

SOMMAIRE

Introduction générale	01
Chapitre I : Energie solaire photovoltaïque	05
I.1. Introduction	06
I.2. Qu'est ce que l'énergie solaire photovoltaïque	06
I.2.1. Ensoleillement et lumière	07
I.2.1.1. Qu'est ce que la lumière	07
I.2.1.2. Rayonnement solaire et atmosphère	08
I.2.2. La conversion photovoltaïque	12
I.2.2.1. L'absorption de la lumière	12
I.2.2.2. Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques	13
I.2.2.3. La collecte de charges	16
I.3. les systèmes photovoltaïques	18
I.3.1. Les éléments d'un système photovoltaïque	19
I.3.1.1. Les modules photovoltaïques	19
I.3.1.2. Stockage d'énergie	28
I.3.1.3. Régulateur de charge	29
I.3.1.4. Les convertisseurs	29
I.3.1.5. Récepteurs pour systèmes autonomes	29
I.3.2. les différents systèmes photovoltaïques	32
I.3.2.1. Systèmes autonomes	32
I.3.2.2. Systèmes autonomes avec stockage	32

I.3.2.3. Systèmes autonomes hybrides	33
I.3.2.4. Systèmes raccordés au réseau	33
I.4. Nouvelle technologie des cellules photovoltaïques faites de films de diamant	34
I.5. Conclusion	35
I.6. Références bibliographiques chapitre I	36
Chapitre II : Adaptation de l'énergie solaire photovoltaïque	37
II.1. Introduction	38
II.2. Concept du MPPT	39
II.2.1. Définition	39
II.2.2. Principe de fonctionnement	39
II.3. Définitions des rendements associés à la chaîne de conversion	40
II.4. La connexion directe GPV-charge comme mode de transfert de puissance	42
II.5. La connexion GPV-charge via un étage d'adaptation continu-continu	44
II.5.1. Hacheur boost (hacheur parallèle ou élévateur)	44
II.5.1.1. Etude d'un hacheur parallèle en conduction continue	45
II.5.2. Mise en parallèle de deux convertisseurs boost	50
II.5.2.1. Etude du convertisseur pour un rapport cyclique inférieur à 0,5	51
II.5.2.2. Etude du convertisseur pour un rapport cyclique supérieur à 0,5	54
II.5.3. Comparaison entre la structure simple et la structure entrelacée	56
II.6. Conclusion	57
II.7. Références bibliographiques chapitre II	58
Chapitre III : Consommation de l'énergie solaire photovoltaïque	59
III.1. Introduction	60

III.2. Courant électrique	60
III.2.1. définition	60
III.2.2. Types de courants électriques	60
III.2.2.1. Le courant alternatif	60
III.2.2.2. Le courant continu	61
III.3. Courant continu ou courant alternatif	61
III.3.1. La guerre des courants	62
III.3.2. Le retour du continu dans le transport d'électricité	62
III.3.3. Comparaison entre les deux régimes	64
III.3.3.1. Courant continu	64
III.3.3.2. Courant alternatif	64
III.3.3.3. Résultats de la comparaison	65
III.4. Consommation de l'énergie solaire photovoltaïque	65
III.4.1. Consommation de l'énergie durant le jour	65
III.4.2. Consommation de l'énergie durant la nuit	66
III.4.3. L'armoire électrique	67
III.5. Fonctionnement des récepteurs électriques	67
III.5.1. L'adaptateur AC-DC	68
III.5.2. Modification proposé pour l'adaptateur AC-DC	69
III.5.3. Récepteurs fonctionnant avec du courant continu	70
III.6. Conclusion	70
III.7. Références bibliographiques chapitre III	71

Chapitre IV : Gestion de la consommation d'énergie	72
IV.1. Introduction	73
IV.2. La domotique	73
IV.2.1. Les domaines de la domotique	73
IV.2.2. Le système domotique MAHAS	74
IV.2.3. Définition de l'agent	75
IV.3. Mécanismes du système MAHAS	77
IV.3.1. Mécanisme réactif	77
IV.3.1.1. Principe du mécanisme réactif	78
IV.3.1.2 Protocole de négociation	78
IV.3.2. Mécanisme anticipatif	80
IV.3.2.1. Principe du mécanisme anticipatif	80
IV.3.2.2. Protocole de négociation	81
IV.4. Conclusion	82
IV.5. Références bibliographiques chapitre IV	83
Chapitre V : Conclusion générale	84
Annexe	87

Liste des abréviations

A	: Surface du panneau
AC	: Courant alternatif
A_{eff}	: Surface de la partie active du panneau
C	: Vitesse de la lumière
DC	: Courant continu
E	: Energie d'un photon
E_g	: Le gap optique
eV	: Electron Volt
G	: L'irradiance
GPV	: Générateur photovoltaïque
h	: Constante de Planck
HVDC	: High-Voltage Direct Current
I_{pv}	: Courant délivrée par le GPV
MAHAS	: Multi-Agents Home Automation System
MPPT	: Maximum Power Point Tracker
P_{max}	: Puissance maximale potentiellement disponible a la sortie du GPV
P_{out}	: Puissance a la sortie de l'étage d'adaptation
PPM	: Point de Puissance Maximale
P_{pv}	: Puissance délivrée par le GPV
PV	: Photovoltaïque
R_c	: Résistance équivalente de charge
R_{opt}	: Résistance équivalente optimale du GPV
R_{pv}	: Résistance équivalente du GPV
STC	: Standard Test Conditions
VAC	: Volts Alternating Current

VDC	: Volts Direct Current
V_{pv}	: Tension délivrée par le GPV
W_c	: Watt crête
a	: Rapport cyclique
a_{opt}	: Rapport cyclique optimale
λ	: Longueur d'onde
v	: La fréquence

Introduction générale

cliccours.com

Depuis le début du 21^{ème} siècle, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde. Il semble que tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part, quels que soient les cas de figures envisagés. De nos jours, une grande partie de la production mondiale est à partir de ressources fossiles. La consommation de ces ressources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y a plusieurs façons d'agir :

- Diminuer la consommation des récepteurs d'énergie ;
- Améliorer et repenser la structure des récepteurs afin d'augmenter leurs rendements ;
- Augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant respectivement leurs efficacité ;
- Trouver et développer de nouvelles sources d'énergie : l'utilisation et le développement des énergies renouvelables.

Dans le monde, nous projetons la consommation de d'électricité (TWh) pour le demi-siècle qui vient, sur une base d'une croissance annuelle de 2% par an. La figure 1 montre l'évolution des parts de l'électricité d'origine renouvelables (hydraulique, photovoltaïque, éolienne) pouvant satisfaire jusqu'à 60% de la consommation mondial en 2050.

Le résultat est surprenant : bien que non mesurable aujourd'hui, la contribution du photovoltaïque devient significative à partir de 2025 en couvrant la totalité des toitures, elle présente 7% (1678 TWh/an) et pourrait atteindre 28% en 2050. [1]

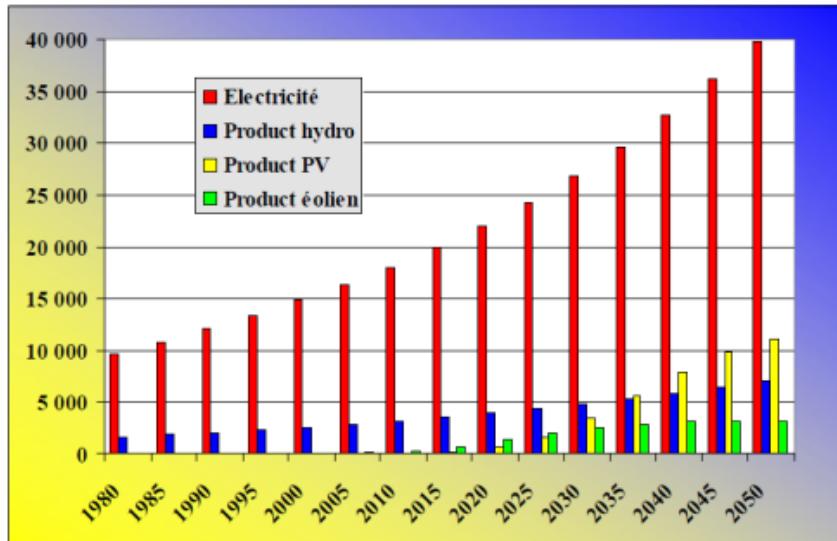


Figure 1 : Evolution des parts de l'électricité d'origine renouvelable

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom). Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...).

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant plusieurs jours

Une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité : c'est **l'énergie solaire photovoltaïque**. Ce mode de production ne nécessite pas de réseau de distribution. En effet on peut produire de l'énergie électrique là où on la consomme :

- Villages isolés;
- Relais de communication ;
- Pompage de l'eau ;
- Refuges ;
- Maisons.

Dans ce mémoire nous allons nous intéresser sur la production, l'adaptation, la consommation et la gestion de l'énergie solaire photovoltaïque adaptée pour une maison.

Dans le début de ce mémoire, nous allons présenter des généralités sur l'exploitation de l'énergie solaire, plus particulièrement la production de l'électricité photovoltaïque ainsi que les différents systèmes de consommations et leurs composants. Par la suite, nous évoquerons le rôle important de l'utilisation d'un étage d'adaptation qui nous permet le suivi du point MPPT.

Dans le troisième chapitre, nous allons revenir sur un débat qui a eu lieu à la fin du 19^{ème} siècle, il a imposé un énorme basculement sur la production, le transport et la consommation d'énergie électrique. A l'époque l'alternatif l'a emporté grâce à l'invention du transformateur en France par Lucien Gaulard. Ce débat va-t-il être relancé avec l'avènement de l'électronique de puissance qui permet d'avoir des courants continus à haute tension ?

Dans le dernier chapitre, nous nous intéresserons sur la bonne gestion de l'énergie électrique. Pour cela, nous solliciterons l'aide d'un système de gestion d'énergie qui est dit MAHAS (Multi-Agents Home Automation System).

[1]: Alain Ricaud. « L'électricité photovoltaïque » Document de synthèse 2009 « CYTHELIA Entreprise et Conseil »

Energie solaire photovoltaïque

I.1. Introduction

Acteur durable de plus de 4 milliards d'années, le soleil sauvera l'humanité du chao. Bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous, il demeure notre plus grande source d'énergie. L'énergie solaire reçue par la terre représente chaque année environ 8380 fois la consommation énergétique de l'humanité en 2009 soit environ 11 milliards de TEP (tonnes équivalent pétrole). Toutes les quarante minutes, en effet, la terre reçoit du soleil assez d'énergie solaire pour couvrir sa consommation mondiale d'énergie pendant une année. [1]

Jusqu'à présent, cette énergie est utilisée principalement pour l'éclairage naturel et pour le chauffage. Mais avec le développement de la technologie, il y a eu apparition de trois autres domaines d'utilisations de cette énergie :

- ❖ **L'énergie solaire thermique** : Elle consiste à produire de la chaleur a partir du rayonnement solaire infrarouge afin de chauffer l'eau ou l'air. On utilise dans ce cas des capteurs thermiques qui relèvent d'une toute autre technologie. Dans le langage courant, ce sont des « chauffe-eau solaire » ou des « capteurs à air chaud ».
- ❖ **L'énergie solaire thermodynamique** : cela fonctionne sur un principe de concentration des rayons solaires au moyen de miroirs galbés, en un foyer placé sur une tour qui emmagasine les calories pour les restituer ensuite sous forme mécanique à l'aide d'une turbine à vapeur par exemple. [2]
- ❖ **L'énergie solaire photovoltaïque** : Il existe deux types. Le premier consiste à produire de l'électricité en absorbant les rayonnements lumineux, le deuxième transforme la chaleur en électricité. Le premier type sera repris en détail.

I.2. Qu'est ce que l'énergie solaire photovoltaïque

La conversion du rayonnement lumineux (solaire ou autre) en électricité, appelée aussi effet photovoltaïque, a été découverte par Antoine Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

L'énergie photovoltaïque s'est développée dans les années 50 pour l'équipement de vaisseaux spatiaux et le premier a été lancé dans l'espace en 1958. C'était le seul procédé non-nucléaire d'alimenter des satellites en énergie. Les images satellites reçus par notre téléviseur ne nous parviennent que grâce à l'énergie photovoltaïque.

A présent des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés dans plusieurs pays. [3]

I.2.1. Ensoleillement et lumière

I.2.1.1. Qu'est ce que la lumière

A. Un peu de physique

Un faisceau lumineux est un déplacement de petits corps porteurs d'énergie, ou photons, comme le décrit Einstein en 1905, pour expliquer l'effet photovoltaïque.

Depuis l'équivalence onde-corpuscule mise en évidence par Louis de Broglie en 1924, la lumière est décrite également comme une onde électromagnétique, comme les rayons X ou les ondes radiofréquence. Tous est une question de longueur d'onde, ou de fréquence, pour ces oscillations qui traversent l'espace et parfois la matière. Chaque photon porte une quantité d'énergie directement liée à sa longueur d'onde. [4]

B. Couleur et longueur d'onde

La longueur d'onde d'un faisceau lumineux caractérise sa couleur, telle que la perçoit notre œil. Bien sûr, tous les rayonnements ne sont pas perceptibles par l'œil, mais ils ont aussi leurs longueurs d'onde, qui dépendent de leurs fréquences : fréquence radio, micro-ondes...

Puisque la photopile a pour vocation de fournir de l'électricité dans le monde où nous vivons, elle est conçue pour convertir les longueurs d'onde disponibles dans notre environnement, d'une façon la plus écologique qu'elle soit, donc propres au développement de la vie.

Regardons de quoi se compose le rayonnement du soleil parvenant à la surface de la terre : l'infrarouge procure de la chaleur, le visible est nécessaire à la croissance des plantes et des animaux (dont nous faisons partie, s'il est besoin de le préciser), et l'ultraviolet brunit la peau et tue les bactéries. Le spectre du soleil s'étend de 200 nm à 3 µm (=3000 nm).

Quoi de plus naturel pour les physiciens du siècle dernier que de nommer « ultraviolette » la lumière plus bleue que le bleu-violet perceptible par l'œil, et « infrarouge » la lumière moins rouge que celle que notre œil détecte ? En effet, la perception oculaire moyenne de l'homme s'étend du bleu (longueur d'onde 380nm) au rouge (longueur d'onde

780nm), en passant par les couleurs que l'arc-en-ciel nous dévoile lorsque les gouttes de pluie décomposent la lumière blanche.

On réalise la même décomposition avec un prisme (figure I-1).

On appelle spectre, ou répartition spectrale, d'une source de lumière l'ensemble des couleurs, ou longueurs d'onde, qui la constituent. [4]

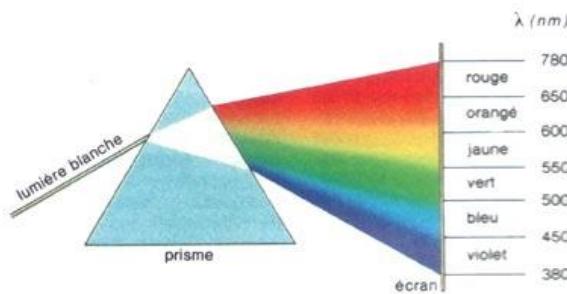


Figure I-1 : Décomposition de la lumière blanche par un prisme

I.2.1.2. Rayonnement solaire et atmosphère

La distance de la terre au soleil est d'environ 150 millions de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus que 300 000 km/s ; les rayons du soleil mettent environ 8min à nous parvenir. [4]

L'énergie lumineuse dite « extraterrestre » c'est-à-dire hors atmosphère a été évaluée avec précision par la NASA et vaut 1367 W/m^2 . Il s'agit de l'irradiance reçue, ou rayonnement solaire instantané, à un instant donné au-dessus de l'atmosphère terrestre, en incidence normale (c'est-à-dire sur un plan perpendiculaire à la direction du soleil). On appelle cette valeur « constante solaire », mais elle ne l'est pas tout à fait à cause des légères variations de la distance Terre-Soleil.

Cette énergie qui descend en ligne droite vers notre planète ne peut pas nous parvenir sur terre en intégralité car elle va subir des transformations en traversant l'atmosphère : par absorption et par diffusion.

En effet, l'atmosphère est composée, d'une majorité d'azote et d'oxygène (respectivement 78 et 21%), mais aussi de l'argon, du CO₂, de la vapeur d'eau et la fameuse couche d'ozone de la stratosphère, dont le rôle est de filtrer les UV les plus durs est si important. Les poussières et les nuages (formés de minuscules gouttelettes d'eau, ne pas

confondre avec la vapeur d'eau, qui elle est un gaz) on aussi leurs importance dans la diffusion du rayonnement solaire. [2]

A. Masse d'air

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir des transformations.

On appelle masse d'air ou *Air Mass* en anglais, le rapport entre l'épaisseur atmosphérique traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu (figure I-2).

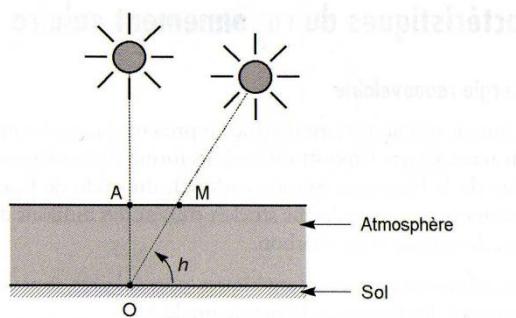


Figure I-2 : définition de l'Air Mass

Cela dépend surtout de la hauteur angulaire du soleil. A l'aide des points O , A , M et de l'angle h représentés sur la figure I-2, la longueur du trajet du soleil à travers l'atmosphère est :

$$OM = \frac{OA}{\sin(h)} \quad (\text{I-1})$$

Donc, l'Air Mass $\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin(h)}$

Dans l'expression AMx , x désigne ce rapport OM/OA .

Exemples :

- Soleil au zénith (au niveau de la mer) : $AM1$;
- Soleil à 30° : $AM2$;
- Soleil à $41,8^\circ$: $AM1,5$;

Et par convention, $AM0$ désigne le rayonnement solaire hors atmosphère. [2]

B. Les différents rayonnements solaires

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

- ❖ Le rayonnement direct : Il 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.
- ❖ Le rayonnement diffus : Il est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet « éclatement » des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet que le rayonnement diffus est isotrope, c'est-à-dire que l'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 circumsolaire) et souvent un renforcement sur l'horizon, la bande horizon.
- ❖ L'albédo : Il est la partie réfléchie par le sol. Il dépend de l'environnement du site. La neige, par exemple, renvoie énormément des rayons lumineux alors qu'un asphalte n'en renvoie pratiquement aucun. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.

Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure I-3. [2]

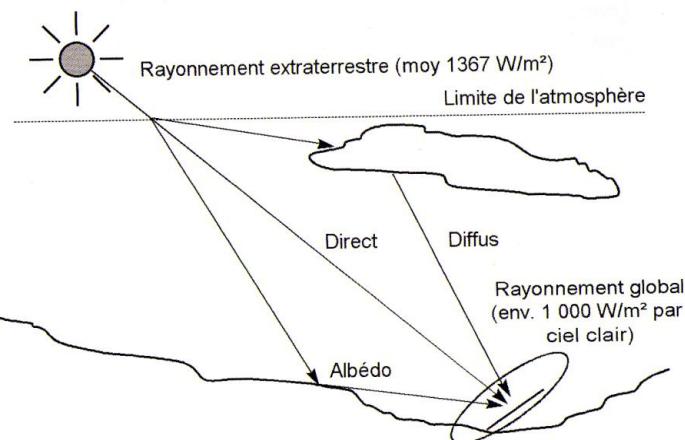


Figure I-3 : Composantes du rayonnement solaire au sol

C. spectre solaire

Le spectre du soleil est une décomposition en longueurs d'onde ou « couleurs », en effet, la lumière solaire est composée de tous sortes de rayonnements de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde par la relation :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I-2})$$

Où h est la constante de Planck, ν la fréquence, C la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde

Une courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre, compilée selon les données recueillies par des satellites, est désignée sous le nom de *AM0* et donnée par la figure I.4. Sa distribution en énergie est repartie comme suit :

- Ultraviolet UV $0,20 < \lambda < 0,38 \text{ } \mu\text{m}$ 6,4%
- Visible $0,38 < \lambda < 0,78 \text{ } \mu\text{m}$ 48,0%
- Infrarouge IR $0,78 < \lambda < 10 \text{ } \mu\text{m}$ 45,6%

Elle montre l'atténuation observée après le passage à travers une épaisseur d'atmosphère correspondant à une masse d'air 1,5, soit l'équivalent d'une hauteur du soleil de $41,8^\circ$ au niveau de la mer. L'irradiance spectrale est le flux solaire pour une longueur d'onde donnée (donc une couleur donnée, en ce qui concerne la lumière visible).

Le spectre du ciel clair, noté AM1,5, sert de référence pour la mesure de cellules photovoltaïques. Les simulateurs servant à mesurer les modules tentent de la reproduire aussi fidèlement que possible. On peut également remarquer le spectre de diffusion par beau temps, nettement renforcé vers les bleus du fait de la diffusion de Rayleigh. [2]

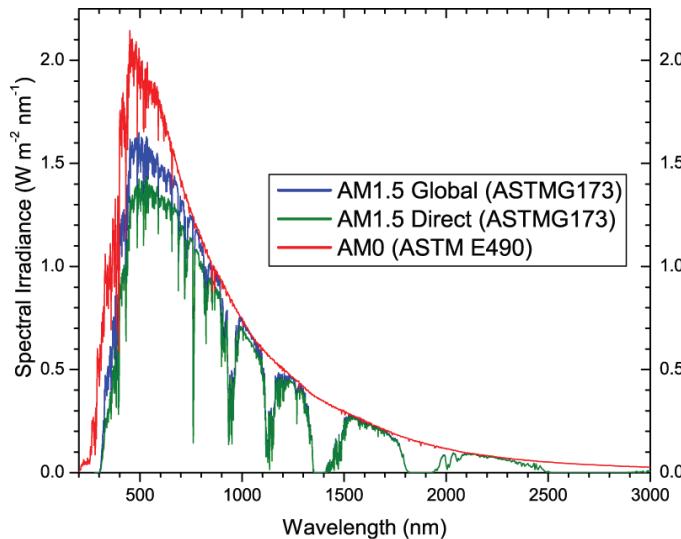


Figure I-4 : Répartition spectrale du rayonnement solaire

I.2.2. La conversion photovoltaïque

La conversion d'énergie met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés :

- L'absorption de la lumière dans le matériau ;
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques ;
- La collecte de charges.

Il est donc clair qu'un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque. [2]

I.2.2.1. L'absorption de la lumière

Comme on l'a vu précédemment, la lumière se compose de photons, « grain de lumière », chacun porteur d'une énergie dépendante de sa longueur d'onde (ou couleur du rayon). Ces photons peuvent pénétrer dans certaines matières, et même passer au travers : les objets transparents pour notre œil laissent passer la lumière visible.

Plus généralement, un rayon lumineux qui arrive sur un solide peut subir trois événements optiques (figure I-5).

- La réflexion : la lumière est renvoyée par la surface de l'objet ;
- La transmission : la lumière traverse l'objet ;

- L'absorption : la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre formes.

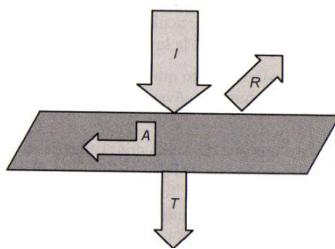


Figure I-5 : Réflexion, transmission et absorption

Ce sont ces propriétés optiques du matériau rencontré qui conditionnent la répartition des ces diverses contributions.

Prenons l'exemple d'un morceau de verre coloré en rouge. Il transmet la lumière rouge, puisque notre œil la perçoit. La partie réfléchie s'élèvera à 8% du flux lumineux, toutes couleurs confondues, du fait de l'indice de réfraction du verre. Le reste de la lumière bleue, jaune, etc. sera absorbé dans la matière.

Cette absorption sera perceptible au toucher sous éclairage intense car le verre va s'échauffer. En effet, dans la plupart des matériaux, la part absorbée de la lumière est convertie en chaleur, c'est-à-dire en rayonnement infrarouge (de longueur d'onde comprise entre 1µm, limite rouge du spectre visible, et 1mm, début des ondes radio).

Dans un matériau photovoltaïque, une partie du flux lumineux absorbé sera restituée sous forme d'énergie électrique. Il faut donc au départ que le matériau ait la capacité d'absorber la lumière visible, puisque c'est ce que l'on cherche à convertir : lumière du soleil ou des autres sources artificielles. On prendra soin également de minimiser les pertes purement optiques par réflexion ou par transmission. [2]

I.2.2.2. Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques

On va s'intéresser maintenant à la lumière absorbée dans le matériau photovoltaïque et expliquer comment son énergie est convertie en électricité.

Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous illumination sont des électrons, charges négatives élémentaires, contenus dans la matière semi conductrice.

Tout solide est en effet constitué d'atomes qui comprennent chacun un noyau (constitué de protons et neutrons) est un ensemble d'électrons gravitant autour.

Les photons absorbés vont tout simplement transférer leur énergie aux électrons périphériques (les plus éloignés du noyau), leur permettant ainsi de se libérer de l'attraction de leur noyau. Ces électrons libérés sont susceptible de produire un courant électrique si on les « attire » ensuite vers l'extérieur.

En régime permanent l'électron libéré laisse un « trou » qui se traduit par une charge positive. Si cet électron est attiré au dehors, c'est l'électron d'un atome voisin qui va venir combler ce trou, laissant à nouveau un trou, lui-même comblé par un électron voisin et ainsi de suite. On génère ainsi une circulation de charges élémentaires, d'électrons dans un sens, et de trous dans l'autre sens, ce qui donne un courant électrique.

Ce phénomène physique, dit photoconductivité, est spécifique aux semi-conducteurs (éléments de la quatrième colonne du tableau de Mendeleïev) car ils comportent des électrons « libérables » ; contrairement à un isolant, où tous les électrons sont fortement liés, et à un conducteur électrique, dans lequel il existe une forte densité d'électrons totalement libres.

On comprend aisément qu'il existe, dépendant du matériau, un « seuil » d'énergie minimum nécessaire à cette « libération » des électrons par des photons. Si ce seuil dépend du matériau, c'est tout simplement parce que la structure électronique est différente pour chaque type d'atomes (nombre d'orbites et quantité d'électrons par atome) et donc les énergies mises en jeu également.

On appelle ce seuil le gap optique du matériau ou la largeur de bande interdite. En effet, si le photon a une énergie inférieure, il ne pourra pas créer la paire électrons-trou et ne sera pas absorbé. Les propriétés optiques et électroniques sont donc intimement liées.

Si un photon a une énergie supérieure ou égale au gap optique, c'est qu'il a une longueur d'onde inférieure à une certaine valeur, puisque ces deux grandeurs sont inversement proportionnelles voir la relation (I-2):

Ce qui se traduit par : $E(\text{en eV}) = 1,24 / \lambda(\text{en nm})$.

Pour le silicium cristallin, le gap optique est de $E_g=1,1 \text{ eV}$. Un photon possédant cette énergie a une longueur d'onde de $1,13 \mu\text{m}$ (dans le proche infrarouge). Pour le silicium

amorphe, $E_g=1,77$ eV. Un photon ayant cette énergie est en lumière rouge, avec une longueur d'onde de 700 nm ($=0,7\text{ }\mu\text{m}$).

Tous les photons d'énergie supérieure à ces seuils, et donc de longueurs d'onde inférieures, sont opérationnels pour la conversion photovoltaïque.

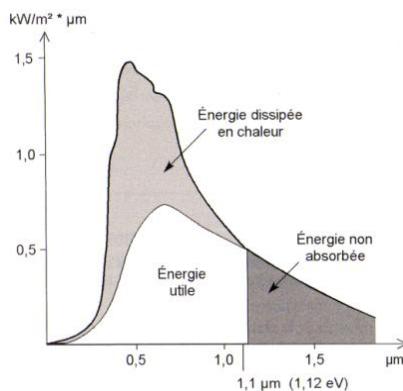


Figure I-6 : Spectre solaire *AM0* et partition exploitables par le silicium cristallin

La figure I-6 permet de visualiser la portion du spectre solaire qui peut être convertie en énergie électrique dans le cas du silicium cristallin. La partie du spectre en gris foncé est donc impossible à convertir car elle n'est pas absorbée dans le matériau.

Pour la portion en gris clair, nous ferons recours à une autre représentation du transfert énergétique des photons aux particules chargées. La figure I-7 représente les différents états d'énergie dans le matériau semi-conducteur.

Dans le domaine d'énergie situé sous le gap optique se trouve les électrons de valence du matériau, c'est-à-dire ceux qui sont liés aux atomes. Dans la bande de conduction se trouve ceux qui en ont été extraits et sont libres de circuler dans le matériau. Elle est donc vide quand le semi-conducteur n'est pas illuminé. Lorsqu'un photon a une énergie suffisante, il est absorbé et fait passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction. Que se passe-t-il s'il a une énergie supérieure à E_g ? Le photon 2 de la figure I-7 génère une paire électron-trou à un niveau supérieur, mais l'excédant est perdu par un processus de désexcitation spontanée qui produit de la chaleur et ramène son énergie à E_g . Donc quelle que soit son énergie, pourvu qu'elle soit supérieure à E_g , chaque photon absorbé ne crée qu'une seule paire électron-trou d'énergie E_g .

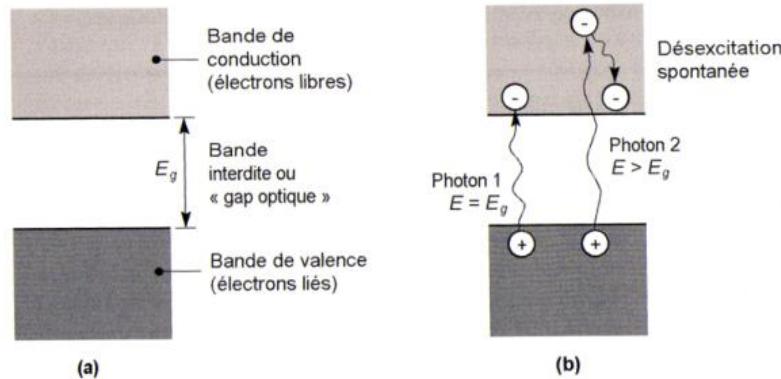


Figure I-7 : Diagramme d'énergie d'un semi-conducteur

a) Dans l'obscurité. b) Sous illumination

Puisque l'on connaît l'énergie disponible à chaque longueur d'onde d'un spectre solaire donné, on peut quantifier la quantité de photons (énergie solaire totale à cette longueur d'onde divisée par l'énergie du photon) et en additionnant tous ces photons calculer le courant et la puissance totale qu'ils peuvent générer, en fonction du gap optique du matériau. Il s'agit de performances électriques purement théoriques, que l'on pourrait qualifier d'« ultimes » : elles ne prennent pas en compte les pertes par réflexion, et supposent que toutes les paire électron-trou photogénérées sont collectées, ce qui n'est pas le cas réellement.

Pour convertir un taux plus élevé d'énergie lumineuse, il faudrait que tous les photons de la source de lumière aient la même énergie (un soleil rouge, par exemple !) et que l'on dispose d'un matériau dont le gap optique correspond exactement à cette énergie. [2]

I.2.2.3. La collecte de charges

Pour que les charges libérées par illumination soient génératrices d'énergie, il faut qu'elles circulent. Il faut donc les « attirer » hors du matériau semi-conducteur dans un circuit électrique. Sinon, elles se recombinent : l'électron chargé négativement neutralisant le « trou », chargé positivement. Autrement dit, les électrons libérés retrouveraient leur état initial à la périphérie de leur atome : cela libérerait de l'énergie thermique (chaleur) mais aucune énergie électrique.

Cette extraction des charges est réalisée au sein d'une jonction créée volontairement dans le semi-conducteur. Le but est d'engendrer un champ électrique à l'intérieur du matériau, qui va entraîner les charges négatives d'un côté et les charges positives de l'autre côté. C'est

possible grâce au dopage du semi-conducteur. La jonction d'une photopile au silicium est constitué d'une partie dopée au phosphore (P), dite de type « n », accolée à une partie dopée au bore (B), dite de type « P ». C'est à la frontière de ces deux parties que se crée un champ électrique pour séparer les charges positives et négatives

A. Dopage des semi-conducteurs

Le dopage d'un semi-conducteur pur va permettre d'amener des charges excédentaires qui amélioreront la conductivité du matériau.

A la figure I-8, en représente une vue schématisée, à plat, des atomes de silicium (a 4 électrons dans la couche externe) qui sont chacun liés à quatre autres atomes de silicium.

A l'état pur, le silicium dit « intrinsèque » n'est pas très conducteur.

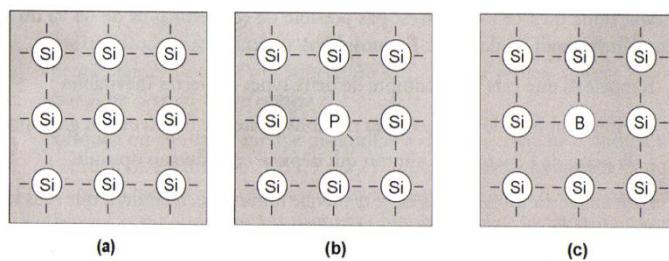


Figure I-8: a) Silicium pur (intrinsèque) b) Silicium de type n. c) Silicium de type p

En dopant avec des atomes étrangers de phosphore qui ont 5 électrons dans leur couche externe, un électron par atome de phosphore ne pourra pas se lier avec ses correspondants du silicium, il y aura alors un excédant de charges négatives dans le cristal (figure I-8). Le matériau sera donc potentiellement « donneur » d'électrons, disponibles pour la conduction électrique, et le silicium ainsi dopé est appelé silicium de type n.

Par symétrie, on peut également doper le silicium avec du bore qui a seulement 3 électrons dans sa couche de valence. Le résultat est l'apparition d'un excédent de trous, donc de charges positives, puisqu'il manque un électron à chaque atome de bore pour compléter les 4 électrons du silicium (figure I-8). Le matériau est l'inverse du précédent « accepteur » d'électrons. Ce matériau ainsi dopé est appelé silicium de type p.

B. Jonction p-n et p-i-n

La mise en contact de deux zones de dopages opposés dans un semi-conducteur constitue un élément fort connu : la diode. A l'interface ou les concentrations d'atomes étrangers font passer le silicium de type p au type n apparaît une région appelée zone de charge d'espace qui provient de la tendance des électrons excédentaires de la couche n à vouloir passer du côté p ou ils sont attirés par les trous excédentaires, et de la tendance des trous à vouloir passer du côté n par réciprocité. Cet échange de porteurs dans la zone de charge spatiale crée un champ électrique qui va contrebalancer l'échange de charges et rétablir l'équilibre thermique.

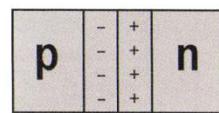


Figure I-9 : Représentation schématique d'une jonction p-n

La cellule solaire est donc le plus souvent une tranche de silicium dopé « p » d'un côté, et « n » de l'autre, à laquelle on ajoute des contacts électriques pour collecter le courant. Cette jonction a donc les caractéristiques électriques d'une diode au silicium classique avec, sous illumination, apparition d'un photocourant indépendant de la tension et proportionnel au flux lumineux et à la surface de la cellule.

Mais cette simple structure p-n, adaptée au silicium cristallin, n'est pas suffisante dans tous les cas. Par exemple, un silicium amorphe dopé de type p n'est pas un très bon photoconducteur, et il est préférable que la conversion photovoltaïque se produise dans un matériau non dopé, donc intrinsèque, et noté « i ». La cellule au silicium amorphe classique se compose donc de 3 couches : p-i-n. La couche « i » placée au centre du dispositif est la plus épaisse, et sert à la conversion des charges. Les couches p et n, quant à elles permettent la création du champ électrique interne qui s'étend dans toute la couche i, ce qui favorise la séparation des charges. [2]

I.3. les systèmes photovoltaïques

Un module photovoltaïque seul ne suffit généralement pas pour alimenter régulièrement une application. Tout comme l'éclairage, l'énergie qu'il fournit est très variable, et en courant continu : Il faut souvent la stocker et parfois la transformer. On appelle système

photovoltaïque l'ensemble des composants nécessaires à alimentation d'une application en toute fiabilité. [2]

I.3.1. Les éléments d'un système photovoltaïque

I.3.1.1. Les modules photovoltaïques

Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. En effet une photopile élémentaire ne génère pas suffisamment de tension : entre 0,5 et 1,5V selon les technologies. Il faut toujours plusieurs photopiles en série pour générer une tension utilisable. [2]

A. Cellule solaire

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), génère de l'électricité. C'est l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Le courant obtenu est fonction de la lumière incidente. L'électricité produite est fonction de l'éclairement, la cellule photovoltaïque produit un courant continu.

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autre semi-conducteurs : sélénure de cuivre et d'indium ($\text{CuIn}(\text{Se})_2$ ou $\text{CuInGa}(\text{Se})_2$), tellurure de cadmium (CdTe), etc. Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté, prises en sandwich entre deux contacts métalliques, pour une épaisseur de l'ordre du millimètre.

Les cellules sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques ou panneaux solaires, en fonction de la puissance recherchée. [5]



Figure I-10 : Cellule solaire

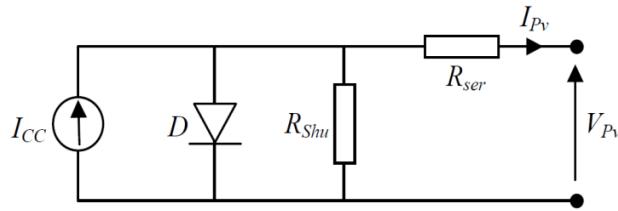


Figure I-11 : Schéma équivalent d'une cellule solaire

a) Les différentes technologies:

Nous résumons ici les propriétés des différents types de photogénérateurs. Le silicium cristallin et le silicium amorphe représentent à eux seuls plus de 90% du marché mondial des applications terrestres. Mais d'autres matériaux semi-conducteurs sont également employé pour la fabrication des photogénérateurs : le CuInSe₂ (en abrégé CIS), le CdTe (tellurure de cadmium) et le GaAs (arséniure de gallium). [4]

❖ Arsenic de Galium(GaAs) : Ce matériau a très grand rendement est un cas à part : très onéreux du fait des éléments utilisés, il n'est employé que pour des panneaux solaires de satellites ou sur des systèmes a concentration. Dans ces applications, le rendement et le poids sont des critères de choix, et non le prix !

- Rendement électrique : 20-25%.
- Usage : satellites, concentrateurs.
- Particularité : prix très élevé.

❖ 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'arsenic de gallium.

- Rendement électrique des panneaux : 15% STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 300 W_c.
- Gamme d'éclairement : 100 à 1000 W/m².
- Usage : tous usages en extérieur de forte et moyenne puissance (télécoms, balisage, relais, habitat...).

❖ Silicium amorphe : Nettement moins puissant au soleil que les deux précédents, ce silicium en couche très mince répond par contre à tous les éclairages, extérieurs et intérieurs. 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 : 5-7% STC (jusqu'à 9% pour les multijonctions).
- Puissance des photopiles intérieures : 0 à 1 W_c.
- Puissance des panneaux extérieurs : 0,5 à 60 W_c.
- Gamme d'éclairage : 20 lux (en intérieur) à 1000 W/m² (en extérieur).
- Usage : électronique professionnelle et grand public (montre, calculettes...), électronique de faible consommation en extérieur, baies vitrées semi-transparentes.

❖ CuInSi₂ (CIS) : Les photopiles utilisant ce matériau sont produites en couche mince par des méthodes chimiques ou de dépôt sous vide, sur une sous-couche de CdS (sulfure de cadmium). Elles ont d'assez bonnes propriétés électroniques. De plus, elles bénéficient des mêmes commodités de fabrications que le silicium amorphe (mise en série et découpe simple). Mais cette technologie est assez peu commercialisée dans le monde, sans doute à cause de difficultés d'industrialisation et de tenue climatique, mais surtout en raison du Cadmium qu'elle contient (toxique).

- Rendement des panneaux : 10-12%.
- Puissance des panneaux : 5 à 60 W
- Usage : alimentations de faible et moyenne puissance en extérieur, habitat raccordé au réseau. [4]

b) Propriétés des cellules photovoltaïques

❖ **Réponse spectrale :** On appelle réponse spectrale la courbe de réponse d'une cellule en fonction de la couleur du rayonnement incident.

Le matériau amorphe répond mieux dans le bleu (faibles longueurs d'onde), mais le cristallin est plus performant dans le rouge et le proche infrarouge (700-1100 nm). Cette propriété

explique notamment le meilleur comportement du silicium cristallin au soleil, et la performance du silicium amorphe pour les éclairages artificiels, plus riche en lumière bleue.

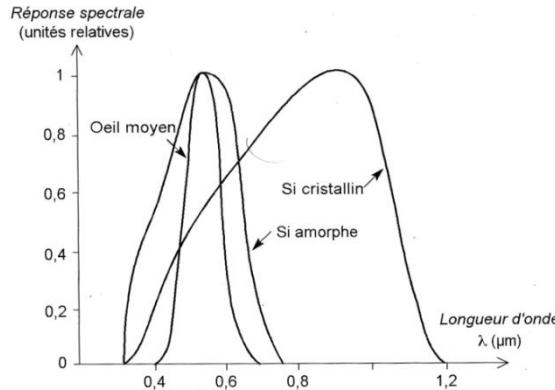


Figure I-12 : Réponses spectrales des différents types de cellules solaires

Pour les fabricants, améliorer cette réponse spectrale, c'est chercher des solutions pour renforcer l'absorption des différentes couleurs dans le dispositif, c'est-à-dire en face avant du dispositif pour la lumière bleue, absorbée dès les premiers nm du matériau, et pour la lumière rouge au cœur ou en face arrière du dispositif (lorsqu'il s'agit de couches minces).

Exemples d'améliorations possibles de la réponse spectrale :

- Diminution de la réflexion en face avant par une couche antireflet ;
- Utilisation d'un miroir arrière comme électrode métallique (à l'argent, qui réfléchit mieux que l'aluminium) ;
- Empilement de cellules à gaps optiques différents.

❖ **Caractéristiques électriques :** Les technologies de cellules solaires sont souvent comparées entre elles uniquement au soleil, sous un rayonnement de 1000W/m^2 (conditions dites STC), qui n'est pas le cas général. Mais lorsque ces normes ont été définies, tous les panneaux étaient optimisés pour le grand soleil, sans doute parce qu'on n'imaginait pas à l'époque toutes les applications que le solaire allait couvrir ensuite dans les pays tempérés et a fortiori sous éclairage artificiel.

La figure I-13 montre les performances d'une cellule au silicium monocristallin et d'une cellule au silicium amorphe sous éclairement maximal.

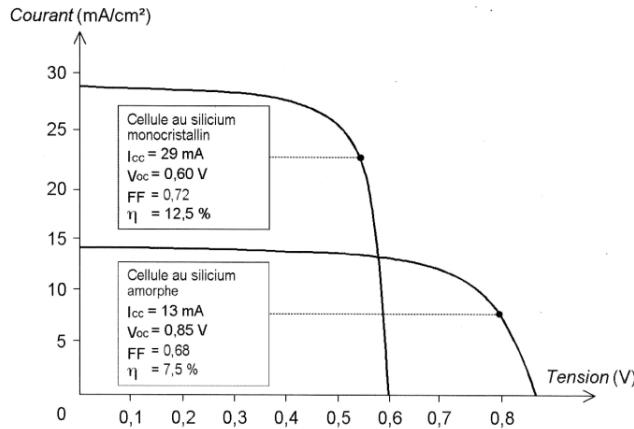


Figure I-13 : Caractéristiques courant-tension comparées d'une cellule au silicium amorphe et d'une cellule au silicium cristallin (sous 1000 W/m^2)

La cellule amorphe, grâce à son gap plus élevé que le silicium cristallin, a une tension plus élevée. Mais son courant sous fort éclairement est nettement plus faible en raison de sa moins bonne collecte et de sa faible épaisseur.

Ainsi, les panneaux monocristallins sont les plus performants du marché et atteignent, en 2004, environ 12 à 14% de rendement STC.

Les caractéristiques électriques des cellules multicristallines, les plus répondues actuellement, sont similaires aux monocristallines (même gap). Seuls certains défauts différencient ce matériau, en particulier les joins de grains et les rendements de conversion atteignent 10 à 12%.

La technologie amorphe, quant à elle, fournit industriellement des panneaux de 6 à 8% de rendement STC en simple jonction et jusqu'à 10-12% en multi-jonctions.

Mais attention, tous ces rendements, sont donnés sous fort ensoleillement, aux conditions STC (sous 1000W/m^2 , spectre AM1,5, 25°C). Voyons maintenant l'influence de l'ensoleillement et de la température

- Influence de l'éclairement : La figure I-14 représente les caractéristiques d'une cellule monocristalline typique de $10 \times 10 \text{ cm}^2$: on a tracé la variation du courant par rapport à la tension pour plusieurs intensités de rayonnement solaire.

Dans la partie gauche des caractéristiques, le courant est directement proportionnel au rayonnement à ces niveaux d'éclairages. La tension par contre n'est pas très dégradée lorsque la lumière baisse ; dans une cellule monocristalline, la résistance parasite shunt reste assez élevée et la cellule peut fournir une tension correcte même à petit éclairages. Pour une cellule polycristalline qui présente une plus faible résistance shunt, la tension peut parfois baisser de manière importante dès que la lumière est en dessous de 30 à 50 W/m² (3 à 5% de l'ensoleillement maximal).

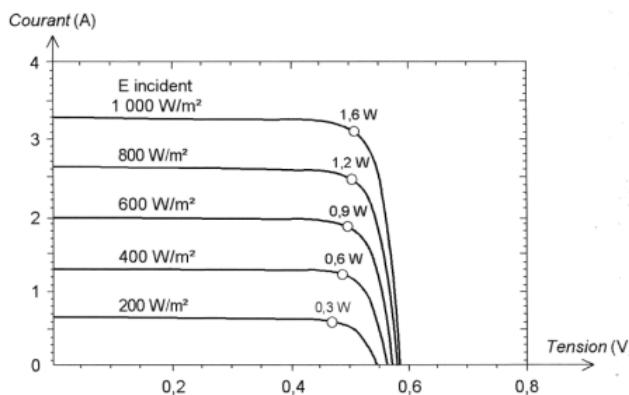


Figure I-14 : Courbes I(V) sous diverses intensités de rayonnement d'une cellule monocristalline

- Influence de la température : l'influence de la température est un effet important qui a des conséquences dans la conception des panneaux et des systèmes.

Malheureusement, la tension d'une cellule cristalline baisse assez fortement avec la température. Cet effet est représenté à la figure I-15 où l'en voit différentes courbes d'une cellule cristalline entre 10 et 75°C sous un ensoleillement de 1000 W/m².

La tension perd 2 à 2,5 mV/°C (soit -0,41% /°C), ce qui donne un déficit de 80 à 100 mV entre 10 et 50°C par exemple. Pour d'autres technologies, les variations de la tension en fonction de la température baissent lorsque le gap augmente : pour le silicium amorphe, l'effet est réduit de 30% (environ 0,29% /°C).

Sous l'effet d'une hausse de la température, le courant gagne quant à lui un petit peu d'intensité. Ceci peut être expliqué par une meilleure absorption de la lumière, le gap est décroissant lorsque la température augmente. Mais l'accroissement du courant peut être négligé au point de puissance maximale et le comportement global de la cellule cristalline en température est une perte de 0,4 à 0,5% par degré. [2]

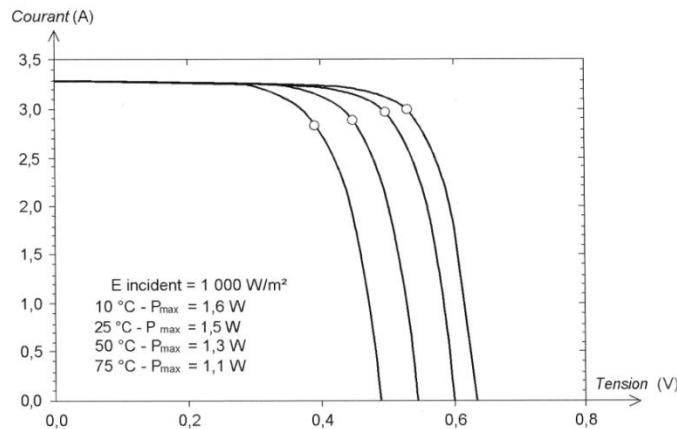


Figure I-15 : Courbes I(V) d'une cellule monocristalline à diverses températures

B. Architecture classique d'un générateur photovoltaïque

Dans les conditions d'ensoleillement standard (1000W/m^2 ; 25°C ; AM1.5), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de 150 cm^2 est d'environ 2.3 W_c sous une tension de 0.5V . Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires.

Une association de n_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, Figure I-16. L'équation (I-3) résume les caractéristiques électriques d'une association série de n_s cellules.

$$V_{co\ ns} = V_{co}*n_s \quad \text{avec} \quad I_{cc\ ns} = I_{cc} \quad (\text{I-3})$$

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus

importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ($V_{co\ ns} = 0.6V \times 36 = 21.6V$) afin d'obtenir une tension optimale du panneau V_{opt} proche de celle d'une batterie de 12V.

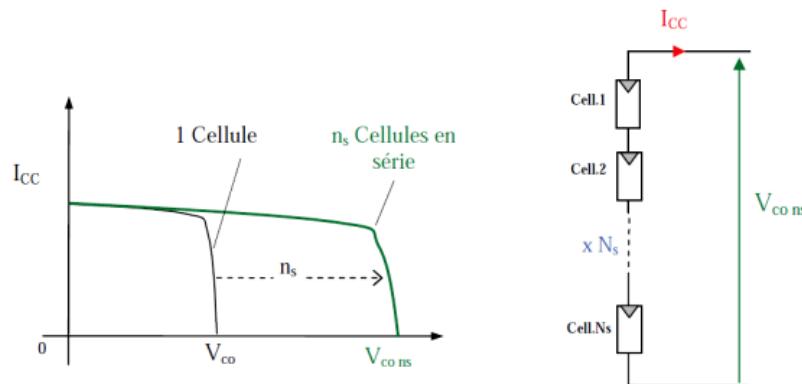


Figure I-16 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de n_s cellules en série.

D'autre part, une association parallèle de n_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants, Figure I-17. L'équation (I-4) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de n_p cellules.

$$I_{CC\ np} = I_{CC} * n_p \quad \text{avec} \quad V_{CO\ np} = V_{CO} \quad (\text{I-4})$$

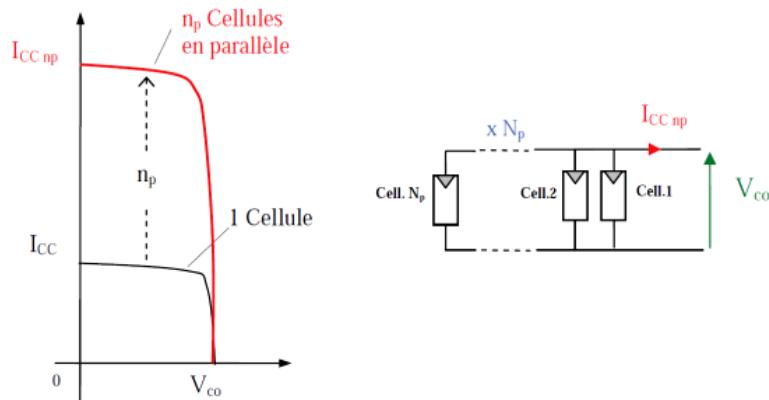


Figure I-17 : Caractéristiques résultant d'un groupement de n_p cellules en parallèle.

La caractéristique $I(V)$ d'un générateur solaire peut être considérée comme le fruit d'une association d'un réseau de $ns \times np$ cellules en série/parallèle. La caractéristique globale peut, en outre, varier en fonction de l'éclairement, de la température, du vieillissement des cellules et les effets d'ombrage ou d'inhomogénéité de l'éclairement. De plus, il suffit d'une occultation ou d'une dégradation d'une des cellules mises en série pour provoquer une forte diminution du courant solaire produit par le module photovoltaïque. Lorsque le courant débité est supérieur au courant produit par la cellule faiblement éclairée, la tension de celle-ci devient négative et se comporte comme un élément récepteur. Celle-ci se retrouve à dissiper une quantité trop importante de puissance électrique qui pourrait aboutir à sa destruction si le défaut persiste trop longtemps. C'est le phénomène dit de *hot spot* ou « point chaud ».

Pour remédier à ce phénomène, il faut câbler une diode *by-pass* en parallèle pour chaque groupe de cellules, ces diodes ont pour rôle de protéger les cellules qui deviennent passives Figure I-18-a. La diode *by-pass* lorsqu'elle se met à fonctionner, court-circuite alors une partie du panneau comme indiqué en Figure I-18-b, évitant ainsi la circulation de courants inverses au sein des cellules défectueuses. Par contre, cette solution efficace réduit d'autant la puissance délivrée ainsi que la tension aux bornes du panneau. La dégradation d'une seule cellule condamne donc le groupe de cellules associé à la cellule défectueuse et protégée par la diode *by-pass* à ne pas produire de puissance. Ce phénomène de perte partielle de puissance est à comparer à la perte totale d'un panneau entier en cas de problème sur une cellule avec un panneau fonctionnant sans protections.

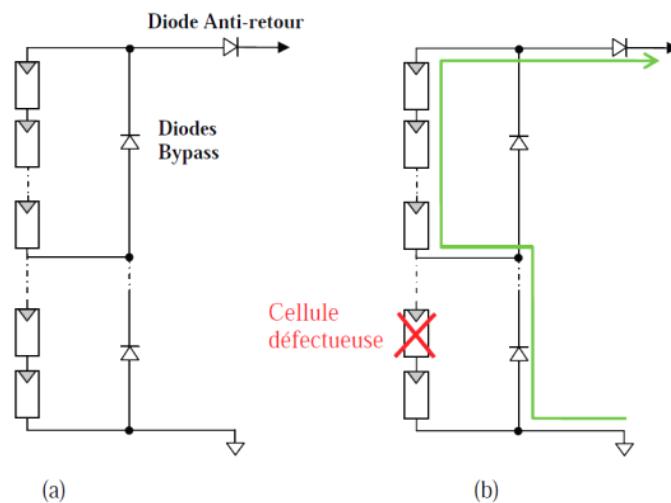


Figure I-18 : a) Architecture Classique d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protections. b) Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de la diode by-pass et mise en évidence du courant de circulation I_{pv} .

Une autre protection consiste à protéger le module photovoltaïque contre les courants négatifs qui pourraient être générés lors de différentes connexions en parallèle de plusieurs panneaux (lorsque le panneau devient récepteur plutôt que générateur). Ainsi, une diode anti-retour est mise en série avec chaque branche d'un GPV. Le risque est que des chaînes de cellules fortement éclairées débitent dans des chaînes soumises à moins d'éclairage. Il est à souligner que la présence de cette diode anti-retour permet d'éviter tous les courants négatifs y compris provenant de la charge (comme une batterie par exemple fonctionnant tout le temps et pouvant débiter sur le GPV la nuit). [6]

I.3.1.2. Stockage d'énergie

Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes est en général assuré par des batteries, composants utilisés dans la majorité des cas. Seules quelques applications utilisant l'énergie au fil du soleil par exemple du pompage ou de la ventilation peuvent se passer d'accumuler l'énergie ; aussi, la maîtrise des batteries est un élément essentiel au succès des systèmes autonomes. Dans ces systèmes, le stockage d'énergie représente environ 13 à 15% des investissements initiaux mais sur une durée d'exploitation de vingt ans, ce coût peut atteindre 50% des frais totaux ; il est donc primordial d'essayer de réduire ce prix en augmentant la durée de vie des batteries. En effet, elle est toujours inférieure à celles des panneaux, il faut donc les remplacer plusieurs fois au cours de la durée de service du système (tous les deux, cinq ou dix ans selon le cas).

Les batteries utilisées dans les systèmes solaires autonomes sont en général de type plomb-acide (Pb). Les batteries cadmium-nickel (NiCd) ne sont plus que rarement utilisées car leur prix est beaucoup plus élevé et elles contiennent du cadmium (toxique). Leurs remplaçantes, les batteries nickel-métal-hydrure (NiMH) sont intéressantes, leur emploi étant plus fréquent dans les applications professionnelles haut gamme, ou de très petite taille (< 2 Ah).

On peut connecter en série/parallèle des batteries solaires exactement identiques et de même âge. La mise en parallèle n'est pas cependant recommandée ; il faut la réserver aux installations où la fourniture de grands éléments n'est pas possible. Dans ce cas, il faut veiller à l'équilibrage des courants par un câblage symétrique.

Pour chaque chaîne de batteries (ensemble de batteries câblées en série), il faut monter un fusible en série dans le câblage. Pour les petits systèmes, il est toujours avantageux de sur

dimensionner une batterie au départ, la mise en parallèle de batteries d'âges différents étant fortement déconseillée, la batterie la plus âgée faisant vieillir prématurément la nouvelle. [2]

I.3.1.3. Régulateur de charge

Le régulateur est l'élément central d'un système photovoltaïque autonome : il contrôle les flux d'énergie. Il doit protéger la batterie contre les surcharges (solaire) et décharges profondes (utilisateur). Il doit également assurer la surveillance et la sécurité de l'installation (surcharge, alarmes, fusibles et inversement de polarité). Dans un système plus élaborés, il peut aussi commander la recharge par d'autres sources d'énergies (générateur d'appoint, éolienne, hydraulique). Dans certain cas, il peut réaliser une transformation de puissance (recherche du point de puissance maximum, *Maximum Power Point Tracker*, MPPT).

Les régulateurs de charge de systèmes PV autonomes peuvent être classés en trois groupes principaux :

- Les régulateurs séries, qui incorporent un interrupteur entre le générateur et l'accumulateur pour arrêter la charge ;
- Les régulateurs shunt, dont l'interrupteur court-circuite le générateur solaire en fin de charge ;
- Les régulateurs à recherche de point de puissance maximum (MPPT), qui utilisent un circuit électronique spécial permettant de soutirer en permanence du champ de capteurs sa puissance maximal.

A ces types de circuits, on ajoute en général un régulateur de décharge pour empêcher les décharges profondes de la batterie. [2]

I.3.1.4. Les convertisseurs

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer le courant continu fourni par les panneaux ou les tensions continues délivrées par les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative. Les convertisseurs utilisés dans les systèmes PV sont de types DC/DC et DC/AC. [2]

I.3.1.5. Récepteurs pour systèmes autonomes

Dans ce point on va citer quelques appareils utilisés dans les systèmes photovoltaïques autonomes.

A. L'éclairage

Les lampes représentent les principaux récepteurs des systèmes autonomes. Le type le plus utilisé est la lampe fluorescente qui présente un des rendements les plus élevés. Les autres sources de lumières comme les lampes à incandescence et à halogène seront réservées aux courtes durées d'utilisation. [2]

B. La réfrigération et la ventilation

- ❖ **Réfrigération :** Les réfrigérateurs pour installation autonomes utilisent des compresseurs fonctionnant avec un moteur DC et une armoire à isolation renforcée. Leur prix est beaucoup plus élevé que les modèles standards en 230 VAC (environ 2 à 3 fois plus cher) mais leur consommation est inférieure à la moitié pour les meilleurs modèles.
- ❖ **Ventilateur :** Pour la ventilation de petits espaces, il existe une large gamme de ventilateur DC, utilisés en électronique. Certains sont même déjà montés avec des cellules solaires dans une bouche de ventilation pour caverne ou bateau. [2]

C. Le pompage et le traitement de l'eau

Le pompage de l'eau est une des priorités du solaire en Afrique. Pour les utilisations en Europe, les besoins les plus courants sont la mise en pression de l'eau d'une habitation, d'une caravane ou d'un bateau. [2]

D. Hi-Fi, TV, Ordinateur

- ❖ **Hi-Fi et TV :** Il existe un très grand choix d'appareils radio et Hi-Fi automobilistes fonctionnant en 12 VDC qui sont parfaitement adaptables aux systèmes solaires. Pour une chaîne Hi-Fi classique en 230 VAC sur un système avec onduleur, un modèle sinus est recommandé pour éviter les renflements dus aux harmoniques qui seraient difficiles à filtrer par l'alimentation.

Le choix des téléviseurs se développe, avec l'arrivée des écrans LCD, peu gourmands en énergie. Mais leur prix est encore élevé. Et dans le domaine des appareils 12 ou 24 VDC, le choix est plus que restreint. En attendant, le plus rationnel est d'utiliser un modèle classique 230V à tube cathodique avec un onduleur, en s'assurant que l'onduleur peut démarrer le téléviseur qui demande une puissance importante à l'allumage du tube. [2]

❖ **Ordinateurs :** La plupart des ordinateurs portables doivent être rechargés à des tensions de 15 à 20 V, ce qui demande un convertisseur DC/DC adapté. L'autre possibilité est d'utiliser l'alimentation secteur de l'ordinateur couplé soit à un convertisseur DC/DC 300 V, soit de passé par un onduleur. [2]

E. Autres composants de base

On décrit dans ce point les derniers éléments indispensables au bon fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome tel que les protections contre la foudre, les disjoncteurs et fusibles et les composants de mesure permettant le suivi de l'installation.

❖ **Protection contre la foudre :** Les protections contre la foudre sont indispensables si l'on veut garantir une alimentation fiable en électricité. Le nombre de pannes recensés augmente avec l'altitude et dès 1000m, il est fortement recommandé de prévoir des protections supplémentaires à celles qui sont en général incorporées aux régulateurs.

Trois principes doivent être respectés pour réaliser une protection contre la foudre :

- Conduire le courant de foudre vers la terre par le chemin le plus direct ;
- Minimiser les surfaces des boucles de masse ;
- Limiter l'onde de surtension par des parafoudres.

❖ **Fusibles et disjoncteurs :** Une distribution électrique à partir d'énergie solaire demande les mêmes protections que pour un réseau classique. Cependant, les protections coté DC sont particulières car le courant continu (qui ne passe pas par 0 à chaque alternance) est plus difficile à interrompre si un arc ce produit. En 12 VDC, le danger d'arc est assez faible mais dès 24 V, avec un régulateur série, les panneaux serons parfois en tension ouverte à plus de 40 V et un arc peut se produire si deux câbles sont mal isolés ou si une connexion se détériore avec le temps. Dans les systèmes à tension continue de plus de 100 V, un mauvais choix dans les équipements de protections a été la cause de plusieurs incendies.

Dans un système autonome, le risque principal est la forte densité d'énergie présente dans une batterie qui peut fournir plus de 100A si les câbles ne fondent pas. Il est impératif de toujours ajouter un fusible sur la borne non à la terre de la batterie.

Dans le choix d'un disjoncteur ou d'un fusible, il faut s'assurer que la valeur du courant et de la tension nominale est valable en tension continu. Pour les grands systèmes à tension

DC élevée, le matériel le plus adéquat est celui utilisé dans les transports pour l'équipement de tramway, trolleybus et train.

- ❖ **Interrupteur programmable :** Un interrupteur programmable est un équipement souvent utilisé dans les systèmes automatique : la commande est en général temporelle mais elle peut aussi être lumineuse ou par détection de personne ou mouvement.
- ❖ **Mesure :** On va donner ici quelques recommandations dans le choix d'appareils et de la méthode permettant de s'assurer du bon fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome.

- Carnet de bord-manuels : Le premier équipement indispensable est un carnet de bord, un classeur, ou tout autre moyen de mémoire où l'on note au départ toutes les informations décrivant le système et ensuite la date et les mesures et actions effectuées.
- Pèse-acide : Si la batterie est ouverte, un pèse-acide suffit à s'assurer de sa capacité et de son éclat.
- Multimètre : Il est fortement recommandé car il permet de faire des mesures et effectuer un diagnostic en cas de doute sur la santé du système. [2]

I.3.2. les différents systèmes photovoltaïques

I.3.2.1. Systèmes autonomes

Ce sont les systèmes les plus simples puisque l'énergie photovoltaïque est utilisée directement à partir des panneaux. [2]

I.3.2.2. Systèmes autonomes avec stockage

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes que les anglophones appellent *Stand-Alone Systems*. La batterie d'un tel système se charge le jour, et sert de réservoir d'énergie en permanence. Les appareils alimentés sont donc câblés sur la batterie au travers du régulateur de charge. Lorsque la batterie est pleine, ce dernier coupe sa charge pour éviter qu'elle ne souffre de surcharge. [2]

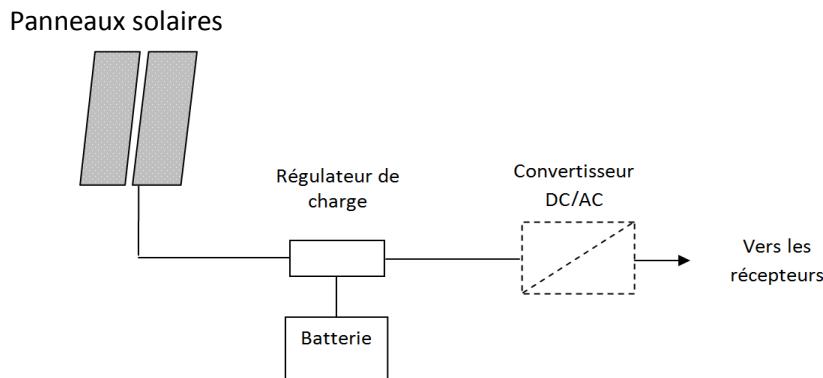


Figure I-19 : Système photovoltaïque avec stockage (avec ou sans conversion d'énergie)

I.3.2.3. Systèmes autonomes hybrides

Avoir un système hybride, c'est disposer d'une autre source d'électricité autonome qui vient compléter l'apport photovoltaïque. Cette autre source peut être un groupe électrogène (appelé aussi « génératrice »). [2]

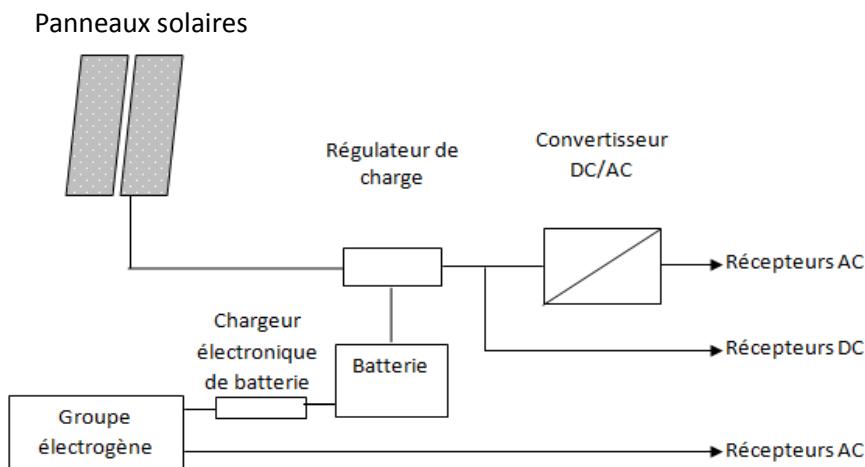


Figure I-20 : Système d'alimentation autonome hybride photovoltaïque/groupe électrogène

I.3.2.4. Systèmes raccordés au réseau

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau. Généralement sur les habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement.

L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie. On ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement au réseau local ou national. Il y a un compteur qui tourne dans un sens pour la consommation, et un autre dans l'autre sens pour la production. Mais il faut tout de même convertir le courant continu des panneaux en alternatif au travers d'un onduleur. Cet onduleur doit être homologué par la compagnie d'électricité qui va recevoir ce courant (il doit respecter des normes sur sa qualité sinusoïdale).

Dans certain cas, on ajoute aux systèmes une batterie de secours pour les coupures de courte durée. [2]

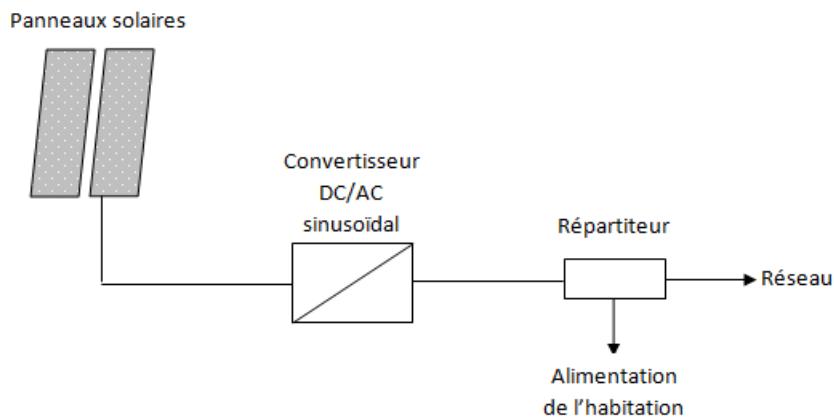


Figure I-21 : Système photovoltaïque raccordé au réseau

I.4. Nouvelle technologie des cellules photovoltaïques faites de films de diamant

Prisés depuis des siècles pour leur dureté, leur éclat et leur résistance à la corrosion, ces différents matériaux révèlent « une fois réduits à l'échelle du nanomètre » de nouvelles propriétés susceptibles de révolutionner la fabrication des gadgets électroniques. Niel Fox passe ici ses journées à manipuler de fragiles films de diamants de l'épaisseur d'un cheveu. Ses expériences sont tellement minutieuses que la moindre vibration peut tout faire échouer. L'objectif du physicien : transformer ces films de diamants en cellules photovoltaïques d'un nouveau genre, capables de produire de l'électricité en absorbant la chaleur plutôt que les rayonnements lumineux. Pour ce faire, il exploite le phénomène dit : d'émission thermionique, c'est-à-dire la propension de certains matériaux à libérer des électrons sous l'effet de la chaleur. Il s'avère que les diamants microscopiques se prêtent particulièrement bien à cette utilisation. Fox compte utiliser un panneau réflecteur qui concentrerait la lumière du soleil sur un dispositif composé de deux minces films de diamants, séparés de seulement quelques centaines de micromètres. A mesure que les rayons solaires chauffent le film du dessus, les

électrons les plus instables sont arrachés et collectés par l'autre film, générant ainsi un courant électrique.

D'ordinaire, les appareils servant à capturer la chaleur du soleil concentrent les rayons lumineux sur des tubes remplis d'eau ou d'huile. Le fluide ainsi chauffé est utilisé pour produire de la vapeur et actionner une turbine générant de l'électricité. Une cellule photovoltaïque constituée de diamant est dépourvue de dispositif mécanique devrait être plus efficace, explique Fox. Cette technologie serait en outre indépendante du soleil puisque ces cellules pourraient fonctionner avec les rejets calorifiques des centrales électriques, des usines ou des émissions automobiles ou toute autre source de chaleur. [7]

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique par le biais de module solaire, ainsi que les différents systèmes et éléments utilisés dans le domaine du photovoltaïque.

I.6. Référence bibliographiques chapitre I

[1]: Revue science et vie mai 2009.

[2]: Anne Labouret. Michel Villoz « Energie solaire photovoltaïque » Dunod 3^{ème} édition 2006.

[3]: Magazine HIGHTECH décembre 2009.

[4]: A Labouret. P Cumunel. J P Braun. B Faraggi « Cellule solaire » Dunod 4^{ème} édition 2005.

[5]: http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolta%C3%AFque

[6]: Mr Petibon Stephane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » thèse Doctorat 2009 « Université de Toulouse ».

[7]: Courrier international N° 1022 du 3 au 9 juin 2010.

Adaptation de l'énergie solaire photovoltaïque

II.1. Introduction

L'électricité photovoltaïque a été développée dans un premier temps pour des applications autonomes sans connexion à un réseau électrique pour par exemple des satellites de télécommunication ou pour des habitations isolées. On la trouve maintenant dans des applications de diverses puissances comme des calculatrices, des montres et d'autres objets d'utilisation courants. En effet, cette électricité produite par des cellules photovoltaïques individuelles peut alimenter diverses charges continues sans difficulté. Plus récemment, avec l'émergence d'installations photovoltaïques connectées au réseau de distribution, le photovoltaïque a connu un développement important en tant que moyen de production d'électricité.

Cette évolution constante a été rendue possible grâce aux recherches fondamentales menées dans le domaine des matériaux photovoltaïques et aussi par l'amélioration progressive des dispositifs de gestion de cette énergie. En effet, l'électricité photovoltaïque est une source d'énergie intermittente, à caractère non-linéaire et dépendante de nombreux paramètres comme l'irradiance et la température. Il a donc fallu adapter cette source d'énergie à notre mode de consommation, soit en stockant la production solaire dans des batteries, ou dans tout autre moyen de stockage en cours de développement, soit en la renvoyant sur le réseau électrique public.

Les premières avancées technologiques ont été réalisées dans l'association des cellules photovoltaïques afin de créer des panneaux solaires disposant de caractéristiques électriques susceptibles de répondre à nos besoins et présentant une grande fiabilité permettant une garantie des caractéristiques au-delà de 25 ans. Plus récemment, avec le développement d'une électronique de puissance spécifique dédiée aux applications photovoltaïques, beaucoup de systèmes de conversion innovants ont été conçus, notamment des onduleurs ayant leurs premiers étages d'adaptation en entrée assurant la recherche de PPM. En effet, ces dispositifs permettent aujourd'hui d'adapter et d'optimiser la production photovoltaïque par le biais de convertisseurs de puissance DC-DC insérés entre les modules photovoltaïques et l'entrée de l'onduleur. Généralement, ces étages disposent de commandes de gestion électrique plus ou moins complexes permettant d'adapter la tension PV à la tension d'entrée de l'onduleur.

Dans ce contexte, l'objectif de ce chapitre est de présenter un état des lieux actuel des différentes architectures de gestion de l'énergie photovoltaïque afin de mieux comprendre les

enjeux et les perspectives à venir de l'électronique de puissance dans ces applications. Nous développerons ainsi deux structures DC-DC, « le boost élémentaire » et « le boost entrelacé ».

II.2. Concept du MPPT

II.2.1. Définition

Par définition, une commande MPPT « Maximum Power Point Tracking » ou en français «Recherche du Point de Puissance Maximum» est un organe fonctionnel du système PV et permet la recherche du point de fonctionnement optimal du générateur PV, dans des conditions météorologique et de charges stables. Que ce soit une commande analogique ou digitale, le principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α à la valeur adéquate de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. [1]

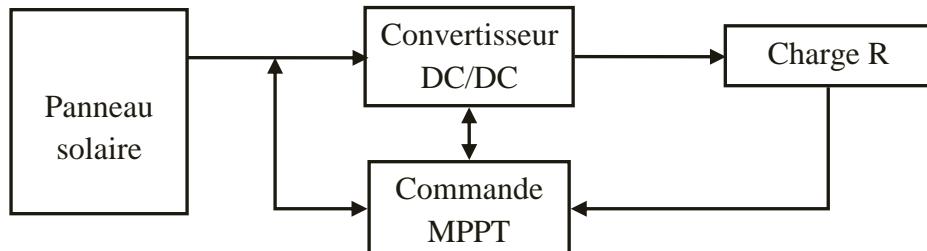


Figure II-1 : Schéma d'un système PV dont le fonctionnement est contrôlé par une commande MPPT

II.2.2. Principe de fonctionnement

Dans le cas d'un convertisseur DC-DC élévateur (boost), les grandeurs électriques de sorties (V_C et I_C) sont liées à celles de l'entrées (V_{pv} et I_{pv}) en fonction du rapport cyclique du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur par les relations suivantes (les relations (II-1) et (II-2) seront démontrées dans ce chapitre) :

$$V_C = \frac{V_{pv}}{1 - \alpha} \quad (\text{II-1})$$

$$I_C = (1 - \alpha) \cdot I_{pv} \quad (\text{II-2})$$

A partir de ces deux équations, nous pouvons déduire la résistance apparente de sortie du panneau PV (R_{PV}) en fonction de α et R_C :

$$R_{pv} = R_c \cdot (1 - \alpha)^2 \quad (\text{II-3})$$

Ainsi le rapport cyclique α s'écrit en fonction des résistances R_{PV} et R_C :

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{R_{pv}}{R_c}} \quad (\text{II-4})$$

Puisque le rapport cyclique α est inférieur à 1 ($\alpha < 1$), le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge R_C remplit la condition suivante :

$$R_c > R_{pv}$$

Dans les conditions optimales et pour une charge R_C donnée, la résistance interne du panneau ($R_{PV} = R_{OPT}$) et le rapport cyclique ($\alpha = \alpha_{opt}$) obéissent donc à l'équation :

$$R_{opt} = (1 - \alpha_{opt})^2 \cdot R_c \quad (\text{II-5})$$

Donc, pour une installation photovoltaïque, la connaissance des conditions optimales (tension optimale, courant optimal, la puissance optimale et la résistance équivalente à la sortie du GPV) est indispensable afin de choisir la valeur de la charge adéquate. [1]

II.3. Définitions des rendements associés à la chaîne de conversion

Une normalisation des origines des pertes dans une chaîne de conversion photovoltaïque est indispensable pour pouvoir en connaître ses performances et envisager de les améliorer. Ceci se traduit par la définition de plusieurs rendements distincts. Ainsi, le rendement global de la chaîne de conversion qui en résulte reflète bien l'ensemble des sources de pertes réparties sur l'ensemble de la chaîne PV.

L'irradiance G (W/m^2) est définie comme la quantité d'énergie électromagnétique solaire incidente sur une surface par unité de temps et de surface. La puissance reçue par un panneau de surface A (m^2) est donc égale à $G * A_{eff}$. La surface A_{eff} représente la surface du panneau correspondant à la partie active et susceptible de pouvoir effectuer la conversion photovoltaïque et non la surface totale occupée par le panneau solaire. Plusieurs systèmes de mesures existent. L'utilisation d'un pyranomètre est la plus fréquente mais nécessite un grand nombre de précautions en termes de mesures sur la propreté de ce dernier et les temps de mesures de l'ordre de quelques dizaines de secondes. D'autre part, il existe d'autres types de mesures associées à des capteurs à base de diode à silicium commercialisés sous le nom de «sonde radiation globale». Ils ont l'avantage de présenter des temps de réponse inférieurs à la seconde compatibles aux temps de réponse de GPV à base de silicium, mais sont limités à la largeur spectrale de sensibilité du silicium (0,4 à 1,1 μm). Quelle que soit la méthode utilisée,

aujourd'hui, la précision de ces données sur G est malheureusement faible lorsque l'on essaie de caractériser un ensoleillement instantané réel arrivant au niveau du sol terrestre (de l'ordre de 10%). Le débat reste donc ouvert pour améliorer ce domaine de métrologie.

Dans ce contexte et faute de plus de précision, nous prendrons comme définition du rendement traduisant la capacité maximale d'un GPV ainsi que sa qualité de la conversion photons-électrons d'un panneau solaire noté η_{pv} , le rendement défini selon l'équation (II-6)

$$\eta_{pv} = \frac{P_{MAX}}{G \cdot A_{eff}} \quad (\text{II-6})$$

Où P_{MAX} est le maximum de puissance potentiellement disponible à la sortie du GPV dépendant du matériau photovoltaïque, de l'instant et de l'endroit des mesures, des conditions météorologiques et de la température.

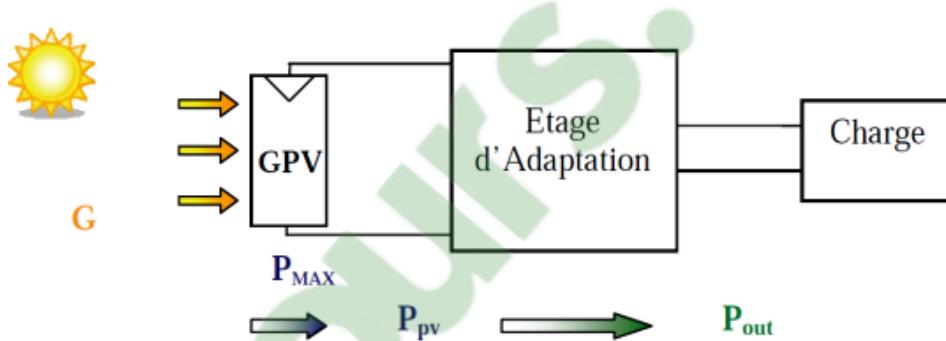


Figure II-2 : Chaîne de conversion photovoltaïque.

La puissance délivrée par le GPV notée P_{PV} est plus ou moins éloignée du potentiel productible noté P_{MAX} en fonction de l'étage d'adaptation utilisé pour réaliser la conversion et le transfert énergétique (Onduleur, convertisseur DC-DC, connexion directe...). La définition d'un nouveau rendement traduisant les pertes énergétiques est alors nécessaire. Nous l'associons au point de fonctionnement du GPV et nous le notons η_{MPPT} . Il correspond à la capacité de l'étage d'adaptation à exploiter sa puissance maximale (P_{MAX}) disponible aux bornes du panneau photovoltaïque. Ce rendement η_{MPPT} est obtenu en divisant la puissance disponible aux bornes du GPV par la puissance maximale potentiellement dérivable par ce même GPV. Pour être précis, ce rendement est le fruit de mesures des puissances effectuées, avec une cellule témoin insérée sur le panneau, sur un intervalle de temps très court (<1s). Il sera donc représentatif d'un instant donné, de conditions météorologiques précises et de modes de fonctionnement donnés. En résumé, ce rendement représente un rendement instantané des performances du GPV.

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{PV}}{P_{MAX}} \quad (\text{II-7})$$

Pour transférer la puissance électrique produite, le mode de transfert utilisé peut présenter plus ou moins un taux de pertes lié à sa constitution. Nous définissons pour qualifier ces étages de conversion électrique-électrique et de transfert, le rendement de conversion d'un étage d'adaptation noté η_{conv} , défini en (II-8), et permettant d'évaluer les pertes liées à la conversion de puissance associée à l'étage d'adaptation. Là aussi, ce type de rendement dépend du temps et des conditions de fonctionnement. Il est nécessaire, pour obtenir une grande précision sur cette grandeur, d'effectuer les mesures de courant et de tension en entrée et en sortie de l'étage au même instant garantissant ainsi la connaissance précise du transfert de puissance effectué à un instant donné.

$$\eta_{conv} = \frac{P_{out}}{P_{PV}} \quad (\text{II-8})$$

Le rendement global de la chaîne de conversion photovoltaïque, noté η_{TOTAL} , peut donc être défini comme le produit des trois rendements précédemment définis sur le même intervalle de temps. [2][3]

$$\eta_{total} = \frac{P_{MAX}}{G \cdot A_{eff}} \cdot \frac{P_{PV}}{P_{MAX}} \cdot \frac{P_{out}}{P_{PV}} \quad (\text{II-9})$$

II.4. La connexion directe GPV-charge comme mode de transfert de puissance

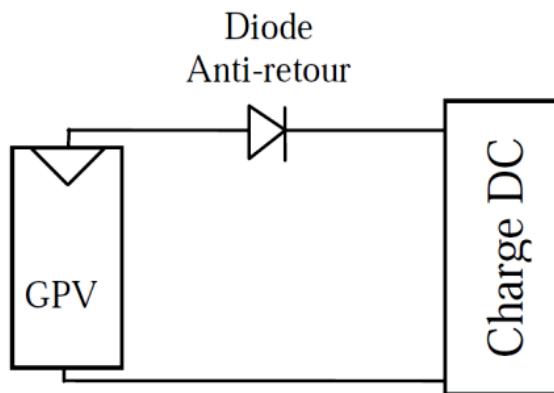


Figure II-3 : Connexion directe GPV-Charge via une diode anti-retour.

La connexion directe du panneau solaire photovoltaïque à une charge reste actuellement le principe de fonctionnement le moins cher et le plus répandu, Figure II-3. Bien sûr, il faut s'assurer auparavant que la charge accepte bien la connexion directe au générateur de puissance continue qu'est le panneau solaire. En effet, le GPV est une source d'énergie

continue qui ne peut être connectée à une charge alternative que via un étage d'adaptation de type onduleur.

L'inconvénient majeur de cette connexion est sa dépendance directe entre la puissance fournie par le générateur et la charge. En fait, la puissance fournie par le module photovoltaïque résulte de l'intersection entre la caractéristique $I(V)$ du GPV et celle de la charge. Comme le montre la caractéristique de la Figure II-4, la puissance transmise directement à une batterie ou une charge résistive de type lampe ou bien même un moteur (MCC), n'est pas toujours effectuée à la puissance maximale P_{MAX} ($PPM =$ point de puissance maximale) que peut fournir le panneau solaire. La solution la plus utilisée actuellement est de créer généralement un GPV par association de cellules pour obtenir une puissance nominale donnée proche de celle nécessaire pour l'utilisation. Cette solution est valable pour les charges DC de type batterie recueillant le courant PV sous des tensions proches de V_{opt} . Une autre application directe est le pompage d'eau « au fil du soleil ». Dans ce cas, on garantit statistiquement la coïncidence du point de puissance maximale PPM du générateur avec les besoins optimaux de la charge. Toutefois, les pertes de ce genre d'association peuvent aller de 5% à 30% selon les gisements solaires et l'état des charges.

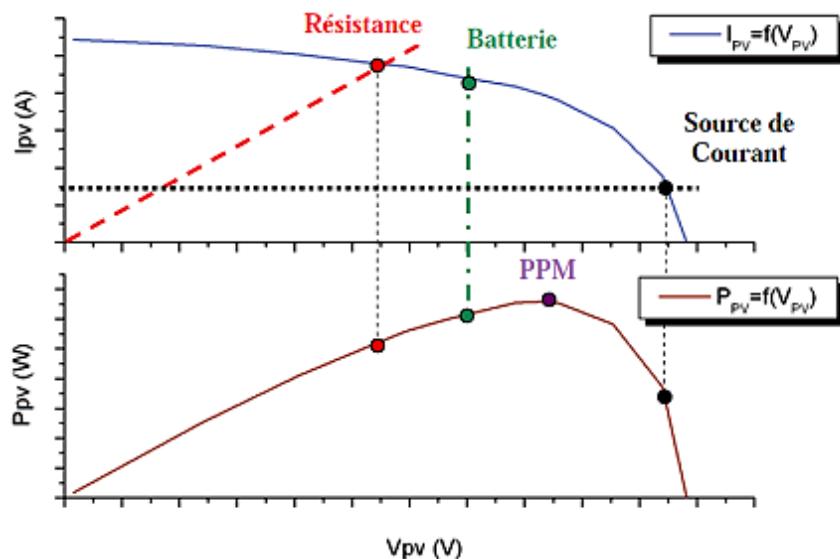


Figure II-4 : Caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque en connexion directe GPV-Charge.

Comme nous l'avons précisé précédemment, les caractéristiques électriques d'un GPV peuvent changer rapidement en fonction de l'irradiation solaire, de la température et à plus long terme du vieillissement des cellules. En réalité, la connexion directe est surtout utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre, son coût minimal et sa fiabilité. En termes de

rendement, même si la puissance du GPV est choisie judicieusement par rapport à la charge, ce type de connexion souffre souvent d'une mauvaise adaptation électrique et présente des pertes importantes de production d'énergie

Pour augmenter la production d'un GPV, on trouve de plus en plus d'étages d'adaptation entre le panneau et la charge, dans le but d'optimiser le transfert de puissance. Bien sûr, ces étages présentent un surcoût par rapport à la connexion directe qui ne nécessite qu'une simple diode. [2][3]

II.5. La connexion GPV-charge via un étage d'adaptation continu-continu

Pour l'étude des convertisseurs, il est d'usage de calculer les valeurs moyennes en supposant les tensions constantes lorsque l'on calcule les courants et les courants constants lorsque l'on calcule les tensions

II.5.1. Hacheur boost (hacheur parallèle ou élévateur)

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur [4]. Ce montage permet de fournir une tension moyenne V_c à partir d'une source de tension continue $E < V_c$. Le montage étudié est donné à la figure II-5.

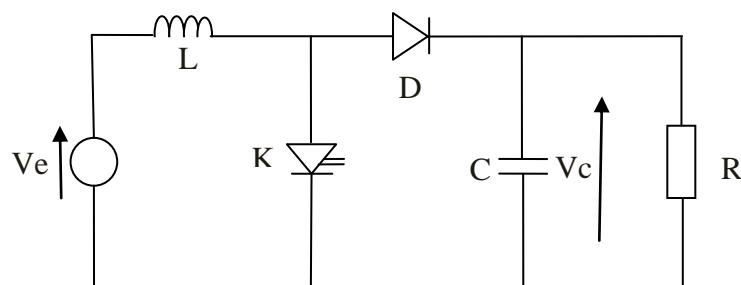


Figure II-5 : Structure d'un hacheur parallèle

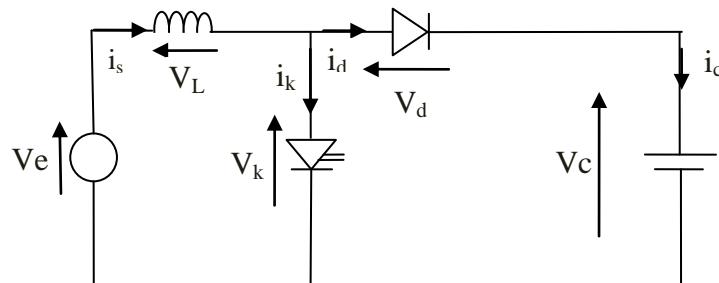
Les applications principales du hacheur parallèle sont les alimentations de puissance régulées et le freinage par récupération des moteurs à courant continu. On distingue 2 phases de fonctionnement:

- Lorsque l'interrupteur K est fermé, la diode est polarisée en inverse ($v_d = -v_c$); la charge est donc isolée de la source. La source fournit de l'énergie à l'inductance L.

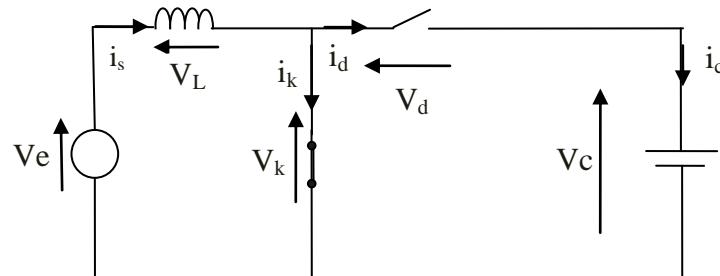
- Lorsque l'interrupteur K est ouvert, l'étage de sortie (C + charge) reçoit de l'énergie de la source et de l'inductance L

Pour l'analyse en régime permanent, le condensateur de filtrage C a une valeur de capacité suffisamment élevée pour que l'on puisse considérer la tension disponible en sortie constante. [5][6]

II.5.1.1. Etude d'un hacheur parallèle en conduction continue



Pour $t \in [0 \text{ à } \alpha T]$ K conduit, D ouverte



$$\begin{cases} i_d = i_c = 0 \\ v_k = 0 \end{cases} \quad (\text{II-10})$$

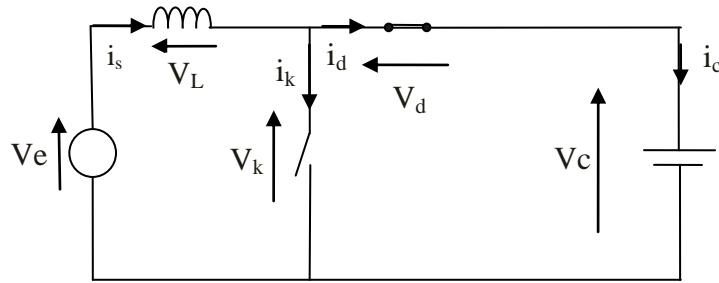
$$\begin{cases} v_d = v_h - Vc = -Vc \\ v_k = Ve - L \frac{di_s}{dt} = 0 \end{cases} \quad (\text{II-11})$$

$$i_s = i_d + i_k = i_k \quad (\text{II-12})$$

$$\text{Donc } i_s = i_k = \frac{Ve}{L} t + I_1 \quad (\text{II-13})$$

$$I_{s_{\max}} = \frac{Ve}{L} \alpha T + I_1 \quad (\text{II-14})$$

Pour $t \in [\alpha T \text{ à } T]$ D conduit, K ouvert :



$$\begin{cases} i_k = 0 \\ v_d = 0 \end{cases} \quad (\text{II-15})$$

$$v_k = v_d + Vc = Vc \quad (\text{II-16})$$

$$i_s = i_d = i_c \quad (\text{II-17})$$

$$Vc = Ve - L \frac{di_s}{dt} \quad (\text{II-18})$$

$$i_s = \frac{Ve - Vc}{L} t + I_2 \quad (\text{II-19})$$

Détermination de I_1 et I_2 :

$$i_s(0) = I_0 \Rightarrow I_1 = I_0 \quad (\text{II-20})$$

$$i_s(\alpha T^-) = i_s(\alpha T^+) \quad (\text{II-21})$$

$$\Rightarrow \frac{Ve}{L} \alpha T + I_0 = \frac{Ve - Vc}{L} \alpha T + I_2 \quad (\text{II-22})$$

$$I_2 = I_0 + \frac{Vc}{L} \alpha T \quad (\text{II-23})$$

Chronogrammes des différentes grandeurs:

a) Des tensions:

$$v_k = \begin{cases} 0 & t \in [0, \alpha T] \\ Ve & t \in [\alpha T, T] \end{cases} \quad (\text{II-24})$$

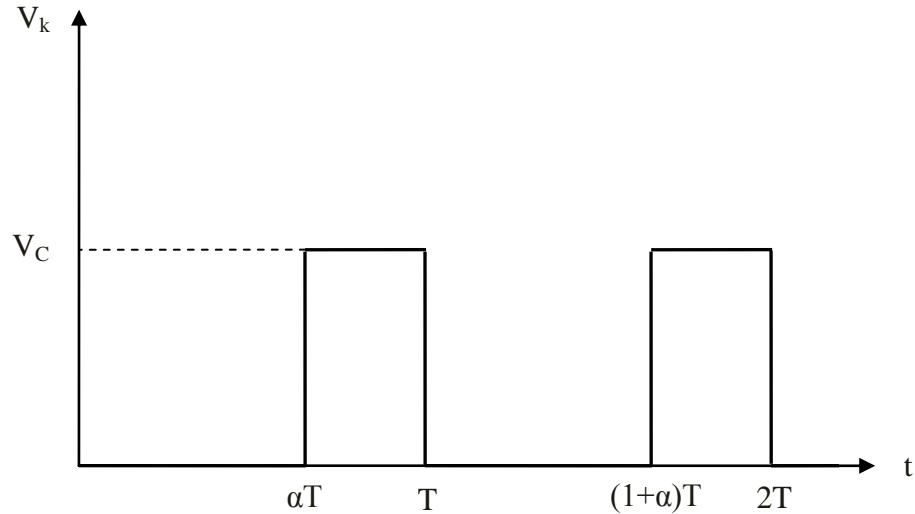


Figure II-6 : Allure de la tension aux bornes du thyristor

$$V_{kmoy} = (1 - \alpha)V_C \quad (\text{II-25})$$

$$V_{kmoy} = Ve \quad (\text{II-26})$$

Car on a $v_k = Ve - L \frac{di_s}{dt} \Rightarrow V_{kmoy} = Ve$ parce que la valeur moyenne de $L \frac{di_s}{dt} = 0$

$$\Rightarrow V_C = \frac{Ve}{1 - \alpha} \quad \text{C'est la démonstration de l'équation (II-1).}$$

$$v_d = \begin{cases} -V_C & t \in [0, \alpha T] \\ 0 & t \in [\alpha T, T] \end{cases} \quad (\text{II-27})$$

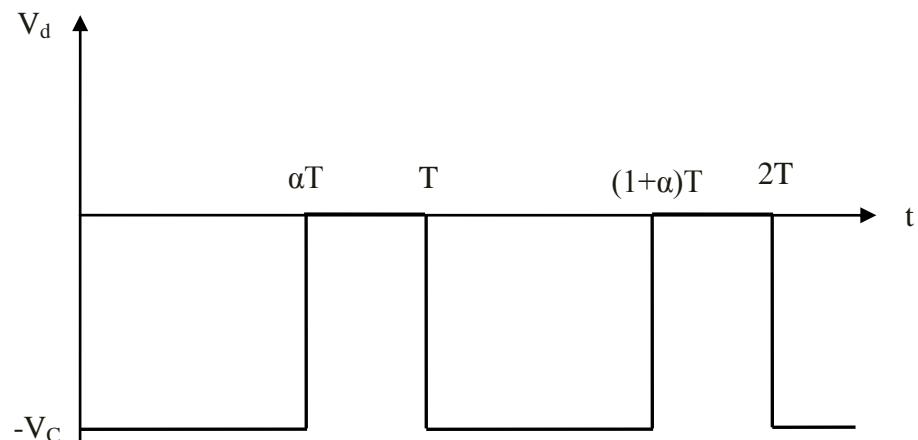


Figure II-7 : Allure de la tension aux bornes de la diode

b) Les courants :

$$i_s = \frac{Ve}{L}t + I_0 \quad \text{pour } t \in [0, \alpha T] \quad (\text{II-28})$$

$$i_s = \frac{Ve - Vc}{L}t + I_2 \quad \text{pour } t \in [\alpha T, T] \quad (\text{II-29})$$

$$\text{Avec } I_2 = I_0 + \frac{Vc}{L}\alpha T \quad (\text{II-30})$$

$$i_s = \frac{(1-\alpha)Vc - Vc}{L}t + I_0 + \frac{Vc}{L}\alpha T \quad (\text{II-31})$$

$$i_s = -\frac{Vc}{L}t + \frac{Vc}{L}\alpha T + I_0 = -\frac{Vc}{L}(t - \alpha T) + I_0 \quad (\text{II-32})$$

$$i_s = \begin{cases} (1-\alpha)\frac{Vc}{L}t + I_0 & t \in [0, \alpha T] \\ -\frac{Vc}{L}(t - \alpha T) + I_0 & t \in [\alpha T, T] \end{cases} \quad (\text{II-33})$$

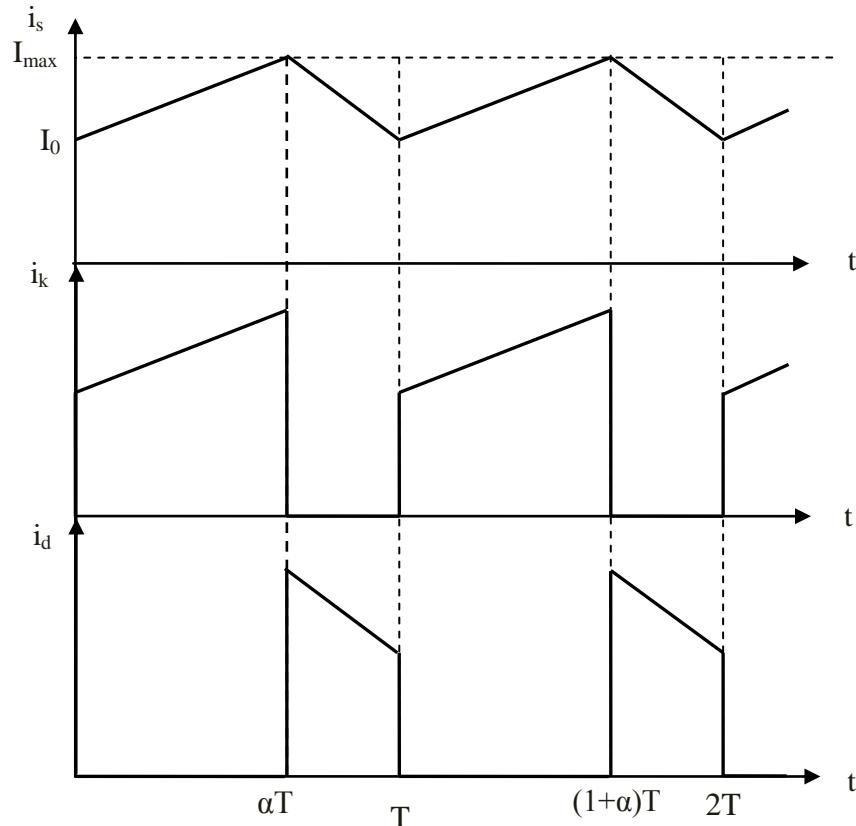


Figure II-8 : Allures des différents courants (i_s , i_k et i_d)

Puissance fournie par la source :

$$P_s = V_e \cdot i_s \quad (\text{II-34})$$

$$\Rightarrow P_s = \frac{1}{T} \int p_s dt = \frac{1}{T} \int V_e \cdot i_s \quad (\text{II-35})$$

$$P_s = V_e \cdot I_{s_{moy}} \quad (\text{II-36})$$

Puissance reçue par la charge :

$$P_c = V_c \cdot i_c \quad (\text{II-37})$$

$$P_c = \frac{1}{T} \int V_c \cdot i_c \quad (\text{II-38})$$

$$P_c = V_c \cdot I_{c_{moy}} \quad (\text{II-39})$$

Comme ce hacheur est supposé parfait $\Rightarrow P_s = P_c$

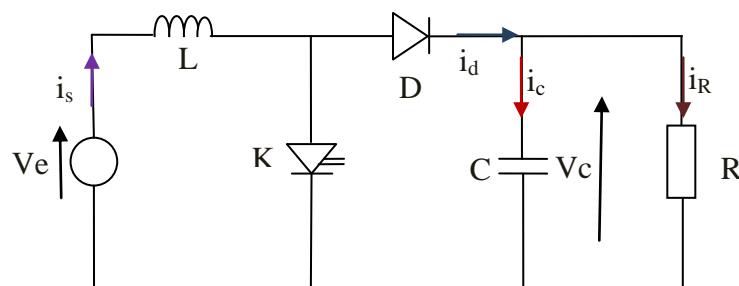
$$\Rightarrow V_e \cdot I_{s_{moy}} = V_c \cdot I_{c_{moy}} \quad (\text{II-40})$$

$$(1 - \alpha) V_c \cdot I_{s_{moy}} = V_c \cdot I_{c_{moy}} \quad (\text{II-41})$$

$$I_{s_{moy}} = \frac{I_{c_{moy}}}{1 - \alpha} \quad \text{C'est la démonstration de l'équation (II-2).}$$

$$\Delta I_L = \Delta I_s = I_{\max} - I_{\min} = \frac{\alpha \cdot V_e}{L \cdot f} \quad (\text{II-42})$$

Remarque : On réalité en régime permanent la tension v_c n'est pas constante, elle représente des ondulations.



Pour approximer cette ondulation, nous supposerons que le courant de source et le courant traversant la résistance sont constants, $i_s = Is_{moy}$ et $i_R = I_R$ avec : $I_R = Is_{moy} \cdot (1 - \alpha)$

$$i_d = i_c + I_R \quad (\text{II-43})$$

Pour $t \in [\alpha T, T]$ la diode conduit, nous avons :

$$i_d = Is_{moy} \quad (\text{II-44})$$

$$i_c = Is_{moy} - I_R = C \frac{dv_c}{dt} \quad (\text{II-45})$$

$$\frac{I_R}{1 - \alpha} - I_R = C \frac{dv_c}{dt} \quad (\text{II-46})$$

$$\frac{\alpha \cdot I_R}{1 - \alpha} = C \frac{dv_c}{dt} \quad (\text{II-47})$$

$$\frac{\alpha \cdot I_R}{1 - \alpha} = C \frac{\Delta Vc}{\Delta t} \quad (\text{II-48})$$

Δt Correspond à l'intervalle de temps choisi : $\Delta t = (1 - \alpha)T$

$$\Delta Vc = \frac{\alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot T \cdot I_R}{(1 - \alpha) \cdot C} \quad (\text{II-49})$$

$$\Delta Vc = \frac{\alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot T \cdot Vc}{(1 - \alpha) \cdot R \cdot C} \quad (\text{II-50})$$

$$\Delta Vc = \frac{\alpha \cdot T \cdot Ve}{(1 - \alpha) \cdot R \cdot C} \quad (\text{II-51})$$

$$\Delta Vc = \frac{\alpha \cdot Ve}{(1 - \alpha) \cdot R \cdot C \cdot f} \quad (\text{II-52})$$

II.5.2. Mise en parallèle de deux convertisseurs boost

La mise en parallèle des convertisseurs est une structure qui permet de partager le courant entre plusieurs cellules élémentaires. Le courant traversant chaque cellule est alors moins important. On diminue ainsi les contraintes en courant des composants.

On présente sur la figure II-9 un convertisseur continu-continu, constitué de deux boost élémentaires identiques mis en parallèle. Chaque cellule fournit la moitié de la puissance totale. Cette structure est utilisée pour réduire l'ondulation du courant d'entrée.

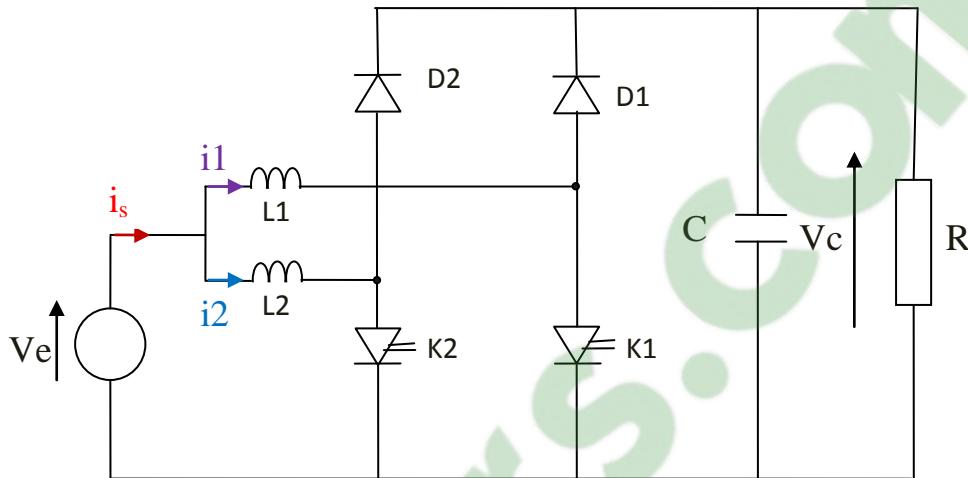


Figure II-9 : Mise en parallèle de deux boost

Dans la structure de convertisseur de la figure II-9, chaque boost élémentaire est commandé avec le même rapport cyclique α et les commandes sont décalées entre elles d'une demi-période. Le courant moyen passant dans chaque cellule correspond à la moitié du courant d'entrée. La tension de sortie a la même valeur moyenne que celle du boost classique pour un rapport cyclique donné. Tant que les deux convertisseurs élémentaires sont identiques, les courants dans les inductances sont de même forme, mais ils sont décalés d'une demi-période entre eux. Selon l'équation (II-40), les ondulations de courant dans chaque inductance sont toujours égales à :

$$\Delta I_L = \Delta I_1 = \Delta I_2 = \frac{\alpha \cdot V_e}{L \cdot f} \quad (\text{II-53})$$

II.5.2.1. Etude du convertisseur pour un rapport cyclique inférieur à 0,5

Pour un rapport cyclique inférieur à 0,5, la forme du courant de source est représentée sur la figure II-10.

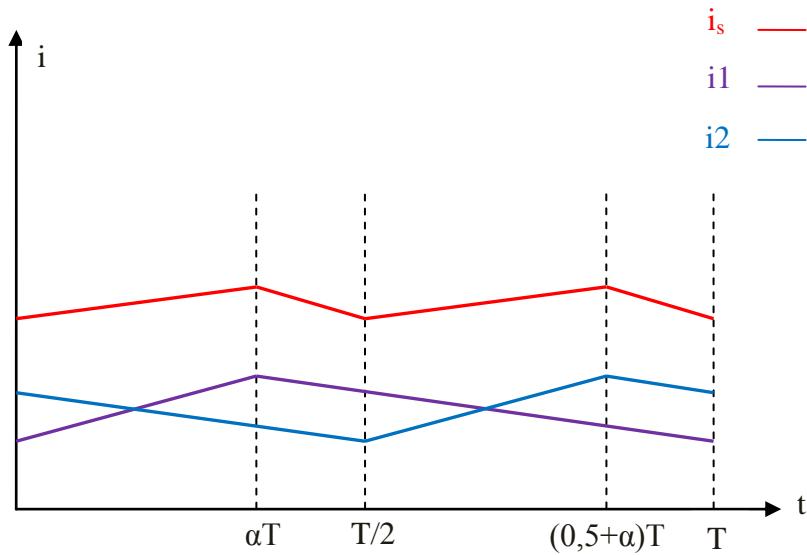


Figure II-10 : Courant dans les deux inductances et courant de source

Pour $\alpha < 0.5$

$$\dot{i}_s = \dot{i}_{L1} + \dot{i}_{L2} \quad (\text{II-54})$$

❖ Etude de l'ondulation du courant de source :

Pour ce rapport cyclique, l'ondulation du courant de source s'écrit :

$$\Delta I_s = I_{s \max} - I_{s \min} \quad (\text{II-55})$$

$$I_{s \max} = \dot{i}_s(\alpha T) \quad (\text{II-56})$$

$$\dot{i}_s(\alpha T) = \dot{i}_{L1}(\alpha T) + \dot{i}_{L2}(\alpha T) \quad (\text{II-57})$$

Pour raison de symétrie on a :

$$\dot{i}_{L2}(\alpha T) = \dot{i}_{L1}\left(\frac{T}{2} + \alpha T\right) \quad (\text{II-58})$$

$$I_{s \max} = \frac{Ve - V_C}{L} \cdot \frac{T}{2} + \frac{2 \cdot Ve}{L} \cdot \alpha T + 2I_0 \quad (\text{II-59})$$

$$I_{s \min} = \dot{i}_s\left(\frac{T}{2}\right) \quad (\text{II-60})$$

$$\dot{\mathbf{i}}_s \left(\frac{T}{2} \right) = \dot{\mathbf{i}}_{L1} \left(\frac{T}{2} \right) + \dot{\mathbf{i}}_{L2} \left(\frac{T}{2} \right) \quad (\text{II-61})$$

Du graphe des courants on a :

$$\dot{\mathbf{i}}_{L2} \left(\frac{T}{2} \right) = I_0 \quad (\text{II-62})$$

$$I_{s\min} = \frac{Ve - V_C}{L} \cdot \left(\frac{T}{2} - \alpha T \right) + \frac{Ve}{L} \cdot \alpha T + 2I_0 \quad (\text{II-63})$$

$$\Delta I_s = \frac{1 - 2\alpha}{1 - \alpha} \cdot \frac{\alpha \cdot Ve}{L \cdot f} = \frac{1 - 2\alpha}{1 - \alpha} \Delta I_L \quad (\text{II-64})$$

❖ Etude de l'ondulation de la tension de charge

Nous prenons les mêmes hypothèses que pour le cas du boost élémentaire.

$$i_{d1} + i_{d2} = i_c + i_R \quad (\text{II-65})$$

Pour $t \in \left[\alpha T, \frac{T}{2} \right]$ les diodes D₁ et D₂ sont conductrices, nous avons :

$$i_{d1} + i_{d2} = I_{S\text{moy}} \quad (\text{II-66})$$

Nous aurons la même équation que celle trouver en (II-48).

Δt Correspond à l'intervalle de temps choisi : $\Delta t = (0,5 - \alpha)T$.

$$\Delta V_C = \frac{\alpha \cdot (0,5 - \alpha) \cdot T \cdot I_R}{(1 - \alpha) \cdot C} \quad (\text{II-67})$$

$$\Delta V_C = \frac{\alpha \cdot (0,5 - \alpha) \cdot T \cdot V_C}{(1 - \alpha) \cdot R \cdot C} \quad (\text{II-68})$$

$$\Delta V_C = \frac{\alpha \cdot (0,5 - \alpha) \cdot T \cdot V_e}{(1 - \alpha)^2 \cdot R \cdot C} \quad (\text{II-69})$$

$$\Delta V_C = \frac{\alpha \cdot (0,5 - \alpha) \cdot V_e}{(1 - \alpha)^2 \cdot R \cdot C \cdot f} \quad (\text{II-70})$$

II.5.2.2. Etude du convertisseur pour un rapport cyclique supérieur à 0,5

Pour un rapport cyclique supérieur à 0,5, la forme du courant de source est représentée sur la figure II-11.

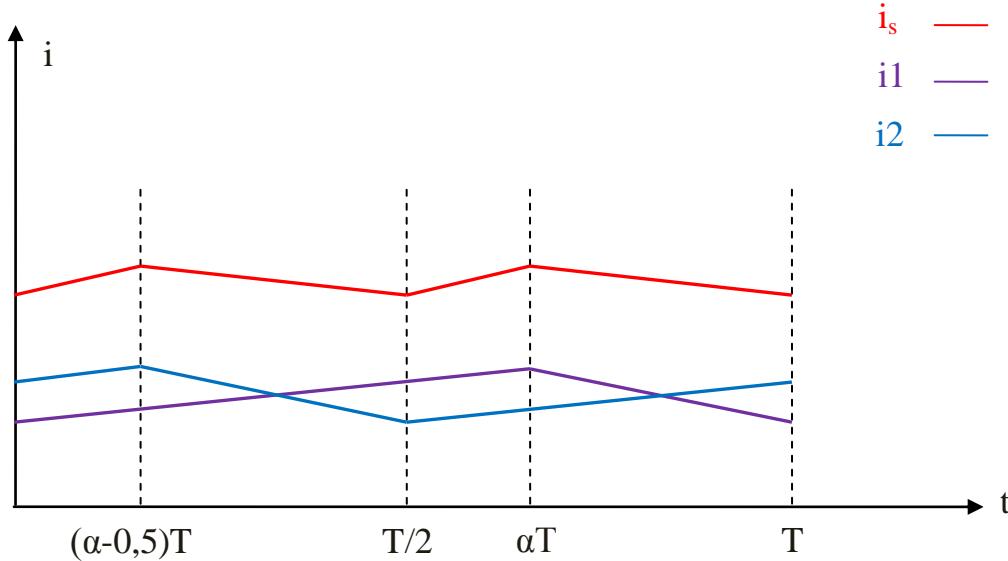


Figure II-11 : Courant dans les deux inductances et courant de source

Pour $\alpha > 0.5$

❖ Etude de l'ondulation du courant de source:

Pour ce rapport cyclique, l'ondulation du courant de source s'écrit :

$$\Delta I_s = I_{s \max} - I_{s \min} \quad (\text{II-71})$$

$$I_{s \max} = \dot{i}_s(\alpha T) \quad (\text{II-72})$$

$$\dot{i}_s(\alpha T) = \dot{i}_{L1}(\alpha T) + \dot{i}_{L2}(\alpha T) \quad (\text{II-73})$$

Pour raison de symétrie on a :

$$\dot{i}_{L2}(\alpha T) = \dot{i}_{L1}\left(\alpha T - \frac{T}{2}\right) \quad (\text{II-74})$$

$$I_{s \max} = \frac{2 \cdot V_e}{L} \cdot \alpha T - \frac{V_e}{2 \cdot L} T + 2I_0 \quad (\text{II-75})$$

$$I_{s \min} = \dot{i}_s\left(\frac{T}{2}\right) \quad (\text{II-76})$$

$$\dot{\mathbf{i}}_s \left(\frac{T}{2} \right) = \dot{\mathbf{i}}_{L1} \left(\frac{T}{2} \right) + \dot{\mathbf{i}}_{L2} \left(\frac{T}{2} \right) \quad (\text{II-77})$$

Du graphe des courants on a :

$$\dot{\mathbf{i}}_{L2} \left(\frac{T}{2} \right) = I_0 \quad (\text{II-78})$$

$$I_{s\min} = \frac{Ve}{2 \cdot L} T + 2I_0 \quad (\text{II-79})$$

$$\Delta I_s = \frac{(2\alpha - 1) \cdot Ve}{L \cdot f} = \frac{2\alpha - 1}{\alpha} \cdot \frac{\alpha \cdot Ve}{L \cdot f} = \frac{2\alpha - 1}{\alpha} \Delta I_L \quad (\text{II-80})$$

❖ Etude de l'ondulation de la tension de charge:

Pour $t \in [\alpha T, T]$ la diode D₁ conduit, nous aurons :

$$i_{d1} = \frac{Is_{moy}}{2} \quad (\text{II-81})$$

$$i_c = i_{d1} - I_R = \frac{Is_{moy}}{2} - I_R \quad (\text{II-82})$$

$$i_c = i_{d1} - I_R = \frac{I_R}{2 \cdot (1-\alpha)} - I_R \quad (\text{II-83})$$

$$i_c = \frac{(2\alpha - 1) \cdot I_R}{2 \cdot (1-\alpha)} = C \frac{dv_c}{dt} \quad (\text{II-84})$$

$$\frac{2 \cdot (\alpha - 0,5) \cdot Vc}{2 \cdot (1-\alpha) \cdot R \cdot C} = \frac{\Delta Vc}{\Delta t} \quad (\text{II-85})$$

$$\Delta Vc = \frac{(\alpha - 0,5) \cdot \Delta t \cdot Vc}{(1-\alpha) \cdot R \cdot C} \quad (\text{II-86})$$

Δt Correspond à l'intervalle de temps choisi : $\Delta t = (1-\alpha)T$

$$\Delta Vc = \frac{(\alpha - 0,5) \cdot (1-\alpha) \cdot T \cdot Vc}{(1-\alpha) \cdot R \cdot C} \quad (\text{II-87})$$

$$\Delta Vc = \frac{(\alpha - 0,5) \cdot T \cdot Ve}{(1 - \alpha) \cdot R \cdot C} \quad (\text{II-88})$$

$$\Delta Vc = \frac{(\alpha - 0,5) \cdot Ve}{(1 - \alpha) \cdot R \cdot C \cdot f} \quad (\text{II-89})$$

II.5.3. Comparaison entre la structure simple et la structure entrelacée

Le courant traversant les éléments de chaque cellule du hacheur Boost entrelacée est moins important que le courant traversant les éléments du hacheur Boost élémentaire. Ainsi, on diminue les contraintes en courant des composants.

La fréquence du courant de source et de la tension de charge est doublée par rapport à celle du découpage.

Pour comparer l'ondulation du courant de source et de la tension de charge, il suffit d'analyser la variation des rapports $\frac{\Delta Is_{\text{entrelacée}}}{\Delta Is_{\text{élémentaire}}}$ et $\frac{\Delta Vc_{\text{entrelacée}}}{\Delta Vc_{\text{élémentaire}}}$ en fonction du rapport cyclique α représentées respectivement sur les figures (II-12) et (II-13) :

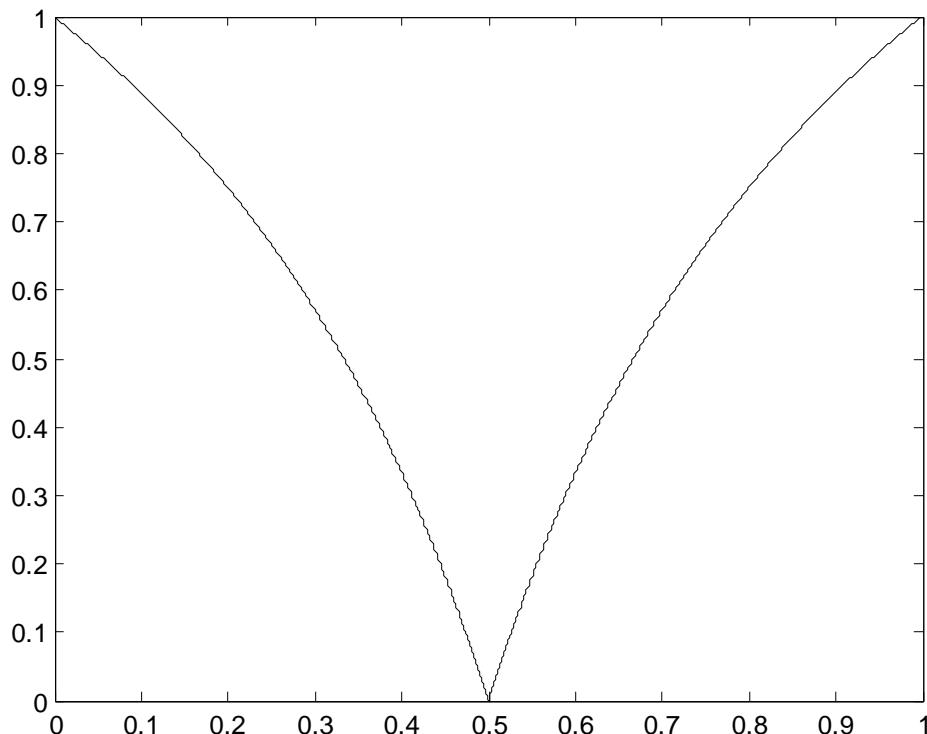


Figure II-12 : Variation du rapport des ondulations du courant de source en fonction de α

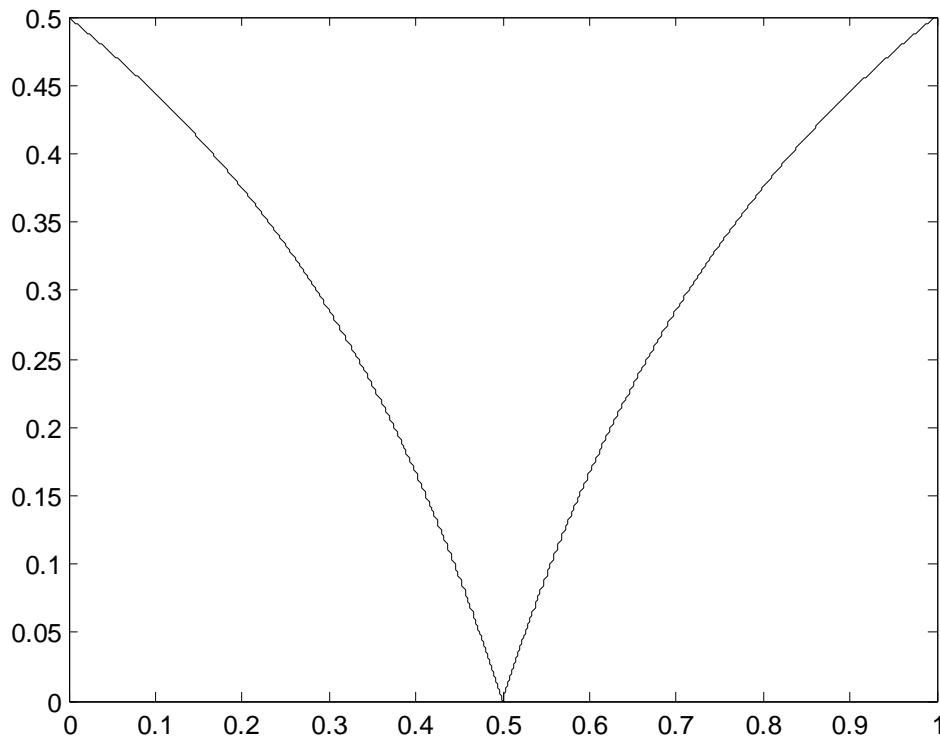


Figure II-13 : Variation du rapport des ondulations de la tension de charge en fonction de α

Le rapport d'ondulation du courant délivré par la source est compris entre 0 et 1. Donc cette ondulation est plus petite dans le cas du hacheur Boost entrelacée.

Le rapport d'ondulation de la tension de charge est compris entre 0 et 0,5. Donc cette ondulation est inférieure de plus de 50% dans le cas du hacheur Boost entrelacée.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu les différents rendements d'une chaîne de conversion photovoltaïque, l'utilité de rechercher le point de puissance maximum (MPPT) et surtout le rôle important de l'étage d'adaptation. Pour éléver la tension des panneaux photovoltaïques, les structures BOOST apparaissent les mieux adaptées. La structure BOOST entrelacée permet de diminuer l'ondulation et doubler la fréquence du courant de source et de la tension de charge et de diminuer les contraintes en courant pour les composants.

II.7. Références bibliographiques chapitre II

- [1]: Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°4 (2007)
- [2]: M. Petibon Stephane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » thèse Doctorat 2009 « Université de Toulouse ».
- [3]: M. Angel Cid Pastor « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électriques » thèse doctorat 2006 « Université de Toulouse »
- [4]: http://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Boost
- [5]: www.sitelec.org/cours/hacheurs.pdf
- [6]: Michel Pinard « Convertisseur et électronique de puissance » Dunod 2007

Consommation de l'énergie solaire photovoltaïque

III.1. Introduction

Dans les chapitres précédents nous avons vu comment produire une énergie électrique à partir de modules solaires photovoltaïques ainsi que l'adaptation de cette énergie.

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser à la façon de consommer cette énergie. L'énergie électrique est l'énergie fournie sous forme de courant électrique à un système électrotechnique ou électronique [1]. Le courant électrique existe sous deux formes « courant continu » et « courant alternatif ». Comme nous l'avons vu, un module solaire génère un courant continu. La question que nous nous posons est la suivante : est-il préférable de consommer cette énergie en courant continu ou bien la transformer et la consommer en courant alternatif ?

III.2. Courant électrique

III.2.1. définition

Un courant électrique est un déplacement d'ensemble de porteurs de charge électrique, généralement des électrons, au sein d'un matériau conducteur. Ces déplacements sont imposés par l'action de la force électromagnétique, dont l'interaction avec la matière est le fondement de l'électricité.

III.2.2. Types de courants électriques

Il existe deux types de courants électriques :

III.2.2.1. Le courant alternatif

Le courant alternatif est un courant électrique qui change de sens. Ce courant est dit périodique s'il change régulièrement et périodiquement de sens.

Un courant alternatif périodique est caractérisé par sa fréquence, mesurée en hertz (Hz), c'est le nombre d' « allers-retours » qu'effectue le courant électrique en une seconde. Un courant alternatif périodique de 50 Hz effectue 50 « allers-retours » par seconde, c'est-à-dire qu'il change 100 fois (50 allers et 50 retours) de sens par seconde.

La forme la plus utilisée de courant alternatif est le courant sinusoïdal, essentiellement pour la distribution commerciale de l'énergie électrique.

La fréquence du courant électrique distribué par les réseaux aux particuliers est généralement de 50 Hz en Europe et 60 Hz en Amérique du Nord.

On doit distinguer :

- ❖ Les courants purement alternatifs dont la valeur moyenne (composante continue) est nulle, qui peuvent alimenter un transformateur sans danger.
- ❖ Les courants alternatifs à composante continue non nulle qui ne peuvent en aucun cas alimenter un transformateur. [2]

III.2.2.2. Le courant continu

Le courant continu, par opposition au courant alternatif, est un courant électrique unidirectionnel : le courant circule à chaque instant dans le même sens, le déplacement des électrons se fait toujours dans le même sens.

Ces courants sont produits par des générateurs délivrant des tensions également continues.

Le terme de courant continu recouvre plusieurs sens :

- ❖ Courant constant : le courant est totalement constant en direction et en intensité au cours du temps. Les courants de ce type sont parfois appelés courants parfaitement continus
- ❖ Courant continu lissé : c'est un courant qui s'approche du courant constant, mais qui conserve une ondulation relativement basse par rapport à la valeur moyenne.
- ❖ Courant variable unidirectionnel : C'est un courant qui ne change pas de sens mais dont l'amplitude varie en fonction du temps, donc l'intensité. [2]

III.3. Courant continu où courant alternatif

Comme nous l'avons indiqué au début de ce chapitre, est-il préférable pour certains récepteurs électriques de consommer du courant sous forme continu ou bien alternatif ?

Pour traiter cette énigme, revenons un peu en arrière plus exactement vers la fin du 19^{ème} siècle pour réexaminer la guerre qui a opposé « Thomas Edison » contre « George Westinghouse » donc « Nikola Tesla », cette confrontation est connue sous le nom de : « guerre des courants ».

III.3.1. La guerre des courants

Si la nécessité d'utiliser des hautes tensions paraît très claire, il faut connaitre que le choix du régime alternatif sinusoïdal n'est pas tout à fait aussi évident. [3]

Si le courant alternatif a séduit les Etats américains puis le monde entier, c'est grâce à sa grande maturité technique. Lors de l'émergence des réseaux électriques à la fin du 19^{ème} siècle, le courant continu d'Edison voyait sa puissance chuter rapidement avec la distance. Il était impossible de distribuer le courant au-delà d'un kilomètre de manière fiable. Les premiers réseaux installés aux Etats-Unis étaient fréquemment soumis à des coupures de courant, dues aux pertes importantes par effet Joule dans les réseaux de distribution en basse tension. Les réseaux de courant continu, ne pouvaient techniquement pas moduler leur voltage; en restant à de faibles tensions, ils nécessitaient l'implémentation de nombreux générateurs dans la ville-même. [4]

Quand l'éléphant de cirque Topsy mourut d'une charge de courant alternatif, Thomas Edison avait déjà perdu la «War of Currents». L'équipe de l'inventeur américain fixa cette «électrocution» sur pellicule pour montrer les dangers du courant alternatif. La campagne macabre de 1902 fut sans doute la dernière tentative pour empêcher la percée du transport de courant alternatif comme solution technique standard aux Etats-Unis. Aux débuts de l'électrification, la tension continue d'Edison était encore la règle. Mais en 1896 déjà, son rival George Westinghouse réussit à faire accepter le système de tension alternative selon les travaux de Nikola Tesla. Jusqu'à aujourd'hui, l'approvisionnement énergétique repose principalement sur le courant alternatif ou la tension alternative, et cela pour une bonne raison: «La tension alternative se transforme facilement en niveaux de tension supérieurs. Ainsi, lors du transport d'électricité, les pertes sont relativement faibles», commente Thilo Krause de l'Institut pour le transport de l'énergie électrique et la technique haute tension de l'EPF de Zurich. En effet, à chaque transport, une partie de l'énergie électrique se transforme en d'autres formes énergétiques, par exemple en chaleur, et est ainsi perdue pour une autre utilisation. «Plus l'intensité du courant électrique est forte, plus les pertes sont importantes». [5]

III.3.2. Le retour du continu dans le transport d'électricité

Le courant alternatif présente un inconvénient: la ligne de transport doit être continuellement chargée et déchargée parce que sa polarité change cinquante fois par seconde

et cela crée des champs électromagnétiques qui contrecarrent le processus de charge. Il faut donc de l'énergie réactive pour pouvoir transporter de l'énergie utile. A partir d'une certaine distance, l'énergie réactive est si grande que le transport devient inefficace [5]. Ainsi, le courant continu est revenu sur les projets de transport électrique dans les cas où les câbles ne pouvaient être aériens (une liaison aérienne à courant continu est plus cher que l'aérien alternatif jusqu'à 250 Km environ. [6]) et nécessitaient d'être enterrés ou immergés. En effet, le courant alternatif est électromagnétique. Suivant le milieu dans lequel il évolue, il accuse plus ou moins des pertes magnétiques. Dans les cas particuliers où le courant doit passer dans la terre ou l'eau de mer, les systèmes alternatifs accusent des pertes plus importantes. A l'image du courant continu qui nécessitait des générateurs disséminés sur tout le réseau, le passage du courant dans des lignes alternatives non aériennes requerrait de multiples stations afin de fournir la puissance réactive compensant ces pertes.

Les courants continus ne nécessitent aucune puissance réactive ; ils n'ont de pertes majeures que par simple effet Joule (échauffement des fils lié à leur résistance), ce qui représente entre 1 et 3% de pertes tous les 1000 kilomètres suivant la technologie utilisée. Ce type de ligne présente encore d'autres avantages : il ne nécessite aucune coordination de fréquence ou de phase des réseaux interconnectés. De plus, à puissance égale, une ligne à courant continu est moins coûteuse à la construction qu'une ligne à courant alternatif. Le problème d'investissement ne se situe qu'au niveau des convertisseurs, constituants les terminaisons, imposants et complexes.

Ainsi fut construite dès 1961 le «Cross Channel» (connue en France sous le nom sobre d'IFA pour «Interconnexion France Angleterre»), une des premières lignes modernes à haute tension à courant continu (appelée communément HVDC pour «High Voltage Direct Current»). Rénovée dans le milieu des années 1980, cette liaison assure aujourd'hui l'alimentation en électricité de plus de 3 millions de foyers britanniques par les centrales françaises. Notons que les futures interconnexions entre la France et les pays voisins, l'Italie et l'Espagne, se feront par des lignes HDVC souterraines.

La particularité de pouvoir interconnecter facilement est souvent mise en avant par les constructeurs de lignes HVDC. Elles permettent en effet l'indépendance des réseaux entre pays voisins, ainsi que de sommer des puissances produites dans un parc de centrales multiple voire diffus. [4]

III.3.3. Comparaison entre les deux régimes

De façon tout à fait naturelle, il est possible de comparer les avantages et inconvénients des régimes alternatif et continu

III.3.3.1. Courant continu

❖ Avantages :

- Production directe par panneau solaire photovoltaïque ;
- Elévation et abaissement de la tension avec l'avènement de l'électronique de puissance ;
- Pas d'effets réactifs, le facteur de puissance est unitaire (en dehors de déformations) ;
- Facilite l'interconnexion des réseaux, il suffit d'avoir partout la même tension ;
- Pas d'effet de peau, les câbles et les lignes sont simples et moins chers ;
- Permet le stockage d'énergie dans des batteries.

❖ Inconvénients :

- Difficulté de couper les courants continus, d'où des dispositifs de coupure plus performants et plus chers ;
- Terminaisons très couteuses.

III.3.3.2. Courant alternatif

❖ Avantages :

- Production directe par alternateur ;
- Permet l'utilisation de transformateur pour éléver et abaisser la tension ;
- Facilite la coupure des courants par le passage naturel par zéro 2 fois par période c'est-à-dire 100 fois par seconde.

❖ Inconvénients :

- Implique un effet de peau, d'où la nécessité de câbles et lignes adaptés et donc plus chers ;
- Difficulté d'interconnexion de plusieurs réseaux (il faut garantir l'identité de la tension, de la fréquence et de la phase) ;

- Implique des effets inductifs et capacitifs pénalisants pour un certain nombre de raisons (facteur de puissance < 1 principalement) ;
- L'indispensable puissance réactive.

III.3.3.3. Résultats de la comparaison

Il apparaît donc que la pluparts des avantages de l'un correspondent aux inconvénients de l'autre. Comme nous l'avons vu, la guerre des courants a pris fin en faveur du courant alternatif et ceux seulement à cause du problème de transport du courant continu. Maintenant que ce problème est résolu grâce aux lignes HVDC, ce débat va-t-il être relancé ?

III.4. Consommation de l'énergie solaire photovoltaïque

La terre tourne au tour du soleil en une année d'environ 365 jours, et autour d'elle-même en un jour. Ces rotations produisent respectivement ce que nous appelons : « les 4 saisons » et « le jour et la nuit ». Nous distinguons ainsi deux types de consommations :

III.4.1. Consommation de l'énergie durant le jour

Les modules solaires produisent de l'électricité en permanence. Cette énergie sera utilisée pour le chargement des batteries de stockage, l'alimentation des récepteurs DC via un adaptateur DC-DC, l'alimentation des récepteurs AC via un onduleur purement sinusoïdal (système photovoltaïque isolé) ou le renvoie d'énergie au réseau (système photovoltaïque raccordé au réseau).

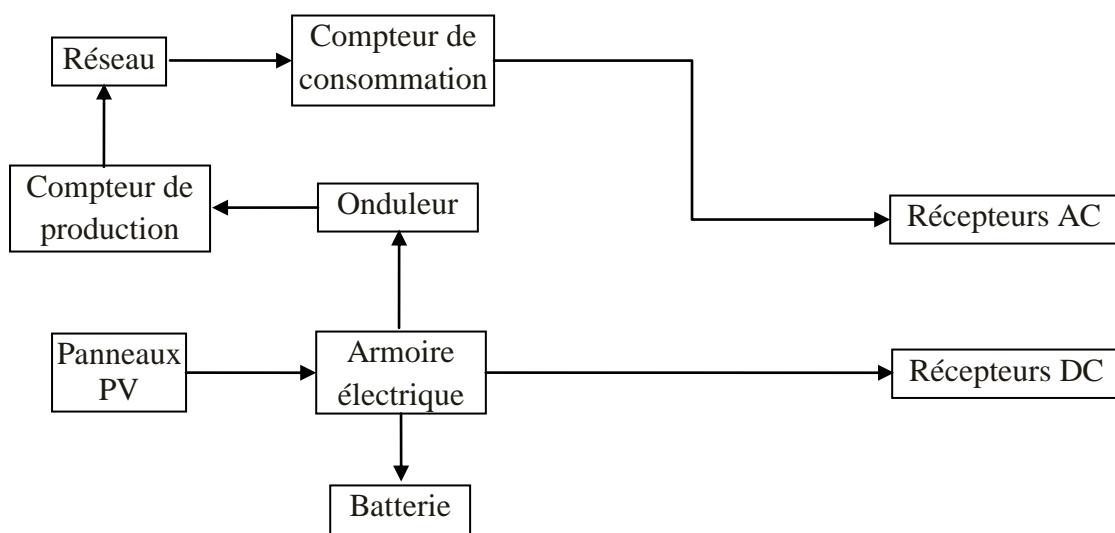


Figure III-1 : Répartition d'énergie pour un système photovoltaïque raccordée au réseau

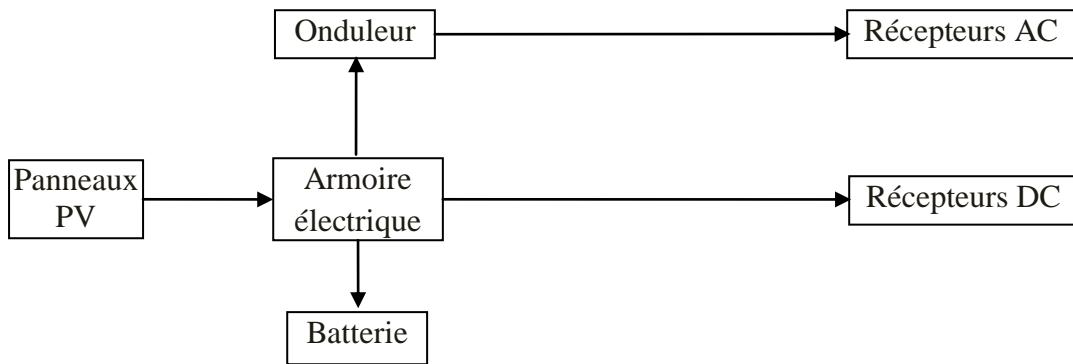


Figure III-2 : Répartition d'énergie pour un système photovoltaïque isolé.

III.4.2. Consommation de l'énergie durant la nuit

Les batteries prendront le relais, elles débiteront sur les récepteurs DC et sur les récepteurs AC (dans le cas d'un système photovoltaïque isolé).

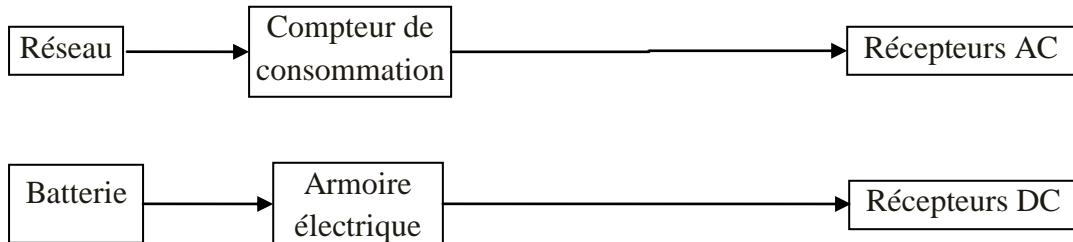


Figure III-3 : Répartition d'énergie pour un système photovoltaïque raccordé au réseau

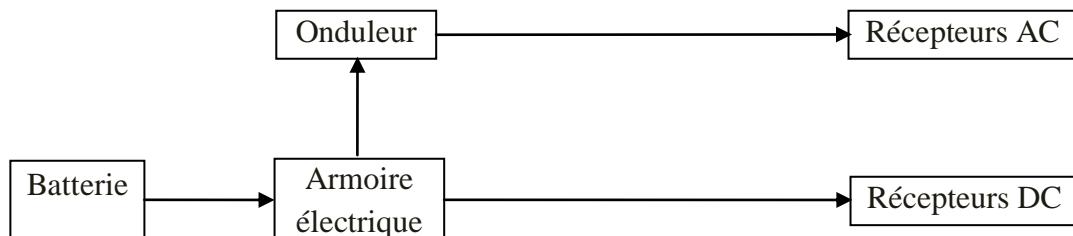


Figure III-4 : Répartition d'énergie pour un système photovoltaïque isolé

III.4.3. L'armoire électrique

Les éléments de l'armoire électrique sont représentés sur la figure III-5 :

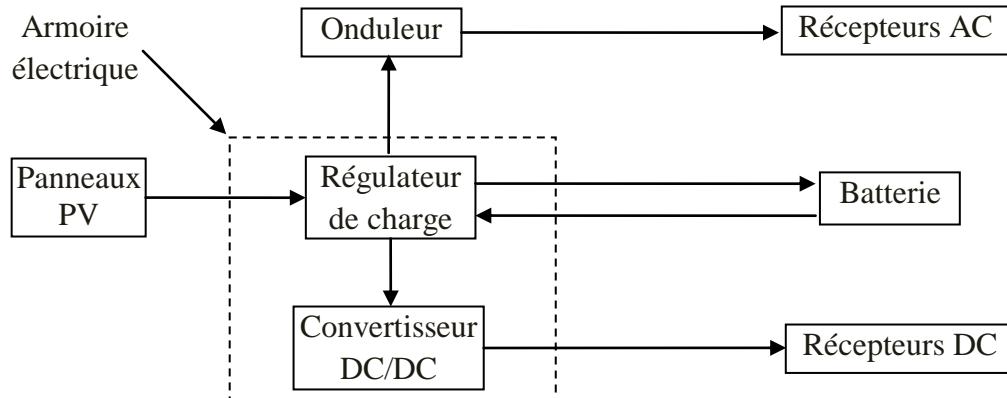


Figure III-5 : Armoire électrique

- Régulateur de charge : Comme nous l'avons indiqué dans le premier chapitre, le régulateur de charge contrôle le flux d'énergie, protège la batterie contre les surcharges (solaires) ainsi que les décharges profondes (utilisateur) et doit également assurer un fonctionnement à puissance optimale (poursuite du MPPT) ;
- Convertisseur DC/DC : Dans notre cas c'est un hacheur BOOST entrelacé ;
- Fusibles et disjoncteurs : Pour protéger et assurer un bon fonctionnement du système.

III.5. Fonctionnement des récepteurs électriques

Les récepteurs électriques habituellement utilisés peuvent se ranger en deux catégories:

- ❖ Les appareils qui fonctionnent directement sous la tension du secteur: les appareils de chauffage (four, réchaud, fer à repasser), d'éclairage (lampe à incandescence, tubes luminescents) ou les récepteurs contenant des moteurs (machine à laver, réfrigérateur, tondeuse à gazon, mixeur, perceuse...)
- ❖ Les récepteurs électroniques: ordinateurs, chaîne Hi fi qui ne fonctionnent pas en alternatif mais en courant continu. D'ailleurs, certains de ces appareils peuvent fonctionner sur piles et possèdent un adaptateur externe permettant de remplacer l'énergie très coûteuse des piles par celle du secteur. Dans un ordinateur de bureau ou une chaîne Hi fi, l'adaptateur est interne, il constitue la partie alimentation de l'appareil. De nos jours certains appareils possèdent des adaptateurs externes exemples : ordinateurs portables, lecteurs DVD etc.... [7]

Remarque : actuellement, il existe plusieurs récepteurs qui fonctionnent avec du courant continu (réfrigérateur, ventilateur, machine à laver(USA)...etc).

III.5.1. L'adaptateur AC-DC

L'adaptateur permet d'obtenir une **basse tension continue** à partir du **220V alternatif** de la prise du secteur. Il ya deux types d'adaptateurs :

- ❖ **1^{er} type :** Ce type d'adaptateur consiste à transformer la valeur efficace du réseau à l'aide d'un transformateur, puis la redresser et la filtrer pour être consommé par le récepteur.

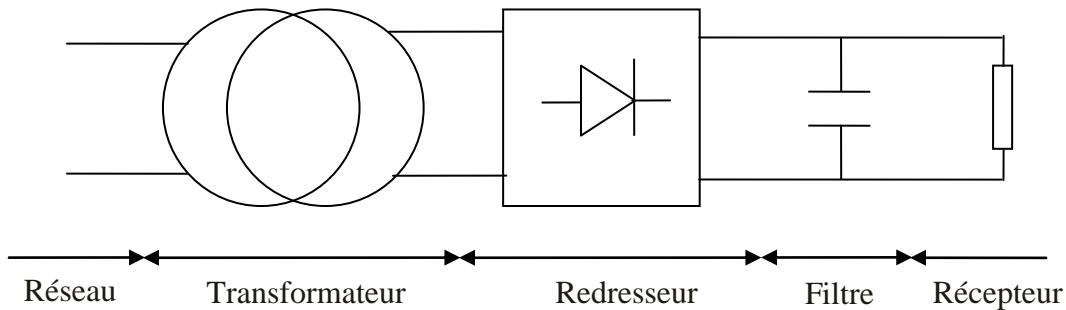


Figure III-6 : Principe de fonctionnement du 1er type d'adaptateur

L'inconvénient de ce type d'adaptateur est : le volume, le poids et le coût très élevé du transformateur.

- ❖ **2^{ème} type :** Actuellement, l'alimentation des appareils est constituée d'un redresseur en pont de diode monophasé pour redresser la tension du réseau, suivie d'un condensateur qui lisse la tension redressée et d'un hacheur qui abaisse cette tension pour être adapter à la demande du récepteur.

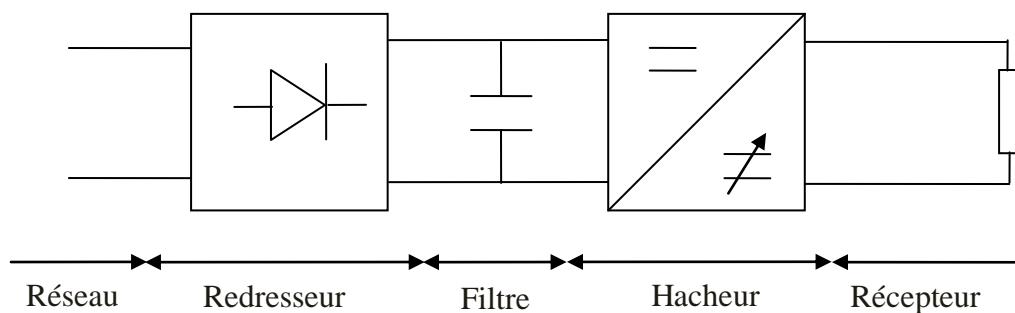


Figure III-7 : Principe de fonctionnement du 2^{ème} type d'adaptateur

La tension redressé et filtré a pour valeur moyenne 300VDC. Cette tension peut être obtenue à partir du générateur photovoltaïque. Donc pour faire fonctionner notre récepteur, il suffit de connecter l'entrée du hacheur sur notre source de tension continu obtenue à l'aide des modules solaires (sortie du hacheur entrelacé).

III.5.2. Modification proposé pour l'adaptateur AC-DC

Nous allons nous intéresser sur le deuxième type d'adaptateur. Ce type d'adaptateur contient trois (3) blocs de transformation :

- ❖ Redressement : cette conversion est assurée par un pont de diode monophasé (figure).

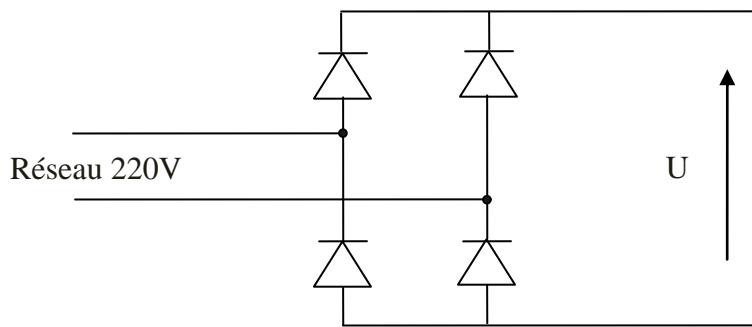


Figure III-8 : Pont à 4 diodes (pont de Greatz)

La tension moyenne à la sortie du redresseur est:

$$U_{moy} = \frac{2 \cdot V_{max}}{\pi}$$

$$\text{Avec } V_{max} = 220 \cdot \sqrt{2} = 310V$$

- ❖ Lissage de la tension redressé : La tension redressée a toujours le même signe mais elle varie de 0 à Vmax.

Pour obtenir une tension lissée, un condensateur est placé en dérivation à la sortie du pont de redressement. Ce bloc consiste à empêcher la variation brutale de la tension redressée. Nous allons choisir un condensateur qui va imposer une tension lissée de valeur moyenne égale à 300VDC.

- ❖ Conversion DC-DC : Cette conversion est assurée par un convertisseur DC-DC qui abaisse la tension lissée (300VDC) pour avoir la tension de fonctionnement du récepteur.

Pour faire fonctionner cet adaptateur sur notre source de tension (sortie du hacheur entrelacé), nous proposons au fabricant de rajouter une entrée en tension continu après le bloc de filtrage.

III.5.3. Récepteurs fonctionnant avec du courant continu

Actuellement, plusieurs récepteurs électriques fonctionnent avec du courant continu (12V ou 24V). Pour faire fonctionner ces récepteurs dans notre maison, on pourrait proposer au fabricant de rajouter un adaptateur DC-DC (300VDC / tension de fonctionnement du récepteur).

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons évoqués la guerre qui c'est déroulée à la fin du 19^{ème} siècle entre le courant continu et le courant alternatif. Nous avons vu que le courant continu a fait son retour principalement dans le domaine du transport et que ce dernier présente plusieurs avantages par rapport au courant alternatif. Dans le domaine de l'aviation on parle actuellement de l'avion plus électrique à l'avion tout électrique (le cas de l'Airbus A380 est souvent cité), plusieurs chercheurs travaillent pour. Pour y arriver les chercheurs envisagent d'utiliser un réseau principal et de secours en courant continu. Ce dernier permet de supprimer l'étage redresseur, d'où un gain de masse. De plus, le retour du courant ce fait par la structure métallique de l'avion ; il y a donc un seul conducteur d'alimentation. Cela diminue la masse des câbles comparativement au triphasé. Ils citent également le problème de réserve énergétique, d'où la nécessiter de consommer avec un meilleur rendement, pour cette raison, ils préconisent le retour au courant continu. Une gestion adéquate de la consommation de l'énergie électrique est indispensable. Plus récemment, l'éventualité d'un réchauffement climatique met l'accent sur l'urgence d'un habitat économe en énergie et respectueux de l'environnement. [8][9]

III.7. Référence bibliographique chapitre III

[1]: http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_%C3%A9lectrique

[2]: http://fr.wikipedia.org/wiki/Courant_%C3%A9lectrique

[3]: Luc Lasne « Electrotechnique » Dunod 2008

[4]: <http://energie.sia-conseil.com/20100309-le-retour-du-continu-dans-le-transport-delectricite-partie-1-la-technologie/>

[5]: Bulletin de l'office fédéral de l'énergie OFEN N°3 Mai 2010

[6]: F. Meslier, le 12 novembre 2008 « Les technologies de transport de l'électricité »

[7]: <http://webetab.ac-bordeaux.fr/Pedagogie/Physique/Physico/Electro/e06trans.htm>

[8]: Journées 2004 de la section électrotechnique du club EEA, 18-19 mars 2004, Cergy-Pontoise «de l'avion plus électrique à l'avion tout électrique »

[9]: M. Sylvain Bonhomme « Méthodologie et outils pour la conception d'un habitat intelligent » thèse doctorat 2008 « Université de Toulouse »

Gestion de la consommation d'énergie

IV.1. Introduction

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, un module solaire est un générateur de courant lorsqu'il est soumis à une source de lumière. Les inconvénients d'une telle installation sont :

- Variation climatique ;
- Limitation de la puissance fournie par générateur;
- Epuisement de l'énergie stocké le soir.

Nous nous appuierons dans ce chapitre, sur l'approche Systèmes Multi-Agents pour montrer qu'il est possible dans le contexte de l'habitat d'exploiter des capacités de décision et de communication embarquées dans les équipements domestiques dans l'habitat et dans les sources d'énergie afin d'optimiser la consommation d'énergie. Nous proposerons donc un système de gestion de l'énergie pour l'habitat, capable de trouver dynamiquement une politique de consommation d'énergie tout en prenant en compte des critères posés par l'usager, les contraintes diverses des équipements et la disponibilité des sources d'énergie. Ce système domotique est appelé MAHAS.

IV.2. La domotique

La domotique est l'ensemble des techniques de l'électronique, de la physique du bâtiment, d'automatismes, de l'informatique et des télécommunications utilisées dans les bâtiments. La domotique vise à apporter des fonctions de confort (optimisation de l'éclairage, du chauffage), de gestion d'énergie (programmation), de sécurité (comme les alarmes) et de communication (comme les commandes à distance ou l'émission de signaux destinés à l'utilisateur) que l'on peut retrouver dans les maisons, les hôtels, les lieux publics...[1]

IV.2.1. Les domaines de la domotique

Les principaux domaines dans lesquels s'appliquent les techniques de la domotique sont :

- ❖ la programmation des appareils électrodomestiques, électroménagers. Un micro moteur synchrone entraîne, au moyen de réducteurs appropriés, des cames qui ouvrent et ferment les contacts.
- ❖ la gestion de l'énergie, du chauffage (par exemple, il peut gérer les apports naturels en fonction de l'enveloppe thermique du bâtiment), de la climatisation, de la

ventilation, de l'éclairage, de l'ouverture et de la fermeture des volets (par exemple en fonction de l'ensoleillement), de l'eau (le remplissage de la baignoire peut s'arrêter automatiquement grâce à un senseur, les robinets de lavabos peuvent ouvrir l'eau à l'approche de mains, etc.). Il est également possible de recharger certains appareils électriques (ordinateurs, etc.).

- ❖ la sécurité des biens et des personnes (alarmes, détecteur de mouvement, interphone, digicode).
- ❖ la communication entre appareil et utilisateur par le biais de la sonification (émission de signaux sous forme sonore).
- ❖ le « confort acoustique ». Il peut provenir de l'installation d'un ensemble de haut-parleurs permettant de répartir le son et de réguler l'intensité sonore.
- ❖ la gestion des ambiances lumineuses.
- ❖ la compensation des situations de handicap et de dépendance. [1]

IV.2.2. Le système domotique MAHAS : Multi-Agents Home Automation System

Dans l'habitat, un système de gestion de l'énergie est un système qui a généralement accès à l'énergie produite par des producteurs distants (via le réseau de transport/ distribution électrique national), mais qui peut également disposer de ses propres sources d'énergie (par exemple : solaire, éolienne, pile à combustible,...). Les trois principales caractéristiques d'un tel système est d'être :

- ❖ *Distribué* : les sources et les charges sont réparties spatialement et leurs systèmes de commandes sont indépendants les uns des autres ;
- ❖ *Flexible* : les sources d'énergie sont redondantes et certaines charges peuvent accumuler de l'énergie (énergie thermique) ou satisfaire avec retard à des demandes de services (différer un lavage, une cuisson) ;
- ❖ *Ouvert* : le nombre de sources et de charges doit pouvoir évoluer sans que cela ne remette en cause le fonctionnement global du système.

Il s'agit ici de doubler le réseau d'énergie de l'habitat par un système d'information capable d'ajuster dynamiquement la consommation d'énergie aux différentes contraintes.

Pour parvenir à cet ajustement, les charges consommatrices d'énergie de l'habitat, tout comme les sources de production d'énergie, sont équipées d'agents logiciels dotés de capacités de décision et de communication et embarqués sur des microcontrôleurs Java. Selon les conditions météorologiques, les informations en provenance des autres agents, les habitudes de l'usager et les informations internes (des charges ou des sources). [2]

IV.2.3. Définition de l'agent

Un agent est une entité réelle ou virtuelle dont le comportement est autonome, évoluant dans un environnement qu'il est capable de percevoir et sur lequel il est capable d'agir, et d'interagir avec les autres agents.

A partir de cette définition, [Ferber (1995)] définit un agent comme une entité physique ou virtuelle :

- Qui est capable d'agir dans un environnement ;
- Qui peut communiquer directement avec d'autres agents ;
- Qui est mu par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser) ;
- Qui possède des ressources propres ;
- Qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement ;
- Qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune) ;
- Qui possède des compétences et offre des services ;
- Qui peut éventuellement se «reproduire» ;
- Qui a un comportement qui tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit.

Cette définition comprend plusieurs termes qui sont importants. Par exemple, une entité physique est un objet agissant dans le monde réel comme un robot, une voiture, etc. ; une entité virtuelle peut être un composant logiciel ou un module informatique et n'existe pas physiquement.

Les agents n'ont qu'une représentation partielle de ce qui se passe dans leur environnement. C'est pour cela que les agents doivent coopérer pour atteindre un ou des buts globaux. [3]

- Un agent (d'une source) détermine quelle est l'énergie qu'il est prêt à fournir ;
- Un agent (d'une charge) détermine quels seront ses propres besoins d'énergie en tenant compte des contraintes de l'usager.

A partir de ces prédictions locales, un «plan de consommation d'énergie» est conjointement construit par les différents agents. Ce plan est ensuite, soit appliqué tel quel, soit modifié dynamiquement en cas de perturbations imprévues (par exemple : un pic de consommation). En domotique, le «confort de l'usager» est un aspect important à prendre en considération. Dans le système MAHAS, une notion de «préférences de l'usager» est représentée par une fonction de satisfaction associée à chaque agent. Par exemple, un agent embarqué dans un radiateur électrique aura une fonction de satisfaction modélisant la plage de températures acceptable par l'usager. [2]

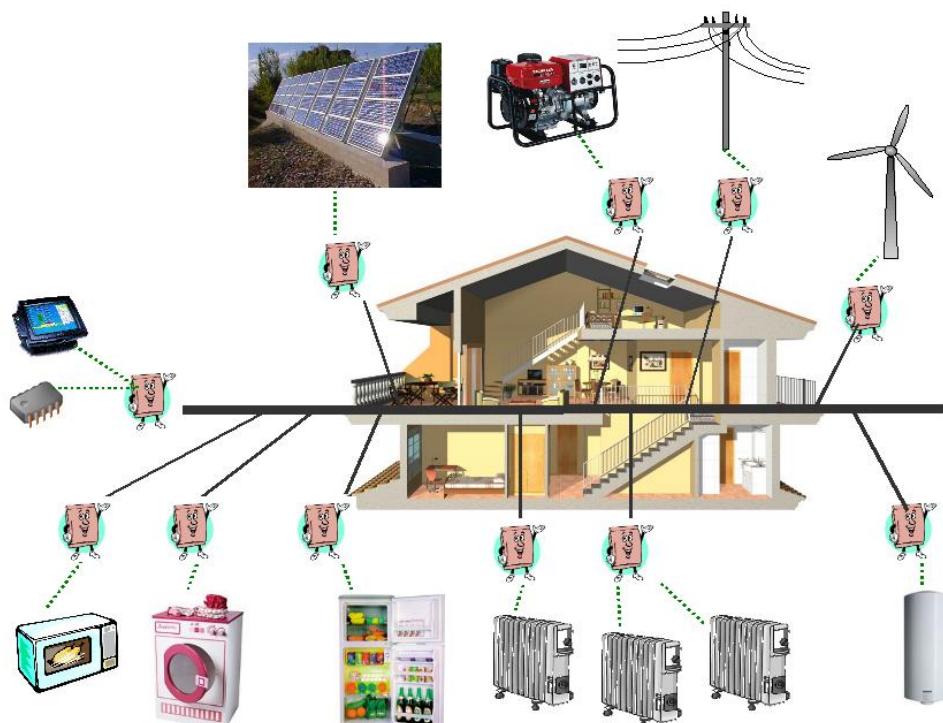


Figure IV-1 : Structure globale du système MAHAS pour la gestion d'énergie domestique.

IV.3. Mécanismes du système MAHAS

Le mécanisme d'urgence et le mécanisme d'anticipation sont les deux principes fondamentaux du système MAHAS.

IV.3.1. Mécanisme réactif

Les Systèmes Multi-Agents constitués uniquement d'agents réactifs possèdent généralement un grand nombre d'agents. Chaque agent est dénué de capacité de raisonnement intelligent sophistiqué (comportement réactif). Le comportement intelligent résulte de la pertinence des échanges entre agents. Envisager un collectif pose alors le problème d'organiser les différentes activités des agents afin que globalement ce collectif se comporte comme un tout cohérent et réponde aux exigences qui lui sont fixées. La convergence du comportement de l'ensemble des agents tend vers un objectif, mais il existe peu de cas où la solution trouvée soit la solution optimale. Néanmoins, dans les situations complexes comme la gestion de l'énergie dans l'habitat, une bonne solution (admissible) est généralement suffisante.

Le mécanisme réactif est un mécanisme essentiel du système MAHAS. Il permet de réagir à des événements imprévus (manque d'énergie imprévue dans une période de temps, consommation non programmée, etc.) et d'éviter l'interruption totale du fonctionnement de certains équipements prédefinis (arrêt complet d'un four ou d'un radiateur dans une pièce), cela permet de faire face aux situations d'urgence et de maintenir un confort satisfaisant pour l'utilisateur. Ce mécanisme réalise ce que l'on peut appeler un « délestage intelligent » puisque certains équipements peuvent être interrompus temporairement. Toutefois, contrairement à un délesteur classique pour lequel les équipements non prioritaires sont définis a priori pour une installation, ici, les agents embarqués dans les équipements négocient lesquels seront délestés.

Ce mécanisme travaille sur des valeurs réelles d'énergie sur une période relativement courte (de l'ordre d'une minute) parce que d'une part, son objectif est de réagir à des événements imprévus instantanés, et d'autre part, un niveau plus proche de l'équipement est nécessaire pour prendre en compte les valeurs réelles de consommation et de production d'énergie. [3]

IV.3.1.1. Principe du mécanisme réactif

Comme nous l'avons vu précédemment, en domotique, le confort est une notion importante à prendre en considération car le but d'un système domotique est de répondre à un besoin de confort tout en minimisant le coût énergétique. Cette notion est traduite par des fonctions de satisfaction.

Un Système Multi-Agents est dit « réactif » si son comportement repose sur des actions déclenchées suivant un processus stimulus-réponse. Mais pour que les agents puissent agir, ils doivent observer leur environnement (y compris leur état). Dans le système MAHAS, le mécanisme réactif s'appuie sur la notion de satisfaction pour déterminer son état courant et pour décider d'actions à entreprendre.

Ce mécanisme est déclenché quand le niveau de satisfaction d'un agent tombe en dessous d'une certaine valeur ; un agent commencera alors une négociation avec les autres agents. Ainsi, le mécanisme réactif ajuste en temps réel les consignes prédictes en fonction de l'état courant de l'équipement, des contraintes et des critères de l'usager. De nouvelles consignes sont alors transmises aux équipements.

Par analogie avec le principe de Système Multi-Agents réactif, les agents du mécanisme réactif se comportent selon un processus stimulus-réponse avec de capacité de communication (envoi/réception des messages). Le rôle d'un agent est le suivant :

- ❖ Il surveille en permanence son niveau de satisfaction courant (par exemple, la valeur température pour le service de chauffage : un capteur physique) ;
- ❖ lorsque son niveau de satisfaction tombe en dessous d'une valeur de satisfaction (satisfaction critique), il en avertit les autres agents (demande d'aide en envoyant des messages) ;
- ❖ Lorsqu'il reçoit des demandes des autres agents, il les analyse et fait des propositions en retour ;
- ❖ Lorsqu'il reçoit des réponses à ses propres demandes, il choisit les propositions les plus intéressantes. [3]

IV.3.1.2 Protocole de négociation

Le protocole de négociation du mécanisme réactif se décompose en trois grandes phases dont les principes sont les suivants :

- ❖ Phase de demande d'énergie : pendant cette phase, un agent demande aux autres agents une aide pour qu'il puisse augmenter son niveau de satisfaction ;
- ❖ Phase de décision : l'agent, qui avait demandé de l'aide, analyse les propositions et peut soit les accepter, soit les refuser. En cas d'insuffisance des propositions, une nouvelle phase de demande d'énergie peut être déclenchée ;
- ❖ Phase de proposition : les agents font des propositions correspondant à la demande d'un agent et ils les lui envoient.

Un certain nombre de performatifs permettent de déterminer des actes de communication. Dans le mécanisme réactif, il y en a trois : request, propose et accept.

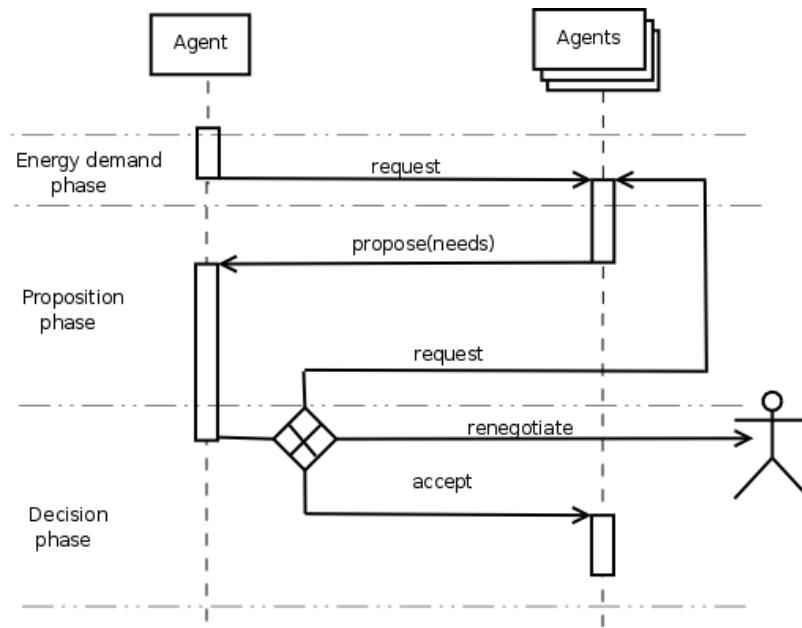


Figure IV-2 : Protocole de négociation des agents : mécanisme réactif.

- **Request** : ce message initie une négociation et est envoyé quand une situation d'urgence est détectée. Un agent envoie ce message aux autres agents quand son niveau de satisfaction tombe en dessous du niveau de satisfaction critique ou quand il veut démarrer alors que cela n'a pas été planifié.
- **Propose** : ce message est la réponse au message « request » envoyé par un agent. Il contient l'ensemble des propositions durant l'intervalle demandé.

- **Accept** : ce message indique à certains agents qu'une de ses propositions a été acceptée. [3]

IV.3.2. Mécanisme anticipatif

Au mécanisme d'urgence est associé un mécanisme d'anticipation qui pré-calcule un «plan global de consommation de l'énergie» en fonction des prédictions de consommation des différentes charges et des prédictions de disponibilité des sources d'énergie. Le mécanisme d'anticipation s'appuie sur le fait qu'il y a d'une part, des équipements électriques capables d'emmagerer de l'énergie sous forme thermique (un cumulus par exemple) et d'autre part, des équipements qui peuvent être décalés dans le temps (un lave-linge par exemple).

IV.3.2.1. Principe du mécanisme anticipatif

L'objectif de ce mécanisme est de calculer un « plan prédictif global d'énergie » en fonction des prédictions de consommation des équipements et des prédictions de disponibilité des sources d'énergie. La prédition repose sur des prévisions météorologiques et des programmations de services par l'usager. Il prépare à l'avance un plan de consommation et de production d'énergie pour un horizon temporel en organisant la production et la consommation d'énergie de manière prédictive ou proactive lorsque des événements sont prévus. Le mécanisme d'anticipation sera lancé périodiquement, lorsque le plan courant ne peut plus être appliqué par les agents au niveau du mécanisme réactif ou lorsque de nouvelles prévisions seront disponibles.

Ce mécanisme s'appuie sur le fait qu'il y a, d'une part, certains équipements capables d'emmagerer de l'énergie sous forme thermique et, d'autre part, certains services qui disposent d'un délai variable quant à leur exécution.

A partir de ces constatations préliminaires, il est possible d'imaginer que si la consommation de l'ensemble des équipements peut être prévue, il existe alors un moyen de mieux l'organiser. Par exemple, pour un service de chauffage, il est possible de calculer la durée et la quantité de surchauffe « anticipée » qui permettrait de réduire la consommation pendant une période où l'énergie est indisponible ou restreinte. De même, si un service peut être retardé ou avancé, il y a là encore moyen d'organiser la consommation globale.

La construction d'un plan prédictif global d'énergie se base sur le fait que la consommation d'énergie des services ne doit pas dépasser la production d'énergie des sources

énergétiques. C'est pour cela que l'agent embarqué de chaque service génère toutes les possibilités de plans locaux (profils de puissance) en s'appuyant sur la flexibilité de son service. [3]

IV.3.2.2. Protocole de négociation

La négociation entre les agents se fait par des messages. Au niveau du mécanisme anticipatif, le protocole de négociation se décompose en deux grandes phases dont les principes sont les suivants :

- ❖ Phase de demande de génération de profils de puissance : pendant cette phase, l'agent solving demande aux agents de générer des profils de puissance voisins d'un profil pour une satisfaction ;
- ❖ Phase de proposition : les agents génèrent des profils de puissance qui sont voisins au profil reçu de l'agent solving.

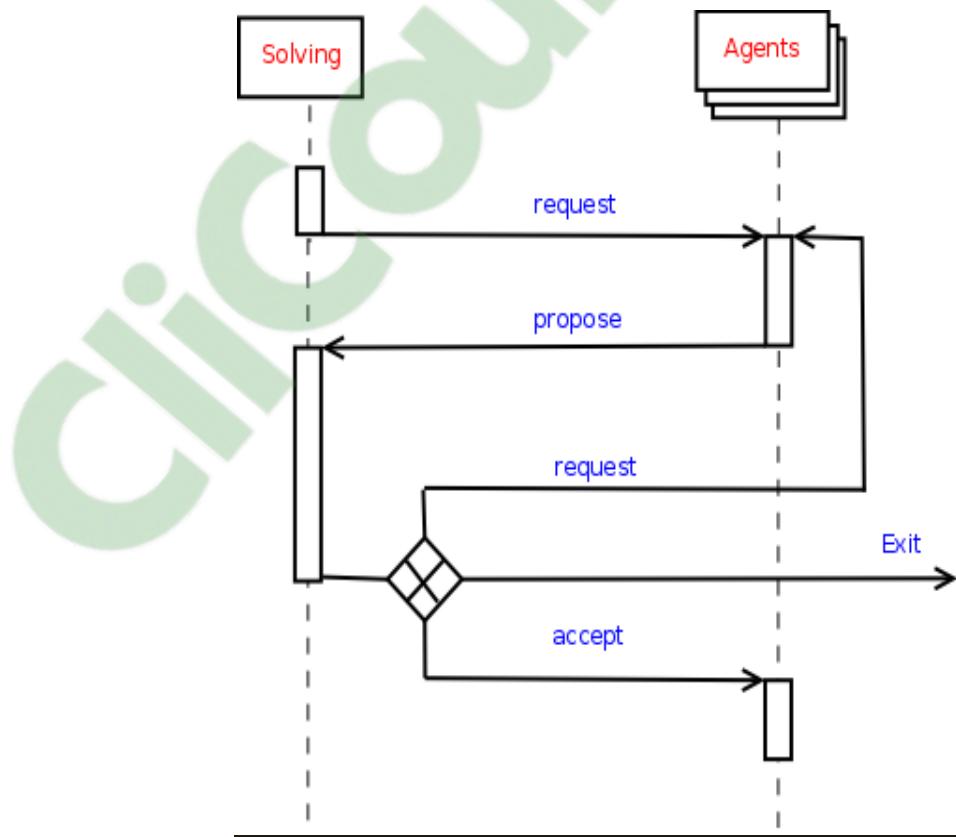


Figure IV-3 : Protocole de négociation des agents : mécanisme anticipatif.

- **Request** : l'agent solving envoie ce message aux autres agents pour qu'ils génèrent des profils de puissance ;
- **Propose** : ce message est la réponse au message « request » envoyé par l'agent solving ;
- **Accept** : ce message indique aux agents qu'une solution a été trouvée. L'agent solving envoie à chaque agent le profil de puissance contenant les futures consignes pour le sous-problème demandé. [3]

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un système domotique multi-agents de gestion de l'énergie dans l'habitat.

Il s'agissait de trouver une solution de pilotage informatique du système énergétique de l'habitat composé d'équipements domestiques et de sources d'énergie, soit distantes (via le réseau de transport/distribution électrique national), soit locales (par exemple : solaire, éolienne, et pile à combustible).

Cette solution permet de trouver dynamiquement une politique de production et de consommation de l'énergie tout en prenant en compte les critères posés par l'utilisateur, les contraintes diverses des équipements et la disponibilité des sources d'énergie.

IV.5. Références bibliographiques chapitre IV

[1]: <http://fr.wikipedia.org/wiki/Domotique>

[2]: S Abras. S Pesty. S Ploix. M Jaconimo « Maîtrise de la consommation d'énergie en domotique par un système multi-agents». L'objet – 8/2002. LMO'2002, pages 45 à 57

[3]: Shadi Abras « Système domotique Multi-Agents pour la gestion de l'énergie dans l'habitat » thèse Doctorat 2009 «Institut polytechnique de Grenoble »

Conclusion générale

Le problème du réchauffement climatique est en grande partie du aux énergies fossiles. En effet, le climat ce réchauffe, les glaciers fondent, l'indisponibilité des ressources fossiles dans les temps à venir inquiètent toutes l'humanité et la consommation de l'électricité ne cesse d'augmenter. Une solution pour cette énigme est une source d'énergie bon marché, abondante et non polluante « le soleil ». Comme nous sommes dans un pays qui dispose d'un potentiel de production en énergie solaire très élevé (en moyenne presque 300 journées ensoleillées par an), pourquoi ne pas en profiter de la gratuité de cette source. Plusieurs méthodes existent pour l'exploitation de cette source d'énergie. Nous avons opté pour le solaire photovoltaïque car il permet de convertir la lumière du soleil en électricité soit en installant des centrales photovoltaïques dans des endroits bien spécifique (le Sahara par exemple) ou bien d'installer des modules solaires sur les toitures des maisons.

Actuellement, cette technologie coûte cher car elle est très peu utilisée. Mais avec les données environnementales actuelles, cette énergie va être utilisée dans tous les domaines, ce qui va permettre la fabrication en chaîne des produits photovoltaïques ainsi que la création de plusieurs récepteurs fonctionnant avec du courant continu, cela va permettre la baisse des prix de tous ces produits et les rendre à la portée de tous le monde afin de les adapter pour leurs utilisation quotidienne.

Notre travail s'inscrit dans cette problématique, ainsi dans la première partie, nous avons présenté la technique de production d'énergie électrique à partir du rayonnement solaire. Par la suite, nous avons vu le rôle important de l'utilisation d'un étage d'adaptation qui nous permet le suivi du point MPPT. Nous nous sommes alors attachés à l'étude de deux types d'étages d'adaptation.

Dans le troisième chapitre, nous sommes revenus à la « guerre des courants » qui c'est terminée à l'époque en faveur du courant alternatif à cause de l'invention du transformateur. Nous avons vu le retour du courant continu dans le domaine du transport d'énergie, pourquoi ne pas consommer l'énergie en courant continu ?

Dans le dernier chapitre, nous avons vu les différents inconvénients des systèmes photovoltaïques à savoir l'absence de la lumière sur la moitié de la journée, donc problème de réserve. La solution que nous avons présenté est basée sur la bonne gestion de l'énergie électrique à l'aide des systèmes domotique dit MAHAS.

Pour conclure, nous espérons que ce travail sera utile pour tous les étudiants qui voudront le reprendre et améliorer. Nous souhaitons que les étudiants qui vont étudier l'énergie solaire photovoltaïque auront l'occasion de voir, de toucher et de faire des essais sur les produits adaptés.

Annexe

**Notre idée...
Votre confort
Il est temps d'y penser**

**Une énergie propre
A votre portée!**

Nous sommes engagés à comprendre et satisfaire les exigences de nos clients par la maintenance d'une unité professionnelle sensible et flexible à travers la mise à niveau technologique et le développement de notre personnel en des équipes motivées et habiles.

Direction centrale du partenariat
unité de fabrication des produits solaires
ENIE-Spa Z.I BP101 Route de Mascara Sidi Bel Abbès
Tel : 048 56 79 15 / Tel Fax : 048 56 66 88
Email : enie-solar@enie.dz / Site Web : www.enie.dz

ENIE se lance dans l'énergie solaire

ENIE met sur le marché national des panneaux solaires photovoltaïques. Ces panneaux couvriront une large gamme de puissance créée.

Avantages :

- Disponibilité de l'énergie,
- Fiabilité et longévité des équipements
- Rentabilité,
- Simplicité de mise en œuvre et d'opération.

Applications :

- Professionnelles,
- Eclairage public,
- Pompage solaire,
- Habitations isolées.

Applications Professionnelles

Équipement radio en montagne, balisage maritime, faisceaux hertziens... La multiplication de ces infrastructures en sites isolés et même en milieux urbains pose la question de leur alimentation en énergie.

L'éclairage public

Le besoin de points d'éclairage public dans de nombreux sites isolés du réseau électrique (chemins, croisements, squares, etc.), associé à leur faible consommation d'énergie, a converti les lampadaires photovoltaïques en solution idéale pour de telles situations. L'éclairage public solaire se révèle plus particulièrement adapté pour les pays fortement ensoleillés.

Le Pompage Solaire

Le pompage solaire représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent.

Applications agricoles ou pastorales, alimentation en eau potable villageoise ou domestique.

Avantage du pompage solaire :

- Fiabilité et longévité des composants,
- Simplicité d'installation,
- Fonctionnement entièrement autonome,
- Entretien simple,
- Coûts d'exploitation minimes,
- Fonctionnement silencieux sans pollution.

Les habitations isolées

Plus de la moitié de la population mondiale est située à l'écart des réseaux électriques. L'approvisionnement en électricité dans les régions rurales isolées est un problème d'actualité, en particulier dans les pays en voie de développement. L'extension du réseau pour des demandes relativement faibles et isolées n'est pas rentable pour les sociétés d'électricité.

- Applications individuelles, électrification (habitations principales, secondaires, fermes, entreprises privées, pompages hydrauliques à usages domestiques...).
- Applications communautaires (refuges, écoles, centres de santé, stations de police, bureaux de poste...).









ENIE Solar
Les énergies renouvelables

NOS PRODUITS

MODULES PHOTOVOLTAIQUES :	REGULATEURS :	BATTERIES :
<ul style="list-style-type: none"> • ES-75 / 12 • ES-80 / 12 • ES-150 / 12 • ES-155 / 12 • ES-160 / 12 • ESF-60 / 12 • ESF-120 / 12 • ESF-200 / 18 	<ul style="list-style-type: none"> • ESregul 10 • ESregul 20 • ESregul 30 • ESregul D 10 • ESregul D 20 • ESregul D 30 • ESregul 40SD 12/24V • ESregul 40SD 48V 	<ul style="list-style-type: none"> 12 à 48V 60 à 390 A 
ONDULEURS AUTONOMES	INJECTEURS & CONVERTISSEURS :	
<ul style="list-style-type: none"> • ESVERTER 250 W / 12 & 24V • ESVERTER 350 W / 12 & 24V • ESVERTER 500 W / 24V • ESVERTER 600 W / 12 & 24V • ESVERTER 700 W / 12, 24 & 48V • ESVERTER 1000 W / 12 & 24V • ESVERTER 1500 W / 12, 24 & 48V • ESVERTER 2000 W / 12V • ESVERTER 3000 W / 24 & 48 V 	<ul style="list-style-type: none"> • inversor ingecom sun 25 Kw • inversor ingecom sun 3.3 Kw • Inversor Ingicom Sun 5 <p>CONVERTISSEURS POUR SYSTEME DE POMPAGE :</p>	
POMPES SOLAIRES SUBMERSIBLES :	ECLAIRAGE PUBLIC :	
<p>Caractéristiques selon besoins</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Alfa led 10/12 • Alfa PL 2X18 • Alfa 36/12 Sox  	

* Photos non contractuelles

Société par actions au capital de 8 322 000 000 DA Registre de commerce : Sidi Bel Abbès B 89 005
 Siège Social : B.P N° 101 – Zone Industrielle, Route de Mascara Sidi Bel Abbès – Algérie
 Téléphone : +213 48 56 66 88 Télécopie : +213 48 56 66 88 Web : www.enie.dz E-mail : enie-solar@enie.dz



Les énergies renouvelables

MODULE PHOTOVOLTAIQUE – 75W

Caractéristiques physiques :

Dimensions	1224 x 545 x 39,5 mm
Poids	9 Kg
Conditions d'emballage	4 modules par caisse / 26 modules par caisse
Dimension de la caisse d'emballage	1350 x 665 x 230 mm / 1295 x 605 x 1220 mm

Caractéristiques électriques (1.000 W / m², 25° C cell, AM 1.5) :

Puissance maximale	75 Wp +/- 10 %
Courant maximum	4,34 A
Tension maximale	17,3 V
Tension maximale du système	760 V
Courant de court circuit	4,67 A SC
Tension de circuit ouvert	21,6 V OC
Valeur minimale du fusible en série	10 A
NOCT (800 W / m ² , 20° C, AM 1.5, 1 m / s)	47°C



Caractéristiques constructives :

Type de cellule	Monocristalin, avec texture et couche anti-reflet – 125 x 125 mm
Contacts	Redondants, contacts multiples dans chaque cellule de 125 x 125 mm
Nombre de cellules en série	36
Nombre de cellules en parallèle	1
Laminage	EVA (ethylene vinyl acetate)
Face frontale	Verre à microstructure trempé avec haute transmissivité
Face postérieure	Protégée par plusieurs couches de Tedlar
Cadre	Aluminium anodisé
Bornier de mise à la terre	Oui

Boîte de connection :

Dimension (LxHxP)	100 x 110 x 30 mm
Boîte	1 x IP65 avec une diode bypass
Bornier de connection	Bornier vissable et possibilité de soudage
Câbles	400 mm (+); 700 mm (-); 4 mm ²



Certifications : IEC 61215, Class II selon certificat TÜV, CE

Observation : Pour l'amélioration du produit, toute caractéristique pourrait être modifiée sans notification.



Société par actions au capital de 8 322 000 000 DA Registre de commerce : Sidi Bel Abbès B 89 005

Siège Social : B.P N° 101 – Zone Industrielle, Route de Mascara Sidi Bel Abbès – Algérie

Téléphone : +213 48 56 66 88 Télécopie : +213 48 56 66 88 Web : www.enie.dz E-mail : enie-solar@enie.dz



Les énergies renouvelables

REGULATEURS

Caractéristiques générales :

	Régulateur 10	Régulateur 20	Régulateur 30
Tension nominale	Bi-tension : sélection automatique 12 / 24 V		
Intensité maximale générée	10 A	20 A	10 A
Intensité maximale de consommation	10 A	20 A	10 A
SurchARGE admissible	25 %		
Autoconsommation	< 40 mA		
Perte maximum Génération / Consommation	< 168 mV / 130 mV	< 253 mV / 190 mV	< 310 mV / 230 mV

Caractéristiques constructives :

Dimension du produit	156 x 157 x 26,9 mm
Poids	540 gr
Peinture	Epoxie au four
Degré d'étanchéité	IP 32
Section maximale du câble	6 mm ²
Emballage	1 régulateur
Boîtier	Aluminium (base), tôle d'acier (frontal)
Dimension d'emballage	215 x 185 x 50 mm



Alarmes et protections :

Alarmes locales au moyen de LCD, LED et Acoustique	Haute et basse tension de batterie, surcharge et court-circuit, ligne de sensing, sonde de température, inversion polarité.
Protection contre courant inversé de batterie	Au moyen de diode intelligent type MOSFET
Protection contre polarité inversée	lignes génération, batterie et consommation et sensing
Protection contre surcharges	dans ligne de consommation et génération (25% en plus de la I nominal)
Protection contre court-circuits	instantanée (ligne consommation)
Protection contre surtensions	au moyen de varistors (lignes génération, batterie et consommation)
Protection contre déconnexion de ligne du sensing	Oui



Les énergies renouvelables

Caractéristiques fonctionnelles :

Type de régulation	Contrôle par microprocesseur avec relais d'état solide ON/OFF /PWM
Sélection de batterie	AGM / SLI MOD / Tubulaire ouverte / Tubulaire à Gel
Ligne de sensing de batterie	Oui
Système de régulation	Charge profonde / flottaison / Egalisation ⁽¹⁾
Visualisation de l'état de charge	Profonde, flottaison et égalisation au moyen de LED et LCD
Compensation par température	Oui, -2mV / °C / V (au moyen de sonde extérieure)
Déconnexion de la consommation par basse tension	Oui (avec réarmement automatique)
Indicateurs d'état de charge	Batterie pleine mi-chargée et vide
Relais crépusculaire	Oui, configurable mode ON- OFF ou ON- OFF- ON
Paramètres en LCD alphanumérique	Tension de batterie, valeurs instantanées de courants de génération et consommation, température, etc
Tropicalisation des circuits	Oui
Plage de température de fonctionnement	0 –50° C à pleine charge
Réarmement déconnexion court-circuit / Surcharge	Oui – Remise manuelle

Certifications : CE

Observation : Pour l'amélioration du produit, toute caractéristique pourrait être modifiée sans notification.

Société par actions au capital de 8 322 000 000 DA Registre de commerce : Sidi Bel Abbès B 89 005

Siège Social : B.P N° 101 – Zone Industrielle, Route de Mascara Sidi Bel Abbès – Algérie

Téléphone : +213 48 56 66 88 Télécopie : +213 48 56 66 88 Web : www.enie.dz E-mail : enie-solar@enie.dz



Les énergies renouvelables

BATTERIE BT80-12HC

Caractéristiques générales :

- ✓ Scellée et sans entretien,
- ✓ Étanchéité maximale,
- ✓ Performance exceptionnelle de récupération de la décharge,
- ✓ Valve de sécurité anti-explosion,
- ✓ Haute qualité et fidélité,
- ✓ Décharge très lente.



Durée de vie	5 ans ou > 350 cycles @ -0,5CA à 9,6V			
Capacité	20 Hr (4,1A-1,75V)	10 Hr (8A-1,75V)	5 Hr (13,5A-1,75V)	1 Hr (48A-1,75V)
	82 AH	80 AH	67,5 AH	48 AH
Dimensions	Longueur	Largeur	Hauteur	Hauteur a/ cosse
	259 mm	168 mm	208 mm	226 mm
Poids approx.	26 Kg			
Résistance interne	Pleine charge à 25°C : 0,006 Ohm			
Décharge	3% de la capacité par mois à 25°C			
Capacité corrigée par température (20 Hr)	40°C 102%	25°C 100%	0°C 85%	-15°C 65%
Charge à 25°C	Cyclique 14,4-15V (-30mV/°C), max. Courant : 20A		Floating (Aléatoire) 13,6-13,8V (-20mV/°C)	

Certifications : CE

Observation : Pour l'amélioration du produit, toute caractéristique pourrait être modifiée sans notification.

Société par actions au capital de 8 322 000 000 DA Registre de commerce : Sidi Bel Abbès B 89 005

Siège Social : B.P N° 101 – Zone Industrielle, Route de Mascara Sidi Bel Abbès – Algérie

Téléphone : +213 48 56 66 88 Télécopie : +213 48 56 66 88 Web : www.enie.dz E-mail : enie-solar@enie.dz

Clicours.COM



Les énergies renouvelables

LAMPE : Alfa Led 10



Caractéristiques physiques :

	Commandement électronique	Lampe
Longueur	86 mm	230 mm
Largeur	49 mm	37 mm
Hauteur	26 mm	53 mm
Poids	90 gr	123 gr

Protections :

Protection contre l'inversion de polarité	Oui – Permanente (Contrôle électronique)
Protection contre les courts-circuits	Oui – Permanente (Contrôle électronique)
Protection contre les surcharges	Oui – Permanente (Contrôle électronique)

Caractéristiques générales :

Commande	Courant constant
Degré d'étanchéité	IP 54
Tension nominale d'entrée	12 V DC
Plage de tension d'entrée	11-14 V DC
Puissance nominale	10 W
Luminosité moyenne	700 lum
Luminance équivalente*	10W LED ≈ 36W LPS (sodium à basse pression)
Température de couleur	3000-7000 K
Plage de température de fonctionnement	-20 / 50° C
Portée sphérique d'une unité	5m x 9,5 m à une hauteur de 5 m
Portée sphérique de 2 unités	5m x 17 m à une hauteur de 5 m

(*) Cette équivalence est basée sur la perception subjective de l'illumination de l'œil humain, basé sur la reproduction et la qualité chromatique de la lumière et pas sur la valeur absolue des lumens données.

Caractéristiques constructives :

Eléments inclus	Dissipateur, lampe, commande électronique, appuis
Nombre de led	9 unités
Durée de vie prévisionnelle	30000 h
Tropicalisation des circuits	Oui
Amorçage	Instantané

Certifications : CE

Observation : Pour l'amélioration du produit, toute caractéristique pourrait être modifiée sans notification.

Société par actions au capital de 8 322 000 000 DA Registre de commerce : Sidi Bel Abbès B 89 005

Siège Social : B.P N° 101 – Zone Industrielle, Route de Mascara Sidi Bel Abbès – Algérie

Téléphone : +213 48 56 66 88 Télécopie : +213 48 56 66 88 Web : www.enie.dz E-mail : enie-solar@enie.dz



Les énergies renouvelables

Lampe : Alfa Led 10

Contrôle	Courant constant
Degré d'étanchéité	IP 54
Tension nominale d'entrée	12 V DC
Plage de tension d'entrée	11-14 V DC
Puissance nominale	10 W
Luminosité moyenne	700 lum
Luminance équivalente*	10W LED = 36W LPS (Sodium basse pression)
Température de couleur	3000-7000 K
Plage de température de fonctionnement	-20 / 50° C

(*) Cette équivalence est basée sur la perception subjective de l'illumination de l'œil humain, basé sur la reproduction et la qualité chromatique de la lumière et pas sur la valeur absolue des lumens données.

Caractéristiques constructives :

Eléments inclus	Dissipateur, lampe, commande électronique, appuis
Nombre de led	9 unités
Durée de vie prévisionnelle	30000 h
Tropicalisation des circuits	Oui
Amorçage	Instantané

Observation : Pour l'amélioration du produit, toute caractéristique pourrait être modifiée sans notification.

Société par actions au capital de 8 322 000 000 DA Registre de commerce : Sidi Bel Abbès B 89 005
 Siège Social : B.P N° 101 – Zone Industrielle, Route de Mascara Sidi Bel Abbès – Algérie
 Téléphone : +213 48 56 66 88 Télécopie : +213 48 56 66 88 Web : www.enie.dz E-mail : enie-solar@enie.dz

ENIE Solar
Les énergies renouvelables

UNITE ECLAIRAGE PUBLIC (UEP-01)

Structure :

Orientation du module	360°
Inclinaison du module	15° à 55°
Nombre de lampes	1, 2 ou 3 Par crosse
Nombre de crosses	1: Simple / 2: Double
Localisation des batteries	* En haut sous le module * Sous-toit * Protégé au sol
Accessoires (Options)	* Panneau d'affichage * Mini lampe pour la chaussée

Caractéristiques technologiques :

Matière	Peinture ou Acier galvanisé
Production	Fabrication standard
Livraison	Structure du module Structure du luminaire Poteau et accessoires

Société par actions au capital de 8 322 000 000 DA Registre de commerce : Sidi Bel Abbes B 89 005
Siège Social : B.P N° 101 – Zone Industrielle, Route de Mascara Sidi Bel Abbes – Algérie
Téléphone : +213 48 56 66 88 Télécopie : +213 48 56 66 88 Web : www.enie.dz E-mail : enie-solar@enie.dz



المؤسسة الوطنية للصناعات الالكترونية

ENTREPRISE NATIONALE DES INDUSTRIES ELECTRONIQUES S.p.A



E.N.I.E SpA – Direction Générale au capital sociale : 8.332.000.000 DA
 Direction centrale du partenariat et du développement industriel
 BP 101 – Z.I Route de Mascara – Sidi.Bel.Abbes – Algérie
 Téléphone/fax : 048 56 79 15

R.C.N° :22/00-0022289 99
 N° Identif. fiscale : 098222010009252
 Compte bancaire:065220021677
 Banque Extérieure d'Algérie
 Agence -SBA

BORDEREAU DES PRIX

Code	Désignation	PV HT	TVA	PV TTC
UEP-01	Unité éclairage publique non galvanisée composé de:	128 995,35	21 929,21	150 924,56
S07V010	01 panneau solaire 75W/12V			
S06V010	01 Régulateur 10A/12V			
S06V021	01 Batterie BT65-65Ah/12V			
S06V030	02 Barettes de luminaires à leds			
S06K001	Structure métallique			

Code	Désignation	PV HT	TVA	PV TTC
UEP-01	Unité éclairage publique galvanisée composé de:	141 813,35	24 108,27	165 921,62
S07V010	01 panneau solaire 75W/12V			
S06V010	01 Régulateur 10A/12V			
S06V021	01 Batterie BT65-65Ah/12V			
S06V030	02 Barettes de luminaires à leds			
S06K001	Structure métallique galvanisée			

Code	Désignation	PV HT	TVA	PV TTC
S07V010	01 panneau solaire 75W/12V	34 312,07	5 833,05	40 145,12
S06V010	01 Régulateur 10A/12V	4 804,18	816,71	5 620,89
S06V021	01 Batterie BT65-65Ah/12V	11 507,65	1 956,30	13 463,95
S06V021	01 Batterie 80Ah/12V	13 676,40	2 324,99	16 001,39
S06V030	02 Barettes de luminaires à leds	15 928,63	2 707,87	18 636,50

Le service commercial

Points de vente des produits photovoltaïque en Algérie**❖ ENIE SOLAR**

BP 101 – Z.I Route de Mascara – Sidi-Bel-Abbès – Algérie

Téléphone/fax : 048 56 79 15

Mail: www.eniesolar@yahoo.fr

Site web: <http://www.enie-dz.com/english/act6.php>

❖ SCET « Société de Commerce, Etudes Technique »

Site web : www.scetenergie.com

➤ SCET ENERGIE (Bab Ezzouar)

Adresse: Cité 498 logts Bt 11 Local n° 03 Bab Ezzouar- Alger

Tel: + 213(0) 21 24 70 66

Fax: + 213(0) 21 24 85 93

➤ SCET ENERGIE (Rouiba Z.I)

Adresse: Zone Industrielle de Rouiba lot W- Alger.

Tel: + 213(0) 21 85 56 92

Fax: + 213(0) 21 85 57 52

- Division Batterie
g.tounsi@scetenergie.com
faiza.chacal@scetenergie.com
hamiti.melissa@scetenergie.com
- Division Onduleurs / Redresseurs
g.tounsi@scetenergie.com
hamiti.melissa@scetenergie.com
amine.berraf@scetenergie.com
- Division Energie Renouvelable
solar@scetenergie.com
amine.berraf@scetenergie.com
- Service Après Vente « CHLORIDE »
technique@scetenergie.com
- Informations & Documentations
info@scetenergie.com

Remarque : Pour télécharger les catalogues de tous les produits que vend la Société de Commerce, Etudes Technique « SCET », consultez les sites de ces partenaires.