)$$

pour conserver les caractéristiques du système d'axes triphasé dans le système d'axes biphasé, il faut ajouter la composante homopolaire I_0 .

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C) \quad (I.15)$$

Sous forme matricielle le passage du système triphasé au système biphasé s'écrit :

$$\begin{pmatrix} I_U \\ I_V \\ I_0 \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix} \quad (I.16)$$

On définit la matrice $[P]$ appelée matrice de Park ou matrice de transformation de Park:

$$[P] = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (I.17)$$

Le système (I.6) s'écrit alors comme suit :

$$[I_{UV0}] = [P] \cdot [I_{ABC}] \quad (I.18)$$

Le passage du système biphasé au système triphasé est donné par :

$$[I_{ABC}] = [P]^{-1} \cdot [I_{UV0}] \quad (I.19)$$

Et la matrice inverse de Park est donnée par :

$$[P]^{-1} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{pmatrix} \quad (I.20)$$

Pour donner un sens physique à cette transformation, il faut assurer l'invariance de la puissance instantanée dans les deux systèmes de représentation, ce qui conduit à leur équivalence, dans ce cas on utilise la matrice de Park modifiée :

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{pmatrix} \quad (I.21)$$

Et

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{pmatrix} \quad (I.22)$$

On note que : $[P]^T \cdot [P] = [II]$ et $[P]^{-1} \cdot [P] = [II]$ donc, on peut dire que les deux matrices $[P]$ et $[P]^{-1}$ sont orthogonales, alors la puissance instantanée dans les deux systèmes d'axes est maintenue invariante.

b. Transformation de Clark

La transformation de Clark noté (α, β) permet le passage du système triphasé vers un système biphasé immobile c'est-à-dire $\omega_a = 0$, autrement dit $\theta = 0$, et la matrice de Park non modifiée dite de Clark est donnée par :

$$[Cl] = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\sqrt{\frac{3}{2}} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (I.23)$$

Le passage du système triphasé vers le système biphasé (α, β) s'écrit :

$$[I_{\alpha\beta 0}] = [Cl] \cdot [I_{ABC}] \quad (I.24)$$

Le passage du système biphasé (α, β) vers le système triphasé (ABC) s'écrit :

$$[I_{ABC}] = [Cl]^{-1} \cdot [I_{\alpha\beta 0}] \quad (I.25)$$

Avec :

$$[Cl]^{-1} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} & 1 \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} & 1 \end{pmatrix} \quad (I.26)$$

On note que : $[Cl]^T \cdot [Cl] \neq [II]$ et $[Cl]_T^{-1} \cdot [Cl]^{-1} \neq [II]$ donc, on peut dire que les deux matrices $[Cl]$ et $[Cl]^{-1}$ ne sont pas orthogonales, alors la puissance instantanée dans les deux systèmes d'axes n'est pas conservée.

c. Transformation de Concordia

La transformée de Concordia $[Co]$ est la transformée de Clark modifiée.

$$[Co] = \sqrt{\frac{1}{3}} \begin{pmatrix} \sqrt{2} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & -\sqrt{\frac{3}{2}} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (I.27)$$

Le passage du système triphasé vers le système biphasé (α, β) s'écrit :

$$[I_{\alpha\beta 0}] = [Co] \cdot [I_{ABC}] \quad (I.28)$$

Le passage du système biphasé (α, β) vers le système triphasé (ABC) s'écrit :

$$[I_{ABC}] = [Co]^{-1} \cdot [I_{\alpha\beta 0}] \quad (I.29)$$

$$[Co]^{-1} = \sqrt{\frac{1}{3}} \begin{pmatrix} \sqrt{2} & 0 & 1 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} & 1 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & \sqrt{\frac{3}{2}} & 1 \end{pmatrix} \quad (I.30)$$

On note que : $[Co]^T \cdot [Co] = [II]$ et $[Co]_T^{-1} \cdot [Co]^{-1} = [II]$ donc, on peut dire que les deux matrices $[Co]$ et $[Co]^{-1}$ sont orthogonales, alors la puissance instantanée dans les deux systèmes d'axes est conservée.

On remarque que : Si le système biphasé tourne avec une vitesse de synchronisme ($\omega_a = \omega_s = 2\pi f$), avec $f = 50 \text{ Hz}$ et le système (UV) devient $(d q)$, alors $\theta_s = \int \omega_s dt = \omega_s t = cte$, ce qui permet de dire que les composantes biphasées (I_{dq}) sont continues (constantes).
Ce qui est le cas de la GSAP

d. Rotation entre le référentiel mobile (d, q) et le référentiel fixe (α, β)

La figure (I.8), représente la rotation d'un angle θ entre le référentiel fixe (α, β) et le référentiel mobile (d, q) autour de l'axe homopolaire.

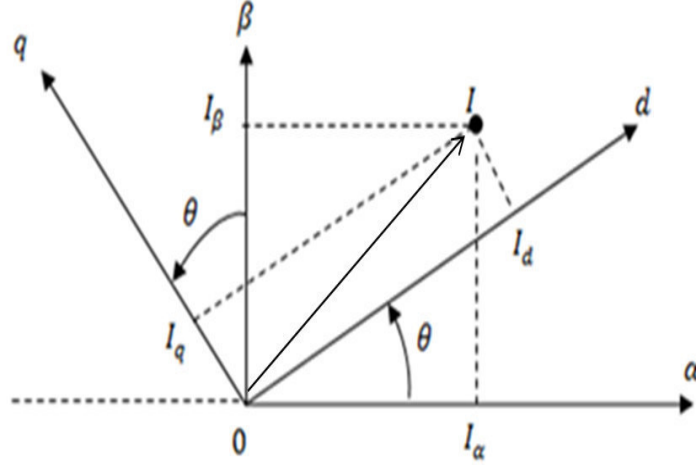


Figure (I.8) : Représentation du référentiel mobile (d, q) par-rapport au référentiel fixe (α, β)

La projection du vecteur I sur les axes donne :

$$I_\alpha = I_d \cos \theta - I_q \sin \theta \quad (\text{I.31})$$

$$I_\beta = I_d \sin \theta + I_q \cos \theta \quad (\text{I.32})$$

Sous forme matricielle, on a :

$$\begin{pmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} \quad (\text{I.33})$$

on appelle, $R(\theta)$, la matrice de rotation

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (\text{I.34})$$

Et

$$\begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} = R(\theta)^{-1} \begin{pmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{pmatrix} \quad (\text{I.35})$$

Avec :

$$R(\theta)^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (\text{I.36})$$

I.3.3.1 Modèle de la GSAP dans le repère de Park

Au stator, on applique le passage du système triphasé au système biphasé, on a :

$$\begin{aligned}
 [v_{sdq}] &= [P_{\theta_s}] \cdot [-R] \cdot [P_{\theta_s}]^{-1} [i_{sdq}] + [P_{\theta_s}] \cdot \frac{d}{dt} \left([P_{\theta_s}]^{-1} \cdot [\varphi_{sdq}] \right) \quad (I.37) \\
 &= [-R_s] \cdot [i_{sdq}] + [\varphi_{sdq}] [P_{\theta_s}] \cdot \frac{d}{dt} \left([P_{\theta_s}]^{-1} \right) + \frac{d}{dt} ([\varphi_{sdq}])
 \end{aligned}$$

D'autre part :

$$[P_{\theta_s}] \cdot \frac{d}{dt} \left([P_{\theta_s}]^{-1} \right) = \frac{d\theta}{dt} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (I.38)$$

Donc, on peut écrire :

$$\begin{cases} v_{sd} = -R_s \cdot i_{sd} - \frac{d\varphi_{sd}}{dt} + \omega \varphi_{sq} \\ v_{sq} = -R_s \cdot i_{sq} - \frac{d\varphi_{sq}}{dt} - \omega \varphi_{sd} \end{cases} \quad (I.39)$$

Avec $\varphi_{sd} = l_d i_{sd} + \varphi_f$ et $\varphi_{sq} = l_q i_{sq}$

Equation du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique peut être calculer à partir du bilan de puissance de la machine. La puissance instantanée fournie par les enroulements statoriques en fonction des grandeurs électriques dans le référentiel biphasé (d, q) est donnée par :

$$P_e = v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq} \quad (I.40)$$

remplaçons v_{sd} et v_{sq} par leurs expressions (I.17), on obtient :

$$P_e = \left(-R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \right) i_{sd} + \left(-R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \right) i_{sq} \quad (I.41)$$

$$= -R_s (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) + \omega_s (\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd}) + \left(i_{sd} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} + i_{sq} \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \right) \quad (I.42)$$

Cette relation se décompose en trois termes :

- Le premier terme représente la puissance dissipée en pertes joules :

$$P_j = R_s (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) \quad (I.43)$$

- Le deuxième terme représente la puissance ou l'énergie électromagnétique stockée.

$$P_{sk} = \left(i_{sd} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} + i_{sq} \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \right) \quad (I.44)$$

- Le troisième terme représente la puissance mécanique

$$P_m = \omega_s (\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd}) = C_e \Omega = \frac{1}{p} C_e \omega_s \quad (I.45)$$

P : est le nombre de pair de pôles.

Donc l'expression du couple électromagnétique peut être donné par :

$$C_e = \frac{3}{2}(p\varphi_f i_{sq} + (L_d - L_q)i_{sq}i_{sd}) \quad (I.46)$$

L'expression du couple peut être aussi donnée par l'équation mécanique suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f\Omega \quad (I.47)$$

Avec

f : Coefficient de frottement

C_{rst} : Couple résistant

I.3.3.2 Modèle d'états de la GSAP à vide

Le modèle général d'entrée-sortie de la génératrice synchrone à aimant permanent est lié au choix de vecteur d'état. Dans le cas des équations de la GSAP, dans le repère lié au rotor, les composantes du vecteur d'entrée de la machine sont les tensions V_d et V_q , les courants i_d et i_q statoriques sont les composantes du vecteur de sortie. Notre objectif dans ce qui suit est de mettre les équations sous la forme suivante :

$$\frac{dx}{dt} = A[X] + B[U] \quad (I.48)$$

$$y = C[X] + D[U] \quad (I.49)$$

Les équations (I.17), s'écrivent :

$$\begin{cases} v_{sd} = -R_s \cdot i_{sd} - l_d \frac{di_{sd}}{dt} + \omega l_q i_{sq} \\ v_{sq} = -R_s \cdot i_{sq} - l_q \frac{di_{sq}}{dt} - \omega l_d i_{sd} - \omega \varphi_f \end{cases} \quad (I.50)$$

Nous, obtenons les modèles d'états suivant :

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{l_d} (-R_s \cdot i_{sd} + \omega l_q i_{sq} - v_{sd}) \\ \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{l_q} (-R_s \cdot i_{sq} - \omega l_d i_{sd} - \omega \varphi_f - v_{sq}) \end{cases} \quad (I.51)$$

Sous forme matricielle, on aura :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-R_s}{l_d} & \frac{\omega l_q}{l_d} \\ \frac{-R_s}{l_q} & \frac{-\omega l_d}{l_q} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{-1}{l_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{l_q} & \frac{-\omega}{l_q} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ \varphi_f \end{pmatrix} \quad (I.52)$$

I.3.3.3 Modèle d'états de la GSAP alimentant une charge inductive

Les équations aux bornes de la charge s'écrivent :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_{ch} \cdot i_{sd} + l_{ch} \frac{di_{sd}}{dt} - \omega l_{ch} i_{sq} \\ v_{sq} = R_{ch} \cdot i_{sq} + l_{ch} \frac{di_{sq}}{dt} + \omega l_{ch} i_{sd} \end{cases} \quad (I.53)$$

D'autre part, En négligeant l'impédance de la ligne, on peut considérer l'égalité entre les tensions de la génératrice à vide et de la charge, on aura :

$$\begin{aligned} v_{sd} &= -R_s \cdot i_{sd} - l_d \frac{di_{sd}}{dt} + \omega l_q i_{sq} = R_{ch} \cdot i_{sd} + l_{ch} \frac{di_{sd}}{dt} - \omega l_{ch} i_{sq} \\ v_{sq} &= -R_s \cdot i_{sq} - l_q \frac{di_{sq}}{dt} - \omega l_d i_{sd} - \omega \varphi_f = R_{ch} \cdot i_{sq} + l_{ch} \frac{di_{sq}}{dt} + \omega l_{ch} i_{sd} \end{aligned} \quad (I.54)$$

Alors :

$$(l_d + l_{ch}) \frac{di_{sd}}{dt} = -(R_s + R_{ch}) i_{sd} + \omega (l_q + l_{ch}) i_{sq} \quad (I.55)$$

$$(l_q + l_{ch}) \frac{di_{sq}}{dt} = -(R_s + R_{ch}) i_{sq} - \omega (l_d + l_{ch}) i_{sd} - \omega \varphi_f \quad (I.56)$$

Nous obtenons les équations différentielles régissant le courant de i_{sd} et i_{sq} :

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = -\frac{(R_s + R_{ch})}{(l_d + l_{ch})} i_{sd} + \frac{\omega (l_q + l_{ch})}{(l_d + l_{ch})} i_{sq} \\ \frac{di_{sq}}{dt} = -\frac{(R_s + R_{ch})}{(l_q + l_{ch})} i_{sq} - \frac{\omega (l_d + l_{ch})}{(l_q + l_{ch})} i_{sd} - \frac{\omega}{(l_q + l_{ch})} \varphi_f \end{cases} \quad (I.57)$$

Les équations (I.24) peuvent être écrites sous forme matricielle suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{(R_s + R_{ch})}{(l_d + l_{ch})} & \frac{\omega (l_q + l_{ch})}{(l_d + l_{ch})} \\ \frac{\omega (l_d + l_{ch})}{(l_q + l_{ch})} & -\frac{(R_s + R_{ch})}{(l_q + l_{ch})} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{\omega}{(l_q + l_{ch})} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \varphi_f \end{pmatrix} \quad (I.58)$$

En remplaçant (I.25) dans (I.23), on obtient :

$$\begin{cases} v_{sd} = \left(l_d \frac{(R_s + R_{ch})}{(l_d + l_{ch})} - R_s \right) i_{sd} + \omega \left(l_q - l_d \frac{(l_q + l_{ch})}{(l_d + l_{ch})} \right) i_{sq} \\ v_{sq} = \left(l_q \frac{(R_s + R_{ch})}{(l_q + l_{ch})} - R_s \right) i_{sq} + \omega \left(l_q \frac{(l_q + l_{ch})}{(l_d + l_{ch})} - l_d \right) i_{sd} + \left(1 - \frac{l_q}{(l_d + l_{ch})} \right) \omega \varphi_f \end{cases} \quad (I.59)$$

Le système (I.26) s'écrit sous forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left(l_d \frac{(R_s + R_{ch})}{(l_d + l_{ch})} - R_s \right) & \omega \left(l_q - l_d \frac{(l_q + l_{ch})}{(l_d + l_{ch})} \right) \\ \omega \left(l_q \frac{(l_q + l_{ch})}{(l_d + l_{ch})} - l_d \right) & \left(l_q \frac{(R_s + R_{ch})}{(l_q + l_{ch})} - R_s \right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \left(1 - \frac{l_q}{(l_d + l_{ch})} \right) \omega \varphi_f \end{pmatrix} \quad (I.60)$$

I.4 Schéma et Résultats de simulation :

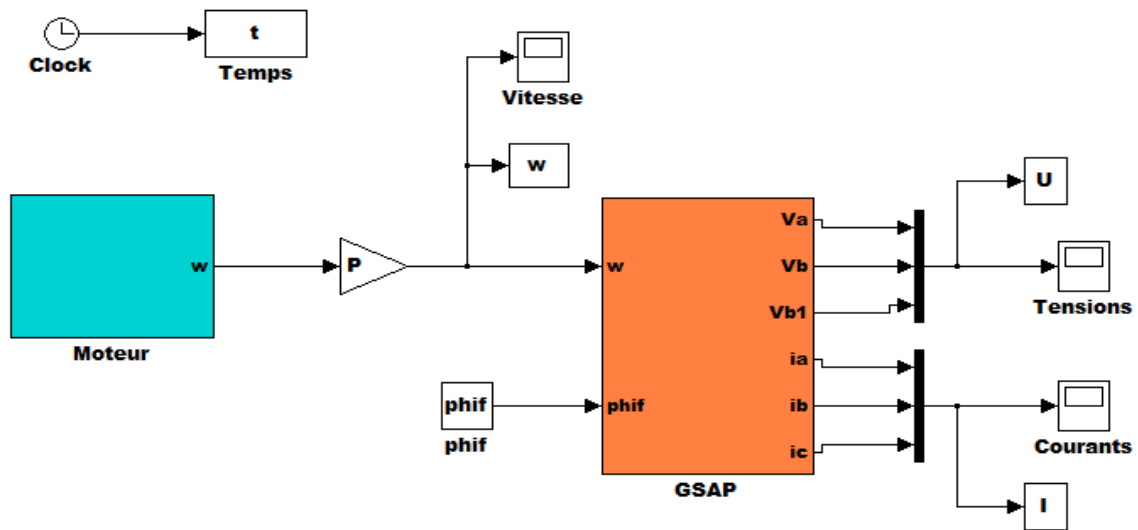


Figure (I.9) : Schéma de simulation sous Matlab/Simulink

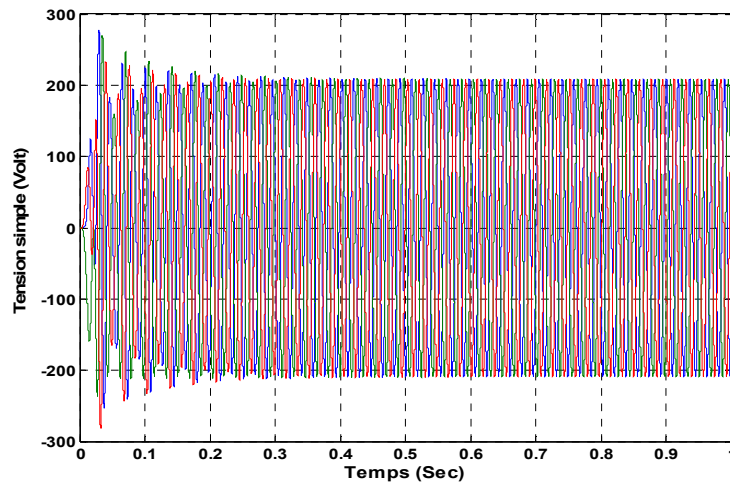


Figure (I.10.a) : Tensions statoriques délivrées par la GSAP.

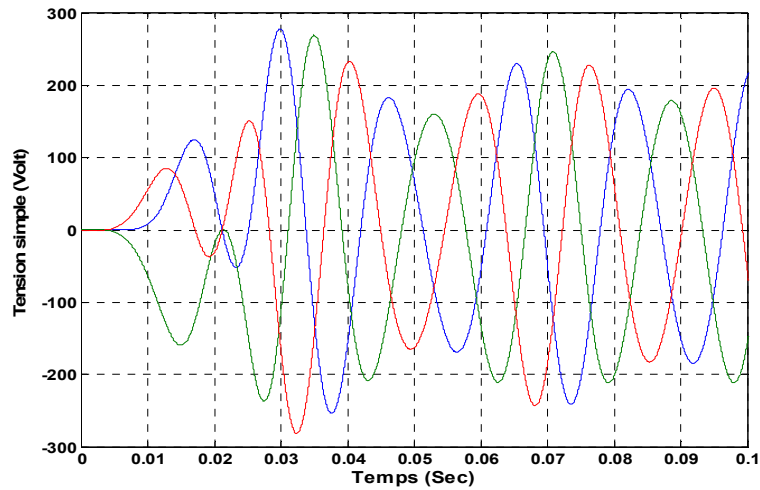


Figure (I.10.b) : Tensions statoriques délivrées par la GSAP (Zoom-1).

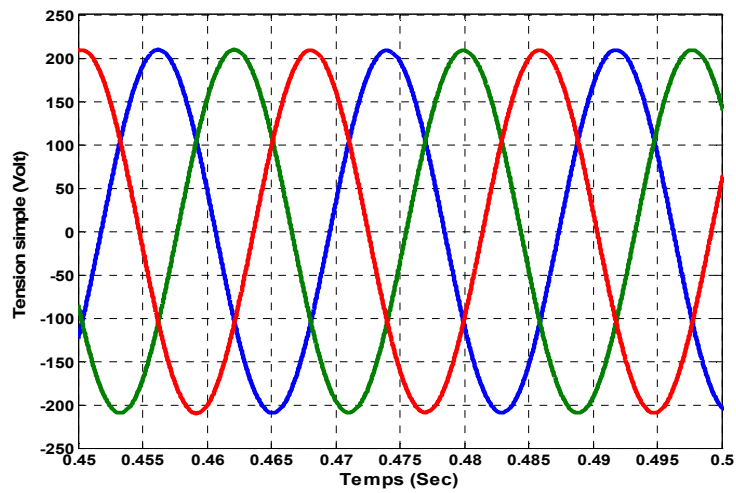


Figure (I.10.c) : Tensions statoriques délivrées par la GSAP (Zoom-2).

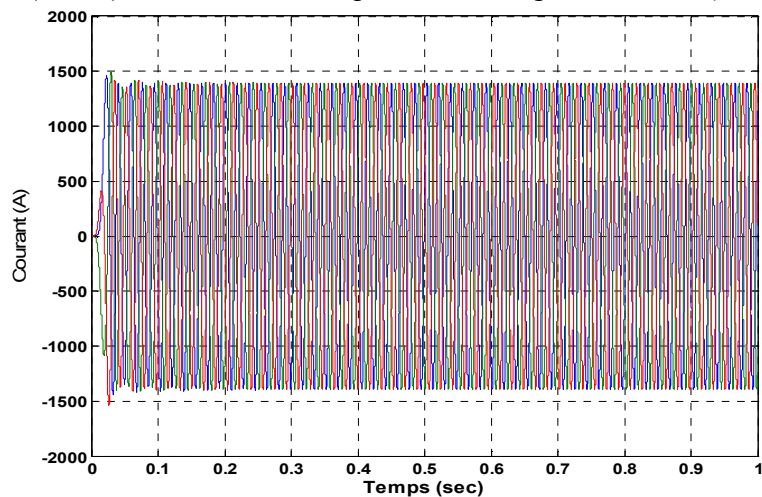


Figure (I.11.a) : Courants triphasés délivrés par la GSAP.

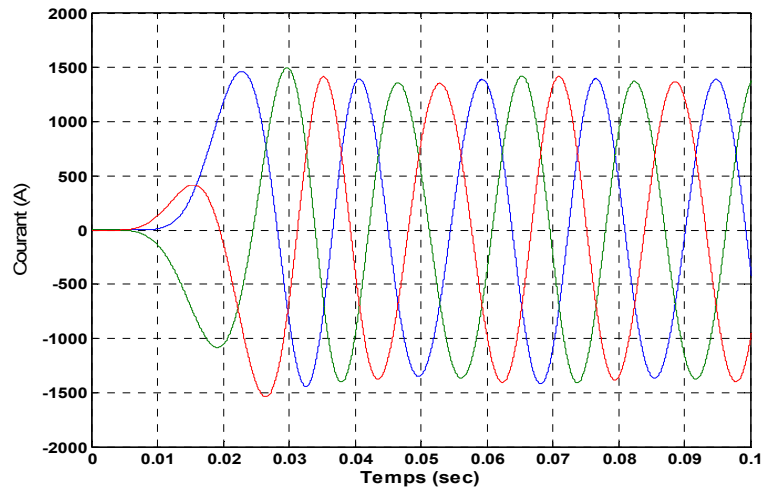


Figure (I.11.b) : Courants triphasés délivrés par la GSAP (Zoom-1).

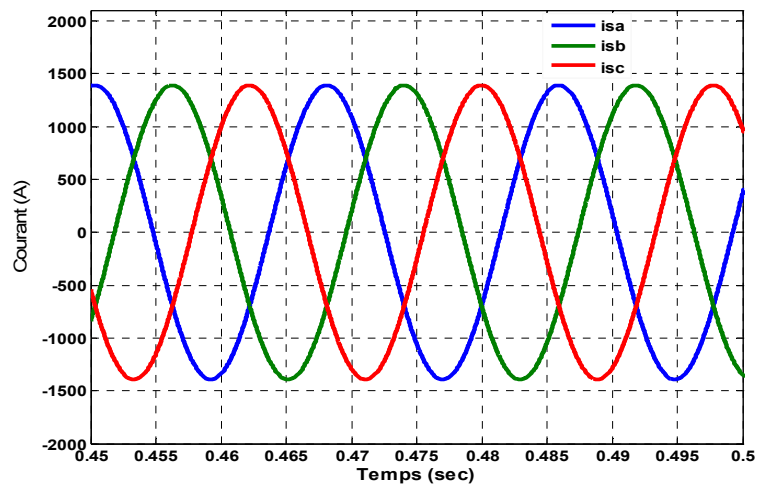


Figure (I.11.c) : Courants triphasés délivrés par la GSAP (Zoom-2).

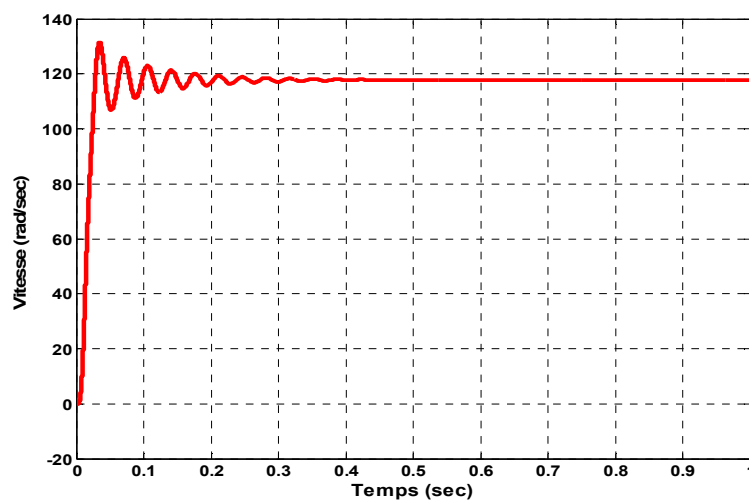


Figure (I.12) : Vitesse de rotation

Interprétation des résultats :

Chapitre I : Modélisation de la génératrice Synchrone à aimants permanents

La figure (I.9) illustre le schéma qu'on a utilisé pour réaliser la simulation de la GSAP entraînée par un moteur asynchrone. La figure (I.10), montre que les tensions simples aux bornes de chaque phase de la génératrice, elles sont bien sinusoïdaux et décalées entre eux de 120° . La fréquence de ces tensions est bien $f=50\text{Hz}$. On remarque qu'au démarrage, les signaux des tensions par un phénomène transitoire dus au démarrage de la turbine ou moteur etc..., cela veut dire que la GSAP commence à débitée des tensions nominales que lorsque sa vitesse de rotation atteint sa valeur nominale, figure (I.12). Mêmeinterprétation pour les courants illustrés par la figure (I.11).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique de la génératrice synchrone à aimant permanent. Les résultats de simulation confirment la faisabilité du modèle présenté à vide. Pour tester notre machine en charge, on a besoin de la commande de tout le système (Moteur - GSAP) afin de régler la vitesse en fonction de la charge, cela fait l'objet du chapitre qui suit.

Chapitre II

*Modélisation et Simulation du Panneau
Photovoltaïque*

Introduction

Les panneaux photovoltaïques présentent plusieurs avantages :

- Production d'énergie à partir d'une source solaire durable, renouvelable et propre,
- Faible coût de fonctionnement en comparaison des sources traditionnelles d'énergie,
- Prix d'achat des panneaux PV peu élevé,
- Modularité des éléments d'un panneau PV facilitant le montage même en zone dégroupée,
- Entretien minimum,
- Travail sécuritaire des techniciens.

Cependant, des points faibles sont également à noter :

- Rendement fluctuant à cause des variations de la source solaire,
- Rendement concret et densité d'énergie faible,
- Matériels encombrants ce qui nécessite des endroits d'installations plus grands.

Dans ce chapitre, nous étudierons la cellule photovoltaïque qui est l'élément de base de tout panneau solaire. Nous nous intéresserons ensuite aux associations de ces cellules permettant de construire des éléments plus ou moins grands : du panneau solaire au champ photovoltaïque.

II.1 La cellule photovoltaïque**II.1.1 Le rayonnement solaire**

Le rayonnement solaire est une onde électromagnétique émise par le soleil. Chaque seconde, 3.89MJ d'énergie nucléaire est libéré par le noyau du soleil[6]. Ce flux d'énergie nucléaire est rapidement converti en énergie thermique et transportée vers la surface de l'étoile où elle est libérée sous la forme d'un rayonnement électromagnétique. Le Soleil ressemble à un corps noir avec une température de surface de 5800°K et un pic d'énergie spectral émise à 480 nm. Environ 77 % de l'énergie émise se trouve dans la bande de 300 à 1200 nm comme le montre la figure (II.1)

La densité de puissance émise par le soleil est de l'ordre de 64MW/m² dont 1370W/m² environ atteint le sommet de l'atmosphère de la terre sans absorption significative dans l'espace. Cette dernière quantité est appelée la constante solaire. La gamme spectrale du rayonnement solaire est très large et couvre les rayons ultraviolets (UV) dont la longueur

d'onde ($\lambda < 400\text{nm}$) et représente 6% du spectre du rayonnement, infrarouge (IR) ($\lambda > 700\text{nm}$) pour 46%, y compris le visible ($400 < \lambda < 700\text{nm}$) pour 48%.

Le rayonnement solaire incident sur le panneau PV est composé de trois parties : le rayonnement direct, le rayonnement diffus et le rayonnement réfléchi par la surface de la Terre (albédo). Ils se décomposent comme suit :

- Rayonnement direct (ou faisceau de rayonnement) : rayonnement qui n'est pas réfléchi ou diffusé et qui atteint la surface de la Terre directement.
- Rayonnement diffus : Rayonnement dispersé dans toutes les directions de l'atmosphère. Une partie arrive au plan sur la surface de la Terre (non directionnelle).
- Albédo : Part du rayonnement qui frappe la terre et qui est réfléchi par le sol.
- Rayonnement global : Combinaison de ces trois rayonnements.

Afin de pouvoir calibrer et comparer les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde, la notion de masse d'air (AM) est établie. Elle représente la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle θ du soleil depuis le zénith:

$$AM = 1 / \sin(\theta)$$

Par exemple :

- Les conditions AM1 sont obtenues lorsque le soleil est au Zénith (au niveau de la mer) $AM = 1/\sin(90^\circ) = 1$ et on note AM1.
- Avec un soleil à 30° sur l'horizon, les conditions $AM2 = 1/\sin(30^\circ)$ sont obtenues et on note AM2.
- Les conditions AM0 désignent le rayonnement solaire hors atmosphère. Ces conditions sont utilisées dans le domaine spatial, par exemple pour caractériser les cellules solaires utilisées comme sources d'alimentations des satellites.

Les conditions AM1.5 appelées aussi les conditions standards de test caractérisent un spectre de référence avec une puissance de $1000\text{W}/\text{m}^2$ (IEC 60904-3, 2008 Ed 2) [IEC, 2008]. Ces conditions sont utilisées pour tester les performances des cellules solaires destinées à des applications terrestres.

Des sources artificielles sont utilisées pour simuler le spectre AM1.5 au niveau des laboratoires appelés simulateurs solaires. Ces simulateurs se composent de différents types de lampes (par exemple xénon ou halogène) pour simuler le spectre AM1.5.

La figure (II.2) montre le spectre du rayonnement solaire reçu pour différentes conditions AM.

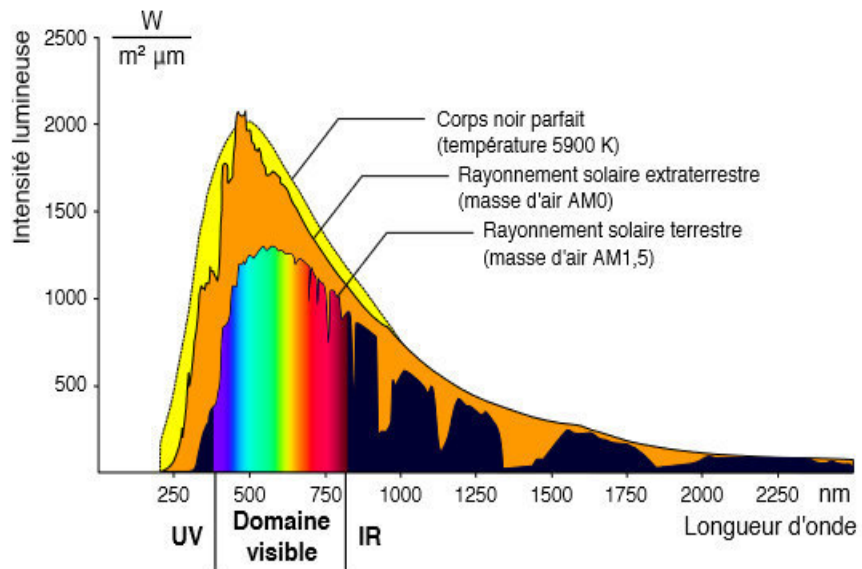


Figure (II.1) - Spectre du rayonnement solaire reçu .

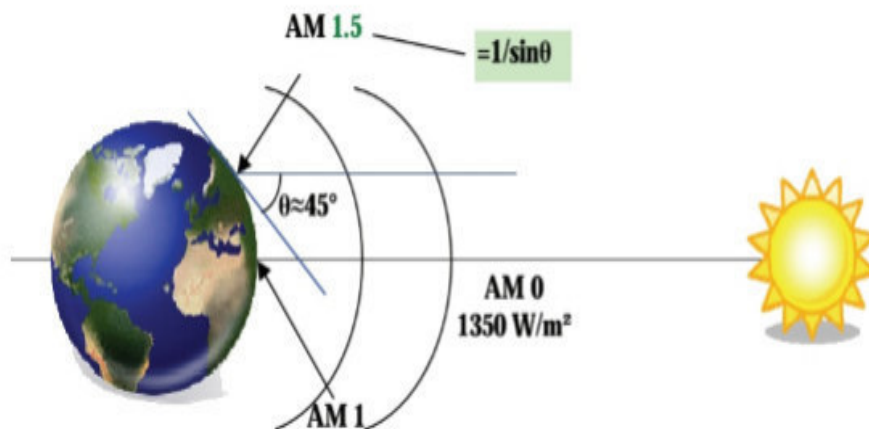


Figure (II.2) - Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.

II.1.2 Cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque (PV), n'est pas une pile, mais un convertisseur instantané d'énergie, qui ne pourra fournir une énergie sous forme électrique que si elle reçoit une énergie sous forme de rayonnement. Elle représente une source de tension et de courant variable.

II.1.3 Spectre du rayonnement et constante solaire

La production d'électricité photovoltaïque dépend de l'ensoleillement du lieu et de la température, donc de sa localisation géographique, de la saison et de l'heure de la journée. La température à la surface du soleil avoisine les 5800 K.

On appelle constante solaire l'éclairement énergétique du Soleil sur l'atmosphère extérieure lorsque le Soleil et la Terre se trouvent distants d'une UA (unité astronomique) est la distance séparant la Terre du soleil, soit 149 597 890 km. Les valeurs actuellement admises sont proches de 1360 W/m^2 la constante solaire désigne l'éclairement intégré total sur la totalité du spectre comme me montre la Figure (II.3).

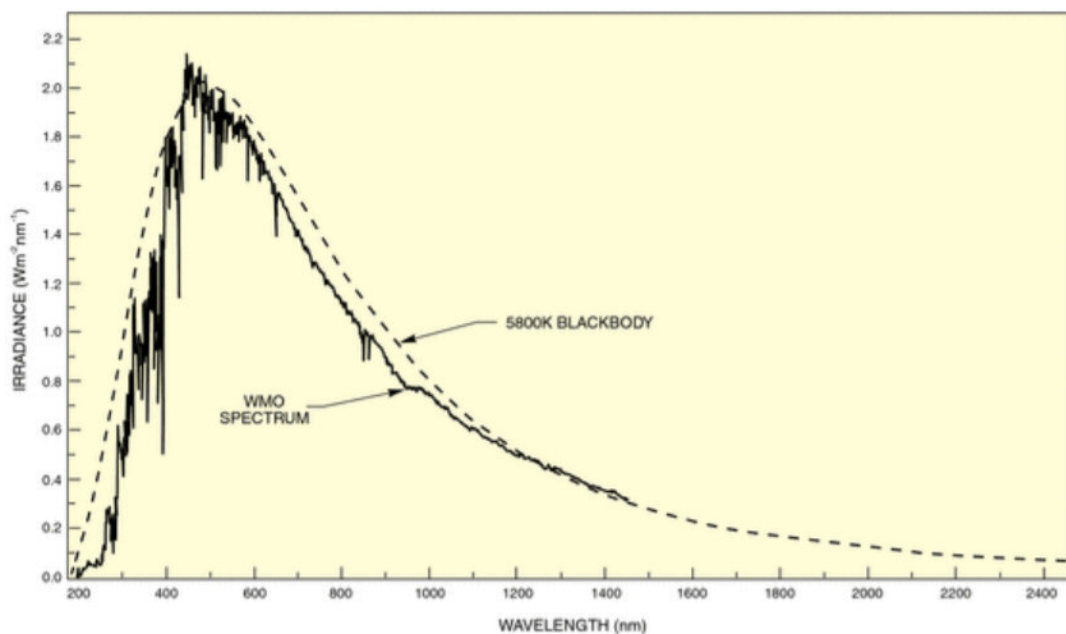


Figure (II.3): Spectre de rayonnement à l'extérieur de l'atmosphère terrestre comparé au spectre d'un corps noir à 5800 K.

L'éclairement qui traverse l'atmosphère terrestre varie chaque année d'environ 6,6 % en raison de la variation de distance entre la Terre et le Soleil. Les variations de l'activité solaire provoquent des modifications de l'éclairement pouvant aller jusqu'à 1 % [7].

Le spectre du rayonnement solaire à la surface de la Terre est constitué de différents éléments. Le rayonnement direct provient directement du soleil, tandis que le rayonnement diffus est diffusé par le ciel et le milieu extérieur. Un autre rayonnement encore est réfléchi par le milieu extérieur (la terre ou la mer) en fonction de l'albédo local (albédo = rapport de l'énergie solaire réfléchie par unité de surface sur l'énergie solaire incidente). Le

rayonnement terrestre total est appelé rayonnement global. Il convient en ce qui concerne l'éclairement global de définir la direction de la surface cible, figure (II.4).

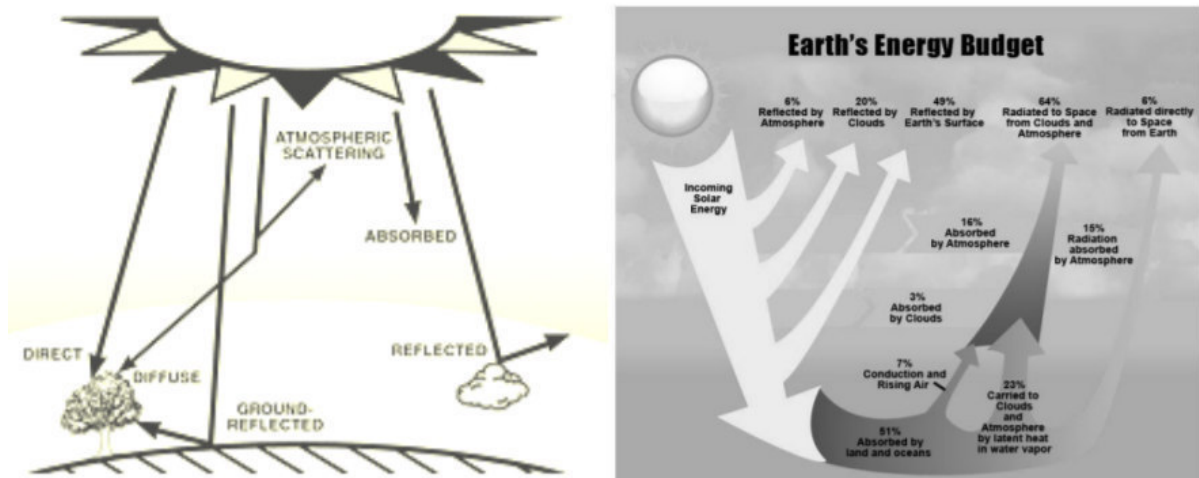


Figure (II.4): Rayonnement global total au niveau du sol et ses composantes directes, diffuses et réfléchives.

L'intégralité du rayonnement qui atteint le sol traverse l'atmosphère, ce qui modifie le spectre en raison des phénomènes d'absorption et de diffusion. L'oxygène et l'azote atomiques et moléculaires absorbent le rayonnement de très courte longueur d'onde, faisant effectivement obstacle au rayonnement aux longueurs d'onde de plus élevées entre 200 et 300 nm (bande de Hartley), mais absorbe peu le rayonnement visible. La vapeur d'eau, le dioxyde de carbone et, dans une moindre mesure, l'oxygène, absorbent de manière sélective dans l'infrarouge proche. La diffusion (de particules) de Rayleigh dépendante de la longueur d'onde et la diffusion par les aérosols et autres particules en suspension dans l'air, dont notamment les gouttelettes d'eau, modifient également le spectre du rayonnement qui atteint le sol (c'est à ces deux phénomènes que le ciel doit sa couleur bleue).

Dans une atmosphère estivale sans nuage typique et avec un angle zénithal de 0°, les 1367W/m² qui atteignent l'atmosphère extérieure sont réduits à un rayonnement du faisceau direct de 1050 W/m² environ et à un rayonnement global d'environ 1120 W/m² sur une surface

II.1.4 Variation diurne et annuelle

La figure (II.5) montre les variations diurnes et annuelles typiques du flux radiatif solaire global. La demi-largeur réelle et la position maximale de la courbe dépendent de la latitude et de la saison. L'impact des nuages est pris en compte. on remarque sur cette figure que

l'éclairement solaire global au soleil de midi mesuré dans l'Arizona, montre la variation annuelle.

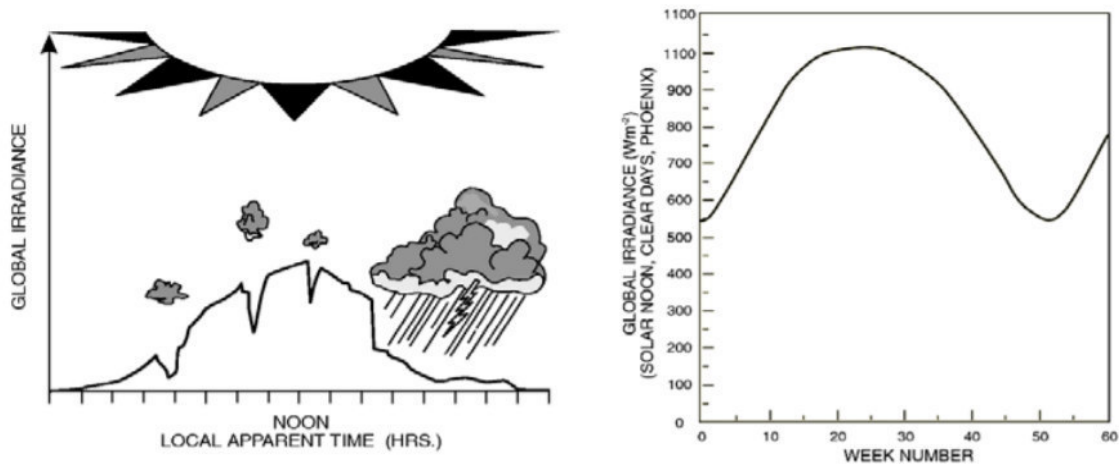


Figure (II.5): Variations diurnes du flux radiatif solaire global un jour nuageux et annuellement.

II.1.5 Irradiante disponible sur la surface de la terre

Au-delà de la constante solaire de l'ordre de 1360W/m^2 qui ne tient pas compte de la traversée de l'atmosphère, l'énergie disponible à la surface terrestre est moindre et dépend de l'exposition dans le temps et la localisation. En effet, l'ensoleillement d'une surface est plus important quand cette surface fait directement face au Soleil. Lorsque l'angle augmente entre la direction normale à la surface et celle des rayons du Soleil, l'ensoleillement est réduit proportionnellement au cosinus de l'angle. Cela explique la répartition de l'ensoleillement et donc du potentiel solaire sur la Terre visible sur la figure (II.6).

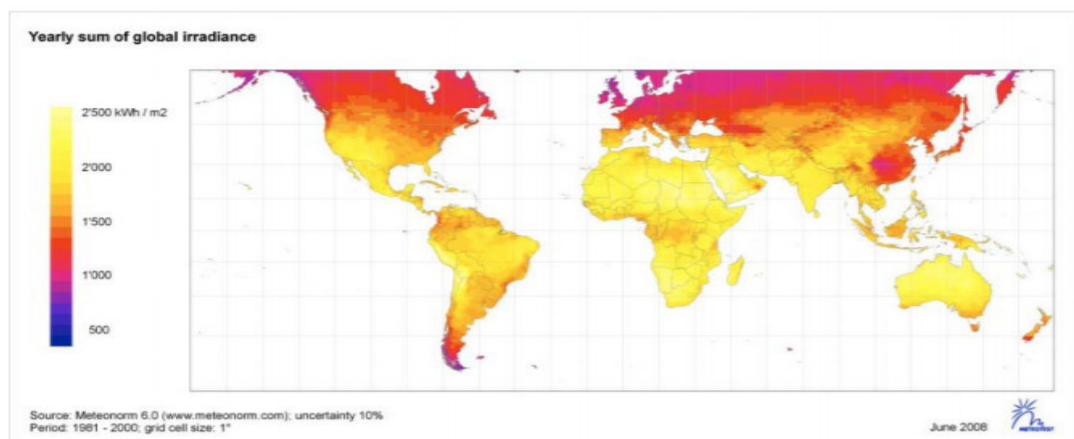


Figure (II.6): Distribution spatiale du rayonnement solaire annuel sur la Terre et en France

II.1.6 Angle permettant de projeter le flux incident sur la surface du capteur

Les figures (II.7-9) illustrent les angles qui rentrent en jeu dans le calcul de l'irradiante disponible à un moment de la journée, pour une localisation spatiale et un montage spécifique angulaire du capteur.

➤ **Déclinaison : δ**

La déclinaison est l'angle situé entre l'équateur et la distance du centre de la Terre au centre du Soleil. Comme l'axe de la Terre est incliné à $23,45^\circ$, la déclinaison varie au cours d'une année de $\pm 23,45^\circ$. En été et en hiver, la déclinaison atteint son maximum. En revanche, au printemps et à l'automne, elle s'élève à 0° .

➤ **Azimut : α**

L'azimut solaire est l'angle que fait le plan vertical du soleil avec le plan méridien du lieu. On le mesure à partir du Sud, vers l'Est ou vers l'Ouest (0° pour le Sud, 180° pour le Nord). Les lignes verticales du diagramme figurent les angles azimutaux de 10° en 10° .

➤ **Élévation du soleil ou hauteur : γ**

La hauteur du soleil est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan horizontal. Les lignes horizontales du diagramme figurent les hauteurs angulaires de 10° en 10° au-dessus de l'horizon (0° pour le plan horizontal et 90° pour le zénith).

$$\gamma = -\Phi + \delta$$

Comme le Soleil se « déplace » dans le ciel pendant la journée, son élévation se modifie sans cesse.

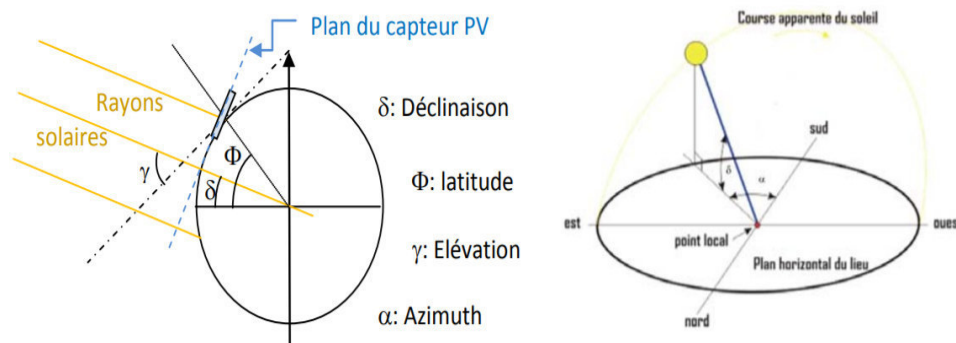


Figure (II.7) : Schéma de principe de la terre et des angles rentrant dans le calcul de l'irradiante.

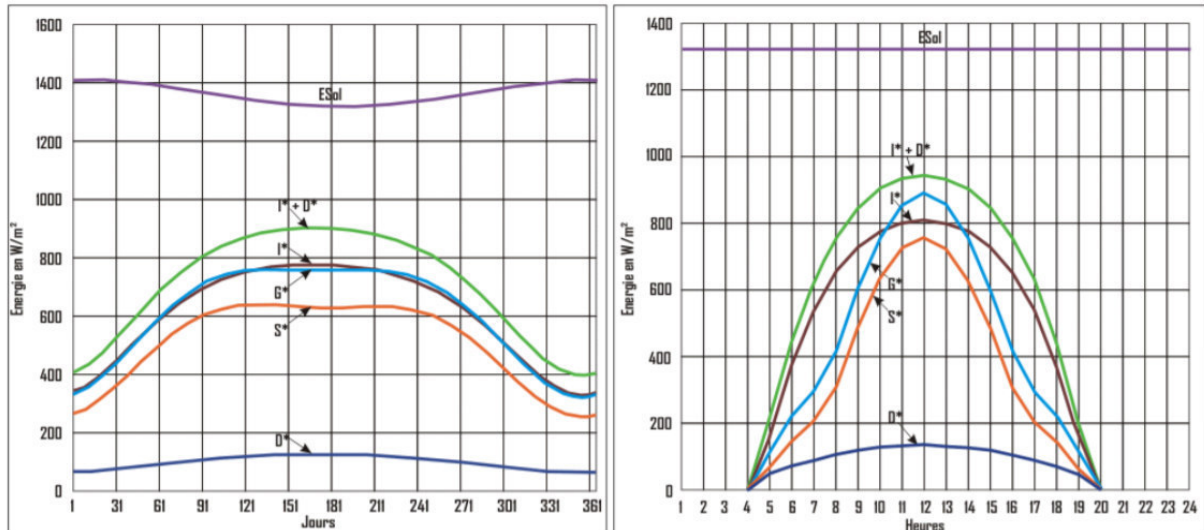


Figure (II.8) : Courbe bleu clair (G^*) : Energie solaire qui arrive sur le capteur. Courbe $I^* + D^*$ (vert clair) : cas d'un capteur solaire motorisé. En moyenne suivant la courbe G^* , il est récupéré 14,2% de $ESol$ sur l'année et 28,6% sur la journée. ($ESol$: rayonnement solaire, I^* : rayonnement solaire direct, D^* : rayonnement solaire diffus, G^* : rayonnement solaire global, S^* rayonnement solaire direct sur le capteur.

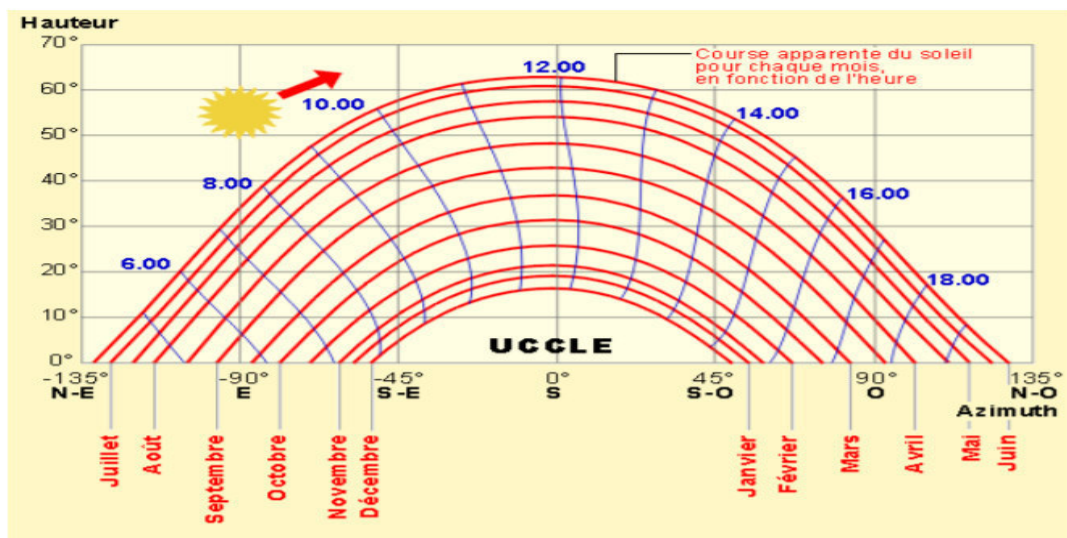


Figure (II.9) : Elévation en fonction de l'azimut (heure de la journée) et de la période de l'année (latitude 43°)

➤ **Angle du capteur : θ**

Lorsque le rayonnement touche une surface horizontale, l'angle d'incidence du capteur doit être pris en compte. On introduit alors un rendement d'utilisation en comparant la surface d'un plan horizontal avec un plan incliné perpendiculaire au Soleil et pour la même puissance de rayonnement comme le montre la figure (II.10)..

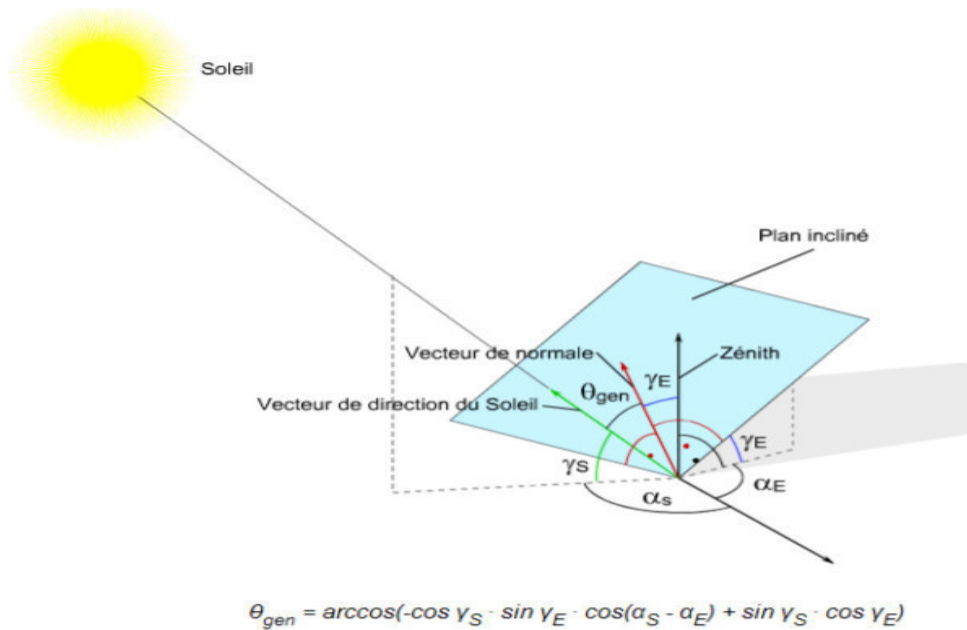


Figure (II.10): Représentation des angles projetés terre-soleil et capteur-horizon

II.1.7 Rayonnement quotidien moyen, Temps d'éclairage équivalent

Un module se caractérise avant tout par sa puissance-crête P_c (W), puissance dans les conditions STC (standard test conditions). Le module exposé dans les conditions STC va produire à un instant donné une puissance électrique égale à cette puissance crête, et si cela dure N heures, il aura produit une énergie électrique égale au produit de la puissance crête par le temps écoulé :

$$E_{elec} = N \cdot P_c \quad (II.1)$$

Cependant, le rayonnement n'est pas constant pendant une journée d'ensoleillement, donc on ne peut pas appliquer strictement cette loi. Afin de calculer ce que produit un module photovoltaïque pendant une journée d'ensoleillement qui a un certain profil et une énergie solaire intégrée en Wh/m^2 , on va assimiler cette énergie solaire au produit du rayonnement instantané $1000 W/m^2$ par un certain nombre d'heures que l'on appelle « nombre d'heures équivalentes »[8].

II.2 Principe des capteurs solaires

Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base desilicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme decourant et de tensioncontinu est ainsi directement utilisable [8].

II.2.1 Principe de fonctionnement

La conversion photovoltaïque consiste à transformer l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière, la figure (II.11) illustre le principe de conversion photovoltaïque.

Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique. [8]

Généralement, la paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique, c'est l'effet photovoltaïque.

Même si le phénomène électrique est secondaire devant le phénomène thermique (incluant la chauffe du matériau par les rayons solaires), récupérer tout ou partie de l'énergie électrique est le premier objectif des capteurs photovoltaïques sous forme de cellules ou de générateurs.

Comme exemple, les cellules solaires réalisées en associant un matériau semi-conducteur dopé N à un autre semi-conducteur dopé P.

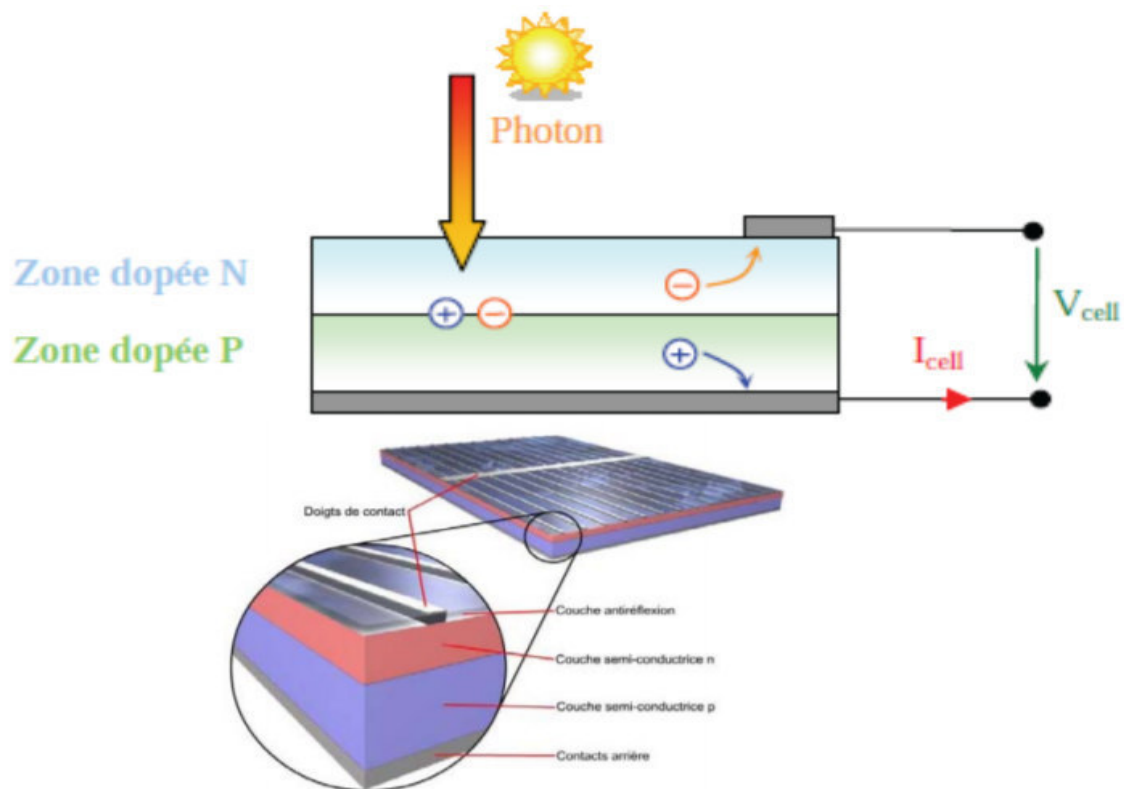


Figure (II.11) : Schéma de principe de conversion photovoltaïque.

II.2.2 Composition d'une cellule photovoltaïque

➤ Couche semi-conductrice de type p

Le matériau semi-conducteur contient des atomes externes qui possèdent une quantité inférieure d'électrons libres. On obtient ainsi un excédent positif de porteurs de charge (trous d'électrons) dans le matériau semi-conducteur. Ces couches sont appelées des couches semi-conductrices à conduction de type **p**. [8]

➤ Couche semi-conductrice de type n

Le matériau semi-conducteur contient des atomes externes qui possèdent une quantité supérieure d'électrons libres. On obtient ainsi un excédent négatif de porteurs de charge (électrons) dans le matériau semi-conducteur. Ces couches sont appelées des couches semi-conductrices à conduction de type **n**.

➤ Doigts de contact et contact métallique de la face arrière

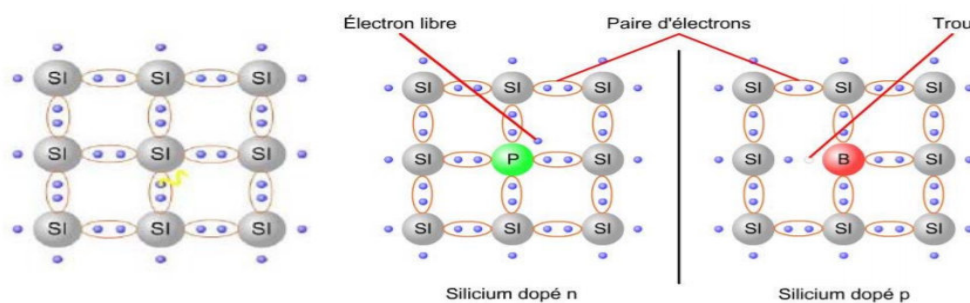
Avec le contact métallique arrière, les doigts de contact constituent les connexions permettant de brancher par exemple un consommateur. Couche anti réflexion.

➤ La couche anti réflexion

Le but de cette couche est de protéger la cellule photovoltaïque et de réduire les pertes de réflexion à la surface de la cellule.

II.2.3 Production des électrons trous

Un atome de silicium possède quatre électrons de valence. Dans un cristal de silicium, deux électrons d'atomes adjacents forment une paire d'électrons. Dans cet état, le cristal de silicium n'est pas un conducteur électrique, car il ne dispose d'aucun électron libre pour transporter la charge. [8], la figure (II.12) montre un exemple d'une matière dopée et non dopée, cela dont le but d'avoir un trou libre.



Figure(II.12) : Schéma de la matière cas sans et avec dopage.

Un champ électrique permet de séparer les électrons des trous. Dans les semi-conducteurs, l'apport d'atomes perturbateurs permet de générer un champ électrique.

A cet effet, des atomes à cinq électrons sont placés dans une région. Cette région est un semi-conducteur n ou dopé n, car, comparée au réseau de cristal de silicium pur, elle présente une charge légèrement négative.

Des atomes à trois électrons sont placés dans une autre région. Cette région est un semi-conducteur p ou dopé p, car, comparée au réseau de cristal de silicium pur, elle présente une charge légèrement positive. Si les semi-conducteurs n et p sont adjacents, il se forme à leur limite la jonction p-n, dont provient un champ électrique.

On obtient une jonction p-n en associant des couches semi-conductrices p et n. À la limite entre les deux couches, les électrons se déplacent de la couche n vers la couche p et s'y recombine avec les trous.

II.2.4 Différents types de cellules solaires

Les cellules solaires peuvent être réparties en trois groupes, selon le matériau de base utilisé :

- Cellules monocristallines
- Cellules poly cristallines
- Cellules à couches minces
- Les cellules multi-jonctions à haut rendement.

Le groupe des cellules à couche mince compte les cellules amorphes au silicium et les cellules formées à partir d'autres matériaux, comme le tellure de cadmium ($CdTe$), le di sélénure de cuivre et d'indium (CIS) ou l'arséniure de gallium (GaAs). Dans la pratique, les cellules en silicium ont fini par s'imposer

a- Cellules solaires monocristallines (figure II.13)

Des blocs de silicium sont formés à partir de fonte de silicium ultra-pure. Dans un monocristal, le réseau cristallin complet est agencé de manière uniforme. Le bloc de silicium est découpé en rondelles de 200 à 300 μm d'épaisseur, appelées galettes. Pour permettre un usage optimal de la surface du module solaire, les cellules rondes sont découpées en éléments carrés. D'habitude, les cellules présentent une longueur d'arête de 152 mm. La fabrication est conclue par le dopage, l'application des surfaces de contact et de la couche anti réflexion.

Possédant un rendement variant entre 15 et 18 %, les cellules monocristallines fabriquées industriellement sont les cellules ayant actuellement le rendement le plus élevé. Cependant, leur fabrication requiert plus d'énergie et de temps que celle des cellules poly cristallines. [8]

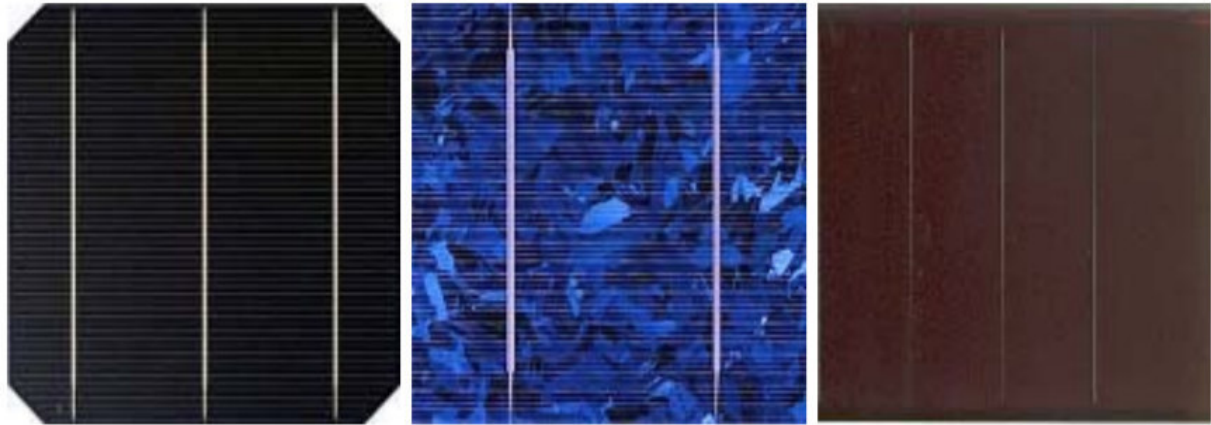


Figure (II.13): Cellules solaires monocristallines, poly cristallines, amorphes.

b- Cellules solaires poly cristallines

Le matériau de base est du silicium ultra-pur qui est porté à fusion. Mais pour la fabrication de cellules solaires poly cristallines, on ne cultive pas de monocristaux, mais la fonte de silicium est refroidie de façon contrôlée dans un moule carré. Pendant le refroidissement, les cristaux s'orientent de manière irrégulière et forment la surface miroitante typique pour les cellules solaires poly cristallines. Les blocs de silicium carrés sont découpés en galettes de 200 à 300 μm d'épaisseur. La fabrication est conclue par le dopage, l'application des surfaces de contact et de la couche anti réflexion. La couche anti réflexion offre à la cellule solaire sa surface bleue typique, car le bleu réfléchit le moins de lumière et en absorbe la plus grosse quantité. Les cellules solaires poly cristallines présentent un rendement entre 13 et 16 %.[9]

c- Cellules solaires amorphes

Le terme amorphe vient du grec (a : sans, morphé: forme) et signifie qui n'a pas de forme. En physique, on appelle amorphes les éléments dont les atomes présentent des formes irrégulières. Si les atomes ont une structure ordonnée, on les appelle des cristaux.

Pour la fabrication de cellules solaires amorphes, on applique le silicium sur un matériau support, comme par ex. le verre. L'épaisseur du silicium s'élève alors à env. 0,5 à 2 μm . Ainsi, non seulement la quantité de silicium requise est-elle assez faible, mais le découpage

fastidieux des blocs de silicium n'est plus nécessaire. Le degré de rendement des cellules solaires amorphes se situe seulement à 6-8 %.

Le tableau suivant montre le rendement des cellules selon le type de ces dernières.

Matériau de base	Rendement en %	Surface en m2
Cellule monocristalline	15-18	7-9
Cellule poly-cristalline	13-16	8-9
Cellule amorphe	6-8	13-20
Cellule au diséléniure de cuivre et d'indium	10-12	9-11

Figure (II.14) : Rendement des différentes technologies

d- Les cellules multi-jonctions à haut rendement.

Aujourd'hui, la plupart des cellules photovoltaïques inorganiques sont constituées d'une simple jonction PN. Dans cette jonction, seuls les photons dont l'énergie est égale ou supérieure à la transition énergétique d'un électronique (cad la bande interdite du matériau notée E_g en eV) sont capables de créer des paires électron-trou. En d'autres termes, la réponse photovoltaïque d'une cellule simple jonction est limitée à l'énergie du photon. Seule la proportion du spectre solaire dont l'énergie des photons est supérieure au gap d'absorption du matériau est utile, l'énergie des photons plus faible n'est donc pas utilisable.

D'autre part, même si l'énergie des photons est suffisante, la probabilité de rencontrer un électron est faible. Ainsi, la plupart des photons traversent le matériau sans avoir transférer leur énergie. Une première réponse pour limiter les pertes est connue de longue date du point de vue technologique. Il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants comme le montre la figure (II.15). Ainsi il est possible d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité avec des rendements de conversion très importants. [11]

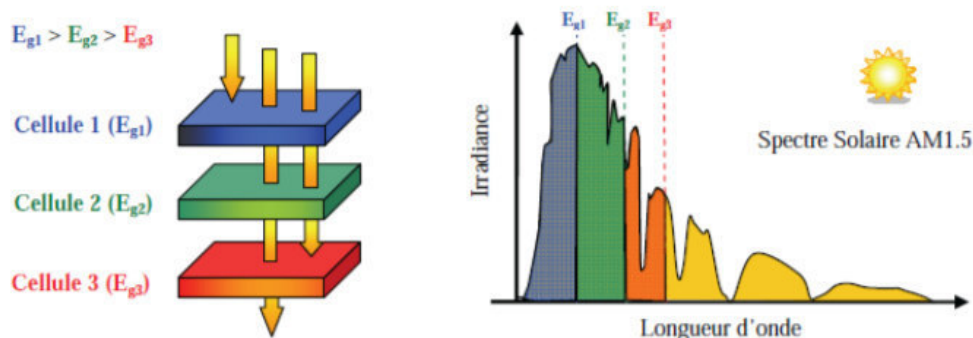


Figure (II.15) : Principe de la cellule à hétérojonction

II.2.5 Caractéristique U/I de la cellule solaire (figure (II.16))

Pour le spécialiste, la caractéristique d'une cellule ou d'un module est un critère d'appréciation très important. L'illustration montre la courbe U/I typique d'une cellule PV pour différentes intensités de rayonnement ainsi que pour différents types de matériaux.

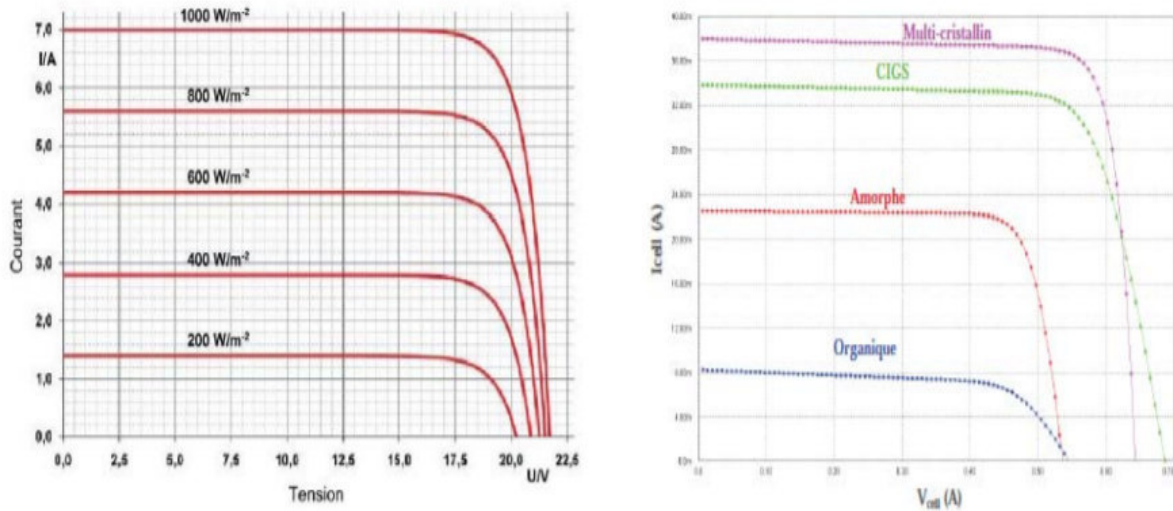


Figure (II.16) : Courbes caractéristiques courant tension d'une cellule pour différents éclairements et pour différentes technologies.

La figure (II.17) montre l'allure très caractéristique de la puissance. La puissance maximum qui se trouve être atteinte pour une plage restreinte du couple (U,I) devra être recherchée à tout instant quel que soit l'état d'éclairement.

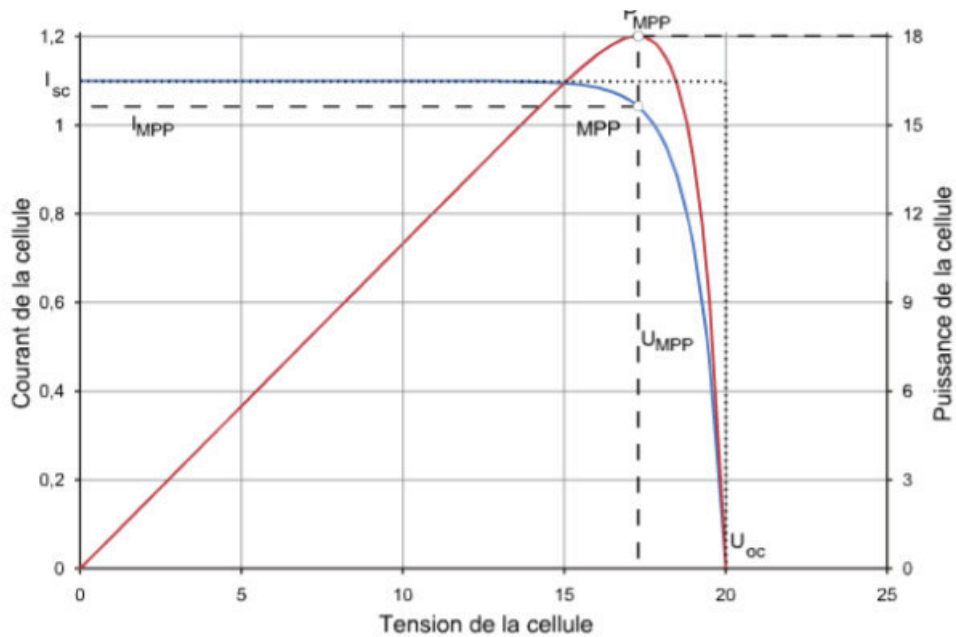


Figure (II.17) : Caractéristiques majeures d'une cellule photovoltaïque.

II.2.6 Effet de la température sur la cellule photovoltaïque

De même, toute l'énergie des photons n'arrivant pas à se transformer en électricité est absorbée par le matériau sous forme thermique. Le matériau constituant les capteurs photovoltaïques a alors sa température interne qui augmente proportionnellement à l'énergie solaire reçue. Le taux de conversion photon-électron est faible car un certain nombre de conditions doivent être réunies pour que ce phénomène se produise. L'effet thermique est donc majoritaire sur la plupart des capteurs, détériorant d'autant plus les performances de ces derniers. C'est pourquoi la température d'une cellule est toujours plus élevée que la température ambiante.

Pour estimer la température de cellule T_c à partir de la température ambiante T_a , on peut utiliser la formule de correction suivante :

$$T_c = T_a + \frac{E_s}{800} (T_{uc} - 20) \quad (\text{II.2})$$

T_{uc} Est la température nominale de fonctionnement de la cellule solaire, T_a est la température ambiante, E_s est l'énergie d'ensoleillement.

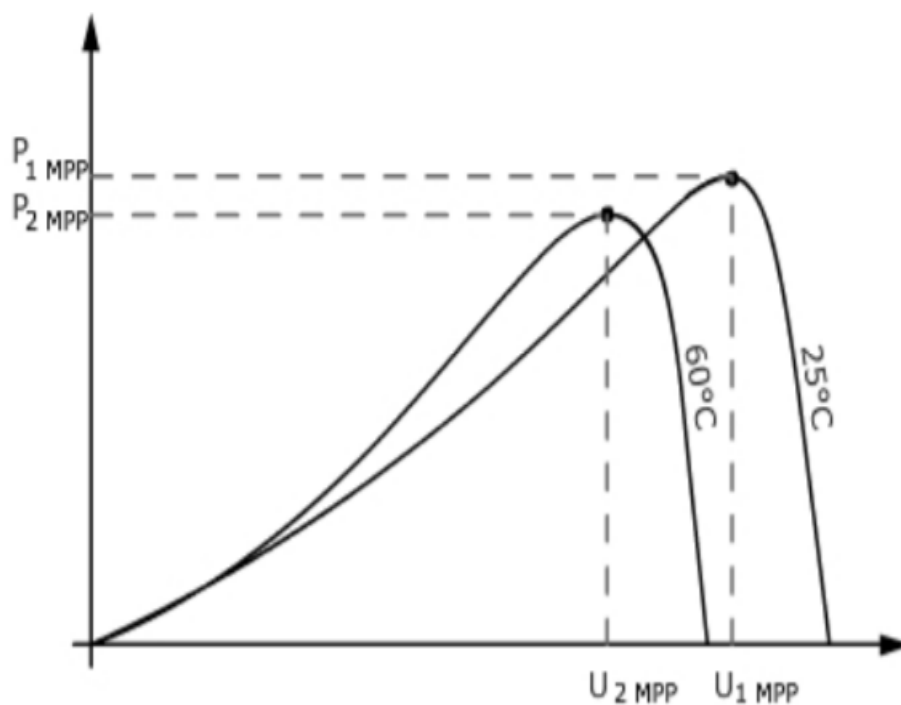


Figure (II.17) : Evolution de la puissance fournie par une cellule PV lorsque sa température de fonctionnement augmente.

Selon la figure(II.17), pour avoir un rendement élevé, il faut optimiser la puissance fournie par la cellule en fonction de la température.

II.2.7 Modélisation électrique d’une cellule photovoltaïque.

Le module photovoltaïque est caractérisé par son schéma électrique équivalent qui se compose d’une source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, une résistance shunt (court-circuit) R_{sh} qui est une conséquence de l’état le long de la périphérie de la surface de la cellule, une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contact et de connexion, une diode en parallèle qui modélise jonction PN, la figure (II.18) illustre le schéma équivalent d’une cellule photovoltaïque. .

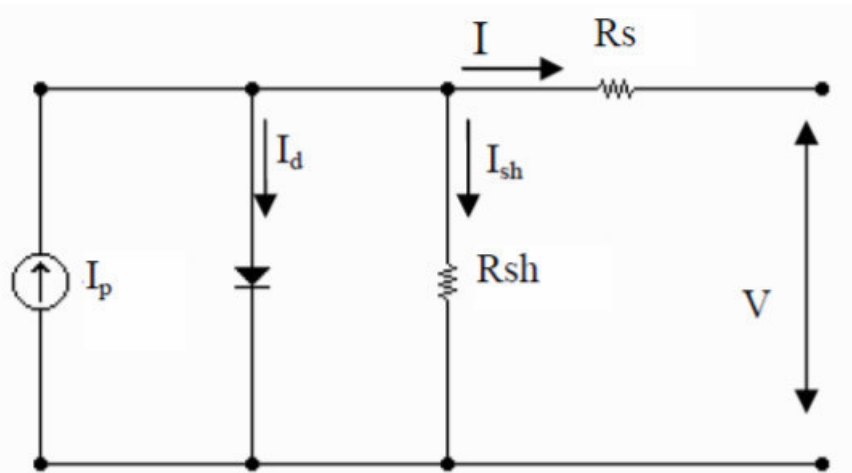


Figure (II.18) : Montage électrique équivalent

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I = I_p - I_d - I_{sh} \quad (II.3)$$

Avec I , le courant délivré par le module, I_p le photo courant, I_d le courant de diode et I_{sh} Le courant shunt. Le courant I_p est directement dépendant des rayonnements solaire E_s et de la température de la cellule T_c , il est donné par la relation suivante:

$$I_p = P_1 E_s [1 + P_2 (E_s - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{cref})] \quad (II.4)$$

P1	0.0036	P3	-0.0005	R_s	0.614
P2	0.0001	P4	70.874	R_{sh}	151.16

Tableau 2 : Exemple de valeurs des paramètres

La température de la cellule peut être calculée à partir de la température ambiante et celle d'irradiation comme suit :

$$T_c = T_a + \frac{E_s}{800} (T_{uc} - 20) \quad (II.4)$$

Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_{sat} \left(e^{\frac{e_0(V+RI)}{A_n k T_c}} - 1 \right) \quad (II.5)$$

Avec I_{sat} est le courant de saturation. Il est fortement dépendant de la température et est donné par :

$$I_{sat} = P_4 T_c^3 e^{\frac{E_g}{k T_c}} \quad (II.6)$$

Le courant de la résistance shunt est calculé par :

$$I_{sh} = \frac{V+R_S I}{R_{sh}} \quad (II.7)$$

En regroupant l'ensemble des équations, on obtient :

$$I = I_p(E_s, T_j) - I_d(V, I, T_j) - I_{sh}(V) \quad (II.8)$$

$$= P_1 E_s [1 + P_2 (E_s - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{cref})] - P_4 T_c^3 e^{\frac{E_g}{k T_c}} \left(e^{\frac{e_0(V+RI)}{A_n k T_c}} - 1 \right) - \frac{V+R_S I}{R_{sh}} \quad (II.9)$$

Il est alors proposé le schéma électrique équivalent de la cellule PV en un schéma bloc comportant quatre variables comme le montre la figure (II.19).

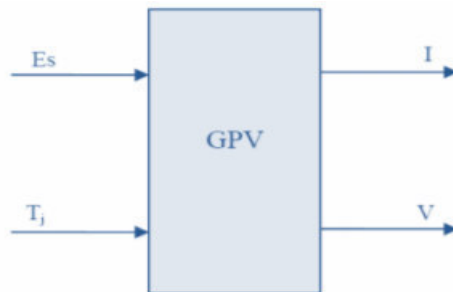


Figure (II.19): Schéma bloc du Générateur Photovoltaïque

E_{ref}	Irradiation de référence	1000 W/m ²
T_{ref}	Température de référence	25°C
ns	nombre de cellule en série dans un module	72
e_0	La charge d'électron	1,6.10-19C
K	Constant de Boltzmann	1,38.10-23 J/K
E_g	Energie de gap pour le silicium cristalline	1.12 ev
T_a	Température ambiante	
T_{UC}	Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur	45°C

Facteur de forme

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} * V_{co}} \quad (II.10)$$

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Il est illustré sur la Figure (II.20). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} * V_{oc}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales. [10]

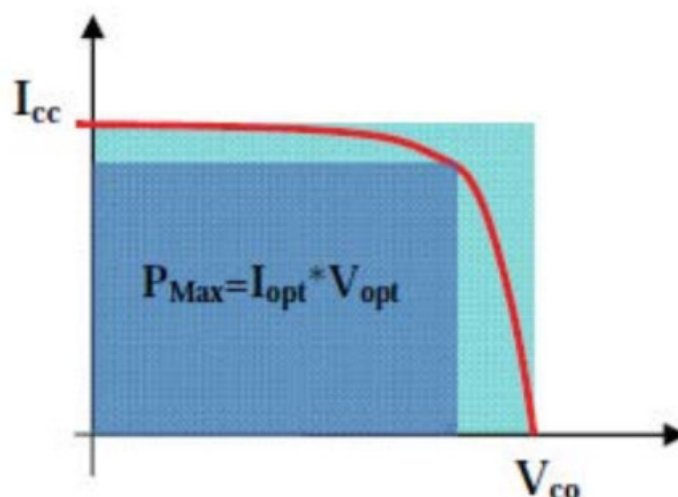


Figure (II.20) : Notion de facteur de forme FF pour une cellule photoélectrique.

II.3 Convertisseur Buck (hacheur)

II.3.1 Définition

Un hacheur est un convertisseur statique qui permet de transformer une tension continue de valeur fixe en une autre tension continue réglable. C'est l'équivalent du transformateur en alternatif comme le montre la figure (II.21)

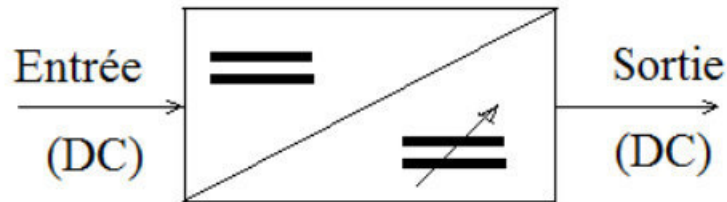


Figure (II.21):schéma de principe de le hacheur

Le hacheur permet la modulation de l'énergie entre une source et une charge continues. Cette source et cette charge peuvent être soit de nature capacitive (source de tension), soit de nature inductive (source de courant).

Il est constitué d'un interrupteur commandable qui peut être un transistor (pour des faibles puissances) ou un thyristor (pour grande puissance)

Le rapport entre la durée ton de fermeture de l'interrupteur et la période de commutation T s'appelle le rapport cyclique « Duty Cycle ».

$d = \text{ton}/T$ ou bien : $\text{ton} = d.T$ d'où : $\text{toff} = (1-d).T$

Pour des raisons expérimentales, on donne toujours la fréquence de commutation f_{sw} « switching frequency » au lieu de la période de commutation. Un hacheur est un abaisseur (dévolteur ou Buck) lorsque la tension de sortie est inférieure à celle d'entrée. L'inverse est un hacheur élévateur (survolteur ou Boost). Selon le procédé de hachage (découpage), on peut faire varier la valeur moyenne de la tension de sortie de 3 manières :

1. Hacheur à fréquence fixe et à largeur d'impulsion variable PWM.
2. Hacheur à fréquence variable et à largeur d'impulsion fixe PFM.
3. Hacheur à fréquence et à largeur d'impulsion variable.[5]

II.3.2 Domaine d'utilisation des hacheurs

Un des gros domaines d'utilisation des hacheurs est la variation de vitesse du moteur à courant continu (MCC), Ils équipent par exemple la majorité des engins de moyenne traction, tels que ceux utilisés pour le métro. La première génération de TGV (TGV Sud Est) est équipée d'ensembles hacheurs-moteurs à courant continu.

On trouve aussi des hacheurs dans tous les équipements destinés à l'utilisation de l'énergie éolienne ou solaire. Ils permettent de rendre constante une tension d'entrée très versatile. Les hacheurs sont également utilisés dans l'alimentation des moteurs pas à pas.

II.4 Types des hacheurs

Du point de vue réversibilité des grandeurs de sortie, on distingue deux catégories des hacheurs : Réversibles et irréversibles. La réversibilité permet d'apporter certains avantages aux hacheurs. On cite par exemple, l'inversion du sens de rotation des moteurs électriques, le freinage par récupération, rechargement des batteries par récupération....etc. [6]

A) **Les hacheurs réversibles** : Les hacheurs réversibles permet l'inversion du courant ou de la tension. Ce type de comportement se rencontre usuellement dans les systèmes d'entraînements électriques. Ainsi, un moteur en sortie d'un hacheur représente une charge. Cependant, si on veut réaliser un freinage, le moteur va devenir une génératrice, ce qui va entraîner un renvoi d'énergie à la source (mieux qu'un simple freinage mécanique). [6]

Dans cette catégorie, on distingue trois types :

- Hacheur réversible en tension (deux quadrants) : C'est uniquement la tension appliquée à la charge qui peut prendre des valeurs positives ou négatives.

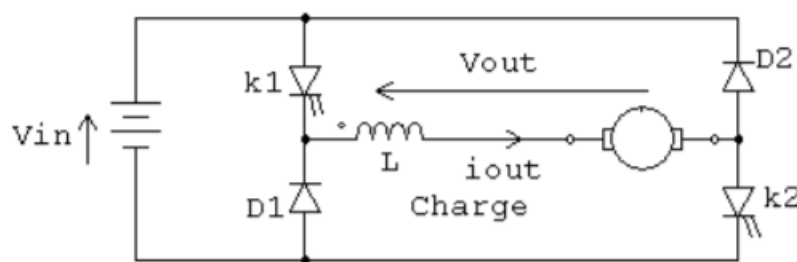


Figure (II.22) :Schéma de principe d'un hacheur réversible en tension

- hacheur réversible en courant (deux quadrants) : C'est uniquement le courant de charge qui peut prendre des valeurs positives ou négatives.

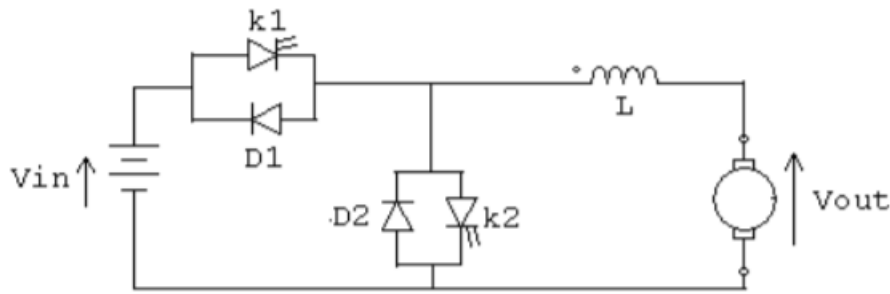


Figure (II.23) : Schéma de principe d'un hacheur réversible en courant

- hacheur réversible en courant et en tension (quatre quadrants) : Grâce à la structure quatre quadrants, la tension et le courant de charge peuvent les deux avoir des allures positives ou négatives.

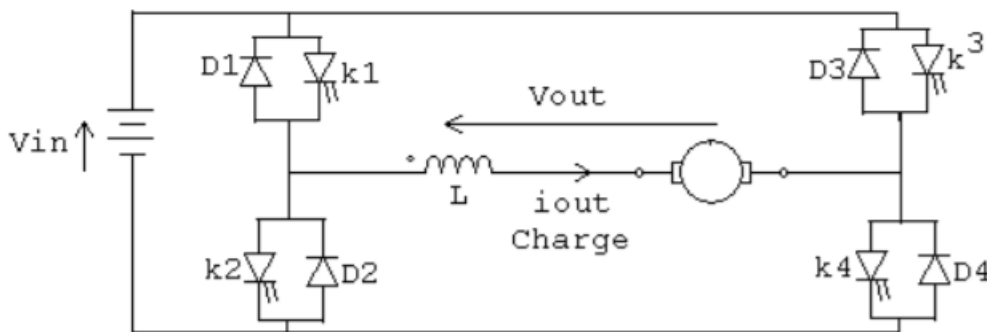


Figure (II.24) : Schéma de principe d'un hacheur réversible en courant et en tension

B) **Les hacheurs non réversibles** : Les hacheurs non réversibles permet un transfert unidirectionnel de l'énergie électrique (uniquement de la source vers la charge). [6] Dans cette catégorie et selon le type des sources de l'entrée et de la sortie, on distingue deux sous-catégories : μ

- Les hacheurs à liaison directe qui associent deux sources de nature différentes :
 - Le hacheur série (dévolteur ou Buck).

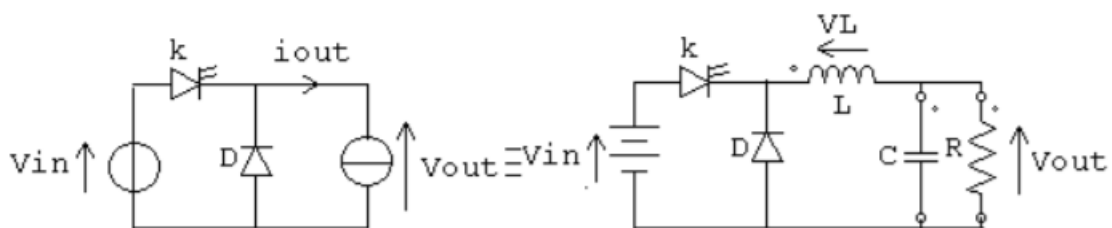


Figure (II.25) : Schéma de principe d'un hacheur Buck.

- Le hacheur parallèle (survolteur ou Boost).

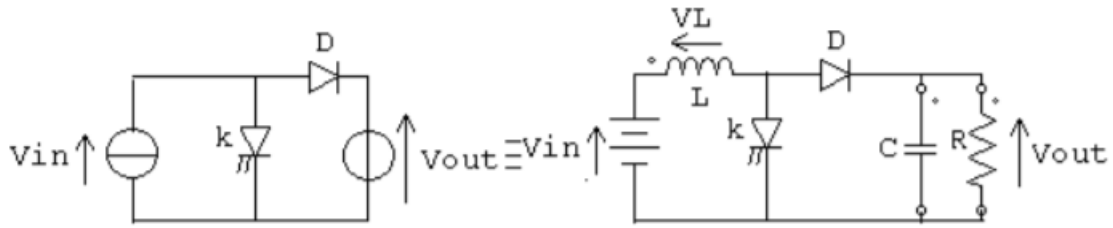


Figure (II.26) : Schéma de principe d'un hacheur Boost.

- Les hacheurs à liaison indirecte ou à accumulation qui associent deux sources de même nature :
 - Le hacheur à stockage inductif ou série-parallèle (Buck-Boost).

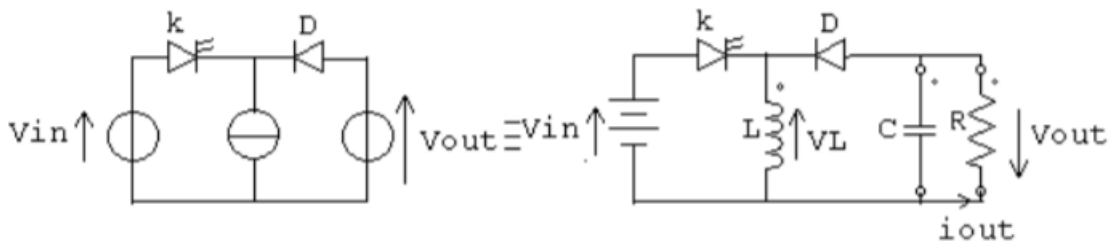


Figure (II.26) : Schéma de principe d'un hacheur Buck-Boost

- Le hacheur à stockage capacitif (Çuk)

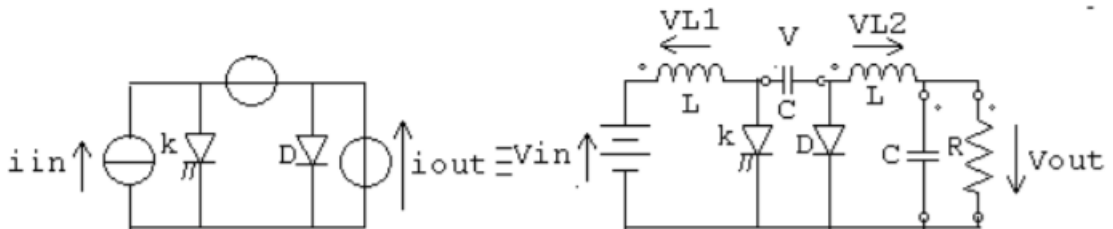


Figure (II.27) : Schéma de principe d'un hacheur Çuk

Le schéma synoptique qui résume les liaisons entre une source entrée (alimentation) et une source de sortie (charge) que se soient des sources de courant ou de tension est représenté dans la figure ci-dessous.

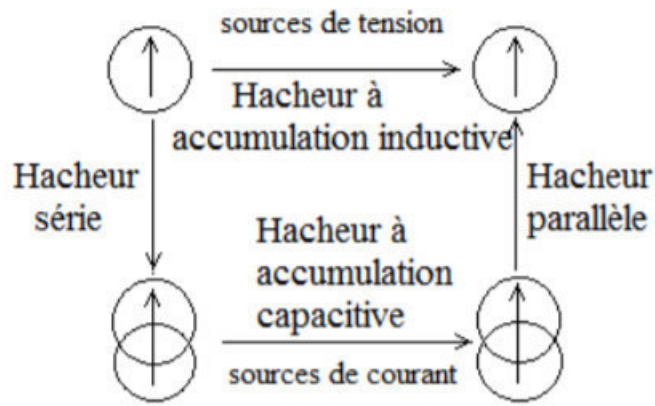


Figure (II.28) : Représentation générale des hacheurs non réversibles.

II.4 Simulation du module photovoltaïque

II.4.1 Caractéristique

Tableau 2-2 Caractéristique du panneau photovoltaïque

C	470 e^{-6}	Constant
C1	470 e^{-6}	Constant
L	5 e^{-3}	Constant
R	12	Constant
VI	17	
L1	1/L	
L2	1/C	
L3	$1/(R \cdot C)$	
K1	0.5	
K2	200	
K3	600	

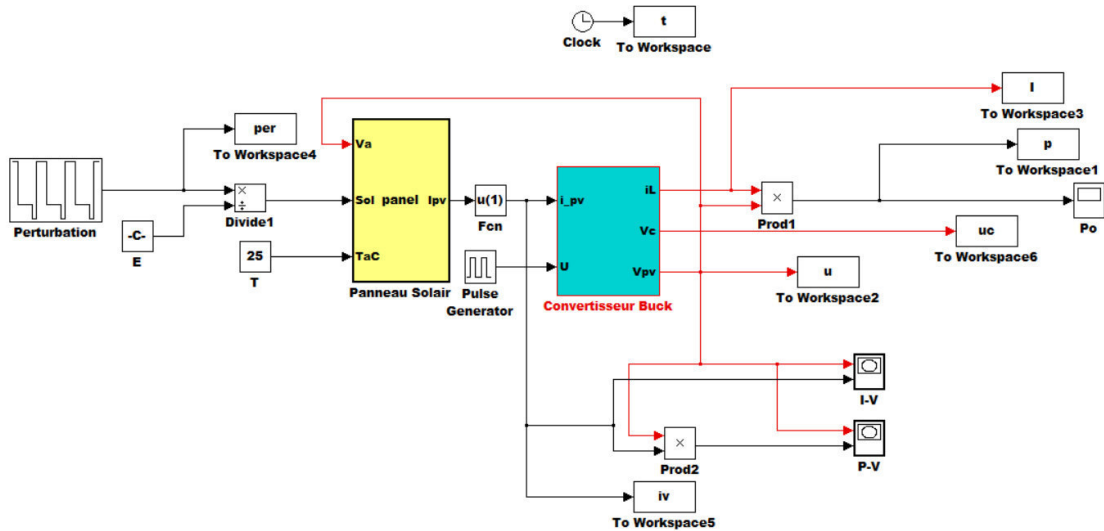


Figure (II.29) Schéma de simulation sous Matlab/Simulink

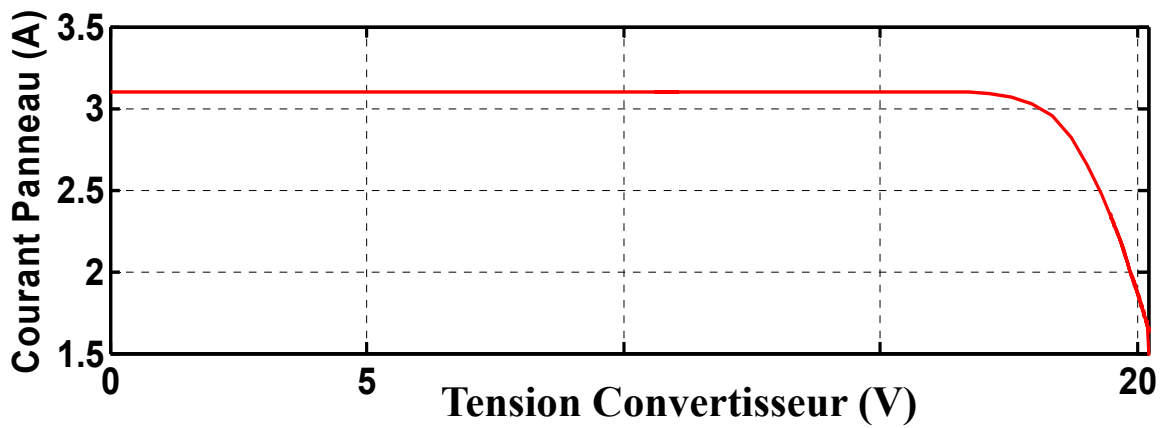


Figure (II.30) :Caractéristique Courant- Panneau en fonction de la Tension-convertisseur

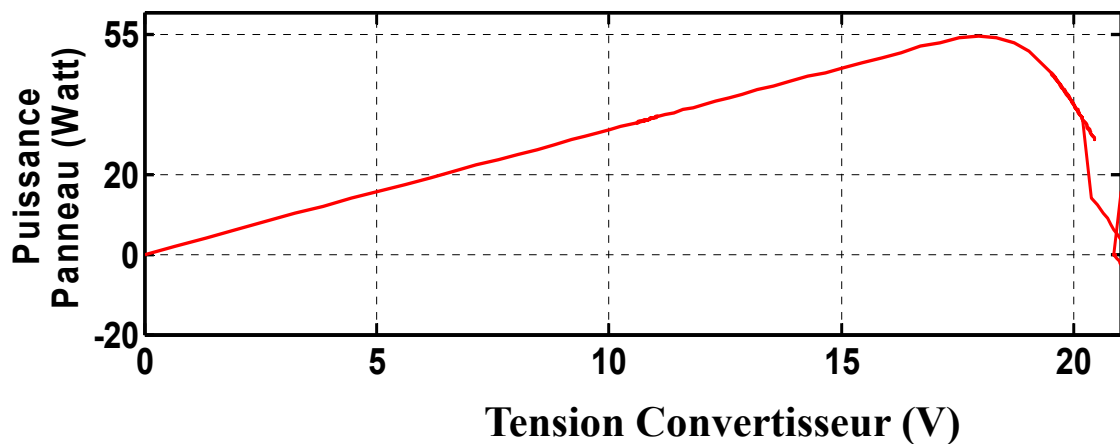


Figure (II.31) :Caractéristique Puissance- Panneau en fonction de la Tension-convertisseur

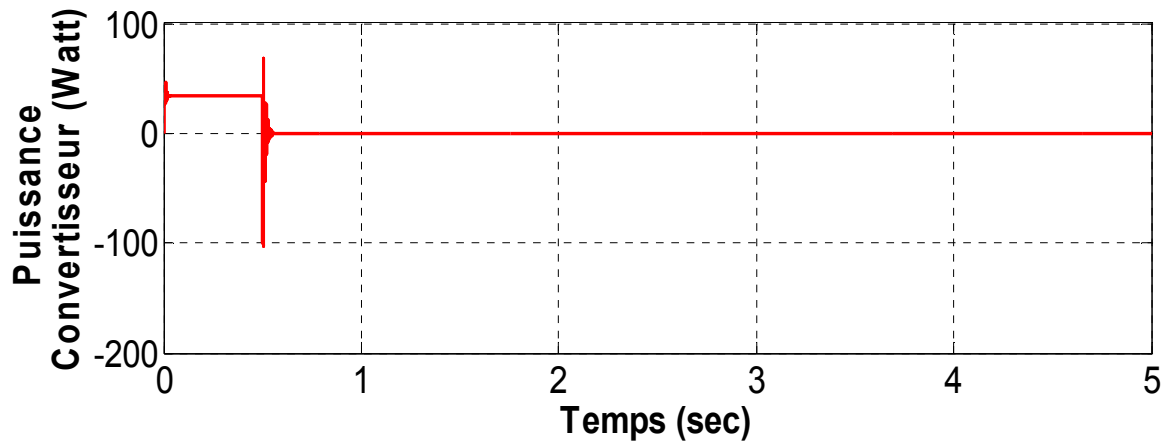


Figure (II.32) :Caractéristique Puissance-convertisseur.

La Figure (II.30), montre l'évolution du Courant délivré par le panneau solaire en fonction de la tension délivrée par le convertisseur statique DC/DC, on remarque que ce courant s'annule dès qu'une perturbation climatique arrive. Donc on peut dire que le modèle mathématique fonctionne normalement.

La puissance délivrée par le panneau évolue selon la tension-convertisseur, elle atteint le pic (le point maximal) lorsque la tension convertisseur est à ça valeur nominale ce quoi confirme encore la faisabilité du modèle.

Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenter un modèle mathématique d'un panneau solaire constitué de plusieurs cellules photovoltaïques, les résultats de simulation montre l'efficacité et la faisabilité du Modèle, ce qui permet de l'utilité pour concevoir le convertisseur DC/DC afin de réguler et d'optimiser la puissance voulue.

Chapitre III

Technique de logique floue

Introduction

Issue de la théorie des sous-ensembles flous établie par Lotfi, la logique floue ou de l'anglais "Fuzzy Logic" est de nos jours un sujet attirant, parce que faisant trait à une question d'actualité qui est le traitement de l'incertain dans la connaissance. Il permet d'affirmer que presque toute la logique du raisonnement humain n'est pas la logique classique à deux valeurs de vérité, ou à deux tranches nettement séparables. Dans les mécanismes de notre pensée, les propositions enchaînées et implications sont vagues, imprécis et floues. De même, les données, informations et sensations reçues sont loin d'être des événements précis, sauf exception [13]. La logique floue offre un modèle mathématique très adéquat pour la résolution des problèmes où l'on fait appel à des expressions du langage naturel. Sa caractéristique fondamentale est l'utilisation des variables linguistiques au lieu des variables numériques dans des situations conditionnelles floues. Par ceci, elle se veut un pas vers un rapprochement entre la précision de la logique classique et la subtile imprécision du monde réel [13], [14], [15].

Dans les chapitres (IV), on a utilisé la logique floue pour réaliser un superviseur flou afin de commander les interrupteurs de basculements entre les deux sources.

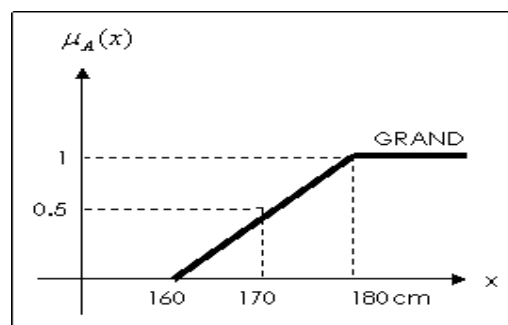
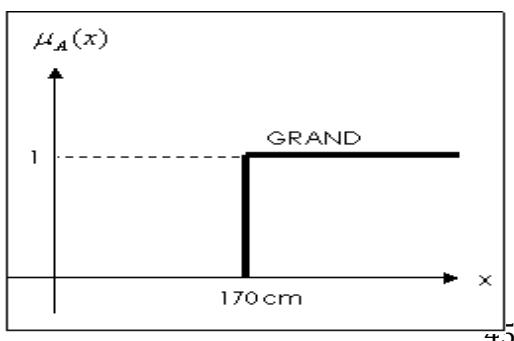
III.1 Logique floue type 1

III.1.1 Principe et définition

La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous développée par [14]. La logique floue devient de plus en plus appliquée dans la commande des processus industriels. Les algorithmes de réglage conventionnels sont alors remplacés par une série de règles linguistiques de la forme "Si ... Alors...". On obtient un algorithme heuristique en prenant en considération l'expérience des opérateurs pour la conduite du processus [15, 16].

Un ensemble flou est une classe d'objets dans laquelle la transition de l'appartenance aux non-appartenance est graduelle au lieu d'être brusque.

Prenons un exemple simple : soit E, l'ensemble des tailles possibles et A le sous ensemble grand. En logique bivalente, on est soit petit soit grand, ($x < 170\text{cm}$: pas grand ; $x \geq 170\text{cm}$: grand).



Une définition plus mathématique peut être établie comme suit :

Si U est une collection d'objets ou de valeurs notés par " x ", alors un ensemble flou A dans U est défini par l'ensemble des paires ordonnées:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in U\} \quad (\text{III.1})$$

Où $\mu_A(x)$ est une fonction qui prend des valeurs comprises entre 0 et 1 et est appelée fonction d'appartenance. Elle caractérise l'ensemble flou A et fournit une mesure du degré d'appartenance d'un objet x de U dans l'ensemble flou A . Elle peut être formulée comme suit:

$$\mu_A : U \rightarrow [0, 1]$$

$$u \rightarrow \mu_A(u)$$

U Peut contenir des valeurs continues ou discrètes.

Généralement, A s'écrit sous la forme:

$$A = \int \mu_A(x) / x \quad \text{Si } U \text{ est continu} \quad (\text{III.2})$$

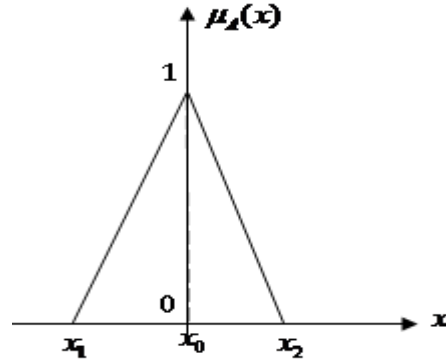
$$A = \sum_{x_i \in U} \mu_A(x_i) / x_i \quad \text{Si } U \text{ est discret} \quad (\text{III.3})$$

Dans ces deux équations les signes d'intégral et de sommation ne désignent pas une intégration ou une addition arithmétique, respectivement, mais une collection de tous les points $x \in U$ avec leur fonction d'appartenance $\mu_A(x)$.

Un fait incertain tel que x à peu près égal à x_0 aura une fonction d'appartenance en forme de triangle. L'affirmation x à peu près comprise entre x_1 et x_2 correspond à une fonction d'appartenance trapézoïdale..

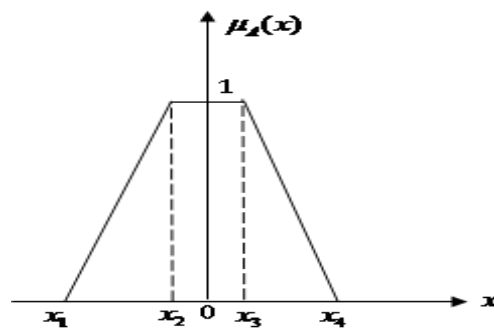
- **La fonction triangulaire**, $A = (x_1, x_0, x_2)$

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < x_1 \\ \frac{x_1 - x}{x_1 - x_0} & \text{si } x_1 \leq x \leq x_0 \\ \frac{x - x_2}{x_0 - x_2} & \text{si } x_0 \leq x \leq x_2 \\ 0 & \text{si } x > x_2 \end{cases} \tag{III.4}$$



- **La fonction trapézoïdale, $A = (x_1, x_2, x_3, x_4)$**

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < x_1 \\ 1 & \text{si } x_2 \leq x \leq x_3 \\ \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} & \text{si } x_1 \leq x \leq x_2 \\ \frac{x - x_4}{x_3 - x_4} & \text{si } x_3 \leq x \leq x_4 \\ 0 & \text{si } x > x_4 \end{cases} \tag{III.5}$$



A. . Propriétés des ensembles flous

- **Support**

Le support d'un ensemble flou A , noté $Supp(A)$ tel que :

$$Supp(A) = \{x \in U, \mu_A(x) > 0\} \tag{III.6}$$

L'ensemble flou dont le support est un ensemble singleton est appelé "singleton flou".

- **Hauteur**

La hauteur d'un ensemble flou A , noté $h(A)$ est la valeur maximale atteinte sur le support de A , elle est défini de la manière suivante:

$$h(A) = \max_{x \in U} \mu_A(x) \quad (\text{III.7})$$

- **Noyau**

Le noyau d'un ensemble flou A , noté $Noy(A)$ est l'ensemble de tous les éléments qui lui appartiennent, telque :

$$Noy(A) = \{x \in U, \mu_A(x) = 1\} \quad (\text{III.8})$$

S'il y a un seul point avec un degré d'appartenance égale à 1, alors ce point est appelé la valeur modale de A .

B. Opérateurs sur les ensembles flous

Il s'agit de la généralisation des opérateurs égalité, inclusion, intersection et union de la théorie des ensembles ordinaires, comme le montre la figure (III.1) :

- **Egalité**

Deux ensembles flous A et B sont dits égaux s'ils ont des fonctions d'appartenance égales en tout point de U tel que :

$$A = B \quad \text{si} \quad \text{ssi}$$

$$\forall x \in U, \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad (\text{III.9})$$

- **Inclusion**

Soit deux ensembles flous (A et B), si pour n'importe quel élément x de U , x appartient toujours moins à A qu'à B , alors on dit que A est inclus dans B ($A \subseteq B$) et l'on a :

$$A \subseteq B \quad \text{si} \quad \text{ssi}$$

$$\forall x \in U, \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (\text{III.10})$$

- **Union**

L'union des deux ensembles flous (A et B), est dénotée comme $(A \cup B)$, est donnée par :

$$\forall x \in U, \mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{III.11})$$

• **Intersection**

L'intersection des deux ensembles floue (A et B), dénotée ($A \cap B$), est donnée par:

$$\forall x \in U, \mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \tag{III.12}$$

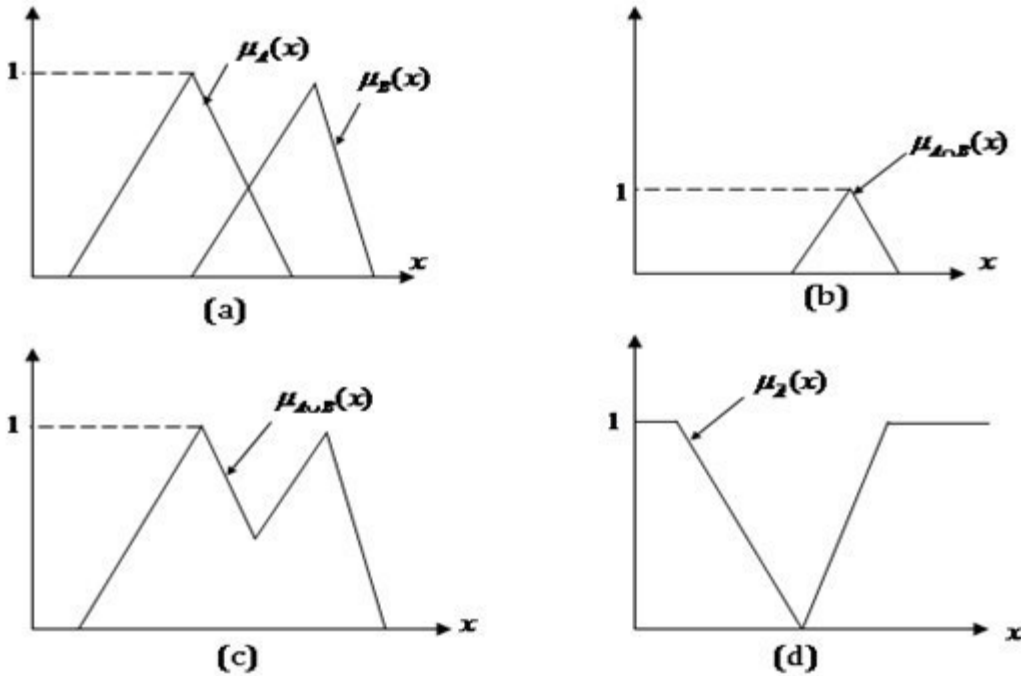


Figure (III.1) : Opérateurs logiques a : A et B , b : $A \cap B$, c : $A \cup B$, d : \bar{A} .

C. Variables linguistiques

Une variable linguistique représente un état dans le système à régler ou une variable de réglage dans un contrôleur flou. Sa valeur est définie dans des termes linguistiques qui peuvent être des mots ou des phrases d'un langage naturel ou artificiel.

Chaque variable linguistique est caractérisée par un triplet $\{x, U, T(x)\}$ tel que :

x est le nom de la variable,

U est l'univers de discours associé avec la valeur de base,

$T(x)$ est l'ensemble des valeurs linguistiques que peut prendre x .

Exemple :

La variable linguistique $x = \text{température ambiante}$ peut être définie avec un ensemble des termes :

$T(x) = \{ \text{extrêmement froide, très froide, froide, chaude, très chaude, extrêmement chaude} \}$
 quiforment son univers du discours $U = [-20^{\circ}C, 40^{\circ}C]$. La variable de base est *température*.

Le terme froid représente une valeur linguistique. On peut l'interpréter, par exemple comme « les températures plus petites que $15^{\circ}C$ ».

D. Règle floue :

Une règle floue s'écrit : "Si x est A Alors y est B "

Et peut-être notée :

$$"(x, y) \text{ est } A \rightarrow B" \tag{III.13}$$

L'ensemble flou $A \rightarrow B$ n'est qu'une relation floue R entre U et V et sa fonction d'appartenance (valeur de vérité de l'implication) est donnée par :

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \Phi(\mu_A(x), \mu_B(y)) \tag{III.14}$$

où Φ est un opérateur d'implication floue spécifique. Il existe différents types d'opérations proposées par divers auteurs. L'opérateur de Mamdani et le plus utilisé en commande floue :

$$\Phi(\mu_A(x), \mu_B(y)) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \tag{III.15}$$

Si x_1 est A_1 et x_2 est A_2 et et x_n est A_n alors y est B

$$\mu_A(x) = \min(\mu_{A_1}(x_1), \dots, \mu_{A_n}(x_n)) \tag{III.16}$$

III.2 Configuration d'un contrôleur flou

Par opposition à un régulateur classique, le régulateur par logique floue ne traite pas une relation mathématique bien définie (algorithme de réglage), mais utilise des inférences avec plusieurs règles se basant sur des variables linguistiques [17]. Ces inférences sont traitées par des opérateurs de la logique floue (autrement dit c'est un langage expert). La configuration de base d'un bloc floue (BLF) est donnée par la figure (III-2).

A. Module de Fuzzification :

Dans ce module, on distingue :

- L'organe de normalisation qui permet de passer d'un domaine physique donné à un domaine normalisé, $[-1,1]$ par exemple. Cet organe est optionnel.
- L'organe de Fuzzification qui associe à une valeur numérique un degré d'appartenance à une valeur linguistique.

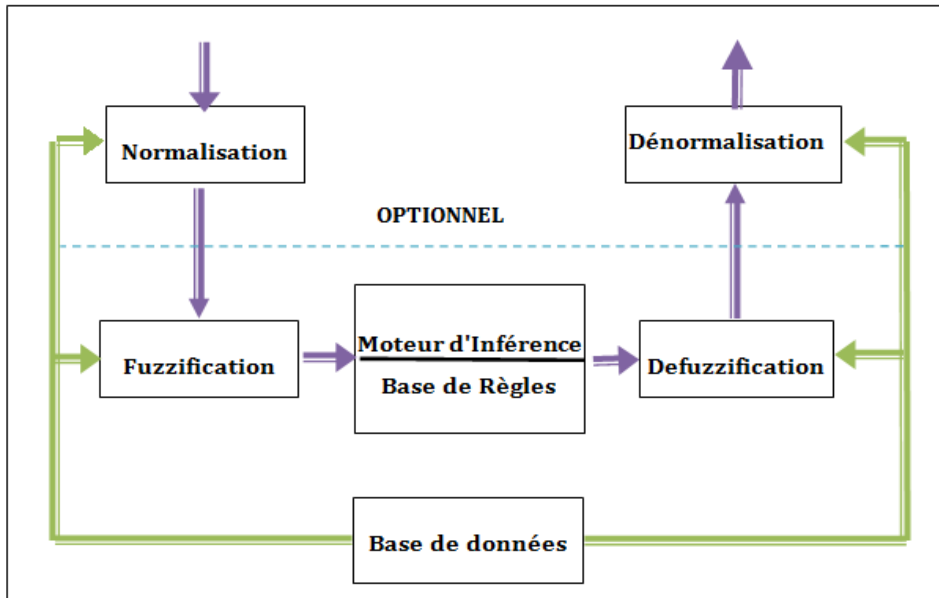


Figure (III.2) : Configuration de base d'un bloc flou (BLF).

B. Base de données

Elle contient les définitions des termes utilisés dans la commande et les règles caractérisant la cible de la commande et décrivant la conduite de l'expert. Elle consiste en une base de données et une base de règles.

- La base de données fournit les informations nécessaires pour le fonctionnement du module Fuzzification. Ces informations sont :
Les ensembles flous (fonction d'appartenance) donnant la signification des valeurs linguistiques. Les domaines physiques et normalisés et les facteurs de réduction correspondants.
- La base de règles a pour but de structurer, la connaissance que l'on a sur le contrôle du processus en produisant des règles de la forme :
Si <état du processus> Alors < action en sortie >.

La partie "**Si**" est appelée antécédent de la règle, la partie "**Alors**" est appelée conséquence de la règle. Les paramètres auxquels on a recours pour construire la base des règles sont :

- Le choix de "l'état du processus" et de la variable de sortie.
- Le choix du contour de l'antécédent et de la conséquence des règles.
- Le choix des valeurs linguistiques pour l'état du processus et la variable de sortie.

C. Moteur d'inférence

C'est le noyau d'un *BLF*, il a l'aptitude de simuler la prise de décision humaine en se basant sur des concepts flous. La formulation concrète des inférences dépend évidemment du comportement statique et dynamique du système à régler et de l'organe de commande, ainsi que des buts de réglages envisagés. L'expérience joue un rôle important pour indiquer les règles. Pour le réglage par logique floue, on utilise en général une des méthodes suivantes [17]:

- Méthode d'inférence Max-Min.
- Méthode d'inférence Max-Produit.
- Méthode d'inférence Somme-Produit.

La méthode la plus utilisée est celle de Max-Min [14]. On traitera un cas particulier avec deux variables d'entrée $x_1 \in U$ et $x_2 \in V$ et une variable de sortie $y \in W$. L'inférence est composée de deux règles :

Règle 1 (R_1): Si x_1 est A_1 et x_2 est B_1 alors y est C_1 , OU (III.17)

Règle 2 (R_2): Si x_1 est A_2 et x_2 est B_2 alors y est C_2 . (III.18)

La figure (III.3) représente graphiquement le principe de la méthode d'inférence Max-Min

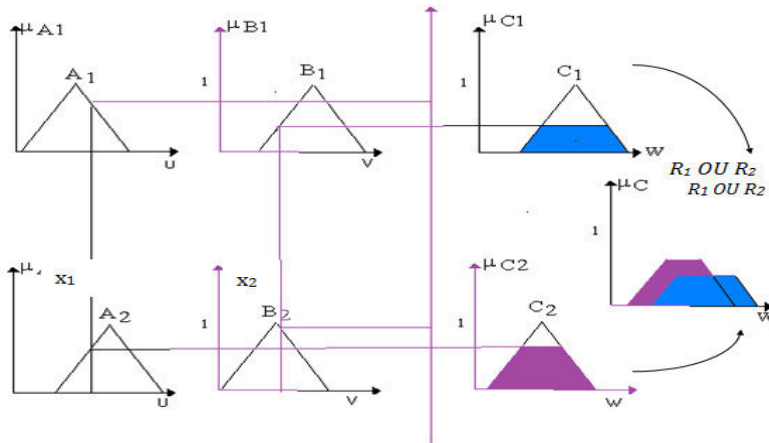


Figure (III.3) : Représentation graphique du principe de la méthode d'inférence Max-Min

D. Module de défuzzification

Pour pouvoir définir la loi de commande, le contrôleur flou doit être accompagné d'une procédure de défuzzification jouant le rôle de convertisseur de la commande floue en valeur physique nécessaire pour un tel état du processus. Une stratégie de défuzzification est alors nécessaire. Plusieurs stratégies de défuzzification existent [17]. Les plus utilisées actuellement sont :

- Méthode du Maximum.
- Méthode de la moyenne des Maximas.
- Méthode du centre de gravité.

Chapitre IV

Jumelage éolien/photovoltaïque monté sur une charge

Chapitre IV Jumelage éolien/photovoltaïque monté sur une charge

Introduction

L'énergie électrique provenant de sources renouvelables, en particulier le vent et le soleil, est considérée comme une alternative de production intéressante dans les systèmes d'énergie électrique du monde d'aujourd'hui. Cependant, leur utilisation est limitée par la variabilité des ressources qui risquent de diminuer leur fiabilité. La fluctuation de la charge selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément corrélées avec les ressources énergétiques disponibles. Pour remédier à ce problème, la solution consiste à combiner plusieurs ressources, comme le système hybride éolien-photovoltaïque. L'idée consiste à superviser les puissances de chaque source (PV et GSAP).

IV.1 Généralité et principe de fonctionnement

Notre système à étudier, représente le jumelage entre deux sources d'énergie : photovoltaïque et une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) entraînée par une éolienne comme le montre la figure (IV.1). La puissance délivrée peut être contrôlée en incorporant un régulateur de poursuite du point de puissance maximale pour ces deux sources d'énergie renouvelable [18].

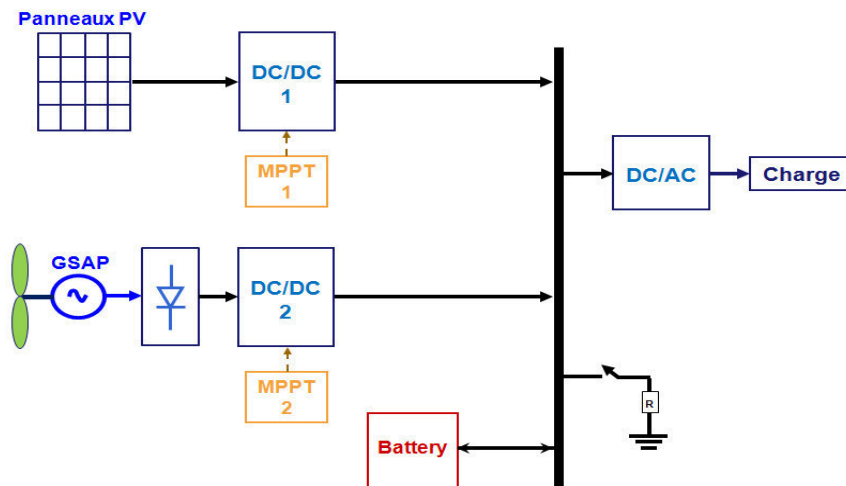


Figure (IV.1) : Structure d'un système de jumelage (hybride).

Le système photovoltaïque est connecté au bus CC à travers un convertisseur statique. Avec un contrôleur de poursuite du point de puissance maximale, l'énergie produite est toujours maximale dans toutes les conditions climatiques et/ou d'exploitation. Cette puissance maximale est fournie la charge au travers d'un onduleur. Pour assurer la demande de la charge, des systèmes de stockage peuvent également être associés. Le moyen de stockage conventionnel repose sur l'utilisation de batteries. En particulier, un système de délestage par résistance est aussi utilisé comme l'illustre la figure (IV.1).

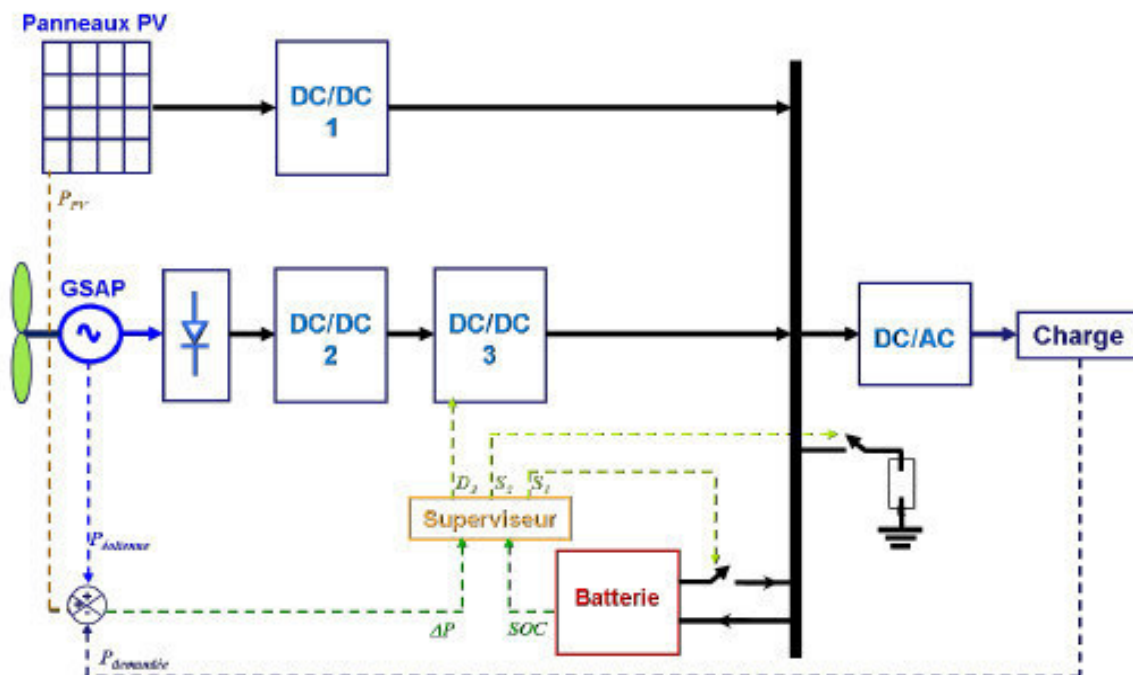
IV.2 Superviseur flou de l'énergie jumelée produite.

Pour suivre et gérer l'énergie électrique générée, un superviseur est intégré afin d'optimiser l'usage de l'énergie produite et celle de la batterie. Si les sources renouvelables ne donnent pas

Chapitre IV Jumelage éolien/photovoltaïque monté sur une charge

suffisamment de puissance et si la capacité de la batterie est suffisante, la batterie fournira alors la puissance manquante. Si la puissance jumelée (hybride) dépasse la demande de la charge, l'excédent sera stockée dans la batterie et si celle-ci est pleine, le surplus sera dissipé dans un système de délestage (par exemple une résistance). Ainsi, la batterie n'est pas le fournisseur principal, son taux de charge/décharge est réduit, et donc la durée de vie de la batterie est prolongée.

L'association GSAP - redresseur - convertisseur - batterie doit satisfaire un niveau de tension du bus continu suffisamment élevé pour que la commande de la machine puisse être réalisée. Le bus continu doit alors être de tension suffisamment haute pour assurer le pilotage de la génératrice à vitesse optimale et aussi pour le bon fonctionnement de l'onduleur. La régulation de la tension continue sur le bus CC est mise en œuvre par un convertisseur élévateur. Ainsi, la tension du bus CC est régulée en contrôlant le flux d'énergie entre les batteries et le bus. Quand l'énergie fournie par les sources d'énergie renouvelable est insuffisante pour faire face à une augmentation soudaine de la charge, l'énergie manquante est obtenue à partir des batteries. Quand il existe un excès d'énergie, il est utilisé pour recharger les batteries. Ceci impose l'association en série/parallèle d'un grand nombre de batteries de tension standard.



Figure(IV.2) : Structure du système de jumelage entre deux sources d'énergie renouvelables.

Dans ce superviseur, les entrées représentent l'état de charge de la batterie (SOC) et l'erreur de puissance ΔP (différence entre la puissance fournie et la puissance de la charge). Les sorties sont le rapport cyclique D_3 appliquée au convertisseur élévateur DC/DC 3 pour adapter la tension du bus

Chapitre IV Jumelage éolien/photovoltaïque monté sur une charge

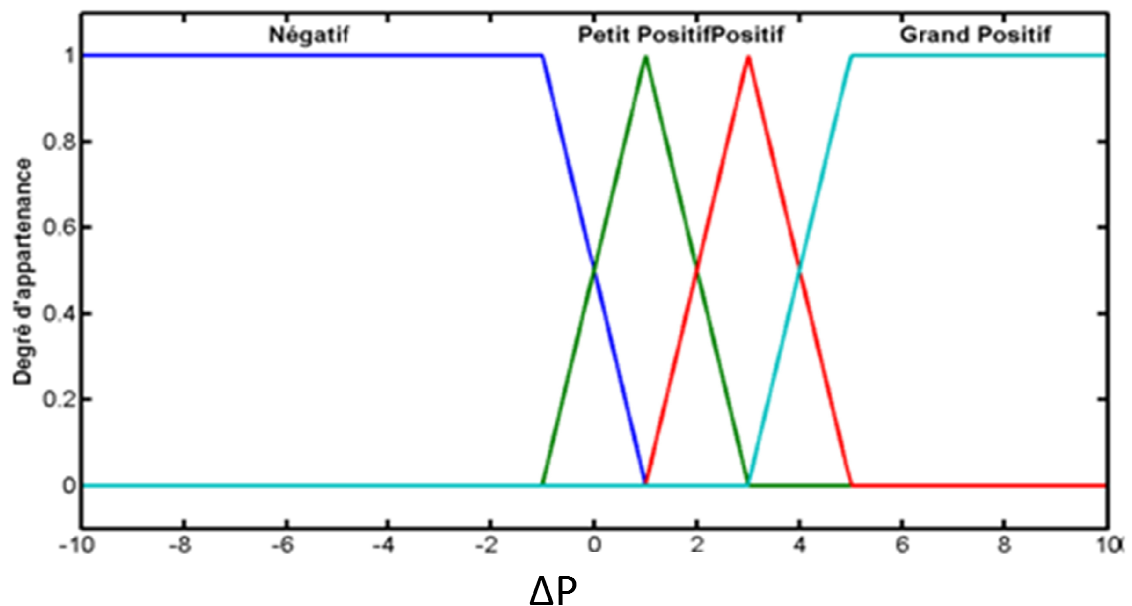
CC et celle de la GSAP pour que la commande des interrupteurs ; la commande de l'interrupteur S1 pour l'utilisation de la batterie (rechargement ou fourniture d'énergie à la charge) ; et la commande de l'interrupteur S2 pour l'utilisation de la résistance de décharge lorsqu'il faut dissiper le surplus.

Pour mettre en œuvre le superviseur flou, on a défini les ensembles flous comme suit :

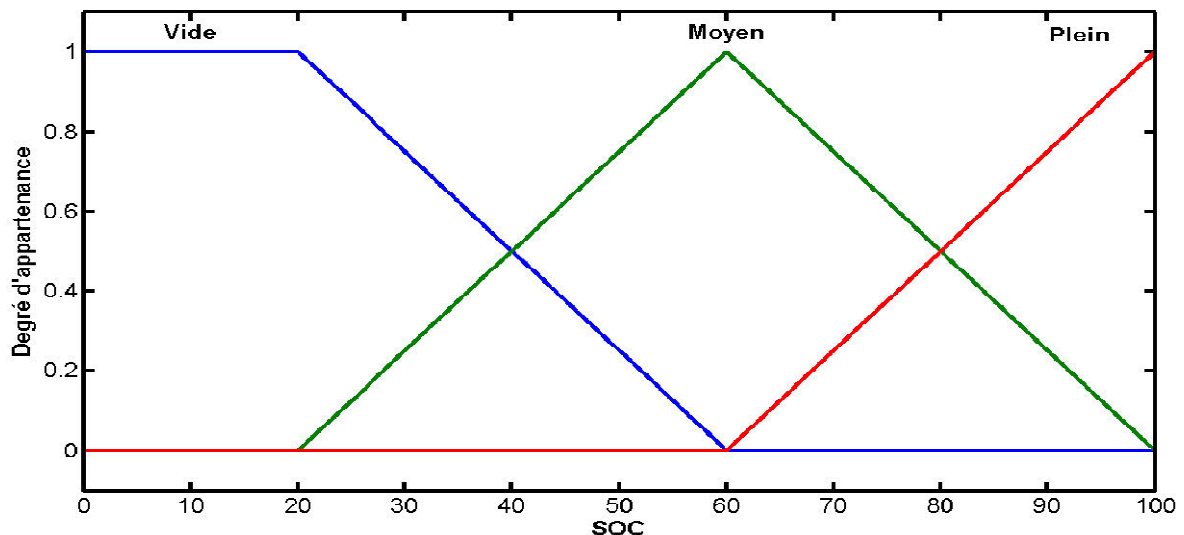
- ✓ l'erreur de puissance ΔP [Négatif, Petit Positif, Positif, Grande Positif],
- ✓ l'état de charge de la batterie (SOC) [Vide, Moyen, Plein],
- ✓ le rapport cyclique D3 [Petit, Moyen, Grand],
- ✓ l'état de l'interrupteur S1 et S2 [Ouvert, Fermé].

Pour les fonctions d'appartenance correspondant à chaque ensemble flou, on a choisi les formes suivantes :

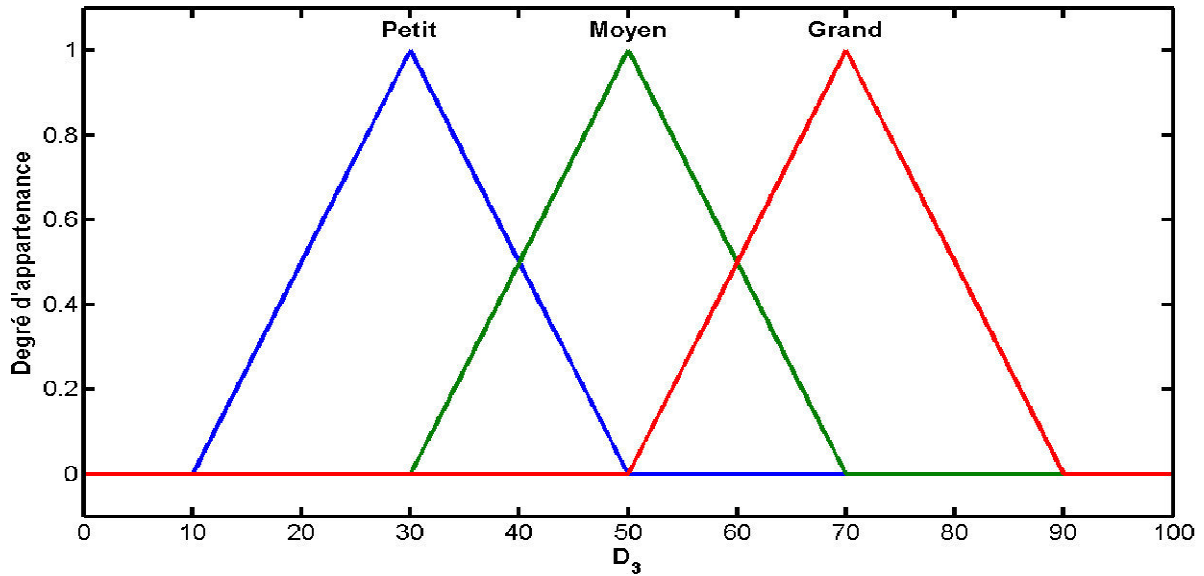
Ensemble flou ΔP :



Ensemble flou SOC :



Ensemble flou D3 :



Pour la mise en œuvre des règles, nous avons eu recours aux règles floues de type Mamdani.

Exemple : si l'erreur entre l'énergie hybride et la demande de charge est "Grand Positif" et l'état de charge de la batterie est "Plein", alors, l'interrupteur S1 devrait être "**Ouvert**" et l'interrupteur S2 devrait être "**Fermé**". Les tableaux de vérité (IV.1-3) illustrent les différentes règles floues utilisées dans notre superviseur.

✓ *Règles de D3*

		SOC		
		Plein	Moyen	Vide
ΔP	Négatif	Moyen	Petit	Petit
	Positif	Grand	Moyen	Petit
	Très Positif	Grand	Moyen	Moyen

Table de vérité (III.1).

✓ *Règles de S1*

		SOC		
		Plein	Moyen	Vide
ΔP	Négatif	Fermé	Fermé	Ouvert
	Positif	Ouvert	Ouvert	Ouvert
	Très Positif	Ouvert	Ouvert	Ouvert

Table de vérité (IV.2).

✓ Règles de S2

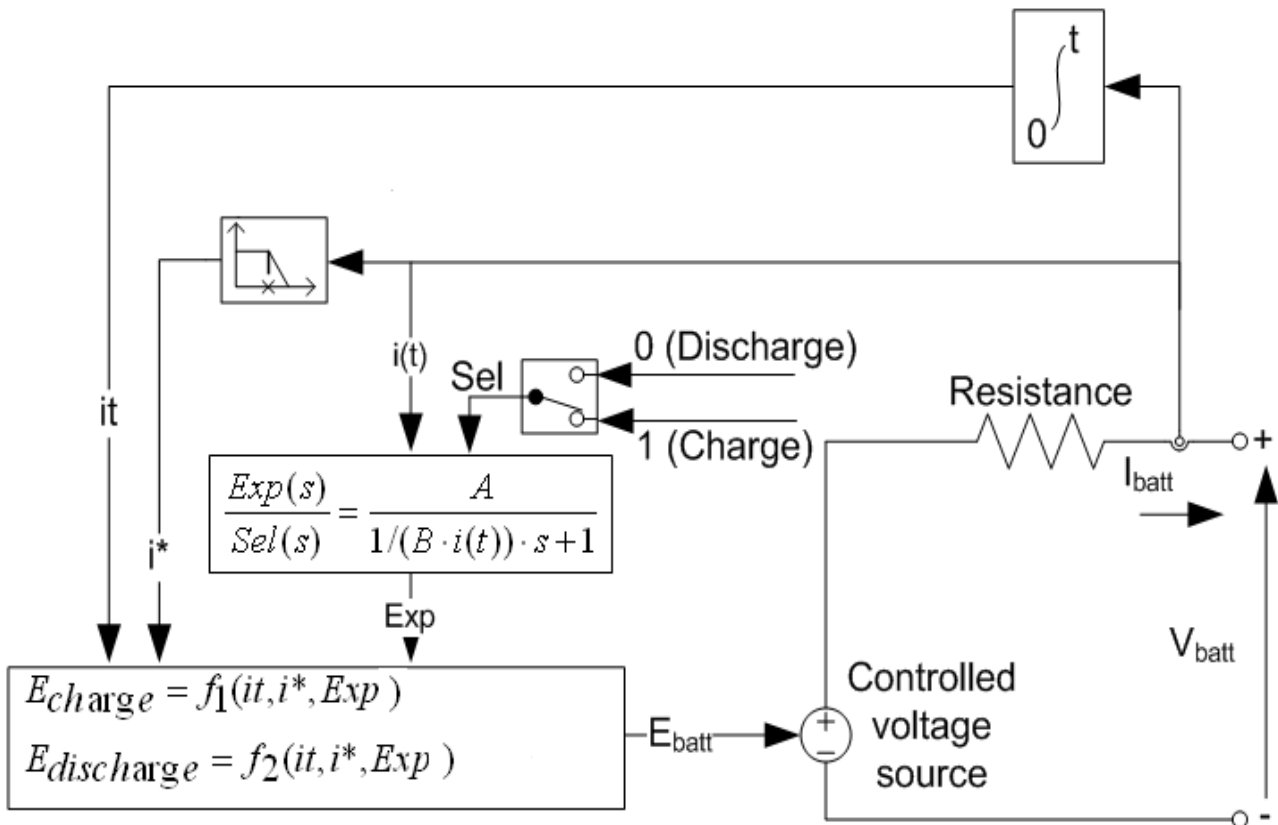
		SOC		
		Plein	Moyen	Vide
ΔP	Négatif	Ouvert	Ouvert	Ouvert
	Positif	Ouvert	Ouvert	Ouvert
	Très Positif	Fermé	Ouvert	Ouvert

Table de verité (IV.3).

Pour le moteur d'inférence, nous avons utilisé la méthode max-min. C'est à dire a un niveau de la condition de chaque règle, l'opérateur **OU** est réalisé par le calcul du maximum et l'opérateur **ET** par le calcul du minimum. Pour la conclusion de chaque règle, l'implication se fait par l'opérateur **ET**. Pour l'agrégation des règles, l'opérateur **OU** qui lie les différentes règles est réalisé par le calcul du maximum.

IV.3 Système de stockage

Le système de stockage n'est qu'un ensemble de batteries reliées entre eux. Le circuit équivalent de la batterie rechargeable est indiqué par la figure (IV.3) [19].



Figure(IV.3) : Circuit équivalent de la batterie rechargeable

IV.3.1 Modèle mathématique du mode de charge et décharge

La fonction de décharge est exprimée par :

$$f_1(i_t, i^*, Exp) = E_0 - K \frac{Q}{Q-i_t} i^* - K \frac{Q}{Q-i_t} i_t \quad (IV.1)$$

La fonction de charge est exprimée par :

$$f_1(i_t, i^*, Exp) = E_0 - K \frac{Q}{i_t+0.1Q} i^* - K \frac{Q}{Q-i_t} i_t + \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{Exp(s) 1}{Sel(s) s} \right) \quad (IV.2)$$

Avec :

E_{Batt} : Tension batterie non-linéaire ;

E_0 : Tension constante ;

$Exp(s)$: Exponentiation dans la zone dynamique (Volt) ;

$Sel(s)$: Représente le mode de batterie. $Sel(s) = 0$ si la batterie se décharge, $Sel(s) = 1$ si la

Batterie se charge ;

K ; Constante de polarisation (Ah^{-1}) ou résistance de polarisation (Ohms) ;

i^* : Courant dynamique de basse fréquence ;

i : Courant de batterie ;

i_t : Capacité d'extraire (Ah) ;

Q : Capacité maximal de la batterie (Ah) ;

A : Tension exponentiel

B : Capacité exponentiel ($(Ah)^{-1}$).

La figure (IV.4) montre la caractéristique l'évolution de la décharge de la batterie, elle est tracée à partir de l'équation (IV.1)

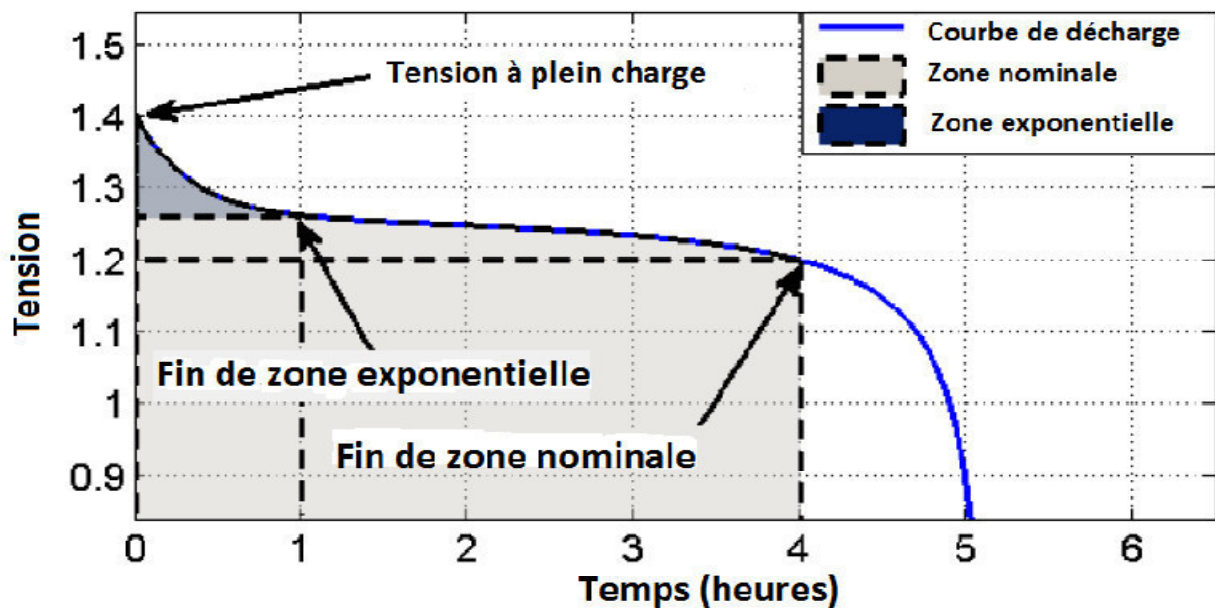


Figure (IV.4) : Caractéristique d'évolution de la décharge de la batterie.

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

La fonction de transfert $Exp(s)$ représente le phénomène d'hystérésis pendant les cycles de charge et de décharge. La tension exponentielle augmente lorsque la batterie est en charge, quel que soit l'état de charge de la batterie. Lorsque la batterie se décharge, la tension exponentielle diminue immédiatement comme le montre la figure (IV.5).

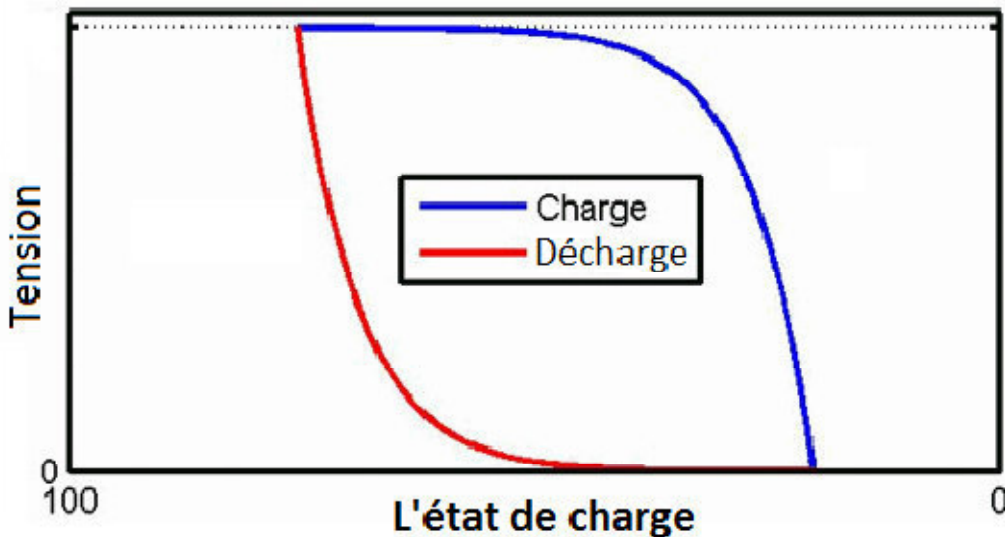


Figure (IV.5) : Caractéristique de charge et décharge de la batterie.

IV.4 Onduleur MLI de tension

L'onduleur est un convertisseur statique d'énergie électrique du continu en alternatif. Il permet d'obtenir une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace à partir d'une tension continue. L'onduleurs en modulation de la largeur d'impulsions est le type d'onduleur le plus utilisé dans les différents systèmes de conversion.

Le schéma de la figure (IV.6) montre le schéma fonctionnel d'un tel onduleur, dont chaque branche est constituée de deux éléments de commutation et de deux diodes en parallèle. Les éléments de commutation doivent pouvoir travailler en commutation forcée. Les diodes en parallèles avec les éléments de commutation servent à assurer la continuité du courant lors d'utilisation de charge inductive.

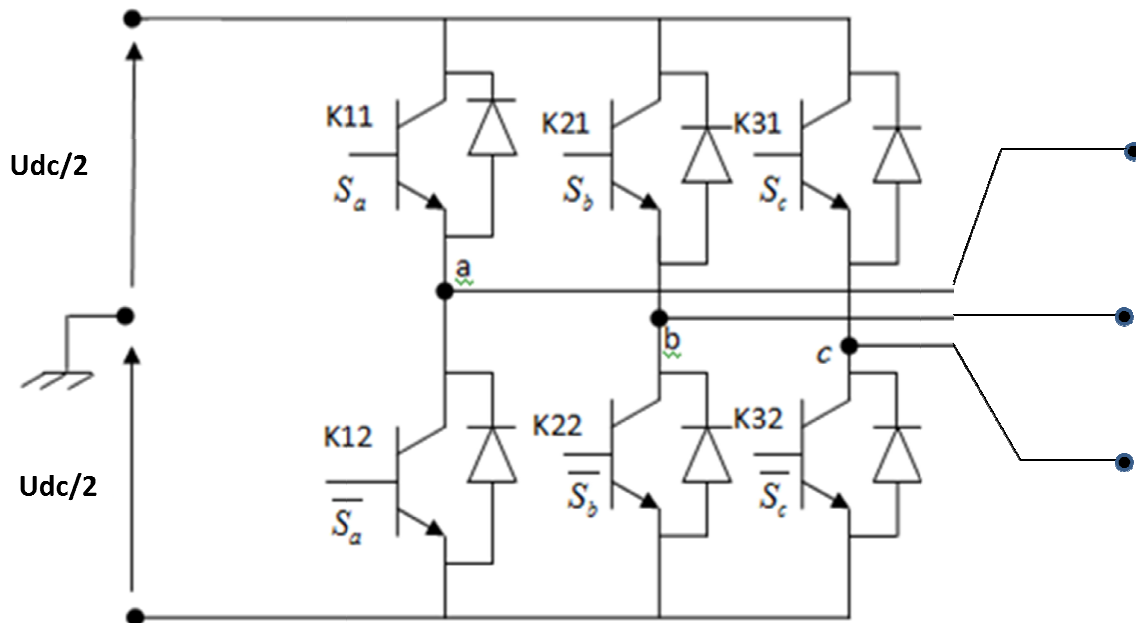


Figure (IV.6) : Schéma fonctionnel d'un onduleur.

IV.4.1 Model Mathématique de l'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu- alternatif, alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir à sa sortie, une grandeur (tension, courant) alternative.

L'onduleur de tension triphasé découle immédiatement de trois demi pont monophasé, on obtient l'onduleur triphasé à six interrupteurs (figure IV.6). Chaque demi pont comprend un thyristor (ou un transistor) et une diode. La source de tension continue est obtenue à partir d'un pont redresseur.

Pour simplifier l'étude, on suppose que:

- La commutation des interrupteurs est instantanée
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable ;
- La charge est triphasée, équilibrée et couplée en étoile avec un neutre isolé ;

Les interrupteurs (K_{11}, K_{12}) et (K_{21}, K_{22}) et (K_{31}, K_{32}) doivent être complémentaires deux à deux, quelque soit la loi de commande à adopter, il est possible d'établir des relations générales que nous utiliserons pour la commande MLI ; quels que soient les courants, les interrupteurs imposent les tensions entre les bornes de sortie A, B, C et le point milieu (fictif) 'O' de la source de tension.

Le principe de fonctionnement de l'onduleur est basé sur le séquençage imposé aux interrupteurs statiques, autrement dit, c'est ce séquençage qui réalise la modulation de la largeur des impulsions de tension (MLI).

IV.4.2 Concept de modélisation de l'onduleur

Les trois cellules de commutation formant l'onduleur triphasé sont bidirectionnelles en courant. Avec l'hypothèse où les interrupteurs sont supposés idéaux ayant une image exacte des signaux de commande S_j ($j=a, b, c$) [1].

C'est-à-dire chaque interrupteur est associé à la fonction logique S_j comme l'indique la figure (IV.6).

- $S_j = 1$ si l'interrupteur du haut est fermé et celui de bas est ouvert.
- $S_j = 0$ si l'interrupteur du haut est ouvert et celui de bas est fermé.

Les tensions composées sont déterminées par le système d'équations (IV.3) suivant :

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} &= V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} &= V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{aligned} \quad (IV.3)$$

Où V_{ao} , V_{bo} et V_{co} sont les tensions d'entrée de l'onduleur autrement dit les tensions continues fournis par le redresseur. Elles sont référencées par rapport au point milieu (O) d'un diviseur fictif d'entrée.

On peut écrire les relations de Charles, comme suit

$$\begin{aligned} V_{ao} &= V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} &= V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} &= V_{cn} + V_{no} \end{aligned} \quad (IV.4)$$

Avec : V_{an} , V_{bn} et V_{cn} sont les tensions simples appliquées à la charge.

V_{no} est la tension entre le point neutre (n) de la charge et le point milieu fictif (O).

Le système triphasé fourni par l'onduleur étant équilibré, il en découle :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (IV.5)$$

Utilisant les équations (IV.4) et (IV.5) on obtient :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (IV.6)$$

Remplaçons (IV.6) dans (IV.4), on obtient :

Chapitre IV Jumelage éolien/photovoltaïque monté sur une charge

$$\begin{aligned}
 V_{an} &= \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\
 V_{bn} &= -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\
 V_{cn} &= -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co}
 \end{aligned} \tag{IV.7}$$

Donc le système (IV. 7 s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \tag{IV.8}$$

Posons

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \tag{IV.9}$$

$$[V_{ao} \quad V_{bo} \quad V_{co}]^T = \frac{U_{dc}}{2} [S_a \quad S_b \quad S_c]^T \tag{IV.10}$$

Donc l'onduleur est modélisé par la matrice de transfert $[T]$ avec U_{dc} est la tension continue à la sortie du filtre. Le courant à l'entrée de l'onduleur est:

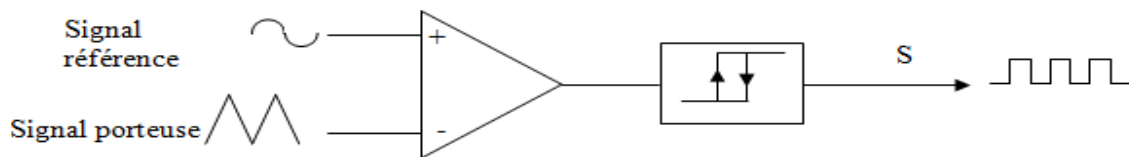
$$i = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \tag{IV.11}$$

IV.4.3 Générateur de MLI :

Pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture (instants de commutation) des interrupteurs, on utilise la technique MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion), qui consiste à comparer le signal de référence onde (modulante) de forme sinusoïdale à faible fréquence, à un signal triangulaire onde (porteuse) de fréquence élevée. Le signal modulé est au niveau haut lorsque la modulante est supérieure à la porteuse et est au niveau bas lorsque la modulante est inférieure à la porteuse.

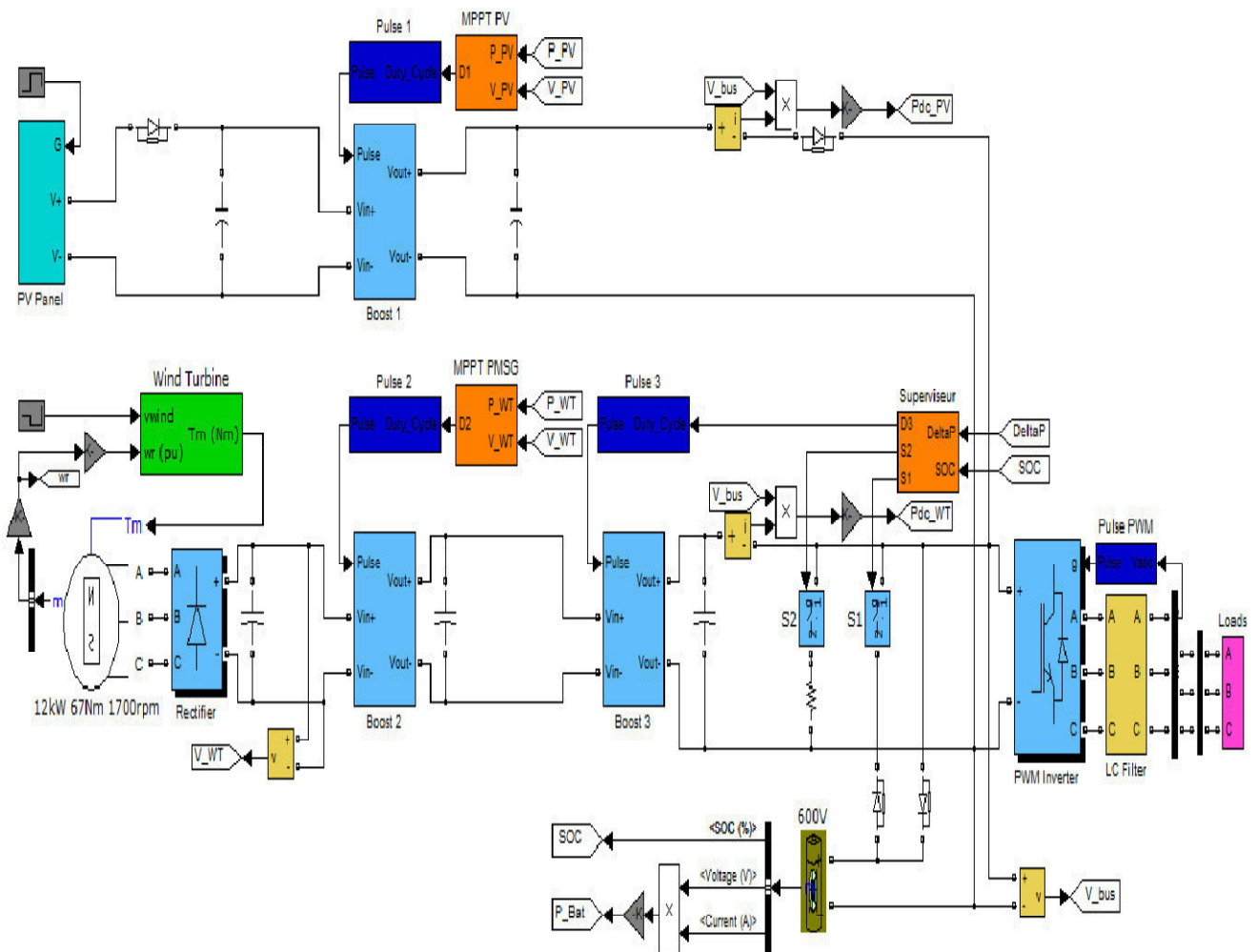
Chapitre IV Jumelage éolien/photovoltaïque monté sur une charge

La conversion continue alternative est assurée par les commutations des interrupteurs de l'onduleur qui vont ainsi effectuer des connexions temporaires entre les bornes de la source d'alimentation continue et les lignes de la charge triphasée alternative. Le transfert d'énergie est contrôlé par le rapport entre intervalles d'ouverture et de fermeture (rapport cyclique) de chaque interrupteur, donc par la modulation de largeurs d'impulsions de contrôle de ces interrupteurs (MLI), cette technique est basée sur la comparaison d'un signal de référence appelé aussi modulatrice d'amplitude A_r et de fréquence f avec un signal appelé porteuse d'amplitude A_p et de fréquence f_p très élevée, comme l'indique la figure (I.11) ci-dessous.



IV.5 Schéma de simulation

Le schéma de la figure ci-dessous suivante représente le schéma de simulation du système de jumelage entre deux sources d'énergie, élaboré sous Matlab/Simulink.



IV.5.1 Résultats de simulation

La figure (IV.7) permet de voir que la tension de sortie du panneau photovoltaïque est bien commandée pour suivre la valeur optimale selon la variation de l'ensoleillement et de la charge, alors le panneau produit toujours une puissance maximale dans toutes les conditions. La puissance du panneau est toujours maximale comme le montre la figure (IV.9).

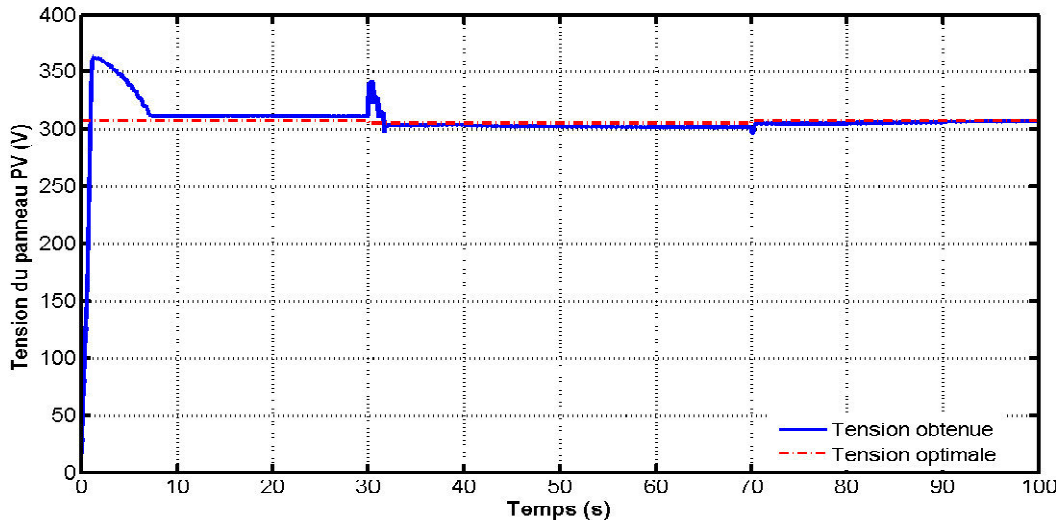


Figure (IV.7) : Tension du panneau photovoltaïque.

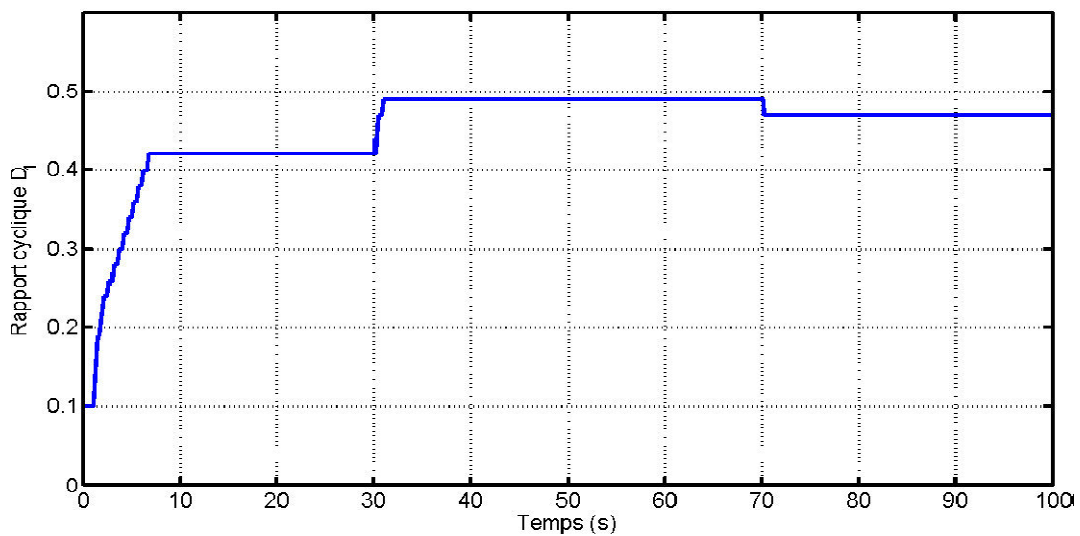


Figure (IV.8) : Rapport cyclique du panneau photovoltaïque.

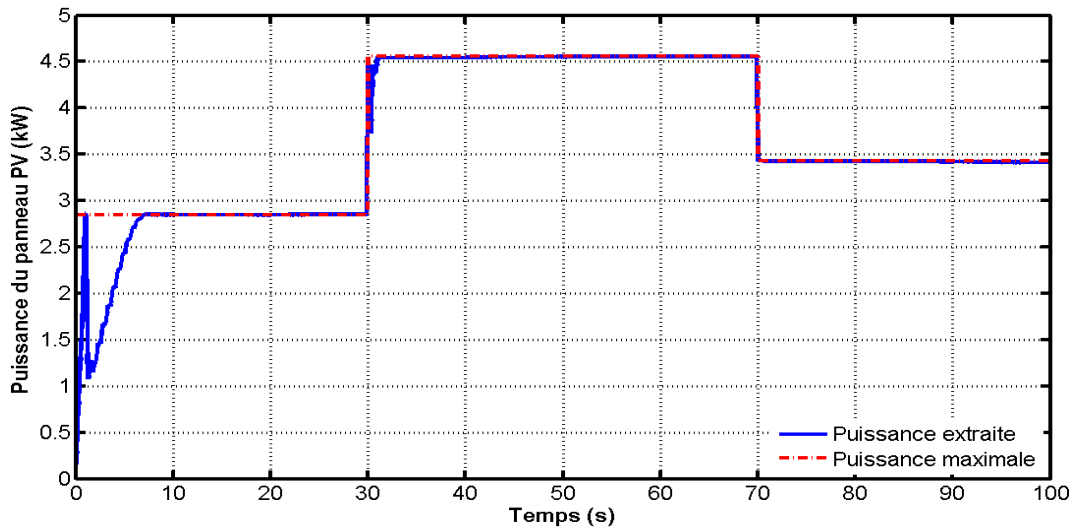


Figure (IV.9) : Puissance du panneau photovoltaïque.

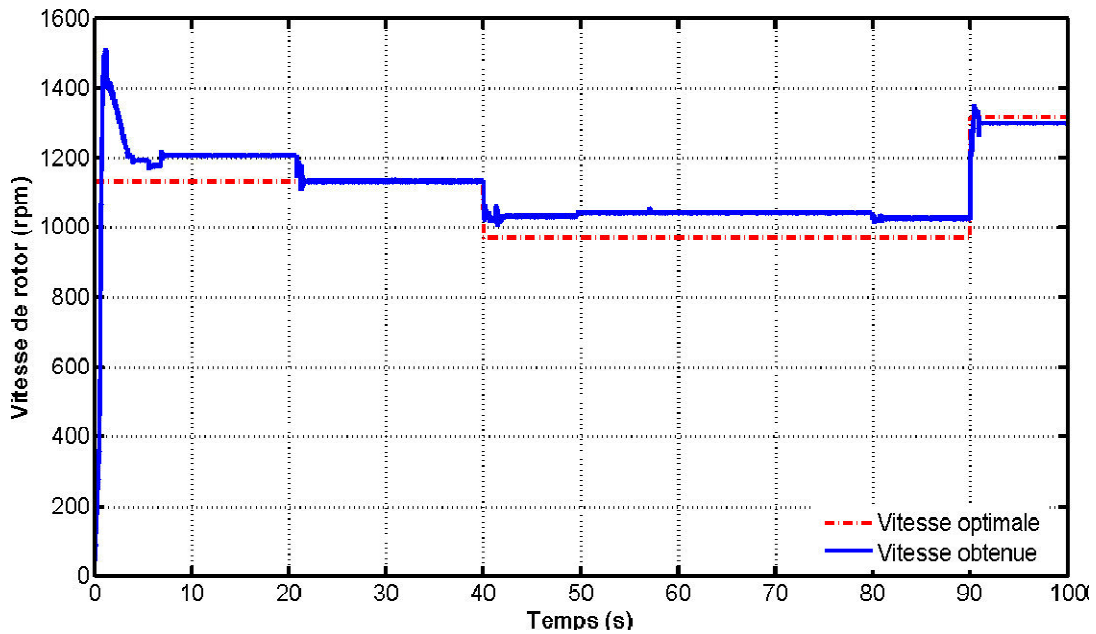


Figure (IV.10) : Vitesse de la GSAP.

La figure (IV.11-12) montre qu'à la 90ème seconde, les conditions climatiques sont bonnes, alors toutes les énergies produites sont transférées à la charge. La batterie est déchargée ($S1 = 1$) parce que la demande de charge dépasse la puissance renouvelable, et quand cette puissance est suffisante, la batterie sera désactivée ($S1 = 0$) afin d'utiliser toute la puissance renouvelable produite.

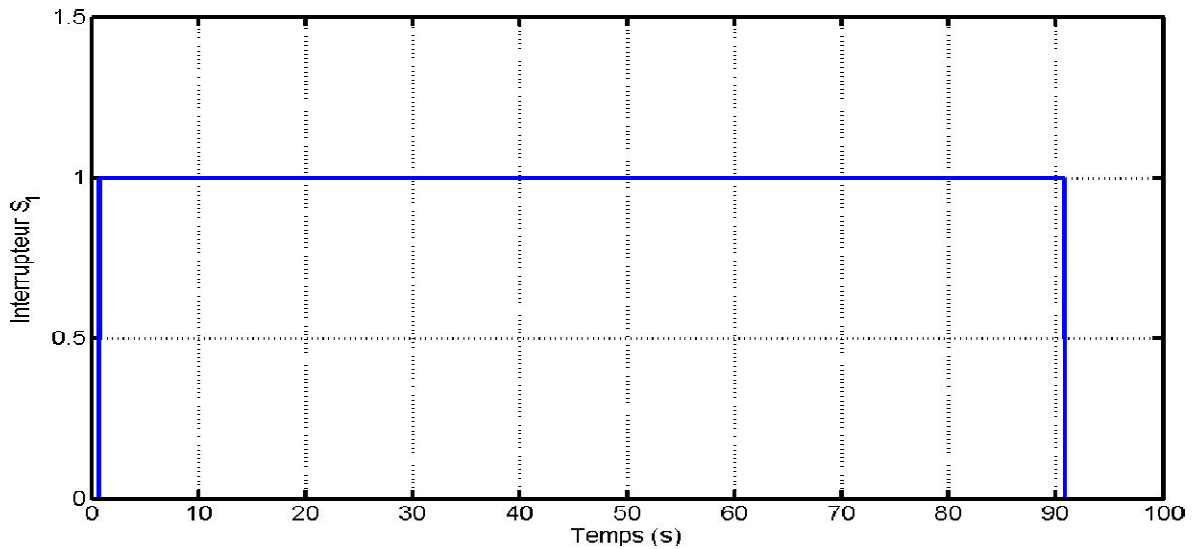


Figure (IV.11) : Etat de l'interrupteur S1.

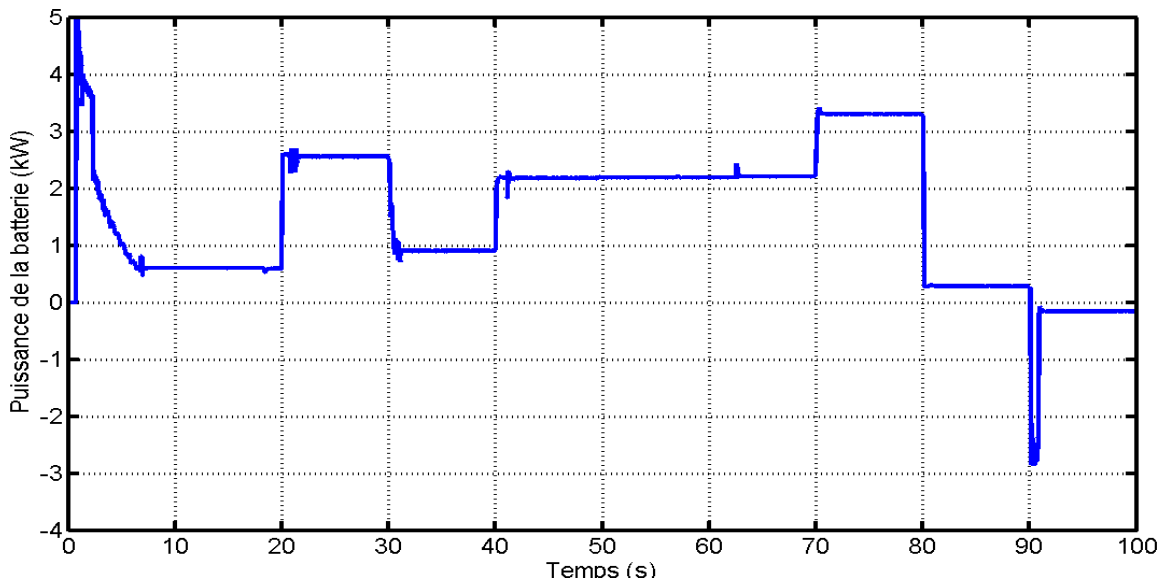


Figure (IV.12) : Puissance de la Batterie.

De $t=90$ secondes à la $t=100$ secondes, la vitesse de la GSAP augmente, en même temps la demande de charge diminue, le surplus devient trop grand ($\Delta P = 3.5$ kw) alors pour éviter le dégagement gazeux de la batterie, la résistance de délestage est enclenchée ($S2 = 1$) pour dissiper le surplus d'énergie, la figure (IV.13) montre l'instant d'enclenchement de l'interrupteur S2.

L'énergie produite est entièrement fournie à la charge avant d'utiliser la batterie comme complément. La demande de charge est toujours respectée malgré les perturbations (conditions climatiques) , comme le montre la figure (IV.14).

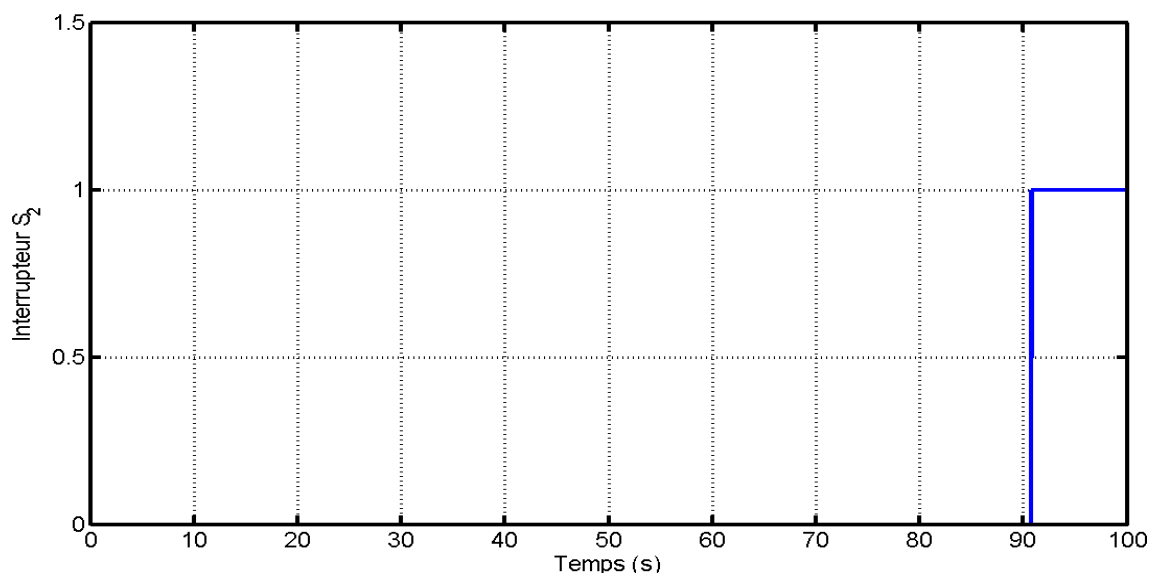


Figure (IV.13) : Etat de l'interrupteur S2.

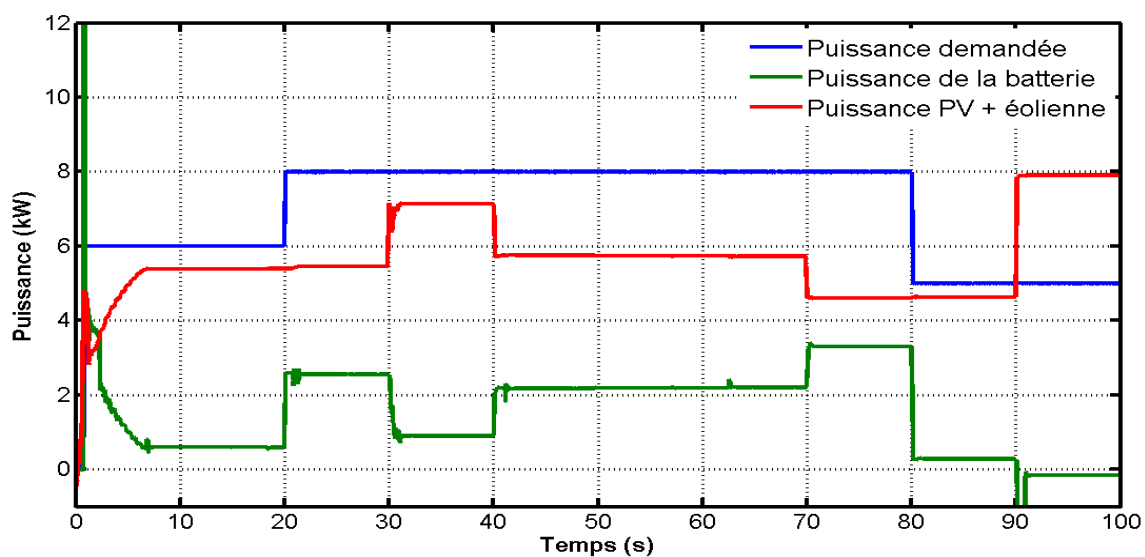


Figure (IV.14) : Puissance renouvelable, puissance de la batterie et puissance demandée.

La figure (IV.15) confirme que la forme de tension fournie à la charge de chaque phase est bien sinusoïdale avec ($f = 50\text{Hz}$; $V = 380\text{V}$) dans tous

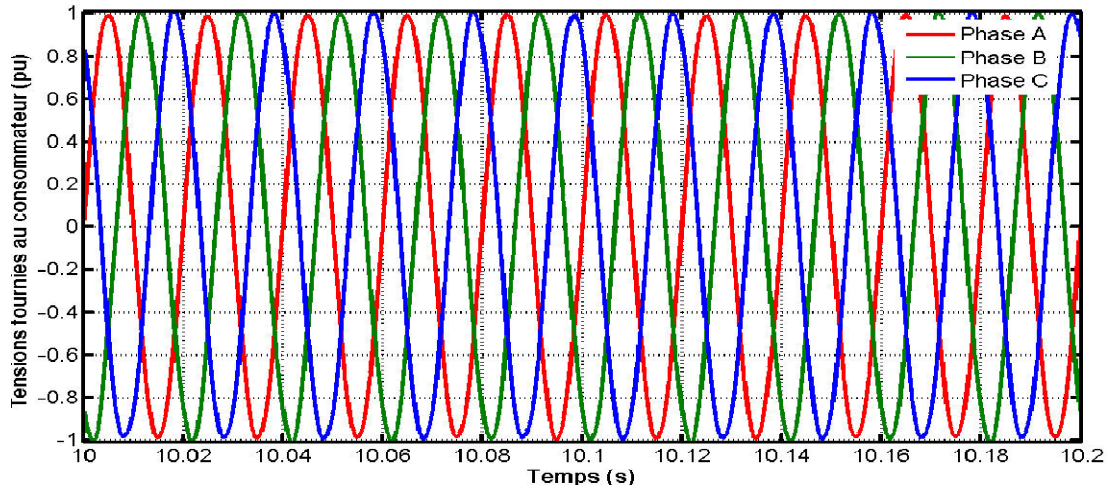


Figure (IV.15-a) : Tension fournie à la charge

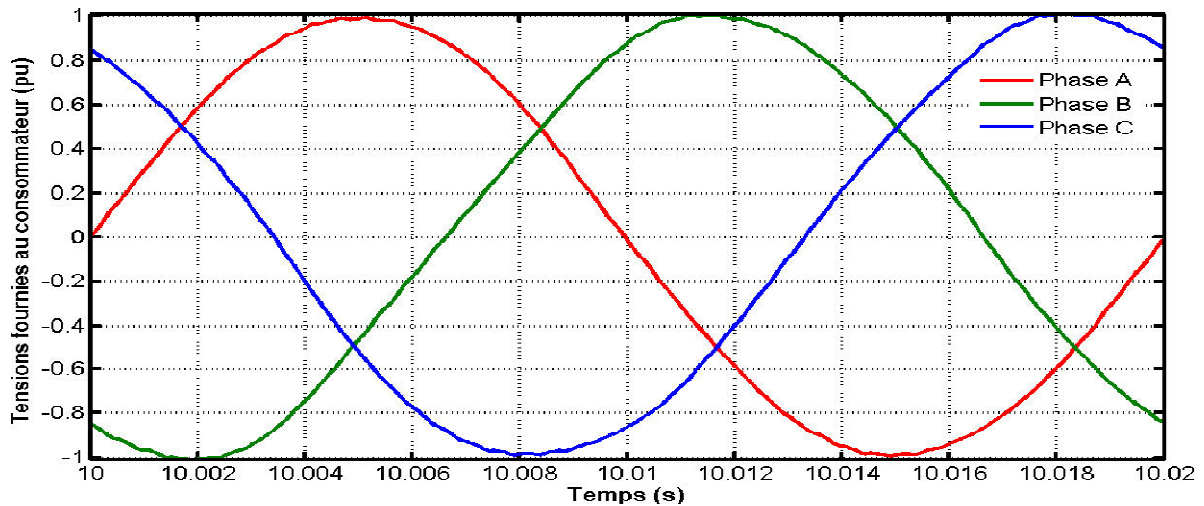


Figure (IV.15-b) : Tension fournie à la charge (Zoom).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un système de production d'électricité hybride (jumelé). En effet, nous avons utilisé un bus continu qui reçoit l'énergie produite par les sources photovoltaïques et une GSAP. Un des avantages de cette structure est l'utilisation des batteries nécessaires en cas de besoin pour compenser un éventuel manque de puissance. Nous avons également utilisé une résistance de délestage qui permet de dissiper le surplus d'énergie en cas de baisse de demande et de batteries pleines.

Pour avoir un comportement optimal de l'installation d'un point de vue flux de puissance, nous avons utilisé un superviseur flu. Celui-ci permet une gestion efficace de l'énergie. Plusieurs résultats de simulation ont été présentés afin de montrer les performances de notre installation en présence de perturbation (changements climatiques et de variations de la consommation d'énergie).

Conclusion

général

Conclusion générale

Dans le contexte mondial pour réduire l'émission de gaz à effet de serre et l'échauffement de la planète, le besoin de l'énergie renouvelable est indispensable. La production de l'énergie renouvelable, surtout éolienne et photovoltaïque, est de plus en plus importante et alors de nouvelles constructions apparaissent. Cette évolution dynamique est surtout visible dans le domaine du site isolé grâce au développement des nouvelles technologies dans le champ de l'électronique de puissance. Notre mémoire s'est focalisé sur le jumelage entre deux sources d'énergie (GSAP entraînée par une turbine éolienne et le panneau photovoltaïque). Dans ce contexte, nous avons introduit un superviseur flou pour contrôler le basculement des interrupteurs de charge et décharge de la batterie ainsi que le délestage. pour l'optimisation de la puissance du panneau photovoltaïque nous avons utiliser le système MPPT.

Dans un site isolé, le besoin de continuité du service en présence de la disponibilité intermittente des sources renouvelables entraine l'utilisation indispensable d'un système de stockage. Dans ce contexte, la batterie plomb-acide est la solution la plus utilisée grâce au bon rapport prix/qualité. Pourtant, la mauvaise utilisation de la batterie peut entrainer sa défaillance, cela implique le besoin d'entretenir et remplacer souvent celle-ci. Le coût d'installation et de fonctionnement du système est donc augmenté. Alors, il faut prendre en compte la durée de vie des composants, surtout de la batterie. De ce fait, nous avons proposé un superviseur de la gestion de l'énergie, pour prolonger la durée de vie de la batterie en limitant son taux de charge/décharge et le dégagement gazeux. Plusieurs simulations ont été effectuées en considérant différents cas d'exploitation et de conditions climatiques pour montrer l'intérêt et l'efficacité du superviseur ou proposé.

Comme perspectives nous suggérons l'implémentation en temps réel du système pour valider notre travail.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Nicolas Laverdure <<Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles Ou insulaires>> Thèse de Doctorat, l'INPG, Génie Electrique, 2005.
- [2] A. Boyette , <<Contrôle- commande d'un générateur asynchrone à double alimentation Avec système de stockage pour la production éolienne >>, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [3] S. Belakehal, A. Bentounsi, M. Merzoug et H. Benalla, « Modélisation et commande D'unégénératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie Éolienne », Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°1 (2010) 149 – 161,
- [4] A. Mirecki, <<Étude comparative de chaines de conversion d'énergie dédiées à une Éolienne de petite puissance >>, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [5] S. El Aimani, <<Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans Un réseau de moyenne tension >>, Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.
- [6] V.Courte suisse, « Supervision d'une centrale multi sources à base d'éoliennes et de Stockage d'énergie connectée au réseau électrique », Thèse doctorat en Génie Electrique, Ecole Nationale Supérieur d'Arts et Métiers, 2008.
- [7] Jean-Claude Sabonnadière, « Nouvelles technologies de l'énergie 1 », Lavoisier, 2006.
- [8] Master Energétique et Environnement : Travaux Pratiques UPMC
- [9] Modélisation des panneaux photovoltaïques et adaptation de la cyclo stationnarité pour le Diagnostic Mohammed Telidjane
- [10] Guy Séguier, "Électronique de puissance", 7th Edition, Dunod, Paris 1999,
- [11] Hansruedi Bühler, "Convertisseurs statiques", Presses polytechniques et universitaires Romandes, 1991,
- [12] Henri FOCH et autres, "Electronique de Puissance", Vol. D3000 à D3233, Ed.Techniques de l'Ingénieur, 1989,
- [13]Malik MANCEUR , thèse de doctorat, « Commande robuste des systèmesnon linéaires complexes » présentée et soutenue publiquement le 12 juin 2012,université de Reims Champagne-Ardenne.
- [14]Cours Magister et Doctorat ,« Logique Floue et son application »: dispense par Prof. F. Fidani, Département Electrotechnique, Université Batna2.

- [15] F. Zidani ET M.E.H Benbouzid, « Fuzzy IFOC for saturation induction machine, », EERR (Electrical Engineering research reports), No.9, pp.34-44, July 2000.
- [16] F. Zidani, « Contribution au Contrôle et Diagnostic de la Machine Asynchrone par la Logique Floue, » Thèse d'état, Université de Batna, département d'électrotechnique, 2003.
- [17] T. Takagi et N. Sugeno, « Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control, » IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, Vol.SMC-15, pp.116-132, January- February 1985.
- [18] [Luque and Hegedus, 2010] Luque, A. and Hegedus, S. (2010). Handbook of photovoltaic science and engineering. Wiley.
- [19] [Tremblay and Dessaint, 2009] Tremblay, O. and Dessaint, L. (2009). Experimental validation of a battery dynamic model for ev applications. World Electric Vehicle Journal, 3 :13-16.