

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMÈRI DE TIZI-OUZOU
FACULTÉ DU GÉNIE ÉLECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE



Mémoire

De Fin D'études



*En vue de l'obtention du diplôme
D'Ingénieur d'état en électrotechnique
Option : Machines électriques*

Thème

*Simulation d'un système
hybride photovoltaïque et
éolienne totalement autonome*

Proposé et dirigé par :

Mr OTMANE CHERIF TAHAR

Réalisé par :

CHERFAOUI Azouaou

Promotion 2010

Dédicaces

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- ∅ A ma mère, mes sœurs et frères, mes proches, mes amis :
Arezki, Hocine bob, Hocine H, Djamel, Yacine, Mheni, Zizi,
Julio, Hakim et Nacima, Abdenour et Sylvia.*
- ∅ Tous les martyres de la démocratie, des libertés et des idées
progressistes.*
- ∅ Mes amis : militants du RCD, militants du MAK, militants
du FFS. Bien que nous ne soyons de la même mer nous
naviguons tous vers la même terre, vers le même havre.*

Dédicaces

A mon angelot...

*Tout le monde la cherche mais personne ne veut la saisir
Qui est tenté demeure à jamais inassouvi
Elle n'est pas une femme car elle ne peut pas mentir
Et par notre comédie elle n'est jamais asservie*

Remerciements

Remerciements :

- ∅ Je remercie mon promoteur. Pour sa sagesse, sa patience et pour ses nombreuses qualités insoupçonnées.*
- ∅ Je remercie les examinateurs pour l'honneur qu'ils me feront en jugeant ce présent travail.*
- ∅ Je remercie tous ceux qui, de près ou de loin, m'avaient soutenu.*

Pour le bien – être ou pour la survie, depuis les premiers balbutiements de notre civilisation moderne, la poursuite de la source d'énergie la plus rentable et la plus fiable demeure l'inconciliable visée de la science et des scientifiques. Par notre génie et par notre désir de maîtrise de nous même et du monde physique nous nous sommes, certes, apporté le confort et l'aisance en explorant et exploitant des formes et des sources d'énergie diverses. Seulement, notre progrès apporta aussi pour notre environnement et, par conséquent, pour nous même, un déséquilibre et une précarité redoutée.

A cause de notre exploitation démesurée des énergies fossiles dans une perspective aveugle d'extension et de plénitude, nous vivons aujourd'hui dans un monde changeant en proie à un réchauffement qui menace l'ordre climatique et, dans son sillage, l'ordre écologique actuel.

Dans une démarche corrective en vue d'une technologie respectueuse de l'environnement, d'autres sources d'énergie ainsi que d'autres techniques d'exploitation, autrefois mises à l'écart pour leurs coûts excessifs et leurs faibles rendements, doivent être relancées. La consommation énergétique mondiale est, de très loin, démesurée, et à forte probabilité, en exponentielle augmentation. Cependant, des études approfondies ont été faites et des estimations ont été avancées quant à la possible satisfaction de la totalité de la demande énergétique mondiale par des sources propres dites « renouvelables ».

Dans la même optique et dans une même vision de possible satisfaction d'une demande énergétique définie, nous allons, sur une échelle réduite, simuler un système hybride (photovoltaïque avec éolienne) de production d'énergie renouvelable alimentant une charge et nous allons observer le comportement des différents éléments producteurs en utilisant le logiciel de simulation HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable).

Introduction :

Il est un idéal dans le domaine énergétique que d'avoir des ressources inépuisables voire des systèmes parfaitement autonomes, or les lois de la physique nous imposent une toute autre réalité. Le deuxième principe de la thermodynamique, principe d'évolution, exige un apport continu d'énergie de l'extérieur vers l'intérieur du système considéré pour parer à la nécessaire augmentation de l'entropie : à la dégradation de l'énergie.

Ce qu'on se propose d'étudier dans ce travail est un système qu'on dira « autonome », seulement on doit se garder de la luxueuse idée d'une autonomie au sens thermodynamique.

Notre étude se portera donc sur la nature de l'apport énergétique. Et si nous avons choisi un double apport photovoltaïque-éolien c'est que chacune de ces deux sources d'énergie, lorsqu'elle est utilisée seule, souffre de stabilité de rendement due à l'alternance jour/nuit et à la succession des saisons. Elles fournissent une certaine puissance, variable selon les saisons et les heures de la journée, avec des creux d'énergie pour le photovoltaïque quand on manque d'ensoleillement et pour l'éolienne quand on manque de vent.

Le système hybride photovoltaïque – éolienne assurera donc une continuité dans l'apport d'énergie au système qui s'effectuera par le photovoltaïque et l'éolienne et ce alternativement ou simultanément selon les heures et les saisons.

Cela va sans dire qu'un tel système sera muni d'accumulateurs qui joueront le rôle de réservoir. Ils absorberont l'excès des pics d'énergie qu'ils fourniront au système pour parer aux creux d'énergie.

Le choix du site pour une éolienne sera soumis à la condition d'un vent favorable au cours des saisons d'ensoleillement faible. Pour le photovoltaïque l'ensoleillement, de préférence, devra être favorable lors des saisons de faibles vents.

I. Introduction :

Depuis les plus anciennes sociétés humaines, l'énergie – enjeu vital – constituait le critère prépondérant et déterminant du couple « dominant / dominé ». Dans la nature en générale et dans les sociétés en particulier, pour assurer sa survie et celle des siens, l'homme assoit son emprise sur son environnement en domptant les animaux, les hommes et la nature.

Les bêtes de somme, les esclaves et les différentes méthodes primitives et modernes d'exploitation traduisent une volonté foncièrement instinctive de conservation et de maintien qui se manifeste dans notre société moderne par une ingéniosité et un excellement dans les techniques d'exploitation de la nature et de ses énergies.

La guerre ainsi que la paix aujourd'hui dans le monde, qui peuvent être vues comme de simples interfaces, sont une conséquence ou « produits dérivés » des fluctuations d'écart du contraste offre – demande dans le contexte énergétique. Hier comme aujourd'hui la possession de ressources d'énergie ou des technologies de production sont un réel atout dans la course à la survie des peuples et des modes de vie.

La société moderne industrialisée a commencée lorsque l'homme a pris conscience de la logique de conversion de l'énergie et par conséquent, de l'opportunité de son exploitation :

Forme d'énergie —> système de conversion —> autre forme d'énergie

Par cette logique l'homme à exploité les forme d'énergie les plus diverses : énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon), énergie du vent et du cycle de l'eau.

Mais les énergies fossiles, utilisées de la manière la plus généralisée, sur lesquelles s'appuient le mode de vie actuel et toute la chaine industrielle, commencent à se raréfier et menace l'équilibre écologique global faisant ainsi de l'alternative énergétique le souci majeur de ce siècle.

Toutefois, il est utile de préciser que cette alternative énergétique qui doit être propre, abondante et d'un rendement supérieur constituera une véritable avancée pour le rétablissement de l'équilibre environnemental. Mais elle fera des peuples non productifs et dépendants des rentes pétrolières et gazières des peuples ruinés.

II. L'énergie dans le monde :

1. La consommation énergétique :

Dans les premiers millénaires de l'histoire de l'Homme, avec une population restée inférieure à 200 millions d'habitants, l'exploitation des énergies n'a affecté que le renouvelable. Et par sa faible activité énergétique il a, du point de vue énergétique, été peu perturbateur de son environnement.

On remarque son brusque accroissement, au début de l'ère industrielle (19e siècle), dû à la fois à la croissance rapide de sa population mais surtout à la forte augmentation de ses besoins énergétiques satisfaite par le charbon, première source fossile exploitée à grande échelle. Puis, en l'espace de 150 ans, la consommation globale est multipliée par 20.

La dépense énergétique comprend l'énergie consommée pour le service voulu (se chauffer, se déplacer, mener ses diverses activités), mais également celle contenue dans les objets, matériaux ou services utilisés (on parle d'énergie grise qui est l'énergie nécessaire à l'extraction des matières, à la production, la transformation, le transport,...).

Les énergies primaires sont réparties non-uniformément sur le globe. Certains pays dépendent des autres pour leur approvisionnement énergétique. Ceci implique des échanges économiques et peut jouer un grand rôle dans les relations entre les Etats.

Ces réserves sont situées, pour la majeure partie, à l'extérieur des zones à forte consommation. Cette dépendance des pays industrialisés vis à vis des pays exportateurs peut être génératrice de crises graves, susceptibles de menacer le fragile équilibre socio-économique mondial (chocs pétroliers des années 70, guerres du Golfe, ...).

La consommation d'énergie dans le monde est très disparate d'une région à l'autre.

Un Américain moyen consomme 8 tonnes de pétrole par année contre 0,3 pour le citoyen de certains pays d'Afrique ou d'Asie. Et on estime que deux milliards de terriens vivent sans électricité.

Parmi les habitants d'Afrique, ceux qui sont connectés au réseau consomment en moyenne 150 fois moins d'électricité qu'un citoyen canadien.

Aujourd'hui, les sept pays les plus développés consomment près de 50% des ressources énergétiques mondiales [6].

2. Estimation des ressources:

Les réserves prouvées de pétrole brut sont de l'ordre de 50 ans, celles de gaz naturel de 80 ans et celles de combustibles minéraux solides de 275 ans. Mais les quantités extraites annuellement peuvent croître fortement selon le scénario, surtout pour le pétrole brut.

Les réserves inventoriées par les compagnies pétrolières et minières ne correspondent cependant qu'aux ressources connues et jugées exploitables aux conditions technologiques et économiques du moment. Si l'on incorpore enfin celles que de nouvelles technologies pourraient rendre accessibles, les ressources ultimes obtenues permettent de satisfaire plusieurs siècles de consommation.

Les réserves prouvées de pétrole sont très inégalement réparties : près de 54 % au Moyen Orient face à 5 % en Amérique du Nord, 3 % en Europe occidentale, 16 % en Amérique latine, 8 % en Afrique, 11 % dans l'ancienne Union Soviétique et 3 % en Asie Pacifique. Associée pour des raisons géologiques aux coûts d'exploitation les plus faibles de la planète cette concentration géographique rend le marché pétrolier plus vulnérable aux événements politiques que les marchés gaziers et surtout charbonniers.

Ces évolutions fondent les perspectives de coûts croissants des hydrocarbures autour de 40 à 50 \$ constants le baril, vers le milieu du siècle prochain. Les anticipations de coûts sont cependant fragilisées par le succès avec lequel les changements technologiques combattent les rendements décroissants : en une quinzaine d'années, les coûts d'exploitation en Mer du Nord ont souvent été divisés par 2 ou 3 grâce aux progrès de la géophysique, du forage et de la récupération assistés [5].

La figure I.1 représente les réserves pétrolières mondiales en 2000

<i>Réserves de pétrole en 2000, en millions de tonnes. Source : BP 2001</i>		
Europe	2500	2%
Amérique N	8500	6%
Amérique S	13'600	9 %
Asie exURSS	9000	7 %
Moyen Orient	92'500	65 %
Afrique	10'000	7%
Asie Pacifique	6000	4%
Total monde	142'100	100%

Figure I.1 : Réserves pétrolières mondiales en 2000.

3. Les énergies :

a. Les énergies non renouvelables :

On appelle ressources énergétiques non renouvelables, celles que l'on épuise sans qu'elles ne se reconstituent. Ce sont les ressources fossiles et le minerai d'uranium.

Les combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel...) sont principalement des résidus de la végétation luxuriante du carbonifère, en somme de l'énergie solaire fossilisée. Il y a aussi, en beaucoup plus grande quantité, les schistes bitumineux dont l'exploitation peut être rentable quand le cours du baril de pétrole est suffisamment élevé. Une autre ressource découverte plus récemment se trouve dans le fond des océans ; il s'agit des hydrates de méthane. Comme le pétrole, c'est un sous-produit de matières organiques digérées par des bactéries. Les hydrates se forment sous pression élevée et/ou à basse température, essentiellement dans les océans à plus de 500 m de fond. Ils contiennent 97 % de méthane et, en cas d'exploitation massive, pourraient dangereusement contribuer à l'effet de serre, le méthane étant encore plus « efficace » que le CO₂.

En 1970, le pétrole contribuait à hauteur de 45 % de l'énergie primaire consommée alors que cette proportion est tombée à 34 % en 2000. Néanmoins, en valeur absolue, nous avons doublé notre consommation en 30 ans. Bien que régulièrement, de nouveaux gisements soient découverts, l'épuisement de cette précieuse ressource, dont les usages ne sont pas qu'énergétiques (synthèse de matières organiques...) se fera au cours du 21^e siècle.

Quand au gaz naturel, particulièrement rentable actuellement, sa consommation croît très rapidement (+ 2 %/an), ce qui conduira à un épuisement dans la même période. Seul le charbon nous offre des perspectives plus lointaines.

En fait, les énergies non renouvelables offrent le plus faible coût de production et tant que leur réel coût environnemental ne sera pas comptabilisé, elles gêneront le développement des ressources alternatives renouvelables.

Si les mesures proposées dans le protocole de Kyoto étaient appliquées, la tonne de carbone rejetée coûterait au pollueur environ 100 €(ou encore 27 €par tonne de CO₂), ce qui aurait pour effet d'augmenter sévèrement le prix de revient des carburants fossiles [6].

Sur le tableau I.2 est donnée l'estimation des ressources non renouvelables.

Énergies fossiles	Pétrole	Charbon	Gaz naturel	Schistes bitumineux	Hydrates de méthane	Uranium 235
Réserves exploitables (kWh)	$1,8 \text{ à } 2 \cdot 10^{15}$	$8 \cdot 10^{15}$	$1,6 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{15}$?	$600 \cdot 10^{12}$
Réserves totales estimées (kWh)	$4 \cdot 10^{15}$?	?	?	$10 \cdot 10^{15}$?
Durée au niveau de consommation de 2000	40 ans	220 ans	57 ans	---	---	70 ans
Durée ramenée à la totalité de la consommation primaire	15 ans	80 ans	11 ans	15 ans	75 ans	4 ans

Figure I.2 : Estimation des ressources non renouvelables.

b. Les énergies renouvelables :

On parle de ressources renouvelables, à notre échelle de temps, lorsque la nature les met à notre disposition de façon permanente.

Sur la Terre, l'essentiel des ressources renouvelables provient du soleil sur lequel se produisent des réactions de fusion nucléaire de l'hydrogène. Notre étoile rayonne dans l'espace une quantité colossale d'énergie dont la Terre intercepte une infime partie. L'énergie reçue fluctue au rythme des journées et des saisons et même, dans une moindre mesure, des années. Pour s'affranchir de ces variations, nous considérons généralement l'énergie reçue annuellement. La Terre capte annuellement $1\ 600 \cdot 10^{15}$ kWh du Soleil dont 30 % sont directement réémis, des couches de la haute atmosphère, vers l'espace. Un quart de cette quantité est converti dans l'atmosphère (cycles hydrologiques, vents, houle), 45 % sont captés et réémis dans l'infrarouge et une infime partie (1015 kWh) est utilisée dans la photosynthèse.

Pour référence, l'humanité manipule annuellement et actuellement environ $140 \cdot 10^{12}$ kWh pour ses divers besoins. Le noyau en fusion laisse s'échapper, à travers la croûte terrestre environ $300 \cdot 10^{12}$ kWh, soit environ le double de la consommation humaine. Quand à l'interaction Terre-Lune-Soleil, elle conduit à la dissipation, en partie à travers les mouvements de marée, de $25 \cdot 10^{12}$ kWh.

Comparées à nos besoins, ces ressources sont donc largement suffisantes. Reste à savoir les exploiter économiquement et proprement.

Le rayonnement solaire est de loin le plus abondant, mais il est fluctuant à cause des alternances jour-nuit, des passages nuageux et des saisons, effet d'autant plus important que l'on s'approche des pôles.

En ce qui concerne les sous-produits du soleil que sont la force de l'eau, celle du vent, l'énergie de combustion de la biomasse, etc., ils sont plus ou moins accessibles et exploitables selon les sites. Voir figure I.3.

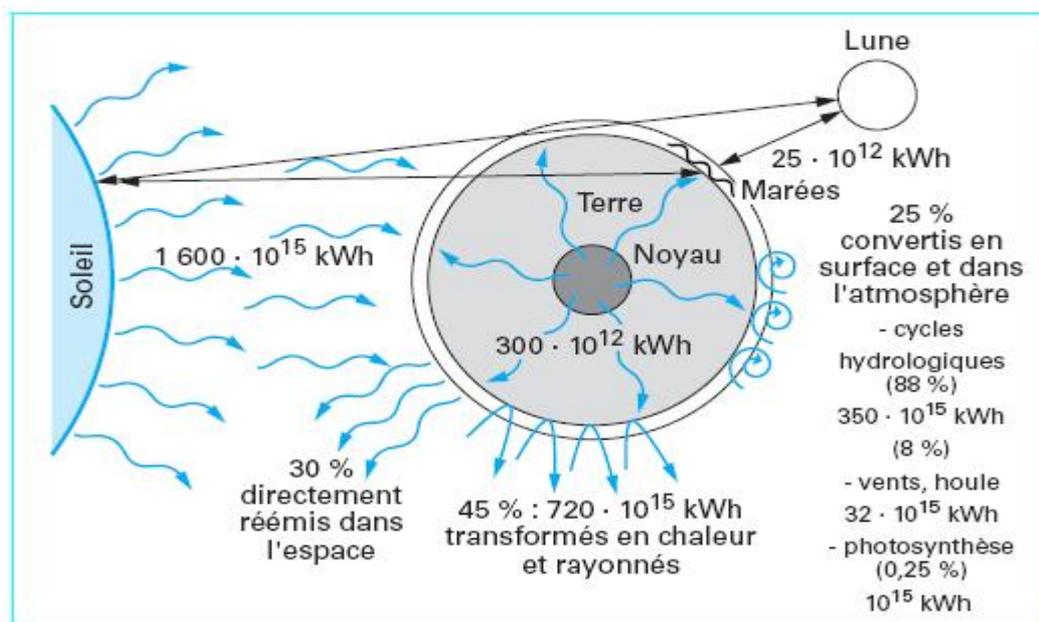


Figure I.3 : ressources renouvelables annuelles sur la terre.

4. La problématique de l'énergie :

Après une exploitation anarchique et hasardeuse des ressources énergétiques non renouvelables, causant ainsi un épuisement et une dégradation manifeste de la nature (pollution, altération du climat, cumuls de déchets non recyclables...), l'homme s'est retrouvé piégé dans une dépendance énergétique implacable. Un devenir railleur, victime de son propre génie.

La quasi-totalité de son alimentation, de ses mouvements et de ses communications s'appuie entièrement sur une énergie qui n'est pas épuisée de ses muscles. Par conséquent une crise énergétique mondiale signifiera une cascade de pénuries et de crises, voire un effondrement global de l'architecture de notre civilisation.

Ceci dit, une véritable crise énergétique n'est pour demain.

En fait le monde énergétique actuel s'articule sur un multi-pied, qui marque la transition du non renouvelable vers le renouvelable. Néanmoins, le défi est de pouvoir assurer cette transition sans trop de troubles donc de pouvoir couvrir la demande mondiale en énergie à partir du renouvelable avant l'épuisement total des ressources non renouvelables.

III. L'énergie du soleil :

1. Introduction :

Aussi loin que la mémoire de l'homme puisse remonter, et même bien avant, le soleil fut, doublement, la source d'énergie et la source de la vie sur notre planète.

Nécessaire à la croissance de la plante (**photosynthèse**) qui devient par son bois et ses fruits, énergie stockée (**charbon** et autres **combustible fossiles**) et énergie de **biomasse**.

A l'origine du **vent**, en causant différentes températures dans différents lieux de la surface terrestre, le soleil fait apparaître ainsi une autre forme d'énergie.

C'est par le soleil, par la température que la terre reçoit, que l'eau s'évapore puis retombe créant ainsi le cycle de l'eau exploitable sous forme d'énergie **hydroélectrique**.

Par ces exemples apparents et par tant d'autres difficilement saisissables (les courants océaniques...), un lien direct ou indirect peut être établi entre la quasi-totalité des formes d'énergie existantes sur terre et la première source : le soleil.

Un lien de cause-effet qui nous rappelle que *rien ne se perd rien ne se crée, tout se transforme*.

2. Constitution :

C'est une sphère gazeuse dont la composition est essentiellement à base d'hydrogène et dont le diamètre est de 1 391 000 km, et qui est placée à une distance de 150 000000 km de nous. [2]

Périhélie : 147,1 millions de km

Aphélie : 152,1 millions de km

CHAPITRE I : ENERGIE, PROBLEMATIQUE ET PERSPECTIVES

Cette distance est si grande que sa lumière nous parvient 8 minutes après avoir été émise et ce en voyageant à la vitesse $C = 300\,000\text{ km/s}$. Son volume pourrait contenir 1 300 000 Terre.

Sa masse est de 330 000 fois celle de la Terre soit $1,99 \cdot 10^{30}\text{ kg}$ représentant ainsi 99,867 % de la masse totale du système solaire, c'est-à-dire que l'ensemble de toutes les planètes et comètes ne représente que le millième du Soleil.

On considère que le soleil, dans sa course, a déjà effectué 20 tours de la Galaxie en traversant des densités variables de poussières qui interceptent une partie du rayonnement qu'il nous envoie.

Sa composition est de 70% d'hydrogène et 28% d'hélium, les 2% restants représentent la plupart des autres atomes présents dans l'univers. Il ne faut pas oublier que les étoiles sont les usines qui créent tous les matériaux existant dans l'univers. Plus de 60 éléments chimiques furent identifiés, tel OH (radical hydroxyle), CH (radical méthylique) et aussi du titane, du plomb, du mercure, du chlore, du silicium, cuivre, calcium, indium, antimoine, zirconium, rhodium...

Le soleil n'a pas de surface à proprement parler. Dans son centre, il règne une pression 220 millions de fois plus grande que la pression atmosphérique de notre Terre qui est de 1033 hectopascal au niveau de la mer entraînant une température de 15 millions K et plusieurs millions de degrés dans les couches supérieures de son atmosphère.

Sur la figure I.4 sont représentées, sur une échelle unitaire, la densité (Kg/m^3), la température (K), la masse (%) et la luminosité (%) sur la surface et au centre du soleil.

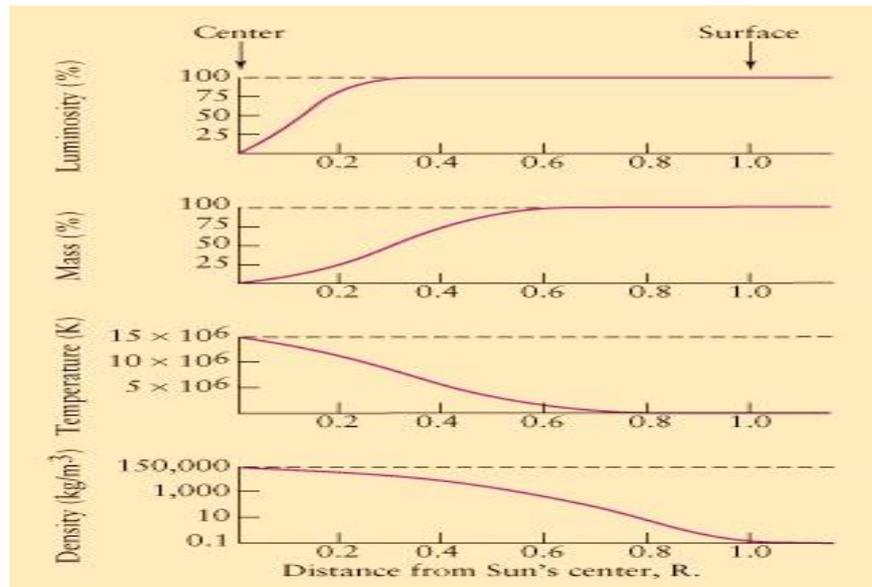


Figure I.4 : densité, température, masse et luminosité du soleil

3. Son énergie :

Son énergie est le résultat des réactions thermonucléaires qui transforment en ses profondeurs des quantités colossales d'hydrogène en hélium avec une énorme émission d'énergie.

En une seconde 564.106 tonnes d'hydrogènes est transformée en hélium en fusionnant 2 noyaux d'hydrogène pour chaque noyau d'hélium. Avec la différence de masse de 4 millions de tonnes convertie en énergie suivant l'équation d'Einstein $E=MC^2$, une énergie de 36.10^{22} KW est diffusée dans l'espace. De cette énergie émise sous forme d'ondes électromagnétiques, avec l'énergie dissipée par la distance qui nous sépare du soleil, la terre reçoit $1,8.10^{17}$ W.

L'énergie du soleil provient de son centre. La pression comprime les noyaux d'hydrogène et permet ainsi la fusion. Cette pression empêche les photons d'atteindre la surface dès leur création. Ainsi, ils mettent 2 millions d'années pour sortir des profondeurs du Soleil contrairement aux neutrinos, électriquement neutres avec une masse nulle et qui porte une énergie et un moment, fabriqués en même temps, qui sortent instantanément.

Le transfert d'énergie du centre vers la surface s'effectue par rayonnement et par convection. La zone de convection est limitée par la photosphère, épaisse de 200 km, et appelée ainsi parce que presque la totalité du rayonnement visible provient d'elle.

CHAPITRE I : ENERGIE, PROBLEMATIQUE ET PERSPECTIVES

Dans le domaine énergétique solaire, on définit une grandeur appelée constante solaire. Elle est la densité moyenne d'énergie que reçoit la terre par unité de surface dans toutes les longueurs d'onde sur la couche supérieure de l'atmosphère terrestre, et vaut $1,4 \text{ KW/m}^2$.

Si $E_0 = 1,4 \text{ KW/m}^2$, on peut calculer pour chaque jour « J » de l'année la valeur E du rayonnement solaire [2]:

$$E = E_0 (1 + 0,033 \cos (0,984j)) \quad (\text{I.1})$$

Cette constante varie légèrement suivant les jours de l'année et suivant la fluctuation de la structure interne du soleil. Elle est réduite sur Terre par réflexion et absorption des particules présentes dans la couche atmosphérique. Cette perte est appelée la « masse d'air » ou AM. Voir figure I.5.

Sachant que plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il traversera une épaisseur plus importante d'atmosphère et donc subir le maximum d'atténuation. La Masse d'Air est défini comme étant le rapport de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par le rayonnement direct et l'épaisseur de l'atmosphère traversée à la verticale du lieu.

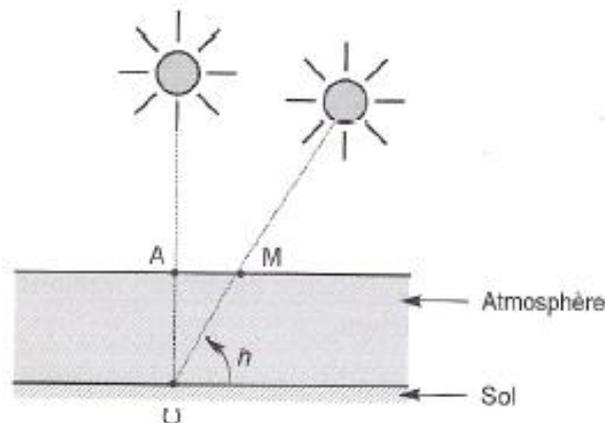


Figure I. 5 : définition de la masse d'air

On définit donc la masse d'air [2]

$$AM = 1/\sin h$$

La désignation AM_0 correspond à une masse d'air nulle pour la lumière arrivant au-dessus de notre atmosphère à incidence normale. Le AM_1 correspond lui à une même lumière arrivant à la surface terrestre. L'appellation $AM_{1,5}$ désigne la

masse d'air rencontrée pour la lumière arrivant à 48° sur la surface de la Terre et AM_2 à 30° .

4. Le rayonnement :

Le rayonnement que le sol terrestre reçoit du soleil, en traversant l'atmosphère, est connu sous plusieurs composantes :

- Ø **Direct** : c'est le rayonnement reçu directement sans qu'il soit modifié par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles les uns par rapport aux autres et peuvent former des ombres.
- Ø **Diffus** : c'est le rayonnement qui, en traversant les particules solides et liquides de l'atmosphère, est diffusé sans direction privilégiée.
- Ø **Albédo** : c'est le rayonnement diffusé et réfléchi par le sol.

Le rayonnement global est donc la somme de toutes les composantes direct, diffus et albédo. Il dépend en grande partie de l'épaisseur de l'atmosphère qu'il traverse. Le rayonnement maximum est obtenu, en traversant une masse d'air minimale, à midi au niveau de la mer et vaut 1000W/m^2 .

Ce rayonnement électromagnétique est composé de photons. L'énergie de chaque photon est fonction la longueur d'onde λ : [2]

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c/\lambda \quad (\text{I.2})$$

h est la constante de Planck

ν la fréquence

c la vitesse de la lumière

La distribution en énergie du spectre de ce rayonnement est répartie en :

Ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ nm}$ 6.4%

Visible $0.38 < \lambda < 0.78 \text{ nm}$ 48.0%

Infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10 \text{ nm}$ 45.6%

Il est à noter que 98% du rayonnement solaire est émis dans une plage de longueurs d'ondes inférieures à $4 \mu\text{m}$. [2]. Ce que peut mettre en évidence la figure I.6 :

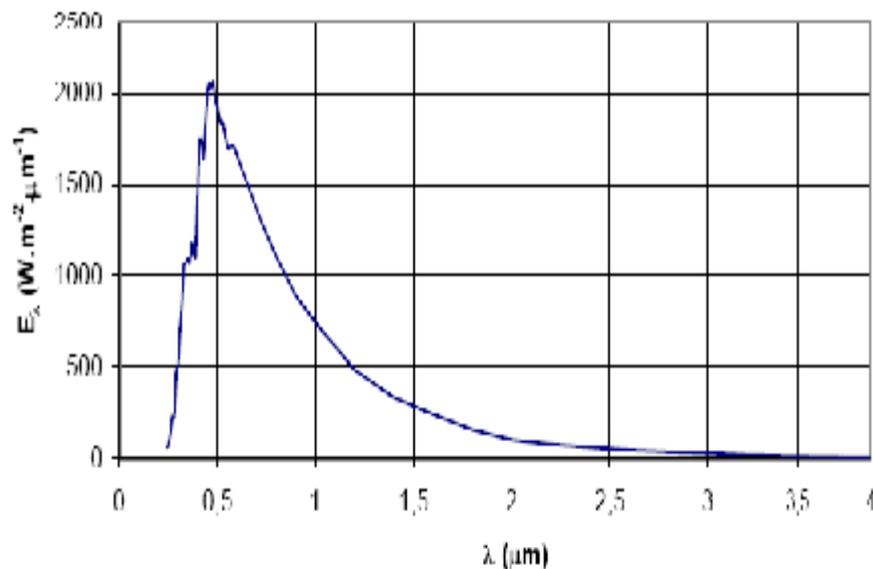


Figure I.6 : Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère

5. Mouvements de la Terre :

La trajectoire de la Terre autour du Soleil est une ellipse dont le Soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique. L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/Soleil ne varie que de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne qui est de 149 675 106 km.

La Terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la Terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique : l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison et qui vaut $23^\circ 27'$. [1]

6. Mouvement apparent du Soleil

Le mouvement apparent du Soleil vu par un observateur fixe en un point de latitude L au nord de l'équateur est représenté sur la figure ci-dessous I.7.

Au midi solaire, l'angle que fait la direction du Soleil avec la verticale du lieu est égal à $(L - d)$.

La durée du jour est de 12h aux équinoxes, elle est inférieure à 12h entre le 21 septembre et le 21 mars, supérieure à 12h entre le 21 mars et le 21 septembre. [1]

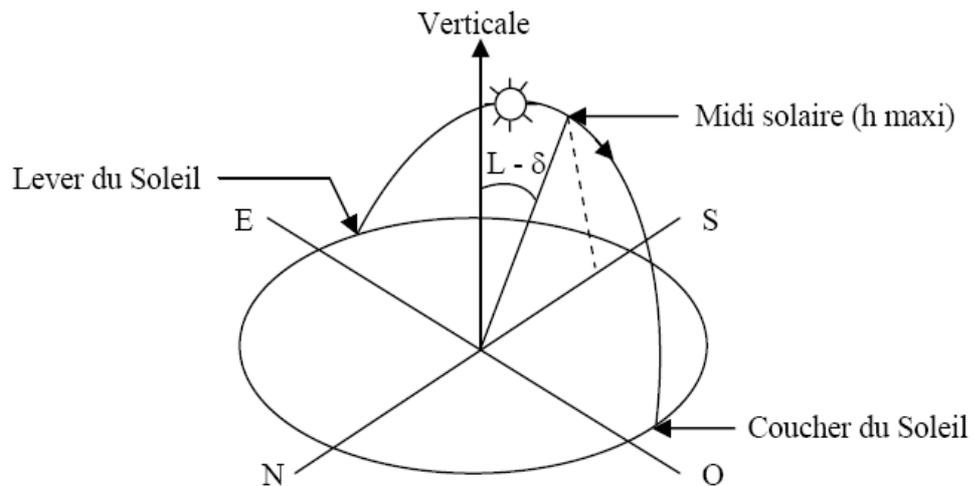


Figure I.7 : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L

Le repérage du Soleil s'effectue par l'intermédiaire de deux angles. Voir figure I.8:

- L'*azimut* a : c'est l'angle que fait la direction de la projection du Soleil sur le plan horizontal avec la direction Sud, cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest.
- La *hauteur* h du Soleil : c'est l'angle que fait la direction du Soleil avec sa projection sur un plan horizontal.

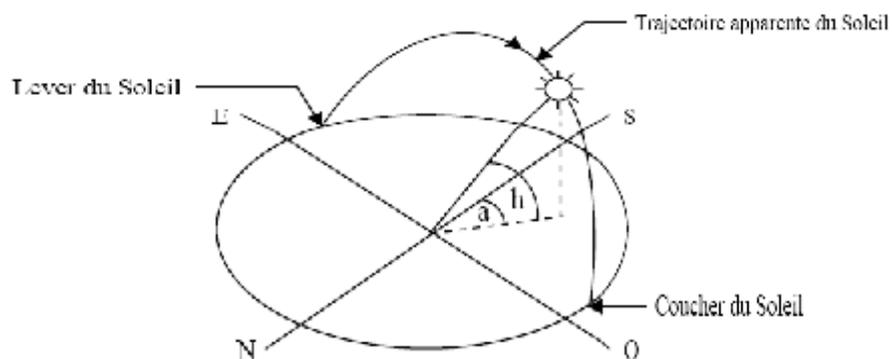


Figure I.8 : Repérage de la position du soleil

7. L'enseillement :

Ø Durée d'enseillement

Selon les conditions atmosphériques, le ciel peut être plus ou moins couvert de nuages au cours d'une journée. Ceux-ci occultent le Soleil, totalement ou partiellement, empêchant ainsi le rayonnement d'atteindre directement le sol. On dit que la nébulosité est plus ou moins importante selon qu'il y a beaucoup ou peu de nuages.

On appelle durée effective d'enseillement ou insolation SS le temps pendant lequel, au cours d'une journée, le rayonnement solaire direct a atteint le sol du lieu considéré. Le rayonnement direct étant le rayonnement qui atteint la surface terrestre sans avoir subi de déviation depuis son émission par le Soleil.

Ø Taux d'enseillement

Par ciel clair sans nuages, le sol reçoit le rayonnement solaire direct pendant toute la durée du jour, ou plus précisément pendant la durée maximale d'enseillement SS_0 . On appelle taux d'enseillement ou taux d'insolation le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'enseillement. [3] :

$$\tau = SS / SS_0 \quad (\text{I.3})$$

8. Différents facteurs agissant sur l'enseillement :

Outre le mouvement de la terre autour du soleil et d'elle-même, causant l'apparition de la nuit et du jour ainsi que les différentes saisons, nombreux facteurs influencent aussi l'enseillement. On distingue :

a. L'atmosphère terrestre :

Ø Composition :

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches de caractéristiques différentes, ce sont :

CHAPITRE I : ENERGIE, PROBLEMATIQUE ET PERSPECTIVES

- La troposphère, entre le sol et 15 km d'altitude.
- La stratosphère entre 15 et 80 km d'altitude.

Les caractéristiques absorbantes de l'atmosphère sont déterminées par la présence de :

- CO₂ (0,03%)
- Vapeur d'eau : en quantité variable caractérisé par l'épaisseur d'eau condensable qui est l'épaisseur d'eau que l'on obtiendrait en condensant toute la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère.
- Ozone O₃ située entre 10 et 30 km d'altitude.
- Aérosols : grains de sable, poussières, fumées...

On trouvera sur la figure I.9 la répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre avec indication des gaz partiellement opaques qui filtrent ce rayonnement selon la longueur d'onde. [1]

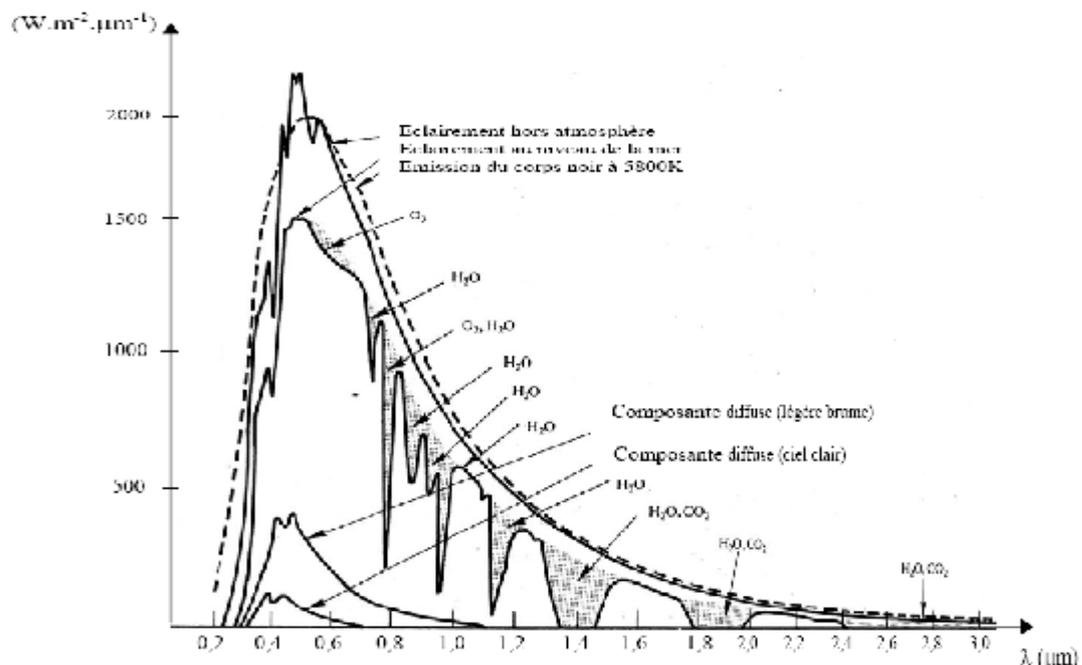


Figure I.9 : Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre

b. La latitude :

On constate dans certains pays, pourtant très proche à l'échelle de la planète, des ensoleillements fort différents. Des écarts dus à une incidence rasante des rayons solaire imposent une inclinaison plus importante des modules photovoltaïque.

Généralement, une inclinaison des panneaux photovoltaïques égale à la latitude donne les résultats les plus satisfaisants.

A l'échelle planétaire, les sites les plus ensoleillés se situent dans les régions tropicales aux latitudes 25° - 30° . Les zones équatoriales sont en général plus perturbées par la nébulosité.

Mais c'est sur la répartition saisonnière que la latitude a le plus d'influence. Dans les zones équatoriales et tropicales, on observe assez peu de variation au cours de l'année, ce qui représente un grand avantage pour l'utilisation du photovoltaïque. Mais plus la latitude s'élève, et plus les différences sont marquées. Dans les pays de faible latitude, entre 15° S et 15° N, le calcul d'une installation se fait sur une valeur relativement constante et la production électrique du générateur photovoltaïque varie peu au cours de l'année. Lorsque le contraste été/hiver s'accroît à plus forte latitude, on doit dimensionner en fonction de l'ensoleillement le plus faible pour une utilisation annuelle, et bien gérer l'excédent d'énergie pendant la saison ensoleillée.

La figure I.10 montre l'évolution annuelle de l'ensoleillement d'un jour « idéal » en fonction de la saison et de la latitude.

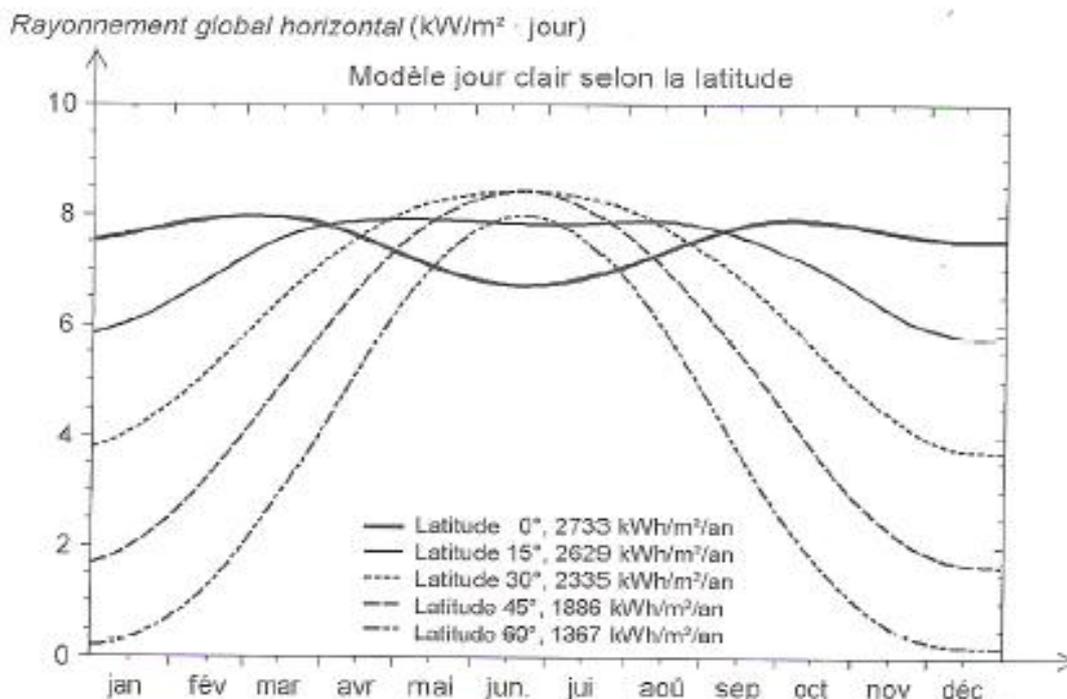


Figure I.10 : Rayonnement global journalier (jour clair sans nuage) en fonction de la saison et de la latitude.

c. L'altitude et l'albédo :

Bien que les principaux facteurs qui déterminent le rayonnement solaire exploitable au sol sont la latitude et la saison, d'autres éléments peuvent intervenir, notamment en montagne, en bordure de mer ou dans les villes où la pollution atmosphérique est élevée.

En altitude, le rayonnement solaire est presque toujours plus élevé que dans la plaine car on se trouve fréquemment au-dessus de la couverture nuageuse. D'une manière générale, la nébulosité baisse avec l'altitude.

De même la réflectivité du sol augmente considérablement le rayonnement reçu par les capteurs photovoltaïques. En hiver, par exemple, l'influence de la neige est primordiale. Ce rayonnement venu du sol n'atteint pas les modules à l'horizontale, mais intervient pour toute exposition inclinée.

IV. Exploitation électrique de l'énergie solaire : différentes approches :

1. L'énergie solaire thermodynamique :

La concentration du rayonnement solaire sur un seul foyer permet d'atteindre des températures élevées. Ce principe, connu depuis l'Antiquité, met en œuvre soit des capteurs paraboliques ou cylindro-paraboliques, soit des centrales dite « à tour », pour lesquelles une multitude d'héliostats orientables concentrent l'énergie solaire sur une chaudière unique située sur une tour. Cela rend possible le réchauffement de fluides caloporteurs, en général de l'huile ou des sels fondus, dans une gamme de température allant de 250 à 1000 °C, selon les techniques employées. Ces fluides viennent ensuite chauffer de la vapeur d'eau qui entraîne un turboalternateur, comme dans les centrales thermiques conventionnelles.

Des unités prototypes de l'ordre de quelques dizaines de kilowatts à une dizaine de mégawatts ont été construites à travers le monde au cours des trois décennies écoulées.

Dans les Pyrénées, la centrale Thémis, d'une puissance de 2 MW, a fonctionné au début des années 80. Le plus grand développement commercial a toutefois été réalisé par la société Luz Corp, qui a construit au cours de la même décennie trois centrales à capteurs cylindro-paraboliques totalisant une puissance électrique nominale de 354MW, et fournissant au réseau de Southern California Edison – qui alimente Los Angeles – une électricité de pointe durant les après-midi d'été. Un potentiel d'amélioration de 20 à 30% reste envisageable, notamment via la production directe de vapeur dans les capteurs, et l'optimisation des miroirs. Les États-Unis, Israël et, pour l'Europe, l'Allemagne et l'Espagne (centrale solaire d'Almería) mènent conjointement des recherches sur ces thèmes. Des réalisations, combinant parfois turbine à gaz et solaire, sont annoncées dans plusieurs pays tels que l'Égypte, le Maroc, l'Inde et le Brésil. La filière thermodynamique à concentration demeure toutefois réservée aux pays sans nuage [4].

2. L'énergie solaire thermique :

Les rayons du soleil, piégés par des capteurs thermiques vitrés, transmettent leur énergie (énergie solaire) à des absorbeurs métalliques - lesquels réchauffent un réseau de tuyaux de cuivre où circule un fluide caloporteur. Cet échangeur chauffe à son tour l'eau stockée dans un cumulus.

Un chauffe-eau solaire produit de l'eau chaude sanitaire ou du chauffage généralement diffusé par un "plancher solaire direct".

L'énergie solaire thermique s'utilise principalement au travers de deux applications : le chauffage de l'eau chaude sanitaire et le chauffage des locaux. Pour le premier point, quatre mètres carrés permettent de répondre aux besoins en eau chaude d'une famille de quatre personnes. Pour le second, dix à vingt mètres carrés assurent le chauffage d'une maison individuelle. Un chauffage d'appoint est nécessaire pour les périodes climatiques les plus défavorables. En moyenne sur l'année, une installation de chauffage solaire procure un taux de couverture des besoins.

De tels capteurs thermiques produisent annuellement de 200 à 800 kWh/m², avec des rendements de 30 à 60%, selon les besoins, les températures et les modes d'utilisation. 200kWh/m² correspondent à des usages épisodiques d'eau chaude sanitaire à température élevée. 800 kWh/m² sont obtenus dans le cas de chauffage continu à basse température. Pour ce type d'application, le fluide caloporteur issu des capteurs est injecté directement dans le plancher des bâtiments à une température de 25 à 30 °C. Cette conception conduit d'une part, à des habitations très confortables et d'autre part, à une rentabilité technico-économique meilleure.

Les développements technologiques en cours ont pour objectif de baisser les coûts, via une meilleure facilité d'intégration et de mise en œuvre dans le bâti. Une voie prometteuse est l'association de trois fonctions dans le même capteur: couverture, production thermique, production électrique. Un circuit caloporteur refroidit le module en face arrière, augmentant le rendement de 20% en moyenne, et chauffe le plancher [4].

3. Les promesses de la biomasse :

En écologie, la biomasse est la masse totale des organismes vivants mesurée dans une population. Dans le domaine énergétique le mot biomasse définit l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie. Ces matières organiques qui proviennent des plantes sont une forme de stockage de l'énergie solaire, captée et utilisée par des plantes grâce à la chlorophylle. Elles peuvent être utilisées soit directement (bois) soit après une méthanisation de la matière organique (biogaz) ou de nouvelles transformations chimiques (biocarburant).

4. L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque est un moyen intéressant de réduire les coûts de distribution de l'électricité dans certaines régions. Particulièrement disponible dans la plupart des pays situés entre l'équateur et le 45^{eme} parallèle, c'est une source d'énergie d'une fiabilité remarquable qui présente un bilan énergétique et environnemental tout à fait favorable.

Les techniques et les matériaux utilisés dans la production de l'énergie photovoltaïque seront étudiés dans le chapitre suivant.

V. Conclusion :

L'énergie solaire se manifeste sous de nombreux et complexes aspects : cycle de l'eau, vent, biomasse, courants océanique...le défi est de savoir et pouvoir exploiter cette énergie que nous savons aujourd'hui la plus abondante, la mieux répartie et la plus propre de toutes.

Différentes et multiples sont les techniques d'exploitation de l'énergie directe du soleil et des autres formes sous lesquelles elle se présente, mais la filière photovoltaïque est, entre toutes, la plus prometteuse en ce qu'elle est la plus facile à exploiter et de rendement en continuelle expansion.

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

I. Introduction :

Afin de mieux appréhender le fonctionnement d'un système hybride photovoltaïque – éolien, il est utile de se pencher sur chacun des deux transducteurs d'énergie séparément.

II. Générateur photovoltaïque :

1. Chronologie du photovoltaïque :

- Ø **1839** : Le physicien Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- Ø **1875** : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- Ø **1954** : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés" (une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs), mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- Ø **1958** : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- Ø **1973** : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

2. L'effet photovoltaïque :

C'est le résultat de l'interaction de la lumière avec les atomes de cristal. L'énergie d'un photon dépend de sa longueur d'onde. Un photon d'énergie suffisante (dont la longueur d'onde est comprise entre 0,4 et 1,1 μm dans le spectre visible) qui heurte un atome de silicium peut arracher un électron et lui communiquer une certaine vitesse. L'électron ayant acquis suffisamment d'énergie peut se déplacer vers une jonction.

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

Une tension électrique apparaît entre les deux zones N et P. Le dispositif devient générateur électrique sous l'effet de la lumière. La collecte de courant se fait par les contacts métalliques, en forme de grille sur chaque face. Si ces électrodes sont reliées à un circuit extérieur, un courant circule. Voir figure II.1. L'épaisseur nécessaire pour réaliser ce phénomène n'est que de quelques dizaines de microns, mais pour des raisons mécaniques, les cellules atteignent généralement des épaisseurs de 200 à 400 microns.

Selon la technologie utilisée (amorphe en couche mince, poly-cristallin, monocristallin), le rendement de conversion s'échelonne de 6 à 20 % actuellement pour le silicium [8].

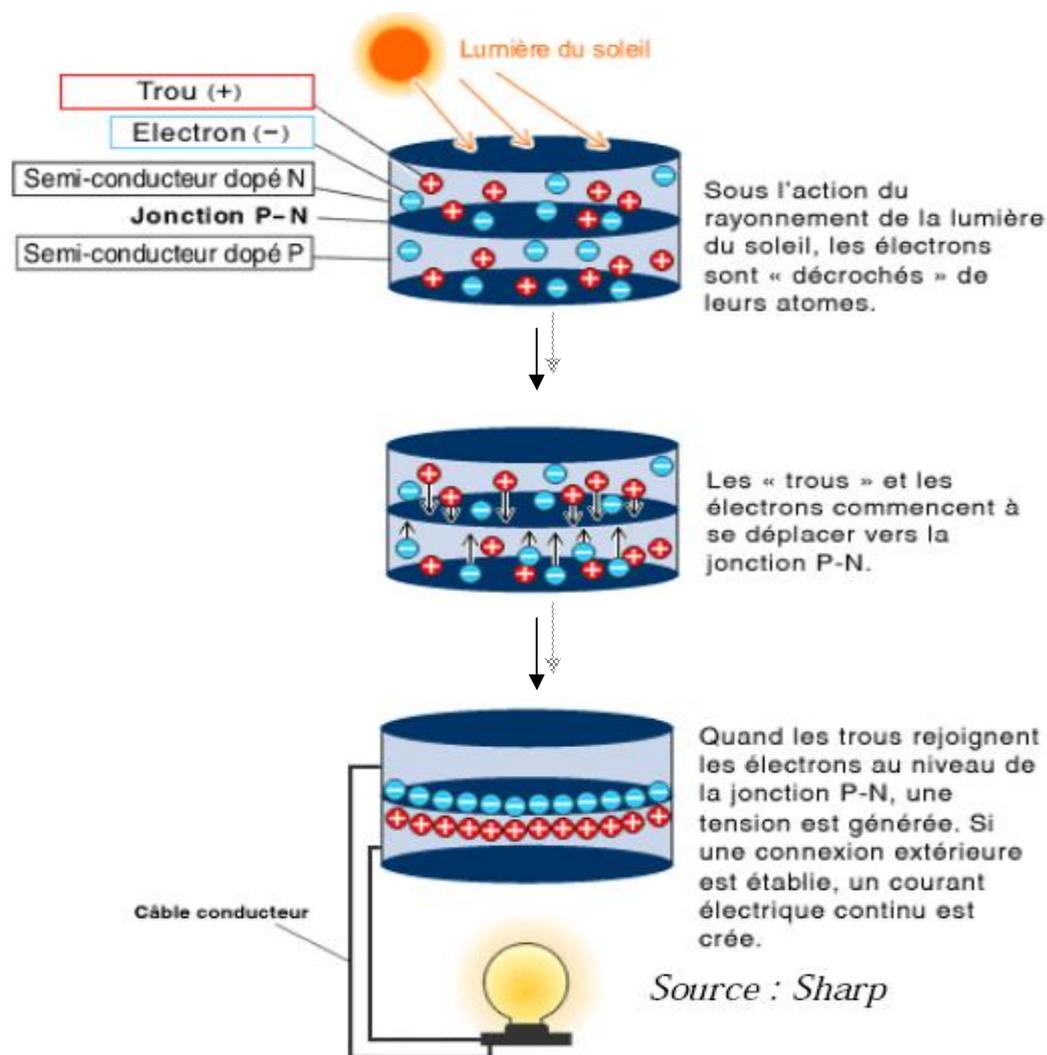


Figure II.1 : processus de la conversion photovoltaïque

3. La cellule photovoltaïque :

Les photopiles ou cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

Le matériau de base est dans la plupart des cas le silicium. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, poly-cristalline, ou monocristalline. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de Gallium (AsGa), Tellurure de Cadmium (CdTe). Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des "impuretés") sont substitués à des atomes de silicium dans un réseau cristallin : c'est ce que l'on appelle le dopage.

- Ø Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type "N" (ex : dopage au phosphore).
- Ø Si l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le Silicium, le matériau sera déficitaire en électrons : il sera dit de type "P" (ex : dopage au bore).

Une cellule solaire sera obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposées (jonction PN). Au voisinage de la jonction, un champ électrique apparaît provoqué par le déséquilibre de charges. Il va contribuer à drainer les électrons qui auront été détachés par l'énergie des photons incidents [8]

a. Schéma équivalent d'une cellule PV idéale sous éclairnement:

Un schéma équivalent de la cellule photovoltaïque idéale comprend une source de courant I_{ph} associée à une diode en parallèle représentant la jonction P-N [10]. Voir figure II.2.

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

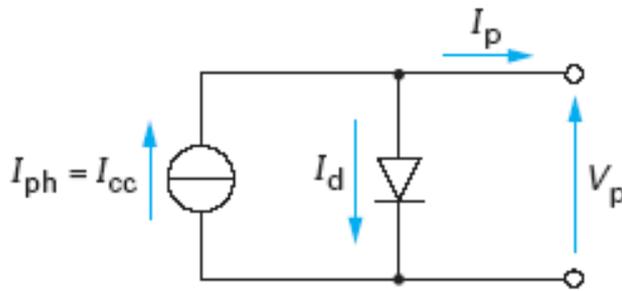


Figure II.2 : schéma équivalent d'une cellule idéale

De ce modèle idéal de la cellule PV, on aura les équations donnant la caractéristique électrique $I_p(V_p)$ comme suit [10]:

Le courant I_p de la cellule :

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

$$\text{Avec } I_d = I_s \left(\exp \frac{eV_d}{KT} - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

La tension V_p aux bornes de la cellule :

$$V_p = \frac{KT}{e} \ln \left(1 + \frac{I_{ph} - I_p}{I_s} \right) \quad (\text{II.3})$$

V_d = la tension imposée à la diode.

K = la constante de Boltzmann

T = la température en K

I_s = le courant de saturation de la diode

e = la charge de l'électron

On peut définir, en se basant sur les deux équations précédentes, le courant de court-circuit I_{cc} et la tension de circuit ouvert V_{co} :

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

Pour le courant de court-circuit $U=0$:

$$I_{cc} = I_{ph} \quad (\text{II.4})$$

Pour la tension de circuit ouvert $I=0$:

$$V_{co} = \frac{KT}{e} \ln\left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s}\right) \quad (\text{II.5})$$

b. Une cellule PV réelle sous éclaircment:

Dans la pratique le processus de conversion photovoltaïque observe différentes pertes qui réduisent considérablement le rendement de la conversion. On peut citer notamment l'énergie perdue lors de la recombinaison, les pertes par conduction, l'énergie excédante des photons ($E \geq E_g$), énergie perdue ($E \leq E_g$) et l'énergie des photons réfléchis par les capteurs.

On tiendra compte globalement des pertes internes de puissance en ajoutant au modèle de la cellule idéale deux éléments dissipatifs [10]: voir figure II.3.

- une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contacts et de connexions ;
- une résistance shunt R_{sh} en parallèle caractérisant les divers courants de fuites.

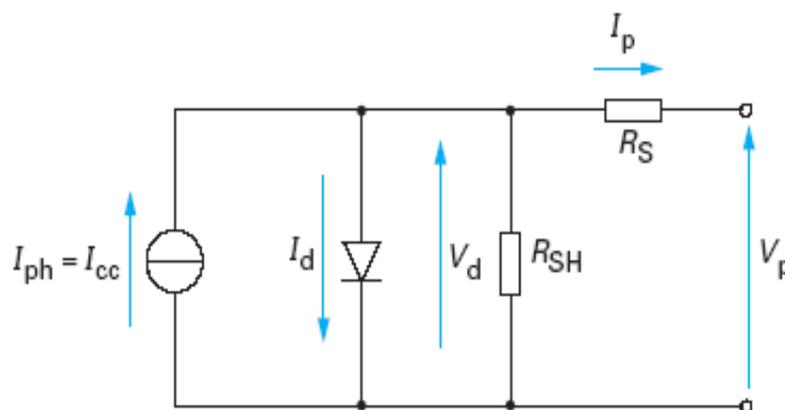


Figure II.3 : schéma équivalent d'une cellule réelle

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

L'expression du courant I_d est donnée comme suit: [10]

$$I_d = I_s \left(\exp \frac{eV_d}{nKT} - 1 \right) \quad (\text{II.6})$$

Le terme introduit n est le facteur de diode qui traduit les pertes d'énergie par la recombinaison. Il est pris habituellement égal à **1** en négligeant la recombinaison. Ce qui donne : [10]

Le courant traversant la diode :

$$I_d = I_s \left(\exp \frac{eV_d}{KT} - 1 \right) \quad (\text{II.7})$$

Le courant I_p généré par la cellule :

$$I_p = I_{ph} - I_d - \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (\text{II.8})$$

La tension aux bornes de la cellule :

$$V_p = V_d - R_s I_p \quad (\text{II.9})$$

Avec :

- R_{sh} est une résistance parallèle ou résistance de fuite traduisant les pertes par des courants parasites entre le dessus et le dessous de la cellule et à l'intérieur du matériau causés par des irrégularités ou des impuretés.
- R_s est une résistance série tenant compte des pertes ohmiques du matériau et du contact entre le métal et le semi-conducteur.
- I_p est l'expression du courant généré par une cellule réelle.
- V_p est l'expression de la tension aux bornes d'une cellule réelle.

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

c. Influence de la température et de l'intensité lumineuse :

On peut constater aisément à partir des expressions du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert d'une cellule photovoltaïque que la V_{co} augmente avec le logarithme du courant I_{ph} donc avec le logarithme l'illumination.

Malgré le terme KT/e , cette tension décroît avec la température. Le courant de saturation I_s dépend de la surface de la cellule et des caractéristiques de la jonction et il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme KT/e . [2].

On peut déduire que :

- Le courant d'une cellule solaire est proportionnel à l'éclairement et à la surface de la cellule, il augmente avec la température.
- La tension en circuit ouvert d'une cellule solaire varie de manière logarithmique avec l'éclairement et baisse avec la température.
Voir figure II.4.

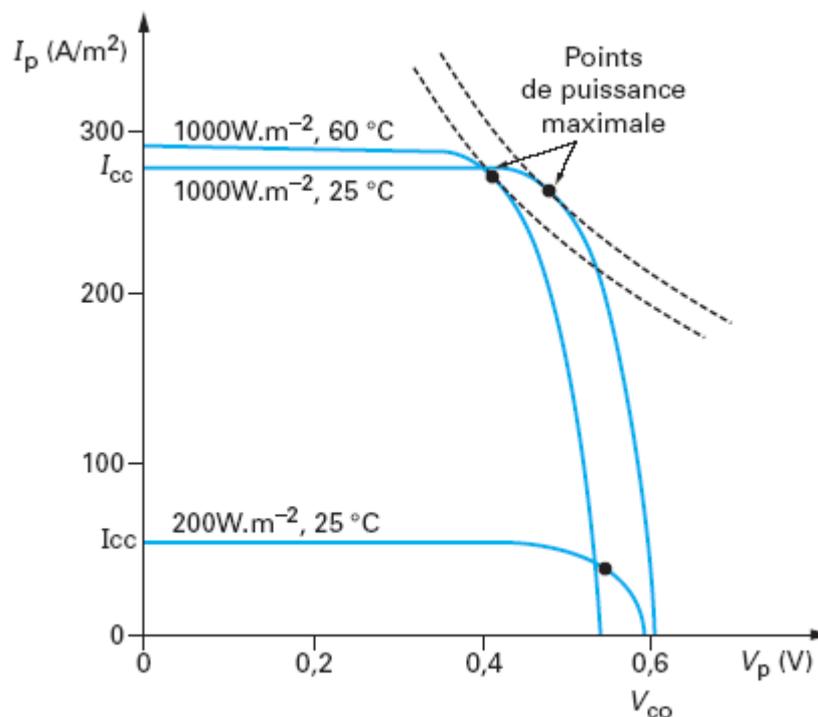


Figure II.4 : caractéristiques d'une cellule soumise à différentes intensités d'éclairement et à différentes températures.

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

d. Puissance et rendement :

La puissance fournie par une cellule PV ainsi que son rendement de conversion dépendent non seulement des conditions environnementales (éclairage et température) mais aussi de son point de fonctionnement, c'est-à-dire de la charge électrique qui lui est connectée.

Sous une charge électrique quelconque :

- à température donnée, la puissance maximale est proportionnelle à l'éclairement.
- pour un éclairement donné la puissance maximale est inversement proportionnelle à la température.

On définit la puissance crête, $P_c = V_c I_c$, qui correspondant à une puissance maximale particulière délivrée par une cellule photovoltaïque, branchée à sa charge maximale, à une température de 298K (25⁰c) sous un éclairement solaire de 1KW/m² dans le spectre AM_{1,5}.

À partir de la tension de circuit ouvert V_{co} et du courant de court-circuit I_{cc} , on définit le facteur de forme FF de la caractéristique de la cellule par : [10]

$$FF = P_c / P_m = V_c I_c / V_{co} I_{co} \quad (\text{II.10})$$

Ce facteur de forme dépend des différentes pertes, particulièrement du facteur de diode n et des résistances R_s et R_{sh} . Il est de l'ordre de 0,85 pour une cellule usuelle au silicium.

C'est dans le point de puissance que l'on définit le rendement η d'une cellule : [10]

$$\eta = P_c / 1000 \quad (\text{II.11})$$

La puissance crête et le rendement η permettent de caractériser et de comparer les performances de différentes technologies de cellules. Mais ils ne déterminent ni un point de puissance nominale, ni la production énergétique du générateur car le rayonnement réel sur site ne correspond pratiquement jamais à ces conditions standards, que ce soit en spectre ou en puissance.

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

La puissance délivrée par le dispositif installé est très souvent inférieure à sa puissance crête. C'est la qualité du gisement solaire et l'implantation des capteurs qui déterminent, en fin de compte, l'énergie produite par une puissance crête installée sur un site.

La figure II.5 représente la caractéristique et puissance crête d'une cellule photovoltaïque.

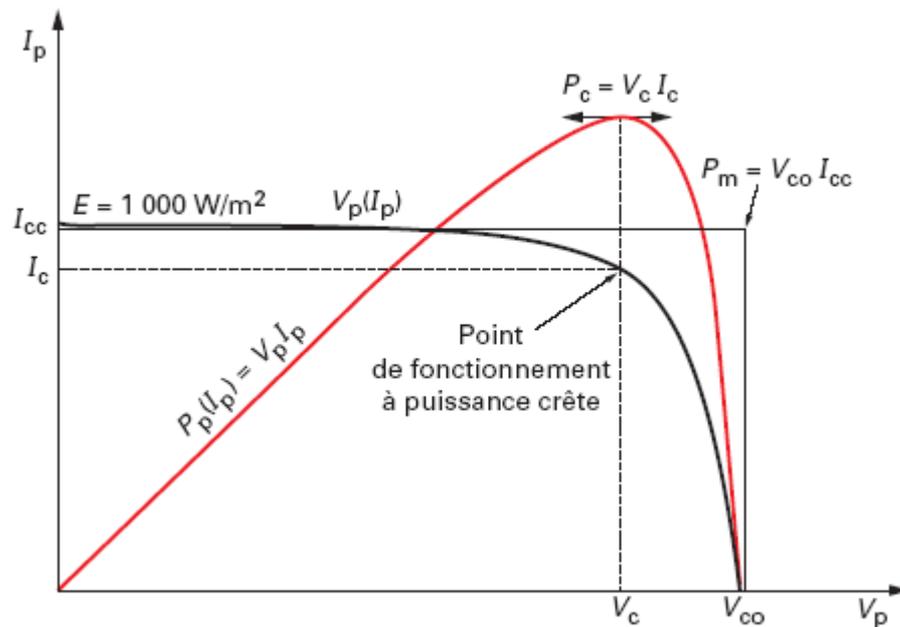


Figure II.5 : Caractéristique et puissance crête d'une cellule photovoltaïque

4. Le « passage » du photon à l'électron :

Les charges élémentaires qui produiront le courant électrique sous l'influence de l'ensoleillement sont les charges négatives élémentaires (électrons), contenues dans la matière semi-conductrice. Ce n'est ni une transformation ni un passage, à proprement parler, du photon à l'électron.

Les photons qui sont absorbés par la matière semi-conductrice vont communiquer leurs énergies aux électrons périphériques. L'énergie ainsi acquise, ils se libèrent de l'attraction de leur noyau.

En régime permanent, l'électron libéré laisse un trou qui se traduit par une charge positive. Si cet électron est attiré à l'extérieur, c'est un autre électron,

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

voisin, qui viendra combler sa place. Le phénomène se poursuit de proche en proche créant ainsi un courant électrique.

La photoconductivité est spécifique aux semi-conducteurs en ce qu'ils comportent des électrons libérables. Dans les isolants, les électrons sont fortement liés ; dans les conducteurs, il y'a une forte densité d'électrons libres.

Il va sans dire qu'il doit exister un seuil d'énergie minimum, qui dépend du matériau, nécessaire à cette libération. Si le nombre d'orbitales ainsi que la quantité d'électron par atome sont différents d'un matériau à un autre, alors les énergies mises en jeu sont également différentes.

Le seuil cité précédemment est défini comme l'énergie du gap E_g du matériau ou la largeur de bande interdite. Si le photon a une énergie inférieure, il ne pourra pas créer la paire électron-trou et ne sera pas absorbé.

Si un photon a une énergie supérieure ou égale au gap, c'est qu'il possède une longueur d'onde inférieure à une certaine valeur. Son énergie est :

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c/\lambda \quad (\text{II.12})$$

h est la constante de Planck

ν la fréquence

c la vitesse de la lumière

Une relation directe est établie entre l'énergie d'un photon exprimée en électronvolts et sa longueur d'onde exprimée en micromètres : [2]

$$E_{(\text{eV})} = 1,24 / \lambda_{(\mu\text{m})} \quad (\text{II.13})$$

Ø L'énergie du gap pour le silicium cristallin est $E_g = 1,1$ eV, le photon qui possède cette énergie à une longueur d'onde de $1,13 \mu\text{m}$.

Ø Pour le silicium amorphe : $E_g = 1,77$ eV, correspondant à un photon ayant une longueur d'onde de $0,7 \mu\text{m}$.

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

La figure II.6 représente le spectre exploitable en fonction de l'énergie E et de la longueur d'onde λ .

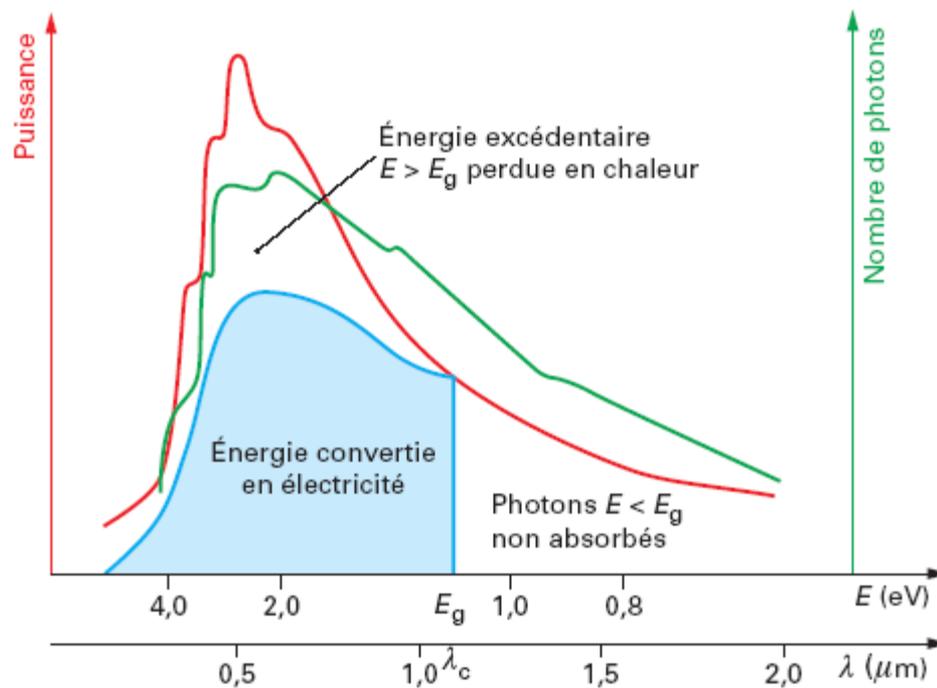


Figure II.6 : spectre exploitable en fonction de E et de λ .

La figure ci-dessus permet de visualiser la partie du spectre solaire qui peut être convertie en énergie électrique en fonction de l'énergie et de la longueur d'onde.

Pour une λ supérieure à une longueur d'onde limite (de coupure) λ_c correspondant une énergie de gap E_g , le spectre n'est pas absorbé par le matériau.

Quelle que soit son énergie, pourvue qu'elle soit supérieure au gap, chaque photon absorbé ne crée qu'une seule paire électron-trou d'énergie E_g .

En effet, lorsque l'énergie du photon est supérieure à E_g l'énergie du gap, le photon génère une paire électron-trou à un niveau supérieur. Mais l'excédent est perdu dans un processus de désexcitation spontané qui produit de la chaleur et ramène son énergie à E_g . Le phénomène est illustré dans la figure qui suivra. Voir figure II.7.

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

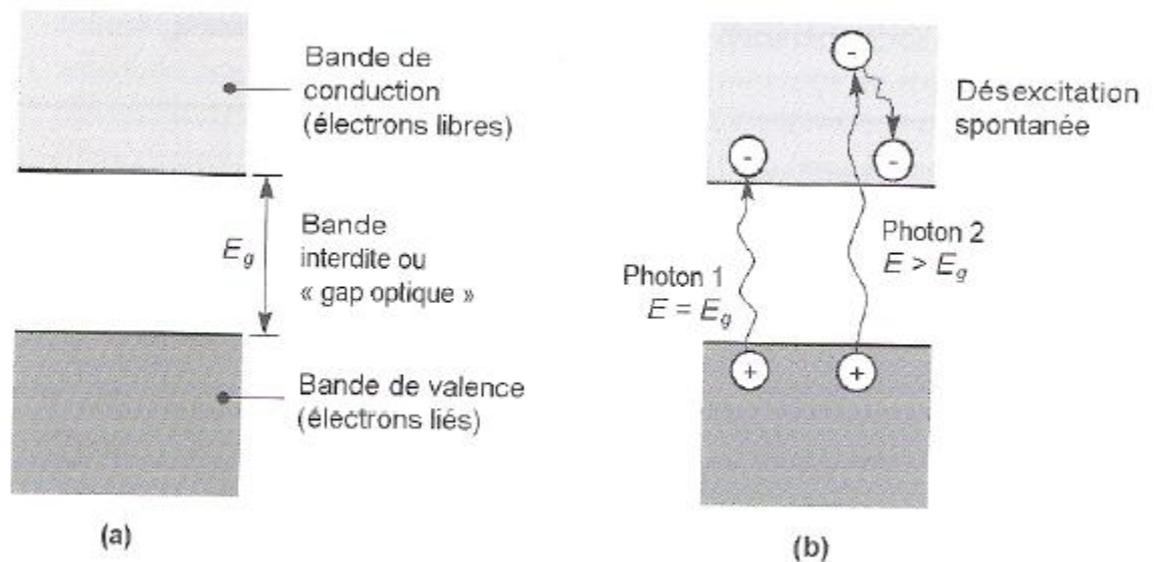


Figure II.7 : diagramme d'énergie d'un semi-conducteur dans l'obscurité (a) et sous éclairement (b).

En conclusion on peut dire que la conversion de photons en électrons dans un matériau pouvant produire un courant électrique nécessite que :

- les photons soient absorbés par le matériau (absorption optique) en transmettant leur énergie au matériau ;
- l'énergie transmise aux électrons soit une énergie potentielle et non une énergie thermique ;
- les électrons excités par les photons soient collectés avant de reprendre leur énergie initiale (relaxation), afin de fournir un courant électrique.

5. La fabrication des cellules photovoltaïque :

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

a. Le choix du matériau :

L'un des facteurs prépondérants pour le choix du matériau est la largeur de son gap E_g . Il impose le nombre de photons du rayonnement solaire participant à la conversion et la tension de sortie de la cellule élémentaire.

La figure II.8 donne le rendement théorique maximal en fonction de la largeur de bande interdite des matériaux.

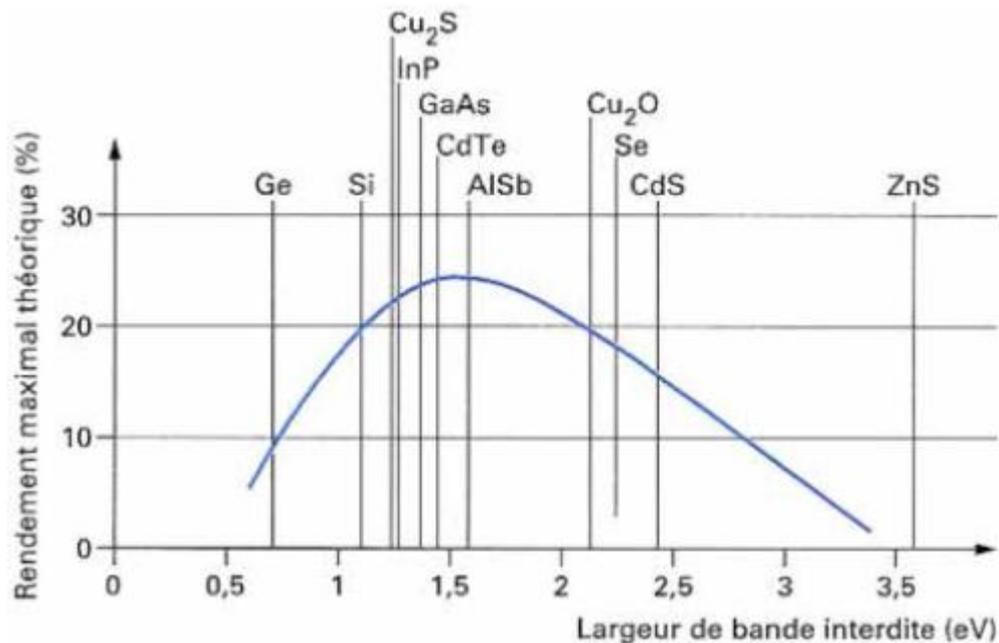


Figure II.8 : Rendement théorique maximal des matériaux photovoltaïque en fonction du gap.

La courbe est tracée en conditions AM_0 et sans recombinaison. Elle montre un maximum de rendement vers le silicium. Certaines cellules photovoltaïques pourront être réalisées à partir de matériaux adaptés à un spectre donné (cellules pour l'espace, pour la lumière solaire au sol, pour la lumière artificielle...).

Parmi les autres facteurs de choix figurent la disponibilité du matériau à l'état cristallin, la température de fonctionnement et la facilité de créer une jonction dans ce matériau.

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

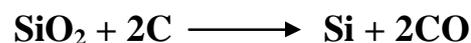
Selon les matériaux utilisés, on réalisera des homo-jonctions, qui sont des jonctions PN au sein d'un même semi-conducteur (silicium ou germanium) par implantation d'impuretés de type P ou N, ou des hétérojonctions à partir de deux semi-conducteurs différents (par exemple, composés de cuivre et de cadmium).

Les matériaux photovoltaïques se situent dans la quatrième colonne de la classification périodique (4 électrons sur la dernière couche) où le silicium est le plus utilisé et dans les colonnes 2,3 et 5.

Récemment, un matériau est combiné à base d'arséniure de gallium (GaAs) pour lequel des rendements prometteurs en laboratoire ont été obtenus (> 25 %). De nouveaux composés ternaires à base de trois matériaux sont également étudiés (GaAlAs) ; des cellules sandwiches utilisant des matériaux différents sous forme de couches superposées ont également été réalisées en laboratoire. Par exemple, une première couche absorbe les photons d'énergie faible (« Si » pour le rouge et infrarouge), puis une seconde couche absorbe les photons d'énergie élevée (GaAs pour le bleu). Sur ce principe, des cellules tandem à 3 couches ont permis des rendements supérieurs à 30 %, mais elles restent du domaine du laboratoire vu la complexité de réalisation [9].

b. L'extraction du silicium :

Le silicium n'existe pas à l'état pur mais seulement sous forme oxydée. Il est le constituant de base du sable. Pour fabriquer du silicium pur, on utilise à la base du sable de quartz qui est cristallisé. Le procédé de raffinage est une réduction dans un four à arc électrique par du carbone, la réaction suit l'équation :



On fabrique de cette manière par année plus d'un million de tonnes de ce silicium, dit métallurgique. Sa pureté est de l'ordre de 98 à 99%, les impuretés les plus importantes étant l'aluminium et le fer. Sa principale utilisation est comme composant de l'aluminium et de l'acier.

Ce procédé d'extraction est relativement efficace, l'énergie consommée étant à peu près la même que pour l'extraction de l'aluminium ou du titane. Une petite proportion de cette production, quelques dizaines de tonnes, sera purifiée pour l'industrie de l'électronique.

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

c. La purification du silicium :

Pour obtenir un matériau suffisamment pur pour fabriquer des composants électroniques, on utilise le procédé Siemens qui lie le silicium à un gaz à partir d'acide chlorhydrique qui est ensuite distillé. L'équation de base est : [2]



Le silicium se dépose ensuite sur une baguette de silicium chauffée sous forme de petits grains poly-cristallins.

d. Le dopage :

Une fois les charges libérées dans le semi-conducteur par la lumière, et pour qu'elles soient génératrices d'énergie, il est nécessaire qu'elles circulent. Dans le cas contraire, elles se recombinent : l'électron neutralise la charge positive (le trou) et retrouve son état initial ce qui se traduira par un dégagement de chaleur au lieu d'une énergie électrique. Il faut donc les attirer hors du semi-conducteur dans un circuit électrique.

L'extraction des charges est réalisée au sein d'une jonction créée volontairement dans le semi-conducteur qui canalise la circulation des électrons dans un unique sens. Le principe étant d'engendrer un champ électrique à l'intérieur du matériau qui entrainera les charges négatives d'un côté et les charges positive de l'autre côté.

Le dopage d'un semi-conducteur pur permettra d'aboutir au résultat escompté.

Sur la figure II.9 sont représentés des atomes de silicium (à 4 électrons dans la couche externe) qui sont chacun liés à quatre autres atomes de silicium. Sont représentés également les deux niveaux d'énergie E_c (bande de conduction) et E_v (bande de valence), ainsi que la valeur E_g de largeur de la bande interdite ou gap.

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

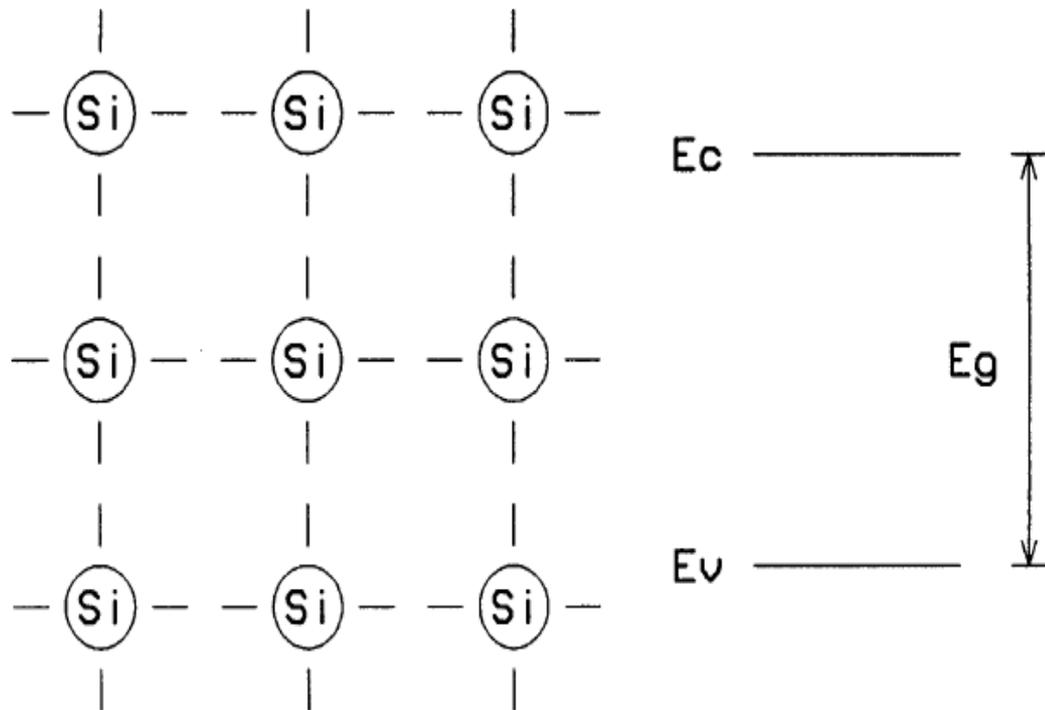


Figure II.9 : silicium pur.

En dopant le silicium 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 excédent de charges négatives dans le cristal. Cet apport d'électrons crée un niveau d'énergie E_d dans la bande interdite proche de la bande de conduction. Il suffit alors de peu d'énergie pour faire passer ces électrons dans la bande de conduction et créer un courant.

Le silicium ainsi dopé est appelé silicium de type n. voir figure II.10 :

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

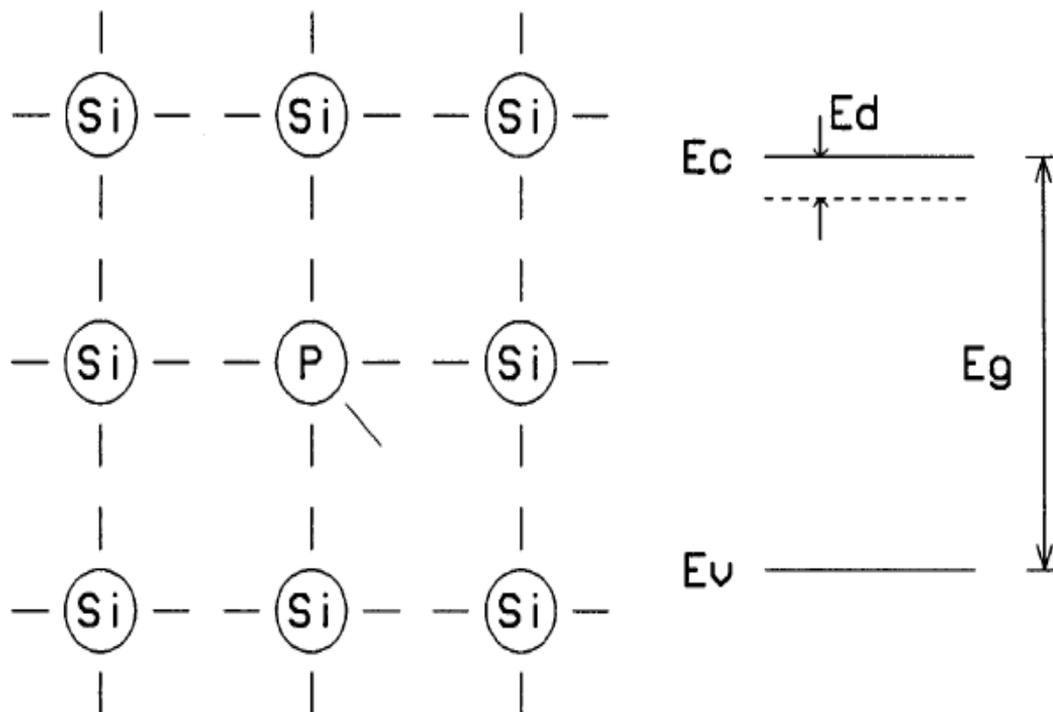


Figure II.10 : silicium de type N (dopage avec le phosphore)

On peut également doper le silicium avec du bore qui a seulement trois électrons dans sa bande 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. Il apparaît également un niveau d'énergie E_a dans la bande interdite juste au-dessus de la bande de valence.

Ce matériau ainsi dopé est appelé silicium de type p. voir figure II.11.

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

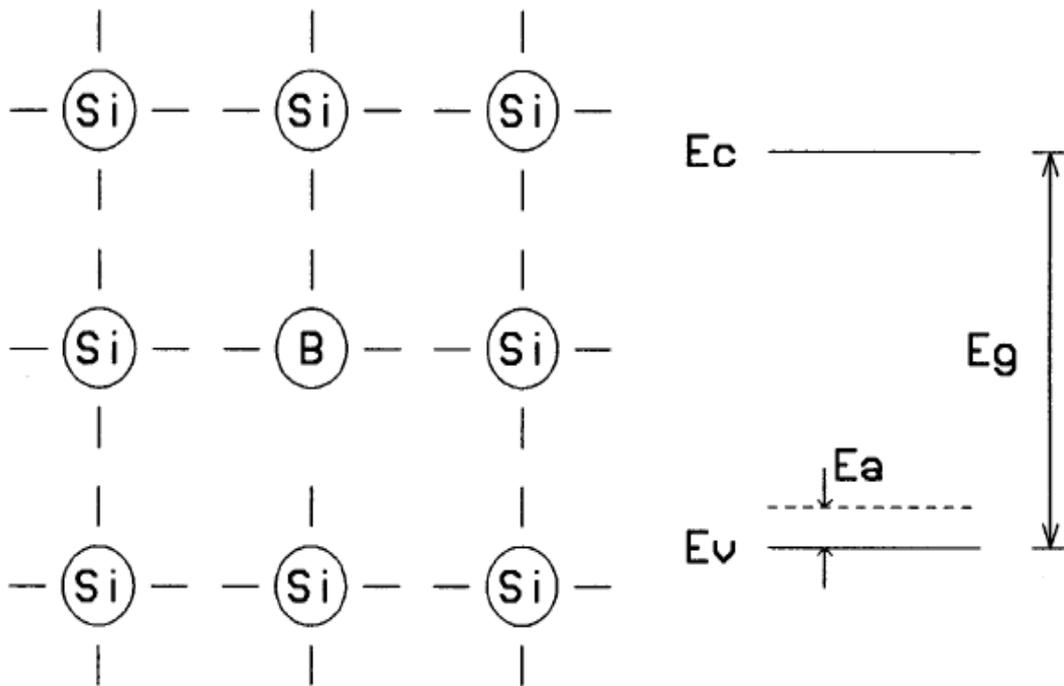


Figure II.11 : silicium de type P (dopage avec le bore)

e. Formation de la jonction PN :

La mise en contact de deux zones à dopages opposés dans un semi-conducteur constitue un élément fort connu: la diode. A l'interface où les concentrations d'atomes étrangers font passer le silicium du 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 où ils sont attirés par les trous excédentaires et de la tendance des trous à vouloir passer du côté n par réciprocity. 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. Voir figure II.12

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

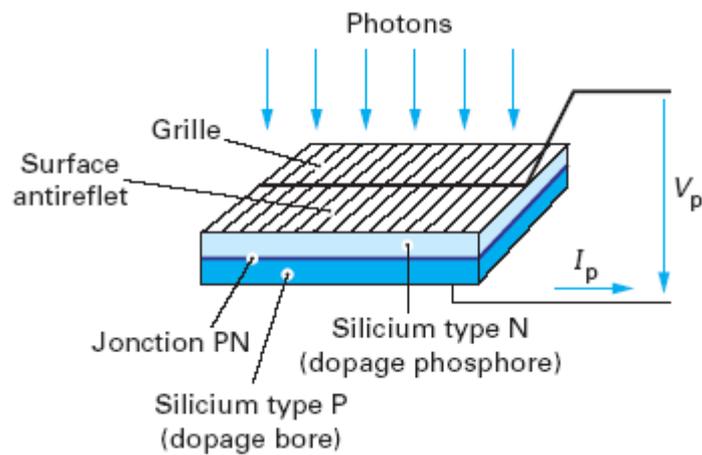


Figure II.12 : illustration d'une cellule PV.

6. Les différentes technologies de fabrication :

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et de développement.

Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou poly-cristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium). Voir figure II.13.

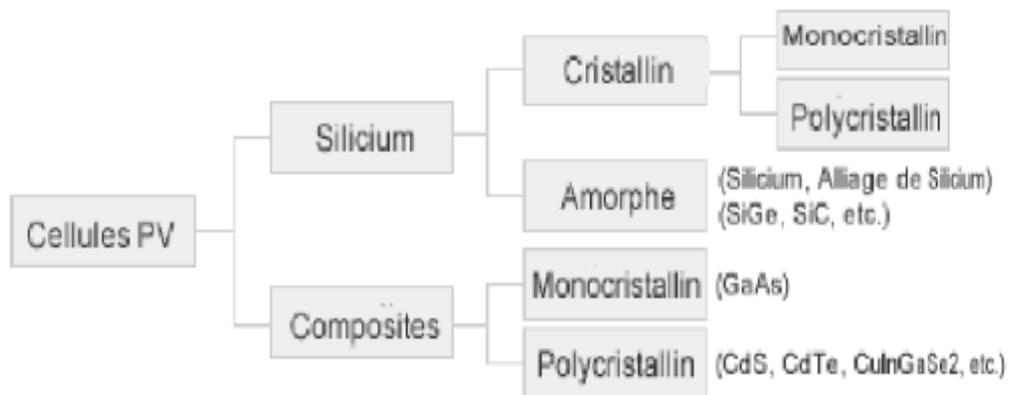


Figure II.13 : différentes technologies de fabrication des cellules PV.

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

a. Cellules en silicium cristallin :

Le silicium représente aujourd'hui 99 % de la production mondiale de matériau photovoltaïque pour les applications terrestres dont 90 % de silicium de type cristallin. L'industrie photovoltaïque bénéficie de celle des semi-conducteurs qui fournit une matière première d'excellente qualité pour les panneaux solaires ainsi que des technologies de fabrication parfaitement maîtrisées. Mais la très forte croissance de la demande commerciale annuelle de 30 % a généré une pénurie qui fait que le coût reste très élevé, ce qui pénalise le coût du kWh électrique [10].

Le silicium monocristallin représente environ 29 % du marché photovoltaïque mondial en 2005.

La première phase de fabrication consiste à obtenir le silicium très pur monocristallin. On réalise ainsi des barreaux de 10 à 20 cm de diamètre et plus de 1 m de long. La technique moderne de sciage de tranches d'épaisseur inférieure à 0,2 mm à l'aide de fils abrasifs a permis de réduire les chutes de matériau. On obtient des tranches de silicium de 10×10 cm², la forme carrée permet une meilleure exploitation de la surface exposée au soleil. Les diffusions d'impuretés de type N (phosphore) et de type P (bore) créent ensuite la jonction P-N. L'électrode supérieure est une grille fine déposée par sérigraphie afin de ne pas faire écran aux rayons lumineux. La passivation de surface par une couche d'oxydes de quelques dizaines de nanomètres permet de réduire les recombinaisons avant collecte.

Très fiables, ce sont les plus performantes des cellules au Si. Le laboratoire de l'Université De New South Wales en Australie a obtenue à plus de 23 % de rendement proche du rendement théorique maximal (25 %). [10]

Le silicium multi-cristallin représente environ 62 % du marché photovoltaïque mondial. Obtenu par refonte des chutes de silicium de l'industrie de la microélectronique, il est donc moins cher. Le rendement des cellules est inférieur en raison d'un taux de recombinaison des porteurs plus élevé que dans le silicium monocristallin. La réalisation du dispositif peut bénéficier des raffinements appliqués au monocristallin. Le laboratoire de l'Université De New South Wales en Australie a obtenue un rendement record de 19,8 %. Les produits commerciaux offrent des rendements typiques de 14,5 %.[10].

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

b. Cellules en couches minces :

Les cellules en couche mince constituent une deuxième génération de cellules véritablement prometteuses pour baisser les coûts.

On ne dépose que la quantité de matériau photosensible efficace pour absorber l'essentiel du rayonnement solaire (quelques micromètres d'épaisseur suffisent) et elles peuvent utiliser des substrats flexibles : leur fabrication est donc moins coûteuse.

Les cellules en silicium amorphe hydrogéné avec un coefficient d'absorption beaucoup plus élevé que le cristallin utilisent moins de matériaux silicium que les technologies précédentes (épaisseur 2 à 3 μm), ce qui réduit leur coût. Le matériau peut être produit en rubans. Elles ont été les premières exploitées pour des applications portables de très faible puissance comme des calculettes ou des montres au prix d'un rendement de conversion fortement pénalisé par le taux de recombinaison élevé en structure amorphe.

L'amélioration de leurs performances et leur coût inférieur au silicium cristallin ont permis de développer le marché. Les meilleures cellules triples jonction atteignent 13% de rendement en laboratoire. Le rendement typique des cellules commerciales est de 8 %, ce qui les limite aux applications de très petites puissances.

Les cellules au tellure de cadmium (CdTe) sont très prometteuses. Ce matériau absorbe 90 % des photons incidents sur quelques micromètres. Les meilleurs rendements obtenus en laboratoire au National Renewable Energy Laboratory atteignent 16,5 %. La technologie est déjà bien développée au niveau industriel avec 0,5 % de la production mondiale et les modules commerciaux ont un rendement de 7 à 11 %. Le principal handicap vient du cadmium, un métal lourd polluant dont l'utilisation est mise en cause. [10]

Les cellules couches minces CIS et CIGS sont parmi les plus efficaces. L'intérêt des cellules CIGS est d'avoir un gap E_g ajustable. Le gap peut ainsi varier de 1,02 eV

(CuInSe₂ pur) à 1,68 eV (CuGaSe₂ pur). Plus de 99 % des photons incidents sont ainsi absorbés dans le premier micromètre du matériau. En laboratoire, les meilleurs rendements atteignent 19,2 %. [10]

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

c. Autres technologies non industrialisées :

- Ø **Cellules organique** : le principe est le transfert photo-induit d'un électron depuis un polymère semi-conducteur donneur d'électrons vers un polymère (ou une molécule, comme le fullerène C60) accepteur d'électrons. Encore purs objets de laboratoire à ce jour, elles pourraient révolutionner le photovoltaïque grâce à leur faible coût de fabrication et à leur facilité d'utilisation sur support flexible et translucide. De nombreux progrès restent à accomplir, mais les rendements atteignent déjà 5 %.

- Ø **Les cellules hybrides** : Les cellules hybrides organique-inorganique offrent une voie pour améliorer la mobilité des porteurs de charges, pénalisée dans les cellules organiques, en introduisant un matériau inorganique ou un semi-conducteur.

- Ø **Les cellules photo-électrochimiques** : Les cellules photo-électrochimiques, à colorants organiques, dites aussi de Grätzel, sont faites d'une couche d'oxyde de titane (TiO₂), semi-conducteur à large gap $E_g = 3,2$ eV plutôt adapté aux courtes longueurs d'ondes, immergée dans un électrolyte liquide contenant un couple redox. Un colorant organique recouvre la surface des nano-cristaux de TiO₂ qui assurent la conduction des électrons. Des électrons de ce colorant, excités par les photons incidents, sont injectés dans la bande de conduction du dioxyde de titane et sont collectés. Une réaction d'oxydoréduction régénère le colorant oxydé. Le rendement de ces photopiles dépasse 10 % en laboratoire. Leur caractère prometteur reste à confirmer. Par évolution, ces nouveaux types de cellules photo-électrochimiques ouvrent de nouvelles perspectives pour le stockage direct de l'énergie solaire, un peu à l'image de ce qui est réalisé avec la photosynthèse.

7. Connexion des cellules photovoltaïques :

a. Connexion en série : les modules photovoltaïques :

Le rendement typique des cellules au silicium monocristallin est aujourd'hui de 17 % avec une surface unitaire typique de $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Cette cellule délivre donc une puissance crête de 1,7 W, soit typiquement un courant de 2,6 A sous 0,6 V.

Les modules photovoltaïques sont réalisés par association d'un grand nombre de cellules élémentaires en série afin d'accroître la tension. Voir la figure II.14.

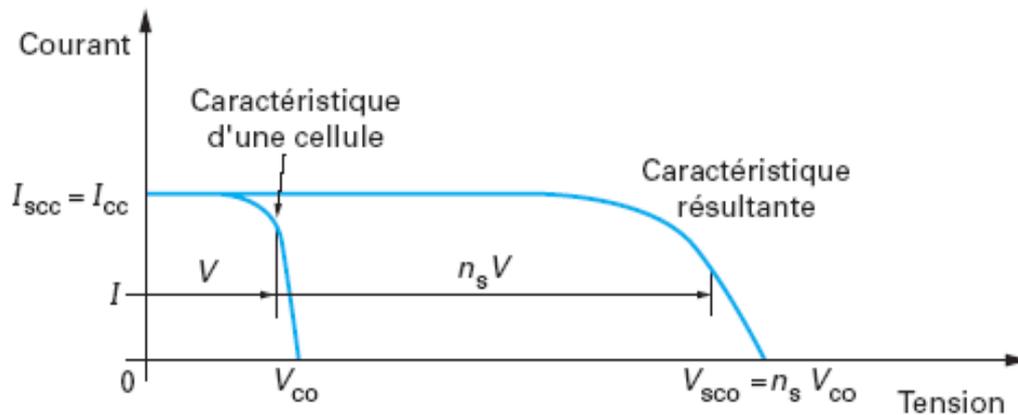


Figure II.14 : caractéristiques électriques d'une cellule et de n cellules (en série)

Dans les connexions de cellules en série, les cellules se voient traverser par le même courant et la caractéristique résultante est obtenue par addition des tensions.

Un déséquilibre survient dans le groupement en série si deux cellules présentent des caractéristiques différentes. Dans le cas d'ombrage d'une cellule par exemple, les deux cellules étant parcourues par le même courant, la cellule touchée peut fonctionner en récepteur par application d'une tension négative pour des courants proches du court-circuit ou lorsque le groupement alimente une charge de faible résistance. Lorsqu'on est en présence de plusieurs cellules connectées en série (un module) combinées à un éclairage non uniforme (ombrage d'une cellule) dans un fonctionnement en court-circuit, alors la cellule en question se verra fonctionner en récepteur et soumise à la tension

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

cumulée des autres cellules appliquée en inverse. Elle dissipera une puissance importante qui peut la détruire si la contrainte thermique est trop forte.

Dans le dispositif en série, la valeur du courant commun du groupement série sera limitée par celle du courant de court-circuit de la cellule touchée par l'ombrage.

Pour remédier à ce problème, il faut disposer une diode connectée en parallèle, appelée diode bypass, aux bornes d'un groupement élémentaire de 30 à 40 cellules au silicium au maximum (voir la figure II.15). L'amorçage spontané de cette diode, dès apparition d'une tension en inverse aux bornes du groupement, limite cette dernière à la valeur de la tension directe de conduction de la diode choisie. Le module. Des modules commercialisés incluent maintenant ces diodes parallèles de protection contre les tensions inverses. Sinon, on doit les prévoir dans le câblage. Au sein d'un module ainsi by-passé, constitué de 40 cellules en série par exemple, la contrainte de tension inverse subie par une cellule reste donc limitée à celle de 39 cellules au maximum, ce qui évite sa destruction. De plus, ces diodes bypass évitent la chute du courant dans le reste des modules sains connectés en série dans un même panneau photovoltaïque

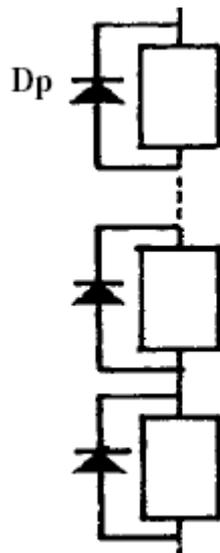


Figure II.15 : Mise en série des cellules ; protection par diode bypass.

b. Connexion en série-parallel : panneau photovoltaïque :

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules seront soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement sera obtenue par addition des courants à tension donnée.

Comme dans une connexion série, si deux cellules présentant des caractéristiques différentes sont connectées en parallèle, étant soumises à la même tension, la cellule la plus faible fonctionnera en récepteur en étant parcourue par un courant inverse pour certaines valeurs de la tension proches de la tension en circuit ouvert. Cette cellule peut donc dissiper une puissance importante et être détruite.

Pour éviter cet effet, il suffit et il est indispensable de disposer une diode connectée en série qui interdit tout courant inverse dans un groupement élémentaire de cellules connectées en série et constituant une branche d'un groupement parallèle. Voir la figure II.16.

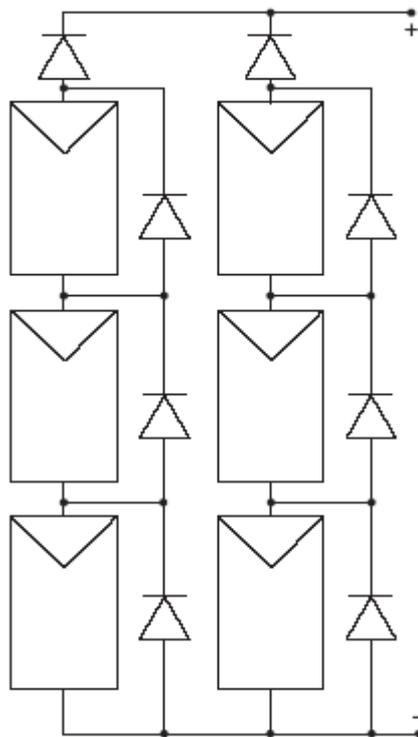


Figure II.16 : groupement série-parallel des cellules ; protection par diode bypass et diode anti-retour.

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

Cette diode anti-retour protège également le groupement série des courants inverses pouvant provenir du circuit électrique extérieur auquel il est connecté.

Un générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés en panneaux photovoltaïques. Sa caractéristique combine les caractéristiques disparates de modules soumis à des éclairagements et températures différents car non uniformes sur l'ensemble d'un générateur de plusieurs mètres carrés regroupant plusieurs panneaux, mais conserve l'allure fondamentale classique de celle d'une cellule élémentaire. Les influences de l'éclairément et de la température sur les courants et tensions caractéristiques restent les mêmes que pour une cellule élémentaire. Voir la figure II.17.

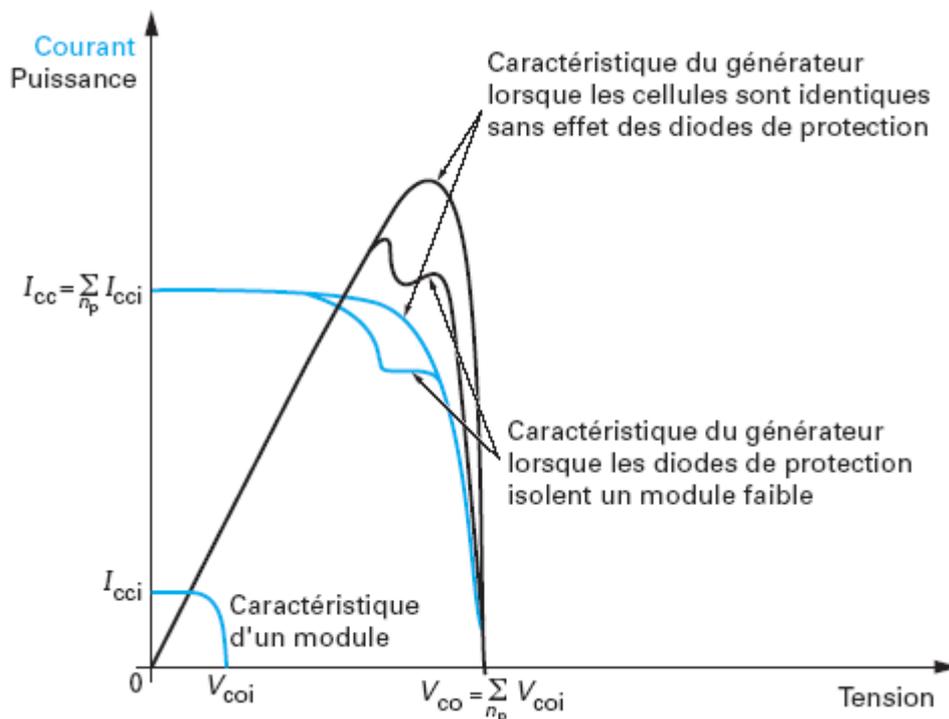


Figure II.17 : caractéristiques de groupement parallèle-série. Avec et sans déséquilibre.

8. L'onduleur pour photovoltaïque :

Comme tout onduleur ordinaire, celui du photovoltaïque est installé dans l'objectif de convertir le courant continu du champ photovoltaïque et des accumulateurs en courant alternatif utilisable.

Dans les installations autonomes familiales, la plupart des appareils fonctionnent directement sur le circuit continu de la batterie (12, 24 ou 48 V). L'usage d'un onduleur occasionne des pertes importantes, et devrait être réservé aux appareils non disponibles sur le marché en version courant continu. La gamme de puissance des onduleurs domestiques va de 100 à 2000 W. Ils fonctionnent avec une tension d'entrée fixe, et une puissance de sortie variable selon la charge. La forme du signal alternatif peut être carrée, trapézoïdale ou sinusoïdale. Pour une utilisation prolongée, la consommation à vide est un facteur déterminant.

La figure II.18 représente un onduleur à thyristors.

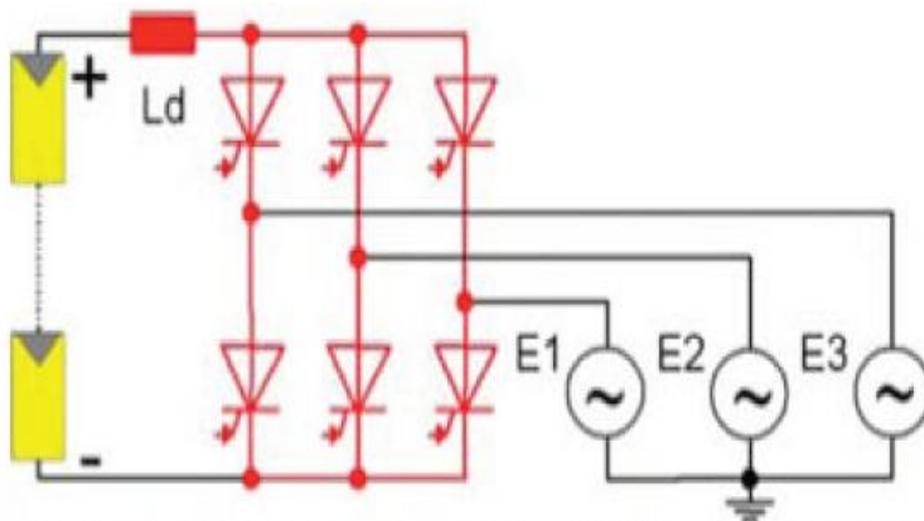


Figure II.18 : Exemple d'onduleur utilisant des thyristors.

III. Générateur éolien :

1. Origine de l'énergie :

L'énergie dite éolienne doit son nom au dieu Eole qui est, dans la mythologie grecque, le dieu du vent, fils de Poséidon, vivant sur l'île mythique Eolia.

Le vent est un phénomène complexe, mais une description simple et succincte peut être faite.

Lorsque le soleil réchauffe la terre, la température sur le sol varie d'un endroit à un autre. Avec les cieux couverts de nuages et les cieux dégagés, avec les sols recouverts d'eau ou désertiques, des écarts de température et donc de pression apparaissent d'un endroit à un autre. L'air des endroits plus chauds se réchauffe, devient moins dense et monte. Le mouvement de l'air qui monte crée une zone de basse pression dans laquelle vient s'engouffrer l'air des zones voisines dont la pression est plus élevée. C'est le vent.

On peut voir sur la figure II.19 un moulin à vent, moyen primitif d'exploitation de l'énergie éolienne.

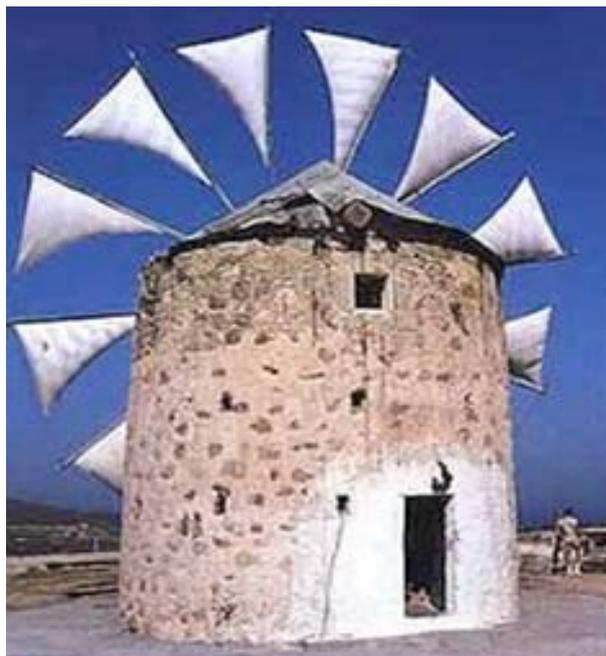


Figure II.19 : Moulin à vent.

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

Depuis des siècles, l'homme capte l'énergie contenue dans le vent. Les moulins à vent, qui datent du 12^e siècle, constituaient au 16^e siècle une importante source d'énergie en Europe. En Amérique du Nord, il y a environ un siècle que les agriculteurs ont adopté la technologie du moulin à vent pour pomper l'eau. De nos jours, on peut encore utiliser le rotor d'une éolienne pour faire fonctionner des pompes ou faire tourner une génératrice produisant de l'électricité.

2. Les différents types d'éoliennes :

a. Eolienne à axe verticale :

Dans ce genre de machine on a tendance à utiliser deux différents principes : la trainée différentielle ou la variation cyclique d'incidence.

Ø Trainée différentielle [11]:

L'anémomètre utilise le même principe de mouvement que le type de machine utilisant la trainée différentielle.

La trainée différentielle répond à un principe très simple en réalité. Les deux faces d'un même corps creux répondent différemment à une même force exercée par le vent. La différence de l'intensité de la force applicable pour obtenir un mouvement pour les deux faces engendre un couple moteur. Ce couple est utilisable pour entrainer un générateur électrique ou un autre dispositif mécanique tel qu'une pompe. Voir la figure II.20.

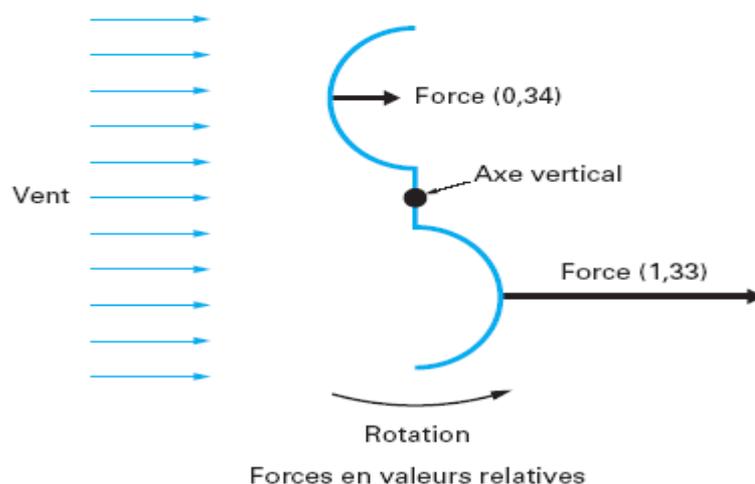


Figure II.20 : principe de la trainée différentielle.

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

L'illustration la plus courante de ce type d'éolienne est le rotor de Savonius, du nom de son inventeur, un ingénieur finlandais qui l'a breveté à la fin des années 1920. Il est constitué de deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Le rotor de Savonius est caractérisé par un grand couple de démarrage. Des machines de plusieurs kilowatts ont été réalisées pour assurer le pompage de l'eau dans certains pays; elles démarrent à des vitesses de vent faible, voisines de 2 à 3 m/s. Ces systèmes présentent cependant beaucoup plus d'inconvénients que d'avantages dans les réalisations actuelles car ils nécessitent un dispositif d'orientation. La récupération de l'énergie produite est en général beaucoup plus compliquée et se traduit souvent par une perte sensible du rendement global. Voir la figure II.21.

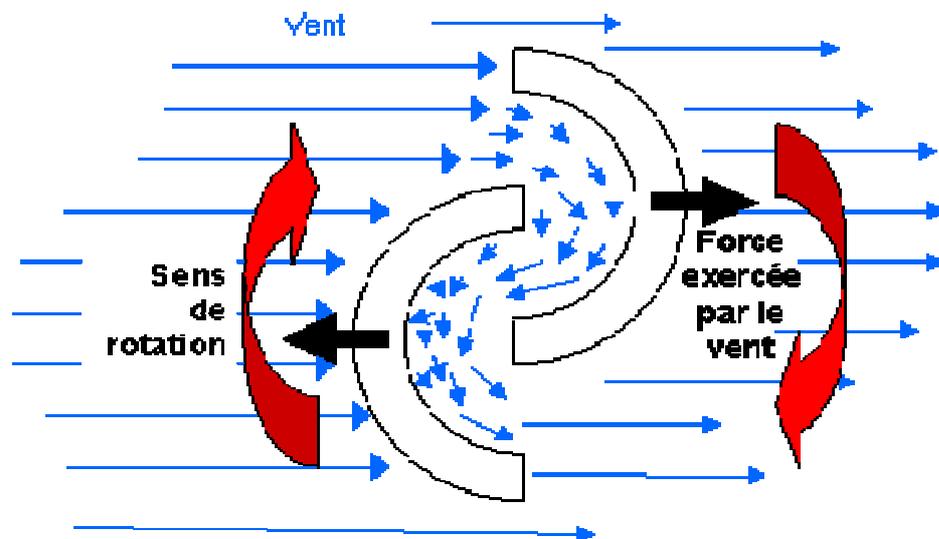


Figure II.21 : rotor de Savonius

Ø Variation cyclique d'incidence [11]:

Le fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La combinaison de ces forces génère alors un couple moteur. En fait, les différents angles auxquels sont soumis les profils, proviennent de la

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent.

Ce principe de fonctionnement a été breveté au début des années 1930 par le Français Darrieus. De tels rotors peuvent être de forme cylindrique, tronconique, parabolique.

Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour. Par ailleurs, une éolienne à axe vertical fonctionne quelle que soit la direction d'où souffle le vent, permettant donc de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine.

Par ailleurs, le principe même de fonctionnement basé sur des variations incessantes de charge aérodynamique sur les pales, fait que ces éoliennes sont très sujettes aux problèmes d'aéroélasticité. Enfin, pour des éoliennes de grande puissance, la surface occupée au sol par le haubanage est très conséquente. Voir la figure II.22.



Figure II.22 : Eolienne de DARRIEUS

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

b. Eolienne à axe horizontal :

Ces machines sont les descendantes directes des moulins à vent sur lesquels les ailes, faites de voiles tendues sur une structure habituellement en bois, ont été remplacées par des éléments ressemblant fortement à des ailes d'avion. Elles présentent généralement un nombre de pales compris entre 1 et 3 et peuvent développer des puissances élevées (plusieurs mégawatts). Deux types de configuration peuvent être rencontrés : les éoliennes amont, sur lesquelles les pales sont situées du côté de la tour exposé au vent, et les éoliens aval (voir la figure II.23). Chaque configuration possède avantages et inconvénients : la formule amont requiert des pales rigides pour éviter tout risque de collision avec la tour alors que la configuration aval autorise l'utilisation de rotors plus flexibles. Par ailleurs, dans le cas d'une machine « amont», l'écoulement de l'air sur les pales est peu perturbé par la présence de la tour. L'effet de masque est plus important dans le cas d'une machine aval. Enfin, une machine aval est théoriquement auto-orientable dans le lit du vent, alors qu'une éolienne amont doit généralement être orientée à l'aide d'un dispositif spécifique. On constate néanmoins que la majeure partie des éoliennes de grande puissance adoptent la configuration amont [11].

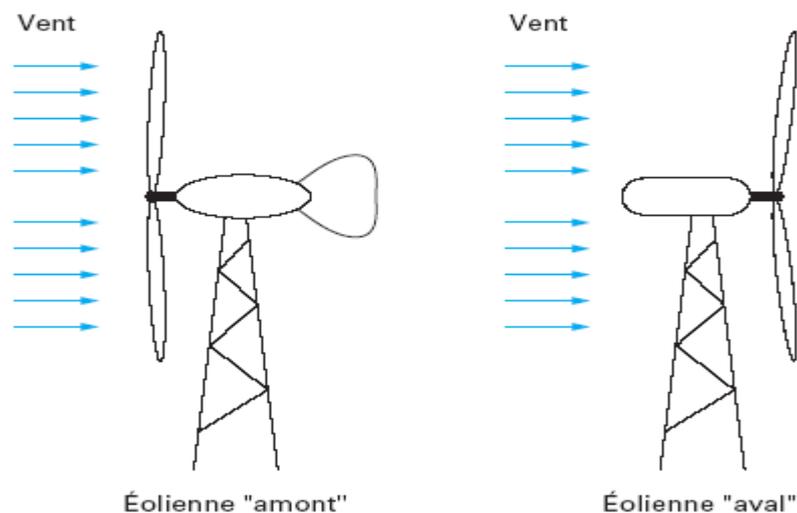


Figure II.23 : Eolienne à axe horizontal

3. Composants d'une éolienne à axe horizontal :

Une éolienne à axe horizontal est composée des éléments suivants (voir la figure II.24):

a. La tour :

Elle joue le rôle de support à l'ensemble de l'installation, en surélevant le rotor et la nacelle pour que les pales ne puissent pas toucher le sol.

Sa hauteur doit répondre à certaines conditions afin, notamment, de sortir autant que possible des perturbations causées par le sol.

b. La nacelle :

Elle joue le rôle d'abri à l'installation de génération de l'énergie électrique. Elle contient habituellement les composants suivants :

- Ø un multiplicateur de vitesse qui sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques ;
- Ø la génératrice qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Ø un contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante, gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor + nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre et une girouette, habituellement situés à l'arrière de la nacelle.
- Ø divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile ;
- Ø le dispositif d'orientation de la nacelle. Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée.

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

c. Le rotor :

Le rotor est formé de plusieurs pales qui ont une forme particulière et un profil aérodynamique spécial. Lorsque le vent fait tourner les pales, celles-ci font tourner le rotor qui fait tourner le mécanisme d'entraînement et le générateur. Les pales doivent être légères, solides et durables, pour résister à l'action des éléments. On les construit habituellement en matériaux composites à base de fibre de verre, en plastique renforcé ou en bois. L'éolienne doit aussi être conçue de manière à ce que, par grand vent, le rotor ne tourne pas trop vite.

C'est le diamètre des pales qui détermine la quantité d'électricité produite par le système. L'éolienne compte habituellement deux ou trois pales. Le rotor à trois pales réduit les contraintes mécaniques que subit le système, mais son coût est plus élevé.

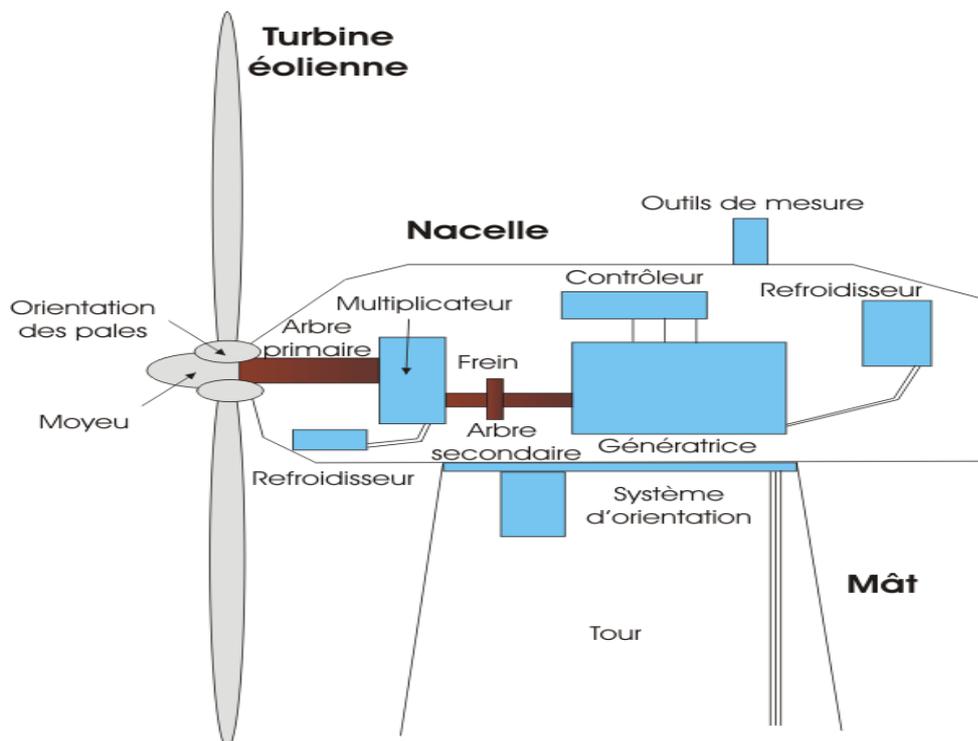


Figure II.24: composants d'une éolienne.

4. Rendement et puissance d'une éolienne :

Si on suppose que l'énergie d'une masse d'air, en mouvement, de densité ρ , est complètement récupérée par une éolienne de surface d'action S alors cette puissance sera [11]:

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (\text{II.14})$$

Dans la pratique la puissance extraite au vent par une éolienne est largement inférieure à P . Pour que l'énergie cinétique du vent soit totalement récupérée, la vitesse de l'air après son passage par les pales doit être nulle, ce qui est dans la réalité irréalisable.

Considérons la représentation suivante sur laquelle est illustré l'écoulement de d'une masse d'air de densité ρ avant et après une éolienne :

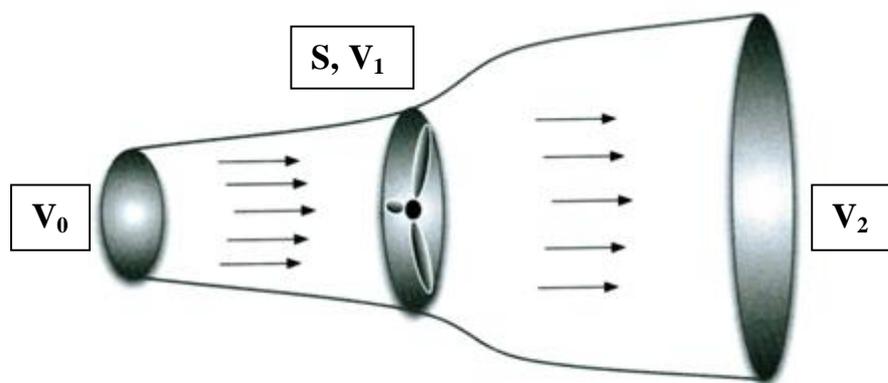


Figure II.25: écoulement d'une masse d'air à travers le rotor d'une éolienne.

La puissance récupérée par l'éolienne est définie comme suit [11]:

$$Pr = \rho S V_1^2 (V_0 - V_2) \quad (\text{II.5})$$

On définira le coefficient de puissance C_p qui caractérise l'aptitude de conversion d'une éolienne, donc son rendement, comme étant le rapport de la puissance récupérée par l'éolienne Pr sur la puissance du vent P : [11]

$$C_p = Pr/P \quad (\text{II.16})$$

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

Il est clair que cette aptitude de conversion admet une limite. C'est la limite de Betz [11]

$$C_{p_{\max}} = 0,59$$

IV. Le stockage de l'énergie électrique :

De nos jours, la quête des ressources et les techniques d'exploitation constitue une des approches pouvant répondre à notre dépendance aux énergies. Seulement, l'équation de la demande à la production présente une faiblesse décisive quant à son équilibre.

Dans le domaine de l'énergie électrique, une production exige sa consommation. Hormis une infime partie qu'on épargne par stockage, l'énergie produite est dans sa totalité perdue si elle n'est pas consommée.

On arrive à stocker l'énergie mécanique, l'énergie thermique, l'énergie chimique, mais on n'arrive toujours pas à stocker l'énergie électrique telle qu'elle est produite sans une conversion, au préalable, en une autre forme d'énergie causant ainsi des pertes considérables.

Le stockage permettra dans notre système hybride autonome la conservation de l'énergie produite, dans l'attente d'une utilisation ultérieure. Il fournira à l'installation de l'énergie électrique lorsque les générateurs n'en produisent pas assez ou lorsque des puissances plus importantes sont sollicitées en plus de celles fournies par les générateurs.

1. Quelques techniques de stockage de l'énergie électrique :

Il existe plusieurs moyens de stocker de l'électricité, qui passent quasiment tous par sa conversion en une autre forme d'énergie plus aisée à emmagasiner, telle l'énergie chimique par exemple. Seuls le stockage électromagnétique et le stockage électrostatique stockent l'électricité sous forme de charges électriques.

Sur le tableau II.26, nous pouvons trouver les différentes techniques de stockage de l'énergie électrique.

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

Énergie intermédiaire	Systèmes de stockage	Rendement	Densité de stockage (kWh/m ³)	Type de cycle ou délai de décharge
gravitaire	pompage hydraulique	0,73	2 (pour 1000 m de chute)	quotidien, hebdomadaire ou saisonnier
thermique	stockage de chaleur latente ou sensible avant production électrique	0,65 à 0,85	20 à 150	quotidien
de pression	compression d'air	≈ 0,7	2 à 5	quotidien ou hebdomadaire
chimique	batteries d'accumulateurs électrochimiques	0,7 à 0,9	5 à 150	décharge en quelques jours à quelques dizaines de minutes
	stockage H ₂ par électrolyse et pile à combustible	< 0,55	< 100	quotidien à saisonnier
cinétique	volant d'inertie	0,7 à 0,9	10 à 100	décharge en quelques dizaines de minutes
électro-magnétique	courant permanent en bobine supraconductrice	0,9 à 0,95	0,1 à 5 dans la bobine	décharge en quelques millisecondes à quelques secondes
électrostatique	condensateur classique	—	< 0,1	fractions de millisecondes
	hypercondensateur	—	0,1 à 1	fractions de millisecondes
	supercondensateur à électrolyte double couche	0,90 à 0,95	1 à 10	décharge en quelques secondes à quelques dizaines de secondes

Figure II.26: les différentes techniques de stockage.

a. Le stockage hydraulique gravitaire :

Une installation de stockage hydraulique gravitaire est une station de transfert d'énergie par pompage qui comprend nécessairement un bassin supérieur et un autre inférieur, entre lesquels est placée l'usine hydroélectrique réversible de turbinage / pompage. L'usine est reliée au bassin supérieur par des ouvrages d'adduction d'eau et vers le bassin inférieur par des canalisations. (Voir la figure II.27)

Le principe de fonctionnement de ces installations est simple : pendant les creux de consommation on remonte l'eau par pompage pour la turbiner aux heures de pointe.

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

On estime que pour restituer 1 kWh sur le réseau il faut consommer à la moyenne 1,25 kWh en turbinage et 1,65 kWh en pompage /turbinage. Le rendement de ce mode de stockage est entre 70 et 80 %.

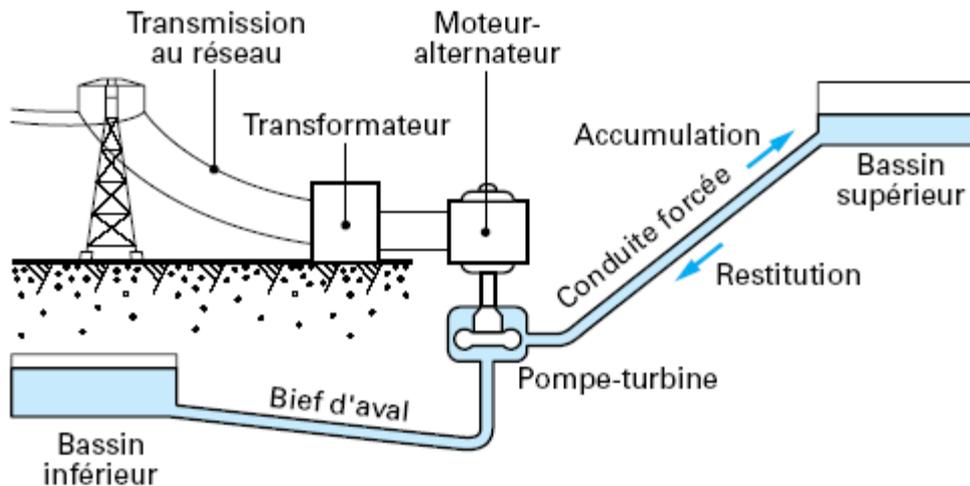


Figure II.27: principe du stockage hydraulique gravitaire.

b. Stockage par air comprimé :

Dans ce genre de procédé, de l'air est comprimé aux heures creuses par un turbocompresseur accouplé à la turbine à gaz, puis est stocké dans des cavités souterraines. Aux heures de pointe, l'air comprimé est co-alimenté en gaz dans la chambre de combustion d'une turbine à gaz. Voir la figure II.27.

On estime que pour restituer 1 kWh sur le réseau, il faut consommer 0,75 kWh d'électricité en pompage, et brûler 1,22 kWh de gaz.

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

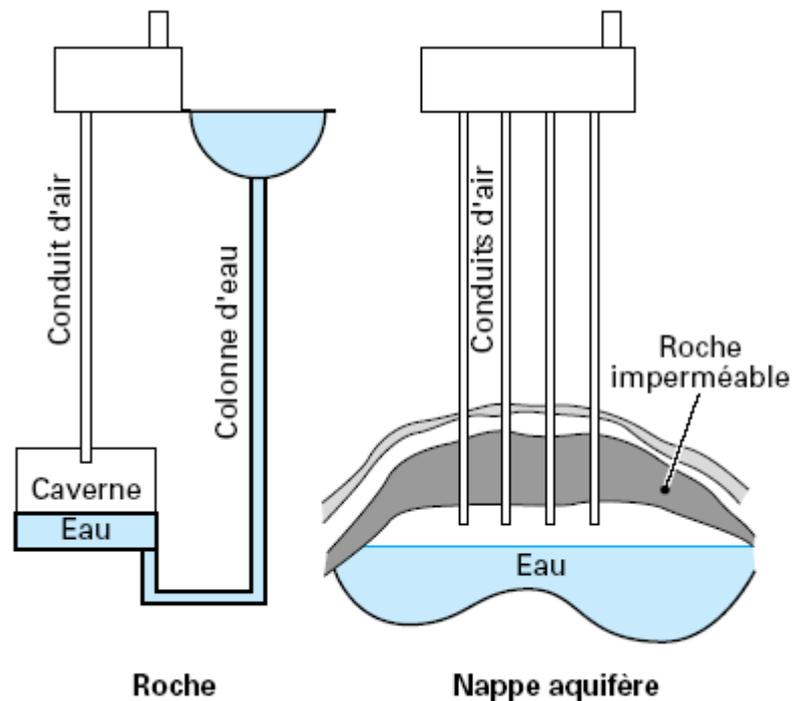


Figure II.28: le stockage par air comprimé.

c. Le stockage électromagnétique:

On utilise dans ce genre de procédé des bobines supraconductrices qui présente une résistance nulle au-dessous de la température critique du matériau. Si elle est refermée sur elle même, le courant qui la parcourt se maintient. L'énergie de la bobine n'est donc pas dissipée en chaleur par effet Joule et reste stockée sous forme de champ magnétique.

Il existe deux catégories de supraconducteurs : celui à basse température critique mettant en jeu des conducteurs fonctionnant à très basse température (4K), en présence d'un champ magnétique de l'ordre de 5 T. celui à haute température critique correspond à des matériaux utilisables sous des champs magnétiques très élevés (d'environ 10 T), à des températures de l'ordre de 20 à 30 K.

Les avantages que présente cette technologie résident dans sa durée de vie importante (20 à 30 ans) et son très bon rendement (95%).

CHAPITRE II : LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIEN

2. Les accumulateurs électrochimiques :

Les accumulateurs sont des systèmes électrochimiques capables de stocker de l'énergie électrique en la transformant en énergie chimique dans un processus réversible.

Ils sont constitués d'un couple électrochimique composé de deux électrodes séparées par un électrolyte et aux interfaces desquelles interviennent des réactions d'oxydation ou de réduction qui cèdent ou absorbent des électrons. Les ions ainsi générés circulent dans l'électrolyte. Pour avoir une grande énergie stockée, il faut un grand nombre d'électrons échangés par mole ainsi qu'une réaction entre un élément très oxydant et un autre très réducteur. Il faut en outre une parfaite réversibilité des processus électrochimiques et des matériaux à faible masse ou volume molaire.

Sur le tableau II.29 sont données les différentes filières d'accumulateurs.

Filière	Température de fonctionnement (°C)	Nombre de cycles profonds	Énergie volumique (Wh/dm ³)	Rendement charge/décharge (%)	Auto-décharge
Pb/acide/PbO ₂	ambiante - 20 à + 50	300/1500	60/120	70/75	2 à 5 %/mois
Alcaline Ni/Cd, Ni/H ₂ MH	ambiante - 30 à + 40	300/1500 10 000	100/160	60/75	25 %/mois
Alcalines Ni/Zn MnO ₂ /Zn	ambiante	100/300 30	110/140	70/75	30 %/mois
Na/alumine β'' /S, Na/alumine β'' /NiCl ₂	300 à 350 régulée	500/2000	85/130	80	24 à 48 h à chaud
Li/FeS ₂	450 régulée	300/1000	150/250	75	24 h à chaud
<i>Redox-flow</i>	ambiante	1500/2000	35	> 80	
Zn/Br	ambiante	500	60/70	65/70	
LiC/MO _x (4V) (2)	ambiante 0 à + 50	200/1000	150/250	85	10 %/mois
Li/polymère/ MO _x (3V) (2)	+ 60 à + 90 régulée	300/600	150/220	90	2 semaines à chaud quelques % par an à froid

Figure II.29: les différentes filières d'accumulateurs

CHAPITRE III : MODELISATION DES ELEMENTS TRANSDUCTEURS DU SYSTEME

I. Introduction :

Nous avons simulé un système transducteurs d'énergie hybride photovoltaïque – éolien, totalement autonome, alimentant une charge sur un site déterminé par ses coordonnées géographiques. Pour ce, il est indispensable de s'intéresser dans un premier temps aux principes théoriques et aux contraintes régissant les sources d'énergie et le système de conversion hybride.

II. Définitions :

1. Angles solaires :

a. La latitude (φ):

La latitude d'un point donné du globe est l'angle formé par la verticale de ce point avec le plan équatorial. Elle est exprimée en degré, de 0 à 90°, positivement vers le nord et négativement vers le sud. Voir figure (III.2).

b. La longitude (λ):

La longitude d'un point est l'angle formé par le méridien de ce point avec le méridien de Greenwich. Elle est exprimée en degré, de 0 à 180°, positivement vers l'ouest et négativement vers l'est. Voir figure (III.2).

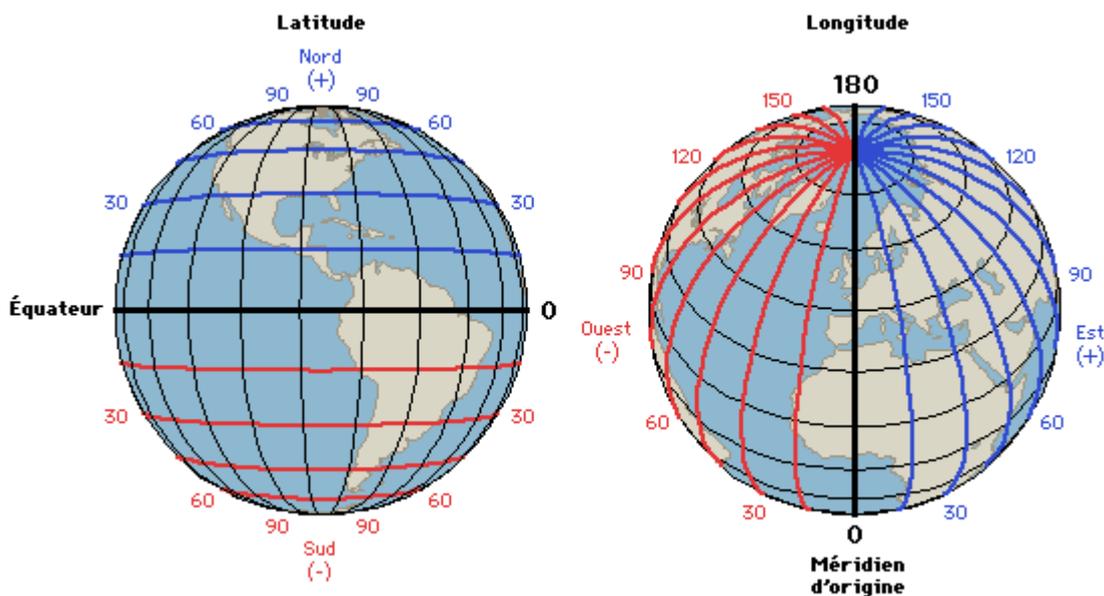


Figure III.1 : La latitude et la longitude.

CHAPITRE III : MODELISATION DES ELEMENTS TRANSDUCTEURS DU SYSTEME

c. La déclinaison (δ) :

C'est l'angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial. Elle est définie comme suit [1]:

$$\delta = 23,45 \sin [0,98 (n+284)] \quad (\text{III.1})$$

Avec n : le numéro du jour de l'année.

d. L'heure solaire (HS):

Le jour est le temps mis par la Terre pour effectuer un tour sur elle-même. Un jour a été divisé en 24h. L'heure solaire HS est définie en fixant HS = 12h lorsque la hauteur du Soleil est maximale, au zénith.

e. L'angle horaire (ω):

L'angle horaire est l'angle formé par le méridien passant par l'observateur et le méridien passant par la verticale du soleil. Il est calculé comme suit [1]:

$$\omega = 15 (HS - 12) \quad (\text{III.2})$$

f. La hauteur angulaire (H) :

La hauteur angulaire est déterminée par l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur un plan horizontal. Elle peut être calculée comme suit [1]:

$$\text{Sin (H)} = \text{sin}(\varphi) \text{sin}(\delta) + \text{cos}(\varphi) \text{cos}(\delta) \text{cos}(\omega) \quad (\text{III.3})$$

g. L'azimut (a) :

C'est l'angle que fait la direction de la projection du Soleil sur le plan horizontal avec la direction Sud, cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest. Il est calculé comme suit [1]:

$$\text{Tan (a)} = \text{sin}(\omega) / [\text{sin}(\varphi) \text{cos}(\omega) - \text{cos}(\varphi) \text{sin}(\delta)] \quad (\text{III.4})$$

CHAPITRE III : MODELISATION DES ELEMENTS TRANSDUCTEURS DU SYSTEME

2. Angles du capteur photovoltaïque :

a. L'orientation (α) :

L'orientation des capteurs photovoltaïques est comptée de 0 à 180° du sud au nord, et de +90 à - 90° de l'ouest à l'est.

b. L'inclinaison (β) :

L'inclinaison du capteur photovoltaïque par rapport au sol est comptée de 0 à 90°.

c. L'angle d'incidence des rayons solaires (θ):

L'angle d'incidence est celui que fait un rayon du soleil avec la normale du plan du capteur. Il est calculé comme suit [1]:

$$\text{Cos}(\theta) = \text{cos}(H) \sin(\beta) \cos(a - \alpha) + \sin(H) \cos(\beta) \quad (\text{III.5})$$

III. Estimation des rayonnements incidents :

1. Sur un plan horizontal :

Nous nous sommes intéressés au modèle de CAPDEROU qui demeure le modèle le plus utilisé en Algérie [13]. CAPDEROU, dans son modèle, présente le rayonnement global sur un plan horizontal comme étant la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

Suivant ce modèle les rayonnements direct et diffus sont calculés comme suit [13]:

Ø Le rayonnement direct est calculé comme suit :

$$\text{Dir} = G_0 \times \sin(H) \times \exp \left[\frac{-TL}{0,9 + \frac{9,4}{(0,89)^z} \times \sin(H)} \right] \quad (\text{III.6})$$

CHAPITRE III : MODELISATION DES ELEMENTS TRANSDUCTEURS DU SYSTEME

∅ Le rayonnement diffus est calculé comme suit :

$$\text{Dif} = G_0 \times \exp \left[-1 + 1,06 \times \log(\sin(H)) + c - \sqrt{d^2 + c^2} \right]$$

(III.7)

Avec :

- Z : l'altitude (Km)
- G_0 : le rayonnement solaire hors atmosphère.
- TL : est le facteur de trouble de LINK qui prend en compte différents paramètres comme la vapeur atmosphérique d'eau et les suspensions de particules.
- $C = 1,1$
- $D = \log(TL) - 2,80 + 1,02 \times [1 - \sin(H)]^2$

2. Sur un plan quelconque :

Le modèle de Perrin de BRICHAMBAUT présente, dans le cas de rayonnement incident sur un plan quelconque, l'avantage de la simplicité.

Selon ce modèle, sur un plan de capteur d'orientation α et d'inclinaison β , le rayonnement global incident est la somme des rayonnements direct et diffus.

Ces deux rayonnements sont donnés par les formules suivantes [14]:

∅ Le rayonnement direct :

$$\text{Dir} = A \cos \theta \times \exp \left[- \frac{1}{B \sin(H+2)} \right] \quad (\text{III.8})$$

∅ Le rayonnement diffus :

$$\text{Dif} = A'(\sin H)^{0,4} \left[\frac{1 + \cos \beta}{2} \right] + A''(\sin H)^{B''} \left[\frac{1 - \cos \beta}{2} \right] \rho \quad (\text{III.9})$$

A, A', A'', B, B'' sont des constantes qui dépendent de l'état de l'atmosphère et du facteur de trouble de LINK

CHAPITRE III : MODELISATION DES ELEMENTS TRANSDUCTEURS DU SYSTEME

ρ est l'albédo ou coefficient de réflectivité du sol. Le tableau suivant donne des coefficients d'albédo usuels :

Milieu urbain	0.14 – 0.20
Herbe	0.15 – 0.25
Herbe fraîche	0.26
Neige fraîche	0.82
Neige mouillée	0.55 – 0.75
Asphalte sec	0.09 – 0.15
Asphalte mouillé	0.18
Béton	0.25 – 0.35
Tuiles rouges	0.33
Aluminium	0.85
Cuivre	0.74
Acier galvanisé neuf	0.35
Galvanisé très sale	0.08

Tableau III.1 : coefficients d'albédo usuels.

IV. Modélisation des composants du système :

1. Synoptique d'un système hybride photovoltaïque – éolien:

Comme nous pouvons le voir sur la figure (III.1), le système hybride contiendra un générateur photovoltaïque, un aérogénérateur, des batteries de stockage, un onduleur et un redresseur.

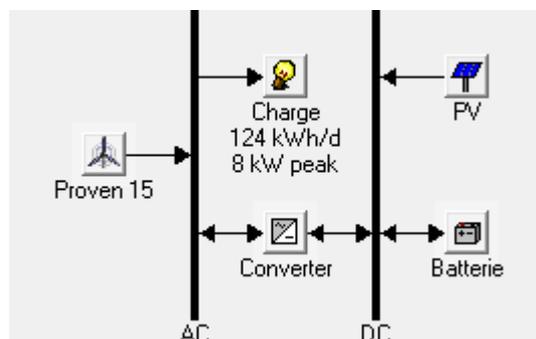


Figure III.2 : synoptique du système

CHAPITRE III : MODELISATION DES ELEMENTS TRANSDUCTEURS DU SYSTEME

2. Modélisation du générateur photovoltaïque :

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque est représenté sur la figure suivante (III.3) :

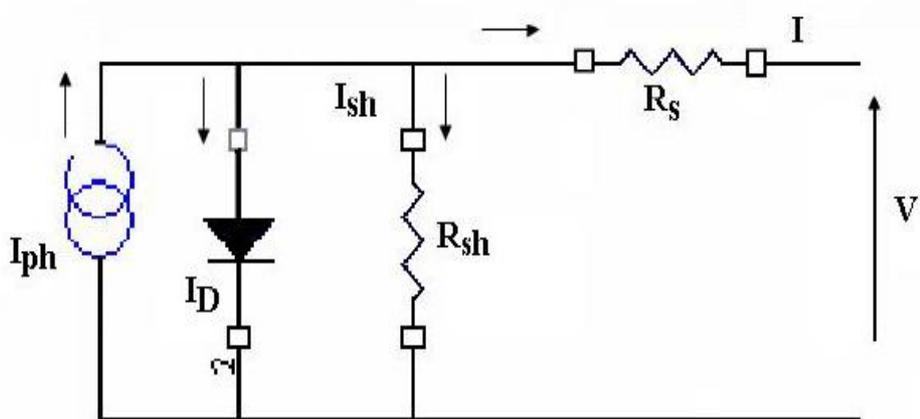


Figure III.3 : schéma équivalent d'une cellule PV

Ce schéma peut être utilisé aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules [15] :

Le courant délivré par un module photovoltaïque est donné par l'expression suivante [15] :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \frac{V+IR_s}{V_T} \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{III.10})$$

Avec :

- I_{ph} : le photo-courant
- I_0 : le courant de saturation
- V_T : la tension thermique

$$V_T = \frac{N_s n K T}{e} \quad (\text{III.11})$$

CHAPITRE III : MODELISATION DES ELEMENTS TRANSDUCTEURS DU SYSTEME

- N_s : nombre de cellules associées en série.
- n : le facteur de diode qui traduit les pertes d'énergie par la recombinaison. Il est pris habituellement égal à 1 en négligeant la recombinaison.
- K : la constante de Boltzmann.
- e : la charge de l'électron
- T : la température de la cellule.

$$T = \left[\frac{T_{Fn} - 20}{800} \right] I_g - T_a \quad (\text{III.12})$$

- T_{Fn} : la température de fonctionnement de la cellule. Elle est donnée par le constructeur.
- I_g : l'irradiation solaire globale reçue par le module PV.
- T_a : la température ambiante.

Le courant de court-circuit, courant maximal, pour lequel la tension aux bornes d'un module PV est nulle, est donné par l'expression suivante [15] :

$$I_{cc} = \left(\frac{R_{sh}}{R_{sh} + R_s} \right) I_{ph} \quad (\text{III.13})$$

La tension de circuit ouvert, tension maximale, pour laquelle le courant débité est nul, est donnée comme suit :

$$V_{CO} = V_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0 + 1} \right) \quad (\text{III.14})$$

2. Modélisation du générateur éolien :

Considérons les vitesses V_0 , V_1 , V_2 de l'écoulement d'une masse d'air de densité ρ :

V_0 étant la vitesse de la masse d'air avant de traverser l'éolienne

V_1 est la vitesse de la masse d'air traversant les pales de l'éolienne

CHAPITRE III : MODELISATION DES ELEMENTS TRANSDUCTEURS DU SYSTEME

V_2 est la vitesse de la masse d'air après avoir traverser les pales de l'éolienne

Soit S la surface balayée par les pales de l'éolienne.

L'énergie de cette masse d'air en mouvement s'écrit comme suit [11]:

$$E = \frac{1}{2} \rho S V_0^3 \quad (\text{III.15})$$

La force exercée par les pales de l'éolienne sur la masse d'air est donnée par l'expression suivante [11]:

$$F = \rho S V_1 (V_0 - V_2) \quad (\text{III.16})$$

La puissance récupérée par une éolienne est définie comme suit [11]:

$$Pr = \rho S V_1^2 (V_0 - V_2) \quad (\text{III.17})$$

Pour une éolienne, un coefficient de puissance ou de performance C_p caractérisant son aptitude de conversion est défini comme étant le rapport de la puissance récupérée par l'éolienne Pr sur la puissance du vent P_v [11]:

$$C_p = Pr/P_v \quad (\text{III.18})$$

Avec : $C_{pmax} = 0,59$ coefficient de Betz qui borne tous les coefficients de puissances de toutes les types d'éolienne existants.

La puissance extraite, par l'éolienne, du vent, n'est évidemment pas la puissance qui sera délivrée à la charge.

En fait la puissance Pr sera réduite par les différents rendements des différents éléments de l'éolienne. On peut citer :

CHAPITRE III : MODELISATION DES ELEMENTS TRANSDUCTEURS DU SYSTEME

η_a : rendement de l'arbre de transmission du rotor à la génératrice.

η_g : rendement de la génératrice

η_c : rendement du convertisseur et de ces auxiliaires

η_x : consommation des auxiliaires de l'éolienne.

En définitive, nous pouvons schématiser l'écoulement de l'énergie provenant du vent et aboutissant à la charge en passant par le transducteur :

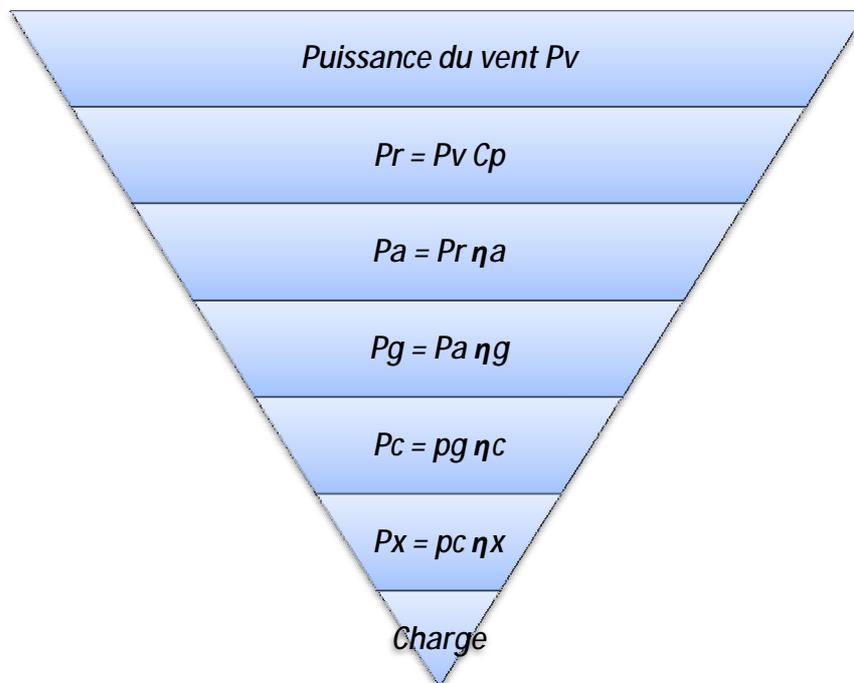


Figure III.4 : Processus d'écoulement de l'énergie éolienne de la source à sa consommation par la charge.

3. Modélisation des accumulateurs :

Sur la figure (III.5) est représenté le modèle électrique d'une batterie [16].

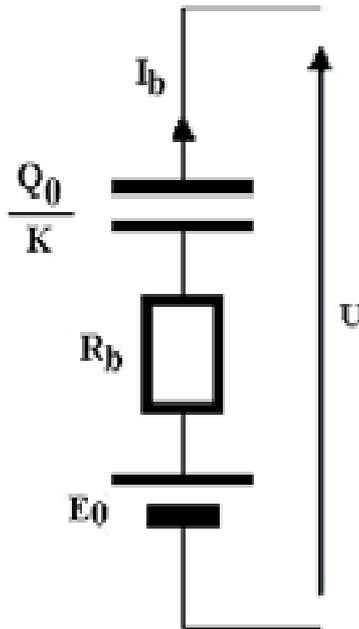


Figure III.5 : Modèle électrique d'une batterie

La tension aux bornes de cette batterie peut s'exprimer comme suit [16]:

$$U = E_0 + K D - R_b I_b \quad (\text{III.19})$$

Avec :

- E_0 : la tension à vide de la batterie chargée.
- K : constante spécifique de la batterie.
- R_b : la résistance interne de la batterie.
- I_b : le courant de la décharge
- D : facteur de décharge. Exprime l'état de décharge de la batterie.

$$D = - \frac{\int I_b dt}{Q_0}$$

- Q_0 : la capacité de la batterie (en Ah)

CHAPITRE III : MODELISATION DES ELEMENTS TRANSDUCTEURS DU SYSTEME

L'appairage ou la mise en série de plusieurs éléments accumulateurs nous donne, pour le besoin de la charge, l'addition des tensions des batteries associées.

Pour n batteries identiques mises en série, la tension totale s'exprime comme suit :

$$U_T = n [E_0 + K D - R_b I_b] \quad (\text{III.19})$$

Le courant débité par l'ensemble est donné par l'expression suivante :

$$I_b = \frac{U_T - n [E_0 + K D]}{n R_b} \quad (\text{III.19})$$

V. Conclusion :

Nous avons donné, dans ce chapitre, les modèles théoriques régissant le fonctionnement des générateurs d'énergie photovoltaïque et éolien ainsi que celui de l'accumulateur.

Le logiciel de simulation HOMER que nous utilisons comporte et emploie dans ses processus de calcul les mêmes modèles combinés à d'autres dans le but d'aboutir à la solution la plus optimale en prenant en compte même le coût de l'installation.

CHAPITRE IV : SIMULATION DU SYSTEME HYBRIDE SOUS LE LOGICIEL HOMER

I. Introduction :

HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable) est un logiciel de simulation et d'optimisation de systèmes, simples et hybrides, de production des énergies renouvelables.

C'est un logiciel qui considère dans son processus de simulation, entre autres, le potentiel des ressources énergétiques, les coordonnées du site, la charge, la durée de vie des composants, leurs coûts et la durée de vie du projet.

Les résultats d'une simulation sont donnés selon leurs COE (cost of energy), leurs NPC (net present cost) et leurs ICC (initial capital cost) donnés par ordre décroissant, définissant ainsi le système le plus optimal quant au coût du KWh produit, au capital initial investi et au capital actuel investi.

Cela va sans dire que les combinaisons qui ne peuvent satisfaire la charge imposée sont automatiquement exclues et ne font pas parties des configurations donnés.

Nous allons essayer de sonder l'environnement HOMER en simulant un système de production d'énergie, hybride, photovoltaïque – éolien alimentant une charge journalière définie sur un site localisé (latitude : 38°, 42 Nord ; longitude : 10°, 25 Est).

II. Synoptique du système et admission des données sous HOMER :

La charge électrique qu'on se propose d'alimenter est de type variable pouvant aller d'un minimum de 3,4 KWh à un maximum de 8 KWh avec une moyenne journalière de 5,2KW. Elle est supposée, donc, variable dans la journée mais traduit la même distribution pour tous les jours de l'année.

La distribution journalière horaire de la charge électrique, préalablement introduite dans HOMER, est donnée sur les figures IV.1 et IV.2 :

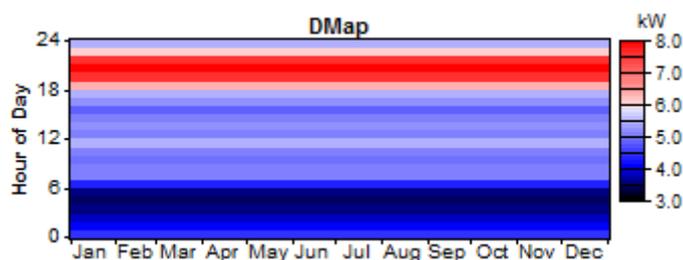


Figure IV.1 : représentation du comportement journalier de la charge.

CHAPITRE IV : SIMULATION DU SYSTEME HYBRIDE SOUS LE LOGICIEL HOMER

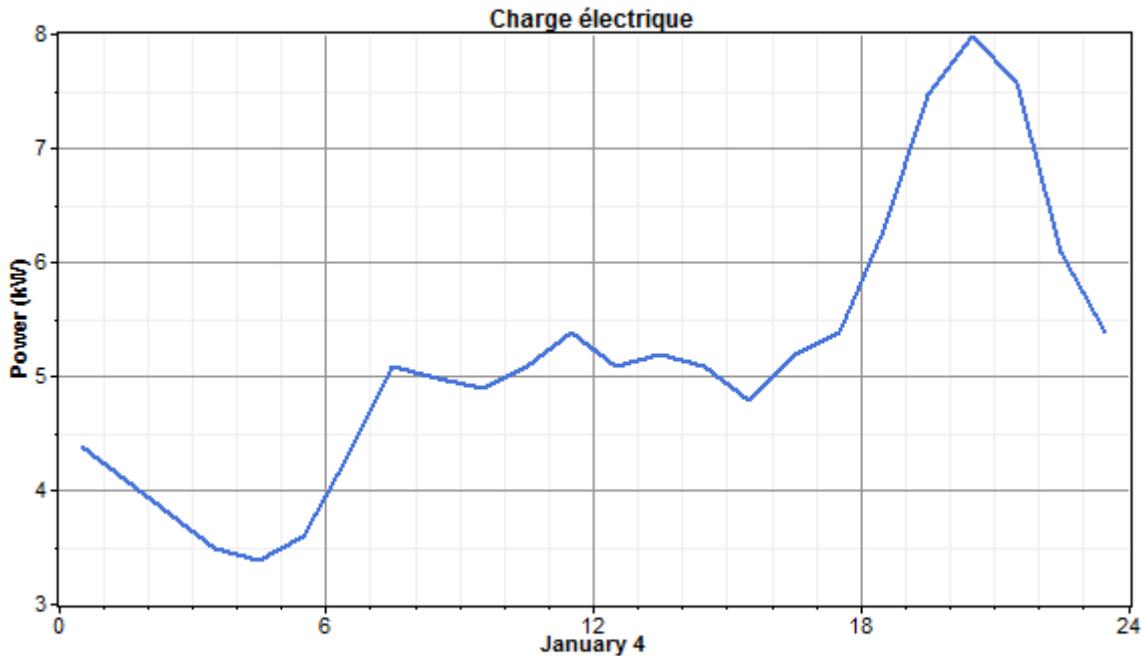


Figure IV.2 : graphe de la distribution journalière de la charge.

Avec la charge qu'on soumet au logiciel, d'autres données sont également introduites. Les coordonnées du site (latitude : 38°, 42 Nord ; longitude : 10°, 25 Est) ainsi que la contrainte du maximum manque annuel admissible (0%) et le pourcentage de l'énergie produite par le renouvelable (100%)

Le choix des types de générateurs éolien et photovoltaïque est soumis aux exigences de la charge. HOMER nous propose une large gamme de composants répartis en fonction de leurs puissances et de leurs caractéristiques.

Pour notre cas, la charge est caractérisée par son maximum horaire 8KWh sa moyenne journalière 5,2KW que nous supposons constants pour tous les jours de l'année. Le système étant autonome, en considérant tous les scénarios possible, il doit pouvoir alimenter la charge considérée sans interruption.

Avec une puissance maximale de sortie de 10 KW, préalablement imposée, la caractéristique coût – puissance du générateur photovoltaïque adopté pour l'installation est donnée par HOMER. Voir la figure (IV.3)

CHAPITRE IV : SIMULATION DU SYSTEME HYBRIDE SOUS LE LOGICIEL HOMER

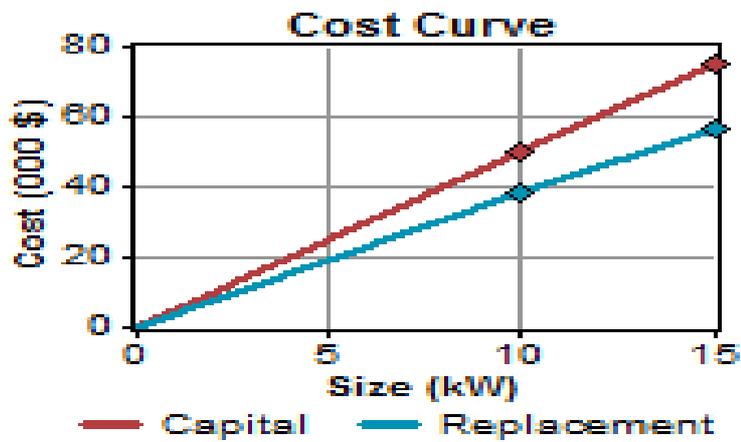


Figure IV.3 : Coût du KW photovoltaïque installé

Pour des raisons économiques et sécuritaires nous avons choisi une éolienne de type Proven 15. Avec une caractéristique donnant une puissance qui se stabilise pour des vitesses élevées, elle présente moins de risque de détérioration, donc, une durée de vie plus avancée et un coût de revient du KWh réduit.

Sa caractéristique puissance – vitesse du vent et le coût de revient de son installation sont donnés dans les figures (IV.4) et (IV.5).

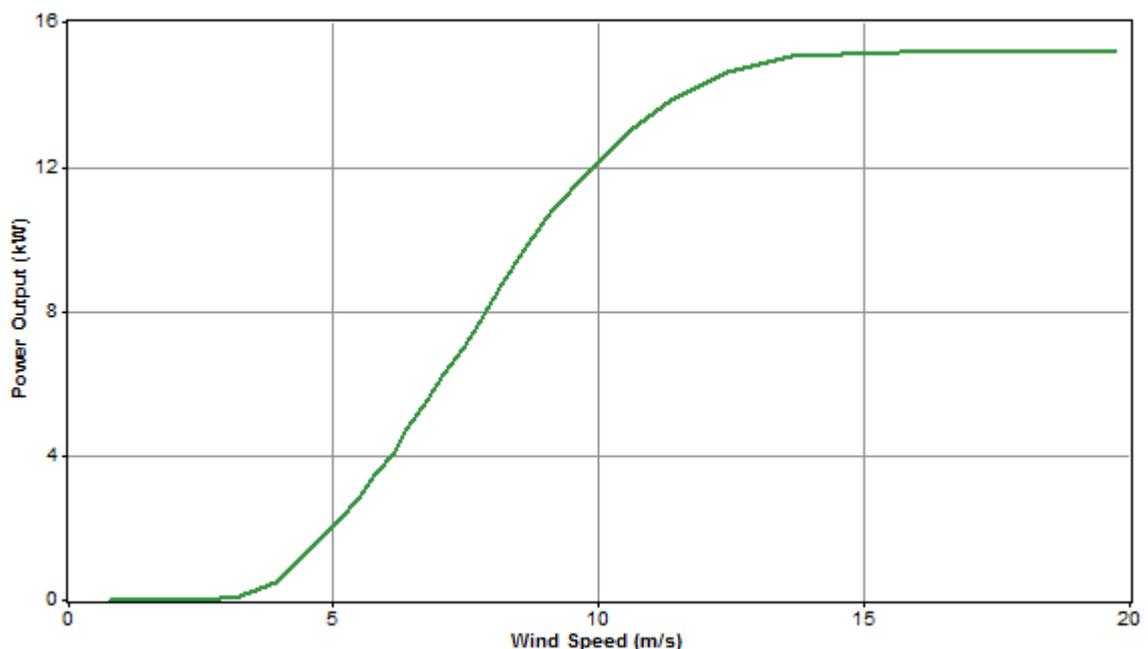


Figure IV.4 : Caractéristique de l'éolienne.

CHAPITRE IV : SIMULATION DU SYSTEME HYBRIDE SOUS LE LOGICIEL HOMER

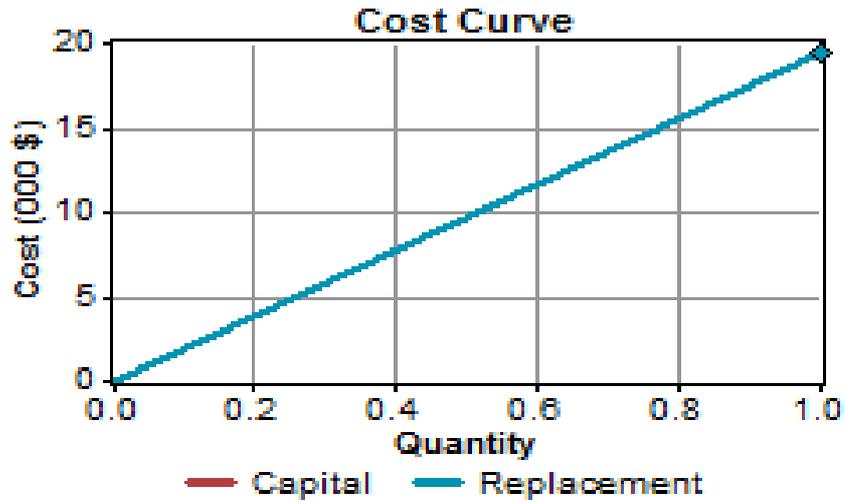


Figure IV.5 : Coût de l'installation éolienne.

Les données météorologiques : moyennes mensuelles de l'insolation et de la vitesse du vent du site considéré sont données graphiquement par HOMER après les avoir introduit numériquement. Voir les figures (IV.5) et (IV.6)

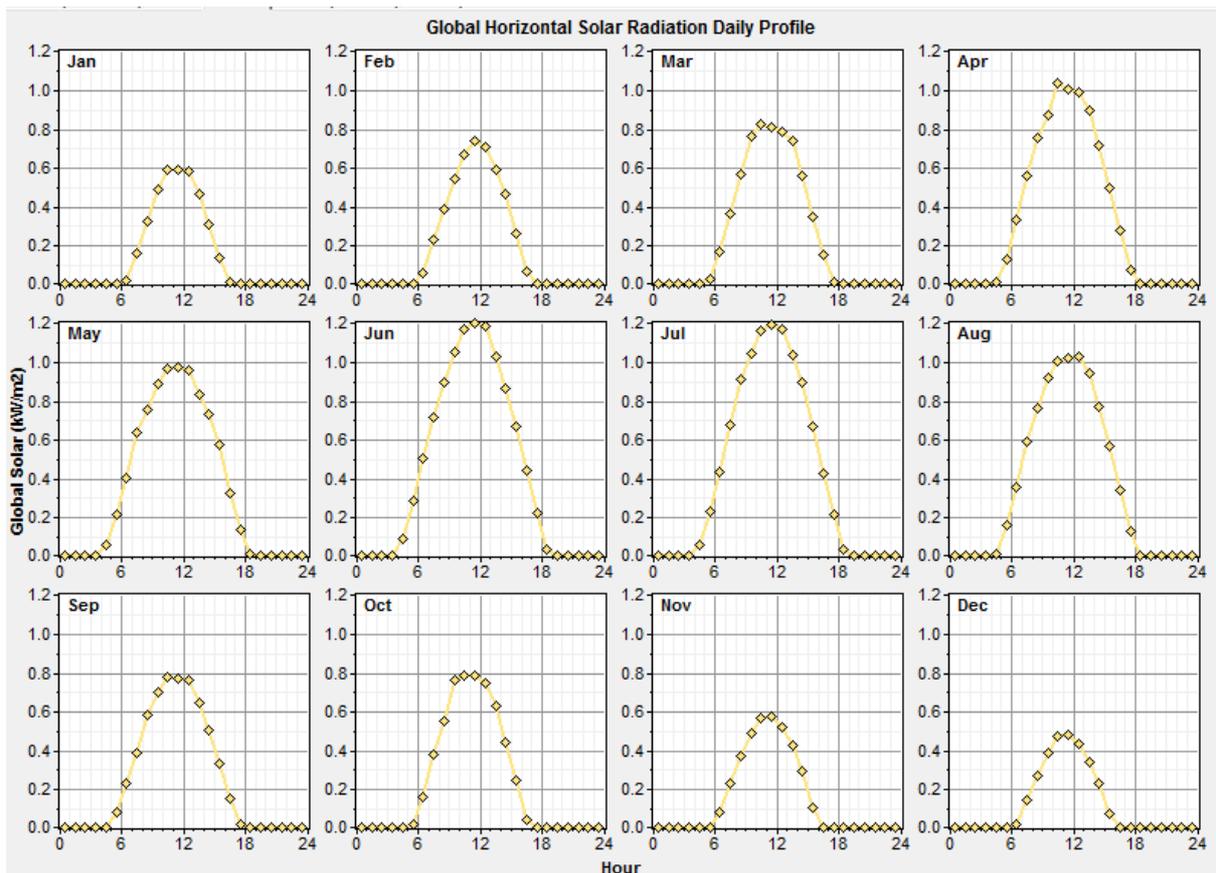


Figure IV.6 : Moyennes mensuelles de l'insolation sur le sol du site.

CHAPITRE IV : SIMULATION DU SYSTEME HYBRIDE SOUS LE LOGICIEL HOMER

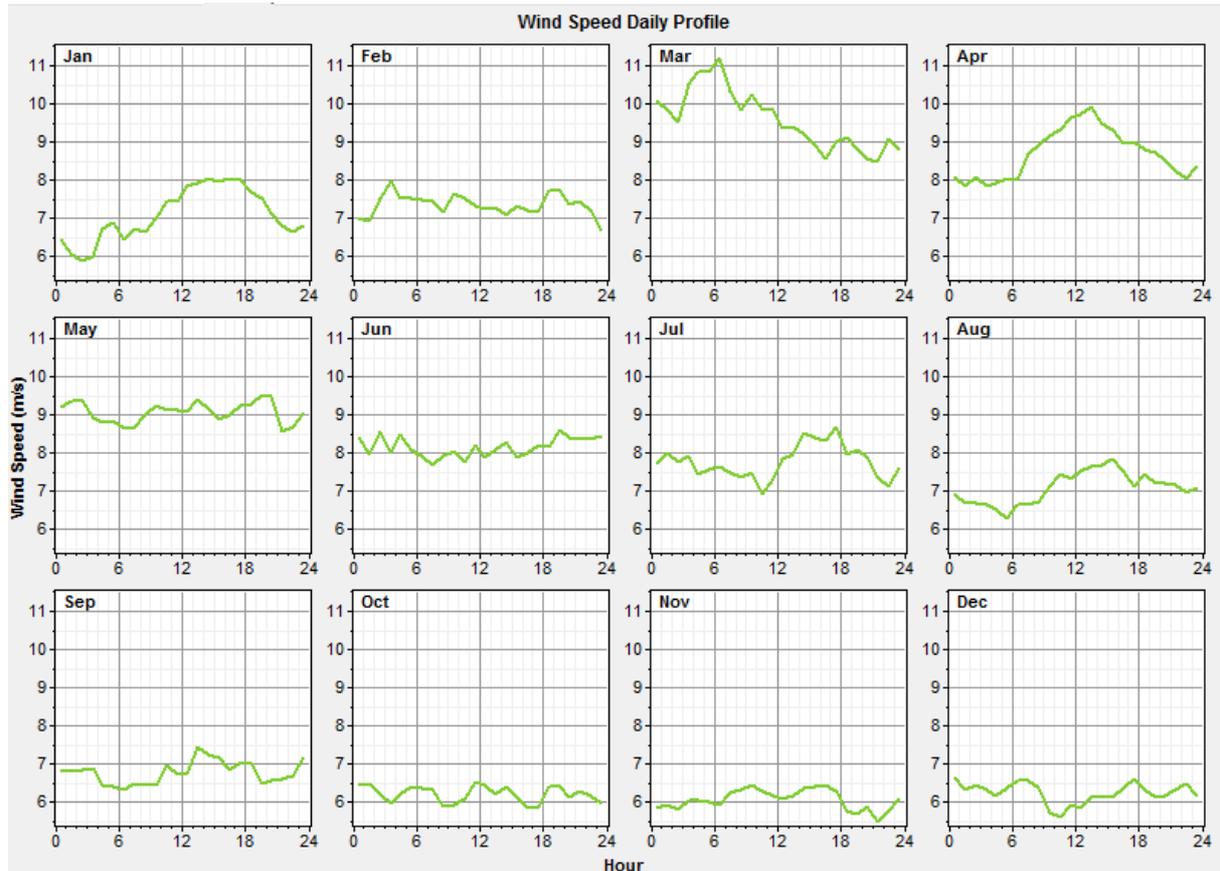


Figure IV.7 : Moyennes mensuelles de la vitesse du vent du site.

Le choix du nombre de batteries de stockage est un paramètre déterminant dans les différentes solutions que nous propose HOMER à notre installation.

On peut prendre le parc de stockage comme un réservoir de secours pouvant alimenter, dans l'absence totale de production, toute la charge. Il peut aussi être considéré comme un simple apport de puissance lors des creux de production en comblant le déficit de production.

La première variante implique une dimension colossale du parc de stockage contrairement à la seconde variante qui ne nécessite qu'un nombre réduit de batteries.

Nous allons simuler deux cas de la deuxième variante :

CHAPITRE IV : SIMULATION DU SYSTEME HYBRIDE SOUS LE LOGICIEL HOMER

1. Premier cas :

Nous prendrons 10 batteries de 48 V, 1,923Ah chacune. Qui nous donne un total de 1KWh environ.

Ø Résultat de la simulation :

La configuration proposée par HOMER est de type photovoltaïque, éolienne et batteries avec un coût du KWh produit évalué à 0,152\$.

Les moyennes mensuelles de la production de l'énergie photovoltaïque est donnée dans la représentation suivante:

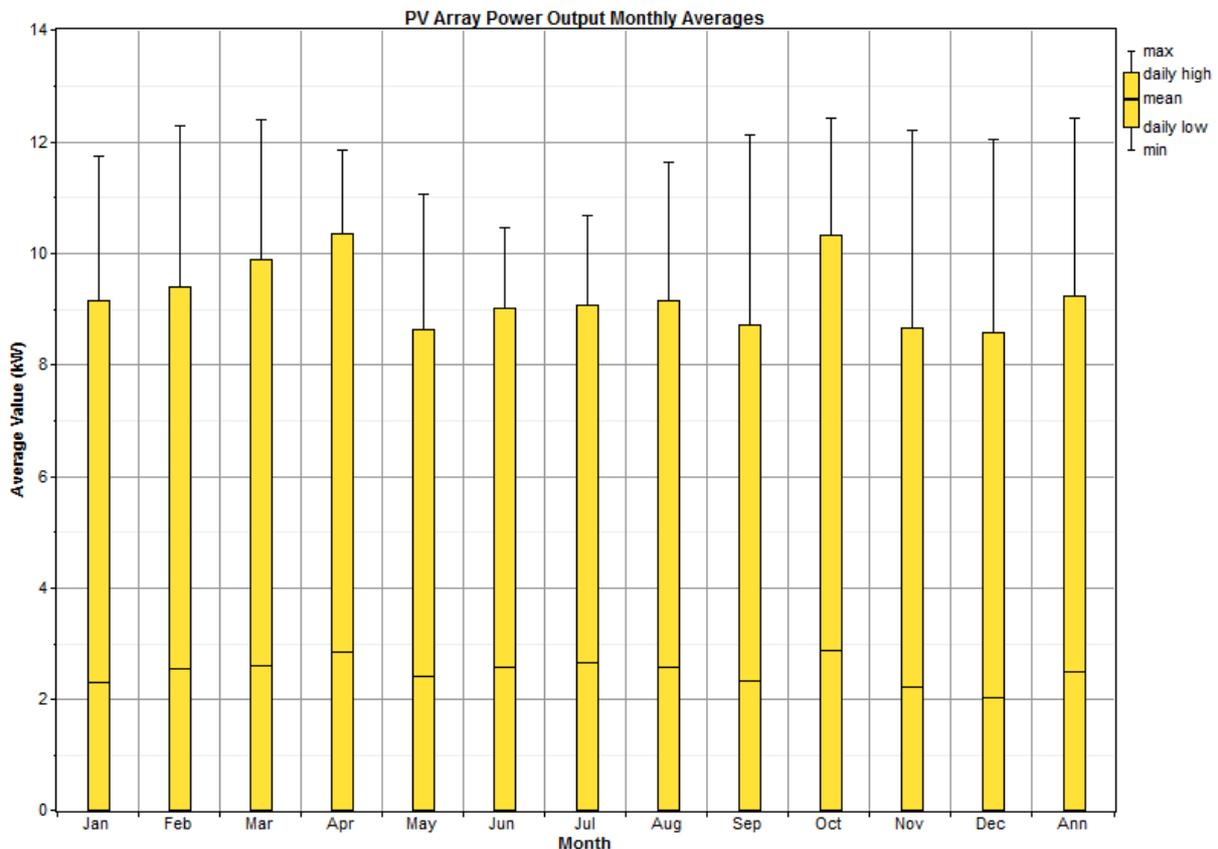


Figure IV.8 : Moyennes mensuelles de la production de l'énergie photovoltaïque.

CHAPITRE IV : SIMULATION DU SYSTEME HYBRIDE SOUS LE LOGICIEL HOMER

Les moyennes mensuelles de la production de l'énergie éolienne est représentée comme suit:

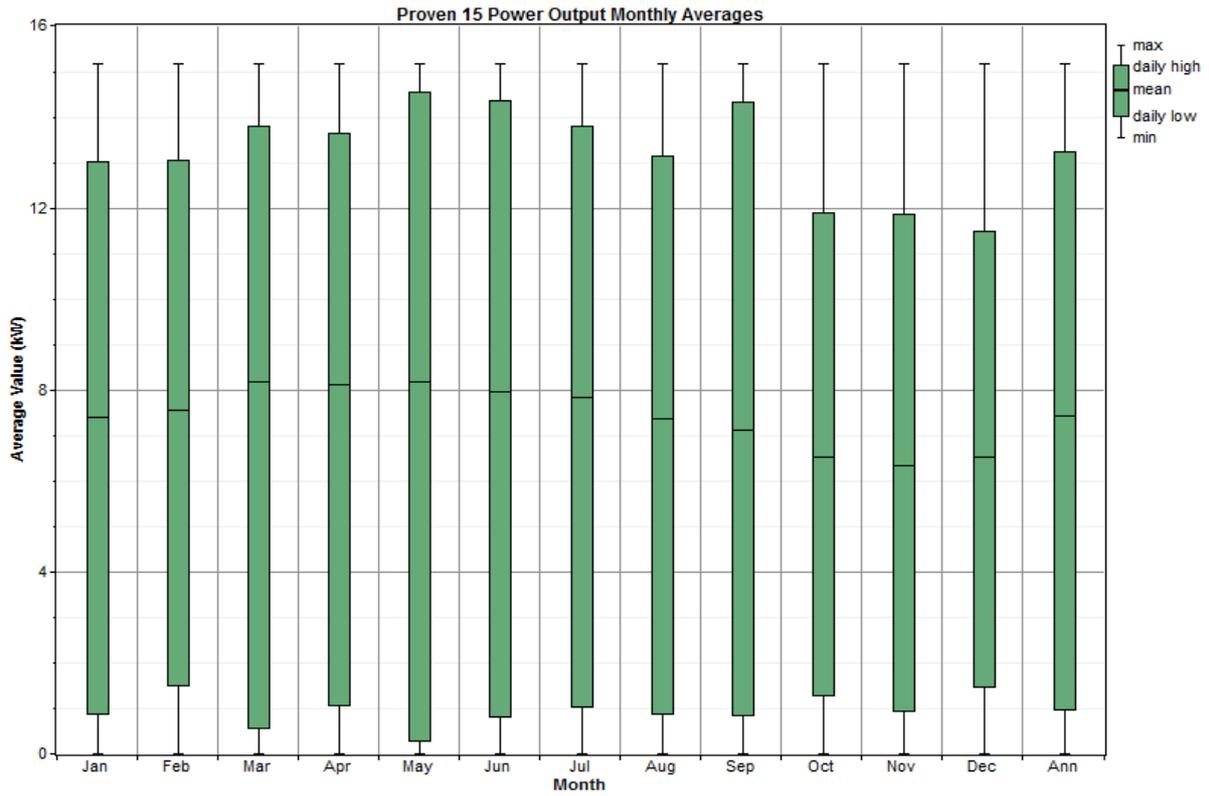


Figure IV.9 : Moyennes mensuelles de la production de l'énergie éolienne.

Les moyennes mensuelles de la production totale est :

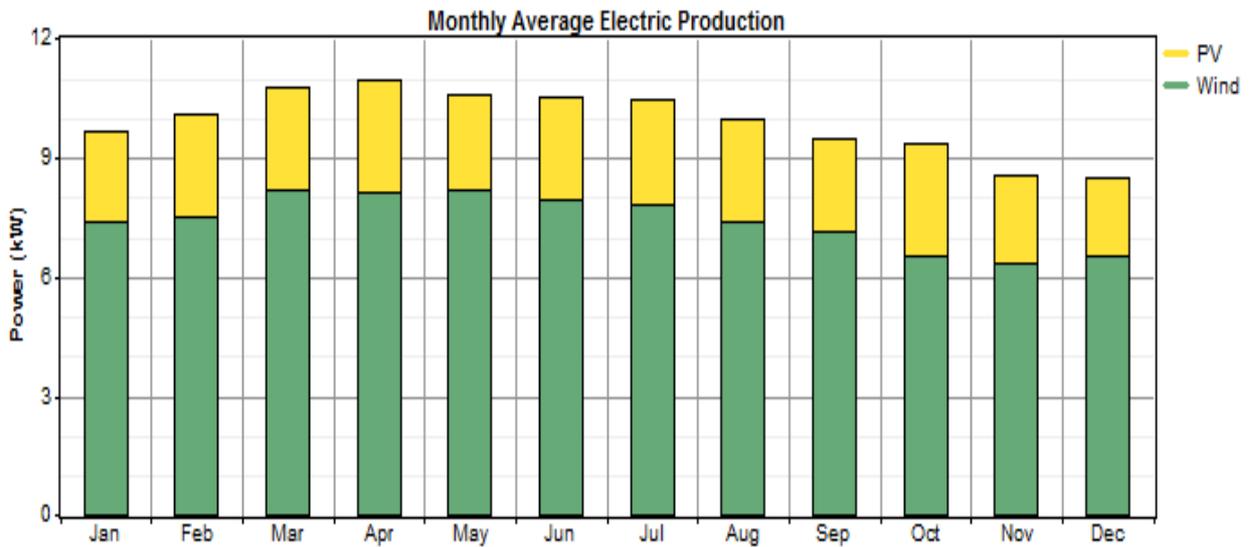


Figure IV.10 : Moyennes mensuelles de la production.

CHAPITRE IV : SIMULATION DU SYSTEME HYBRIDE SOUS LE LOGICIEL HOMER

L'état de charge des batteries :

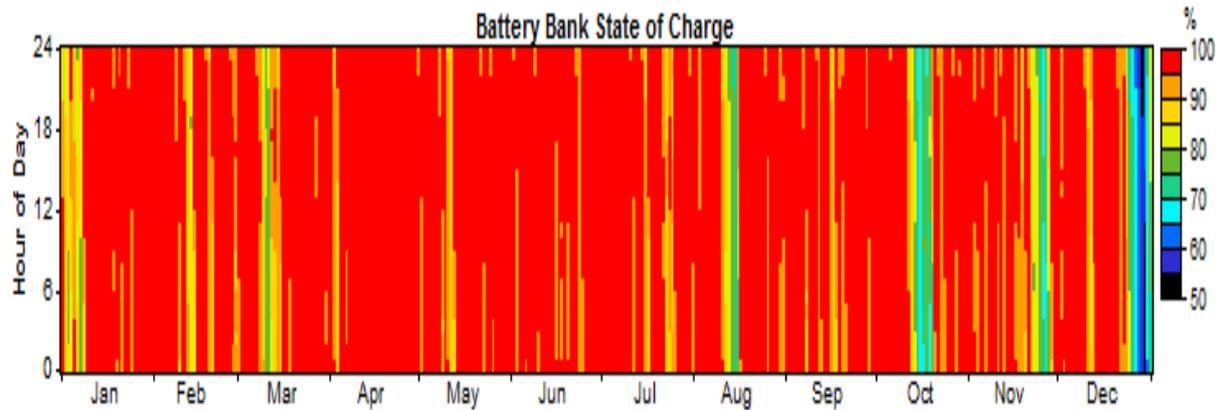


Figure IV.11 : la sollicitation de la réserve des batteries.

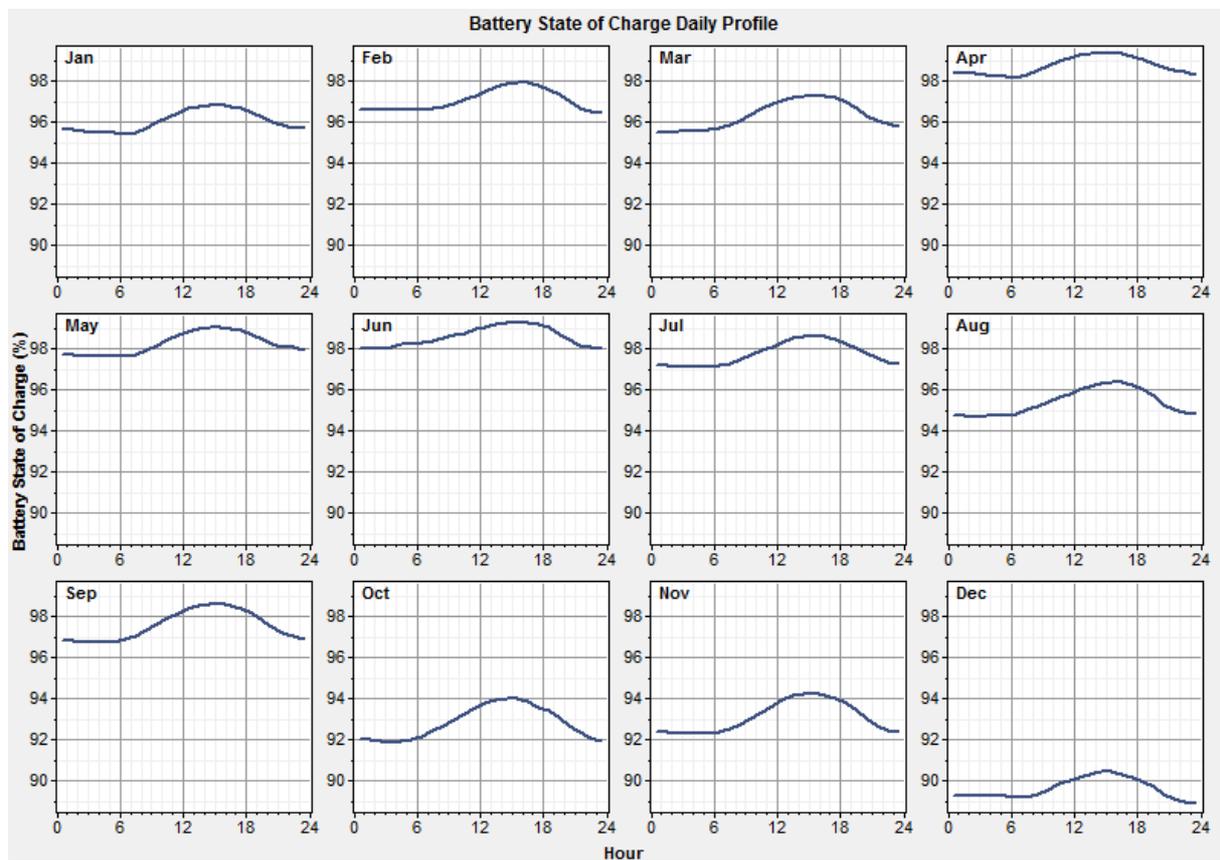


Figure IV.12 : les moyennes mensuelles de l'état de la charge des batteries

CHAPITRE IV : SIMULATION DU SYSTEME HYBRIDE SOUS LE LOGICIEL HOMER

Les moyennes mensuelles de l'excès d'énergie produite par le système est donnée sur la figure suivante :

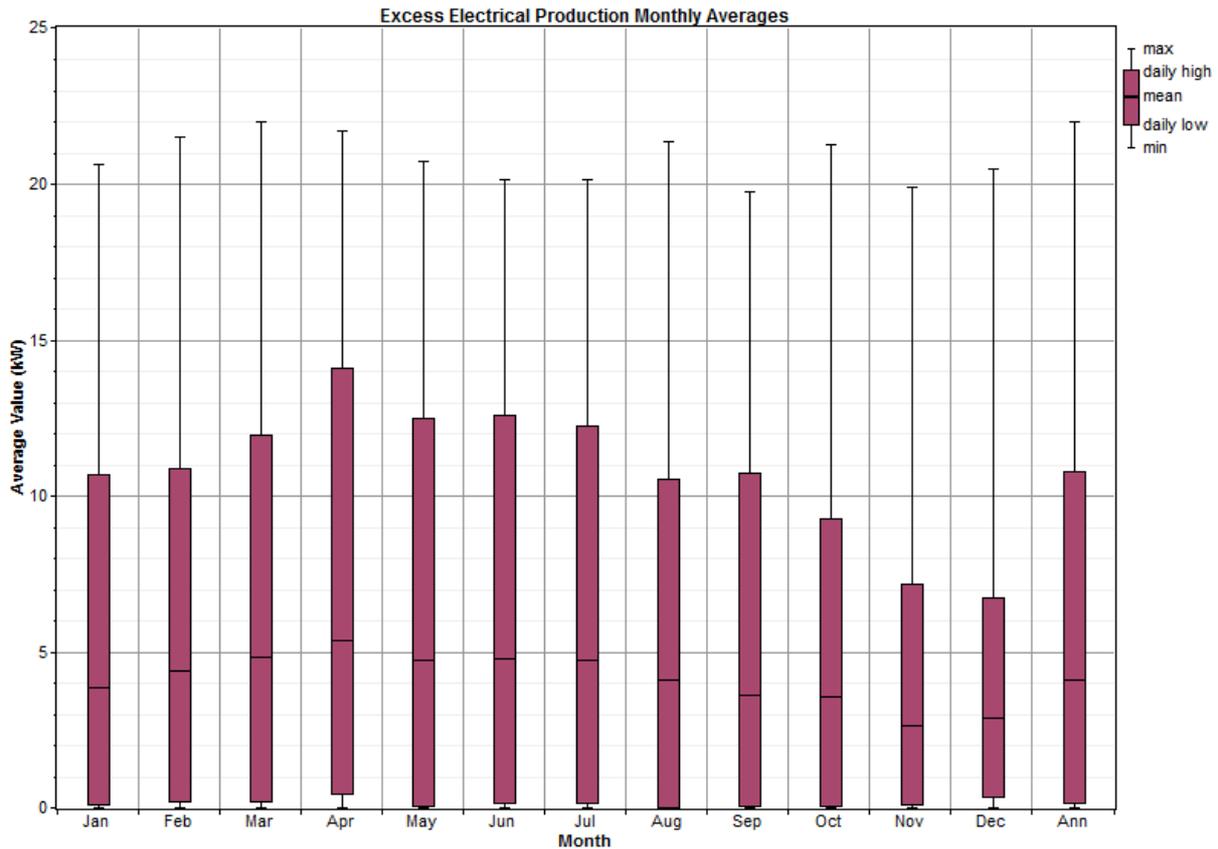


Figure IV.13 : l'excès mensuel d'énergie

Ø Interprétation des résultats :

Les résultats de la simulation nous apprennent que la configuration hybride photovoltaïque – éolienne – batterie proposée par HOMER est satisfaisante pour l'alimentation complète et sans interruption de la charge. Le constat le plus remarquable reste le surplus d'énergie que peut produire ce système. Seulement, en considérant la sollicitation mensuelle des batteries, il est à retenir que durant le mois de décembre (faiblesse du potentiel solaire et éolien) presque la totalité de leur stocke d'énergie est consommée. Ce qui peut supposer qu'un élargissement du parc accumulateur permettra de récupérer et d'emmagasiner plus d'énergie et, par conséquent, limiter les risques de détérioration des batteries.

CHAPITRE IV : SIMULATION DU SYSTEME HYBRIDE SOUS LE LOGICIEL HOMER

2. Deuxième cas :

Nous prendrons 20 batteries de 48 V, 1,923Ah chacune. Qui nous donne un total de 2KWh environ.

Ø Résultat de la simulation :

Deux configurations proposées par HOMER :

a. Photovoltaïque, éolienne et batteries avec un coût du KWh produit évalué à 0,152\$.

Concernant la production photovoltaïque, éolienne, totale, l'excès d'énergie et le coût du KWh, la configuration photovoltaïque – éolienne – batterie donne les mêmes résultats pour 10 et 20 batteries.

Concernant la sollicitation des batteries la différence se manifeste principalement durant les mois de faible potentiel solaire et/ou éolien. Voir les figures suivantes.

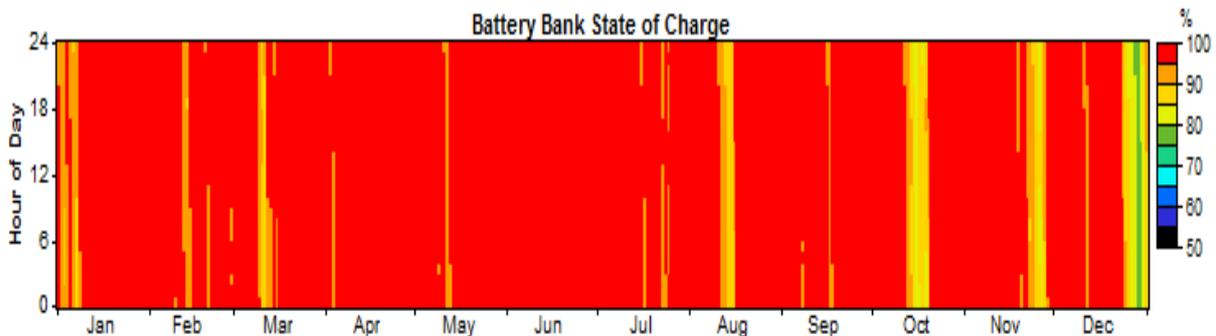


Figure IV.14 : Sollicitation de la réserve de 20 batteries.

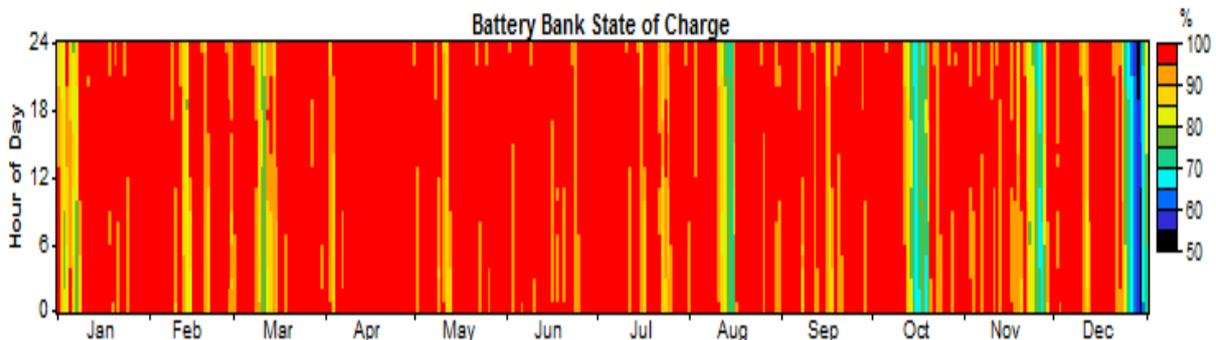


Figure IV.15 : Sollicitation de la réserve de 10 batteries.

CHAPITRE IV : SIMULATION DU SYSTEME HYBRIDE SOUS LE LOGICIEL HOMER

b. Eolienne et batteries avec un coût du KWh produit évalué à 0,066\$.

La production éolienne et totale du système est représentée ci-dessous :

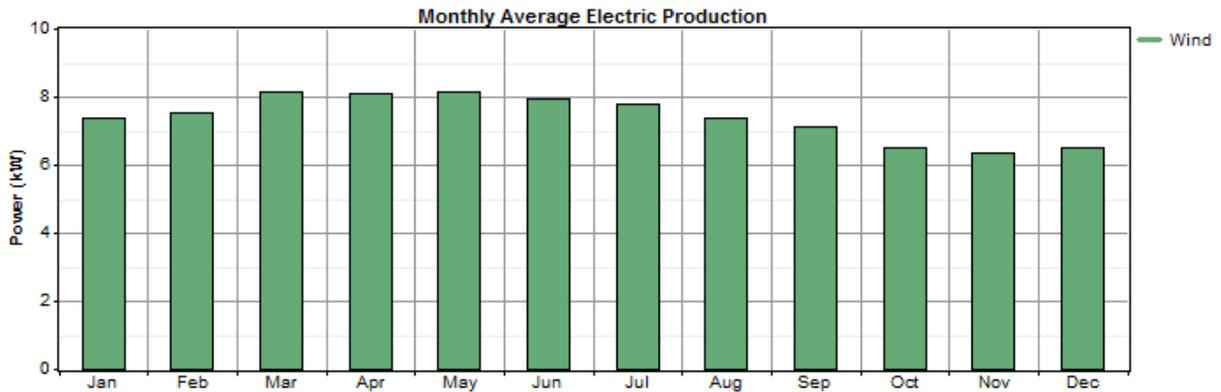
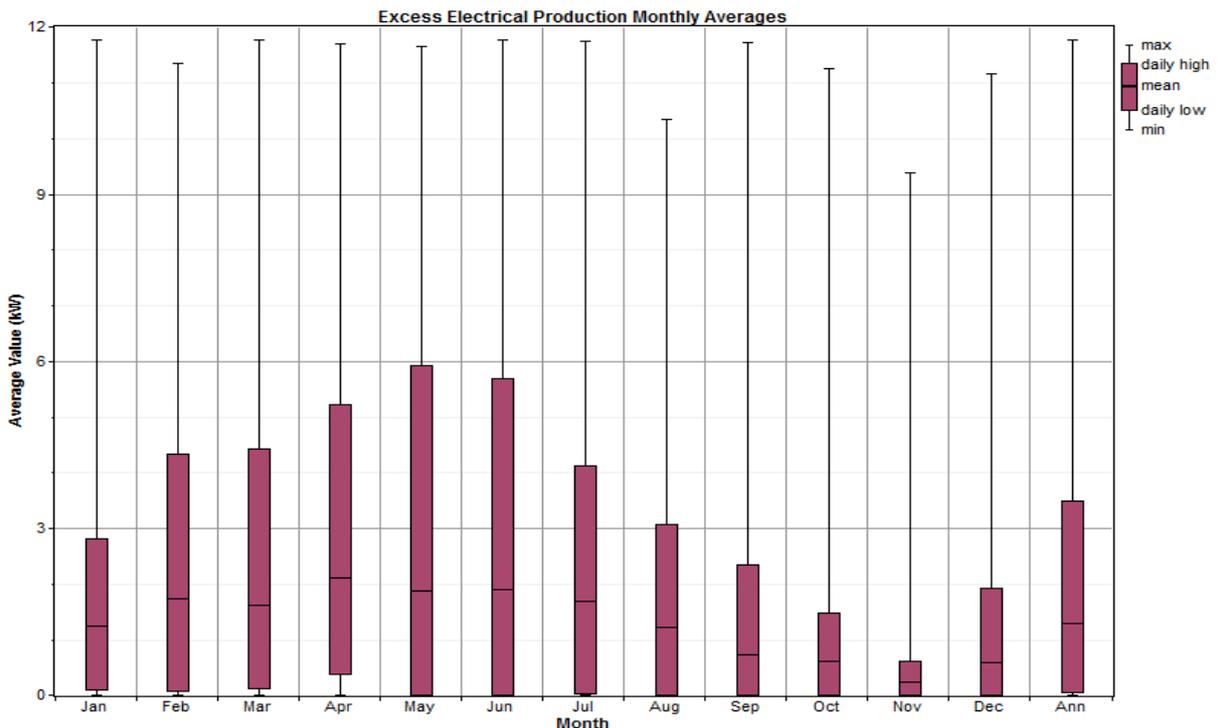


Figure IV.16 : Moyenne mensuelle de la production.

L'excès mensuel d'énergie du système, donc de l'éolienne, est donné dans la figure suivante :



CHAPITRE IV : SIMULATION DU SYSTEME HYBRIDE SOUS LE LOGICIEL HOMER

Figure IV.17 : Moyenne mensuelle de l'excès de production.

La sollicitation de la réserve des batteries par la charge est donnée dans la figure qui suit :

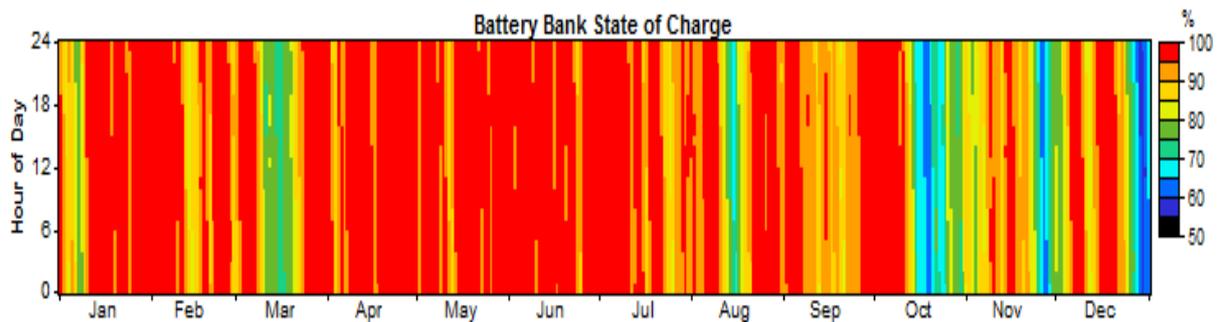


Figure IV.18 : Sollicitation de la réserve des batteries par la charge.

Ø Interprétation des résultats :

L'élargissement du parc de batteries a, non seulement, permis de récupérer plus d'énergie renforçant ainsi le système de production mais il a également offert une autre configuration plus rentable plus facile à réaliser et moins encombrante. La dernière configuration, composée d'une éolienne Proven 15 et de 20 batteries, est du point de vue économique et pratique la plus optimale.

III. Conclusion :

Nous avons vu que pour alimenter une charge définie il est possible mais pas nécessaire de faire appel à tous les composants producteurs du système hybride de génération d'énergie. En cherchant les combinaisons optimales on peut, en fonction de la disponibilité des différents générateurs et des capitaux, adopter le système final adéquat et réduire les coûts de l'installation et du KWh produit. Le système hybride est, en général, avantageux en ce qu'il offre plusieurs configurations pour satisfaire une charge quelconque. Cet atout permet de soulager ou de combler un déficit dans la production d'un générateur faisant parti du système.

CHAPITRE IV : SIMULATION DU SYSTEME HYBRIDE SOUS LE LOGICIEL HOMER

Il est important de noter que l'observation de la sollicitation de la réserve d'énergie des accumulateurs, à elle seule, nous permet de comprendre le comportement de notre système de production vis-à-vis de la charge considérée.

Conclusion générale :

Dans la perspective de nous libérer des énergies fossiles nous avons simulé le cas d'un système hybride, constitué de générateurs photovoltaïque et éolien, alimentant une charge sur un site donné. Les résultats – plus que satisfaisants – nous enseignent que la possibilité d'une auto – satisfaction énergétique des sites isolés peut être, dans un avenir proche, une démarche fiable. Nous oserons estimer, par ailleurs, qu'une généralisation d'une telle démarche dans une vision globale constituera une possible alternative aux énergies fossiles qui non seulement se raréfient mais menace le devenir de la planète.

Nous avons appris, en utilisant le logiciel de simulation HOMER, que pour alimenter une charge quelconque, la configuration du système d'alimentation peut changer en fonction de la dimension de la charge, du potentiel énergétique du site et des éléments générateurs disponibles. Nous avons appris aussi que la capacité du parc de stockage peut influencer la puissance ou le nombre de générateurs à utiliser.

Nous avons vu dans notre étude que l'énergie du soleil, par ses nombreuses manifestations (photovoltaïque, éolienne, hydroélectrique...), à elle seule, pourra satisfaire la totalité de la demande énergétique mondiale. Néanmoins, il est à noter qu'un basculement total et brusque des énergies fossiles vers les énergies renouvelables peut constituer un danger pour notre civilisation.