

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la A Recherche Scientifique

UNIVERSITE Mouloud MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes INGENIEUR D'ETAT

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : MACHINES ELECTRIQUES

Présenté par
Nacer AIT CHEKDHIDH

Thème

Etude de système générateur photovoltaïque-batterie : Application au Véhicule électrique

Mémoire soutenu publiquement le 02 Juillet 2014 devant le jury composé de :

M M.ZAOUIA

Maitre de Conférences, UMMTO, Président

M M. BEN SIDHOUM

Maitre de Conférences, UMMTO, Rapporteur

M H.DJOURI

Maitre Assistant, UMMTO, Examineur

M N.BEN YAHIA

Maitre de Conférences, UMMTO, Examineur

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

- ✓ mes parents.
- ✓ Ma femme.
- ✓ Ma famille frères et sœurs.
- ✓ Tous mes proches.
- ✓ Mes ami(e)s.
- ✓ Mes enseignants
- ✓ Tous les étudiants en génie électrique



Remerciements

Je remercie particulièrement mon promoteur M^r Mohand Outaher BENSIDHOUM pour l'aide qu'il avait fournie afin de mener ce travail à terme.

Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude ses fructueux conseils tout au long de ce travail.

Je tiens également à remercier les membres de jury qui me feront l'honneur d'évaluer le contenu de ce travail.

Nous n'oublions pas tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire et je profite cette présente occasion pour leur témoigner toute ma sincère amitié et leur avouer ma reconnaissance.

NOMENCLATURE

Les principales notations utilisées:

a, b, c : Indices correspondant aux trois phases « a », « b » et « c ».

s, r : Indices correspondant aux stator et au rotor.

d, q : Indices correspondant au référentiel lié aux champ tournant.

S, P : Variables de LAPLACE.

L : Inductance cyclique.

R : Résistance.

L_m : Inductance mutuelle propre.

T : Constante de temps.

p : Nombre de paire de pôles.

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant.

K_f : Coefficient de frottements.

J : Moment d'inertie de la partie tournante.

G : Gain.

V, U : Tension (simple, composée)

I : Intensité de courant

θ : Angle électrique.

Ψ : Flux magnétique.

Ω : Vitesse angulaire mécanique.

w : Vitesse angulaire électrique.

w_g : Vitesse angulaire de glissement électrique

σ : Coefficient de dispersion.

C_e^* : consigne de couple électrique

C_e : couple électrique fourni

C_{roue} : couple au niveau des roues

C_{tot} : couple total au niveau de l'arbre primaire

E : force électromotrice interne de la batterie

I_{bat} : courant délivré par la batterie

I_{cel} : courant délivré par une cellule

k : rapport de la boîte de vitesse

N_p : nombre de branches en parallèle
 N_s : nombre de cellules en série qui constitue une branche
 P_{dem} : puissance demandée
 P_e : puissance fournie par le moteur électrique
 R_i : résistance interne de la batterie
 Soc : l'état de charge de la batterie
 v : vitesse linéaire du véhicule
 V_{bat} : tension aux bornes de la batterie
 V_{cel} : tension aux bornes d'une cellule
 Ω_b : vitesse de base du moteur électrique
 Ω_{mot} : vitesse mécanique de moteur
 Ω_{roue} : vitesse mécanique des roues.
 F_r : force de résistance des frottements aérodynamique et solide.
 m : la masse.
 C_r : couple résistant mécanique des roues.
 C_m : couple moteur électrique.

N.B : Les autres symboles utilisés seront définis au fur et à mesure de leurs utilisations.

II- abréviations et définitions:

GPV : GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE

MPPT : MAXIMUM POWER TRACKING

MLI : MODULATION A LARGEURE D'IMPULSION

NPC : NEUTRAL POINT CLAMPING

IGBT: INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR

DC/DC : CONVERTISSEUR CONTINU VERS CONTINU

STC: STANDARD TEST CONDITION (***1000W/M2, T=25°C, AM1.5***)

BOOST: HACHEUR SURVOLTEUR

SOC: STATE OF CHARGE EN FRANCAIS 'ETAT DE CHARGE'

DOD : DEPTH OF DISCHARGE EN FRANÇAIS 'ETAT DE DECHARGE'

NOCT : Nominal Operating Constant Temperature

DEFLUXAGE : DIMINUER LE FLUX AINSI LE COUPLE SERA DIMINUE
PROPORTIONNELEMENT POUR AUGMENTER LA PLAGE DE VITESSE.

INTRODUCTION GENERALE.....	01
CHAPITRE I : Etude de générateur photovoltaïque	
I-1 Introduction	05
I-1.1 Spectre du rayonnement	
I-1.3 Différentes zones irradiation solaire	
I-1.3 Différents types de rayonnement	
I.2 Base de physique de générateur photovoltaïque	11
I-2.1 Le matériau Semi-conducteur	
I-3.2 La jonction p-n	
I.3 Caractéristiques des cellules photovoltaïque	13
I-3.1 Principe de fonctionnement	
I-3.2 Les différents types des cellules photovoltaïques	
I-3.3 Circuit électrique équivalent	
I-3.4. Equations de la cellule photovoltaïque	
I-3.5 Paramètre des cellules photovoltaïques	
I-3.6 Zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque	
I.4 Le module photovoltaïque.....	21
I-4.1 Caractéristiques d'un module	
I-4.2 Assemblage des modules photovoltaïques	
I-4.3 Protection de cellules Photovoltaïques	
I-4.4 Nombre de cellules par module	
I-4.5 Le panneau solaire	
I.5 Conversion de l'énergie photovoltaïque	26
I-5.1 Le convertisseur continu-continu	
I-5.2 Le convertisseur continu-alternatif	
I.6 Avantages et inconvénients de générateur photovoltaïque	27
I.7 Etage d'adaptation DC/DC.....	28
I-7.1 Les convertisseurs DC-DC ou hacheurs	
I-7.2 Le choix de convertisseur	
I-7.3 Convertisseur DC/DC a découpage (BOOST)	
I.8 La régulation avec MPPT.....	32
I-8.1 Qu'est-ce qu'un régulateur MPPT	
I-8.2 Qu'entendons-nous par optimiser	
I-8.3 La recherche du point de puissance maximum MPPT	
I-8.4 Représentation Graphique du point maximum de puissance	
I-8.5 Influence de la temperature et de l'éclairement	
I-8.6 Technologie de la recherche du point de puissance maximum	
I-8.7 Les systèmes de recherche de puissance "intelligents"	
II-9 Algorithme d'incrémentation de l'inductance	39
II.9.1 Méthode perturbation et observation.....	

CHAPITRE II : Etude de la batterie de stockage

II-1 Généralités sur les batteries.....	41
II.2 Regroupement des batteries.....	
II.3 Caractéristiques électriques de la batterie	42
II-3.1 Interface des batteries	
II-3.2 Modélisation de la batterie.....	
II-3.3 Expression de la tension en présence d'un courant.....	
II.4 Les différents types de la batterie	50
II.5 Régulation électronique des batteries	54
II.5.1 Différents types de régulateurs	
II.5.2 Régulation et Cycle de charge d'une batterie	
II.6 Model électrique équivalent d'un élément de la batterie	57
II.7 Système de charge pour une batterie au Lithium-ion	59
II.8 La charge et la capacité d'une batterie	61
II.9 Conclusion	62

CHAPITRE III : Etude de la machine asynchrone

III Introduction.....	63
III.1 Généralités sur la machine asynchrone	65
Définition.....	
III.2 Constitution.....	
III.2.1 Le stator.....	
III.2.2 Le rotor.....	
III.2.2.1 Le rotor à bague.....	
III.2.2.2 Le rotor à cage.....	
III.3 Principe de fonctionnement.....	67
III.3.1 Théorème de FERRARI.....	
III.3.2 Loi de FARRADAY.....	
III.3.3 Loi de LAPLACE.....	
III.3.4 Loi de LENZ	
III.4 Bilan de puissance.....	
III.5 Le rendement.....	
III.6 Démarrages.....	
III.6.1 Démarrage direct.....	
III.6.2 Démarrage étoile-triangle.....	
III.6.3 Rhéostat rotorique	
III.6.4 Démarrage sous fréquences et tensions variables.....	
III.7 Modélisation de la machine asynchrone.....	71
III.7.1 Hypothèses simplificatrices	
III.7.2 Conséquences	
III.7.3 Convention de signes	
III.7.4 Description	
III.7.5 La mise en équation de la machine asynchrone.....	
7.5.1 Equations électriques	
7.5.2 Equations magnétiques	

7.5.3	Equation mécanique	
7.5.4	Transformation de PARK.....	
7.5.5	Les équations dans les axes d et q	
III.7.6	Choix du référentiel.....	
7.6.1	Référentiel lié au stator	
7.6.2	Référentiel lié au rotor	
7.6.3	Référentiel lié au champ tournant	
III.7.7	Représentation d'état.....	
7.7.1	Choix du vecteur d'état	
7.7.2	Modèle final de la machine asynchrone.....	
III.7.8	Simulation numérique	
III.7.9	Démarrage à vide	
III.8	Alimentation de la machine asynchrone	84
8.1	Introduction	
8.2	Choix de l'alimentation.....	
8.3	Modélisation de l'ensemble des convertisseurs	
8.3.1	Hypothèses de travail	
8.3.2	Modélisation.....	
8.3.3	Modulation de largeur d'impulsion (<i>MLI</i>)	
8.4.1	La modulation sinus-triangle	
8.4.2	Propriété	
8.4.3	Simulation de l'onduleur à <i>MLI</i> sinus-triangle	
8.4.4	Interprétations et commentaires	
8.5	Association onduleur à <i>MLI</i> -machine asynchrone.....	
8.6	Conclusion	93

CHAPITRE IV : Analyse Dynamique de véhicule

Introduction.....	95
IV.1. Modèle Dynamique de véhicule	96
IV-1- 1 Force de frottement solide (F_s)	
IV-1- 2 Force de frottement aérodynamique (F_a)	
IV-1.3 Force de la pesanteur (F_m)	
IV-1.4 Relation avec le principe fondamental de la dynamique	
IV.1.5 Notions sur le couple	
IV.1.6 Contrôle de la vitesse de véhicule	
IV.1.7 Etude association moteur-variateur	
IV.2 conclusion	107

CHAPITRE V : Dimensionnement de différents paramètres de véhicule

V.1. Introduction	107
V-2 Estimation de paramètres physiques de véhicule	
V.2.1 Poids de vehicule	
V.2.2 Dimensionner les paramètres de pack des batteries	
VI-3 Calculs basé sur le model dynamique de véhicule	110
VI-4 Modèle de la machine asynchrone	114

VI-5 Caractéristique couple-vitesse	
VI-6 Conclusion	117

CHAPITRE VI : Modélisation et simulation de système

VI.1 Présentation de MATLAB SIMULINK.....	119
VI.2 Modèle SIMULINK de GPV avec Régulateur MPPT	
VI-3 Estimation de l'énergie produite par le module photovoltaïque	
VI-4 Simulation de Générateur photovoltaïque avec la méthode MPPT.....	121
VI.4.1 Modèle SIMULINK de hacheur survolteur.....	
VI.4.2 Modèle SIMULINK de régulateur MPPT avec algorithme P&O.....	
VI.4.3 Modèle SIMULINK de Générateur photovoltaïque global	
VI-5 Conclusion	124

CONCLUSION GENERALE.....	125
---------------------------------	------------

PERSPECTIVES	126
---------------------------	------------

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction Générale :

Le nombre de véhicules en circulation ne cesse d'augmenter, et même si les nouveaux moteurs thermiques sont de moins en moins polluants, les problèmes de pollution sont de plus en plus critiques, particulièrement pour les gaz à effet de serre responsables du réchauffement de la planète.

Au problème environnemental, s'ajoute également un problème économique du fait que les véhicules à combustion interne ont un très faible rendement concernant l'utilisation des combustibles fossiles 30% au maximum seulement et l'on parle fréquemment ces dernières années des ressources énergétiques qui sont en train de s'épuiser.

Une conséquence est alors la nécessité de prévoir de nouvelles technologies qui permettront de rendre les véhicules moins polluants et plus économes.

Les véhicules électriques sont apparus, dans un premier temps, comme une solution prometteuse. Leur faible autonomie combinée à un coût trop élevé ne leur a pas permis d'être concurrentiels vis-à-vis de leur homologue conventionnel.

L'automobile électrique est jusqu'à ce jour, principalement destinée aux habitants des grandes villes. En effet, son autonomie n'est pas très grande. Le véhicule ne va pas souvent au-delà des 80 km excepté pour ceux qui profitent des dernières avancées technologiques.

Par ailleurs, le véhicule électrique n'a pas d'embrayage. Il n'a pas non plus de boîtier de vitesse. La conception d'un véhicule électrique est articulée autour d'une batterie, d'un moteur, d'un système de commande électronique et de l'électricité. Les batteries servent à emmagasiner l'énergie. Ces dernières peuvent être en nickel-cadmium ou en plomb. Par rapport à la batterie chargée au plomb, la batterie en nickel-cadmium présente l'avantage de pouvoir être entièrement recyclée, ce qui n'est pas le cas de la première.

Toutefois, une autre matière a gagné la faveur des constructeurs : le lithium.

Les chercheurs pensent que ce composant prolongerait de façon conséquente l'autonomie du véhicule. En effet, il serait possible que le véhicule puisse parcourir plus de 200 km avec cette batterie de nouvelle génération.

En outre, la batterie au lithium favoriserait un abaissement des coûts de consommation et gagnerait facilement de la sorte la faveur des acheteurs.

Il existe également une autre option pour les constructeurs : la batterie en nickel-métal-hydrure.

Outre la performance de la batterie, un facteur peut influencer sur l'autonomie de celle-ci : la manière de conduire son véhicule. Si le conducteur fait partie de ceux qui aiment rouler vite, la batterie se déchargera elle aussi très vite. Ainsi, pour conserver le plus longtemps possible l'autonomie de la batterie, il vaut mieux adopter une conduite assez lente de la voiture.

Cela permettra d'économiser l'énergie de la batterie et par la même occasion d'avoir quelques kilomètres de plus à son compteur. Par ailleurs, il est préférable de conduire sur des tracés qui ne présentent pas un relief trop accidenté.

Il existe deux types de moteurs électriques qui peuvent faire rouler une voiture : les moteurs à courant alternatif et les moteurs à courant continu. Contrairement aux moteurs à courant alternatif, les moteurs à courant continu présentent l'avantage d'un coût de fabrication peu élevé. En outre, ces derniers présentent aussi l'avantage de la puissance.

L'un des seuls inconvénients est le risque de « casse » moteur si le conducteur titille trop souvent cette puissance. Cependant, il ne faudrait pas oublier que les moteurs à courant alternatif ont aussi des adeptes. Ainsi, ils peuvent augmenter l'autonomie de la voiture. En effet, ils transmettent de l'énergie lors des freinages de la voiture. Dans les embouteillages et les petites rues étroites, cela peut être indéniablement utile.

Le moteur électrique, qu'il soit à courant alternatif ou continu, présente l'avantage de donner sa pleine puissance à partir d'un tour/minute réduit, à la différence des voitures à moteur « traditionnel ».

Le système électronique permet de renforcer l'efficacité de l'autonomie de la batterie. La puissance d'une voiture électrique ne tient pas seulement à la bonne conception de son moteur ou bien à la technologie performante de sa batterie mais aussi à l'informatique embarquée.

Cette composante devient de plus en plus importante au fur et à mesure que les progrès dans la fabrication des composants avancent. Certains ingénieurs estiment que les difficultés de recharge de la batterie ne se présenteront plus dans un avenir plus ou moins proche grâce aux nouveaux matériaux qui permettent d'améliorer la conception.

Le but poursuivi dans le cadre de ce mémoire est de chercher des modèles Pour stocker l'énergie électrique à base du générateur photovoltaïque pour la restituer au besoin pour l'entraînement de moteur de véhicule électrique.

Au premier chapitre, on fait une description générale, et le principe de fonctionnement de Chaque élément constituant le système photovoltaïque. Nous décrivons le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales et les différents types des cellules, avantages et les inconvénients.

Au deuxième chapitre on poursuit une étude sur Les accumulateurs et piles électrochimiques qui permettent de disposer d'une réserve d'énergie électrique autonome. Le problème de ces éléments énergétiques est de réussir à les maintenir en état le plus longtemps possible bien qu'ils soient le siège de nombreux phénomènes électrochimiques non linéaires et qu'ils subissent une altération de leurs performances au cours du temps et des utilisations.

Le troisième chapitre est très important, car il présente la modélisation de la machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension.

Le quatrième chapitre est destiné à l'étude de modèle dynamique de véhicule électrique en exposant les équations permettant de calculer les paramètres mécaniques essentiels tel que force, puissance et vitesse.

Le Cinquième chapitre on représente la simulation de chaque élément du Système. Par logiciel MATLAB/SIMULINK après dimensionnement des différents composants.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et simulation des résultats.

I- Le Générateur photovoltaïque(GPV) :

I-1 Introduction:

Les énergies renouvelables se manifestent comme une solution potentielle à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Parmi les moyens de production prometteurs, le photovoltaïque apparaît aujourd'hui comme le plus approprié et le plus abouti à la production d'électricité d'origine renouvelable pour la traction des véhicules électriques.

L'électricité provenant des sources renouvelables panneaux photovoltaïques est intermittente, et dépendante des conditions climatiques.

Ces générateurs renouvelables sont couplés généralement à un système de stockage assurant une disponibilité en continue d'énergie.

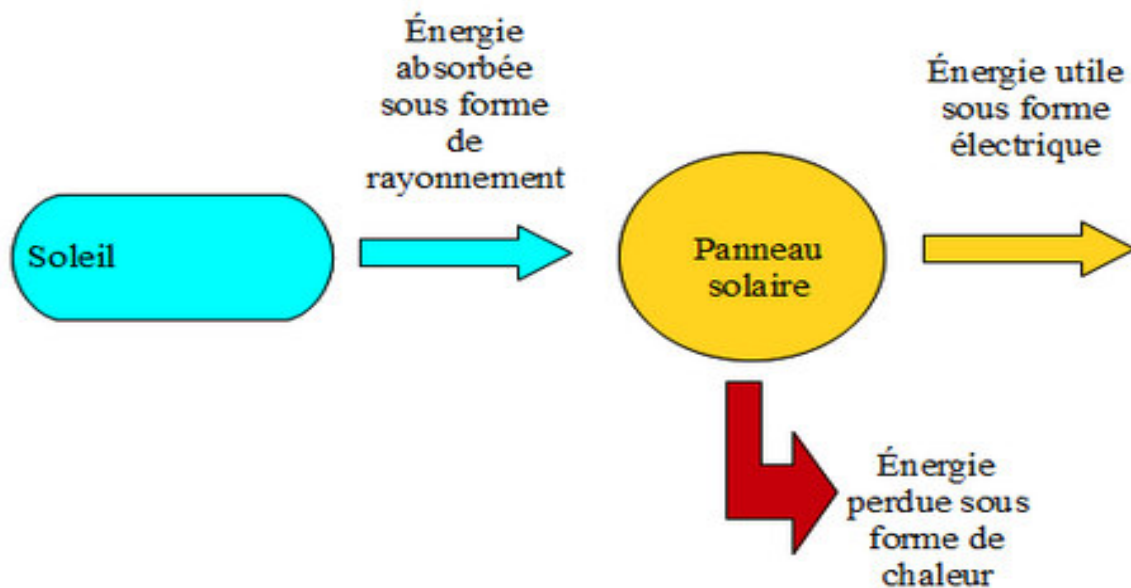


Figure. (I.1) : Schéma synoptique de la conversion de l'énergie solaire [1]

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

La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale.

La caractéristique I-V du générateur photovoltaïque GPV dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. De plus, son point de fonctionnement du GPV dépend directement de la charge qu'il alimente.

Afin d'extraire en chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV, nous introduisons un étage d'adaptation entre le générateur et la charge pour coupler les deux éléments le plus parfaitement possible.

Le problème du couplage parfait entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continue n'est pas encore réellement résolu. Un des verrous technologiques qui existe dans ce type de couplage est le problème du transfert de la puissance maximale du générateur photovoltaïque (GPV) à la charge qui souffre souvent d'une mauvaise adaptation. Le point de fonctionnement qui en découle est alors parfois très éloigné du point de puissance maximale (PPM). La littérature propose une grande quantité de solutions sur l'algorithme de contrôle qui effectue une recherche de point de puissance maximale lorsque le GPV est couplé à une Charge à travers un convertisseur statique. Dans cette thèse, l'ensemble constitué par un GPV, un étage d'adaptation et une charge DC est abordé dans sa globalité par une approche du point de vue architecture de conversion à haut rendement, grandes fiabilité et flexibilité.

Dans le chapitre I, nous rappelons les principales caractéristiques d'un GPV. Nous décrivons les principaux types d'algorithmes de recherche de point de puissance maximale (MPPT) d'un GPV présents dans la littérature.

Puis, nous présentons la conception d'un étage d'adaptation à partir du

Concept de transformateur DC. Ce type d'adaptation permet aujourd'hui de relier aisément un générateur photovoltaïque (GPV) à une charge de type continue (DC) avec un rendement de conversion très élevé. En fait, le concept de transformateur DC correspond à la modélisation des fonctions basiques idéalisées d'un convertisseur à découpage continu-continu (DC/DC).

Le générateur renouvelable sélectionné pour notre étude est un panneau photovoltaïque avec un système de stockage, le stockage est assuré par des batteries. Ce système, appelé système PV-Batteries.

Le type de stockage généralement utilisé dans ce système est la batterie au Lithium ion, la maturité dont cette technologie fait preuve et son fort rendement en sont les raisons principales.

Leur fonctionnement journalier (décharge et recharge complètes sur quelques jours) permet d'installer une faible capacité de stockage. Mais l'état de charge maximal des batteries est atteint d'autant plus la recharge est excessive, on doit les déconnecter de l'installation. Il est alors impossible d'utiliser la totalité de la ressource renouvelable.

Le dimensionnement de stockage optimal basé sur la partie de modélisation des composants constituant ce système et la charge de l'utilisation, c'est à dire la modélisation du panneau photovoltaïque, batterie, régulateur et le convertisseur .

Dans ce chapitre nous décrivons la conception d'un système photovoltaïque et le principe de fonctionnement de chaque élément le constituant.

I-1.1 Spectre de rayonnement:

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons, l'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ et elle est donnée par la formule suivante:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda \quad (I.1)$$

$h = 6,62 * 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ est la constante de Planck.

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom AMO.

Sa distribution en énergie est répartie en :

Ultraviolet UV	0.20 < λ < 0.38 μm	6.4%
Visible	0.38 < λ < 0.78 μm	48.0%
Infrarouge IR	0.78 < λ < 10 μm	45.6%

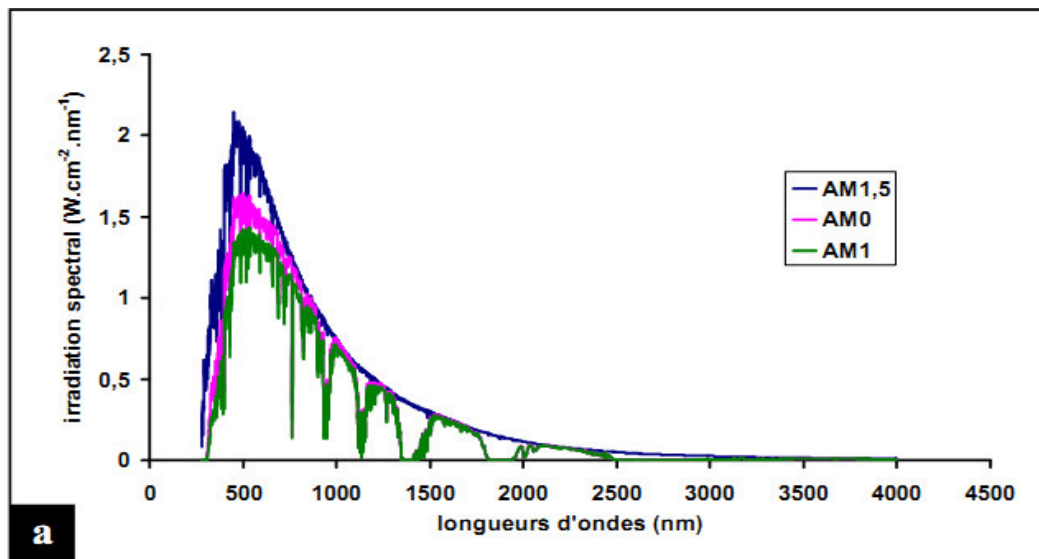


Figure (I. 2) : Le spectre du rayonnement solaire [2].

I-1.2 Les zones de l'éclairement solaire annuel a travers le monde :

Chaque zone dans le monde reçoit une quantité de rayonnements différentes pour la méditerranée cela se situe entre 4 et 5 $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{jour}$.

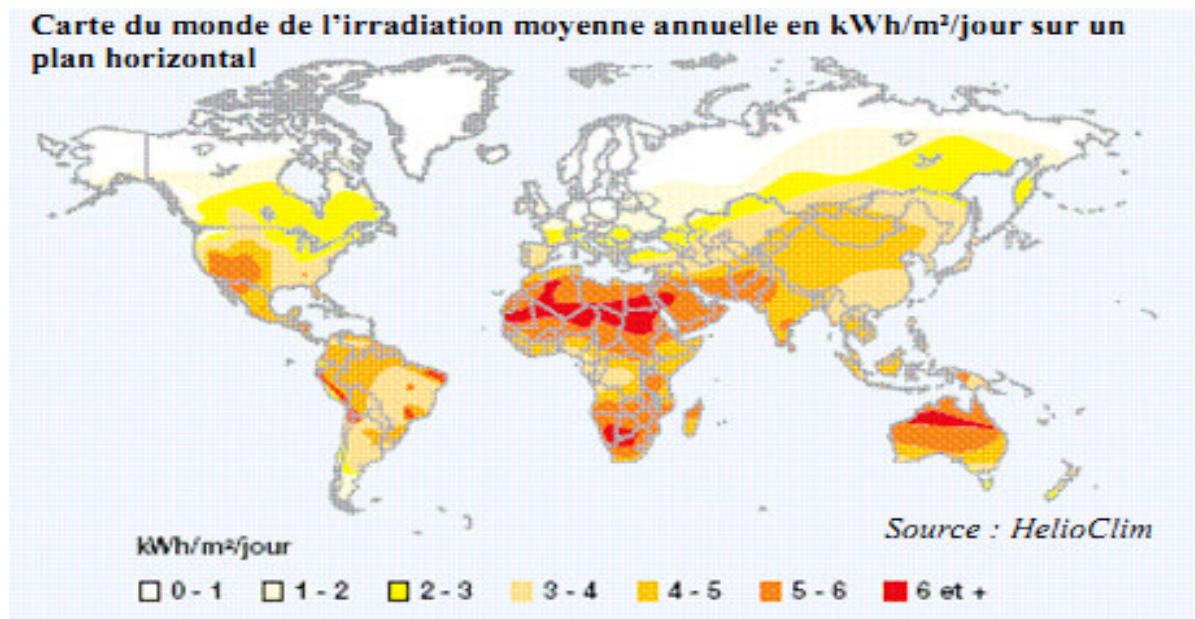


Figure (I.2.b) : différentes zones de l'éclairage solaire ou irradiation dans le monde

I-1.3 Les Différents types de rayonnement:

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes :

a– Le rayonnement direct : est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.

b– Le rayonnement diffus : est constitué des photons diffusés par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Sa structure varie avec les conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet qu'il est isotrope, c'est-à-dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste. Par temps clair ou voilé, outre le ciel bleu relativement isotrope (diffusion sur l'air), on a une couronne plus brillante autour du soleil (composante appelée circumpolaire) et souvent un renforcement sur l'horizon, la bande horizon.

c– L'albédo : est la partie réfléchi par le sol. Il dépend de l'environnement du site, il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.

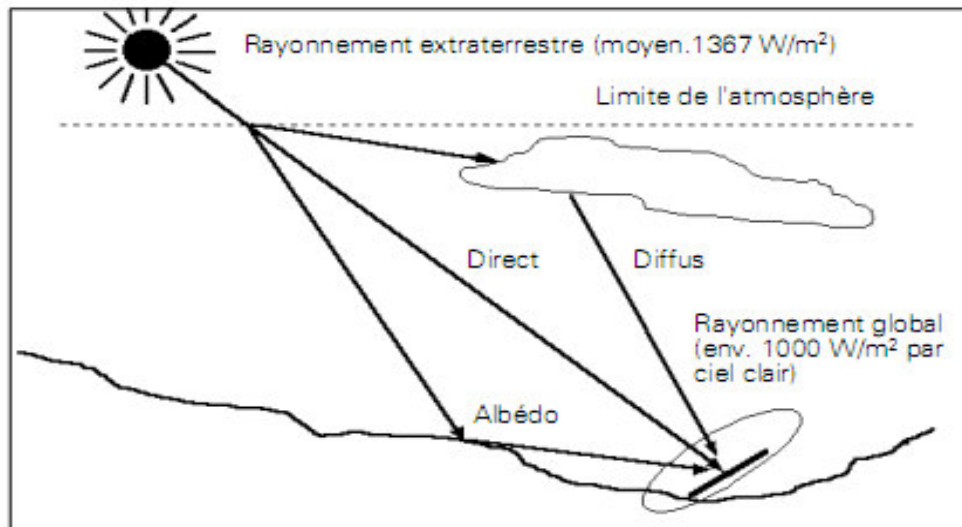


Figure. (I.3) : Composants du rayonnement solaire : extraterrestre, Globale =direct+diffus + albédo.

I-1.4 Orientation et inclinaison:

Pour installer un panneau solaire on doit se préoccuper à la fois de l'orientation et de l'inclinaison. L'orientation indique tout simplement vers quel point cardinal un panneau est exposé : il peut faire face au Sud, au Nord, à l'Est, à l'Ouest. L'inclinaison, quant à elle, est l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal.

Etant donné que la position du soleil dans le ciel varie constamment, il faudrait idéalement que le panneau suive le soleil. Il existe de tels dispositifs «suiveurs», mais ils consomment une part de l'énergie et demandent de l'entretien.

En pratique, l'inclinaison optimale est déterminée par la règle suivante:

Inclinaison optimale pour une utilisation annuelle = Latitude du lieu + 10°

Cet emplacement idéal se justifie, encore une fois, surtout pour les rayonnements directs et les panneaux qui convertissent le mieux ce rayonnement, en l'occurrence les panneaux au silicium cristallin.

Les panneaux au silicium amorphe, quant à eux, convertissent très bien le rayonnement diffus, et pourront être placés par exemple à l'horizontale sans Perdre trop d'énergie solaire [3].

I-2 Physique de Générateur photovoltaïque (GPV) :

I-2.1 Le matériau Semi-conducteur :

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Cette conductivité des semi-conducteurs, à la différence de celle des conducteurs et des isolants, dépend fortement de leur pureté, des irrégularités de leur structure, de la température et d'autres quantités physiques et chimiques. Cette propriété représente leur avantage principal puisqu'elle permet la construction de la plupart des composants électroniques ayant des caractéristiques diversifiées.

A la température de 0°Kelvin (-273°C) chaque atome de la grille cristalline est attaché à quatre atomes voisins par la mise en commun de leurs électrons périphériques (liaisons covalentes), assurant la cohésion du cristal, les électrons qui participent à ces liaisons sont fortement liés aux atomes de silicium, aucune charge mobile susceptible d'assurer la circulation d'un courant électrique n'existe. La conductivité du silicium est alors très faible.

Cependant l'élévation de la température permet la libération dans la structure, de certains électrons périphériques, par apport d'énergie.

De plus, la libération d'un électron provoque l'apparition d'un trou dans la structure cristalline, soit la création d'une paire électron-trou.

I-2.2 La jonction p-n :

La jonction **p-n** est un dispositif semi-conducteur constitué d'un cristal dont une partie a été dopée **N** et l'autre dopée **P**, les deux parties étant séparées par un plan dit de jonction.

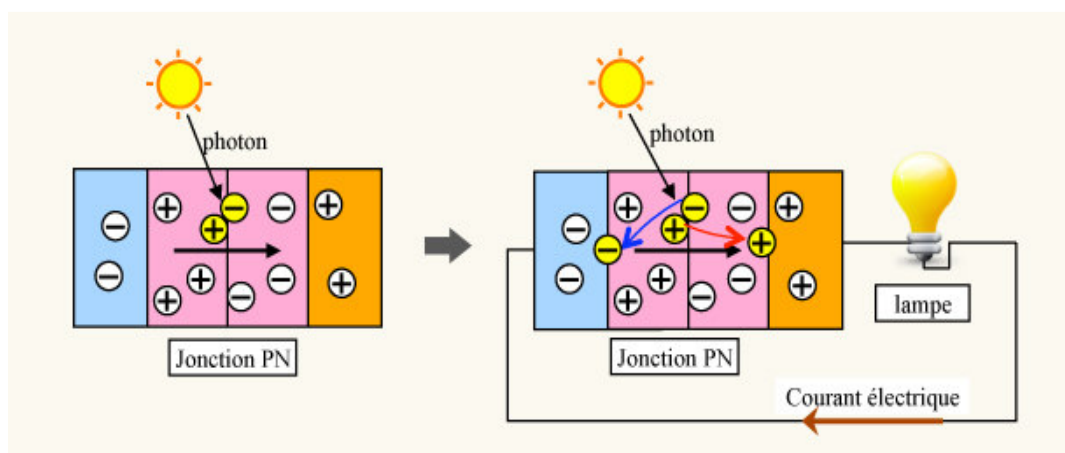
Examinons le fonctionnement d'un tel dispositif. Imaginons que l'on sépare la jonction en deux parties et qu'on relie la région **N** au pôle négatif d'un générateur et la région **P** au pôle positif (polarisation directe).

Les électrons libres de la région **N**, ainsi que les trous libres de la région **P**, vont vers la jonction, vu le sens de polarisation.

Si les deux parties sont en contact, un courant passe. Les électrons sont injectés

dans la région **P** et les trous dans la région **N**. On dit qu'il y a injection de porteurs minoritaires. Si l'on polarise la jonction en sens inverse.

Les électrons allant vers le pôle (+) et les trous vers le pôle (-), ils s'éloignent de la jonction, laissant au voisinage de celle-ci des charges dues aux impuretés ionisées. Mais ces impuretés sont des atomes rigidement liés au réseau cristallin, qui ne peuvent se déplacer. Si l'on met les deux parties en contact, on a au voisinage une région isolante, et la résistance du dispositif en polarisation inverse sera donc très élevée. La jonction **P-N** joue donc le rôle d'une diode laissant passer le courant électrique en polarisation directe et présentant une très forte résistance en polarisation inverse. Si la polarisation est directe, il y a injection de porteurs minoritaires, par exemple des électrons dans la région **P** ; ces électrons ont tendance à se recombinier avec les trous présents en grand nombre dans cette région **P** ; ils le font au bout d'un temps t appelé durée de vie des porteurs minoritaires [4].



Figure(I.4): La jonction p-n

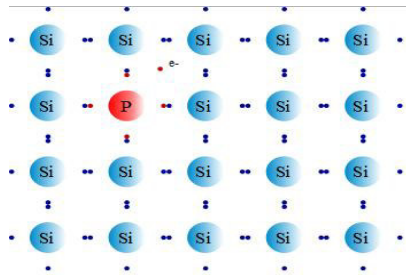
Le dopage est une méthode permettant de réaliser la jonction P-N.

Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ces propriétés électriques. Le semi-conducteur dopé est alors appelé "semi-conducteur extrinsèque".

Il existe deux types de dopage : le type N (Négatif) et le type P (Positif).

a-Dopage de type N :

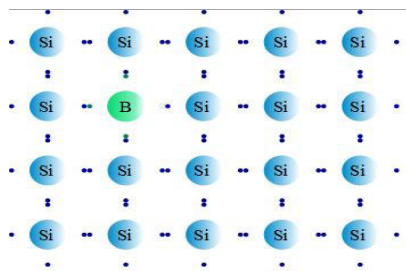
Le dopage de type N consiste à ajouter un atome de phosphore au sein de la structure cristalline du silicium. Le phosphore disposant de **5** électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un électron :



Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale négative.

b-Dopage de type P :

Le dopage de type P consiste à ajouter un atome de bore au sein de la structure cristalline du silicium. Le bore disposant de **3** électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un trou :



Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale positive

I-3 Les caractéristiques des cellules photovoltaïques:

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », découvert par E. Becquerel en 1839.

Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

Les matériaux les plus connus sont:

Le silicium (Si)

Le sulfure de cadmium (CdS)

L'arséniure de gallium (GaAs)

Le tellure de cadmium (CdTe)

Le germanium (Ge)

Le phosphore d'indium (InP)

La figure suivante représente les différentes technologies des cellules PV :

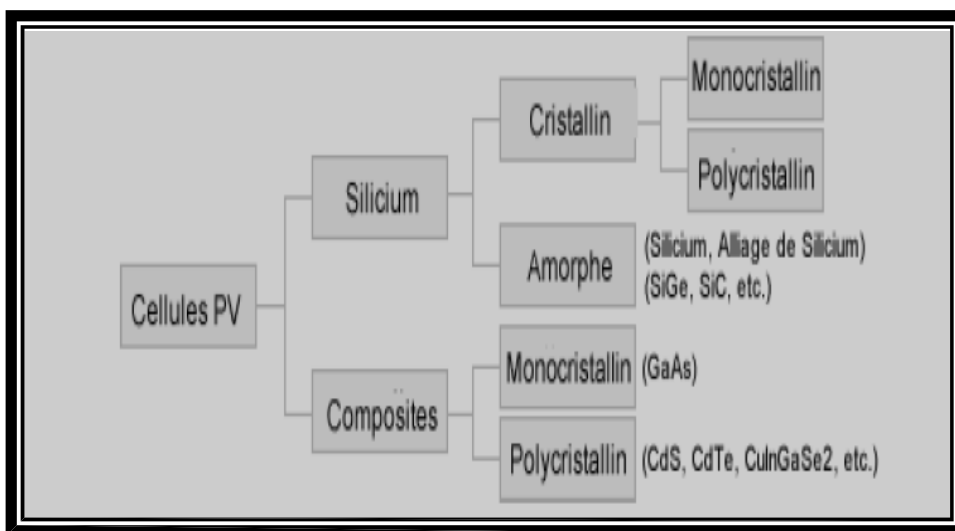


Figure. (I.7): Les différentes technologies des cellules photovoltaïques [5]

I-3.1 Principe de fonctionnement:

Il existe différentes techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, la plus connue est la conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (CdTe). Les cellules solaires de type GaAs sont très coûteuses dans leur fabrication, leur utilisation est aujourd'hui essentiellement limitée aux applications spatiales.

La cellule solaire à semi-conducteur est un dispositif permettant de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière. Son principe de fonctionnement se résume comme suit:

Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie ($E_{ph}=h.\nu$) pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires «électron- trou».

Les électrons (charges N) et les trous (charges P), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel.

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique qui circule [6].

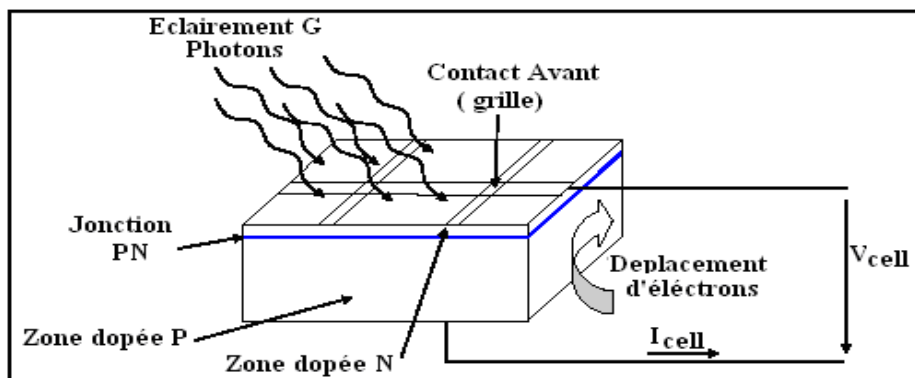


Figure.(I.8): Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire [7].

Les cellules les plus répandues actuellement sont à base de silicium (différence de potentiel de **0.6 V**).

I-3.2 Les différents types des cellules photovoltaïques:

Il existe trois types principaux des cellules :

a) Silicium monocristallin :

Matériau le plus répandu, présentant un bon rendement à fort et moyen éclairement, il est à la base des panneaux «terrestres» les plus performants après ceux à l'arséniure de gallium.

Avantage :

Rendement électrique des panneaux : 15 % STC.

Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc.

Gamme d'éclairement : 100 à 1000 W/m².

Usage : tous usages en extérieur de forte et moyenne puissance

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

Première génération de photopiles.

Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.

Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.

b) Silicium poly (ou multi-) cristallin :

Cousin germain du précédent (composés de multi cristaux), il est un peu moins performant, essentiellement aux éclairagements modérés, et également moins onéreux.

Avantage :

Rendement électrique des panneaux : 12 à 14 % STC.

Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc .

Gamme d'éclairement : 200 à 1000 W/m².

Usage identique à celui du silicium cristallin.

Inconvénients:

Rendement faible sous un faible éclairement.

c) Silicium amorphe :

Nettement moins puissant au soleil que les deux précédents, ce silicium en couche très mince répond par contre à tous les éclairagements, extérieur et intérieur. Sa technologie de fabrication est théoriquement moins onéreuse (mais la production n'a pas atteint des niveaux comparables) et permet de réaliser des petits formats, grâce à la mise en série intégrée et la simplicité de découpe.

Rendement électrique des panneaux :

5 à 7 % STC (9 % pour les «multi jonctions »).

Puissance des photopiles intérieures : 0 à 1 Wc.

Puissance des panneaux extérieurs : 0,5 à 60 Wc.

Gamme d'éclairagement : 20 lux (en intérieur) à 1000 W/m² (en extérieur).

Usage : électronique professionnelle et grand public (montres, calculettes...),
Électronique de faible consommation en extérieur.

I-3.3 Circuit électrique équivalent :

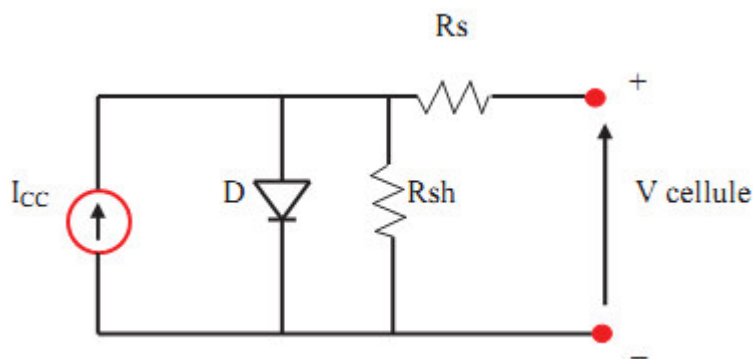


Figure. (I.9) : Schéma équivalent électrique d'une cellule PV

I-3.4. Equations de la cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque peut se modéliser à partir de l'équation définissant le comportement statique de la jonction P-N d'une diode classique, ainsi la figure (I-9) illustre le schéma équivalent électrique d'une cellule photovoltaïque réelle.

Dans cette équation on prend en compte le courant de court circuit et les différentes résistances modélisant les pertes dues à la connectique.

Ainsi en statique, le comportement d'une cellule photovoltaïque constituée d'une jonction P-N à base de SILICIUM peut être décrit par l'équation suivante :

$$I_{cell} = I_{cc} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{V_{cell} + I_{cell} \cdot R_s}{n \cdot V_t} - 1 \right) \right] - \frac{V_{cell} + I_{cell} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (I.02.a)$$

$$V_t = K \cdot T / e$$

$e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C charge de l'électron
 $K = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K° constante de Boltzmann
 $T = (T_0 + 273)$ température en K°
 n : Facture d'idéalité de 1 à 3
 $V_t = 26 \cdot 10^{-3}$ v $T_0 = 25^\circ$ c

R_s : résistance série de panneau photovoltaïque.

R_{sh} : résistance parallèle de panneau photovoltaïque.

Le photocourant I_{cc} dépend de l'éclairement et de la température de la cellule suivant la formule :

$$I_{cc} = [I_{cc_0} + K_i \cdot (T - T_r)] \cdot (S / 100) \quad (I.02.b)$$

I_{cc_0} : le courant de court circuit à l'éclairement standard et la température de référence dans les conditions nominales.

K_i est le coefficient de la température de courant de court circuit (A/K).

T_r : température de référence de la cellule photovoltaïque.

S : est l'éclairement solaire (mW/cm^2)

$$I_{mod} = I_{cc} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{V_{cell} + I_{mod} \cdot R_{se}}{n \cdot V_t} - 1 \right) \right] - \frac{V_{cell} + I_{mod} \cdot R_{se}}{R_{she}} \quad (I.02.c)$$

Tel que: $R_{se} = n \cdot R_s$ $R_{she} = n \cdot R_{sh}$

La modélisation d'un panneau composé de N_s modules en série et N_p modules en parallèle est :

$$I_{panneau} = N_p \cdot I_{cc} - N_p \cdot I_{sat} \cdot \left[\exp \left(\frac{V_{cell} + I_{mod} \cdot R_s}{n \cdot V_t \cdot N_s} - 1 \right) \right] - N_p \cdot \frac{I_{mod} \cdot R_{sp}}{R_{shp}} \quad (I.02.d)$$

Tel que: $R_{sp} = n \cdot (N_s / N_p) \cdot R_s$ $R_{shp} = n \cdot (N_p / N_s) \cdot R_{sh}$

Ses équations permettent de modéliser le panneau photovoltaïque sous matlab.

I-3.5 Paramètre des cellules photovoltaïques :

Les paramètres des cellules photovoltaïques (I_{CC} , V_{CO} , P_{max} , R , ff), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

a) Courant de court-circuit I_{CC} :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule ($V = 0$) Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température, en pratique ce courant est très proche de photo courant I_{ph} . On peut écrire : $I_{cc}(V = 0) = I_{ph}$

b) Tension à circuit ouvert V_{CO} :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul, elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

c) Puissance maximale :

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement $P_{max}(I_{max}, V_{max})$ de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I_{cc} et tension comprise entre 0 et V_{CO}) or il existe un optimum donnant la plus grande puissance P_{max} ou **MPP** (Maximum Power Point).

.d) Rendement d'une cellule 'R' :

On définit le rendement énergétique d'une cellule par le rapport entre la puissance maximum P_s et la puissance incidente.

P_s : est la puissance maximum mesurée dans les conditions STC (Standard Test Conditions), c'est-à-dire sous un spectre AM1.5, une température de 25°C, et un éclairage de 1000W/ m².

e) Le facteur de remplissage 'ff' :

Le facteur de remplissage ou facteur de forme, encore souvent appelé par sa dénomination anglaise (Fill Factor) correspond à la puissance maximum délivrée par la cellule, divisée par le produit $V_{co} \cdot I_{cc}$, correspondant à la puissance maximale idéale.

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est dans le cas général assez faible, de l'ordre de 10 à 20%. Des rendements plus importants ont été obtenus à l'aide de nouveaux matériaux (en laboratoire, l'arséniure de gallium AsGa donne des rendements supérieurs à 25%) ou de techniques expérimentales (technologies multicouches), souvent difficiles et coûteuses à mettre en œuvre. Cependant, le matériau photovoltaïque le plus utilisé est le silicium, qui représente une solution économique. Pour de telles cellules, le rendement énergétique ne dépasse pas les 15%.

D'après les caractéristiques courant-tension et puissance-tension, on peut déduire d'autres paramètres :

I-3.6 Les zones de caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque :

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe $I = f(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque.

La figure (I.13) représente trois zones essentielles :

a) La zone (1) : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

b) La zone (2) : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

c) **La zone (3):** qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

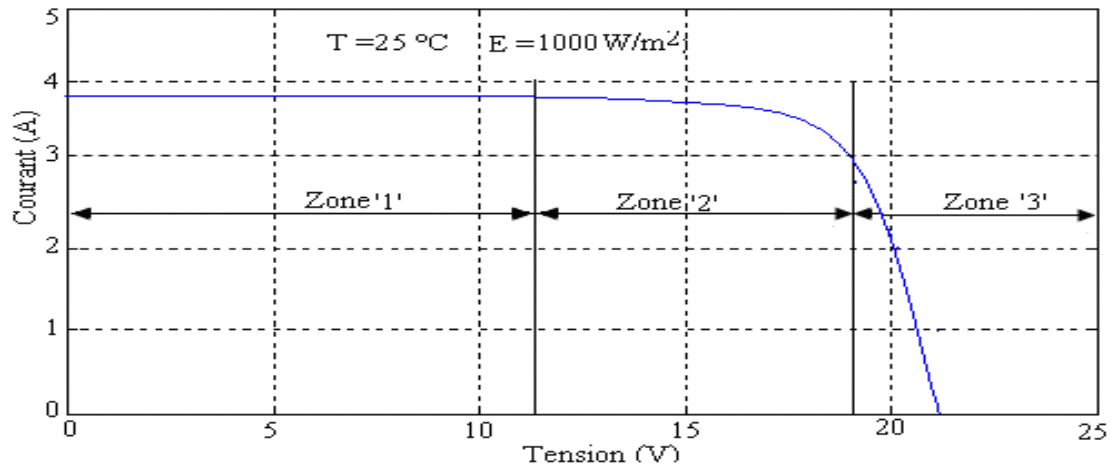


Figure. (I-13): Les différentes zones de Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque [8].

I-4 Le module photovoltaïque:

Les modules photovoltaïques sont des convertisseurs d'énergie lumineuse en électricité, à ne pas confondre avec les capteurs solaires thermiques ou capteurs plans, qui eux produisent de la chaleur à partir des rayons solaires.

Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière.

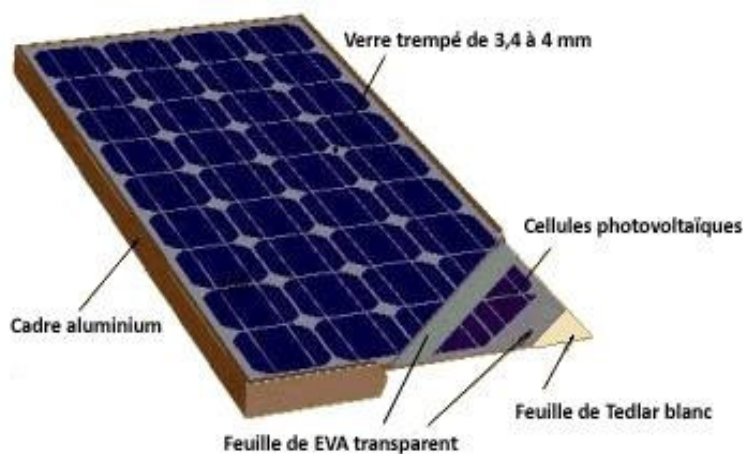


Figure. (I-14): Un module photovoltaïque [9].

Une photopile élémentaire ne génère pas suffisamment de tension entre : 0,5 et 1,5V selon les technologies, il faut presque toujours plusieurs photopiles en série pour générer une tension utilisable.

Les modules en silicium mono cristallin (64% du marché avec une efficacité de Conversion (énergie électrique produite /énergie solaire incidente) de l'ordre de 15 à 18%), polycristallin (28% du marché avec une efficacité de conversion de l'ordre de 13 à 15%) ou silicium amorphe (13% du marché avec une efficacité de conversion de l'ordre de 5 à 12 %) délivrent des tensions normalisées (12,24,48V) et des puissances comprises entre 10 et 100Wc (Watt-crête : puissance obtenue pour l'ensoleillement maximal) [10].

I-4.1 Caractéristiques d'un module :

Voici la description des paramètres d'un module:

La puissance crête P_c : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans la condition standard (25°C et un éclairement de (1000 W/m²).

La caractéristique I (V): Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

Tension à vide V_{co} : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".

Courant de court-circuit I_{cc} : Courant débité par un module en court-circuit pour éclairement " plein soleil ".

Point de fonctionnement optimum (U_m, I_m) : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = U_m \cdot I_m$

Rendement maximal : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} \cdot I_{cc}$ [11].

I-4.2 Assemblage des modules photovoltaïques :

Un module des cellules connecté en parallèle est suffisant pour augmenter le courant du générateur on associé “ N_p ” modules en parallèle comme montré dans les figures (I.15-b) et (I.15-a).

Pour obtenir une augmentation de la tension du générateur on associe “ N_s ” modules en série comme le montrent les figures précédentes.

Afin d’obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d’associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l’on appelle un générateur photovoltaïque.

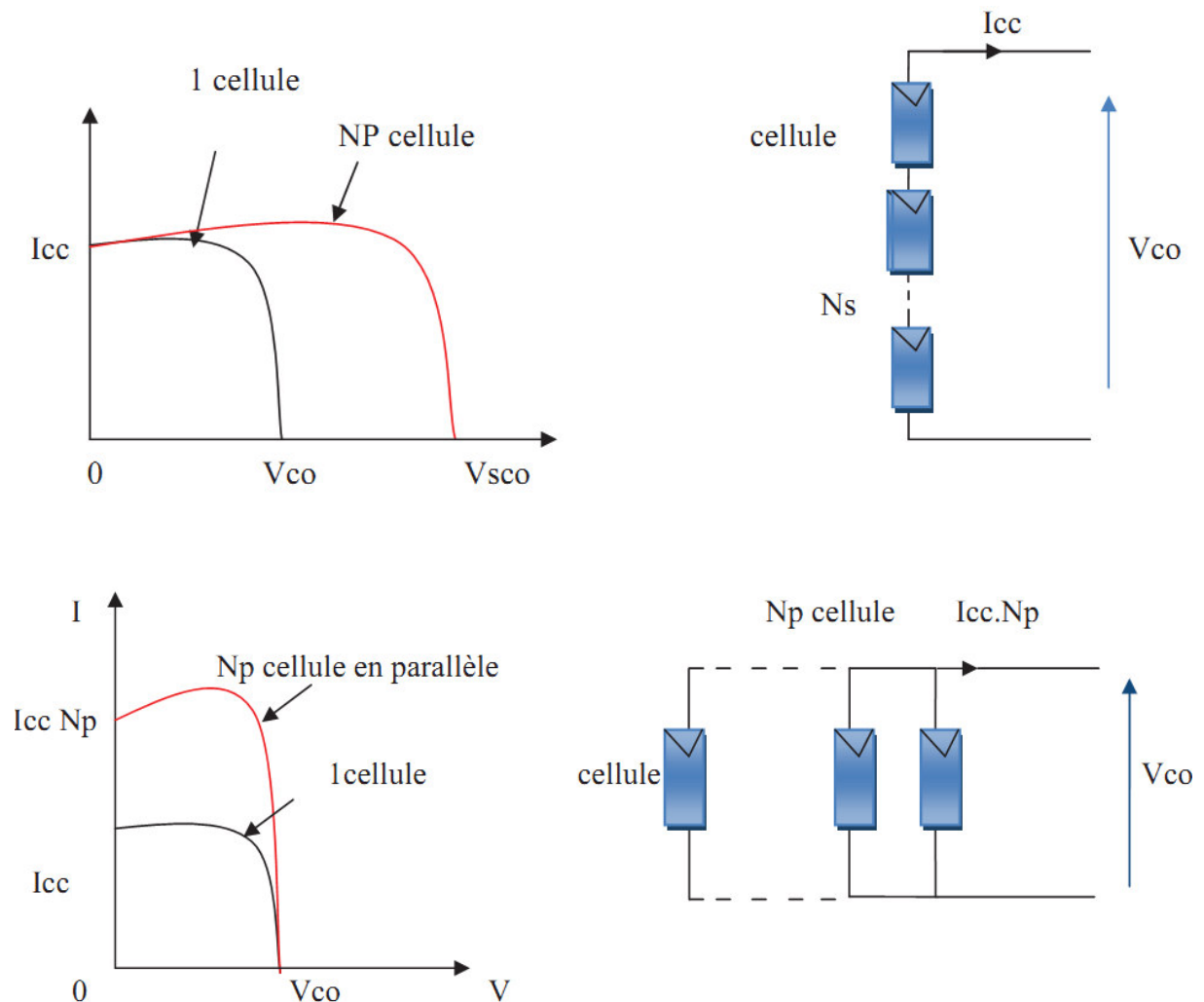


Figure. (I-15): Association des modules photovoltaïques [12]

I-4.3 Protection de cellules Photovoltaïques :

Il arrive qu'un module au silicium cristallin ne soit pas exposé uniformément à la lumière, à cause des taches d'ombre. Puisque les cellules étant câblées en série, le courant total est nivelé par le bas (la cellule la plus faible impose son courant aux autres).

Alors lorsqu'une cellule ne débite plus parce qu'elle n'est plus exposée au rayonnement, le courant de l'ensemble de la chaîne tend vers zéro.

La cellule ainsi masquée devient réceptrice de toutes les autres de la série et reçoit en tension inverse la somme de toutes leurs tensions. Elle se met donc à chauffer d'où le nom bien connu de hot-spot ou point chaud.

Il est indispensable de protéger le module contre ce phénomène en plaçant une diode by-pass en parallèle par groupe de cellules (par séries de 18 cellules, soit 2 par panneau 36 cellules)

On maintient ainsi la tension inverse appliquée à la cellule ombrée à moins de 10 V, ce qui engendre un échauffement limité en cas de hot-spot.

Ces diodes sont généralement placées dans la boîte de jonction en sortie de panneau.

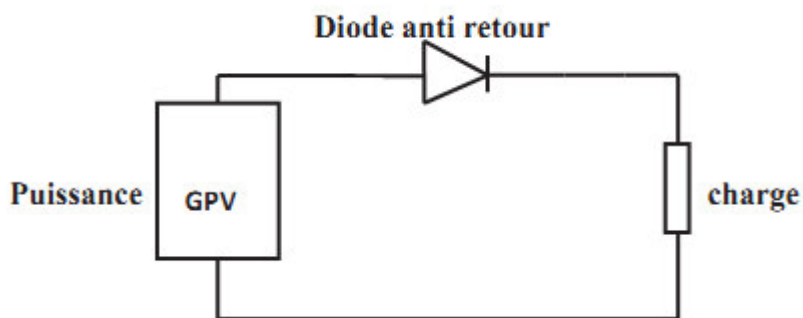


Figure (I.16) : protection de panneau photovoltaïque avec diode anti retour

I-4.4 Nombre de cellules par module :

Une cellule au silicium cristallin présente une tension de circuit ouvert de 0.58 V à 0.60 V et un point de puissance maximale situé entre 0.46 V et 0.47 V. Considérant que notre panneau doit pouvoir charger une batterie 12V jusqu'à

sa tension maximale d'environ 14V et que l'on va perdre 2 à 3V en câblage et du fait des élévations de température, il faut disposer d'un panneau fournissant au Minimum 16-17V à sa puissance maximale. Si l'on divise 16.5 par 0.46, on trouvera le nombre arrondi de 36, valeur courante comme nombre de cellules en série des panneaux usuels du marché.

Cela permet de disposer les photopiles d'un module en 4 rangées de 9. En pratique, les modèles les plus courants de 12V comportent 32 à 44 cellules, suivant la valeur exacte de la tension de chaque cellule et de la température d'utilisation.

Par exemple, dans le désert de certain pays chauds où la température ambiante monte jusqu'à 50°, on peut être amené à installer des panneaux 12V à 40 cellules. À raison de $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$, chaque cellule perd 50 mV entre 25 et 50°C, et la tension de fonctionnement d'un panneau 36 cellules chute de 1.8 V. Il faut donc théoriquement 4 cellules supplémentaires pour y remédier ($1.8/0.46=3.9$).

I-4.5 Le panneau solaire:

Le panneau solaire se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.

Le composant le plus crucial de toute installation photovoltaïque est le module, qui se compose de piles solaires interconnectées. Ces modules sont raccordés entre eux pour former des panneaux et des ensembles (champs) de manière à pouvoir satisfaire différents niveaux de besoins en énergie, comme le montre la figure. (I-17):

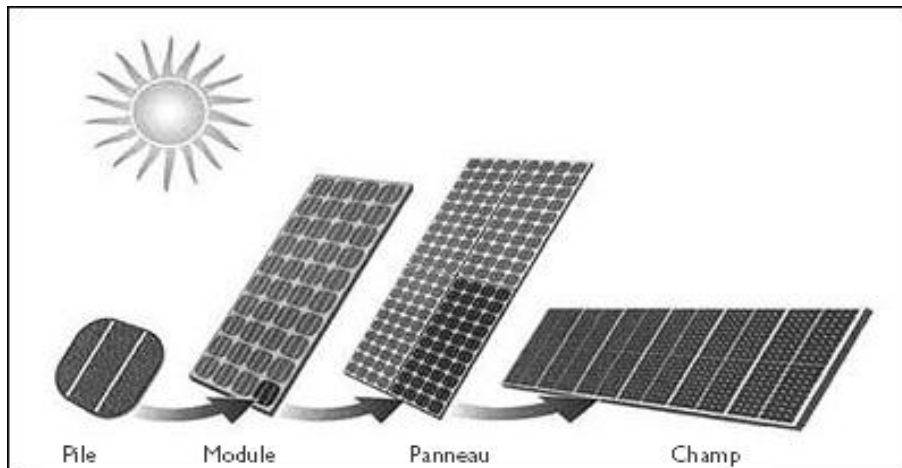


Figure. (I-17): Composants d'un champ de modules PV

I-5 Système de conversion :

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ photovoltaïque et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de Convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu-alternatif).

À l'onduleur est généralement associé un redresseur qui réalise la transformation du courant alternatif en courant continu et dont le rôle sera de charger les batteries et d'alimenter le circuit en continu de l'installation.

I-5.1 Le convertisseur continu-continu :

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du panneau PV correspondant au point de puissance maximal.

Ce système d'adaptation est appelé MPPT (maximum power point tracking).

Son rendement se situe entre 90 et 95%.

Ce système présente deux inconvénients pour un panneau photovoltaïque de faible puissance :

- Prix élevé
- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important.

I-5.2 Le convertisseur continu-alternatif :

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. La formation de l'ordre de sortie peut être assurée par l'onduleur.

C'est un dispositif statique utilisant des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges, les onduleurs peuvent être améliorés à l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en PWM qui permettent grâce à la modulation de la longueur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale, avec ce système, on obtient :

- Un rendement élevé sur une plage du taux de charge.
- De faibles pertes à vide.

I-6 Avantages et inconvénients d'une installation PV:

a) Avantages :

D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées.

Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers.

Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.

Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.

b) Inconvénients :

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 kW/m² par an) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. [11]

I -7 Etage d'adaptation DC/DC :

Les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température.

En plus de ces dépendances, le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant à son tour de l'ensoleillement et de la température ainsi que de la charge. Pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque.

Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite : «Maximum Power Point Tracking» (MPPT).

Le but de cette partie de chapitre est l'étude d'un type de convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques (l'hacheur survolteur). Ainsi, on décrit la commande MPPT des convertisseurs DC-DC.

On présente dans ce chapitre, quelques méthodes MPPT basées sur la contre réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrémental de l'inductance et méthode de perturbation et observation.

I -7.1 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) :

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs.

La technique du découpage, apparue environ dans les années soixante, a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement

des alimentations séries. Dans une alimentation à découpage.

la tension d'entrée est "hachée" à une fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué.

Il en résulte une onde carrée de tension qu'il suffit de lisser pour obtenir finalement une tension continue.

I-7.2 Le choix de convertisseur :

Parmi les structures réalisées dans ce chapitre nous avons choisi le convertisseur de type (Boost) comme structure de conversion pour la réalisation du module photovoltaïque électronique, étant donné sa souplesse sur son fonctionnement et son rendement de conversion.

Se choix a été en effet pour sa simplicité de la structure, le nombre minimum de composants nécessaires (l'utilisation de la diode du Boost pour réaliser la fonction de la diode anti retour par exemple), l'élévation de tension est aussi un facteur positif de choix, puisque les pertes sont plus faibles pour une tension plus élevée, cette structure étant élévatrice.

D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle, Figure (I.17). On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues.

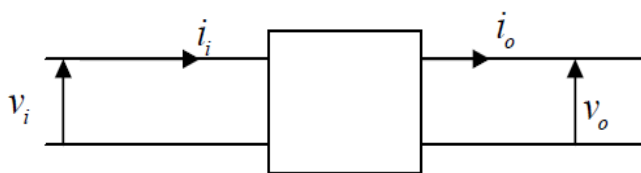


Figure (I.18) : Schéma d'un quadripôle électrique

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est réalisée par une action sur le "rapport cyclique", défini comme la fraction de la période de découpage où l'interrupteur est passant (figure I.19).

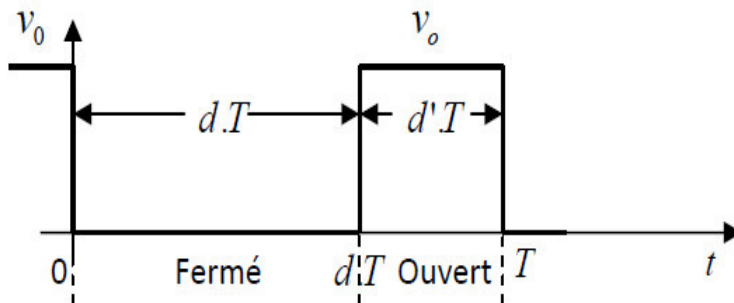
L'interrupteur est un dispositif semi-conducteur en mode tout-rien (bloqué – saturé), habituellement un transistor MOSFET. Si le dispositif semi-conducteur

est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite.

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f avec un temps de fermeture $t_{\text{off}} = Ts$ et un temps d'ouverture $t_{\text{on}} = (1-d) Ts$.

Où:

- T_s est la période de commutation qui est égale à $1/f$
- d le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0, 1]$).



Figure(I.19) : Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.

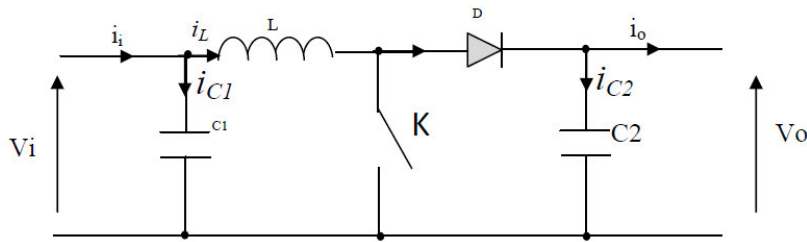
Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi les quels, on présente le principe des trois types des convertisseurs à découpage (dévolteur, survolteur et mixte), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation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

Par définition, Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur (Buck) dans le cas contraire, il est dit survolteur.

I-7.3 Convertisseur DC/DC à découpage (BOOST) :

Un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de «boost» ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (I.20).

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



Figure(I.20) : Schéma de principe d'un convertisseur Boost

Les équations de fonctionnement de hacheur survolteur :

$$V_i \cdot t_{on} + (V_i - V_o) \cdot t_{off} = 0 \quad (I.3.a)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D}$$

a-Modélisation de hacheur survolteur :

C'est un convertisseur DC/DC parallèle inséré entre le générateur photovoltaïque GPV et le reste de la chaîne de conversion

Il est caractérisé par son rapport cyclique d ($0 < d < 1$)

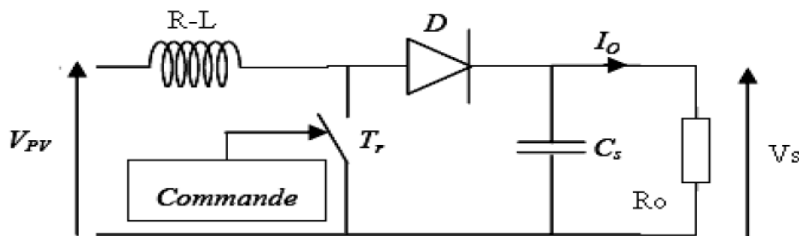


Figure (I.21) : schéma de Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type Boost)

Les grandeurs électriques de sorties (V_s et I_s) dans le convertisseur survolteur sont liées à celles d'entrées (V_{pv} et I_{pv}) en fonction du rapport cyclique D du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur.

Dans le système d'équations, on peut déduire la résistance à la sortie du panneau photovoltaïque (R_{pv}) en fonction de D et R_s .

Alors, le rapport cyclique D s'écrit en fonction des résistances R_{pv} et R_s .

Puisque le rapport D est vérifié l'inégalité $0 < D < 1$, le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge R_s remplit la condition suivante : $R_s > R_{pv}$

Dans les conditions optimales et pour une charge R_S donnée, la résistance interne du panneau ($R_{pv} = R_{opt}$) et le rapport cyclique (D_{opt}) obéissent donc à l'équation:

$$R_{opt} = R_s \cdot (1 - D_{opt})^2 \quad (I-3.b)$$

La relation montre aussi que pour une puissance incidente P , la puissance optimale (point PPM) transférée à la charge ne pourrait être maximale que pour un rapport cyclique bien défini (D_{opt}).

I-8 Commande MPPT des convertisseurs DC-DC :

Nous pouvons classifier d'une manière générale les commandes du MPPT selon le type d'implémentation électronique: analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande du MPPT.

La figure (I.21) montre le diagramme synoptique d'un système photovoltaïque, avec un module MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de sortie du module.

Dans la plupart des cas, on fait une maximisation de la puissance fournie par le module solaire.

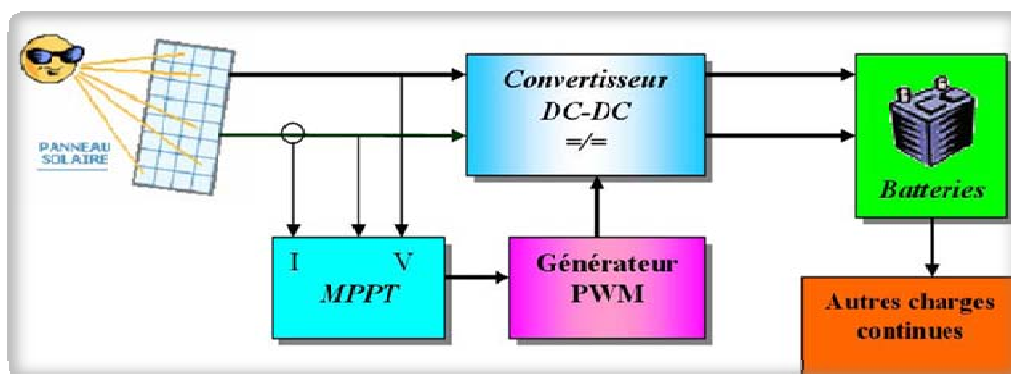


Figure (I.21): Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT

I-8.1 Qu'est-ce qu'un régulateur MPPT :

Un régulateur MPPT ou Maximum Power Point Tracking (traduction française = « recherche du point de puissance maximum ») est un convertisseur électronique DC/DC (courant continu vers courant continu) qui optimise en

permanence les paramètres électriques de fonctionnement entre les 3 systèmes suivants :

- Le système photovoltaïque (constitué de un ou plusieurs panneaux solaires)
- Le dispositif batterie (composé d'une ou plusieurs batteries)
- Les applications utilisant l'énergie (moteur, pompe, éclairage, etc.)

I-8.2 Qu'entendons-nous par optimiser :

Une cellule solaire, comme une batterie, n'est pas, par nature, « intelligente ».

La majorité des panneaux solaires sont conçus pour produire, en théorie, un courant ayant une tension nominale fixe. En réalité la plupart de ces panneaux peuvent produire un courant dont la tension variable.

Le problème réside dans le fait qu'une batterie fonctionne généralement avec une tension nominale en fonction de son état de charge. Une batterie, lorsqu'elle est en charge, a besoin d'une tension bien supérieure pour pouvoir se recharger complètement.

Ces valeurs de tension sont sensiblement différentes des valeurs nominales produites par la plupart des panneaux solaires photovoltaïques.

Pour ça on doit bien designer le régulateur pour avoir un rendement optimal.

II-8.3 La recherche du point de puissance maximum MPPT :

La recherche du point de puissance maximum (MPPT) est intégralement réalisée de façon électronique, sans aucun dispositif ou système mécanique.

Le contrôleur ou régulateur MPPT mesure et compare en permanence, la tension délivrée par le panneau avec celle du dispositif batterie.

Il calcule alors le niveau de puissance maximum que :

1. le panneau peut délivrer à la batterie
2. la batterie est capable de recevoir

A partir de cette valeur de puissance, il détermine la tension (voltage) la plus adaptée afin d'avoir le maximum d'Ampères dans la batterie.

La plupart des régulateurs MPPT modernes permettent d'obtenir des rendements situés entre 92% et 97%.

L'emploi d'un régulateur MPPT permet d'obtenir généralement de 20% à 45% de puissance supplémentaire en hiver et de 10% à 15% en été (par rapport à un régulateur classique).

Les gains réels peuvent varier largement en fonction de la météo, de la température, de l'état de charge de la batterie et d'autres facteurs.

I-8.4 Représentation Graphique du point maximum de puissance :

-La courbe verte (régulation MPPT) comporte une crête qui correspond au point maximum de puissance.

-La courbe rouge (sans régulation MPPT) comporte une crête 'classique'

Un régulateur MPPT recherche le point de puissance maximum, dont la valeur diffère de la valeur STC (Standard Test Conditions) dans presque toutes les situations. (Figure. I.22.a)

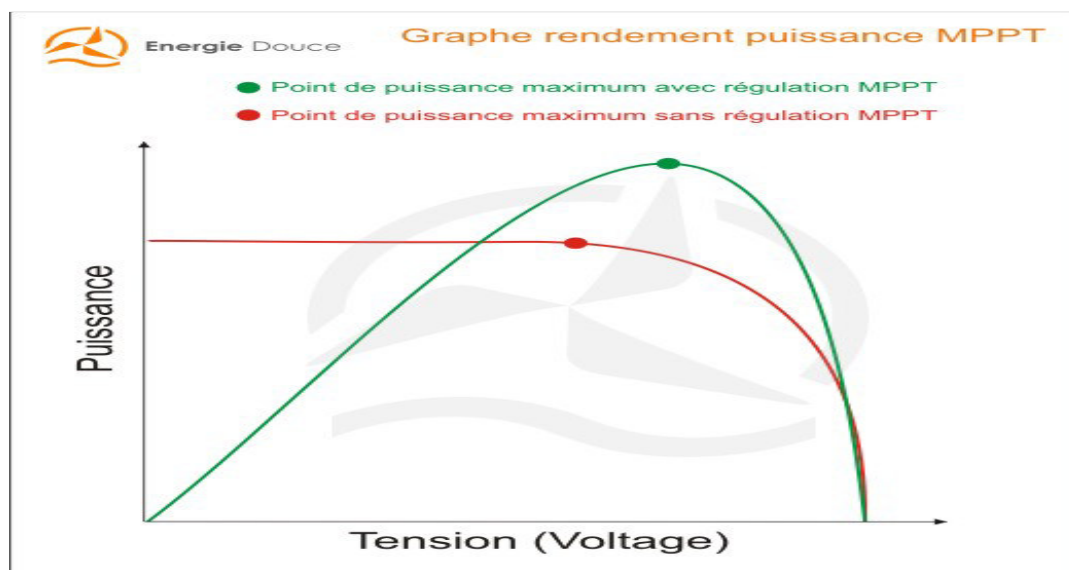


Figure (I-22.a) : Graphe rendement puissance MPPT

I-8.5 Influence de la température et de l'éclairement :

a-Influence de la température :

Les régulateurs MPPT sont plus efficaces sous certaines conditions :

Dans des conditions de températures très froides, le panneau de 120 Watts est capable de produire plus de 130 Watts car plus la température est basse plus la puissance produite est élevée. D'un autre côté, dans des conditions de températures très chaudes, plus la température augmente plus la puissance produite par le panneau diminue.

Par temps froid les panneaux solaires délivrent plus de puissance, mais sans l'emploi d'un régulateur MPPT, la quantité de puissance perdue est supérieure à celle récupérée en plus.

L'équation de Boltzmann donne : $I_{sc} = I_0 \cdot \exp(q \cdot V / K \cdot T)$, l'expérience montre que la tension de circuit ouvert d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule. Nous présentons ci-dessous les caractéristiques I-V et P-V d'un module photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement G donnée pour différentes températures ;

Nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue, et par contre la puissance maximale de générateur subit une diminution lorsque la température augmente.

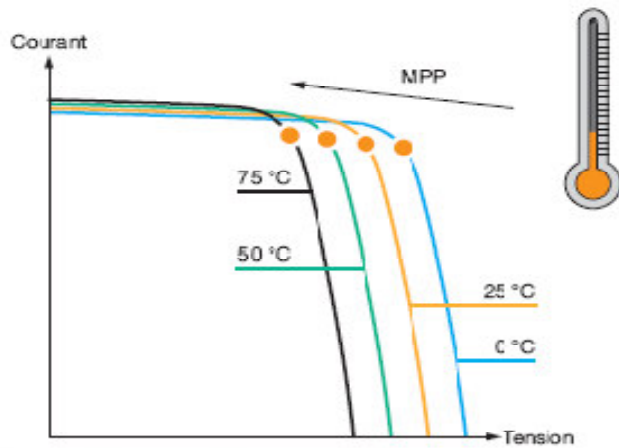


Figure (I-22.b) : Graphe influence de la température sur le point de puissance maximal

b-Influence de l'éclairement :

Après que nous avons fixé la température pour différents éclairagements on remarque que pour l'éclairement $G=1000\text{w/m}^2$ le courant I_{sc} est supérieur comparé au courant pour l'éclairement $G=800\text{w/m}^2$, on peut voir que le courant subit une variation importante quand l'éclairement augmente le courant de court circuit est augmenté mais par contre la tension varie légèrement. Ce qui se traduit par une augmentation de la puissance quand le courant est augmenté.

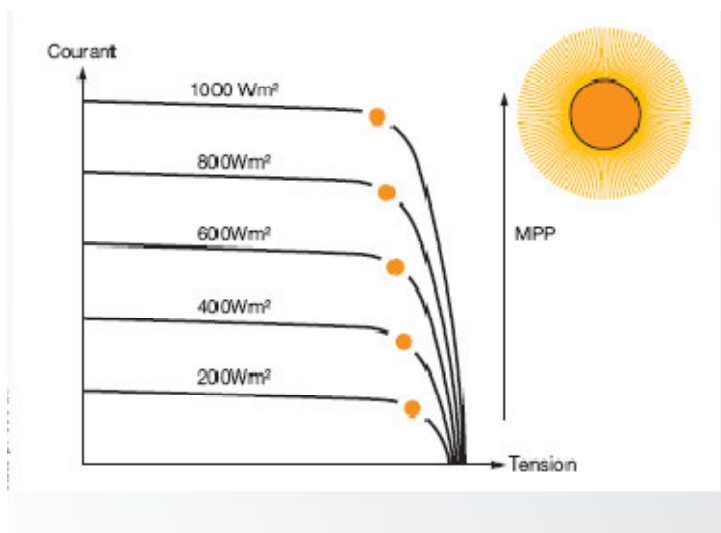


Figure (I-22.c):Graphe influence de l'éclairement sur le point de puissance maximal

I-8.6 Technologie de la recherche du point de puissance maximum :

Le système de recherche du point de puissance maximum est un convertisseur DC vers DC c'est-à-dire un appareil qui convertit le courant continu en courant continu. Cet appareil prend le courant continu dans les panneaux solaires, le transforme en courant alternatif haute fréquence, et le convertit à nouveau en un courant continu dont la tension et l'intensité sont parfaitement adaptées au dispositif batterie.

Le régulateur MPPT fonctionne avec des fréquences audio très élevées, généralement situées dans la plage des 20-80 kHz. L'avantage des circuits avec hautes fréquences est qu'ils peuvent être conçus avec des transformateurs très efficaces de petite taille.

Les systèmes de recherche du point de puissance (et tous les convertisseurs DC vers DC) fonctionnent sur le même principe : ils prennent le courant continu, le convertissent en courant alternatif et le convertissent à nouveau en courant continu à la sortie du régulateur.

Ce processus est entièrement électronique dans la plupart des convertisseurs DC/DC classiques. Ces systèmes ne nécessitent pas vraiment d'« intelligence » à l'exception de la phase de conversion lors de la régulation de sortie.

Les régulateurs de charge MPPT des panneaux solaires nécessitent, quant à eux, beaucoup plus d'« intelligence » étant donné les variations intempestives de :

- l'intensité du rayonnement solaire,
- la température extérieure
- la tension (voltage) du dispositif batterie.

I-8.7 Les systèmes de recherche de puissance “intelligents” :

La plupart des nouveaux modèles de régulateurs MPPT disponibles sont pilotés et contrôlés par un microprocesseur. Ces nouveaux régulateurs savent quand et comment ajuster le signal électrique en sortie (envoyé à la batterie). Ils sont capables d’interrompre l’alimentation pendant quelques microsecondes afin d’analyser le dispositif d’alimentation (panneaux solaires) et le dispositif batterie afin de réaliser les ajustements nécessaires (optimisation et réglage des paramètres de conversion du courant). ce type de régulateurs existe depuis 1985, la baisse des coûts des microprocesseurs les ont rendus accessibles pour les installations de tailles plus modestes (installations inférieures à 1 kW). L’apparition de nouveaux régulateurs tels que les **FM60 et FM80 de Outback Power Systems** a finalement permis de casser les barrières du rapport qualité/prix.

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du module solaire pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les modules photovoltaïques.

La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V du module et la multiplication de ces deux grandeurs

$$P_{PV} = I_{PV} * V_{PV} \dots\dots\dots (I.04)$$

I-9 Algorithme d'incrémentation de l'inductance:

Dans cet algorithme la dérivée de la puissance de sortie du panneau est calculée en fonction de la tension V et sa différence dV et du courant I et sa différence dI .

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

La puissance du panneau solaire est donnée par la formule : $P = I \cdot V$

La dérivé partielle dP/dV est donnée par :

$$dP/dV = I + V \cdot dI/dV \dots \dots \dots (I.05)$$

Implique que :

$$1/V \cdot dP/dV = I/V + dI/dV \dots \dots \dots (I.06)$$

On définit la conductance de la source :

$$G = I/V \dots \dots \dots (I.07)$$

et l'incrémentale conductance :

$$dG = dI/dV \dots \dots \dots (I.08)$$

Puisque la tension V du panneau est toujours positive, les relations ci dessus explique que le point de puissance maximale MPP est atteint si la conductance de la source G égale l'incrémentale conductance ΔG de la source avec un signe moins, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance G est supérieure à l'incrémentale conductance ΔG et vice-versa, comme suit:

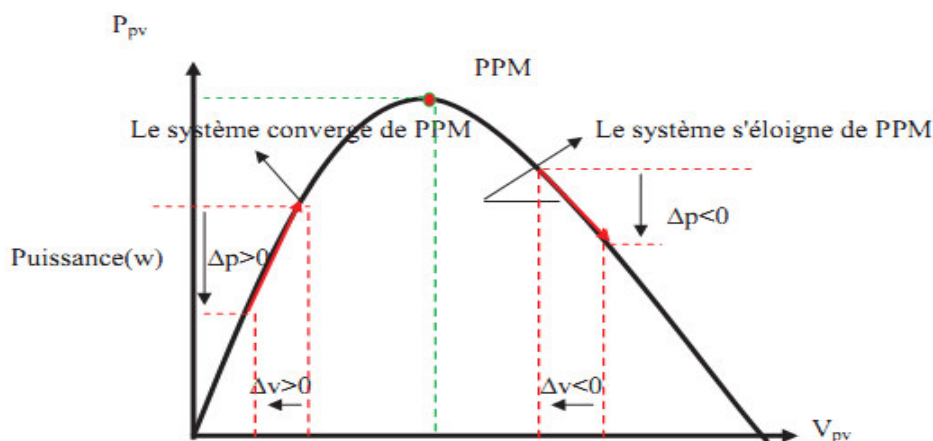


Figure (I.23): Signe de dP/dV pour différentes zones de fonctionnement

Le contrôleur peut calculer la conductance et la conductance incrémentale, important de calculs de dérivées.

I-9.1 Méthode Perturbation et Observation (P&O) :

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{PV} et I_{PV} respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température.

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

La figure (I.24) représente l'algorithme de la méthode P&O. À chaque cycle, V_{pv} et I_{pv} sont mesurés pour calculer $P_{pv}(k)$. Cette valeur de $P_{pv}(k)$ est comparée à la valeur $P_{pv}(k-1)$ calculée au cycle précédent.

Si la puissance de sortie a augmenté, V_{pv} est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminué, V_{pv} est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent. V_{pv} est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT.

Quand le point de puissance maximale est atteint, V_{pv} oscille autour de la valeur optimale V_{op} . Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas de l'incrément de la perturbation. Si ce pas d'incrément est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement.

D'autre part, si le pas est petit, les pertes, lors des conditions de changements atmosphériques stables seront inférieures mais le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'éclairement.

Le pas idéal est déterminé expérimentalement en fonction des besoins.

L'organigramme de l'algorithme MPPT à base de la méthode perturbation et observation P&O est illustré dans les annexes.

II- Le dispositif de stockage d'énergie électrique (la Batterie) :

II-1 Généralités sur les batteries :

La batterie est une unité de stockage d'énergie électrique qui fournit un courant continu sous tension électrique continue (DC).

L'effet est dû à la conversion de l'énergie potentielle chimique vers une énergie électrique par réactions entre deux éléments chimiques ayant des potentiels électrochimiques opposés en termes de tension.

Les batteries sont les sources d'énergie pour les véhicules électriques avec assistance solaire, il existe différents types de batterie pour sélectionner une batterie pour l'usage on doit considérer quelques paramètres essentiels tel que l'estimation de vie, la tension nominale, la capacité en Wh, le courant nominal, le poids.

Une augmentation de courant de charge et de décharge va diminuer l'estimation de vie et la capacité d'une batterie, aussi une augmentation de la tension d'une batterie va causer l'augmentation du courant délivré au véhicule ainsi l'évaluation de paramètre courant en A et capacité en Ah est impératif pour concevoir une batterie pour la traction d'un véhicule.

Il existe trois architectures de connexion des batteries entre elles pour augmenter la puissance électrique latente à débiter.

II-2 Regroupement des batteries :

Association des batteries en **série** la tension de l'ensemble sera égale à la tension d'une seule cellule multipliée par le nombre des cellules en série le courant reste d'une valeur constante comme montré avec les formules suivantes :

$$V_{bat} = V_{bo} \cdot n_s \quad (V)$$

$$I_{bat} = I_{bo} \quad (A)$$

$$U_{bat} = V_{bo} \cdot I_{bo} \cdot n_s \quad (W)$$

Association des batteries en **parallèle**, la tension reste constante égale à la tension d'une seule cellule bien que le courant se multiplie par le nombre des cellules qui constituent la batterie.

$$V_{\text{bat}} = V_{\text{bo}} \quad (\text{V})$$

$$I_{\text{bat}} = I_{\text{bo}} \cdot n_p \quad (\text{A})$$

$$U_{\text{bat}} = V_{\text{bo}} \cdot I_{\text{bo}} \cdot n_p \quad (\text{W})$$

Association en **série-parallèle**, la tension sera égale à la tension d'une cellule multipliée par le nombre de cellules en série, le courant sera égal au courant d'une seule cellule multiplié par le nombre des cellules connectées en parallèle.

La puissance totale sera égale au nombre total des cellules (série et parallèle) multiplié par la puissance unitaire d'une cellule électrique.

$$U_{\text{bat}} = V_{\text{bat}} \cdot I_{\text{bat}} \cdot n_t \quad (\text{en Watt}), \text{ sachant que : } n_t = (n_s \cdot n_p)$$



Figure. (II.1) : Un élément de la batterie

II-3 Caractéristiques électriques de la batterie :

Une batterie à décharge profonde est conçue pour fournir une quantité de courant stable pendant une longue période de temps, contrairement aux batteries de voitures habituelles qui sont faites pour fournir une très grande quantité de courant sur une courte période de temps.

Les batteries à décharge profonde peuvent être chargées en utilisant l'énergie solaire ou d'autres formes d'énergies renouvelables, ce type de batterie est principalement utilisé pour les systèmes qui ne sont pas reliés au réseau électrique et qui en sont éloignés.

Les batteries sont caractérisées par leur capacité en ampère-heure (Ah) et leur tension en volt (V).

Une batterie de puissance à décharge profonde est généralement conçue afin de fournir 80% de sa charge totale sans subir de dommage, par contre si la décharge dépasse le 80% les batteries peuvent éventuellement être endommagées. Si la batterie à décharge profonde est chargée au complet, elle peut avoir une durée de vie environ 100 à 6000 cycles d'utilisation.

En comparaison, la batterie d'une automobile habituelle possède une durée d'environ 30 à 50 cycles.

Les types de batteries recommandés à être utilisés pour les générateurs photovoltaïques sont sélectionnés par le facteur de la densité de puissance par unité de masse (W/Kg), et densité d'énergie par unité de masse en (kWh/Kg), rendement énergétique, décharge spontanée, durée de charge minimale, plage de température, coût spécifique et durée de vie.

Il est nécessaire de commencer par des définitions utiles pour comprendre la terminologie :

a-Cellule ou élément : la plus petite unité (un bac contenant deux électrodes et un électrolyte). On distingue les cellules primaires (non rechargeables) et les cellules secondaires (rechargeables).

b-Pile ou monobloc : association de plusieurs cellules, on appelle « accumulateur » une pile rechargeable (donc formée de cellules secondaires).

c-Batterie : ensemble fonctionnel formé de 1 ou plusieurs monoblocs interconnectés

d-Tension limite de décharge : niveau de tension minimum en dessous duquel la vitesse de dégradation de la batterie devient trop rapide.

e-Capacité : charge électrique que la batterie peut fournir avant d'atteindre sa tension limite de décharge. Ne pas confondre avec la notion de capacité d'un condensateur, la capacité d'une batterie se mesure habituellement en Ah (ampère-heure). Sachant que : $1 \text{ Ah} = 3600 \text{ coulomb}$.

La capacité peut aussi s'exprimer en Wh (watt- heure). $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$ (joule). On passe des Ah aux Wh en multipliant par la tension (nominale) de la batterie.

f-Capacité standard : capacité d'une batterie complètement chargée si on la décharge à une température et un courant constants spécifiés. La température est souvent de 20°C . Le courant est spécifié par le nombre d'heures de la décharge. Donc C_{10} est la capacité pour une décharge en 10 heures (utilisée pour les batteries ordinaires)

C_{100} est la capacité pour une décharge en 100 heures (utile dans le cas de batteries solaires). On a $C_{100} > C_{10}$.

g-État de charge ou SOC (State Of Charge) : rapport entre la capacité résiduelle à un instant donné et la capacité standard.

h-Profondeur de cycle : la batterie est utilisée en cycles courts si la décharge est limitée à quelques pour cent de la capacité standard (batterie de voiture).

Elle est utilisée en décharges profondes si la décharge est supérieure à 50% de la capacité standard (cas des batteries solaires).

i-Durée de vie d'une batterie : période après laquelle la capacité de la batterie complètement chargée tombe à 80% de sa valeur initiale.

Pour une utilisation en décharge profonde, la durée de vie est fournie en nombre de décharges. Ce nombre dépend fortement de la profondeur de la décharge, du courant de décharge et de la température.

Même si la batterie est maintenue en permanence en pleine charge, sa durée de vie est limitée.

Ainsi elle dépend de la température et de la tension à laquelle la batterie est maintenue.

j-Tension de charge maximale ou tension de gazéification : dans beaucoup de batteries, l'électrolyte est une solution aqueuse. Dans ce cas, au-dessus d'une tension limite, l'électrolyse de l'eau devient trop rapide. Il y a alors dégagement d'hydrogène et d'oxygène.

Inconvénients de l'électrolyse : arrachage de matière active par les bulles de gaz et perte d'eau (sauf pour batteries « sans entretien » qui contiennent un catalyseur pour recombinaison des gaz. Dans ce cas, la production de chaleur est parfois utilisée pour détecter la fin de charge).

Pour limiter le phénomène d'électrolyse, on définit une tension maximum. La tension de charge maximum peut être dépassée pendant un temps limité.

k-Autodécharge : diminution spontanée de la charge de la batterie. Elle dépend de la température et de la tension de la batterie (donc plus rapide quand la batterie est fortement chargée). On l'exprime en % de la capacité perdue par mois. L'autodécharge est très différente d'un type de batterie à l'autre.

l-Charge d'égalisation : Les batteries sont normalement constituées par la mise en série de plusieurs cellules. Ces cellules peuvent avoir des vitesses d'autodécharge différentes. Après quelques temps, certaines sont donc plus déchargées que d'autres. Lors de la charge, les mauvaises cellules risquent de ne pas être complètement rechargées si la charge s'arrête une fois la tension maximum de charge de l'ensemble atteinte. Ces cellules risquent ensuite de se retrouver déchargées avant les autres, voire polarisées en inverse et détruites, avant que la tension limite de décharge de l'ensemble soit atteinte.

Pour éviter cela, on termine parfois la charge des batteries par une charge d'égalisation (dépassement pendant un temps limité de la tension maximum de charge) : les bonnes cellules sont le siège d'une électrolyse mais cela permet aux cellules moins bonnes d'être complètement rechargées.

m-Rendement en charge : rapport entre la charge électrique (en Ah par exemple) qu'il faut fournir à la batterie pour la charge et la capacité à charge complète.

n-Rendement énergétique : rapport entre l'énergie fournie à la batterie (en Wh par exemple) pour la charge complète et l'énergie que l'on peut en extraire pendant la décharge. Le rendement énergétique est inférieur au rendement en charge car la tension de la batterie est plus faible durant la décharge que pendant la charge.

II-3.1 Interface des batteries :

Il s'agit d'éviter les décharges ou les surcharges excessives on doit utiliser des Capteurs :

1. **de tension** (effectifs pour les batteries au plomb)
2. **de température** (car la tension dépend aussi de la température)
3. **de courant** (car la tension dépend aussi du courant)
4. **de l'intégrale du courant** (à court terme pour limiter la durée de la charge d'égalisation, ou à plus long terme pour obtenir une information sur l'état de charge)

Ces informations peuvent être combinées dans un système sophistiqué impliquant un modèle de la batterie, afin d'obtenir une meilleure estimation de l'état de charge.

II-3.2 Modélisation de la batterie :

Un modèle peut être utile

- Pour estimer l'état de charge de la batterie.
- Pour estimer son état de vieillissement, donc l'opportunité d'un remplacement.
- Pour simuler le comportement d'une installation, et donc d'évaluer de façon réaliste l'effet d'une modification.

Comme toujours, le choix d'un modèle dépend de l'usage que l'on veut en faire et des données disponibles.

Difficulté particulière : les essais n'ont de sens que sur une durée longue ; mais l'état de la batterie change durant l'essai et même son état de vieillissement.

Les essais standard se font à courant de charge et de décharge constants, donc sont peu représentatifs des conditions réelles.

Si on considère uniquement la réaction principale, on peut se contenter d'une variable d'état (l'état de charge). Il faut plus de variables d'état si on veut tenir compte du fait que l'autodécharge n'est pas la même pour les deux électrodes, ou encore pour tenir compte du vieillissement de la batterie.

Problème de vocabulaire : nous parlerons d'électrode positive et d'électrode négative. Les mots « anode » et « cathode » seraient ambigus. En effet, l'anode est l'électrode par laquelle le courant entre dans le dispositif et la cathode celle par où il sort. Lors de la charge de la batterie, l'électrode positive est l'anode et l'électrode négative la cathode. Lors de la décharge, c'est l'inverse.

II-3.3 Expression de la tension en présence d'un courant :

En présence d'un courant, la tension de la batterie n'est plus égale à sa tension à vide, on a identifié trois phénomènes différents qui participent à cette différence :

1-Irréversibilité des réactions chimiques (activation) :

La tension à vide calculée ci-dessus est la tension qui correspond à une situation d'équilibre chimique, c'est-à-dire à une situation où les concentrations de réactifs et de produits sont constantes. Or, pour qu'un courant circule, il faut que la réaction chimique se poursuive. Lorsque c'est le cas, la tension des électrodes n'est pas égale à leur tension d'équilibre E_0 .

L'application d'une tension E à une électrode conduit à l'apparition d'une densité de courant.

2-Chutes de tension ohmique :

L'étude ci-dessus ne tient compte que de la chute de tension qui se produit au contact entre la matière active et l'électrolyte. Pour obtenir la valeur de la tension aux bornes de la batterie, il faut encore tenir compte des chutes ohmiques qui se produisent dans la batterie.

Ces chutes ohmiques se produisent principalement dans l'électrolyte. Elles dépendent de la concentration et de la température de celui-ci, car la conductivité d'un électrolyte augmente avec sa concentration et avec sa température. Dans les pays chauds, on peut donc utiliser un électrolyte moins concentré, la concentration de l'électrolyte diminue lors de la décharge, de sorte que la résistance de l'électrolyte augmente, ainsi que la chute de tension qu'il occasionne.

La résistance de l'électrolyte ne se limite pas à la partie de l'électrolyte contenue entre les plaques. Lorsque la batterie se décharge, il faut aussi considérer l'électrolyte contenu dans les pores de la partie de la matière des plaques qui a déjà réagi, car les ions doivent traverser cette structure pour atteindre la matière active restante. L'épaisseur de cette structure augmente lors de la décharge, ce qui est une nouvelle raison d'augmentation de la résistance interne, et donc des chutes de tension ohmiques.

Aussi la résistance des plaques elle-même, puisque le courant doit aussi traverser la matière active pour atteindre le support métallique de la plaque. Il est donc important que la matière active soit bonne conductrice de l'électricité.

3-Chutes de tension due à l'inhomogénéité de l'électrolyte :

Il existe une troisième raison qui crée un écart entre la tension à vide et la tension réelle : lors du passage d'un fort courant, que ce soit lors de la charge ou de la décharge de la batterie, les déplacements d'ions font que la concentration de l'électrolyte n'est plus homogène. Il apparaît alors un écart de tension supplémentaire dont la polarité est toujours telle qu'elle s'oppose au passage du courant. [13]

Caractéristiques de la batterie idéale :

- Haute énergie spécifique [kWh/kg] (c'est-à-dire, une batterie légère avec une grande quantité d'énergie stockée)
- Haute densité énergétique [kWh/m³] (c'est-à-dire, un faible encombrement faible par rapport à une grande quantité d'énergie stockée)
- Grande puissance spécifique [W/Kg] (c'est-à-dire, une grande puissance en sortie par rapport à sa masse)
- Un cycle de vie long (elle peut être déchargée et rechargée plusieurs fois sans perte significative de performance)
- Recharge rapide
- Cycle prolongé (pouvant être régulièrement rechargée alors qu'elle est presque vide sans risque de perte fonctionnelle)
- Fonctionne dans une plage de température très large
- Sure
- Recyclable
- Bon Marché

II-4 Les différents types de batteries :

a-Les batteries acide-plomb :

Généralement de 6 volt a électrolyte liquide se sont les plus économiques des batteries au plomb, les moins couteuses en (Ah) on retrouve qui ont de cycles de vie allant de 250 a 3000 mais généralement le meilleur rapport Ah se situe au alentour de 400cycles a 50%.

Paramètres de la batterie acide-plomb :

Densité d'énergie est de	25a 35 Wh/Kg
Puissance spécifique	>100 W/Kg jusqu'a (250W/Kg)
Cout spécifique	80 a 150€ par kWh
Autonomie	50 Km
Décharge spontanée	2% par jour
Rendement	80 %
Resistance interne	$R_{in} = 0.022$ ('Ohm')
Tension de la cellule	2V avec $R_{ino} = 0.022 \text{ Ohm}$
Resistance totale	$R_{in} = n_s * (0.02 / C10)$
n_s :	nombre des cellules en série de la batterie.
Temps de charge minimal	3h (possible 1h a 90%)
Garantie de vie	800 cycles a 80%

b- Les batteries nickel-cadmium (Ni-Cd) :

Densité d'énergie	30 a 50 Wh/Kg
Densité de puissance	125 W/Kg
$V_{cel} =$	1.2V pour une cellule de la batterie.
$T =$	-40 a - 80°C
Temps de charge minimal	1h environ
$R_{ino} =$	0.06 Ohm
$R_{in}(\text{totale}) =$	$n_s * (0.06 / C3)$
Décharge spontanée	0.5% par jour
Durée de vie	1200 Cycles pour SOC=80%
Cout spécifique	600 a 800 € /kWh
Autonomie	80Km

c- Les batteries nickel métal hydrures Ni-MH :

Puissance spécifique :	130 W/kg
Energie spécifique :	70-80 Wh/kg
Durée de vie	500 à 800 cycles
Cout spécifique	600 a 1000€ kWh
Autonomie	80 a 100Km

d- Les Batteries au Lithium

Le lithium est un métal très réactif. Il permet de réaliser des batteries avec une tension élevée par élément (3,2 ... 3,7 V).

On obtient donc une capacité par unité de volume élevée. Comme le lithium est très léger (masse atomique 7 contre 207 pour le plomb), l'avantage est encore plus grand en terme de capacité par unité de masse.

Ces batteries peuvent aussi avoir un faible taux d'autodécharge.

Le principal inconvénient de ces batteries est leur prix, mais ce n'est pas le seul.

En particulier :

- La tension élevée des cellules rend impossible l'usage d'un électrolyte aqueux.
- Ces batteries sont fragiles : la décharge et surtout la charge doivent être bien contrôlées sous peine de destruction et même d'explosion.

Il existe deux types de batteries

- Batteries à lithium métallique (particulièrement dangereuses)
- Batteries lithium-ion et leurs variantes (lithium-polymère, lithium-phosphate...), plus sûres mais de capacité un peu plus faible.

Dans les batteries lithium-ion, les ions lithium sont « dissous » dans les électrodes, ce qui explique la grande variété de réalisations possibles.

La tension dépend de la concentration des électrodes en ions lithium, elle varie donc fortement en fonction de l'état de charge.

Densité de puissance très grande	110 à 160 W/Kg
Prix	600 à 1200€ kWh
Autonomie	150 à 200 Km
Densité d'énergie	160 à 200 Wh/Kg

Dans l'état actuel, un pack de 250 kg de batterie Li-ion offre jusqu'à 160 km d'autonomie sur le cycle normalisé.

La courbe de tension d'une batterie Lithium est plate durant toute la décharge. Ce qui signifie qu'une batterie chargée à 20% fournira quasiment la même tension qu'une batterie chargée à 80%. Cela évite les problèmes de chute de tension propres aux batteries Plomb et permet de délivrer une énergie constante à l'application qu'elle alimente.

La charge des batteries Lithium a un rendement proche de 100% alors que le plomb avoisine 80%. Ceci est particulièrement important pour les applications solaires où l'on cherche à capter et stocker le maximum d'énergie des panneaux solaires. 20% d'énergie captée est perdue lorsqu'elle est stockée dans une batterie au plomb.

La figure **II-2.a** représente la courbe de décharge d'une batterie en Lithium –ion par variation de la capacité en Ah.

La figure **II-2.b** représente influence de la variation de température sur la courbe de décharge d'une batterie en Lithium –ion.

La figure **II-2.c** représente le cycle charge-décharge d'une batterie en Lithium –ion Par variation de l'état de charge SOC.

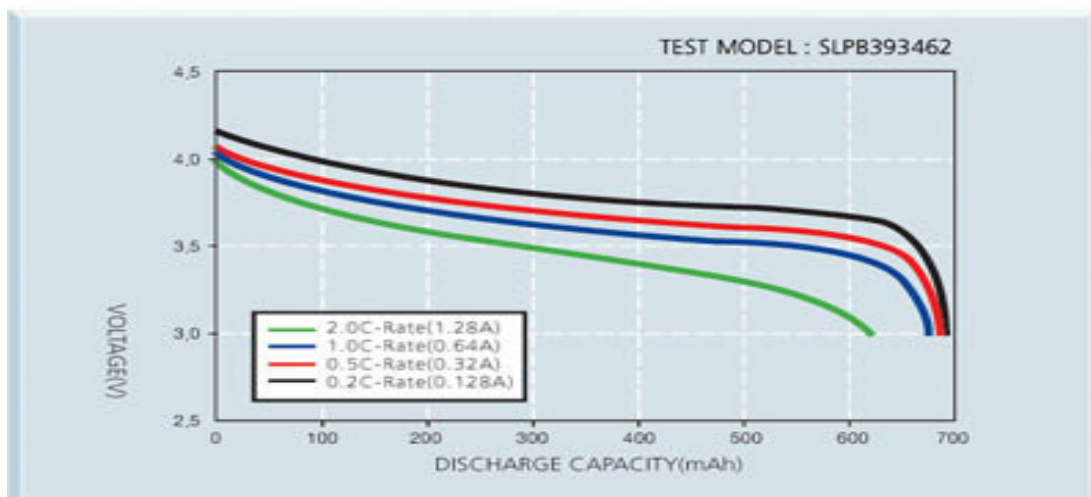


Figure. (II-2.a) : Graphe de décharge pour une cellule batterie Li ion

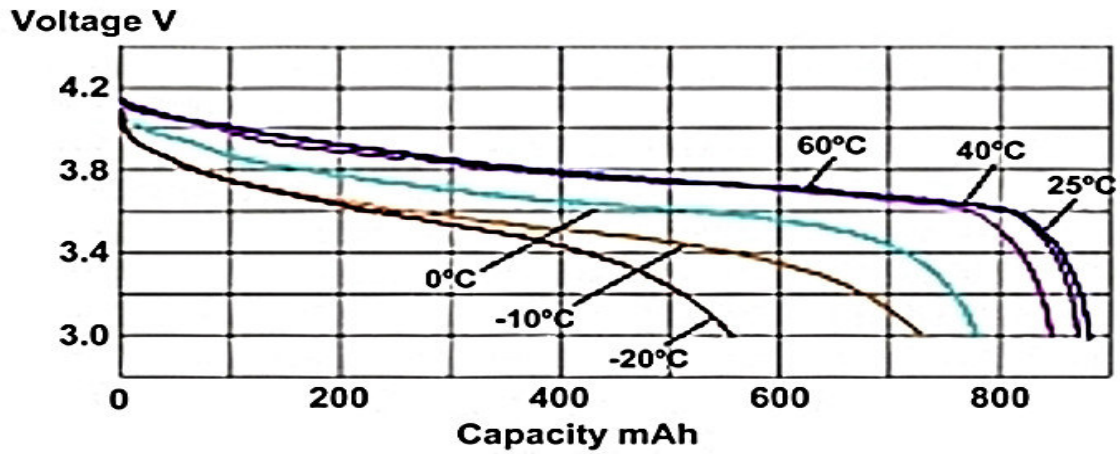


Figure. (II-2.b) : Influence de la température en état de décharge

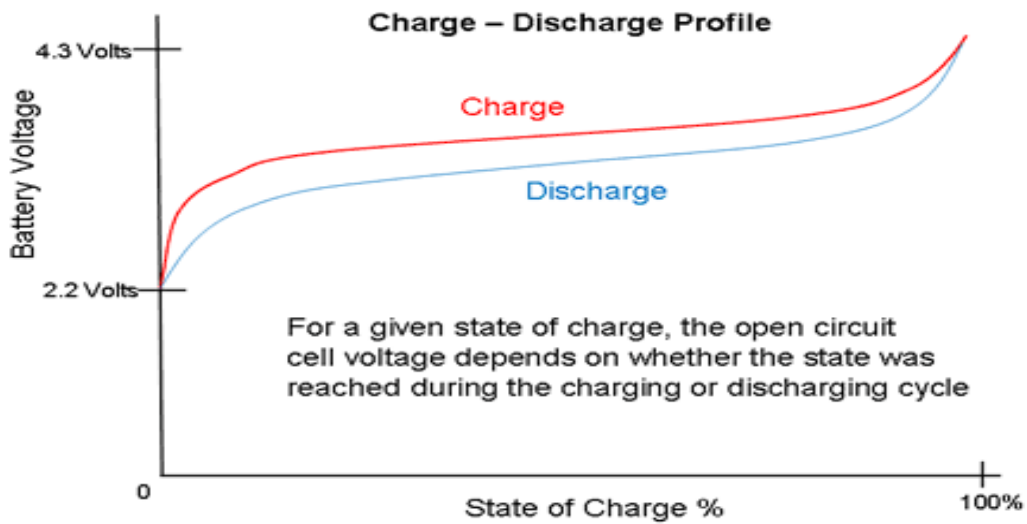


Figure. (II-2.c) : Graphe de l'état de charge pour une cellule batterie Li ion

II.5 Régulation électronique des batteries :

Les batteries d'un véhicule sont soumises à des décharges profondes. Pour recharger une batterie soumise à de telles contraintes, un certain nombre de paramètres doivent être respectés pour les préserver :

1-Prise en compte de la température (particulièrement lorsque l'intensité de recharge est élevée, ce qui permet de réduire le temps de charge)

2-le cycle de charge en 3 étapes (boost, égalisation, floating)

II.5.1 Différents types de régulateurs :

- Régulateur à tension constante.
- Régulateur électronique programmable par timer.
- Régulateur numérique asservi.

1. a Régulateur à tension constante à commande électronique :

C'est l'évolution du régulateur à commande tout ou rien, la tension de la batterie est comparée à une tension de référence et intégrée puis filtrée pour ajuster le courant d'excitation de l'alternateur.

Les avantages par rapport au régulateur électromécanique sont:

1. Stabilité dans le temps de la tension de référence.
2. Intensité de charge progressive dans une plage de quelques dixièmes de volt.

1. b Régulateur électronique programmable par timer :

Ils ont pour particularité de fonctionner en trois cycles (boost, égalisation, floating) et de prendre en compte la technologie des batteries à recharger.

Principe: un réglage manuel permet de définir la durée du cycle d'absorption en fonction de la capacité du parc batterie. Ces données sont ensuite interprétées par un calculateur qui délivre une tension de référence propre à chacune des trois phases. Ces régulateurs agissent ensuite directement sur le courant d'excitation de l'alternateur afin qu'il respecte un cycle de charge IUoU comme un chargeur de batterie évolué.

L'avantage majeur est de respecter les courbes de charge, néanmoins les cycles

de charge ne sont pas optimaux car ce système ne permet pas de prendre en compte le niveau de décharge des batteries (le cycle d'absorption a toujours la même durée). Le modèle **DAR12** fonctionne suivant ce principe.

1. c Régulateur numérique asservi :

Ces régulateurs sont toujours externes et sont utilisés en complément des régulateurs internes dans le but d'optimiser les cycles de charge

Principe: la technologie de la batterie est programmée manuellement. L'état de charge de la batterie est scruté régulièrement dans le but d'ajuster le courant d'excitation pour appliquer le cycle optimal (boost, égalisation, floating).

Ce type de régulateur permet d'obtenir un cycle de charge équivalent à celui des chargeurs les plus évolués. Le modèle **pro digital** fonctionne suivant ce principe.

II.5.2 Régulation et Cycle de charge d'une batterie :

La manière d'optimiser la charge d'une batterie est indépendante de la source de courant et dépend uniquement du dispositif de régulation qui lui est associé et du type de batterie. La régulation de tension basique avec les limitations que cela induit sera tout d'abord abordée. L'accent sera ensuite mis sur les cycles de charge en trois phases et sur les particularités à prendre en compte en fonction du type de batterie, l'influence de la température sera également abordée. D'autre part, le respect de ces cycles de charge nécessite la connaissance de l'état de la batterie : "son pourcentage de charge" ou SOC %.

Avoir une visibilité sur ce paramètre n'est pas simple et les méthodes mises en œuvre dépendent systématiquement des constructeurs. Les principales méthodes de gestion de ce cycle de charge seront parcourues.

Enfin, les particularités des régulateurs en fonction des caractéristiques de la source de charge seront abordées.

2.a Régulation sur une valeur de tension :

On trouve ce type de régulation sur les alternateurs automobiles et certains régulateurs de panneau solaire ou d'éolienne. Souvent la valeur de tension qui détermine si la batterie doit être chargée par la source de courant est fixée. L'algorithme de charge peut être résumé ainsi :

- Si la tension de la batterie est inférieure à la valeur de tension fixée, alors la batterie est chargée par la source de courant.
- Si la tension de la batterie est supérieure à la valeur de la tension alors la batterie est isolée de la source de courant.

Cependant cette méthode adaptée pour les batteries de démarrage, présente les inconvénients suivants pour les batteries de servitude:

- La batterie n'est pas chargée au delà de 80% et la durée de charge est longue (la tension de charge étant trop basse).
- Il n'y a pas de phase d'absorption ni d'égalisation qui permettent d'homogénéiser l'électrolyte de la batterie à la fois par élément (batterie liquide) et entre les éléments.
- Le risque de sulfatation est plus important.

Si la tension est augmentée (certains alternateurs ont une valeur de tension réglable) à une valeur de tension plus élevée (par exemple à la tension d'absorption), ceci permettra de recharger la batterie à 100% de sa capacité mais conduira aussi à terme au séchage de la batterie (perte de l'eau de l'électrolyte).

Ce type de régulation n'est donc pas adapté aux batteries de servitude et c'est pour cette raison que la recommandation est de respecter un cycle de charge en trois phases décrit ci-dessous.

2. b Cycle de charge en trois phases :

Quel que soit le type de batterie, la recommandation des constructeurs est de respecter un cycle de charge en trois phases. Ce qui diffère en fonction de la

technologie utilisée, ce sont les valeurs de tension qui déterminent le passage d'une phase à l'autre et les temps de ces différents cycles.

2.c Régulateurs solaires :

Le plus connu est **Steca** qui 'est le leader mondial en régulation d'installation autonome. Ils ont développé un algorithme propriétaire efficace pour charger complètement les batteries de servitude. Des modèles tels que le Tarom peuvent piloter la régulation d'une éolienne et jouent le rôle de moniteur de charge.

La batterie est un des éléments les plus difficiles à modéliser correctement, Il est cependant nécessaire de disposer d'un modèle de la batterie pour prévoir de façon précise l'état de charge de la batterie, pour rendre compte correctement par simulation du comportement d'une installation photovoltaïque équipée de batteries.

II-6 Model électrique équivalent d'un élément de la batterie:

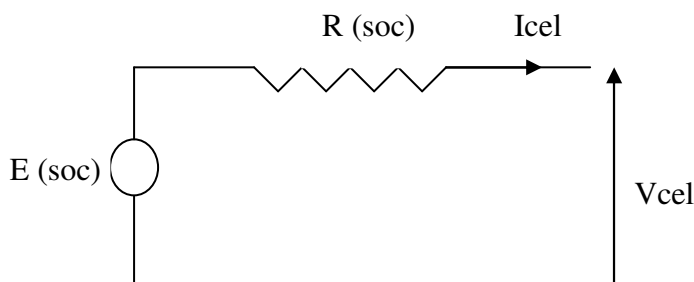


Figure (II.3) : Modèle électrique équivalent d'une cellule

On a choisi comme modèle équivalent d'une cellule une force électromotrice interne E en série avec une résistance interne R, sachant que E et R étant tous les deux fonction de l'état de charge (soc). La batterie est une association en série et en parallèle de cellules.

On a les équations suivantes :

$$V_{bat} = N_s * V_{cel} = N_s * (E - R * I_{cel})$$

$$I_{cel} = \frac{I_{bat}}{N_p} \Rightarrow V_{bat} = N_s * (E - R * \frac{I_{bat}}{N_p}) \quad (1)$$

V_{bat} est la tension aux bornes de la batterie ;

I_{bat} est le courant délivré par la batterie ;

V_{cel} est la tension aux bornes d'une cellule ;

I_{cel} est le courant délivré par une cellule ;

N_s est le nombre de cellules en série qui constitue une branche.

N_p est le nombre de branches en parallèle.

La puissance délivrée par la batterie : $P = V_{bat} * I_{bat}$ (2)

A partir des équations (1) et (2), on en déduit l'équation suivante :

$$(RN_s N_p) * I_{cel}^2 - (N_s N_p E) * I_{cel} + P = 0.$$

Pour résoudre cette équation, il faut au préalable déterminer ses coefficients

SOC: paramètre nommé 'state of charge'

DOD: paramètre nommé 'depth of discharge'

La relation qui relie les deux paramètres est : $DOD = (1 - SOC)$

Ses deux paramètres si dessus dépendent fortement de l'intégral de courant délivré à la batterie.

La tension interne de la source ainsi que les deux résistances internes dépendent parfaitement de SOC de la batterie.

Le model de la batterie dans son état stationnaire, les courants de charge sont négatifs par convention, et les courants de décharge sont positifs.

La tension aux bornes d'une batterie est :

$$V_{bat} = V_{b_{int}} - (R_{b_{dis}} \cdot I_{bat})$$

$$V_{bat} = V_{b_{int}} - (R_{b_{cha}} \cdot I_{bat})$$

$$DoD = DoD_{(t=0)} + \int (I_{beq}/Q)$$

$$I_{bat} > 0 \quad (\text{pendant la décharge})$$

$$I_{bat} < 0 \quad (\text{pendant la charge})$$

I_{beq} : courant équivalent de la cellule de la batterie qui est dépendant de signe et amplitude de courant de batterie I_{bat} .

Q : capacité de la batterie

II-7 Méthode de système de charge pour une batterie au Lithium-ion :

La méthode fréquente utilise pour ce type de batterie et la charge par courant constant et tension constante (CC/CV) , les batteries Lithium-Ion sont vulnérables à être endommagées c'est la limite de tension supérieure de charge est dépassée (sur tension), il est aussi impératif de spécifier une valeur constante du courant de charge que la batterie peut tolérer sans risque de dommage, des précautions spéciales nécessaires sont à prendre pour limiter la valeur de courant maximal de charge et s'assurer que la batterie est complètement chargée continuellement pour éviter le phénomène de surcharge .

Ainsi il est recommandé que la méthode de charge consiste à basculer la charge à une tension constante avant que la tension de la cellule atteigne la tension limite maximale.

Puisque c'est pas possible de charger une batterie en Lithium-ion sous le courant de charge C spécifiée par les constructeurs pour toute la durée de la charge alors c'est pas possible d'estimer le temps de la charge exact simplement par diviser la capacité emmagasinée en Ah par le courant C spécifique de charge de la batterie , puisque le pourcentage du courant varie d'une façon non linéaire pendant le processus de charge bien que cette équation donne une estimation approximative de temps de charge d'une batterie vide quand la méthode (cc /cv) à courant et tension constantes est appliquée :

Ainsi le temps de charge(h) = $1.3 * (\text{capacité de la batterie en Ah}) / (\text{le courant de charge constant en A})$.

Quelle que soit la techno Li-ion ou Li-po le principe de charge est le même. La charge se fait à tension constante et courant limité.

La particularité de la charge des accus au Lithium tient à deux choses primordiales, Ils ne supportent pas la surcharge aussi faible soit elle, et Il faut respecter le niveau de la tension de charge sinon ça ne charge pas. Ceci fait que la fourchette entre la tension minimale de charge et la limite à ne pas dépasser sous peine de surcharge est très faible. Il faut donc que la tension

de charge soit régulée très précisément.

Les deux technologies Li-ion et Li-po ont deux niveaux de tensions nominales différentes 3,6V et 3,7V qui impliquent des tensions de charges correspondantes proches mais parfaitement différentes aussi:

- Tension nominale 3,6V : Tension de charge 4,1 Volts par élément.
- Tension nominale 3,7V : Tension de charge 4,2 Volts par élément.

La tolérance aujourd'hui admise est de +/- 0,05V par élément.

Le courant de charge doit être limité entre C/2 et 1C.

Dans ces conditions respectées, la charge dure entre 2 et 3 heures.

Equation de Charge de la batterie (Li-ion):

Lithium métallique dans du graphite LiC₆

Réaction d'oxydation : $\text{LiC}_2 \rightarrow \text{Li}^+ + \text{e}^- + 6\text{C}$

Cathode : oxyde permettant l'intercalation des ions Li⁺

Réaction de réduction : $\text{CoO}_2 + \text{Li}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{LiCoO}_2$

I début de charge = 0.1C

I de charge rapide = 0.5 a 1C

I fin de charge = 0.02C

Caractéristiques des batteries Li-ion : (Anode est de Graphite C₆)

Batterie à cathode LiCo₂ F.e.m = 4 V, C=160Ah/Kg

Batterie à cathode LiM₂O₄ F.e.m = 3.7V, C=130Ah/Kg

Batterie à cathode LiFePO₄ F.e.m = 3.3V, C=140Ah/Kg

II-8 La charge et la capacité d'une batterie :

La durée nécessaire pour la recharge de la batterie est directement liée à la puissance injectée dans le véhicule.

Cependant plus on veut charger vite, plus la consommation électrique augmente et plus la batterie chauffe.

La solution imaginée à ce problème est l'utilisation de batteries interchangeables, préalablement rechargée, un changement de batterie est aussi rapide qu'un plein du carburant.

L'efficacité énergétique de la batterie Lithium-Ion d'un véhicule à moteur tout électrique est estimée de 10 à 14 kWh par 100 Km.

La capacité moyenne des batteries d'un véhicule électrique peut aller jusqu'à 20 kWh en lui assurant une autonomie d'environ 150 Km.

II-9 Conclusion :

Dans ce chapitre, Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, leurs différents types et leur application dans le domaine photovoltaïque, nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leur rendement et leur coût. Et une synthèse d'assemblage des panneaux et une spécification des différentes zones de fonctionnement Nous avons rappelé aussi les modules photovoltaïques et leurs types d'associations.

Puis on a exposé en théorie l'interaction entre panneau photovoltaïque et la batterie de stockage à travers un étage d'adaptation et un régulateur MPPT qui fonctionne selon un algorithme nommé perturbation et observation.

Enfin on a expliqué les différentes méthodes de charge de la batterie et les systèmes de régulation

III. La machine asynchrone :

Introduction :

La machine asynchrone, est par sa simplicité de conception et d'entretien, sa souplesse d'emploi (différentes gammes de puissance), sa robustesse mécanique, et de son faible coût, a la faveur des industriels depuis son invention par NIKOLA TESLA à la fin du dix-neuvième siècle, quand il découvrit les champs magnétiques tournants engendrés par un système de courants triphasé. Cette simplicité s'accompagne toutefois d'une grande complexité liée aux interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor.

L'apparition des thyristors GTO et, par la suite des transistors IGBT, a permis le développement d'onduleurs à modulation d'impulsion performants, fiable et proposés à un coût non prohibitif. Le problème de l'alimentation étant pratiquement réglé, ajouter a cela la décroissance des prix des micro-ordinateurs.

Comme la machine asynchrone se présente comme un système multivariables, complexe et que certains de ces paramètres ne sont pas directement mesurables, un effort s'impose pour découpler et linéariser son contrôle.

Notre travail consiste à connecter l'onduleur de tension a deux niveaux commandé par type MLI, alimentant par la méthode directe, d'un moteur asynchrone, alimenté en tension et commandé en courant.

Afin de mener ce travail à terme, nous l'avons partagé comme suit :

- Le premier partie est consacrée à la présentation d'une série de rappels théorique suivi du modèle mathématique de PARK d'une machine asynchrone dans un référentiel lié au champ tournant puis dans un référentiel stationnaire fixe lie au stator . Cette modélisation est sera réalisée par simulation numérique sous l'environnement de matlab/simulink version 7.12.
- Dans la deuxième partie on a décrit la théorie des onduleurs classiques à deux niveaux.

- Dans la troisième partie on a réalisé une modélisation de l'interaction onduleur-machine asynchrone.
- Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion.

La plus part des machines électriques des équipements industriels sont asynchrones triphasées, leur puissance s'étend d'une centaine de Watts à une vingtaine de mégawatts. Actuellement, le moteur asynchrone détrône de plus en plus la machine à courant continu et son homologue synchrone dans le domaine de la variation de vitesse ; ceci n'est pas surprenant si l'on considère les caractéristiques principales des moteurs asynchrones :

- Les moteurs asynchrones sont de simple fabrication (surtout ceux à cage).
- Leurs constructions n'exigent pas de matériaux spéciaux et coûteux contrairement aux machines synchrones pour lesquelles on utilise des aimants à base des ferrites spéciales
- Contrairement à la machine à courant continu, la machine asynchrone est sans contacts glissants (dispositif balais collecteurs) ce qui la rend plus robuste et peut ainsi fonctionner dans les atmosphères explosives, humides et voir même poussiéreuses sans recourir à une grande maintenance.

Néanmoins, il est intéressant de se rappeler brièvement de certains problèmes physiques réellement existants et représentant une certaine perturbation pour le fonctionnement normal de la machine:

- L'effet de peau.
- La saturation.
- Les pertes dans le fer.

Et du point de vue d'un automaticien nous citons :

- Variation des paramètres de la machine
- Système multi-variable, couplé et non linéaire

III. Généralités sur la machine asynchrone (MAS) :

III.1 Définition :

On appelle une machine asynchrone ou à induction toute machine électrique ayant P paires de pôles et étant reliée à un réseau de fréquence f et qui ne tourne pas à la vitesse du synchronisme N tel que :

$$N = \frac{60 f}{P} \quad (\text{III-1})$$

f : est la fréquence.

P : est le nombre de paire de pôle.

III.2 Constitution :

Une machine asynchrone est constituée de deux armatures coaxiales, l'une est fixe; appelée *stator* l'autre est mobile ; appelée *rotor*, ces deux parties sont séparées par un vide constant et très étroit appelé *entrefer*.

III.2.1 Le stator :

C'est un anneau de tôles encoché à l'intérieur et portant un enroulement triphasé à P paires de pôles, analogue d'un induit de la machine synchrone. On peut l'appeler primaire ou inducteur car c'est au champ tournant qu'il développe que sont dus les courants induits du rotor.

III.2.2 Le rotor :

C'est un anneau encoché à l'extérieur et concentrique au stator. Il n'est lié à aucune source d'énergie, ce qui simplifie sa construction et il est appelé induit ou secondaire car les courants dans ses enroulements sont uniquement induits par le champ tournant crée dans le stator.

- On distingue plusieurs types de rotor :

III.2.2.1 Rotor à bague (bobiné) :

C'est un rotor à pôles lisses, ses encoches comportent un enroulement 3 ~ monté en étoile afin d'éviter toute circulation de courant entre les phases rotoriques. Il est relié à des bagues fixées sur l'arbre de la machine. Le nombre de bagues est égal au nombre de phases entre lesquelles on peut insérer un rhéostat qu'on court-circuite en marche normale et qui permet un bon démarrage de la machine.

III.2.2.2 Rotor à cage :

L'enroulement est remplacé par des barres, de cuivre ou d'aluminium, logées (coulées) dans les encoches et reliées entre elles à chacune des extrémités par deux couronnes de cuivre ou d'aluminium, ces barres sont généralement inclinées pour réduire les harmoniques des encoches ; Une telle approche est robuste, moins coûteuse et d'une performance importante.

- On tient aussi à signaler l'existence des rotors ; à double cage et à encoches profondes.

III.3 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone :

Le principe de fonctionnement repose sur les lois de l'induction suivantes :

III.3.1 Théorème de FERRARI :

Une armature multipolaire, polyphasé, parcourue par un système de courants sinusoïdaux polyphasés équilibrés, crée dans l'entrefer une force magnétomotrice (fem) circulaire unique et tournant dans l'espace lié à l'armature à la vitesse angulaire $\frac{\omega}{p}$

Tel que :

P : est le nombre de paires de pôles de l'armature.

III.3.2 Loi de FARADAY :

Une force électromotrice ($f.e.m$), apparaît dans un circuit électrique, quand la variation du flux Ψ qui traverse celui ci, est instantanée :

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} . \quad (\text{III-2})$$

III.3.3 Loi de LAPLACE :

Le passage d'un courant d'intensité I dans un conducteur électrique placé dans un champ magnétique caractérisé par l'induction B crée en son enceinte une force dite *Laplace* :

$$\vec{F} = LI \wedge \vec{B}. \quad (\text{III-3})$$

III.3.4 Loi de LENZ :

Dans un circuit électrique fermé soumis à une variation de flux d'induction, les phénomènes de l'induction (courant induit, champ magnétique, forces électromagnétiques...) ont un sens tel qui tend à s'opposer à la cause qui leur a donné naissance.

Principe :

D'après le théorème de *FERRARI*, les trois courants sinusoïdaux équilibrés statoriques engendrent une force magnétomotrice unique tournante, cette force fait circuler un champ magnétique tournant.

Ce champ tournant induit des *f.e.m* au rotor (loi de *FARADAY*) dans le circuit électrique, s'il est fermé, des courants prennent naissance qui, en réaction avec le champ tournant, créent les forces de Laplace qui exercent des moments rotatifs et mettent ainsi le rotor en mouvement.

En effet, la loi de *LENZ* indique que ces forces de Laplace ont tendance à s'opposer à la cause qui leur a donné naissance, c'est-à-dire la rotation du champ tournant par rapport au rotor. Celui ci a donc tendance à tourner avec le champ tournant, de façon à annuler la cause, mais sans y arriver car dans ce cas il n'y aurait pas plus de courants, donc plus de forces de Laplace et le rotor va se ralentir à cause des frottements.

Le glissement : Est la différence relative de vitesse entre le rotor et le champ

tournant, on le note g : $g = \frac{N_s - N}{N_s}$. (III-4)

III.4 Bilan de puissance :

Le bilan des puissances est schématisé par la figure(I-1)

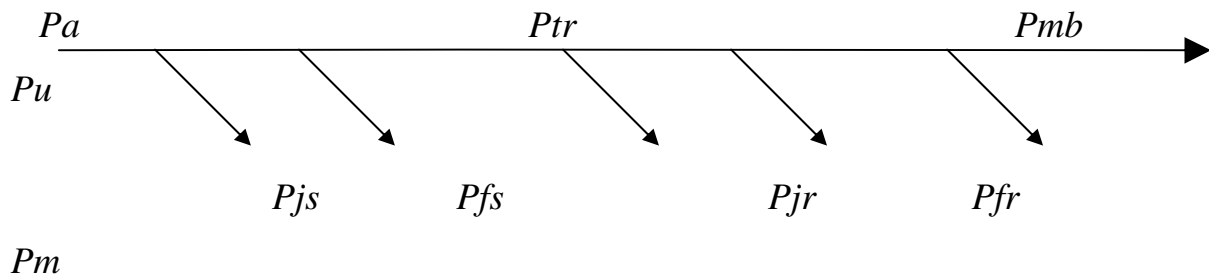


Figure (III-1) : Répartition des puissances.

Tel que :

P_a : Puissance absorbée.

P_{tr} : Puissance transmise au rotor.

P_{mb} : Puissance mécanique brute.

P_{js} : Pertes Joule dans le stator.

P_{fs} : Pertes fer dans le stator.

P_{jr} : Pertes Joule dans le rotor.

P_{fr} : Pertes fer dans le rotor.

P_m : Puissance mécanique.

P_u : Puissance utile.

Le champ tournant applique sur l'axe du rotor un couple C_{em} (couple électromagnétique). Du fait du glissement, la puissance fournie par le champ tournant et la puissance mécanique reçue par l'axe sont différentes, la différence alimente les pertes Joule et les pertes fer dans le rotor. On peut écrire la loi de conservation des puissances :

$$P_{tr} = P_{mb} + P_{jr} + P_{fr} \quad (\text{III-5})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} P_{tr} = C_{em} \Omega_s \\ P_{mb} = C_{em} \Omega_r \end{cases} \quad (\text{III-6})$$

Le champ magnétique tourne à la vitesse angulaire de synchronisme (Ω_s), alors que le rotor tourne à la vitesse angulaire (Ω_r).

On en déduit que :

$$P_{fr} + P_{jr} = P_{tr} + P_{mb} \quad (\text{III-7})$$

Alors :

$$C_e (\Omega_s - \Omega_r) = C_e \cdot g \cdot \Omega_s = g \cdot P_{tr} \quad (\text{III-8})$$

III.5 Le rendement :

La puissance apparente empruntée au réseau se divise en puissance réactive peu utile et en puissance active transformable en énergie mécanique une partie se dissipe en énergie calorifique.

η : Exprime le rendement du moteur, c'est le pourcentage d'énergie active qui est transformée en énergie mécanique. Il est lié à la puissance et au glissement par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (\text{III-9})$$

Tel que :

$$P_u = C_u \cdot \Omega_r (1 - g) \quad : \text{ Puissance utile (puissance mécanique).}$$

D'où :

$$\eta = 1 - g \quad (\text{III-10})$$

Tel que :

η : Rendement

C_u : Couple utile.

III.6 Démarrages :

III.6.1 Démarrage direct :

On peut relier le stator au réseau, brutalement, si celui-ci est capable de supporter la surintensité qui en résulte. C'est habituel pour les petits moteurs, mais cela se pratique également pour des moteurs de plusieurs centaines de kilowatts.

Cette méthode ne peut être utilisée que si la charge présente un moment d'inertie faible, qui permet la mise en vitesse rapide du moteur. Sinon la surintensité risque de l'endommager.

III.6.2 Démarrage étoile-triangle :

Si le moteur est prévu pour fonctionner en triangle avec le réseau, on peut commencer par coupler les enroulements du stator en étoile. Ils ne sont alors soumis qu'à une tension simple et l'intensité en ligne est divisée par trois par rapport au démarrage direct. On passe en triangle dès que le moteur tourne et que l'intensité a suffisamment diminué.

III.6.3 Rhéostat rotorique :

Pour un moteur à rotor bobiné, l'intensité au stator diminue quand la résistance du rotor augmente. On ajoute alors au démarrage un rhéostat en série avec chaque enroulement du rotor, et au fur et à mesure que la vitesse du rotor augmente, on diminue la résistance du rhéostat, qu'on finit par annuler complètement (court-circuit) lorsque le fonctionnement normal est atteint.

III.6.4 Démarrage sous fréquences et tensions variables :

Comme le moteur synchrone, le moteur asynchrone peut être associé à une électronique de puissance capable d'alimenter le stator avec des tensions 3~ dont la fréquence et la valeur efficace sont réglables. Cela permet un démarrage progressif, sans surintensité.

III.7 Modélisation de la MAS et de son alimentation :

Lors du fonctionnement de la machine asynchrone, beaucoup de phénomènes d'induction interviennent à savoir le courant de Foucault, l'effet de peau et la saturation et rendent ainsi sa modélisation complexe. Il est alors nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices afin de faciliter sa modélisation.

III.7.1 Hypothèses simplificatrices :

- La machine est symétrique à entrefer constant.
- Le circuit magnétique est non saturé, parfaitement lissé et à perméabilité constante.
- La force magnétomotrice ($f.m.m$) créée est à répartition spatiale sinusoïdale.
- Les pertes ferromagnétiques sont négligeables
- L'effet dû à la présence des encoches est négligé.
- La densité du courant peut être considérée comme uniforme dans la section d'un conducteur élémentaire (on néglige l'effet de peau).

III.7.2 Conséquences :

- L'additivité des flux.
- Les inductances propres sont constantes.
- La loi de variation des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques est en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

III.7.3 Convention de signes :

- Une f.e.m positive fait circuler un courant positif.
- Un courant positif crée un flux positif.
- Les angles et les vitesses sont comptés positivement dans le sens trigonométrique.
- Le stator est considéré comme *générateur* et le rotor comme *récepteur*.

III.7.4 Description :

- La machine est représentée par les trois phases statoriques (a_s, b_s, c_s) et les trois phases rotoriques (a_r, b_r, c_r).
- L'axe de la machine (Oa_s) de la bobine a_s est considéré comme origine des phases.
- Le rotor est repéré par l'axe magnétique (Oa_r) la bobine a_r .
- Le référentiel (d, q) est repéré par l'axe (Od).

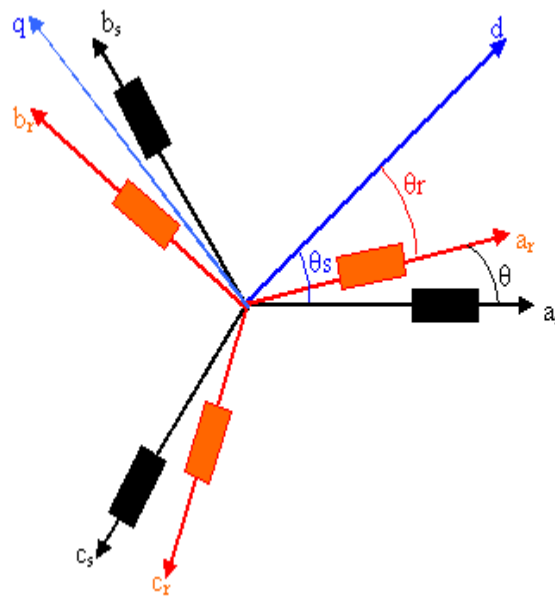


Figure (III-2) : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée

On obtiendra:

$$(Oa_s, Od) = \theta_s$$

$$(Ob_s, Od) = \theta_s - 2\pi/3$$

$$(Oc_s, Od) = \theta_s - 4\pi/3$$

$$(Oa_r, Od) = \theta_r$$

$$(Ob_r, Od) = \theta_r - 2\pi/3$$

$$(Oc_r, Od) = \theta_r - 4\pi/3$$

$$(Oa_s, Oa_r) = \theta_s - \theta_r = \theta$$

$$(Od, Oq) = \pi/2$$

III.7.5 La mise en équation de la machine asynchrone :

Le fonctionnement de la machine asynchrone à cage peut se traduire sous les trois types d'équations

- Équations électriques.
- Équations magnétiques.
- Équation mécanique.

III.7.5.1 Equations électriques :

Les enroulements du rotor et du stator sont régis par les équations écrites sous forme matricielle :

$$[U_s] = R_s [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (\text{III-11}).$$

$$[U_r] = R_r [I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r]$$

Avec :

$$[U_r] = [U_{as} \quad U_{bs} \quad U_{cs}]^t$$

$$[U_r] = [U_{ar} \quad U_{br} \quad U_{cr}]^t$$

$$[I_s] = [I_{as} \quad I_{bs} \quad I_{cs}]^t$$

$$[I_r] = [I_{ar} \quad I_{br} \quad I_{cr}]^t$$

$$[\Phi_s] = [\Phi_{as} \quad \Phi_{bs} \quad \Phi_{cs}]^t$$

$$[\Phi_r] = [\Phi_{ar} \quad \Phi_{br} \quad \Phi_{cr}]^t$$

Les trois enroulements rotoriques (a_r , b_r , c_r) sont court-circuités alors :

$$[U_r] = [0 \quad 0 \quad 0]^t.$$

III.7.5.2 Equations magnétiques :

D'après les hypothèses citées auparavant les relations entre les flux et les courants sont écrites sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_{ss}] [I_s] + [M_{sr}] [I_r] \\ [\Phi_r] = [L_{rr}] [I_r] + [M_{rs}] [I_s] \end{cases} \quad (\text{III-12}).$$

Avec :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (\text{III-13}).$$

Et :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_{as} & M_{as} \\ M_{as} & L_{as} & M_{as} \\ M_{as} & M_{as} & L_{as} \end{bmatrix} \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{ar} & M_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & L_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & M_{ar} & L_{ar} \end{bmatrix}$$

Tel que:

L_{as} : Inductance propre d'une phase statoriques.

L_{ar} : Inductance propre d'une phase rotorique.

M_{as} : Inductance mutuelle entre deux phases du stator.

M_{ar} : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor.

M_{sr} : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor.

III.7.5.3 Equation mécanique :

Le fonctionnement de la charge mécanique en mouvement de rotation est décrit par la relation suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - K_f \Omega \quad (\text{III-14})$$

Tel que :

J : Moment d'inertie.

K_f : Coefficient de frottements visqueux.

C_r : Couple résistant.

Les équations (III-1), (III-2) et (III-3) sont d'ordre élevé et dépendent du courant, de la vitesse et aussi de la position alors, il est recommandé d'opter pour une transformation indépendante de l'angle θ . Cette transformée est élaborée par : PARK.

III.7.5.4 Transformation de PARK :

La transformation de PARK consiste à appliquer aux différentes grandeurs (la tension, le flux et le courant) un changement de variable qui fait intervenir l'angle entre les axes des enroulements statoriques (Oa_s, Ob_s, Oc_s) et les enroulements rotoriques (Oa_r, Ob_r, Oc_r) et les axes orthogonaux Od (polaire ou longitudinal) et Oq (interpolaire ou transversal) ainsi il fait remplacer l'angle θ par θ_s pour les grandeurs statoriques et par θ_r pour les grandeurs rotoriques

Tel que :

$$(Oa_s, Od) = \theta_s \quad (\text{III-15})$$

$$(Oa_r, Od) = \theta_r$$

La matrice de PARK $[P(\theta)]$ est définie ainsi :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III-16})$$

La matrice inverse de PARK est donnée par :

$$[P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III-17})$$

Le coefficient $\sqrt{\frac{2}{3}}$ a été choisi pour donner une forme invariante du couple électromagnétique à partir de l'égalité :

$$[P(\theta)]^t = [P(\theta)]^{-1} \quad (\text{III-18})$$

D'où le changement de variable relatif aux différentes grandeurs est donné par les deux équations :

$$[X_d \ X_q \ X_o]^t = [P(\theta)][X_a \ X_b \ X_c]^t \quad (\text{III-19})$$

$$[X_a \ X_b \ X_c]^t = [P(\theta)]^{-1}[X_d \ X_q \ X_o]^t \quad (\text{III-20})$$

Pour un système triphasé équilibré on a:

$$I_a + I_b + I_c = 0 \Rightarrow \begin{cases} I_{as} + I_{bs} + I_{cs} = 0 \\ I_{ar} + I_{br} + I_{cr} = 0 \end{cases} \quad (\text{III-21})$$

C.à.d. les composantes homopolaires sont nulles.

III.7.5.5 Les équations dans les axes d, q :

III.7.5.5.1 Les équations électriques :

En tenant compte de la formule (III-4), et en utilisant les relations (III-19) et (III-20) nous trouverons:

$$[P(\theta)] \frac{d}{dt} [P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III-22})$$

Au stator:

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{os} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{os} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{os} \end{bmatrix} + R_s \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{os} \end{bmatrix} \quad (\text{III-23})$$

Au rotor:

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \\ V_{or} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \\ \Phi_{or} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_r}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \\ \Phi_{or} \end{bmatrix} + R_r \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_{or} \end{bmatrix} \quad (\text{III-24})$$

III.7.5.5.2 Les équations magnétiques :

Direct :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{dr} \end{bmatrix} \quad (\text{III-25})$$

Quadratique :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{qs} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{III-26})$$

Homopolaire:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{os} \\ \Phi_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{os} \\ I_{or} \end{bmatrix} \quad (\text{III-27})$$

Tel que : $L_s=L_{as}-M_{as}$ Inductance propre cyclique du stator.
 $L_r=L_{ar}-M_{ar}$ Inductance propre cyclique du rotor.
 $L_m=\frac{3}{2}M_{sr}$ Inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor.
 $L_{os}=L_{as}+2M_{as}$
 $L_{or}=L_{ar}+2M_{ar}$

III.7.5.5.3 Equation mécanique :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - K_f \cdot \Omega \quad (\text{III-28})$$

III.7.5.5.4 L'expression du couple :

L'expression du couple sera donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_r} (\Phi_{dr} \cdot I_{qs} - \Phi_{qr} \cdot I_{ds}) \quad (\text{III-29})$$

Conséquences :

D'après les développements de calculs obtenus ci-dessus nous constatons que la matrice des inductances comporte des paramètres indépendants du temps, de plus le nombre de ces paramètres est réduit à cinq (05) à savoir $(L_s, L_m, L_r, L_{os}, L_{or})$

Puisque notre système d'alimentation est triphasé équilibré alors les composantes homopolaires seront nulles. Ainsi nous obtenons des équations générales d'un modèle bipolaire de la machine asynchrone :

Equations magnétiques :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{dr} \end{bmatrix} \quad (\text{III-30})$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{qs} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{III-31})$$

Equations électriques :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d(\theta_s)}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} + R_s \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{III-32})$$

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d(\theta_r)}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} + R_r \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{III-33})$$

III.7.5.5 Interprétation physique de la transformation de PARK :

La transformée de PARK est une substitution de deux enroulements (d, q) dont les axes magnétiques sont solidaires du rotor et tourne avec lui aux enroulements (a, b, c) dont les conducteurs et les axes magnétiques sont immobiles par rapport au stator. Cependant les conducteurs qui constituent les nouveaux enroulements doivent être considérés immobiles d'où l'analogie des enroulements (d, q) et ceux de l'induit d'une machine à courant continu.

III.7.6 Choix du référentiel :

Le référentiel est le système d'axe Od, Oq associé à une vitesse de rotation, il en existe trois sortes différentes. Le choix se fait en fonction du problème qu'on veut résoudre.

On définit par :

$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$: Vitesse angulaire des axes Od, Oq dans le repère statorique.

$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$: Vitesse angulaire des axes Od, Oq dans le repère rotorique.

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = P\Omega .$$

III.7.6.1 Référentiel lié au stator :

Ce référentiel est noté (α, β) , il se définit par les conditions suivantes :

$$\theta_s = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = 0$$

D'où : $\omega_{gl} = -P\Omega$

Ce référentiel est recommandé en vue d'étudier des variations importantes de vitesse de rotation associé ou non avec les variations de la fréquence d'alimentation (grandeurs rotoriques).

III.7.6.2 Référentiel lié au rotor :

Ce référentiel est noté (X, Y), il se caractérise par les conditions suivantes :

$$\theta_r=0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt}=0$$

D'où : $\omega_{gl}=P\Omega$

L'utilisation de référentiel est favorable dans la résolution des problèmes de régime transitoires où la vitesse de rotation est constante (étude des c^t - c^t).

III.7.6.3 Référentiel lié au champ tournant :

Ce référentiel est noté (d, q), il se traduit par les conditions suivantes :

$$\frac{d\theta_s}{dt}=\omega_s \quad , \quad \frac{d\theta_r}{dt}=\omega_r$$

Et $\omega=\omega_s-\omega_r=P\Omega$.

Ce référentiel est utilisable pour l'étude des problèmes de commande linéaire, en effet le contrôle vectoriel par orientation de flux nécessite ce choix.

III.7.7 Représentation d'état :

Pour une MAS alimentée en tension, les tensions (U_{ds} , U_{qs}) et la vitesse du champ tournant sont considérées comme variables de commande et le couple résistant (C_r) comme perturbation.

La représentation d'état consiste à exprimer le modèle de la machine sous la forme :

$$\frac{dX}{dt}=f(X,U,t) \quad \text{(III-34)}$$

$$Y=g(X,U,t)$$

Avec : X : vecteur d'état

U : vecteur d'entrée

Y : vecteur de sortie

Parmi les différentes possibilités qui sont offertes pour le choix du vecteur d'état on cite :

$$X = [\Phi_{ds} \quad \Phi_{qs} \quad I_{ds} \quad I_{qs} \quad \Omega]^t$$

$$X = [\Phi_{ds} \quad \Phi_{qs} \quad I_{dr} \quad I_{qr} \quad \Omega]^t$$

$$X = [\Phi_{dr} \quad \Phi_{qr} \quad I_{ds} \quad I_{qs} \quad \Omega]^t$$

$$X = [\Phi_{dr} \quad \Phi_{qr} \quad I_{dr} \quad I_{qr} \quad \Omega]^t$$

$$X = [I_{ds} \quad I_{qs} \quad I_{dr} \quad I_{qr} \quad \Omega]^t$$

III.7.7.1 Choix du vecteur d'état :

Dans notre cas d'étude, nous choisissons le vecteur d'état suivant :

$$X = [I_{ds} \quad I_{qs} \quad \Phi_{dr} \quad \Phi_{qr} \quad \Omega]^t$$

Ce choix est dû aux considérations suivantes :

- L'objectif essentiel est le contrôle de l'évolution de la vitesse Ω .
- Les courants statoriques sont accessibles et mesurables.
- Le contrôle vectoriel par orientation de flux rotorique est envisagé afin d'assurer un fonctionnement à flux maximal constant.
- Les entrées sont : U_{ds} et U_{qs} .
- Les sorties sont : Ω et le flux rotorique.

Pour obtenir la représentation d'état on devait modifier les équations des tensions statoriques afin d'exprimer les flux (Φ_{ds} , Φ_{qs}) en fonction des variables : i_{ds} , i_{qs} , Φ_{dr} , Φ_{qr} .

Soit :

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} : \text{Coefficient de dispersion.}$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} : \text{Constante de temps rotorique.}$$

$$T_s = \frac{L_s}{R_s} : \text{Constante de temps rotorique.}$$

Après simplifications nous obtiendrons :

$$\frac{d}{dt} \Phi_{dr} = -\frac{1}{T_r} \Phi_{dr} + \frac{L_m}{T_r} i_{ds} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qr}$$

$$\frac{d}{dt} \Phi_{qr} = -\frac{1}{T_r} \Phi_{qr} + \frac{L_m}{T_r} i_{qs} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{dr}$$

Ainsi les équations de tensions seront :

$$\frac{d}{dt} i_{ds} = -\left(\frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r}\right) i_{ds} + \omega_s \cdot i_{qs} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r} \Phi_{dr} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega \cdot \Phi_{qr} + \frac{1}{\sigma L_s} U_{ds}$$

$$\frac{d}{dt} i_{qs} = -\left(\frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r}\right) i_{qs} - \omega_s \cdot i_{ds} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r} \Phi_{qr} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega \cdot \Phi_{dr} + \frac{1}{\sigma L_s} U_{qs}$$

D'où l'écriture matricielle suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r}\right) & \omega_s & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r} & \frac{L_m \omega}{\sigma L_s L_r} \\ -\omega_s & -\left(\frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r}\right) & -\frac{L_m \omega_r}{\sigma L_s L_r} & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r} \\ \frac{L_m}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & (\omega_s - \omega) \\ 0 & \frac{L_m}{T_r} & -(\omega_s - \omega) & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ds} \\ U_{qs} \end{bmatrix}$$

En ajoutant aux équations ci-dessus, l'équation mécanique et celle du couple et en associant le tout à un vecteur de sortie Y , nous allons obtenir un modèle non linéaire complet.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_r} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds})$$

L'équation mécanique est donnée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - K_f \Omega$$

III.7.7.2 Modèle final de la machine asynchrone :

On a : $\frac{dX}{dt} = f(X) + g.U$

Tel que :

$$f(X) = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r}\right) i_{ds} + \omega s i_{qs} + \left(\frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r}\right) \Phi_{dr} + P \Omega \left(\frac{L_m}{\sigma L_s L_r}\right) \Phi_{qr} \\ -\omega s i_{ds} - \left(\frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r}\right) i_{qs} - P \Omega \left(\frac{L_m}{\sigma L_s L_r}\right) \Phi_{dr} + \Phi_{qr} \\ \left(\frac{L_m}{T_r}\right) i_{ds} - \left(\frac{1}{T_r}\right) \Phi_{dr} + (\omega s - P \Omega) \Phi_{qr} \\ \left(\frac{L_m}{T_r}\right) i_{qs} - (\omega s - P \Omega) \Phi_{dr} - \left(\frac{1}{T_r}\right) \Phi_{qr} \\ P \frac{L_m}{J L_r} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) - \frac{(K_f \Omega + C_r)}{j} \end{bmatrix}, \quad g = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$X = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \Phi_{dr} \quad \Phi_{qr} \quad \Omega]^t$ et $U = [U_{ds} \quad U_{qs}]^t$.

Cette modélisation peut être représentée par le schéma ci-dessous où y apparaissent toutes les grandeurs (entrées, états et sorties...).

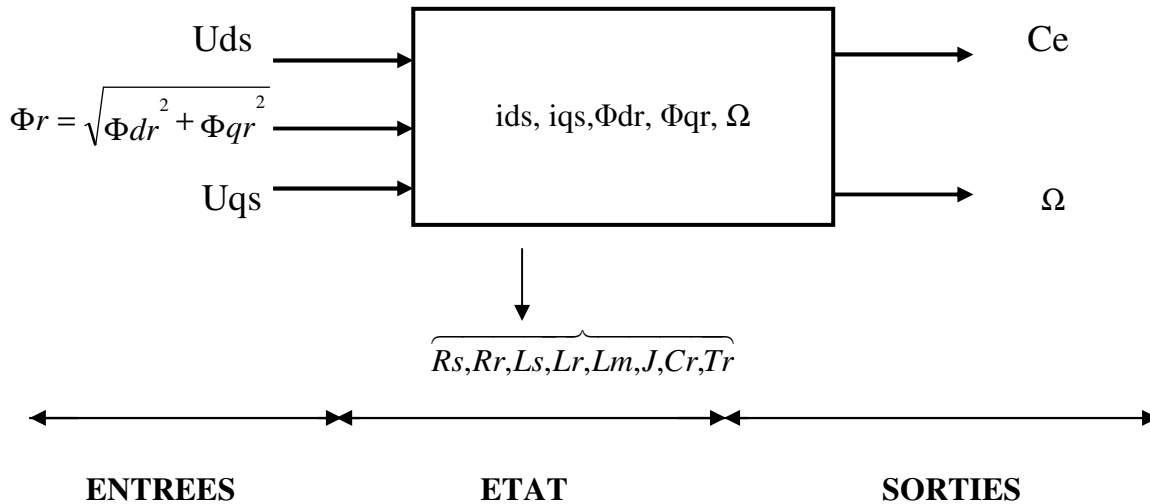


Figure (III-3): Modèle de la machine asynchrone.

III.7.8 Simulation numérique :

La simulation numérique est un moyen utile très répandu dans le domaine de la mise en œuvre des commandes et de l'analyse des systèmes avec beaucoup de précision. Parmi les logiciels qui sont disponibles, nous avons opéré avec « matlab/simulink ».

III.7.9 Démarrage à vide :

La machine étant alimentée par un système de tension triphasé sinusoïdal équilibré :

$$\begin{bmatrix} U_{as} \\ U_{bs} \\ U_{cs} \end{bmatrix} = U\sqrt{2} \begin{bmatrix} \cos(\omega st + \theta_{so}) \\ \cos(\omega st + \theta_{so} + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega st + \theta_{so} + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

En appliquant la transformée de PARK et en supposant que $\theta_s = (\omega st + \theta_{so})$, nous

allons avoir les deux tensions (U_{ds}, U_{qs})

$$\begin{bmatrix} U_{ds} \\ U_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}U \\ 0 \end{bmatrix}$$

III.8 Alimentation de la machine asynchrone :

8.1 Introduction :

Les actionneurs électriques tournants jouent un rôle très important Particulièrement en traction électrique. Les performances demandées à ces actionneurs sont de plus en plus élevées, tant du point de vue de la dynamique de la vitesse que de la précision du couple délivré.

La machine à courant continu a été la plus utilisée pour réaliser cet actionneur vu la simplicité de sa commande. Néanmoins, la machine à courant continu présente plusieurs inconvénients liés à son collecteur mécanique.

En revanche, les machines à courant alternatif (synchrone et asynchrone) possèdent de nombreux avantages. L'absence de collecteur leur permet d'avoir un encombrement réduit, une fiabilité accrue et une vitesse de fonctionnement élevée. L'alimentation de ce moteur par un convertisseur de

fréquence et les circuits de réglage et de commande sont plus compliqués que ceux du moteur à courant continu.

Le réglage de la vitesse du rotor de la machine asynchrone se réalise par action simultanée sur la fréquence et la valeur efficace des tensions (ou des courants) statoriques. Il faut donc disposer d'une source d'alimentation, qui est un convertisseur statique, capable de délivrer une tension d'amplitude et de fréquence réglable en valeur instantanée, selon les critères liés aux performances dynamiques souhaitées.

Le convertisseur statique adéquat et qui peut assurer la conversion continu-alternatif est un onduleur.

Pour un fonctionnement optimal de la machine asynchrone, les performances requises de ces convertisseurs statiques sont de plus en plus élevées : tant de point de vue de la puissance délivrée que de la qualité de la tension générée.

Néanmoins, l'alimentation en créneaux par l'onduleur à deux niveaux utilisé à ce jour présente des inconvénients tels que: la limitation en puissance et le taux d'harmoniques élevé, qui limite considérablement le développement du domaine des entraînements alternatifs.

Ces travaux de recherche ont conduit à l'apparition de nouvelles structures de convertisseurs de puissance destinées pour les applications de haute tension appelées convertisseurs multi-niveaux.

Grâce à leur topologie, les onduleurs multi-niveaux permettent une association série de plusieurs cellules de commutation, ce qui permet une augmentation du niveau de tension appliqué et également la puissance transitée. Cette structure permet aussi d'avoir une tension de sortie proche de la sinusoïde; grâce aux plusieurs niveaux de tension fournis par ce convertisseur.

Alors l'utilisation de ce type de convertisseur dans les domaines de forte puissance .et/ou haute tension permet de résoudre simultanément les difficultés relatives à l'encombrement et à la commande des groupements

d'onduleurs à deux niveaux généralement utilisés dans ce type d'applications. Afin de satisfaire certains critères d'optimisation à savoir la réduction des harmoniques, plusieurs types de commande sont développés, poussés par le besoin et les progrès technologiques.

III.8.2 Choix de l'alimentation :

On distingue deux types d'onduleurs

- Onduleurs de courant.
- Onduleurs de tension.

Dans notre étude, nous avons opté pour l'utilisation d'un onduleur de tension, en effet ce dernier est utilisé de manière quasi systématique dans le cas des machines de faible puissance. Ainsi lorsqu'une machine asynchrone est alimentée par ce type d'onduleur, son inductance n'intervient pas dans les commutations et ne produit pas de pointe de tension. En présence de source continue bien filtrée (un redresseur + un filtre) la machine asynchrone peut fonctionner avec des fréquences relativement élevées.

III.8.3 Modélisation de l'ensemble des convertisseurs :

L'alimentation est fournie par un pack batteries délivrant une tension continue $[V_{dc}]$ à travers un onduleur de tension commandé en tension, dont la commande des interrupteurs est réalisée par Modulation de largeur d'impulsion (MLI ou *PWM*). La figure ci-dessous représente l'ensemble convertisseur-machine.

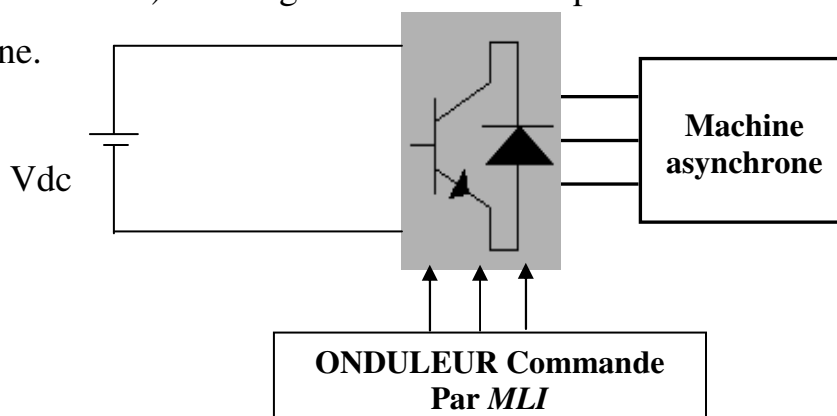


Figure (III-4) : Schéma synoptique de l'alimentation de la machine asynchrone.

III.8.3.1 Hypothèses de travail :

- Les interrupteurs sont parfaits.
- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- Les trois phases statoriques de la machine sont équilibrées.

a- L'onduleur :

L'onduleur de tension à deux niveaux est un convertisseur statique constitué de trois (03) bras bidirectionnels en courant. Chaque bras est composé de deux (02) interrupteurs (transistor et diode montés en antiparallèle) bi-commandables en série. Le point milieu de chaque bras est relié à une phase de la machine. Il est à noter que les interrupteurs de chaque bras sont commandés de manière complémentaire ; si l'un d'entre eux est ouvert l'autre doit être fermé et vis-versa. D'où la figure ci-dessous.

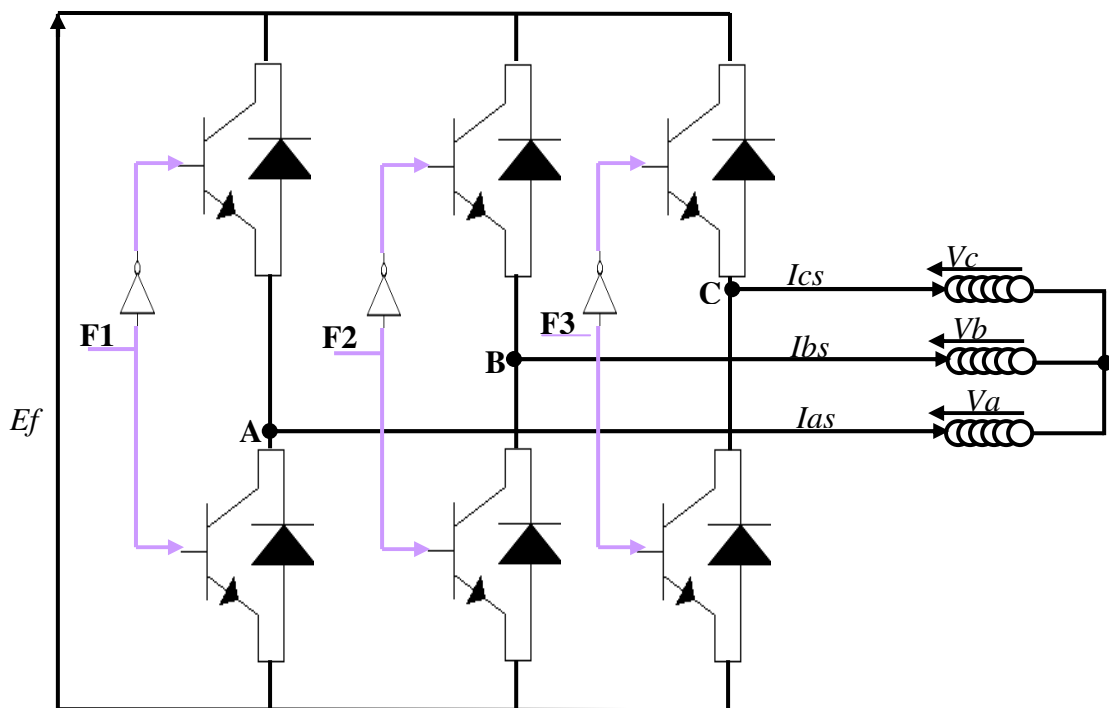


Figure (III-5): Onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

III.8.3.2 Modélisation :

Soient (V_a, V_b, V_c) les tensions de sortie de l'onduleur (tensions simples) et (U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}) les tensions composées.

On a alors :

$$\begin{cases} U_{ab}=V_a-V_b \\ U_{ac}=V_a-V_c \\ U_{ca}=V_c-V_a \end{cases}$$

La charge étant équilibrée donc :

$$V_a + V_b + V_c = 0$$

D'où :

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ac}) \\ V_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases}$$

Chaque bras de l'onduleur est équivalent à un interrupteur à deux positions car l'association d'un transistor et d'une diode qui lui est shunté en antiparallèle correspond à un composant bidirectionnel.

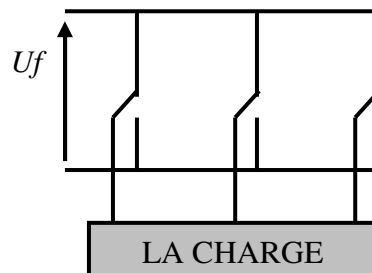


Figure (III-6) : Schéma équivalent d'un bras.

À chaque interrupteur K_i on associe une fonction de connexion F_i , définie par :

$$F_i = \begin{cases} +1 & \text{si } K_i \text{ est connecté à la borne (+) de la source.} \\ -1 & \text{si } K_i \text{ est connecté à la borne (-) de la source.} \end{cases}$$

Avec :

$$i=1,2,3$$

Ainsi nous obtenons :

$$\begin{cases} U_{ab} = \frac{1}{2}U_f(F1 - F2) \\ U_{bc} = \frac{1}{2}U_f(F2 - F3) \\ U_{ca} = \frac{1}{2}U_f(F3 - F1) \end{cases}$$

Alors :

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{6}U_f(2F1 - F2 - F3) \\ V_b = \frac{1}{6}U_f(2F2 - F1 - F3) \\ V_c = \frac{1}{6}U_f(2F3 - F1 - F2) \end{cases}$$

D'où l'écriture matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{6}U_f \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F1 \\ F2 \\ F3 \end{bmatrix}$$

III.8.3 Modulation de largeur d'impulsion.

Les grandeurs de sortie des commandes analogiques ou numériques représentent les tensions ou les courants désirés aux bornes de la machine. La technique de modulation de largeur d'impulsions (*MLI* en français, *PWM : Pulse Width Modulation* en anglais) permet de reconstituer ces grandeurs d'une source à fréquence et tension constantes par l'intermédiaire d'un convertisseur direct.

La *MLI* consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et à former chaque alternance d'une tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables.

La *MLI* permet de se rapprocher du signal désiré, cependant le taux d'harmonique généré par cette technique est important, ce qui est à l'origine des oscillations du couple, des bruits acoustiques et des résonances électromécanique dans les machines tournantes.

Dans le but d'y remédier à ces imperfections, quatre (04) catégories de *MLI* ont été développées :

- Les modulations pré-calculées.
- Les modulations post-calculées.
- Les modulations stochastiques.
- Les modulations sinus-triangle.

Pour la suite de notre travail nous choisirons la modulation sinus-triangle.

III.8.4.1 La modulation sinus-triangle :

Ce type de modulation est réalisé par comparaison d'une onde modulante de basse fréquence à une onde porteuse de haute fréquence et de forme triangulaire.

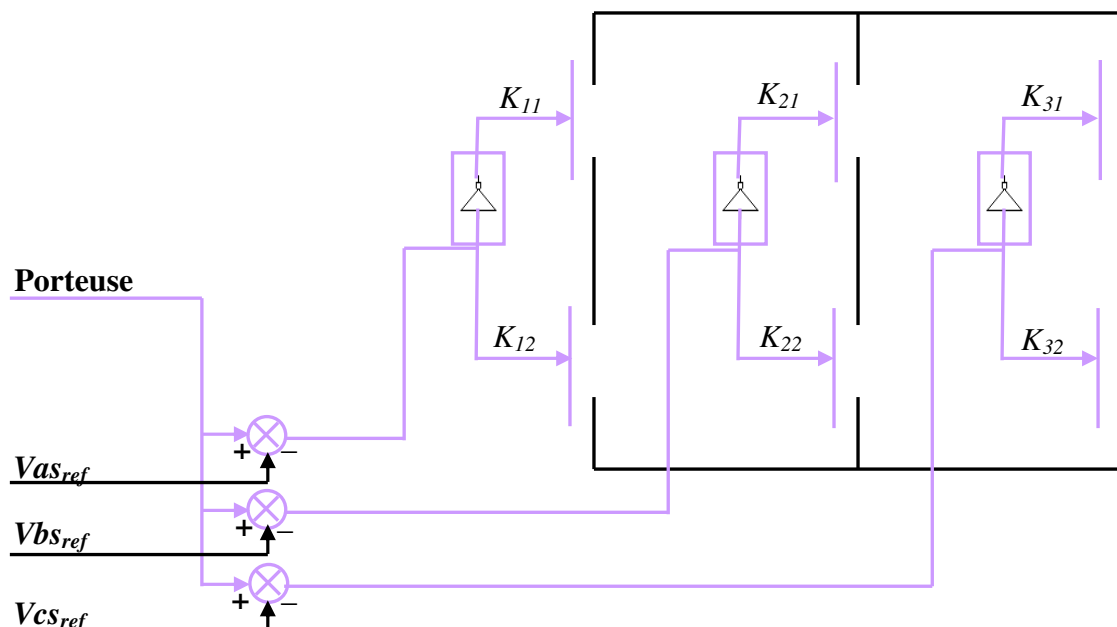


Figure (III-7) : Structure fonctionnelle de la MLI sinus-triangulaire.

Les instants de commutation sont donnés par :

- Pour l'alternance positive de la modulation, l'intersection de celle-ci avec une droite de pente négative de la porteuse entraîne l'allumage de l'interrupteur (K_{11}), tandis que l'intersection avec une droite de pente positive provoque le blocage de cet interrupteur.
- Pour l'alternance négative la modulatrice, l'intersection de celle-ci avec une droite de pente positive de la porteuse entraîne l'allumage de l'interrupteur (K_{12}) tandis que l'intersection avec une droite de pente négative provoque son blocage.

III.8.4.2 Propriété :

Si la référence est sinusoïdale la commande est caractérisée par :

- L'indice de modulation "m" est donné par : $m = \frac{fp}{fr}$

Avec :

fp : Fréquence de la porteuse.

fr : Fréquence de la référence.

- Le coefficient de réglage en tension "r" est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à celle de la porteuse :

$$r = \frac{Ar}{Ap}$$

Avec :

Ar : Amplitude de la référence.

Ap : Amplitude de la porteuse.

- La modulation est synchrone si "m" est entier et elle est asynchrone dans le cas contraire.
 - Si "m" est paire, le développement en série de signal de sortie ne comporte que des harmoniques pairs.
 - Si "m" est impair, le développement en série de signal comporte des harmoniques pairs et impairs.

- L'augmentation de "m" rejette les premiers harmoniques non nuls vers des fréquences élevées et facilite donc le filtrage. Mais "m" est limité par le temps de commutation des interrupteurs du convertisseur et donc par la largeur minimale des impulsions.

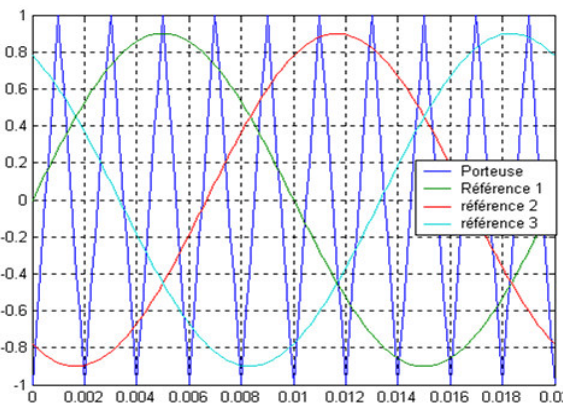
III.8.4.3 Simulation de l'onduleur deux niveaux à MLI sinus-triangulaire :

Les résultats de la simulation de l'onduleur, avec ($r=0.8$, $m=15$) sont représentés sur la figure (III-8). (Uf =220v ; f=50Hz)

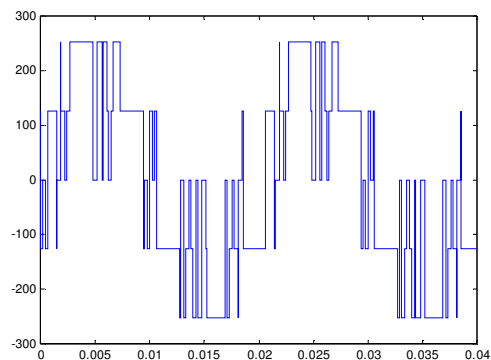
III.8.4.4 Interprétation :

La figure (III-8) montre bien que les tensions de sortie de l'onduleur formées de plusieurs créneaux et que la largeur de ces derniers soit directement liée aux différents instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de commutation

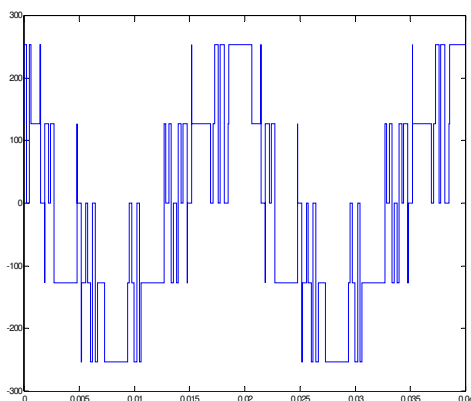
La Porteuse et la référence



Tension simple [Va]



Tension simple [Vb]



Tension simple [Vc]

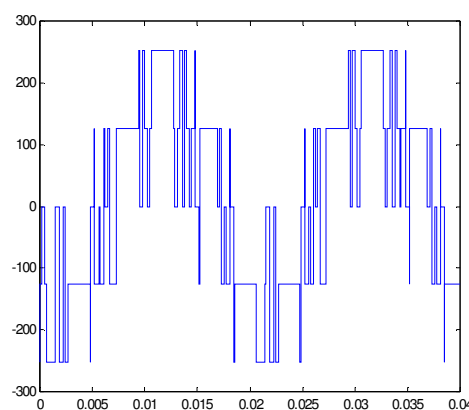


Figure (III-8) : Simulation de l'onduleur deux niveaux à MLI sinus-triangle.

Les figures montrent la tension du bras et la tension de sortie de la première phase de l'onduleur pour $m=15$ et $r=0.8$. on remarque que le nombre de commutations par période d'un interrupteur de l'onduleur est $2P$. [23]

III.8.5 l'association onduleur à MLI - machine asynchrone :

La machine est alimentée par un système de tensions triphasées fournies par un onduleur qui est commandé par la technique *MLI* sinus-triangulaire, le schéma synoptique est représenté sur la figure ci-dessous.

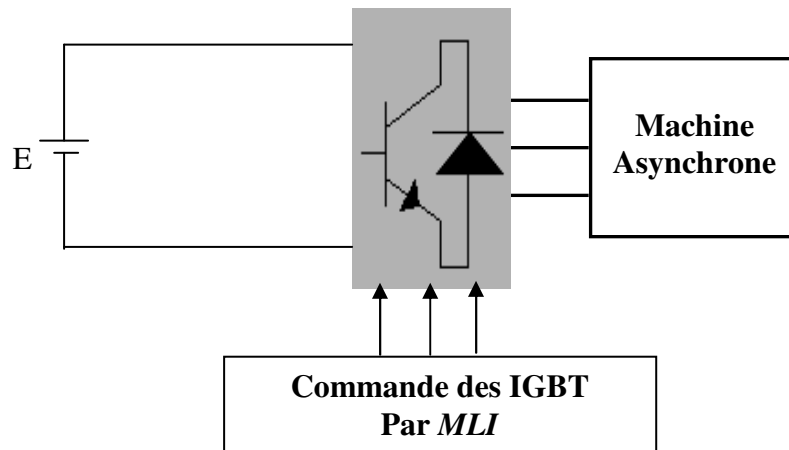


Figure (III-9) : Schéma synoptique de l'ensemble convertisseur-machine asynchrone.

Le modèle simulink de l'interaction onduleur - machine asynchrone est illustré dans les annexes.

III.8.6 Conclusion :

Le signal fourni par l'onduleur est semblable à un signal alternatif sinusoïdal presque parfait avec une élimination de la quasi-totalité des harmoniques

Cela contribue à obtenir des résultats presque identiques à un signal d'alimentation parfaitement sinusoïdal après la conversion de courant continu de la batterie vers un courant alternatif.

L'étude de la machine asynchrone nous a permis de bien contrôler les différents paramètres électriques et mécaniques de moteur asynchrone destiné à entraîner le véhicule électrique.

IV. Introduction :

Un véhicule électrique avec assistance solaire par définition, est un véhicule qui dispose d'une source d'énergie électrique pour assurer sa propulsion. Les sources d'énergie disponibles sont la charge électrique produite par le panneau photovoltaïque, l'électricité stockée dans les batteries ou la pile à combustible.

Le moteur électrique réalise de réels progrès, visant la réduction de sa consommation, comme l'amélioration des différentes parties mécaniques du véhicule (allègement de la carrosserie, performances aérodynamiques, utilisation de nouvelles technologies). Néanmoins ces performances restent insuffisantes au regard des ambitions déclarées.

De ce fait, le véhicule électrique solaire se présente encore aujourd'hui comme le moyen de déplacement le plus « écologique ».

Afin de permettre la récupération d'énergie, le moyen doit être réversible, les échanges ou transformations énergétiques sont bidirectionnelles. Elle peut être par exemple un accumulateur électrochimique, un condensateur, un volant d'inertie...et la plus utilisée actuellement est la batterie.

Un des éléments qui détermine en partie l'utilisation possible du véhicule électrique avec assistance solaire est la capacité de la batterie car elle détermine l'autonomie du véhicule en mode électrique pur. Le problème est d'utiliser de manière optimum par rapport à la consommation de carburant, l'énergie disponible dans la batterie. Cette optimisation est possible en utilisant au mieux les degrés de liberté de la chaîne de traction du véhicule (rapports de boîte par exemple), tout en satisfaisant la demande de puissance du conducteur et des accessoires.

IV-1 Le modèle dynamique du véhicule :

Le modèle dynamique choisi est un modèle simplifié qui ne tient pas compte des forces de roulis et de tangage. Le véhicule est modélisé comme une masse en mouvement soumise à la force motrice F développée par le groupe motopropulseur et à différents efforts liés à l'environnement F_r .

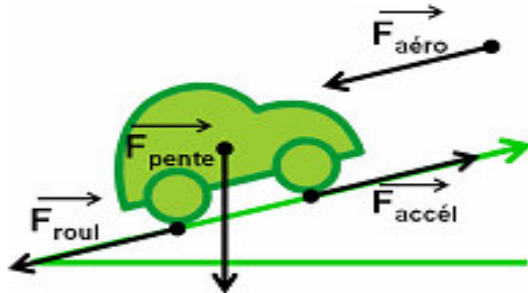


Figure. (IV.1) : Modèle des forces dynamiques sur le véhicule

La puissance nécessaire pour maintenir une vitesse stabilisée en terrain plat se calcule en tenant compte de deux forces de frottement : les frottements aérodynamiques et les frottements solides. Ces deux forces s'opposent au déplacement et le moteur doit les compenser.

Toute la suite de l'article suppose une vitesse stabilisée en terrain plat.

Ainsi la pente sera égale à 0° et la vitesse de vent est négligeable

Puissance, force sont constante pour une vitesse constante donnée.

S'il existe une force F (en Newton) qui est de même direction et de sens contraire au déplacement (vitesse en m/s), la puissance P (en Watt) de cette force s'écrit :

$$P = F \cdot v \cdot \cos(F, v) = - F \cdot v \quad \dots\dots\dots (IV.01)$$

(Le cosinus de l'angle 180° entre F et v vaut -1)

Pour compenser cette perte d'énergie (on ralentit spontanément à cause des frottements), le moteur apporte donc la même puissance, mais de signe positif :

$$P = F \cdot v \quad \dots\dots\dots (IV.02)$$

On appellera encore "puissance de la force" cette valeur positive $F \cdot v$

S'il existe une force F_r (en Newton) qui est de même direction et de sens contraire au déplacement (vitesse en m/s), la puissance P (en Watt) de cette

force s'écrit :

$$F_r = F_s + F_a + F_m \quad \dots\dots\dots(IV.03)$$

IV-1.1 Force de frottement solide (Fs) :

C'est la résistance des roulements du véhicule (contact pneu-route).

La propriété des frottements solides est d'avoir une valeur constante indépendante de la vitesse. En revanche, les frottements solides sont proportionnels à la masse du véhicule.

On a ainsi la relation :

$$F_s = m \cdot g \cdot \mu \quad \dots\dots\dots(IV.04)$$

m : la masse du véhicule (poids à vide du véhicule + conducteur + passagers + bagages éventuels)

g : Valeur de l'accélération de la pesanteur $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

μ: C'est le coefficient de frottement solide.

$$\mu = 0.01 \cdot (1 + (3.6/100) \cdot v)$$

Cette valeur semble être empiriquement de 0.015 environ (+/-10%), mais dépend des véhicules, de leurs roulements, du type de pneus et de leur gonflage. Un sous gonflage entraîne une augmentation des frottements solides, un surgonflage entraîne une usure prématurée des pneus et une adhérence réduite. Des pneus "sportifs" larges entraînent une valeur **μ** plus élevée.

b-Puissance des frottements solides (Ps) :

La valeur de cette puissance s'écrit :

$$P_s = F_s \cdot v \quad \dots\dots (IV.05)$$

En remplaçant **Fs** par sa valeur :

$$P_s = m \cdot g \cdot \mu \cdot v \quad (\text{Watt}) \quad \dots\dots (IV.06)$$

v: vitesse constante de véhicule

IV-1.2 Force de frottement aérodynamique (Fa) :

Puissance des frottements aérodynamiques en voiture, Cette force se manifeste à grande vitesse : un vent fort pousse davantage qu'un vent faible. Dans le domaine automobile, les vitesses et l'aérodynamisme font que les frottements aérodynamiques sont proportionnels au carré de la vitesse v . Ils sont aussi proportionnels à la densité de l'air ρ , à la surface frontale S du véhicule et à son aérodynamisme propre C_x .

On a ainsi la relation : $F_a = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot v^2$ (Newton) (IV.07)

F_a représente la résistance aérodynamique.

Valeur de ρ : $\rho = (M_{air}) \cdot p / (R \cdot T)$

m_{air} = masse molaire de l'air (0.029kg/mol),

p = pression atmosphérique (101300Pa)

R = constante des gaz parfaits (8.314 J/mol/K)

T = température en K (298K pour 25°C, 273K pour 0°C)

Dans ces conditions :

$\rho = 0.029 \times 101300 / (8.31 \times 298)$

$\rho = 1.186 \text{ kg/m}^3$ (à 25°C) jusqu'à 1.295 kg/m^3 (à 0°C)

S : est la surface frontale en m^2 , (aussi appelée maître couple): surface projetée dans le plan vertical orthogonal au vecteur vitesse.

C_x décrit l'aérodynamisme propre (coefficient de traînée).

C'est le produit $S \cdot C_x$ qui détermine la force pour un véhicule donné.

Cette valeur est fournie par les constructeurs et varie pour les voitures entre 0.6 et 0.9 m^2 en général.

Exemples de $S \cdot C_x$:

BMW 530i : 0.630 m^2

Peugeot 206: 0.653 m^2

Clio 3: 0.725 m^2

La vitesse du véhicule v se mesure en m/s. C'est le paramètre que le conducteur fait varier.

Où $(1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot C_x)$ est constante

Puissance des frottements aérodynamiques (Pa) :

La valeur de cette puissance s'écrit :

$$P_a = F_a \cdot v \quad \dots\dots\dots (IV.08)$$

En remplaçant **Fa** par sa valeur :

$$P_a = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot v^3 \quad (\text{watt}) \quad \dots\dots\dots (IV.09)$$

N.B : d'après l'équation de puissance aérodynamique si dessus,

Pour aller **2** fois plus vite, il faut **8** fois plus de puissance.

Pour une puissance donnée, on peut augmenter sa vitesse en diminuant sa valeur de **S** ou **Cx**. Les sportifs le comprennent bien en adoptant des positions aérodynamiques pour pulvériser des records de vitesse.

IV-1.3 Force de la pesanteur (Fm) :

$$F_m = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (\text{Newton}) \quad \dots\dots\dots (IV.10)$$

Représente la force de la pesanteur (résistance de montée en cote) où **α** est la pente en π radian.

La Puissance de résistance en montée (**Pm**) :

$$P_m = F_m \cdot v \quad (\text{watt}) \quad \dots\dots\dots (IV.11)$$

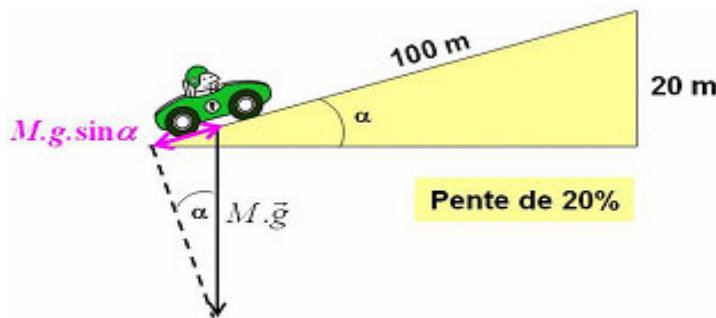


Figure. (IV.2): Modèle de la force de pesanteur

IV-1.4 Relation avec le principe fondamental de la dynamique :

En appliquant le principe fondamental de la dynamique : $F_c = F - F_r = m \times \frac{dv}{dt}$

F_c : La force d'inertie (IV.12)

Connaissant la Force motrice **F** et la force de résistance **Fr** on peut déduire la vitesse **v**.

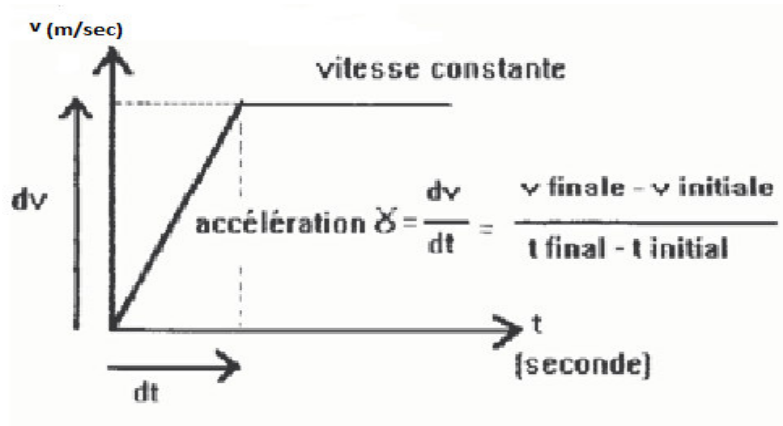


Figure. (IV.3) : Accélération constante de véhicule

On a commencé par cette partie parce que c'est la partie de base et le comportement dynamique de véhicule est le premier système qui sera modélisé. L'entrée principale du système est le cycle de vitesse souhaité et la sortie finale n'est autre que la vitesse réelle.

Pour maintenir sa vitesse constante en terrain plat ($P_m=0$), il faut lutter contre ces forces de frottement. La puissance totale à fournir (par le moteur)

s'écrit donc :
$$P = P_a + P_s + P_m \quad (\text{en watt}) \quad \dots\dots(IV.13)$$

$$P = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot v^3 + m \cdot g \cdot \mu \cdot v \quad (\text{en watt}) \quad \dots\dots (IV.14)$$

Les frottements solides sont prépondérants à faible vitesse et laissent place aux frottements aérodynamiques à haute vitesse.

N.B : les énergies cinétiques et de gravitation peuvent être récupérées si le système de motorisation le permet.

IV-1.5 Etude des couples :

a-Couple de démarrage :

Pour que le moteur entraîne une machine, il lui faut un couple de démarrage. Celui-ci doit d'une part décoller de la masse (de moment d'inertie J) de la machine et d'autre part vaincre le couple résistant relatif à la machine.

On désigne par C_a le couple d'accélération qui n'existe que pendant la mise en vitesse de la masse d'inertie J) et C_r le couple résistant de la machine qui se maintient durant tout le fonctionnement du moteur.

Ainsi le couple de démarrage C_d peut se calculer par la formule :

$$C_d = C_a + C_r \quad \dots\dots\dots (IV.15)$$

Au moment du démarrage, le couple moteur est en moyenne de 1,5 à 2 fois le couple nominal.

Selon le temps mis à la machine à entraîner pour atteindre sa vitesse nominale, le couple d'accélération sera plus au moins important

Le couple d'accélération dépend des masses à mettre en mouvement (J) et de la variation de la vitesse de rotation (vitesse angulaire Ω) dans le temps par la formule :

$$C_a = J \cdot d\Omega / dt \quad \dots\dots\dots (IV.16)$$

$d\Omega$: Variation de vitesse angulaire en rad/s.

dt : Durée de démarrage en secondes S .

C_a : Couple d'accélération en N.m

Calcul du couple nominal :

$$P_n = C_n \cdot \Omega \quad \dots\dots\dots (IV.17)$$

Calcul du couple d'accélération:

$$C_d = C_a + C_r \quad \dots\dots\dots(IV.18)$$

$$C_a = C_d - C_r \quad \dots\dots\dots(IV.19)$$

Avec : $C_r = 0,3 C_n$ $C_d = 1,8 C_n$

C_r est le couple moteur nécessaire aux roues pour obtenir cette force :

Sachant que: (R ; rayon roue = 0,32 m).

Pour une vitesse stabilisée, la puissance à fournir comprend un terme de frottement proportionnel à la vitesse et un terme de résistance aérodynamique proportionnel au cube de la vitesse. Cependant, dans notre fonctionnement ou la vitesse reste faible (à moins de 80Km/h, les efforts aérodynamiques sont négligeables), l'effort total ainsi que la puissance sont sensiblement proportionnels à la masse du véhicule :

$$C_r = F_r \cdot R = [\mu \cdot m \cdot g + m \cdot g \cdot p \text{ \%}] \cdot R \quad \dots\dots (IV.20)$$

Le couple transitoire :

$$C_a = F_r \cdot R = [m \cdot dv/dt] \cdot R \quad \dots\dots\dots (IV.21)$$

Le couple d'accélération requis doit donc être minimal pour une pente nulle.

N.B :

Par hypothèse on ne prend pas en considération la vitesse de vent puisque elle est négligeable devant la vitesse d'entraînement de véhicule.

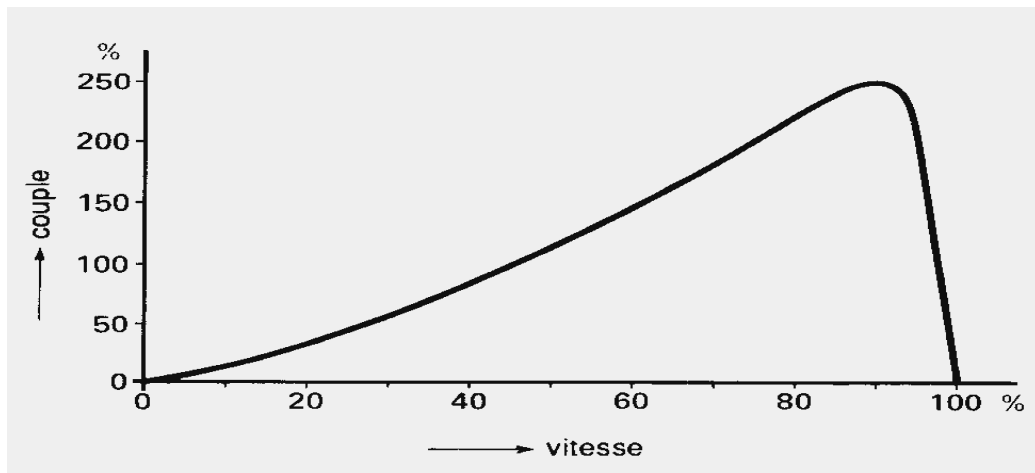


Figure (IV.4) Couple en fonction de la vitesse

b- motorisation avec transmission mécanique et le couple :

On a intérêt à utiliser le réducteur à rapport fixe pour diminuer la masse et le cout de moteur mais le rapport de réduction **k** sera limité par les limites en vitesse mécanique de moteur.

$$C_r = (k/\eta) \cdot F_r \cdot R \quad \dots\dots\dots (IV.22)$$

$$C_r = k/\eta \cdot [(1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot v^2 + m \cdot g \cdot p \% + m \cdot (dv/dt) + \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha))] \cdot R \quad \dots\dots (IV.23)$$

Le couple augmente suivant la valeur de rapport **k**

$$C_{r_{max}} = k \cdot C_{e_{max}} \quad \dots\dots\dots (IV.24)$$

La vitesse de rotation diminue inversement suivant le rapport **k**

$$\Omega_{r_{max}} = \Omega_e (\max) / k \quad \dots\dots\dots (IV.25)$$

En général :

$$C_{r_{max}} = (k_1, k_2, \dots, k_n) \cdot C_{e_{max}} \quad \dots\dots\dots (IV. 26)$$

$$\Omega_{r_{max}} = \Omega_{e_{max}} / \min(k_1, k_2, \dots, k_n) \quad \dots\dots\dots (IV. 27)$$

kn: le rapport de réduction d'ordre n pour la boite de transfert a plusieurs rapports

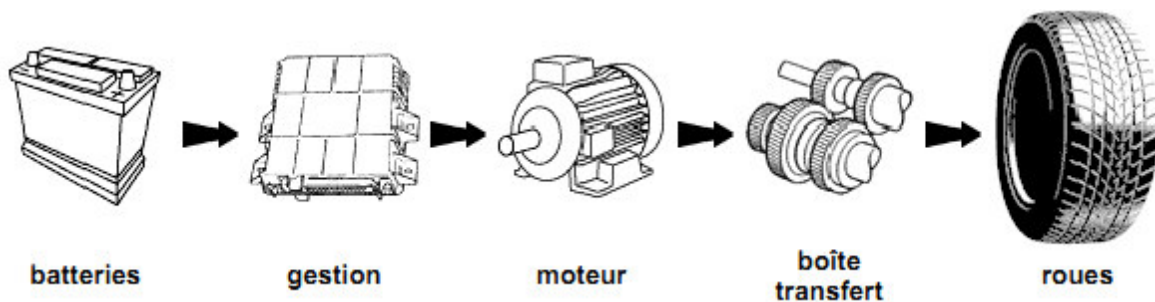


Figure. (IV.5) : Schéma de la chaîne moto propulseur avec boîte de transfert

La transmission finale est de type : ((Courroie-pignons)), les mécaniciens savent dimensionner ce type de transmission en fonction de la puissance à transmettre.

Il était de plus souhaitable qu'il ne soit pas trop volumineux, pour ne pas

toucher la coque du véhicule.

Le rendement de cette transmission est voisin de 90 % ; cela dépend de la tension sur la courroie.

Le couple maximal de moteur doit être égal à $(C_r + C_a) \cdot k$ majoré de 20 % pour prendre en compte les différents couples de pertes dans la transmission.

$$C_r = 1,2 \cdot F_r \cdot R$$

$$= 1,2 \cdot [1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot v^2 + M \cdot g \cdot \mu + m \cdot g \cdot \sin(\alpha) + m \cdot (dv/dt)] \cdot R \quad \dots (IV.28)$$

Soit, pour une accélération et une vitesse maximale sur le plat :

$$C_e = C_r / k \quad (\text{N.m}) \quad \dots\dots\dots(IV.29)$$

$$\Omega_e = \Omega_r \cdot k \quad (\text{rad/s}) \quad \dots\dots\dots(IV.30)$$

On va Choisir le moteur entrainant la voiture électrique selon les caractéristiques principales du moteur nécessaire à notre application :

$$P_e = C_e \cdot \Omega_e \quad (\text{Watt}) \quad \dots\dots\dots (IV.31)$$

$$N_e = (60/2 \cdot \pi) \cdot \Omega_e \quad (\text{tr/min}) \quad \dots\dots\dots(IV.32)$$

Le moteur doit donc être dimensionné pour un couple maximum

$C_{e_{\max}}$ et une vitesse maximale $k \cdot \Omega_e$.

Le couple demandé sera plus faible avec le réducteur

IV-1.6 contrôle de la vitesse de véhicule :

Le contrôle de la vitesse sera soit par façon mécanique soit par intervention sur la fréquence ou le couple de moteur électrique et cela par une boucle de contrôle fermée (feedback), un comparateur mesure la différence entre la vitesse réelle mesure avec capteur et la vitesse souhaitée tant que la différence vitesse pas nulle le conducteur continue d'accélérer ou décélérer, la vitesse consigne et proportionnelle aux perturbations extérieure de l'environnement.

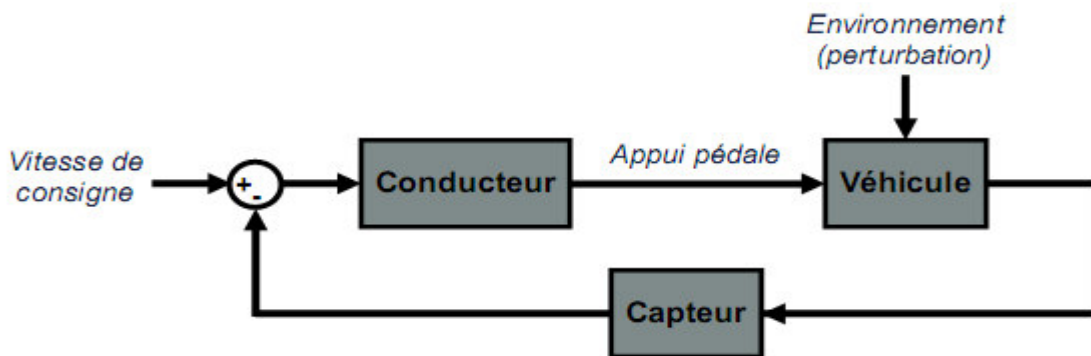


Figure. (IV.6) : Schéma synoptique contrôle de la vitesse de véhicule

Le conducteur peut être remplacé par un contrôleur électronique.

IV-2 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons décrits le comportement dynamique de véhicule avec des équations mécaniques et nous avons décrits l'importance de couple dans l'étude dynamique de Véhicule tout électrique.

Cette étude dynamique est primordiale pour dimensionner les caractéristiques physiques et électriques de moteur asynchrone d'entraînement.

Grace a cette étude on a réussi à fonder le bilan d'énergie de vehicule estimer l'effort énergétique à fournir pour vaincre les forces résistantes.

CHAPITRE.V : Dimensionner les paramètres physiques de véhicule

V.1 Introduction :

Le choix de dimensionnement des paramètres dépend beaucoup de six paramètres essentiels :

- 1-le cout global.
- 2-nature et disponibilité de matériaux.
- 3-impact sur l'environnement.
- 4-durée de vie de composants.
- 5-performances (énergie et puissance).
- 6-sécurité et sûreté.

V-2 Estimation de paramètres physiques de véhicule :

V.2.1 Le poids de véhicule:

Avant de passer au dimensionnement des différents composants, il faut d'abord préciser les paramètres du véhicule à utiliser. Le véhicule choisi est du type segment M1 qui possède les paramètres suivants :

- Surface de projection frontale : 2.6m^2
- Coefficient de pénétration dans l'air : 0.33
- Coefficient de résistance au roulement : 0.0133
- Rayon de la roue : 0.32 m
- Masse : 1300 Kg



Figure. (V.2) : Emplacement de batteries sur un véhicule électrique

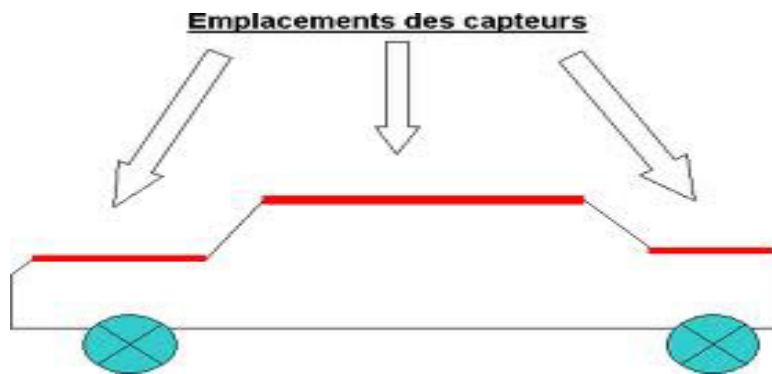


Figure. (V.3) : Position des capteurs photovoltaïques sur le véhicule électrique

Pour un moteur Asynchrone de qualité optimale le rendement $R=90\%$ avec une puissance nominale de 37 kW, alors d'après le cahier des charges le poids imposé du moteur électrique sera approximativement : $m_{\text{mot}}= 300 \text{ Kg}$.

Masse de générateur photovoltaïque (5m^2)	$m_{\text{pv}}= 80\text{Kg}$
Masse de pack batteries (Li-ion)	$m_{\text{bat}}=360\text{Kg}$
Masse de châssis, tôle, roues de véhicule	$m_{\text{vo}}=400\text{Kg}$
Masse conducteur, et bagages	$m_{\text{x}}= 140\text{Kg}$
Masse de véhicule totale : $m = m_{\text{pv}}+m_{\text{bat}}+m_{\text{mot}}+ m_{\text{vo}}+ m_{\text{x}}$	$=1300\text{Kg}$

V.2.2 Dimensionner le pack batterie :

Rendement de la batterie LITHIUM-ION a 80% de charge utile pour différents types de véhicules :

Véhicule type de conduite urbaine (165Wh/Km)

Véhicule type de conduite autoroute (135Wh/Km)

La moyenne sera $(50\%.165+50\%.137) =150\text{Wh/Km}$

Pour un trajet type extra urbain d'une distance (160 Km) la capacité requise de pack batterie sera de 24 kWh.

La batterie au lithium-ion à une stabilité thermique remarquable aux basses températures contrairement aux batteries à acide plomb conventionnelles.

La vitesse de véhicule est déterminée par la tension de pack batterie.

Conception de Pack batterie basé sur les Paramètres d'une cellule de lithium-ion Type (Saft VL 37570):

$V_{b_{max}}=4.2\text{volt}$, $V_{b_{nom}}=3.7\text{v}$, $V_{b_{min}}=2.5\text{v}$, $Q=7\text{Ah}$

$I_{b_1}=7\text{Ah}$: courant de charge nominale en 1 heure, aussi note 1C.

$I_{b_{max}}=28\text{A}$. Température de fonctionnement (-40 +50°C)

Coût spécifique (150 USD /kWh).

Pour un pack batterie $V_{bat_{max}}=300\text{V}$ et une puissance de $P_{bat}=55\text{ kW}$

Le nombre de cellules en série $300/4.2=72$

La tension de fonctionnement nominale est $V_{bat(nom)}=72 \times (3.7)=266\text{V}$

La valeur adéquate de courant de décharge pour un fonctionnement optimal de la batterie est 3C.

Pour un courant I_{max} de $55000/300=183\text{A}$

Le nombre de Cellules en parallèle $183/28=7$

Le courant de décharge nominal $I_{bat_{nom}}=7 \times 3 \times 7=147\text{A}$

La puissance fournie par la batterie dans la phase nominale est :

$V_{bat_{nom}} \times I_{bat_{nom}}=266 \times 147=39102\text{ W}$ ou 39.1 kW

$4.2\text{V} \times 7\text{Ah}=29.4\text{Wh} \times 504=14817\text{ Wh}$

Energie typique par 100 Km estimée est de 12 kWh à 15 kWh bien que l'efficacité énergétique est habituellement < 155 Wh/Km.

La moyenne autonomie est de 125Wh/Km pour une vitesse moyenne de 100km/h, alors la distance à parcourir sera égale à $14817/125 = 118\text{Km}$.

Calcule avec rendement de la batterie à 80% de taux de décharge :

$P_{bat(nom)}=37/0.9=41.11$ et $P_{bat(max)}=41.11\text{kW} / (0.8)=51.4\text{ kW}$

On va choisir une batterie avec une puissance maximale de 55 kW

Les résultats sont quasiment proches des résultats expérimentales représentés par les données de l'essai sur le véhicule électrique (**Renault Fluence Z.E**):

Consommation électrique : **11,9 kWh/100 km**

Batterie : **22 kWh** Autonomie : **185 km**

V-3 calculs numériques basé sur le model dynamique de véhicule :

a-Calcul de la puissance requise d'après le modèle mécanique :

La formule de la puissance utile pour le véhicule électrique est :

$$P_r = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot v^3 + m \cdot g \cdot \mu \cdot v + m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot v$$

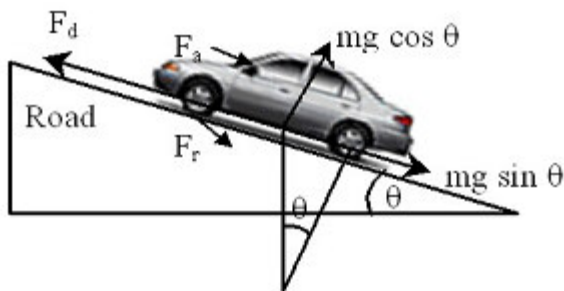


Figure.(VI.5) : Forces appliquées sur le véhicule en régime dynamiques sur une pente

Supposant la vitesse constante 50km/h sur une pente nulle et que $\mu=0.015$.

$$m_t = 1300 \text{ Kg}$$

$$C_x = 1/3$$

$$S = 2.6 \text{ m}^2 \text{ ('surface frontal')}$$

$$\rho = 1.225 \text{ Kg/m}^3,$$

L'équation qui définit se paramètre pour une vitesse donnée :

$$P_r = 1/2 \times (1.225) \times (2.6) \times (0.33) \times (14^3) + 1300 \times (9.81) \times (0.015) \times 14 + 1300 \times (9.81) \times (0) \times 14$$

$$P_r = 1443 + 2678 = 4121 \text{ W.}$$

Dans une heure, avec une vitesse linéaire de 50 km/h le véhicule parcourt 50km de distance sur un trajet plat sans pente, il consomme une énergie de 4.12kWh.

Supposant la vitesse constante 50km/h sur une pente de 5% de trajet type urbain.

$$P_r = 1/2 \times (1.225) \times (2.61) \times (0.33) \times (14^3) + 1300 \times (9.81) \times (0.015) \times 14 + 1300 \times (9.81) \times (0.05) \times 14$$

$$P_r = 1443 + 2678 + 8927 = 13047 \text{ W.}$$

L'accélération elle-même demande une puissance supérieure, si on désire une accélération constante depuis l'arrêt vers une vitesse qui tend vers $v = 50 \text{ Km/h}$ en 8 secondes sur une pente nulle :

$$50/3.6 = 14 \text{ m/sec}$$

$$\frac{dv}{dt} = 14 - 0/8 = 1.7 \text{ m/sec}^2$$

$$F_c = m \times \frac{dv}{dt}$$

$$P_c = F_c \cdot v = 1300 \cdot 1.7 \cdot 14 = 30.94 \text{ kW}$$

L'énergie consommée après 8 secondes d'accélération :

$$E_c = 30.94 \times (8/3600) = 69 \text{ Wh} = 0.069 \text{ kWh}$$

L'accélération nominale atteinte est 2 m/s^2 sur une pente nulle vers la vitesse limite de 50Km/h ou (14m/sec).

N.B: Il est toléré de dépasser la puissance nominale jusqu'au double pendant plusieurs secondes, cependant la puissance des batteries doit être suffisante pour s'accorder avec la puissance de l'accélération requise.

b- Calcule de la vitesse de rotation de moteur avec $v = 50\text{Km/h}$:

Transfert de la vitesse par exemple si le rapport vitesse est : $k=2.4$ et $R=0.32 \text{ m}$

$$N=60 \cdot \Omega / (2 \cdot \pi) \quad (\text{tr/mn})$$

$$\Omega_{\text{roue}} = v / R \quad \Omega_{\text{mot}} = \Omega_{\text{roue}} \cdot k \quad (\text{rad/sec})$$

$$\Omega_{\text{mot}} = 14/0.32 = 43.75 \text{ rad/sec} \times 2.4 = 105 \text{ tr/min} \times 2.4 = 252 \text{ tr/min}$$

c- Calculer le couple développé par le moteur :

Le couple de moteur permanent C_{mot} requis à 50 Km/h pour une pente nulle :

$$C_{\text{roue}} = F_r \cdot R = [(1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot v^2 + m \cdot g \cdot p \% + \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha))] \cdot R$$

Le couple permanent doit être voisin de 35 N.m

Si une accélération de 1m/s^2 , est souhaitée ; il faut pour cela un surcroît de couple transitoire (couple d'accélération des roues) sera voisin de 415 N.m

Le couple résultant sera la somme des deux modules de couples.

$$C_{\text{roue}} = C_r + C_a = 450 \text{ N.m}$$

$$C_{\text{mot}} = \eta / k \cdot (F_r \cdot R_r) = \eta / k \cdot [m \cdot dv/dt] \cdot R$$

On retrouve le couple au niveau de moteur est :

$$C_{\text{mot}} = \eta / k \cdot C_{\text{tot}} = 450 \times (0.95 / 2.4) = 180 \text{ N.m}$$

$$P_{\text{u mot}} = C_{\text{mot}} \cdot \Omega_{\text{mot}} = 180 \times 165 = 29800 \text{ W.}$$

d-Calcul de la vitesse linéaire constante maximale de véhicule électrique :

P_{out} : puissance nominale de moteur électrique.

$$C_x = 0.33, S = 2.6 \text{ m}^2, \rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$$

$$v_1 = 0, \alpha = 0, m_t = 1300 \text{ Kg}, v = 28 \text{ m/sec}, \mu = 0.02,$$

$$P_{\text{out}} = 1/2 \cdot (C_x \cdot S \cdot \rho \cdot v^3) + m \cdot g \cdot \mu$$

On négligeant P_s devant P_a aux vitesses supérieures on retrouve :

$$P_{\text{out}} = 1/2 \cdot (C_x \cdot S \cdot \rho \cdot v^3)$$

$$P_{\text{out}} \times 1000 = 1/2 \cdot (C_x \cdot S \cdot \rho \cdot v^3) \quad (\text{kW})$$

La résolution de l'équation théorique pour : $P_{\text{out}} = P_{\text{max}}$

Alors on retrouve la formule : $P_{\text{max}} = 0.525 \times v^3$

$$\text{Cela implique : } v = \sqrt[3]{\frac{P_{\text{max}}}{0.525}} \quad (\text{m/s})$$

Qui est la vitesse nominale théorique à obtenir avec ce type de moteur sur une route plate (avec une pente nulle) en négligeant les forces de frottements solides.

La courbe de la figure (VI.6) illustre la puissance nécessaire pour maintenir la vitesse stabilisée sur terrain plat sur la base des paramètres du véhicule choisi, avec le rendement de la transmission mécanique estimé à 0.95. La contrainte pour dimensionner le moteur électrique est l'accélération de 0 à 50 km/h en 8

$$\text{secondes : } a = \frac{dv}{dt} = 1.7 \text{ m/s}^2 \quad (\text{'accélération constante'}) :$$

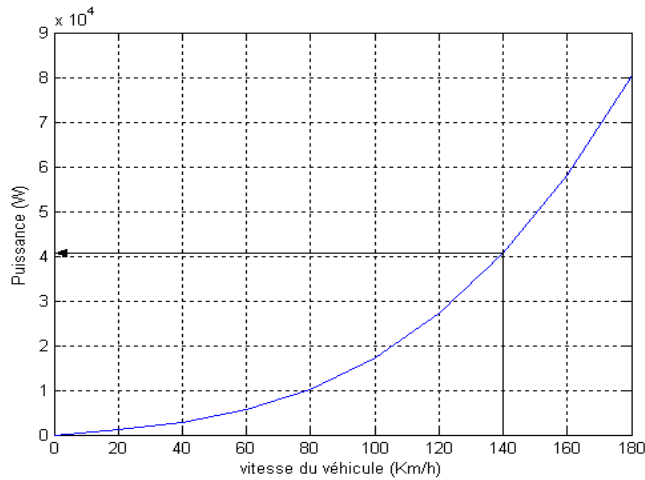


Figure (VI.6) : Puissance nécessaire à vitesse stabilisée sur terrain plat

La figure (VI.7) illustre la puissance demandée pour répondre à cette contrainte. A une vitesse de 120 km/h stabilisée sur terrain plat, la puissance nécessaire est donc de l'ordre de 30 kW. Le choix s'est arrêté sur un moteur de 37 kW (50HP) comme puissance maximale, son régime de rotation maximum est de 475 rd/s.

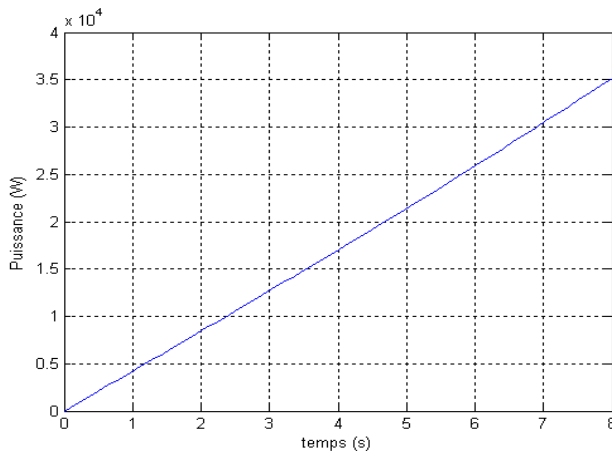


Figure (VI.7) : Accélération de 0-50km/h

La courbe montre que la puissance nécessaire est d'environ 35 kW. On a donc choisi le moteur asynchrone LS 225 ST - 37 kW – Leroy-Somer dont les caractéristiques peuvent être consultées dans l'annexe I.

VI-4 Modèle de la machine asynchrone :

Le moteur asynchrone a été modélisé dans le référentiel naturel (a, b, c) et commandé par une technique de « contrôle vectoriel à flux rotorique orienté » classique dans le référentiel de Park (d, q), voir les annexes.

Le moteur est commandé seulement en couple selon l'expression suivante :

$$C_e = p \cdot \frac{M_{sr}}{L_r} \cdot \Phi_{rd} \cdot I_{sq}$$

• Il n'est pas commandé en vitesse car elle est imposée par le régime de rotation de l'arbre secondaire Ω_{roue} et le rapport de la boîte de vitesses k selon l'équation : $\Omega_{mot} = k \cdot \Omega_{roue}$.

En résumé, le modèle du moteur électrique consiste en trois entrées :

la consigne du couple C_e^* , la tension d'alimentation V_{bat} et la vitesse de rotation Ω_{mot} et deux sorties : le couple réel fourni C_e et le courant batterie I_{bat} .

Le courant de la batterie est calculé, par un bilan de puissance en négligeant les pertes dans l'onduleur, de la façon suivante :

$$I_{bat} = \frac{v_{s1}i_{s1} + v_{s2}i_{s2} + v_{s3}i_{s3}}{V_{bat}},$$

v_{si} étant la tension instantanée aux bornes d'une phase

i_{si} étant le courant instantané absorbé par une phase.

VI-5 Caractéristique couple-vitesse :

En supposant que la MLI est vectorielle, la tension maximale, dans le plan (d,q), que peut délivrer l'onduleur sans distorsion est :

$$V_{max} = V_{\max(a,b,c)} \sqrt{\frac{3}{2}} = \frac{V_{bat}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{3}{2}} = \frac{V_{bat}}{\sqrt{2}}.$$

Le courant maximal admissible dans le plan (d,q) $I_{max} = 1.3 I_n \sqrt{\frac{3}{2}} = 151$ A, en

admettant un dépassement de 30% par rapport au courant nominal I_n égale à

$67\sqrt{2}$ A. Ayant I_{max} , on peut passer maintenant au calcul du couple maximal

C_{max} que peut fournir le moteur.

En régime permanent, $A \Rightarrow I_{sq} = \sqrt{I_{max}^2 - I_{sd}^2} \approx 145$ A

$$\Rightarrow C_{\max} = p * I_{sd} * \Phi_{rd} = 2 * 145 * 1.2 = 348 \text{ N.m}$$

A présent, on va associer la batterie précédemment dimensionnée à la machine et sa commande afin de valider la caractéristique couple-vitesse.

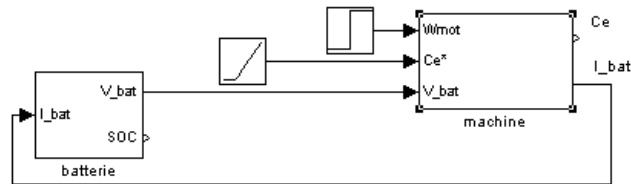


Figure VI.8: Association moteur-batterie

C_{\max} est le couple maximal jusqu'à la vitesse de base. Pour toute vitesse Ω_{mot} supérieure à la vitesse de base, nous allons déterminer le couple maximal que peut délivrer le moteur en imposant une rampe de couple de 400 N. m/s.

Par exemple pour $\Omega_{\text{mot}} = 920 \text{ tr/mn}$, le couple maximal vaut 270 N.m, comme le montre la figure.

À Cette même vitesse de 920 tr/mn, La figure VI.9 montre la réponse à un échelon de couple de 270 N.m.

Le module de la tension aux bornes de la phase vaut $\frac{V_{bat}}{\sqrt{3}}$, c.à.d. que le couple correspondant est le couple maximal pour cette vitesse.

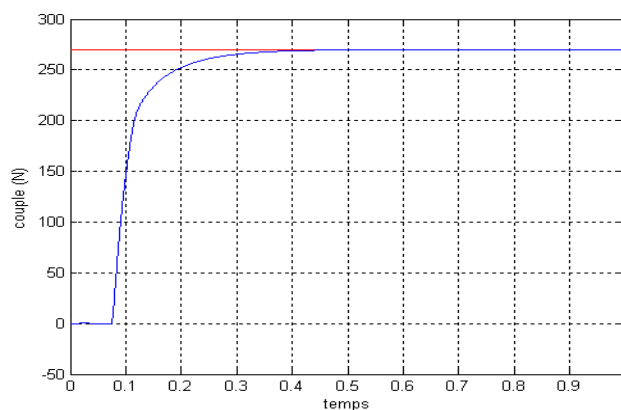


Figure VI.9 : Réponse à un échelon de 270 N.m

Le même travail est répété pour plusieurs vitesses afin d'avoir la caractéristique finale de la figure VI.10, et ceci pour un $\text{soc} = 0.7$

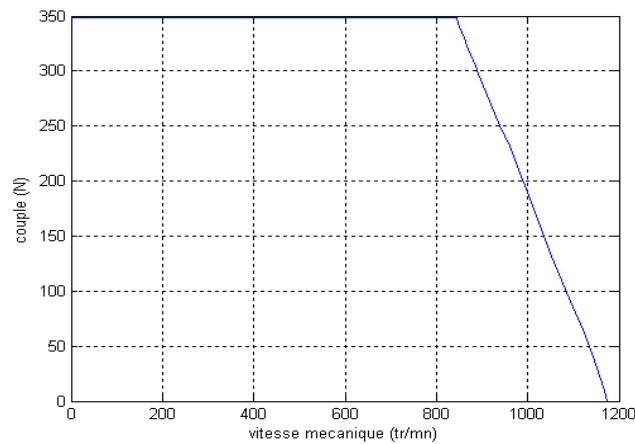


Figure VI.10: Caractéristique couple-vitesse

La même procédure est répétée pour plusieurs valeurs de soc ($\text{soc}=0.8$ et 0.95).

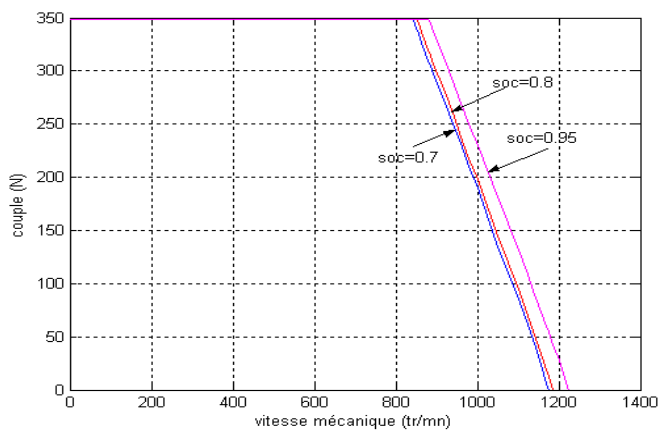


Figure VI.11: Variation de la caractéristique avec le soc

La figure VI.11 montre que montre l'influence du soc sur la caractéristique :

Interprétation des résultats :

- Pour une vitesse donnée, plus la batterie est chargée, plus le couple fourni est grand.
- La vitesse de base augmente avec l'état de charge.

En effet pour un bon fonctionnement de la batterie, soc doit rester entre 0.7 et 0.95.

A $\text{soc} = 0.7$, la vitesse du moteur ne dépasse pas 1175 tr/mn ce qui n'est pas suffisant, une plus large plage de vitesse pour le moteur électrique s'avère indispensable, d'où la nécessité de passer au défluxage.

Sachant qu'avant d'introduire le défluxage, le flux de référence était de 1.2 Wb, lorsque la tension atteint sa valeur maximale, on va réduire le flux, donc défluxer. Le fonctionnement du moteur se fait alors à tension constante égale à celle atteinte à la vitesse de base. Le nouveau flux de référence à introduire dans la commande, a été calculé de la façon suivante :

$$\Phi_{ref} \cong \frac{L_m}{L_s} * \frac{1}{\Omega_s} * \sqrt{(V_s)_{max}^2 - (\Omega_s \sigma L_s I_{sq})^2} ; (V_s)_{max} = 258 \text{ V}$$

est la tension maximale atteinte, dans le plan (d, q) à la vitesse de base et pour $\text{soc} = 0.7$

La figure VI.12 montre la variation du nouveau flux de référence avec la vitesse du moteur

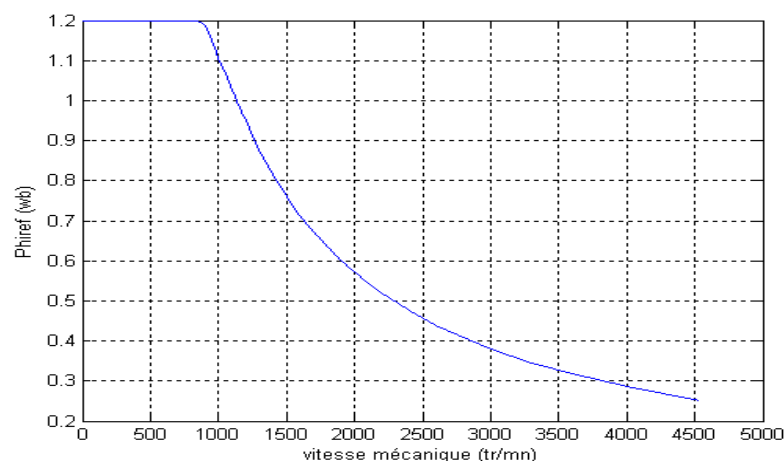


Figure VI.12 : Interaction couple- vitesse le nouveau flux de référence

VI-6 Conclusion :

Au début, la puissance propulsion motrice est généralement utilisée pour accélérer le véhicule pour surmonter la résistance des frottements solides, quand la vitesse voulue est atteinte, la puissance requise est utilisée pour maintenir la vitesse constante en surmontant la résistance des frottements solides et frottements aérodynamique ainsi que la force due à la pente.

Pour une vitesse donnée plus la batterie est chargée plus le couple est grand et la vitesse de base augmente avec l'état de charge.

VI Modélisation et simulation du système GPV- batterie:

VI-1 Introduction :

Dans ce chapitre, on présentera une étude de modélisation et de simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT numérique

« Perturbation et observation ».

Ce système est composé d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « Boost », une commande MPPT « perturbation et observation » ainsi qu'une charge.

Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/SIMULINK.

VI-2 L'outil Matlab / Simulink :

MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
Des bibliothèques de blocs Simulink spécialisés (Blocksets).

D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur. Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques.

Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal .

VI-3 Estimation de l'énergie produite par le module photovoltaïque :

Le modèle **M250-60GET AK BLACK** panneau solaire avec 60 cellules en silicium monocristallin :

a .Paramètres électriques de module photovoltaïque :

$$P_{opt} = 245W_c \text{ (STC)}$$

$$U_{opt} = 29V$$

$$U_{co} = 36,7V$$

$$I_{opt} = 8.45A$$

$$I_{cc} = 8.98A$$

b. Dimension physique de module photovoltaïque :

$$\text{Dimension d'une cellule} \quad 156*156 \text{ mM}$$

$$\text{Dimension module} \quad 1680*990 \text{ mM}$$

$$\text{Le poids de module} \quad 24Kg$$

$$\text{Surface d'un seul module} \quad 1.663 \text{ m}^2$$

La dimension de la tôle de véhicule type permis une surface 3 fois plus large cela nécessite 3 modules regroupés de modèle proposé

En estime la largeur de véhicule a 1.7 m et la longueur totale de 3.5m

Ce qui permet théoriquement de disposer d'une surface 6 m² approximativement.

3 modules seront suffisants pour présenter une surface opérationnelle de 5m².

c. Calcul de la puissance crête produite par le GPV :

La puissance optimale sera égale à : $245 \times 3 = 735 \text{ W c (STC)}$.

Pour un nombre d'heures d'ensolleiment 8 heure/jour avec une efficacité moyenne de 80%, l'énergie produite via le panneau solaire sera de l'ordre de :

Production électrique = puissance de PV x efficacité x nombre h/jour(Wh)

$$E_{PV} = 735 \times 8 \times 0.8 = 4700Wh \dots\dots\dots = 4.7 \text{ kWh}$$

C'est l'énergie électrique moyenne produite au cours de la journée qui est approximativement égale au rayonnement moyen reçue dans la région méditerranéenne. Figure (I.1.b)

D'après le bilan énergétique, Cette énergie sera stockée par la batterie pour fournir une énergie favorisant une autonomie de 60 Km approximativement par jour, avec une vitesse constante moyenne de 50Km/h.

VI-4 Simulation de Générateur photovoltaïque avec la méthode MPPT:

La figure (VI.1) illustre le bloc schématique de SIMULINK du système Photovoltaïque, Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge) adapté par la commande MPPT « perturbation et observation»:

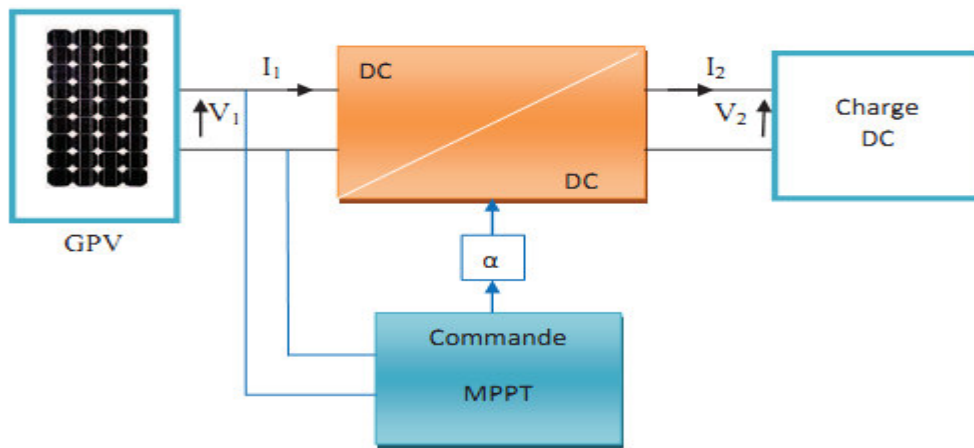
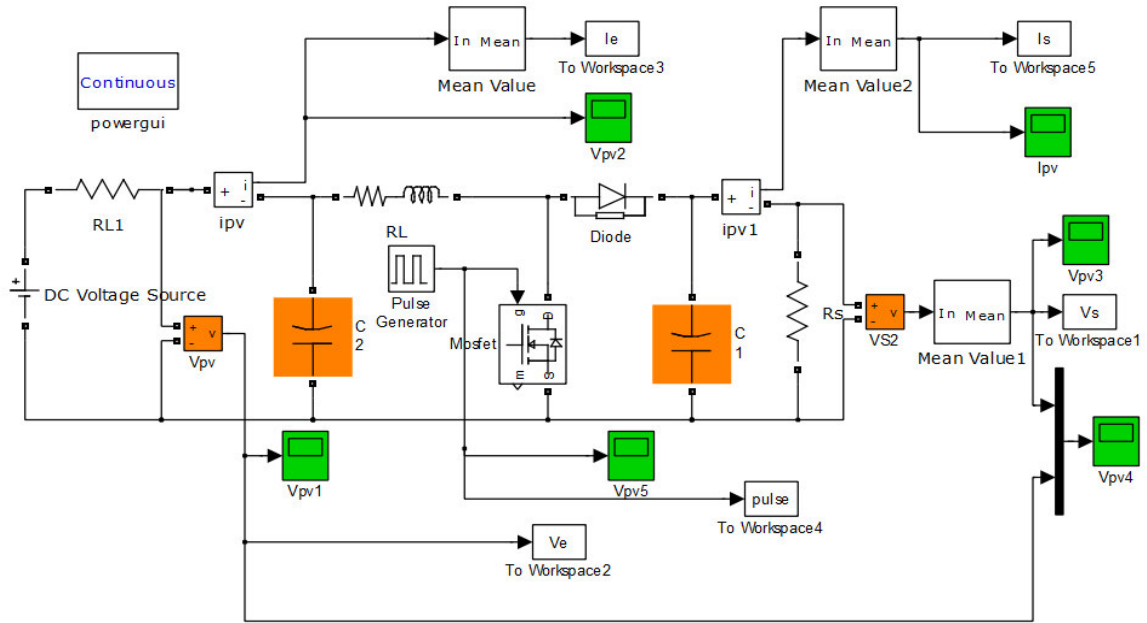


Figure (VI.1): Schéma de la chaîne élémentaire de générateur PV et Régulateur

VI-4.1 Modèle MATLAB SIMULINK du hacheur survolteur :

La figure (VI.2) représente le schéma block d'un convertisseur survolteur. L'hacheur survolteur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque. La commande MPPT adapte le générateur photovoltaïque à la charge: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque.



Figure(VI.2) : Schéma block d'un convertisseur survolteur

VI-4.2 Modèle SIMULINK de régulateur MPPT avec algorithme P&O:

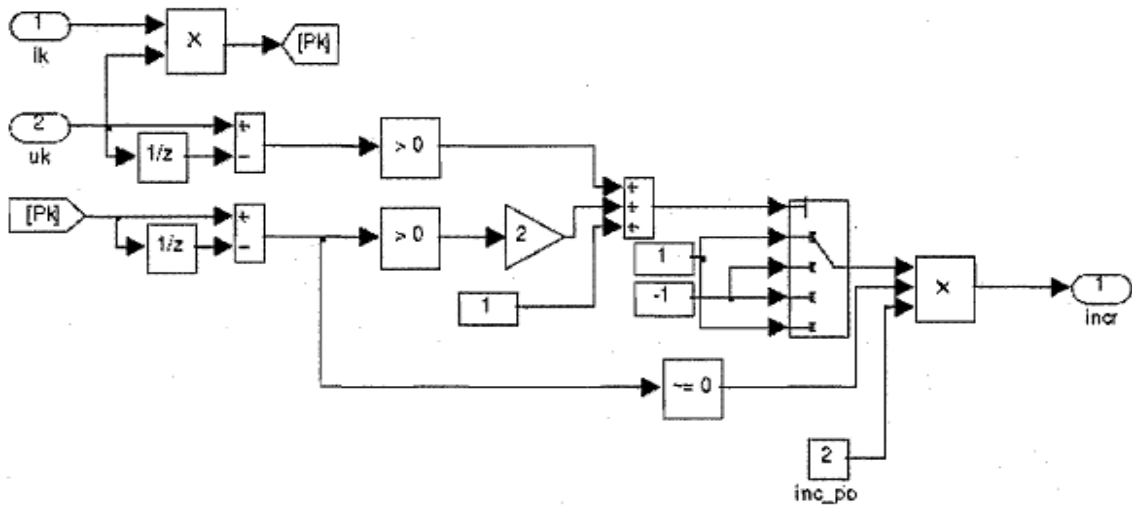


Figure (VI. 3) : Schéma d'implémentation de la méthode P &O sous matlab-simulink

VI-4.3 Modèle MATLAB SIMULINK de générateur photovoltaïque :

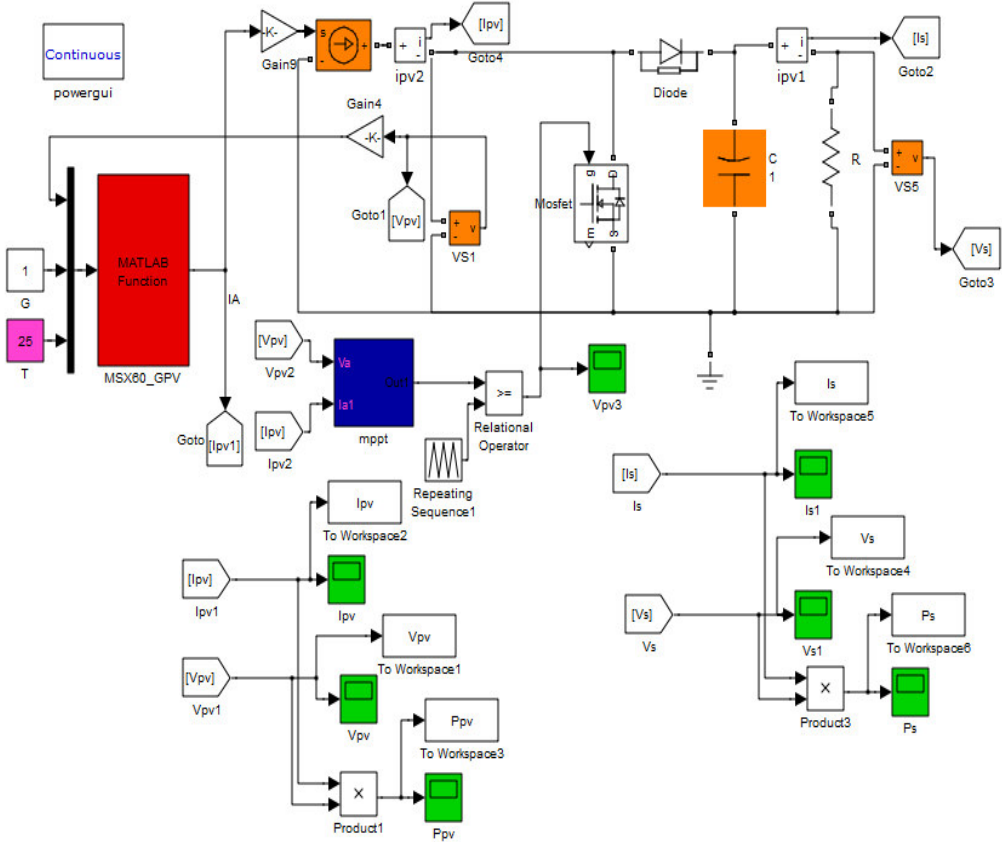


Figure (VI.4): Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec La commande MPPT (P&O).

VI-5 Conclusion :

Dans ce chapitre, la modélisation de l'ensemble composé de : générateur photovoltaïque, hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation » est présentée.

D'après les résultats obtenus de la simulation, on remarque :

Les performances du générateur photovoltaïque se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et les variations de la charge.

Les performances du générateur photovoltaïque sont évaluées à partir des conditions standards (STC) : éclairement 1000W/m^2 température 25°C .

Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque.

La commande MPPT adapte le générateur photovoltaïque à la charge: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif initial de ce travail était de mettre en place un outil de simulation de l'ensemble de la chaîne de traction de véhicule électrique avec assistance solaire et d'adopter une méthodologie permettant d'étudier l'apport énergétique par le générateur photovoltaïque sur le fonctionnement de véhicule.

Le véhicule a été modélisé simplement comme une masse en mouvement soumise à la force motrice et aux forces résistantes.

La boîte de vitesses est considérée comme parfaite et représentée par un rapport de transmission.

Nous avons au cours de ce travail, d'abord présenté le fonctionnement de générateur photovoltaïque avec un régulateur MPPT.

Ce travail a permis de définir le moteur la machine à induction avec une puissance nominale de 37kW.

Nous avons ensuite présenté le dimensionnement des principaux composants de la chaîne de traction électrique en fonction des critères pour un véhicule destiné à un usage urbain.

Afin de préparer la simulation numérique de l'ensemble de la chaîne, nous avons développé la modélisation de La machine à induction représentée dans le référentiel de Concordia par ses équations d'état. Elle est contrôlée dans le référentiel (d, q) par une technique de commande à MLI.

La batterie a été modélisée par un circuit électrique équivalent de Thévenin constitué par une f.e.m (E) en série avec une résistance R. Ces paramètres ont été identifiés à partir des caractéristiques de décharge et leurs évolutions en fonction de l'état de charge.

Nous avons aussi dimensionné la batterie, de type LI-ION. Elle est constituée de 72 éléments en série et de 7 éléments en parallèle.

Par la suite, nous avons mis en place la stratégie de gestion de l'énergie à bord du véhicule. En fonction de la puissance demandée, de la vitesse du véhicule et de l'état de charge de la batterie.

Perspectives :

Nous avons identifié plusieurs axes dans lesquels on pourrait poursuivre ce travail.

On pourrait tout d'abord améliorer la modélisation par :

- Amélioration de rendement des modules photovoltaïques en optant pour des nouveaux matériaux.
- la prise en compte de la température dans le modèle de la batterie.
 - En ce qui concerne la gestion de l'énergie, on pourrait aussi introduire dans la simulation les demandes de puissance des auxiliaires (éclairage, climatisation...).
 - Introduire les super-condensateurs comme source d'énergie électrique pour améliorer les performances mécaniques surtout en période d'accélération.
 - la prise en compte de l'effet régénératif d'énergie de moteur asynchrone lors de freinage et ralentissement.

ANNEXES
ET
BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

I- PAAMETRES DU MOTEUR ASYNCHRONE A CAGE :

Caractéristiques des moteurs asynchrones LS 225 ST-37 kW-Leroy Somer :

Les paramètres du réseau :

<i>Puissance nominale</i>	$P_n = 37 \text{ kW}$
<i>Courant nominal:</i>	$I = 67 \text{ [A]}$
<i>Id/In</i>	6.83
<i>Cd/Cn</i>	2.4
<i>Tension :</i>	$V = 220/380 \text{ [V]}$
<i>La fréquence :</i>	$f = 50 \text{ [Hz]}$
<i>Masse</i>	$M_{\text{mot}} = 304 \text{ Kg}$

Les paramètres électriques :

<i>Vitesse nominale :</i>	$W = 1475 \text{ [trs/mn]}$
<i>Nombre de paire de pôles:</i>	$P = 2 \text{ paires}$
<i>L'inductance statorique :</i>	$L_s = 31.4 \text{ [mH]}$
<i>Résistance statorique:</i>	$R_s = 85,1 \text{ [m}\Omega\text{]}$
<i>Résistance rotorique :</i>	$R_r = 65,8 \text{ [m}\Omega\text{]}$
<i>L'inductance rotorique :</i>	$L_r = 29.1 \text{ [mH]}$
<i>L'inductance mutuelle:</i>	$L_m = 29,1 \text{ [mH]}$
<i>Facteur de puissance</i>	$\cos \alpha = 0.86$
<i>Rendement</i>	92.7%
<i>Inductance de fuite totale</i>	$l_f = 2.3 \text{ mH}$

Les paramètres mécaniques :

<i>Coefficient de frottements visqueux:</i>	$K_f = 0.008 \text{ [Kg.m}^2\text{]}$
<i>Moment d'inertie</i>	$J = 0,23 \text{ [Kg.m}^2\text{/s]}$

ANNEXES

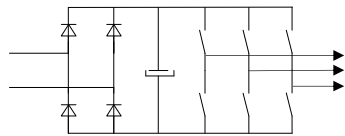
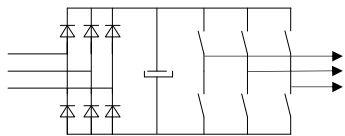
Un variateur de vitesse est composé principalement :

- ❶ Un onduleur (qui convertit un signal continu en un signal alternatif de fréquence variable)
- ❷ La commande en M.L.I. est utilisée pour l'onduleur car elle permet d'obtenir un courant dont la forme est très proche d'une sinusoïde.
- ❸ Pour conserver un couple suffisant aux faibles vitesses (donc aux faibles fréquences), on doit maintenir le rapport U / f constant.

VARIATEUR DE VITESSE ALTIVAR SERIE 45

Le variateur de vitesse ALTIVAR 66 de SCHNEIDER (ancien télémécanique).

B) CARACTERISTIQUES DES ALTIVAR 66

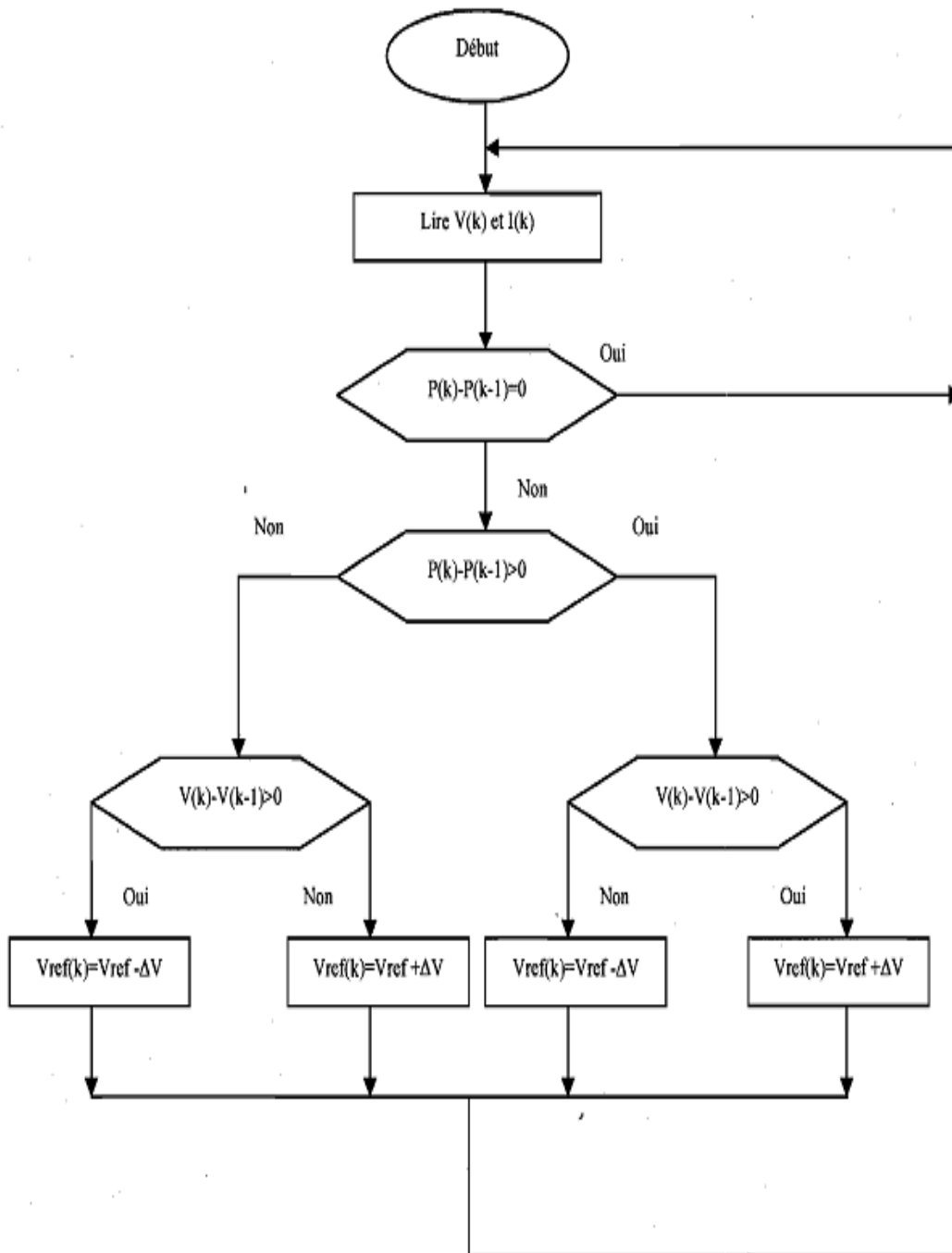
Référence	ATV 66 M2	ATV 66 N4
Alimentation du redresseur	Monophasé	Triphasé
Réseau d'alimentation	220-240 V 50 : 60 Hz	380-415 V 50 : 60 Hz
Pont de puissance		
Gamme de fréquence	1 à 67 Hz	1 à 110 Hz
Freinage d'arrêt	/////	Par injection de courant continu
Freinage de ralentissement	Rhéostatique avec module option	Rhéostatique avec module option
Tension moteur	220-240 V	380-415 V
Gamme de puissance	0.75 à 37 kW	0.75 à 250 kW

C) OPTIONS :

Les variateurs de vitesse peuvent être équipés en option des éléments suivants :

- Résistance externe pour le freinage
- Inductances de lignes pour la réduction des courants harmoniques.

ANNEXES



Organigramme algorithme MPPT à base de la méthode perturbation et d'observation

ANNEXES

Programme matlab de la simulation numérique de fonctionnement de panneau photovoltaïque pour différentes températures et différents éclairagements :

```
%programme de simulation de l'opération de panneau
photovoltaïque avec MPPT
%paramètres panneau pv
ki=0.00023; ('A/k')
iscr=3.75; ('amp')
t=28+273; ('kelvin')
tr1=40; ('fahrenheit')
tr=((tr1-32)*5/9)+273; ('kelvin')
s=[1000 800 600 400 200]; ('w/m2')
irr=0.000021;
k=1.38065e-23; ('k boltzman')
q=1.6022e-19; ('charge electron en c')
a=2.15;
eg=1.166; ('gap si')
alpha=0.473;
beta=636;
eg1=eg-(alpha*t*t)/(t+beta)*q; ('joules')
np=7; ('parallel')
ns=72; ('serie')
vo=[0:1:50]; ('volt')
rs=0.5; ('ohm')
%BOUCLE
for i=1:5
    iph=(iscr+ki*(t-tr))*((s(i))/1000); ('amp')
    irs=irr*((t/tr)^3)*exp(q*eg1/(k*a)*((1/tr)-(1/t))); ('amp')
    io=np*iph-np*irs*(exp(q/(k*t*a)*vo./ns)-1); ('amp')
    po=vo.*io; ('watt')
    %GRAPH
    figure(1)
    plot(vo,io);
    axis([0 50 0 40]);
    xlabel('voltage en volts');
    ylabel('courant en amps');
    title('graphe courant-tension GPV ');
    hold on;
    grid
    figure(2)
    plot(vo,po);
    axis([0 50 0 800]);
    xlabel('voltage en volts');
    ylabel('puissance en watt');
    title('graphe puissance GPV avec MPPT');
    hold on;
    grid
end;
```

Les résultats de la simulation sont illustrés dans les figures ci jointes.

ANNEXES

```
%modell.programme matlab de modele dynamique de vehicule electrique
mv=1300;%(poids ve kg)
g=9.81;%(constante de la gravitation)
R=0.32;%(rayon roue)
vo=14;%( vitesse constante)
Cx=0.33;%(coef aerodynamique)
S=2.6;%(surface frontale)
Rho=1.225;%(coef air)
fa=(1/2)*Rho*Cx*S*(vo^2)
pa=(1/2)*(Rho*Cx*S)*(vo^3)
Crr=0.01*(1+(3.6/100)*vo);%(constante Roulements)
fs=Crr*mv*g
ps=Crr*mv*g*vo
p=2;%(paires de poles)
alpha=0;%(pente)
sin(alpha)
fm=sin(alpha)*mv*g
pm=sin(alpha)*g*vo
pr=pa+ps+pm
a=1.7;%(acceleration ve m.sec-2)
fd=mv*a
pd=mv*a*vo
ft=fa+fs+fm+fd
Pt=pa+ps+pm+pd
Crd=fd*R
%(couple utile roue a acceleration constante(N.m))
Crv=(fa+fs+fm)*R
%(couple utile roue a vitesse constante(N.m))
w=vo/R
%(vitesse de rotation roue 'rad/sec')
wo=w*60/(2*pi)
%(vitesse angulaire relie au moteur 'rpm')
%puissance moteur electrique
wsmax=(314/p)%(vitesse de synchronisme)
wn=154
%calcul vitesse max
Pout=[37];%(puissance nominale moteur en Kw)
vmax=((Pout*1000/(1/2)*(Cx*S*Rho))^(1/3))*3.6
%(VITESSE MAXIMALE DE VIHICULE 'Km/h')
v1=vmax/3.6
%(VITESSE MAXIMALE DE VIHICULE 'm/sec')
wmax=v1/R
k=wsmax/wmax
%(rapport de reduction pour une vitesse vo)
we=w*k
%(vitesse de rotation moteur rad:sec )
Rm=0.92;%('rendement de transmission')
Ced=(Crd/k)*Rm
Cev=(Crv/k)*Rm
%(couple utile moteur N.m)
Cn=Pout*1000/wn
%energie cinetique a recuperer par deceleration:
Ec=1/2*mv*(vo^2)
%(joule)
Ekwh=Ec/3600
%(KWh)
v=[0:1:40];
for i=1:40
    ftot=v(i).*((1/2)*Rho*Cx*S*(v(i)^2)+fs+fm)
    pd=v(i).*fd
    ptot=v(i).*ftot;
```

ANNEXES

```
%GRAPH
grid
figure(3)
plot(v(i),ptot);
axis([0 40 0 40000]);
    xlabel('vitesse en m/s');
    ylabel('puissance en watt');
    title('graphe puissance vitesse');
    hold on;
grid
figure(4)
plot(v(i),pd);
axis([0 40 0 40000]);
    xlabel('vitesse en m/s');
    ylabel('puissance en watt');
    title('graphe puissance vitesse');
    hold on;
end;
```

BIBLIOGRAPHIE

- [1]: Ahmed ZERGA : «**Optimisation du rendement d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin de type p-n** », Mémoire de Magistère Université de Tlemcen-**1998**.
- [2]: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/> .
- [3]: Djamel BELLALA: « **Contribution a l'Optimisation des Systèmes de conversion d'Energie Application aux Systèmes Photovoltaïques** », Thèse Doctorat en sciences, Université de Batna.
- [4]: Zakaria BENDJELLOULI: «**Contribution a la modélisation d'une cellule solaire.**», mémoire de Magister, Université de Bechar.**2008/2009**
- [5] : B. FLECHE - D. DELAGNES : «**Energie solaire photovoltaïque.doc** » **juin 2007**
- [6] : M^{me}. Souad ZAAMTA: « **Réalisation d'un régulateur solaire à base de Microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des Accumulateurs** » mémoire de magister Centre Université Larbi-Ben M'hidi Oum El-Bouaghi ; **20/02./2008**.
- [7] : M .ANGEL - C.PASTOR: « **conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques** » Thèse de doctorat de l'Institut National des sciences Appliquées de Toulouse, septembre.**2006**.
- [8] : <http://energies2demain.com/wpcontent/uploads/polycristaline.jpg>.
- [9] : www.ohmeo.com/composition-panneau-PV.
- [10] : [www .solarelectripower.org](http://www.solarelectripower.org)
- [11] : Othmane BEN SEDDIK, Fathi DJALOUUD: «**'étude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque** » .université de Ouargla, master automatique Le 27 juin **2012**
- [12] : Ibrahim BEN DJAMAA: «**'Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque'** » université de Tlemcen, Mémoire de Magistère **2011/2012**.

- [13] : F.BENYAROU :« **Conception assistée par ordinateur des systèmes photovoltaïques modélisation, dimensionnement et simulation** », Thèse de Doctorat d'état. Université de Tlemcen, Juillet-2004.
- [14] : ELEC 2670 - cours n° 5 : «**'caractérisation des batteries'** » université catholique de Louvain **2014**.
- [15] : Jean Pierre CARON, Jean Paul HAUTIER. « **Modélisation et commande de la machine asynchrone** » Edition technip, Paris **1995**.
- [16] : Francis LABRIQUE, Guy SEGUIER, Robert BAUSIERE.
« **Les convertisseurs de l'électronique de puissance** » Volume 4
Techniques et documentation-Lavoisier, 2^{ème} édition, **1997**.
- [17] : Djamal BEN ANTAR ; Youssouf DIAF: « **Modélisation et commande d'un onduleur triphasé pilote par MLI a structure Multi niveaux** ». Ingénieur d'état en électrotechnique. **2012**
- [18] :Dramane TRAORE : «**commande non linéaire sans capteur d'une machine asynchrone** ».thèse doctorat **.2008**
- [19] :Salaheddine REZGUI : « **commande de la machine électrique en environnement MATLAB/ SIMULINK en temps réel** » Ingénieur d'état en électrotechnique **2009**
- [20] : Arezki SEDDIKI : «**contribution au control direct du couple (DTC) d'une machine asynchrone a cage alimentée par un onduleur de tension multi niveaux** » .mémoire de magistère **2009**
- [21] : Smail BERKOUNE, Jugurtha CHERIEF: « **étude comparative de la commande par des régulateurs PI, IP et RST continus d'une machine asynchrone**».Ingénieur d'état en électrotechnique **2004/2005**.
- [22] : Hala HANNOUN : «**'Minimisation de l'énergie consommée dans un véhicule hybride thermique-électrique'** » Le 6 juillet **2005**
- [23]: Seref SOYLU: «**'Electric vehicles modeling and simulation.pdf'** » Septembre **2011**.

