

Rapport de stage de fin de D.U.T. Mesures Physiques

Etude comparative de panneaux solaires photovoltaïques



Tuteurs :
Marc Van Damme
Sylvie Sautrot

Sommaire

<u>Remerciements</u>	3
<u>Introduction</u>	3
<u>Présentation de HomeEnergy</u>	4
<u>Historique de HomeEnergy</u>	5
<u>1 L'énergie solaire photovoltaïque</u>	6
<u>1.1 L'effet photovoltaïque</u>	6
<u>1.2 La cellule solaire</u>	13
<u>1.3 Le module photovoltaïque</u>	24
<u>1.4 L'installation de modules photovoltaïques</u>	29
<u>2 Mes activités au sein de HomeEnergy</u>	36
<u>2.1 Mesures électriques sur des petits panneaux photovoltaïques</u>	36
<u>2.2 Exposition sur les énergies renouvelables</u>	43
<u>2.3 Diagnostic énergétique</u>	44
<u>2.4 Visites</u>	46
<u>Conclusion</u>	44
<u>Bibliographie</u>	45
<u>Annexes</u>	46

Remerciements

Je tiens à remercier mon tuteur de stage Monsieur Marc VAN DAMME, président de l'association HomeEnergy pour son accueil et les connaissances qu'il m'a transmises.

Je remercie également ma tutrice de l'I.U.T. Madame Sylvie SAUTROT pour son soutien, sans oublier les autres stagiaires Alan KOK, Yoan PITTHAYAPHONE et Rémi VORMUS pour leur bonne humeur communicative et leur aide. Malgré certains obstacles passagers, ils ont tous contribué à établir une ambiance de travail agréable et constructive.

Un remerciement également à l'IUT de Paris Jussieu qui m'a permis de mettre en pratique les notions acquises au cours de ces deux années de D.U.T. Mesures Physiques. Merci aux enseignants, techniciens, personnels administratifs et bien entendu aux étudiants de ma promotion.

Introduction

La production mondiale d'électricité à partir de cellules photovoltaïques augmente de façon exponentielle et présente de nombreux avantages : propreté, silence, fiabilité et surtout c'est une source renouvelable. Ce dernier point présente un intérêt majeur dans le contexte actuel de la fin du pétrole bon marché. Toutefois, la part de l'électricité photovoltaïque reste aujourd'hui très marginale dans le paysage énergétique mondial : moins de 0,001% de la production d'électricité, une goutte dans l'océan.

Les obstacles qui s'opposent à ce que cette forme de production électrique trouve une vraie « place au soleil » sont nombreux : rendement faible, concurrence avec d'autres sources d'énergie (nucléaire, pétrole...) , politiques peu volontaristes dans de nombreux pays, etc... Pour lever ces barrières, il est important d'améliorer les différentes technologies pour abaisser les coûts de production, d'installer de façon optimale les panneaux solaires et de populariser la filière afin d'influencer les décideurs politiques. Il existe de grands enjeux liés à une utilisation intelligente de l'énergie solaire car il y a du soleil partout ; c'est donc un pas significatif vers une indépendance énergétique pour tous.

Dans le cadre de mon stage, j'ai comparé diverses technologies de cellules photovoltaïques en prenant en compte le coût, le rendement, la réponse spectrale et la variabilité de la puissance délivrée selon l'éclairement : le but central étant de déterminer le matériel le plus adapté à une région comme la Normandie, relativement peu ensoleillée.

J'ai également co-organisé une exposition pour présenter les différents types d'énergies renouvelables, répondre aux questions des visiteurs et les conseiller.

Enfin la réalisation d'un diagnostic énergétique d'une habitation a été un troisième axe de travail, en relation étroite avec les deux précédents.

Il faut préciser que j'ai effectué mon stage dans une association disposant de peu de moyens tant sur les plans financier que matériel, ce qui a présenté une difficulté importante. La partie consacrée aux mesures a donc dû être adaptée au contexte dans lequel je me trouvais.

Je vous présenterai enfin les perspectives que j'envisage pour mon avenir professionnel en accord avec l'expérience acquise et les rencontres faites durant ces dix semaines.

Présentation de HomeEnergy

HomeEnergy est une association loi 1901 qui a pour but « l'étude et la recherche dans le domaine du stockage et de la conversion d'énergie électrique pour l'habitat afin de favoriser le développement des énergies renouvelables et d'assurer la sécurité d'approvisionnement en électricité pour les appareils vitaux de l'habitat. »

L'association a été fondée en 2003 par Marc Van Damme, électronicien et passionné d'énergies avec quelques amis. Il y a actuellement une quinzaine de membres bénévoles. Le siège se trouve à Lieurey, petite commune de l'Eure (27), département assez rural.

HomeEnergy organise des expositions sur les convertisseurs électriques et les énergies renouvelables pour faire connaître des techniques qui peuvent répondre à la problématique contemporaine de l'énergie.

Aucune subvention n'est versée dans un souci de préservation de l'autonomie, les membres donnent des cours de soutien scolaire pour faire vivre financièrement l'association.

Les axes d'étude en cours sont :

- la conversion d'une maison tout-électrique aux énergies renouvelables par l'utilisation du solaire thermique et du bois-énergie notamment
- le suivi de la consommation électrique des locaux et la mise en place d'une utilisation rationnelle de l'énergie
- la comparaison de différentes technologies de cellules solaires photovoltaïques
- l'utilisation d'huile végétale pure comme carburant pour l'automobile dans un contexte de fin du pétrole bon marché

Un site Internet est en cours de réalisation. Il sera essentiellement consacré aux convertisseurs électriques (électronique de puissance) : fonctionnement, fabricants, applications et peut-être un espace de vente. Une partie du site portera sur les énergies renouvelables et la maîtrise de l'énergie mais de façon succincte car sur le web, on trouve facilement de telles informations.

Historique de HomeEnergy

- Octobre 2001 : Création activité commerciale de HomeEnergy suite à la tempête de 1999. Vente ambulante sur les marchés de :
convertisseurs, batteries, chargeurs, piles, lampes etc.
- Décembre 2001 : Cessation activité commerciale de HomeEnergy pour les raisons suivantes :
Impossibilité d'obtenir un prêt bancaire
Difficulté de développer la clientèle, produit trop innovant pas encore assez connu, contexte économique défavorable et activité déficitaire.
- Avril 2003: Nouveau statut de HomeEnergy sous forme associative.
Activité : étude et recherche dans le domaine du stockage et de la conversion d'énergie électrique pour l'habitat afin de favoriser le développement des énergies renouvelables (EnR) et d'assurer l'approvisionnement en électricité pour les appareils vitaux de l'habitat.
- 2004 : Campagne d'information pour faire connaître HomeEnergy auprès de la population locale dans la zone Pont-Audemer à Bernay par des communiqués de presse, des journées d'information dans les salles associatives de quelques mairies de la région.
Démonstrations de convertisseurs, information, passage de vidéos distribution de brochures sur les convertisseurs et les EnR (ADEME, CLER, Observ'ER)
- Nov. / Déc. 2004: Démarrage du suivi de la consommation d'électricité d'une maison individuelle tout - électrique type F5 dans une zone rurale (suite à la flambée des cours du pétrole)
Accélération des travaux de recherche et développement.
- Avril 2005 : Réalisation d'un prototype de convertisseur et d'une installation expérimentale au siège de HomeEnergy.
- Juillet 2005 : Déplacement à Jersey pour rechercher des investisseurs et développer les relations Franco-britannique de coopération sur le plan technique.
- Août 2005 : Organisation d'une journée « portes ouvertes » pour faire découvrir au public l'installation expérimentale et le concept HomeEnergy de « maison à énergie positive ».
- Juin 2006 : Exposition sur les EnR et système secouru d'une maison à Lieurey

1 L'énergie solaire photovoltaïque

Un système photovoltaïque convertit directement l'énergie solaire en énergie électrique. Dans cette première partie, nous allons voir comment l'effet photovoltaïque est utilisé par les cellules solaires pour fournir une puissance électrique.

Nous aurons l'occasion de dresser un comparatif des différentes technologies de cellules en prenant en compte le rendement, la réponse spectrale, le comportement en température, le prix, etc...

Je vous présenterai ensuite les divers assemblages de cellules en modules solaires, puis nous étudierons les facteurs à prendre en compte lors de l'installation de générateurs photovoltaïques comme l'ensoleillement, le dimensionnement, l'électronique auxiliaire, la destination de l'électricité produite et le contexte actuel de la mise en place de tels dispositifs. L'ordre logique de cette première partie est donc d'aller du cœur de la matière jusqu'à l'installation PV finale, du plus petit au plus grand.

1.1 L'effet photovoltaïque

1.1.1 Historique et principe

Découvert en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel, l'effet photovoltaïque caractérise la conversion de la lumière en électricité par des matériaux semi-conducteurs.

Dans un cadre plus général, Hertz, découvre en 1887 l'effet photoélectrique qui consiste en l'émission de charges négatives (les électrons, découverts en 1897 par Thomson) lorsqu'un matériau est soumis à une onde électromagnétique de fréquence suffisamment élevée comme la lumière visible par exemple.

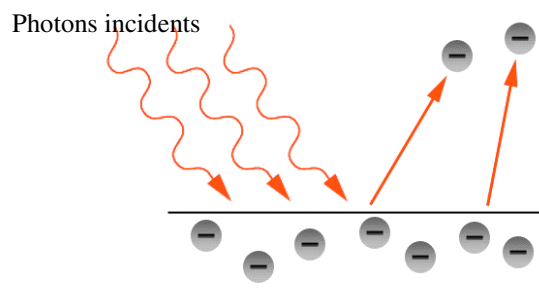
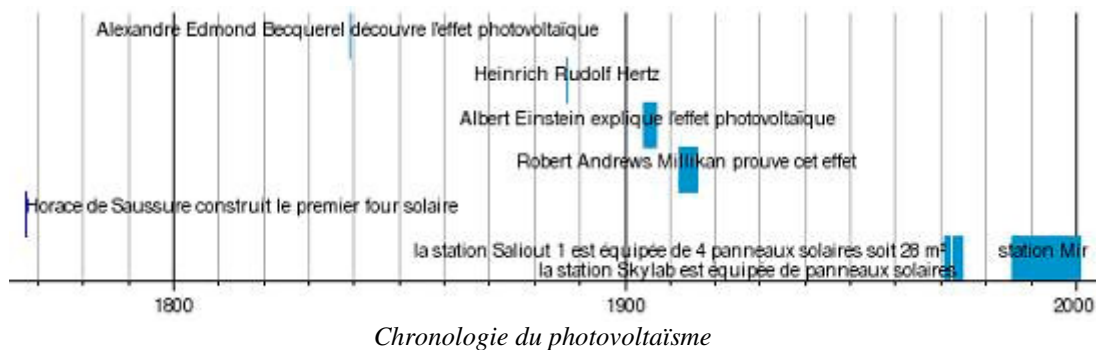


Illustration de l'effet photoélectrique

D'après Einstein, il s'agit dans ce cas d'un transfert d'énergie des photons incidents (les « grains de lumière ») absorbés par la matière vers un ou plusieurs électrons de la périphérie des atomes du matériau. Les électrons sont alors libérés de l'attraction du noyau de l'atome : ils ont assez d'énergie pour pouvoir être accélérés par un champ électrique, ce qui engendre un courant électrique.



L'énergie des photoélectrons dépend notamment de la fréquence de l'onde électromagnétique incidente car $E = h \cdot \nu$ où h est la constante de Planck et ν la fréquence de l'onde (en Hz). Typiquement, pour de la lumière visible, $E = 1 \text{ eV}$

Le nombre d'électrons émis (le courant) est proportionnel à l'intensité de la source électromagnétique, par exemple l'ensoleillement, comme on le constatera plus loin avec les cellules solaires.

1.1.2 Les semi-conducteurs

Ces matériaux ont une conductivité électrique intermédiaire entre les isolants et les métaux. Dans un semi-conducteur un courant électrique est favorisé par deux types de porteurs: les électrons et les trous.

Un semi-conducteur est un solide cristallin dont les propriétés de conduction électrique sont déterminées par deux bandes d'énergie particulières : d'une part, la bande de valence, qui correspond aux électrons impliqués dans les liaisons covalentes ; d'autre part, la bande de conduction, comprenant les électrons dans un état excité, qui peuvent se déplacer dans le cristal.

Ces deux bandes sont séparées par un *gap*, une bande interdite que les électrons ne peuvent franchir que grâce à une excitation extérieure (par exemple, l'absorption d'un photon). La

bande interdite correspond à une barrière d'énergie, dont l'ordre de grandeur est l'électronvolt (eV).

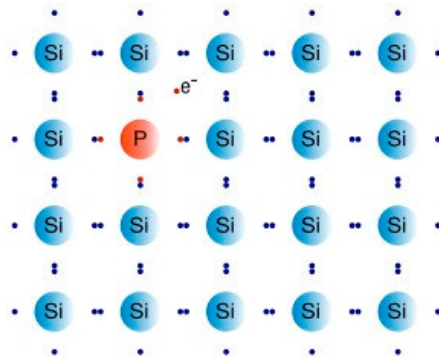
1.1.3 Le dopage

Le dopage d'un matériau consiste à introduire dans sa matrice des atomes d'un autre matériau ; Ces atomes vont se substituer à certains atomes initiaux et ainsi introduire davantage d'électrons ou de trous. Les atomes de matériau dopant sont également appelés impuretés, et sont en phase diluée : leur concentration reste négligeable devant celle des atomes du matériau initial.

Dans un semi-conducteur intrinsèque, ou pur, il n'y a aucun atome dopant. Tous les électrons présents dans la bande de conduction proviennent donc de la bande de valence. Il y a donc autant d'électrons que de trous : $n = p = n_i$; n_i est la concentration intrinsèque. Tout dopage sert à modifier cet équilibre entre les électrons et les trous, pour favoriser la conduction électrique par l'un des deux types de porteurs.

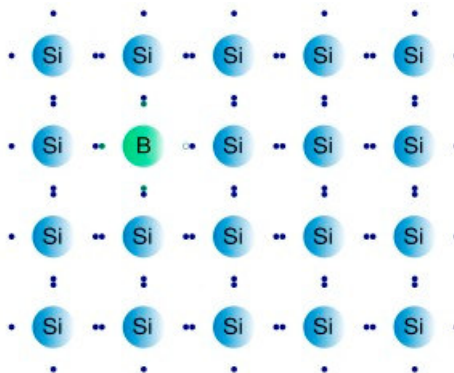
Il existe deux types de dopage :

- type N : consiste à produire un excès d'électrons qui sont négativement chargés



Exemple d'un dopage de type N : le phosphore possède un électron de plus que le silicium
Source : Wikipédia

- type P : consiste à produire une carence en électrons, donc un excès de trous, considérés comme positivement chargés.



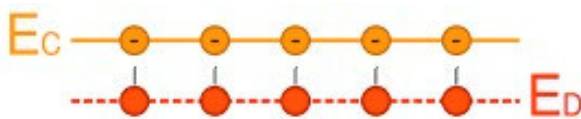
Exemple d'un dopage de type P : le bore possède un électron de moins que le silicium

Source : Wikipédia

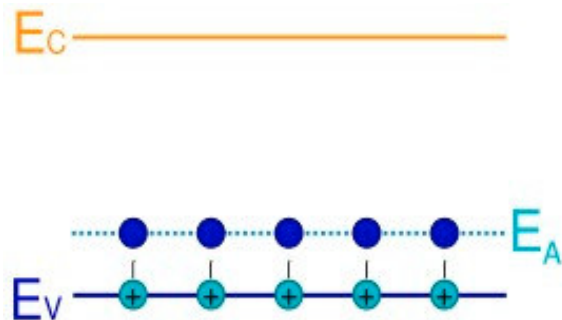
L'atome d'impureté provoque des effets qui dépendent de la colonne qu'il occupe dans la classification périodique de Mendeleïev, par rapport à la colonne de l'atome qu'il remplace.

- Si l'atome dopant appartient à la colonne précédente, il manque alors un électron périphérique pour rétablir l'ensemble des liaisons covalentes initiales. Il apparaît alors une carence en électrons, autrement dit un trou. L'atome inséré est dit accepteur (d'électron), car il est capable de recevoir un électron supplémentaire, provenant de la bande de valence. C'est un dopage P.
- Si l'atome dopant appartient à la colonne suivante, il possède un électron supplémentaire par rapport à l'atome initial. Les liaisons covalentes initiales sont restaurées, mais un des électrons n'est pas utilisé dans ces liaisons. Il est donc sur un état libre du système. L'atome inséré est dit donneur (d'électron). C'est un dopage N.
- Un même atome dopant peut être à la fois donneur et accepteur : il est alors dit amphotère. C'est par exemple le cas du Silicium (Si, colonne IV), qui est un dopant de l'Arséniure de gallium (AsGa) : si le Si se met en substitution d'un atome de Gallium (colonne III), il est donneur d'électron. S'il est en substitution d'un atome d'Arsenic (colonne V), il est accepteur.

Le dopage provoque l'apparition de nouveaux niveaux **accepteurs** et **donneurs** d'électrons dans la structure de bande du matériau dopé. Ces niveaux apparaissent dans le gap, entre la bande de conduction et la bande de valence. . Ainsi, l'énergie nécessaire pour que les électrons passent dans la bande de conduction est bien plus facilement atteinte que dans un semi-conducteur intrinsèque.



Structure de bande d'un semi-conducteur dopé N

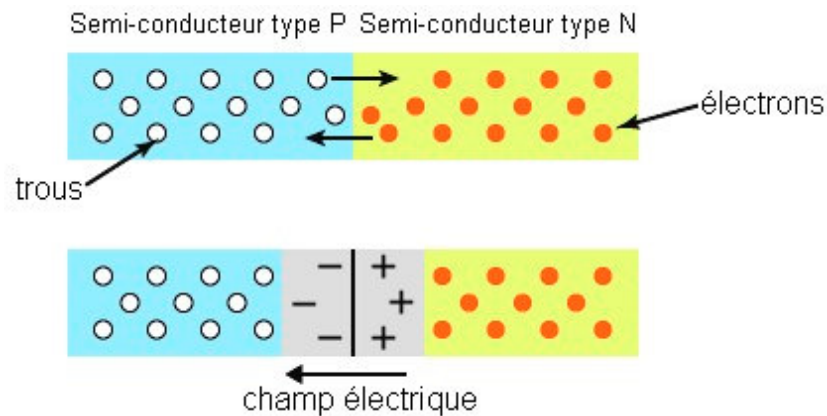


Structure de bande d'un semi-conducteur dopé P

1.1.4 La jonction P-N

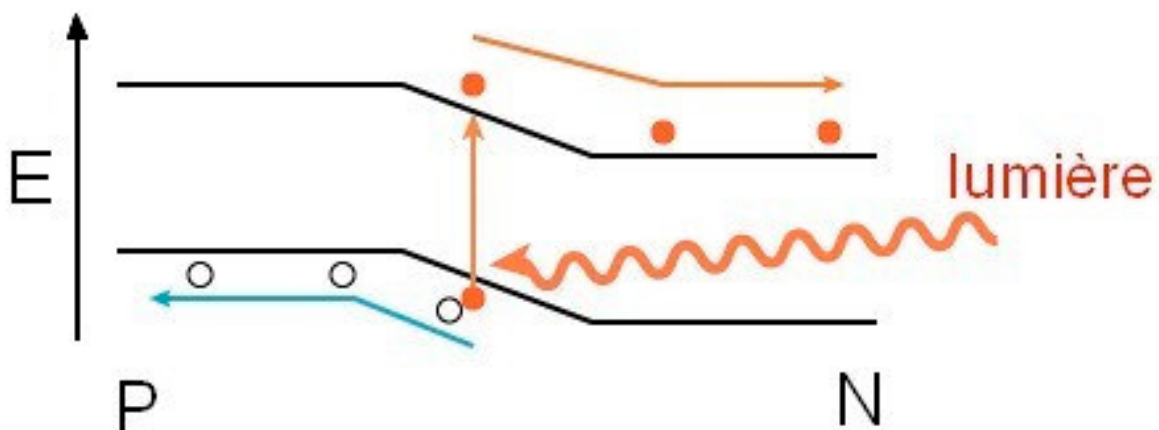
Une jonction P-N est créée en juxtaposant un semi-conducteur dopé P avec un semi-conducteur dopé N. On l'utilise dans de nombreux dispositifs électroniques.

Les électrons, majoritaires dans la zone N vont migrer vers la zone P. Ce mouvement de charges polarise la jonction : la zone N proche de la jonction devient électriquement positive et la zone P devient électriquement négative. Un champ électrique interne est créé. Mais cette diffusion de charges crée un autre champ en sens inverse. A l'équilibre thermodynamique, les deux courants s'annulent.



Déplacement de l'équilibre thermodynamique :

Quand une onde électromagnétique de fréquence adaptée vient frapper la jonction, certains photons libèrent une paire « électron-trou ». Les porteurs de charges gagnent de l'énergie et sont accélérés par le champ électrique interne. Un courant circule alors si on ferme le circuit.



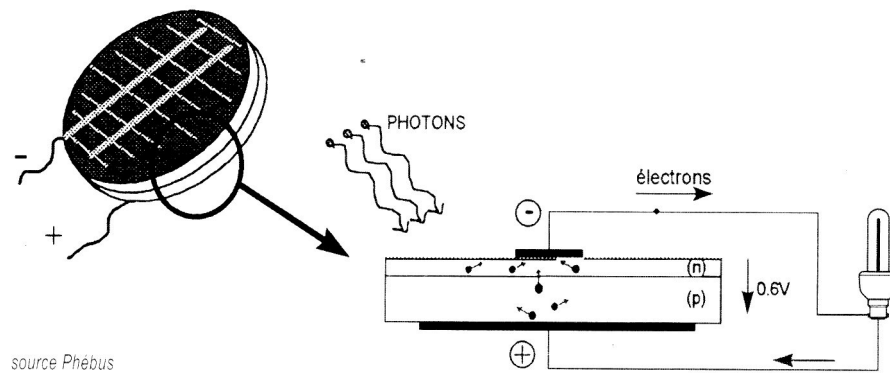
Tout le solaire photovoltaïque fonctionne sur ce principe et la communauté scientifique tente de rechercher en recherche d'optimiser son utilisation avec différentes technologies et processus industriels.

1.2 La cellule solaire

1.2.1 Fonctionnement

C'est l'élément de base pour la production d'électricité à partir du soleil. On l'appelle aussi **cellule photovoltaïque**, **photopile** ou **pile solaire**. Elle est constituée d'un ou plusieurs semi-conducteurs photosensibles.

Les cellules les plus courantes sont faites de **silicium**, un élément abondant à la surface de globe. La cellule photovoltaïque est alors constituée de deux fines tranches de silicium dopées N et P. On expose la tranche N à la lumière et l'on s'arrange pour que la jonction PN soit le plus près possible de la surface afin de capter un maximum de photons.



Principe d'une cellule photovoltaïque

Les électrons sont généralement collectés par des fils métalliques très fins disposés en grille afin de minimiser la résistance interne du générateur équivalent tout en exposant une aire maximale à la lumière.



*Cellule solaire pseudo carrée vue du côté N.
On note la présence de la grille de collecte et de deux grosses électrodes verticales
Source : DoE*

Les contacts ohmiques sur les couches P et N doivent être de très faible résistivité pour limiter la chute de tension lorsque la cellule débite.

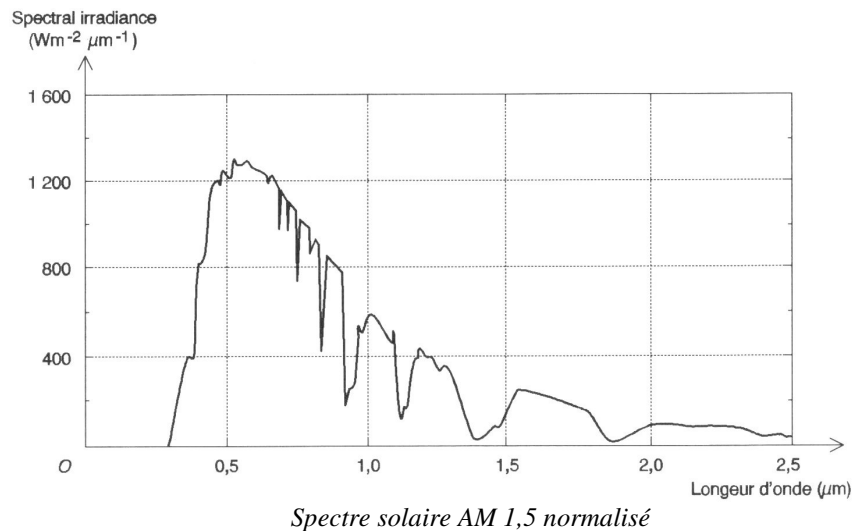
Les cellules sont généralement des carrés ou pseudo carrés de 10x10 cm ou 15x15 cm et de 0,2 mm d'épaisseur. Tout pousse à aller vers une miniaturisation car on économise ainsi de la matière première et on peut espérer obtenir de meilleurs rendements.

1.2.2 Caractéristiques de la cellule

Les test de cellules solaires s'effectuent dans des conditions normalisées :

- rayonnement solaire instantané de 1000W/m²
- spectre solaire AM 1,5 normalisé (1,5 fois la masse atmosphérique traversée par un rayon de soleil si celui-ci est au zénith)
- température ambiante de 25°C

On parle aussi de conditions **STC** (*Standard Test Conditions*). Ces conditions sont rarement rencontrées et sont donc très optimistes.



Les puissances nominales exprimées en Wc (Watt crête) font référence à ces conditions normalisées

1.2.2.1 Caractéristique courant – tension

Dans l'obscurité, la cellule photovoltaïque se comporte comme une diode classique et présente une caractéristique courant – tension semblable. La jonction P-N devient passante à partir de 0,6V. Sous illumination, un photocourant est créé et s'oppose au courant de diffusion des porteurs de charges.

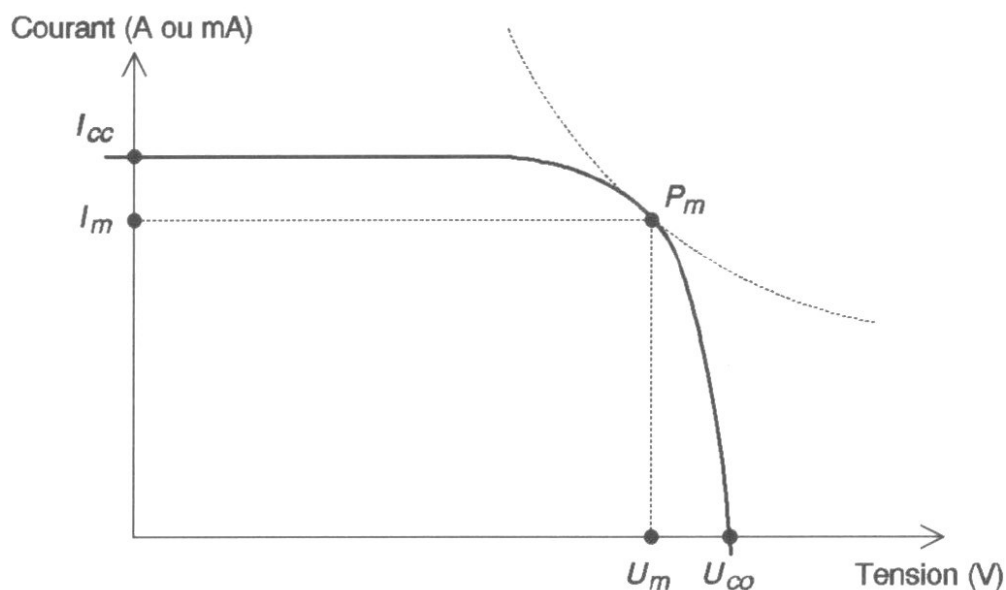
Si l'on met la cellule en court circuit, la cellule ne délivre aucune puissance ($V=0$), de même, si on mesure la tension sans mettre de charge pour faire débiter du courant ($I=0$), on est en circuit ouvert, donc la puissance électrique est nulle.

Dans ces deux cas de figure, on peut mesurer deux caractéristiques importantes d'une cellule : le courant de court-circuit I_{cc} (ou I_{sc}) et la tension en circuit ouvert U_{co} (ou V_{oc}). Entre ces deux points, on peut placer des charges variables (par exemple des résistances) pour tracer une caractéristique courant – tension. Celle-ci semble être une simple translation de la caractéristique de la diode mais en réalité, le photocourant est dépendant de la tension.

Il existe un point P_m de la courbe où la puissance délivrée est maximale.

A ce point correspondent deux coordonnées : I_m l'intensité de puissance maximale et U_m la tension de puissance maximale. En anglais on note P_{MPP} (*maximum power point*). On parle aussi de Puissance, tension et courant **nominaux**.

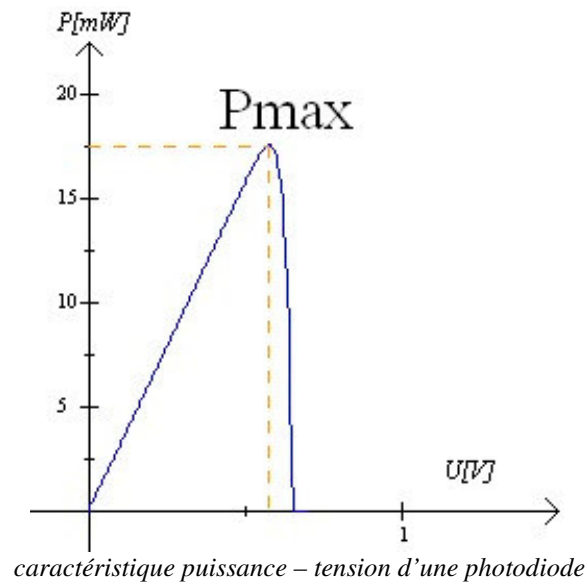
En réalité I_{cc} a une valeur négative, ce qui signifie bien que la cellule est un générateur lorsqu'elle est éclairée. Par convention, on prend un courant positif pour tracer la courbe.



Courbe courant – tension d'un photogénérateur

1.2.2.2 Caractéristique puissance – tension

Sachant que la puissance est le produit de la tension par l'intensité, on peut tracer la caractéristique puissance – tension de la cellule pour mieux localiser le point P_m



On remarque que la courbe présente deux parties séparées par P_m , la puissance chute rapidement après ce point. Il est donc très important de travailler au plus près de P_m pour avoir un rendement des plus intéressants.

1.2.3 Rendement de la cellule

Le **rendement** de la cellule permet de déterminer l'efficacité de la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Le rendement se calcule comme suit :

$$\eta = \frac{P_m}{E_0} = \frac{V_m I_m}{E_0} = \frac{V_{oc} I_{cc} FF}{E_0}$$

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{cc}}$$

Avec FF le facteur de Forme et E_0 l'éclairement incident.

Les pertes d'énergie sont nombreuses :

- certains photons sont réfléchis par la surface de la cellule, on utilise une couche anti-reflet pour limiter ce problème
- une partie de l'énergie électromagnétique chauffe la cellule mais ne produit pas de courant (rendement quantique)
- loin de la jonction P-N les paires de trous électrons se recombinent très vite ce qui les empêche de gagner l'extérieur de la cellule
- pertes dans les contacts électriques avec le milieu conducteur

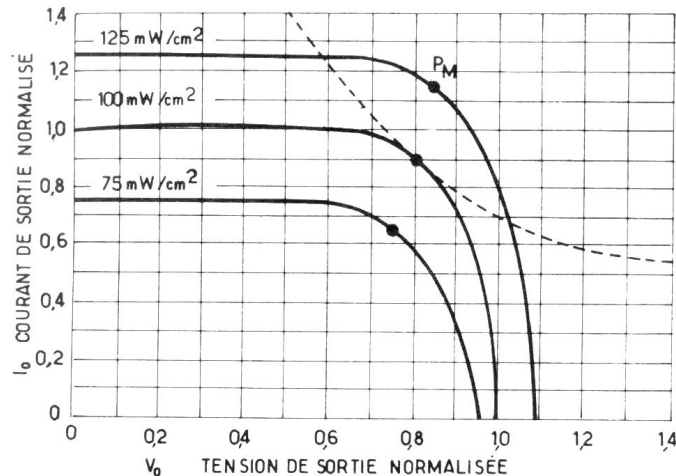
Les rendements varient de 10% à 26% en laboratoire selon les technologies. En pratique, c'est encore moins bon.

Pour avoir un ordre de grandeur, une cellule de 12,5 x 12,5 cm avec un rendement de 15% délivre un peu moins de 2,4W au point de puissance maximale dans les STC.

1.2.4 Variation des caractéristiques électriques

1.2.4.1 Influence de l'éclairement

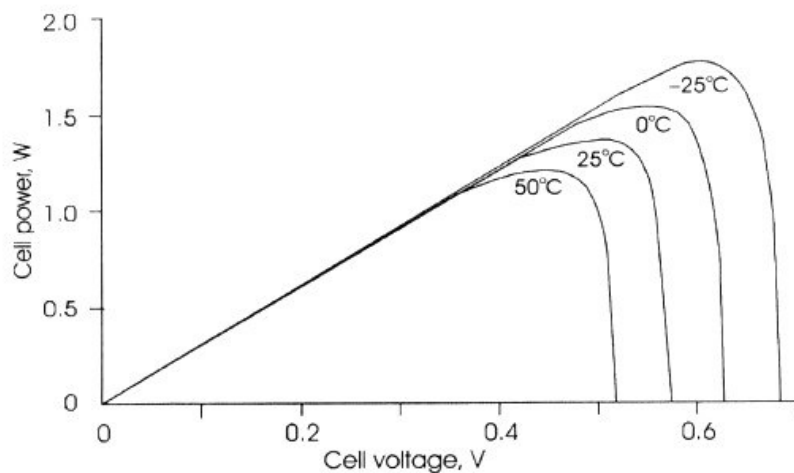
Comme nous l'avons déjà évoqué, la puissance électrique délivrée par la cellule varie énormément selon l'éclairement. Le courant débité lui est directement proportionnel alors que la tension augmente mais de façon moins sensible.



Influence de l'éclairement sur les courbes courant – tension

1.2.4.2 Influence de la température

Les cellules sont assez sensibles aux variations de température. En effet, les résistances internes augmentent avec la température. Quand la température d'une cellule augmente, la tension diminue de l'ordre de $-2\text{mV}.\text{°C}^{-1}$ tandis que le courant augmente faiblement (environ $+0,03\%.\text{°C}^{-1}$). La variation de puissance est opposée à celle de la température (environ $-0,4\%.\text{°C}^{-1}$). Ce comportement est regrettable car généralement, plus il y a de soleil, plus la température de la cellule augmente. Toutefois les régions de montagne, bien ensoleillées et froides bénéficient de cette caractéristique.

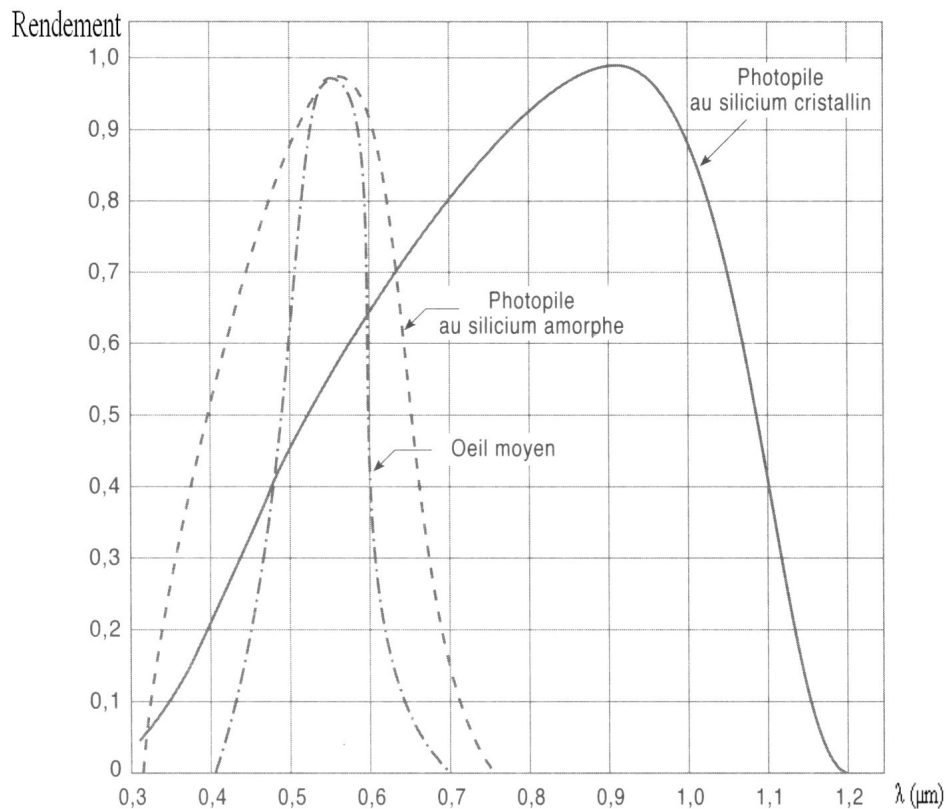


Courbe puissance – tension sous un éclairement constant et 4 températures différentes

1.2.5 La sensibilité spectrale

C'est le rendement quantique obtenu pour une cellule et une longueur d'onde donnée. La sensibilité de la cellule ne couvre pas la totalité du spectre du rayonnement solaire. Il faut que l'onde électromagnétique ait une fréquence minimale et donc une énergie suffisante pour que les électrons puissent quitter la bande de valence.

On remarque que les photopiles n'ont pas la même sensibilité spectrale que l'œil humain moyen. Certaines sont plus sensibles aux rayons infrarouges ($\lambda > 800\text{nm}$), d'autres, au rayonnement visible ($400\text{nm} < \lambda < 800\text{nm}$)



Sensibilité spectrale de différentes cellules photosensibles
Source : ETSF

1.2.6 Les différentes technologies

Il existe de nombreux semi-conducteurs capables d'exploiter l'effet photovoltaïque. Ils diffèrent essentiellement par leur prix, leur rendement, leur sensibilité spectrale. Beaucoup de technologies sont encore en phase de recherche.

Les premières photopiles mises au point furent au sélénium avec un rendement de 0,2%. Puis on a découvert les avantages du silicium et les rendements ont fortement progressé.

N.B. : Les chiffres avancés sont des valeurs typiques qui varient d'un constructeur à l'autre et sont susceptibles d'évoluer au gré des recherches et nouveaux processus industriels. Les rendements record indiqués sont issus de mesures faites en laboratoire sur des cellules spéciales. Pour une même technologie, les rendements des cellules fabriquées en série sont généralement assez éloignés des rendements record. Tous les rendements indiqués s'entendent STC.

La filière du silicium est largement majoritaire sur le marché des photopiles :

- **silicium monocristallin**

Cher à fabriquer et coûteux en énergie, il présente un bon rendement à fort et moyen éclairement (à partir de 100W/m²). Tous usages en extérieur de forte et moyenne puissance. Rendement typique : 12 à 16%. Plus sensible dans l'infrarouge. Couleur : bleu marine uniforme. Rendement record : 32%.

- **silicium polycristallin ou multicristallin**

Moins onéreux que le monocristallin et aussi un peu moins performant, il est utilisé essentiellement aux éclairagements modérés (à partir de 200W/m²). Rendement typique : 11 à 14%. Technologie la plus utilisée actuellement car c'est un bon compromis entre prix et performance. Rendement record : 19%.

- **silicium amorphe (aSi)**

Dans la technologie amorphe, les atomes sont complètement désordonnés contrairement aux technologies cristallines. Il existe des « bras morts », c'est à dire que certains électrons restent seuls. On ajoute alors des atomes d'hydrogène pour créer des liaisons. Les rendements typiques (5 à 7%) sont beaucoup plus bas qu'avec du silicium cristallin.

Plus sensible dans le visible et efficace même sous faible ensoleillement ($<200\text{W/m}^2$) ou si la cellule est partiellement ombragée. Utilisation : applications de petite puissance et grandes surfaces. Couleur : noir uniforme/brun foncé. Rendement record : 13%. Bon comportement en température. En début de vie, le rendement oscille et la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.

On parle aussi de silicium amorphe en couche mince car on dépose une couche de silicium liquide d' $1\mu\text{m}$ environ sur un substrat (verre). Il peut y avoir plusieurs couches pour absorber les différentes couleurs du spectre solaire : par exemple une couche pour le rouge, une pour le vert, une pour le bleu. Les rendements sont ainsi nettement améliorés.

Les technologies suivantes sont encore assez peu développées au niveau industriel ou sont encore à l'état de recherches :

- **CuInSe₂ (CIS)** (diséluiniure de cuivre et d'indium + sulfure de cadmium)
Technologie en couches minces utilisant peu de matière première. Elle présente un moindre coût par rapport aux cellules au silicium cristallin, tout en ayant des rendements supérieurs aux cellules "amorphe". Rendement record : 18%
- **CdTe** (tellurure de cadmium)
Technologie récente et peu chère pour des procédés industriels. Cependant, le cadmium (Cd) est connu pour sa toxicité et certains pays l'ont même interdit. Des recherches ont mis au point des structures à bandes interdites variables (BIV) par un gradient de largeur de bande interdite qui permet une réponse spectrale plus étendue : $5\mu\text{m}$, tout le spectre solaire est ainsi exploité, mais il existe toutefois des obstacles. Rendement record : 16%
- **GaAs** (arséniure de gallium)
Principalement utilisé dans les applications spatiales et les concentrateurs car d'un prix très élevé. Très haut rendement : de 20 à 25%. Pas d'utilisation dans les bâtiments.
- **TiO₂** ou cellules de Graezel
Inspirées de la photosynthèse, ce sont des cellules nano-cristallines à colorant portant le nom de leur inventeur, le chimiste suisse Michael Grätzel. Ces cellules équiperont peut être bientôt un avion solaire censé faire le tour du monde. Encore au stade expérimental.

1.2.6.1 Tableau comparatif des technologies de cellules photovoltaïque

Technologie	Rendement type	prix	utilisation	Eclairement minimal	Avantages	Inconvénients
Si monocristallin	15%	***	Moyenne et grande puissances	100W/m ²	Bon rendement Pratique pour des petites surfaces	Assez cher et coûteux en énergie pour la production
Si polycristallin	12%	**	Moyenne et grande puissances	200W/m ²	Bon compromis	Assez sensible aux variations d'éclairement
aSi	8%	*	Petite puissance et grandes surfaces		Efficace même par temps couvert	Rendement faible
CIS	10%	**	Moyenne puissance		Peu cher	
CdTe		N.C.	Moyenne puissance		Réponse spectrale très étendue	Toxicité du cadmium
GaAs	25%	*****	Satellites		Très bon rendement	Prix très élevé
TiO ₂	4%	N.C.	recherche		Gros progrès attendus	Faible résistance à la chaleur

1.3 Le module photovoltaïque

Une cellule solaire a au maximum une tension de 0,6V à ses bornes ce qui est très faible par rapport aux utilisations courantes de l'énergie électrique. De même, le courant débité est relativement petit : quelques ampères au mieux, d'où l'intérêt de les relier entre elles au sein d'un panneau solaire aussi appelé module photovoltaïque.



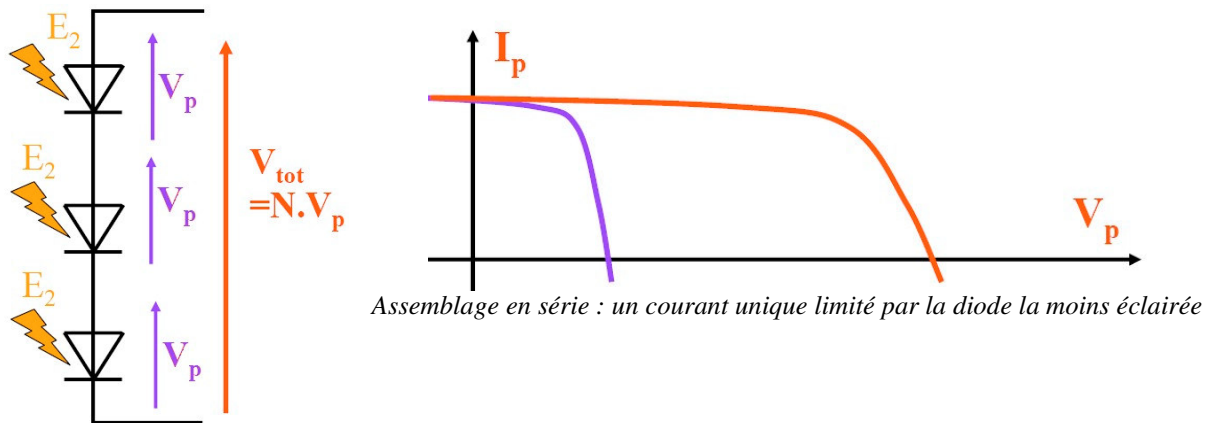
*Panneau photovoltaïque de 123Wc, 1m² et 36 cellules solaires polycristallines
Source :AET*

On peut obtenir des modules de toutes puissances (de 5W à 200W) et de toutes tensions, généralement : 6V, 12V, 24V, 36V et plus rarement 48V ou 68V. On compte en moyenne **100Wc à 180Wc par m²** de modules.

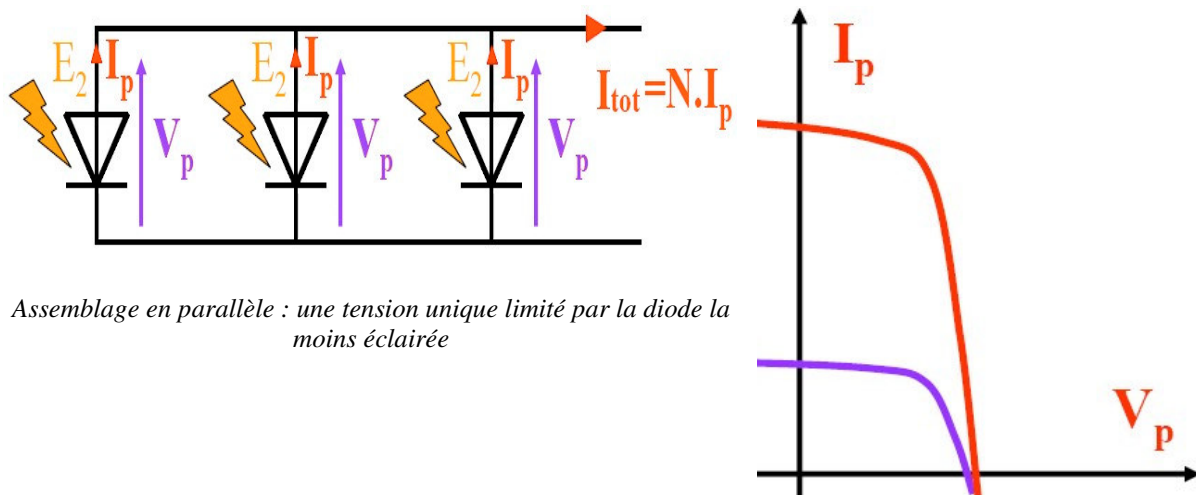
1.3.1 Types d'assemblages électriques

Il est possible de relier des cellules en **série** pour augmenter la tension, en **parallèle** pour augmenter le courant et en **série-parallèle** pour augmenter les deux paramètres simultanément. Dans tous les cas, la puissance électrique augmente avec le nombre de cellules qui sont généralement identiques pour faciliter les processus industriels et optimiser le rendement des capteurs.

1.3.1.1 Assemblage en série

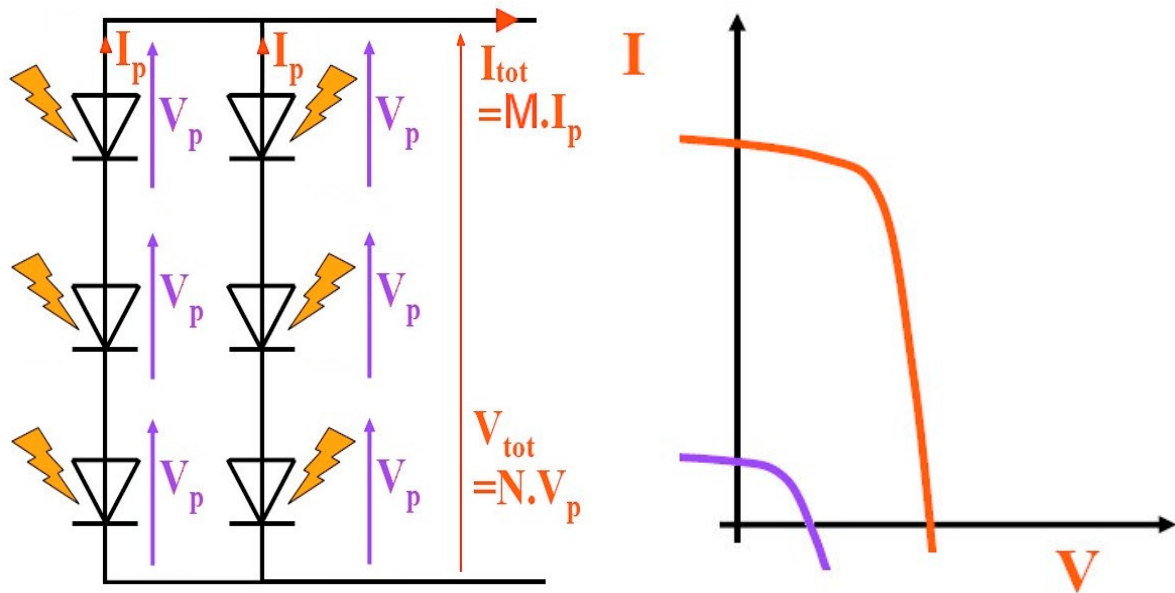


1.3.1.2 Assemblage en parallèle



1.3.1.3 Assemblage en série – parallèle

Le câblage série-parallèle est utilisé pour obtenir un générateur aux caractéristiques souhaitées.



Assemblage en série-parallèle : la puissance est multipliée par un facteur important

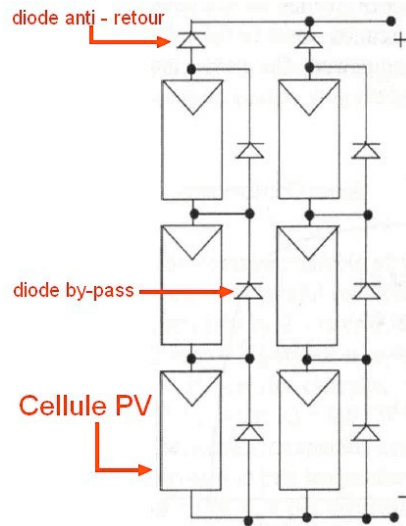
L'assemblage électrique le plus utilisé dans les modules est l'assemblage série pour des raisons de conversions électriques que nous verrons plus loin.

Il faut faire attention à ce que toutes les photopiles soient éclairées de la même façon. En effet, une photopile ombragée (même partiellement) voit sa tension et surtout son intensité baisser considérablement. Une perte de puissance risque de provoquer une polarisation inverse avec dissipation d'énergie dans la diode défaillante.

1.3.2 Diodes de protection

Pour limiter la perte de puissance, on utilise une diode by-pass qui se place en dérivation de la cellule pour ne pas limiter le courant en situation de déséquilibre.

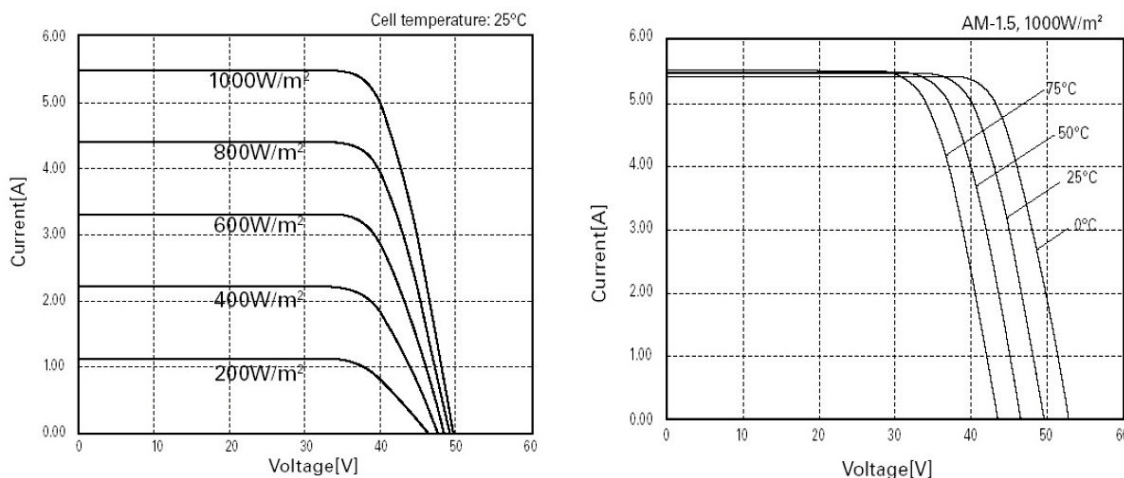
De même, si tout le module est à l'ombre, une batterie bien chargée pourrait débiter dans celui-ci, ce qui serait dangereux pour la structure des photodiodes quasiment incapables de dissiper de l'énergie. On introduit une diode anti-retour sur la borne + du module pour être à l'abri d'un tel ennui. Les diodes anti-retour et by-pass provoquent une chute de potentiel de 0,6V environ qu'il faut prendre en compte dans le rendement des modules.



Exemple d'un assemblage en série - parallèle avec diodes de protection

1.3.3 Caractéristiques du module

Sous un éclairement uniforme, on obtient des courbes courant - tension analogues à celles obtenues pour les cellules.



Caractéristiques courant – tension en fonction de l'éclairement et de la température pour un module de 200Wc
Source : Soleos

1.3.4 Encapsulation

Les cellules sont très minces et donc fragiles, il est nécessaire de les protéger des intempéries et des U.V. qui peuvent les faire vieillir rapidement ou les détériorer définitivement.

Après avoir assemblé électriquement les cellules, on pose une plaque de verre de quelques mm d'épaisseur sur l'ensemble et autour, un cadre d'aluminium anodisé résistant à la torsion et à la corrosion pour faire face aux conditions climatiques extrêmes.

On peut ensuite mettre une deuxième couche de verre (bi-verre) ou un matériau composite (tedlar / milar) pour protéger mécaniquement les cellules. L'ensemble cellule + verre + matériau composite forme alors un laminât.

1.3.5 Durée de vie

En général, les modules sont garantis 10 ans pour un fonctionnement à 90% au moins de la puissance nominale et 25 ans pour 80% de cette même puissance. Au bout de 30 ou 40 ans, un module PV fonctionne encore. Le vieillissement est dû aux conditions climatiques : précipitations, vent, rayons U.V., voire salinité près de la mer. Des panneaux marins sont d'ailleurs spécifiquement mis au point pour des utilisations maritimes.

1.3.6 Temps de retour énergétique

Les panneaux PV sont souvent fabriqués avec une électricité produite de façon polluante (nucléaire, fioul, gaz, charbon), et on leur reproche de consommer beaucoup d'énergie pour leur fabrication. D'où l'importance de cette question. Le temps de retour énergétique est le temps de fonctionnement nécessaire pour rembourser l'énergie dépensée pour la fabrication d'un module. Ce paramètre dépend de la technologie employée et des processus industriels utilisés par le fabricant.

Le temps de retour énergétique est de 4 ans environ pour un système photovoltaïque à base de cellules polycristallines. Pour les modules amorphes, il varie entre 6 mois et 3 ans. En prenant une durée de vie de 30 ans, un système PV produit donc réellement de l'électricité non polluante pendant 86 à 98% de sa vie.

1.4 L'installation de modules photovoltaïques

Chaque jour, la terre reçoit sous forme d'énergie solaire l'équivalent de la consommation électrique de 5,9 milliards de personnes pendant 27 ans. Cependant, on ne peut pas installer des modules PV partout et n'importe comment. Il est important de prendre en compte un certain nombre de paramètres essentiels pour qu'une installation soit efficace, accessible financièrement et nuise le moins possible à son environnement.

1.4.1 Pré-requis pour une bonne installation PV

« L'électricité la plus simple à produire est celle qu'on ne consomme pas. » Cette affirmation qui peut sembler évidente doit être bien prise en compte avant l'implantation d'un système PV. Il faut mieux consommer au lieu de produire toujours plus.

Avant d'installer des appareils produisant de l'électricité à partir d'énergies renouvelables, le scénario Négawatt et de nombreux professionnels préconisent de maîtriser la consommation d'énergie électrique en ayant recours d'une part à **la sobriété énergétique** et d'autre part à **l'efficacité énergétique**. Le premier point est une démarche visant à avoir un comportement responsable dans la consommation d'électricité afin d'éviter les gaspillages (chauffage électrique, appareils allumés et non utilisés, veilles électriques...). Le deuxième point est une technique permettant de réduire les consommations d'énergie en utilisant des appareils plus performants pour un même service rendu, par exemple les lampes basse consommation au lieu des ampoules à incandescence. Pour un achat d'électroménager, il faut penser à regarder



L'étiquette énergie (A, B, C...)

On choisira de préférence un appareil de classe A voire A+ ou A++ en sachant que le surcoût à l'achat est vite amorti par les économies réalisées.

Case « niveau de consommation d'énergie » sur une étiquette énergie.

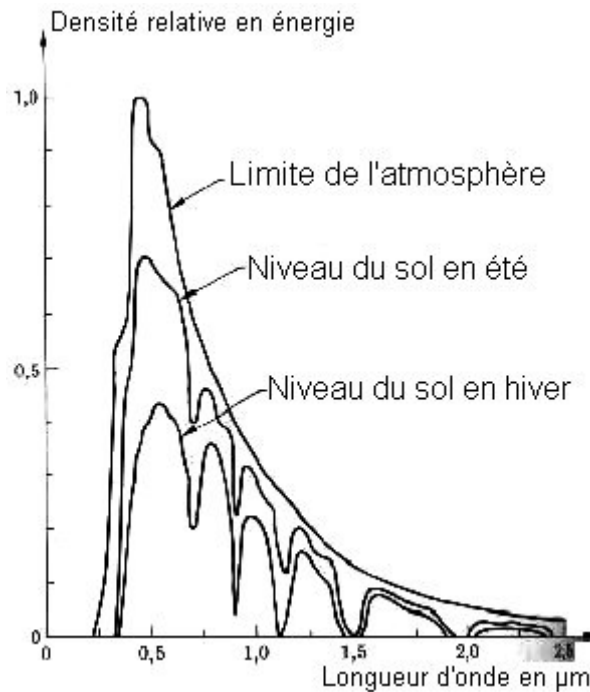
Source : Ademe

Un deuxième pré-requis important est l'**absence d'ombre** sur l'espace où seront installés les panneaux. En effet, comme nous l'avons vu, une cellule ombragée voit sa puissance baisser fortement et tout le panneau voire toute l'installation peut en subir les conséquences. Ce paramètre est au moins aussi important que la zone géographique.

1.4.2 Caractéristiques de l'ensoleillement

1.4.2.1 Le spectre solaire

Le soleil est une source d'ondes électromagnétiques non monochromatique. Les photons reçus sur Terre vont de l'infrarouge proche à l'ultraviolet. La longueur d'onde la plus présente se situe vers 550nm ce qui correspond au vert. C'est d'ailleurs certainement la raison pour laquelle la plupart des végétaux sont verts : cela leur permet de capter un maximum d'énergie solaire. Typiquement, un photon de longueur d'onde $\lambda = 1.24\mu\text{m}$ peut transférer une énergie de 1eV.



Le spectre du rayonnement solaire
Source : ETSF

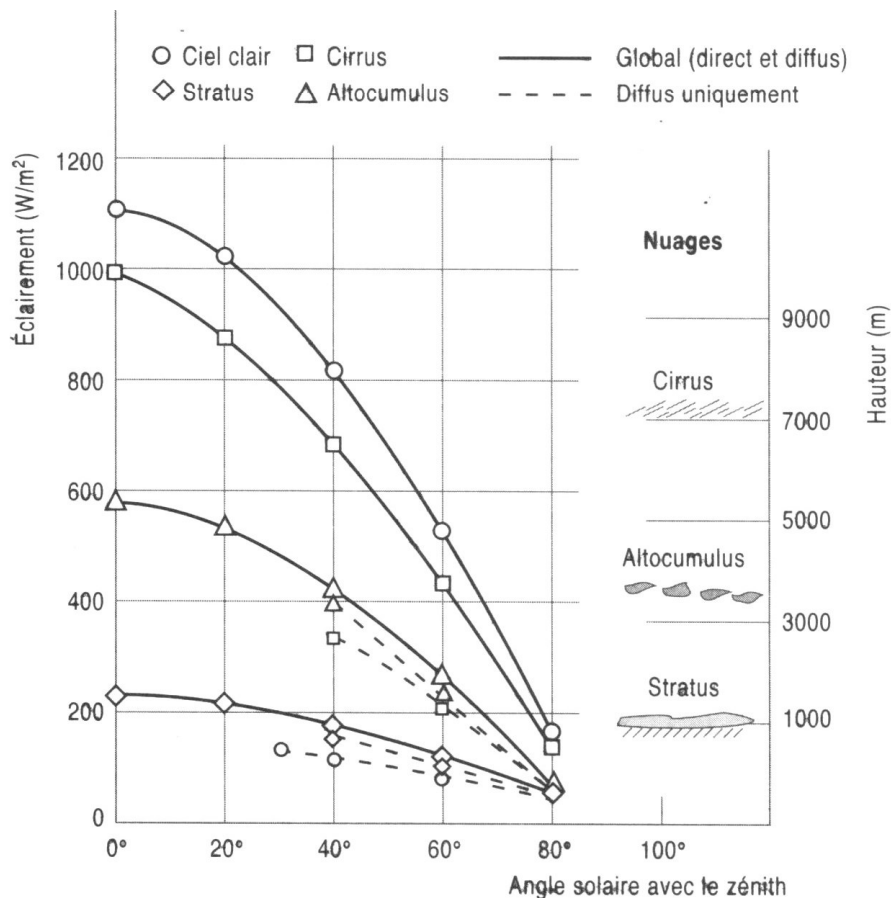
Les bandes d'absorption que l'on peut observer sont dues à la présence de CO_2 et de vapeur d'eau dans l'atmosphère. D'autres gaz peuvent absorber une partie du rayonnement solaire. Une atmosphère humide et polluée sera moins profitable aux panneaux PV qu'un air pur et assez sec. On observe que les longueurs d'onde absorbées se trouvent dans l'infrarouge principalement alors que c'est la gamme de prédilection des cellules cristallines. On comprend donc pourquoi les technologies au silicium amorphe et CIS, qui ont une sensibilité spectrale plus proche de celle de l'œil, ont un rendement qui varie peu par temps couvert avec un éclairage diffus.

1.4.2.2 La puissance rayonnée

La puissance rayonnée aux confins de l'atmosphère est appelée *constante solaire*. C'est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur moyenne est égale à 1360 W/m^2 . Il existe une variation de quelques % au cours de l'année issue de la distance Terre-Soleil variable.

La puissance rayonnée reçue au sol dépend de l'épaisseur d'atmosphère traversée et de l'inclinaison du plan par rapport aux rayons incidents. Pour capter un maximum d'énergie solaire, il faut que le plan des panneaux PV soit strictement perpendiculaire aux rayons du soleil.

Dans des conditions idéales, temps clair, air assez sec, midi heure solaire, angle solaire de 0° avec le zénith, on peut espérer obtenir une puissance rayonnée de 1100 W/m^2 ou plus raisonnablement 1000 W/m^2 , soit l'éclairement de référence STC. Ces conditions sont rarement réunies et il ne faut pas être trop optimiste en ce qui concerne l'éclairement. S'attendre au pire permet d'être agréablement surpris quant à la production électrique.

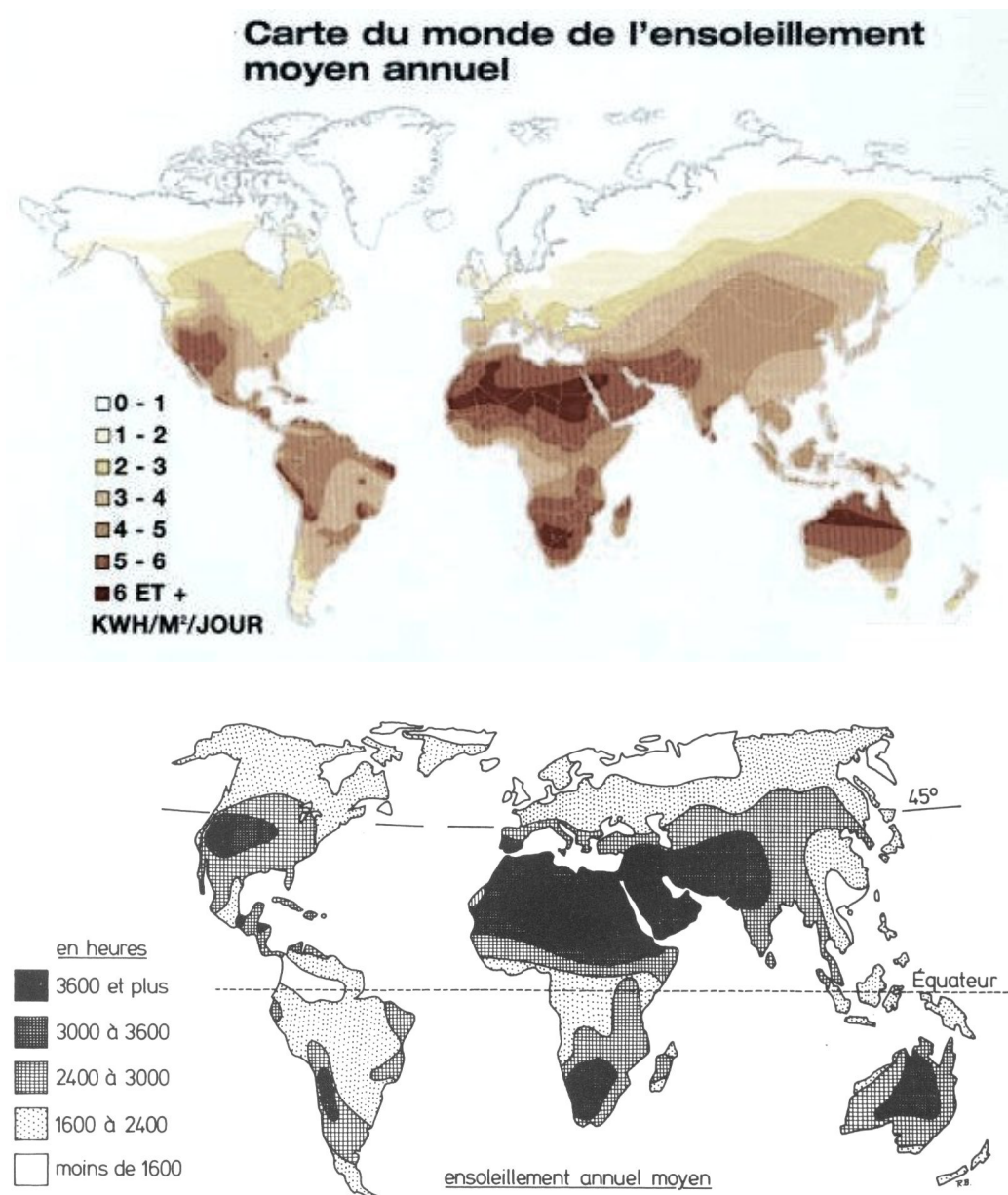


Eclairement en fonction de l'angle solaire avec le zénith et de la météo
Source : ETSF

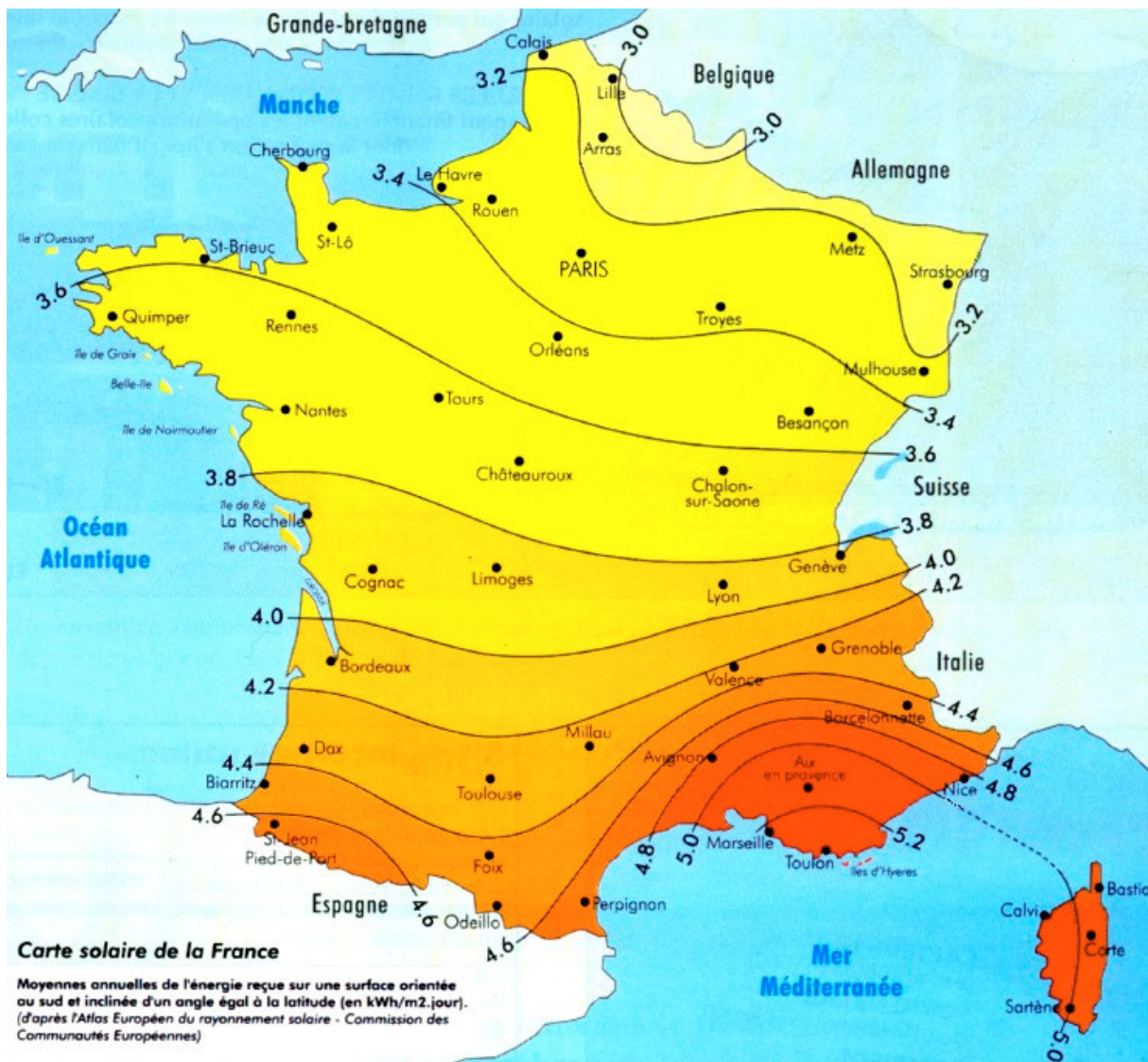
1.4.2.3 Variabilité de l'ensoleillement dans l'espace et dans le temps

Le spectre solaire et la puissance rayonnée sont deux paramètres extrêmement variables en fonction de la zone géographique, de l'heure solaire et de la période de l'année considérée.

Il existe plusieurs grandeurs pour mesurer le potentiel solaire d'une zone géographique. On peut compter le nombre d'heure de soleil par an, c'est à dire quand le soleil est réellement visible. On peut également mesurer la puissance moyenne reçue.



Planisphères représentant l'ensoleillement moyen annuel en heures et en kWh/m²/jour



Carte de l'ensoleillement moyen en France en kWh/m²/jour

On remarque que le meilleur ensoleillement moyen est à peine 1,8 fois plus élevé que le moins bon. Il n'est donc pas si insensé d'installer des panneaux PV dans le Nord de la France. L'Allemagne, qui est un pays beaucoup moins ensoleillé que la France a une puissance PV installée 47 fois supérieure (*baromètre Observ'ER 2005*).

L'ensoleillement varie aussi dans le temps :

- Il y a l'alternance du jour et de la nuit, le soleil parcourt environ 15° par heure et la puissance est maximale à l'heure solaire de midi, quand le soleil est au zénith.
- Il y a l'alternance des saisons du fait de l'inclinaison de la Terre. L'hiver, le soleil est bas et ses rayons doivent donc parcourir une grande distance pour atteindre le sol, l'été, il est nettement plus haut ce qui explique que l'ensoleillement soit plus élevé.

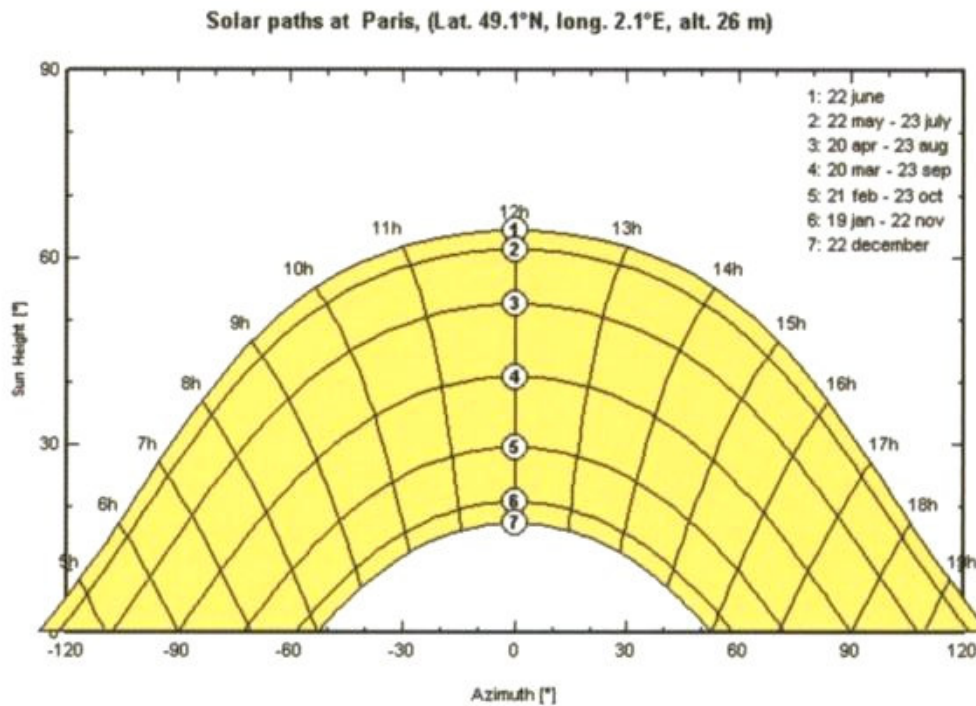


diagramme des courses solaires pour la ville de Paris

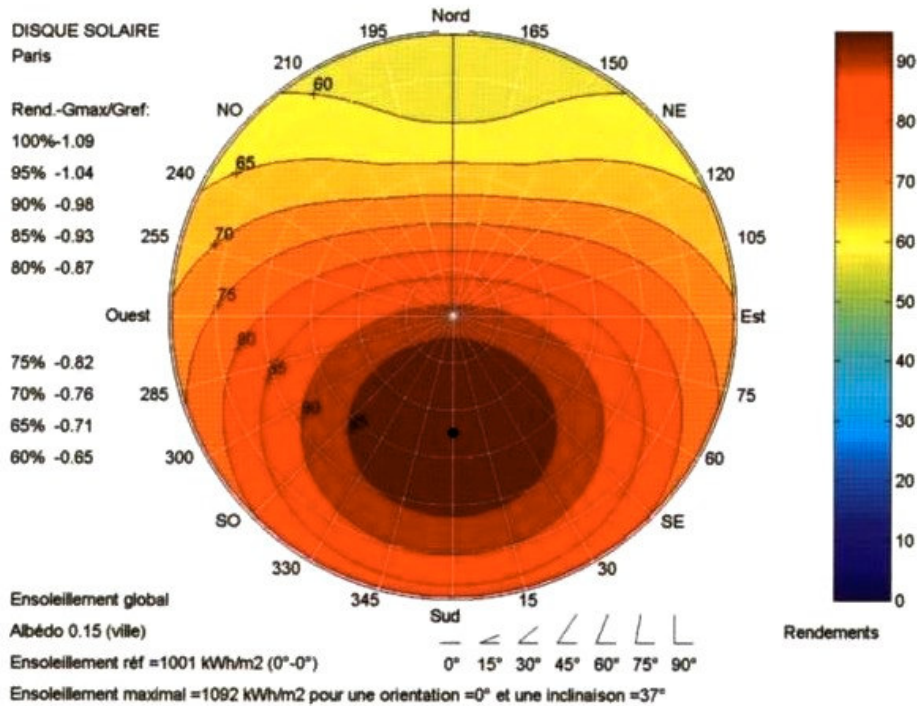
Source : Ademe

Pour chaque zone géographique, un diagramme des courses solaires permet de résumer les variations de l'ensoleillement dans le temps (sans tenir compte des variations climatiques). Pour capter que le panneau soit face au soleil en permanence, il faudrait presque qu'il soit continuellement mobile. Généralement, on trouve un compromis lors de l'installation pour avoir des panneaux fixes et bien inclinés.

Un disque solaire permet de prévoir la puissance reçue par une surface selon son orientation et son inclinaison. Dans l'hémisphère Nord, l'orientation optimale est le sud, quand à l'orientation optimale, elle dépend de la latitude du lieu.

Pour la ville de Paris, on voit par exemple (page suivante) que l'inclinaison optimale est de 38°. Si l'on dispose un panneau horizontalement, on captera 91% de la puissance maximale (centre du disque).

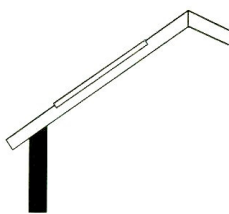
Disque solaire Ville de Paris



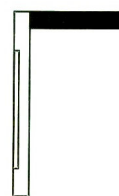
Source : Ademe

1.4.3 L'intégration architecturale

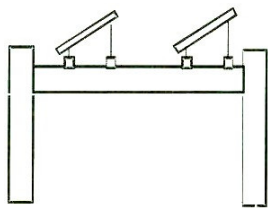
Généralement, l'installation de panneaux PV se fait sur un bâtiment, d'où l'intérêt de cette question pour éviter les risques liés à la sécurité des personnes et la gêne visuelle occasionnée par les panneaux. Il existe 4 types de poses principales.



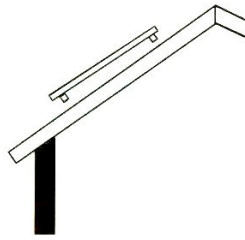
Pose en couverture intégrée



Pose en façade intégrée

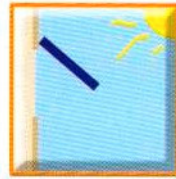


Pose en terrasse



Pose par-dessus la couverture

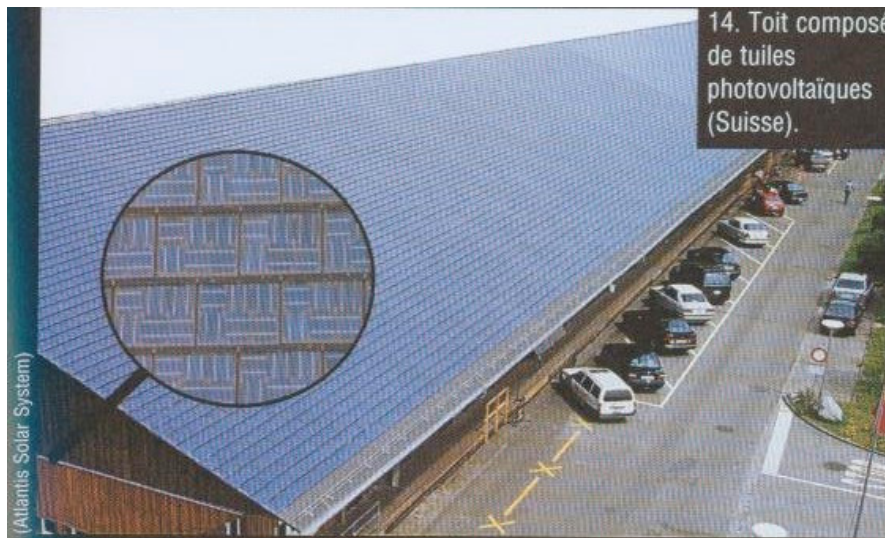
Dans certains cas, on pourra aussi intégrer les panneaux en brise-soleil ou en verrière ce qui est souvent très réussi architecturalement.



*Esthétique et
personnalisation
du bâtiment*

Installation en brise-soleil

Enfin, il existe des tuiles PV qui s'intègrent parfaitement aux toitures à la place de tuiles ordinaires et sont discrètes.

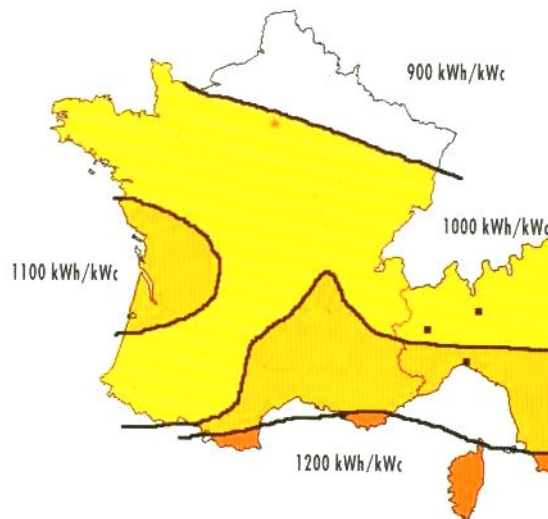


Tuiles photovoltaïques

1.4.4 Dimensionnement d'une installation PV et production annuelle

Le dimensionnement d'une installation se fait à partir des données météorologiques d'une zone ainsi que la surface disponible, l'orientation et l'inclinaison des éléments porteurs. On étudie aussi les ombres portées en appliquant un facteur correctif le cas échéant. Les disques

solaires vus précédemment permettent d'estimer la production d'une centrale PV. On estime que 1 kWc installé produit approximativement 1000kWh par an en France métropolitaine. Il y a cependant de légères variations selon les régions (voir carte page suivante).



Estimation de la production annuelle de 1kWc en France métropolitaine

1.4.5 Optimisation d'une installation

Pour optimiser la production d'une centrale photovoltaïque, on peut installer les panneaux sur des châssis suivant la trajectoire solaire du matin au soir.

De même, il est possible de régler l'inclinaison des panneaux en fonction de la saison. Il faut pour cela un plan peu incliné en été (30°) et très incliné en hiver (60°). On peut ajouter un niveau intermédiaire pour le printemps et l'automne (45°).

Toutefois, ces appareils peuvent alourdir l'installation et les bénéfices ne sont pas toujours évidents. La plupart des installations sont fixes en orientation et inclinaison.

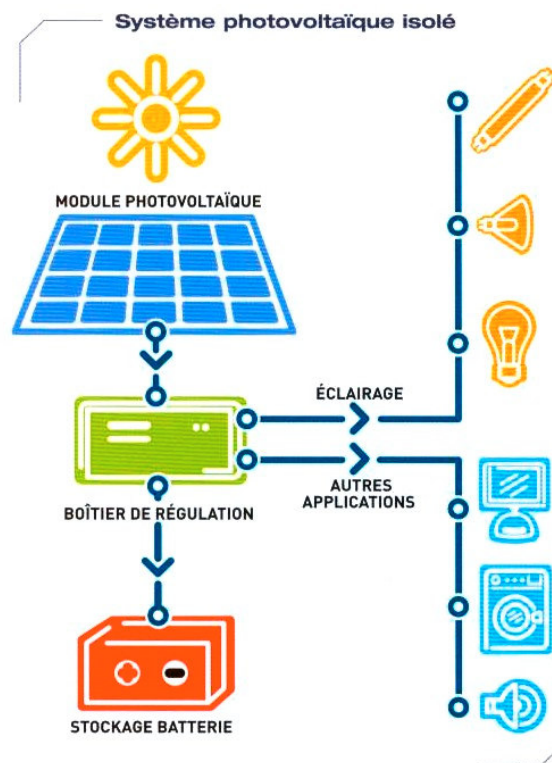
1.4.6 Destination du courant produit

Une fois le courant produit, il faut l'acheminer vers le consommateur. Il existe deux types d'installations. Historiquement, les panneaux PV ont d'abord été installés dans des sites isolés du réseau électrique. Avec l'abaissement des coûts de production, les raccordements au réseau se sont multipliés, bien souvent incités par des tarifs d'achat intéressants de l'électricité produite.

1.4.6.1 Installation en site isolé

Le photovoltaïque est bien souvent la solution la plus économique pour produire de l'électricité là où le raccordement au réseau électrique est impossible ou trop cher. Il peut s'agir de balises en pleine mer, d'habitations reculées dans des vallées sinueuses ou tout simplement de parcmètres.

Quelle que soit la puissance de l'installation, le principe est toujours le même : si la consommation d'électricité se fait jour et nuit, il faut stocker l'énergie sous forme chimique dans des accumulateurs (batteries.) L'adjonction d'un boîtier de régulation électronique est alors nécessaire pour charger correctement la batterie et prolonger sa durée de vie ainsi que celle des panneaux.



*Schéma d'une installation PV en site isolé avec stockage
Source : Total*

Cependant, les batteries demandent une surveillance assez contraignante, demandent à être changées souvent et sont très polluantes en fin de vie car elles ne sont pas vraiment recyclables pour la plupart des technologies.

On peut aussi utiliser l'électricité « au fil du soleil » pour pomper de l'eau quelques heures par jour par exemple. Le recours aux batteries est ainsi évité.

1.4.6.2 Installation raccordée au réseau

Depuis quelques années, les installations PV raccordées au réseau sont de plus en plus nombreuses et surpassent désormais largement les installations en site isolé en terme de puissance et de production.

L'avantage d'une connexion au réseau est l'absence de batteries et la possibilité de créer une petite unité de production de façon décentralisée. Il est possible de consommer tout ou une partie de la production électrique solaire et d'injecter l'excédent ou de se servir sur le réseau en cas de production insuffisante. On peut aussi tout injecter sur le réseau. Ces choix se traduisent par des régulateurs électroniques adaptés.

Il y a cependant une différence de taille entre l'électricité issue d'un champ de panneaux PV et celle circulant sur le réseau électrique. La première en courant continu de tension variable et la seconde en courant alternatif de tension fixe et de fréquence bien définie. Pour transformer le courant continu en courant alternatif, on utilise un convertisseur électronique de puissance CC/AC aussi appelé **onduleur**.

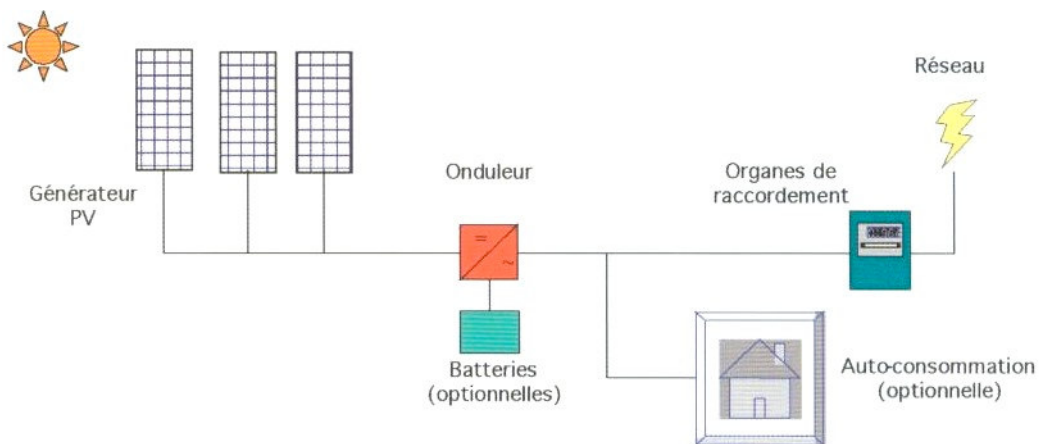


Schéma d'une installation PV raccordée au réseau électrique. Source :Ademe

2 Mes activités au sein de HomeEnergy

2.1 Mesures électriques sur des petits panneaux photovoltaïques

J'ai réalisé mes mesures sur deux petits panneaux photovoltaïques destinés à charger des batteries :

- L'un est de technologie au silicium polycristallin. Modèle : iSun de ICP Global. puissance crête : 2,2Wc. J'ai utilisé la position 12V caractérisée par une tension nominale de 15,2V et une intensité nominale de 145 mA. Les cellules sont disposées en 2 panneaux de 2 rangées de 18 cellules. Soit au total 72 cellules pour une surface de 192 cm². L'assemblage électrique est en série-parallèle.
- L'autre est de technologie amorphe. Modèle : Auto battery charger de Solera Les cellules sont en série. La surface active est de 42cm².

Ces mesures ont principalement consisté à tracer les caractéristiques courant-tension et puissance-tension sous différents éclairagements pour pouvoir comparer les rendements et leurs éventuelles variations.

2.1.1 Problèmes rencontrés et solutions apportées

Etant donné les moyens matériels limités mis à ma disposition, je n'ai pas pu réaliser des mesures dans les conditions que j'aurais souhaitées. En effet, pour comparer des panneaux solaires photovoltaïques, il est nécessaire de stabiliser et de connaître un certain nombre de paramètres comme la température et l'éclairement. Il est impossible d'effectuer des mesures au soleil même par une belle journée ensoleillée car l'éclairement varie à cause de la rotation de la Terre : entre le début et la fin des mesures, le soleil peut avoir tourné de 10° ce qui fausse complètement le comparatif.

J'ai donc réalisé mes mesures sous des éclairages artificiels : lampes à incandescence de différentes puissances.

2.1.2 Le matériel

Outre les deux panneaux PV, je disposais de plusieurs multimètres, d'une gamme de résistances allant de quelques Ω à plusieurs $M\Omega$, de connexions électriques stables et d'une plaquette électronique.

2.1.3 Le dispositif expérimental

Le dispositif est constitué d'une source lumineuse stable faisant face au panneau PV. Ce dernier est relié à la plaquette électronique où l'on place différentes charges (résistances) pour faire varier la tension et le courant.

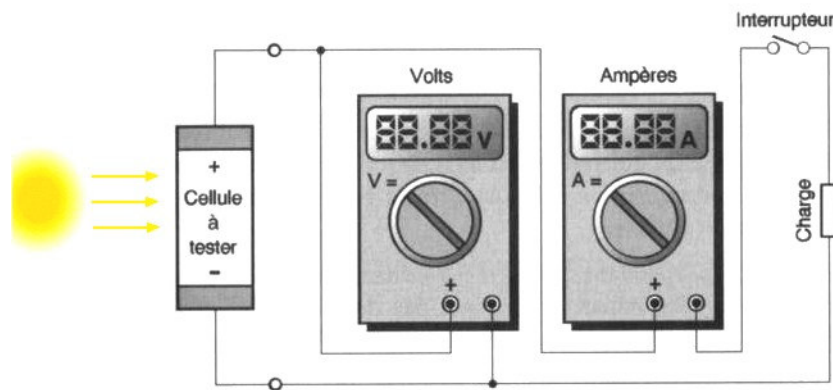


Schéma du montage expérimental

2.1.4 Les caractéristiques courant – tension et puissance – tension

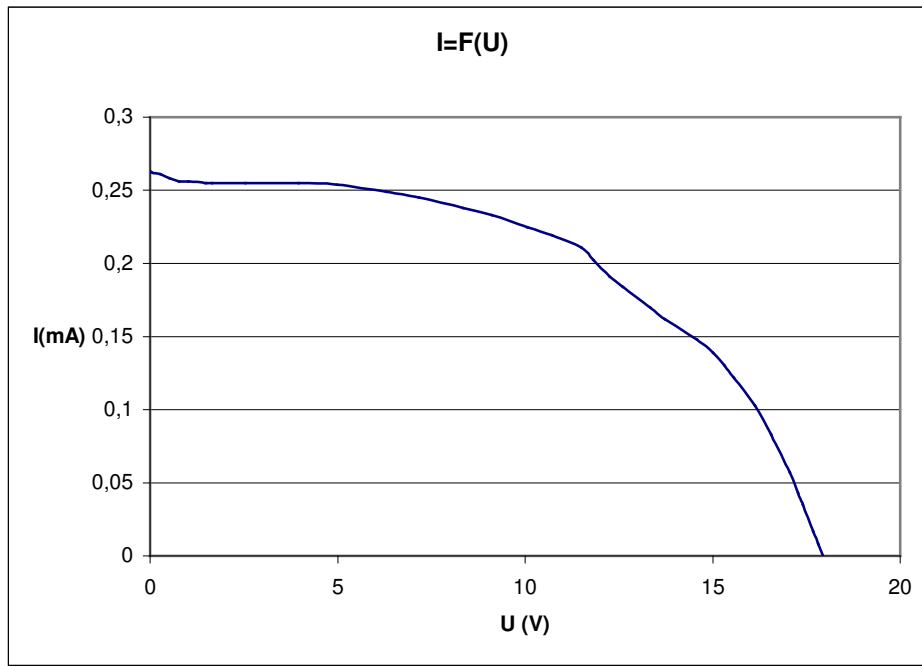
On part d'une résistance nulle en branchant un ampèremètre aux bornes du panneau pour mesurer le courant de court circuit I_{cc} . La tension est alors nulle.

Puis on branche une charge comme indiqué sur le schéma ci-dessus. On relève alors simultanément le courant et la tension.

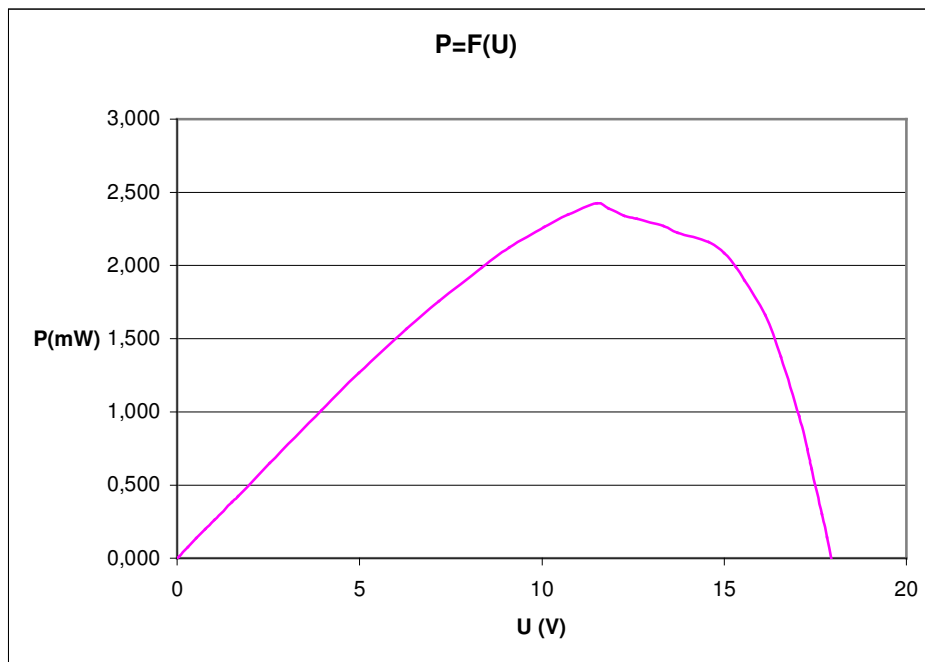
Dans un premier temps, plus la résistance électrique augmente, plus la tension augmente. Le courant quant à lui reste stable.

Dans un second temps, le courant baisse légèrement et la tension augmente peu : nous sommes dans la zone du point de puissance maximale P_{MPP} .

Dans un troisième temps, le courant baisse fortement et la tension augmente très peu.



Exemple d'une caractéristique courant-tension obtenue avec le panneau amorphe et une lampe de 100W



Exemple d'une caractéristique puissance-tension obtenue avec le panneau amorphe et une lampe de 100W

2.1.5 Les résultats obtenus

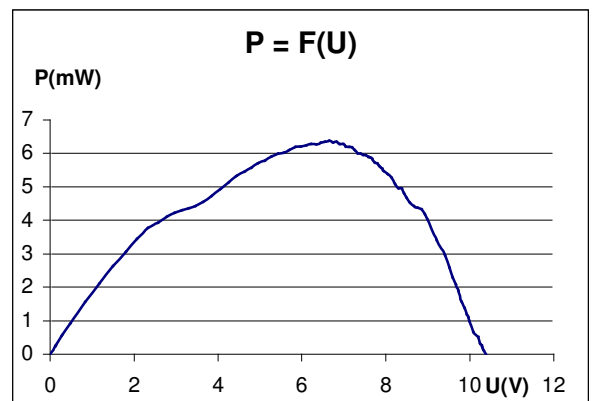
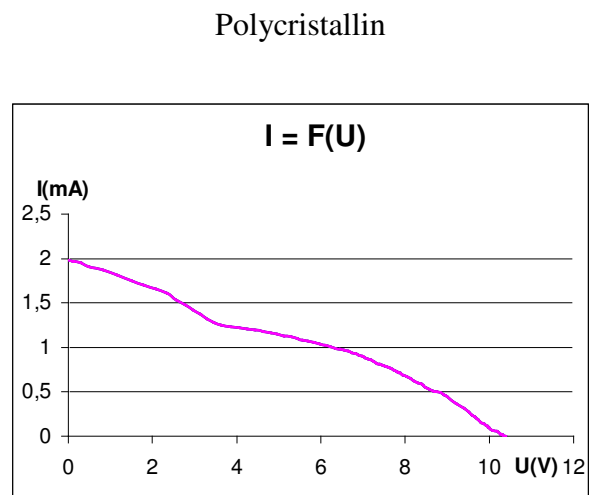
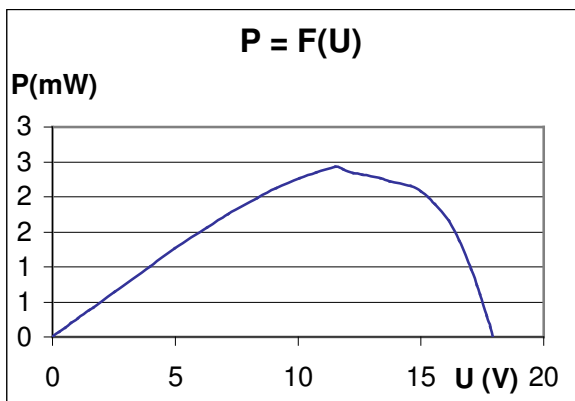
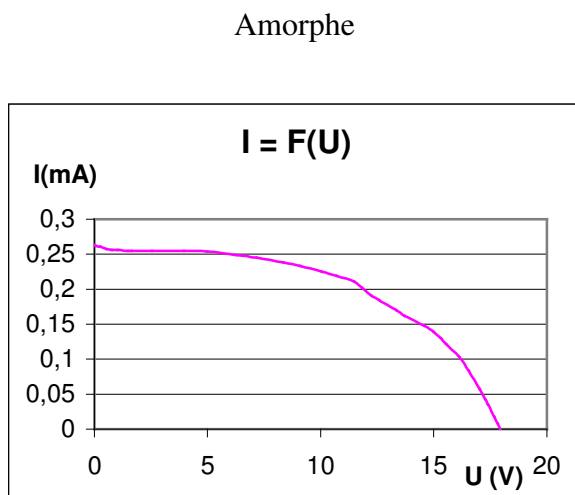
Les courbes obtenues sont parfois loin des caractéristiques obtenues par les constructeurs. Les conditions de mesures sont certainement à prendre en compte. Je n'ai en fait réalisé que deux séries de mesures avec chaque panneau. Cela peut paraître peu mais devant les résultats obtenus et le manque de données initiales, il était quelque peu décourageant de continuer les mesures.

J'ai réussi à estimer l'éclairement par comparaisons avec d'autres situations lumineuses. Par exemple, par une journée très ensoleillée, l'éclairement est de l'ordre de 100 000 lux, par temps couvert, il est proche de 5 000 lux. Dans un local très bien éclairé, au voisinage d'une fenêtre, l'éclairement est de 1000 lux. Le lux est une unité caractérisant la puissance lumineuse dans le spectre visible. Il n'y a pas de correspondance directe entre les W/m² et les lux, cela dépend du spectre de la source considérée. Cette unité permet toutefois une approche intéressante pour comparer des éclairagements.

2.1.5.1 Mesures à 2000 lux

La première série de mesures s'est effectuée avec une lampe de 100W et une boîte blanche pour concentrer la lumière sur la cellule. Dans un premier temps, la température augmentait significativement perturbant les mesures. La lampe à incandescence a donc été remplacée par une lampe basse consommation afin de stabiliser la température tout en ayant un bon éclairage.

Voici les caractéristiques obtenues :



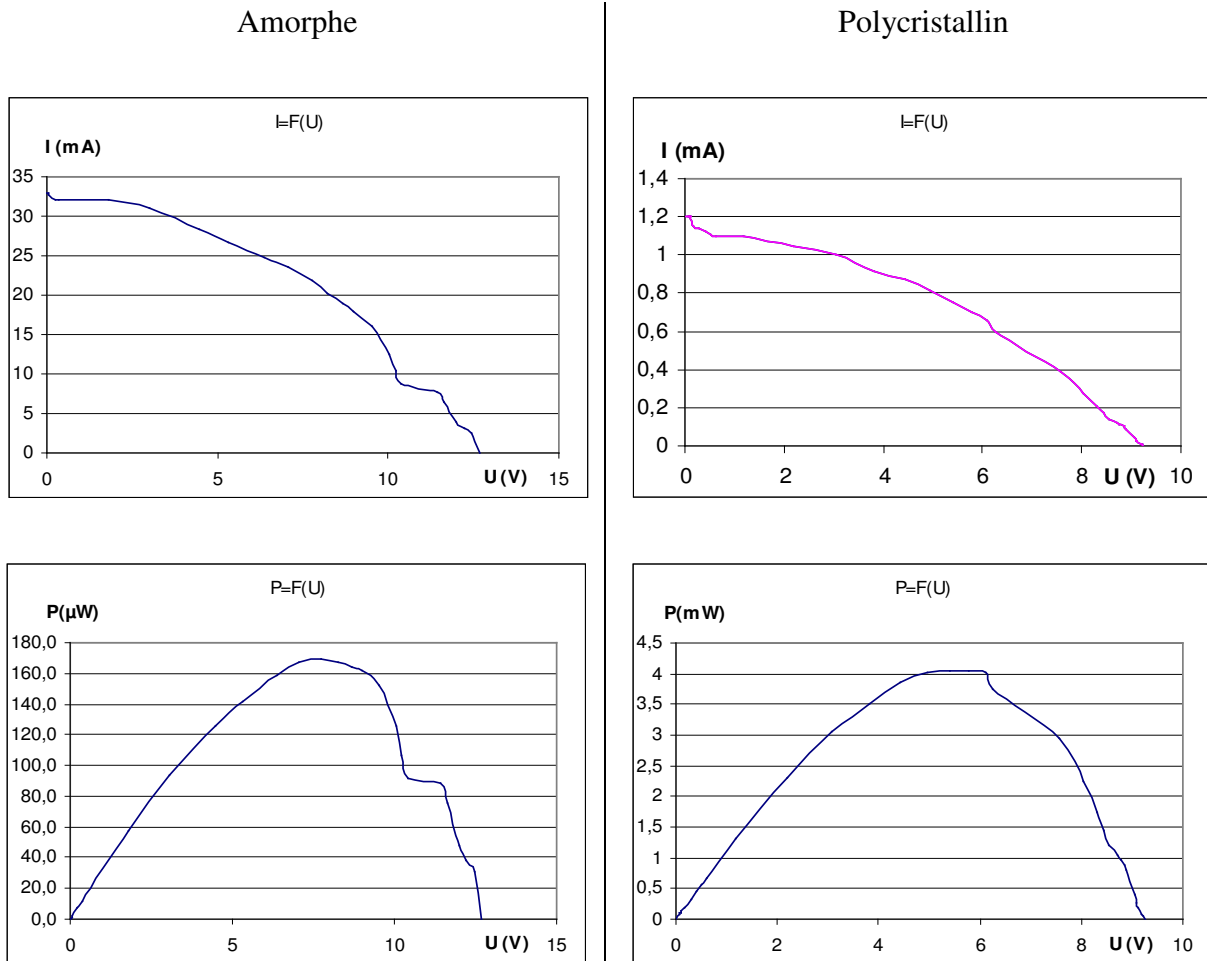
Amorphe		Polycristallin	
$P_{MPP} = 2,4 \text{ mW}$	$FF = 0,52$	$P_{MPP} = 6,4 \text{ mW}$	$FF = 0,31$
$U_{MPP} = 11,5 \text{ V}$	$U_{co} = 17,94 \text{ V}$	$U_{MPP} = 6,65 \text{ V}$	$U_{co} = 10,38 \text{ V}$
$I_{MPP} = 0,21 \text{ mA}$	$I_{cc} = 0,26 \text{ mA}$	$I_{MPP} = 0,96 \text{ mA}$	$I_{cc} = 1,98 \text{ mA}$

On remarque que la puissance maximale délivrée par le module polycristallin est 2,7 fois supérieure à celle délivrée par le panneau amorphe, alors que le rapport de surface est de 4,5. Le panneau amorphe présente donc un meilleur rendement que le panneau polycristallin avec un éclairage de 2000 lux.

2.1.5.2 Mesures à 200 lux

Les mesures s'effectuent ici avec une lampe de 40W. Le protocole expérimental reste inchangé.

Voici les caractéristiques obtenues :



Amorphe		Polycristallin	
$P_{MPP} = 169,2 \mu W$	$FF = 0,40$	$P_{MPP} = 4,1 mW$	$FF = 0,37$
$U_{MPP} = 7,76 V$	$U_{co} = 12,7 V$	$U_{MPP} = 5,85 V$	$U_{co} = 9,25 V$
$I_{MPP} = 21,8 \mu A$	$I_{cc} = 33 \mu A$	$I_{MPP} = 0,7 mA$	$I_{cc} = 1,2 mA$

On remarque que la puissance maximale délivrée par le module polycristallin est 8,7 fois supérieure à celle délivrée par le panneau amorphe. Le panneau amorphe présente donc un rendement moins bon que le panneau polycristallin avec un éclairage de 200 lux.

2.1.5.3 Commentaires sur les mesures

L'allure des courbes courant-tension par rapport à la théorie parle d'elle même : les mesures effectuées sont peu fiables pour comparer strictement les performances des panneaux PV. En revanche, on peut comprendre le comportement général des panneaux en fonction de l'éclairage et de la température.

Le paramètre de facteur de forme FF est intéressant pour estimer l'éloignement d'une courbe courant-tension réelle avec la caractéristique idéale. En théorie, FF vaut environ 0,7. Plus FF baisse et plus on s'éloigne de la caractéristique théorique. Par exemple, à 2000 lux pour le panneau amorphe, on a $FF = 0,52$ et l'on constate graphiquement que l'on est proche d'une caractéristique idéale. Par contre, pour le polycristallin, FF est désastreux ($FF = 0,31$) et on ne reconnaît pas la caractéristique courant – tension d'une photopile. Le graphe ressemble plus à une fonction affine décroissante.

La méthode utilisée pour l'expérience est fortement contestable : la lumière choisie ne correspond pas à un ensoleillement réel, il n'y a pas eu de répétabilité des mesures. De plus, il aurait mieux fallu utiliser un potentiomètre à la place de résistances de valeurs discontinues. La meilleure méthode aurait été de balayer en tension à l'aide d'un potentiostat relié à un ordinateur, mais cela est bien en dehors du budget de HomeEnergy.

Il est difficile de calculer le rendement des panneaux étant donné qu'on ne connaît pas la puissance de l'éclairage incident, mais étant donné les autres problèmes liés à la méthode, il semble superflu de vouloir essayer de calculer le rendement des panneaux en faisant mine d'y accoler une incertitude.

Je suis assez déçu des problèmes rencontrés dans mes mesures et regrette que HomeEnergy n'ait pu me permettre de réaliser un vrai comparatif de panneaux PV.

2.1.5.4 Mesures en plein soleil

J'ai tout de même tenté d'effectuer des mesures en plein soleil, mais sans tracer les caractéristiques précédentes.

Pour le panneau polycristallin, on a alors un courant de court circuit $I_{cc} = 85$ à 105 mA soit 43 à 53 fois la valeur obtenue pour les mesures à 2000 lux. On voit bien que le courant est proportionnel à l'ensoleillement car $2000 \times 50 = 100\,000$ lux, soit approximativement l'éclairement en plein soleil.

Je n'ai pas réussi à obtenir un courant de court circuit supérieur à 110mA, alors que le courant nominal est de 145mA. Même en plein soleil, avec une orientation et une inclinaison adaptées, l'éclairement était en dessous de 1000W/m². Cependant, je ne remets absolument pas en cause le potentiel solaire pour le PV en Normandie ou ailleurs.

2.2 Exposition sur les énergies renouvelables

Le but de l'association est surtout de sensibiliser les gens aux intérêts des énergies renouvelables. C'est pour cette raison que nous avons organisé une exposition sur ce thème les 3 et 4 juin, à la salle polyvalente sous la mairie de Lieurey.

2.2.1 Préparation de l'exposition

Je suis un peu à l'origine de cette exposition, car les précédentes n'ayant pas vraiment porté leurs fruits, les membres de l'association étaient assez découragés pour faire une nouvelle exposition et aller à la rencontre des citoyens qui s'interrogent et des consommateurs qui deviennent raisonnables. Etant intéressé par tout ce qui touche de près ou de loin aux EnR, je me suis proposé pour réaliser des panneaux pédagogiques pour présenter les différentes familles : eau, vent, soleil...

J'ai rédigé le communiqué de presse pour inciter les curieux à venir voir notre exposition. Tous les journalistes alentours l'on normalement reçu. J'ai également élaboré l'affiche de l'événement que nous avons diffusé à plusieurs dizaines d'exemplaires. Bien sur tout cela est modeste mais reste à l'échelle des moyens de l'association.

2.2.2 Accueil des visiteurs

Nous avons reçu une cinquantaine de visiteurs sur deux jours. Leurs questions ont été très variées. Nous avons donné des conseils essentiellement sur la pompe à chaleur (ou géothermie très basse température) et le solaire thermique. Dans une moindre proportion, vient l'intérêt pour les panneaux photovoltaïques et les éoliennes de petite puissance. Certains visiteurs sont venus grâce au communiqué de presse dans le journal local, d'autres sont venus poussés par la curiosité en passant à proximité de l'exposition.

Au cours de cet événement, nous avons appris que les habitants aux alentours de Lieurey sont privés des informations liées aux actualités et au développement des énergies renouvelables. A cause de ce problème, ils sont plutôt indifférents envers les avantages de l'utilisation des énergies renouvelables. Le fait de ne pas savoir qu'il existe des aides (soit financières, soit des conseils) à leur disposition ralentit les prises de décisions.

En fin de compte, cette exposition et les conseils que nous avons donnés ont constitué une expérience très intéressante faisant appel à de nombreuses qualités requises dans le secteur des EnR : pédagogie, écoute, propositions de solutions adaptées...

2.3 Diagnostic énergétique

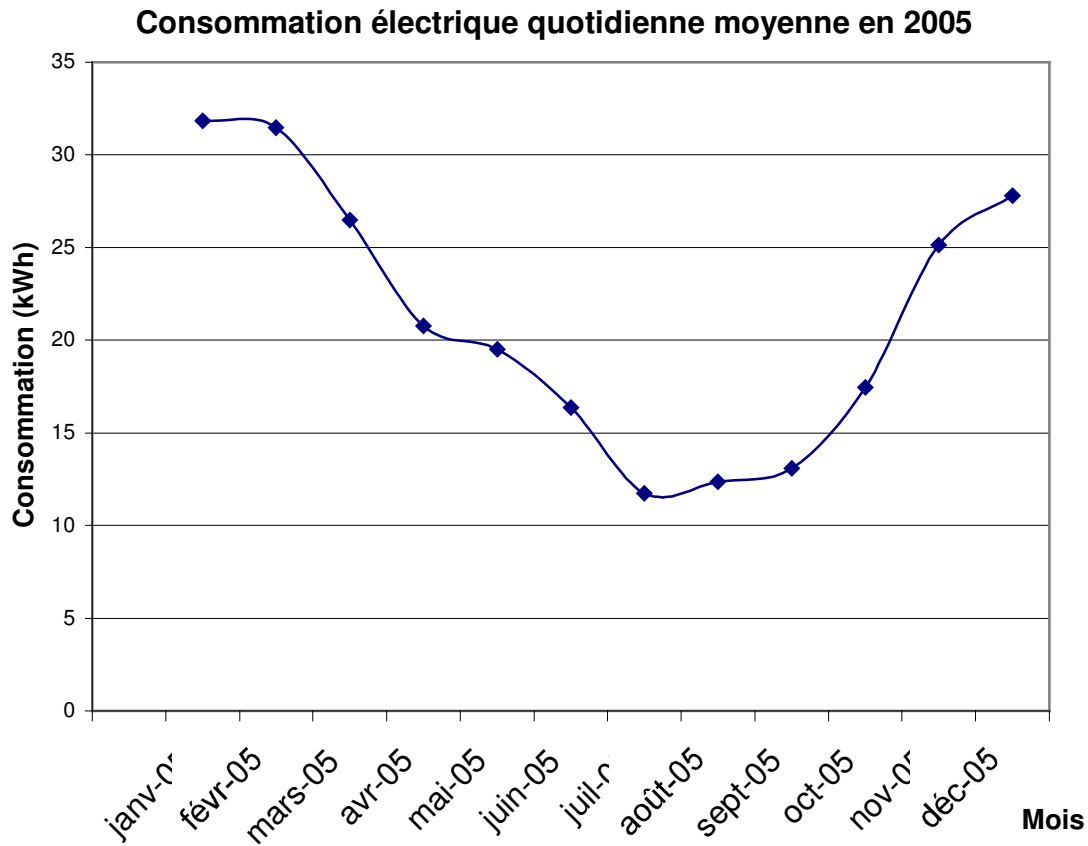
Parallèlement au sujet principal de mon stage, je me suis penché sur la consommation d'énergie électrique car il n'existe pas de réelle politique en faveur des énergies renouvelables sans maîtrise de l'énergie. Combien les locaux de HomeEnergy consomment-ils par an ? Quel est le montant de la facture énergétique ? Bien avant moi, d'autres se sont posé les mêmes questions, ce qui m'a facilité le travail.

2.3.1 Les relevés EDF

Depuis décembre 2004, un relevé quotidien de la consommation électrique est effectué dans un souci de maîtrise de la consommation d'énergie électrique. La température intérieure et extérieure est également relevée afin de voir son influence sur la consommation électrique car les locaux sont équipés de radiateurs électriques. J'ai participé à la mise en forme de tous ces chiffres pour qu'ils soient exploitables.

En 2005, la consommation électrique totale des locaux s'est élevée à 7705 kWh :

- 3279 kWh en Heures Pleines (HP)
- 4426 kWh en Heures Creuses(HC)



On observe sur le graphique de la page précédente qu'il existe de grandes variations entre la consommation hivernale et estivale. L'hypothèse la plus évidente est que le chauffage électrique soit responsable de ces écarts si importants. Mais il y a aussi le ballon d'eau chaude qui doit réchauffer une eau plus froide en hiver qu'en été. De plus, la maison est mal isolée et subit donc de plein fouet les variations de températures.

2.3.2 Consommation des appareils électriques

2.3.3 Les économies d'énergie à réaliser

2.4 Visites

Au cours de ce stage, j'ai eu l'occasion de réaliser des visites intéressantes concernant les énergies renouvelables et plus particulièrement le solaire PV. Il y a eu deux visites majeures qui m'ont permis de rencontrer d'autres professionnels du secteur. J'ai ainsi pu mieux situer la place de HomeEnergy au sein de ce secteur en plein essor.

2.4.1 Le salon des énergies renouvelables

J'ai assisté à la 4^e édition de ce salon qui se tenait à la Porte de Versailles à Paris du 15 au 17 juin. Tous les types d'énergies renouvelables étaient bien entendu représentés, mais j'ai essayé de cibler mes rencontres autour du PV et de la maîtrise de l'énergie. Cela n'a pas été facile car les exposants étaient nombreux et je m'intéresse plus largement à tous les types d'EnR.

Mes questions n'ont pas toujours trouvé de réponse car sur un tel salon, les techniciens se font plus rares que les commerciaux, pas toujours bien informés sur ce qu'ils comptent vendre. J'ai pris des contacts pour un éventuel stage l'an prochain. L'expérience de cette année m'a fait comprendre qu'il faut vraiment s'y prendre à l'avance si l'on veut un stage de qualité.

Ce salon a été pour moi l'occasion de me préparer à d'autres événements du même genre si je travaille dans le secteur des EnR dans quelques années. Il est important d'avoir des repères dans un secteur d'activité spécialisé comme celui-ci.

2.4.2 Le toit bleu du Comité de Liaison des EnR à Montreuil

J'ai beaucoup étudié théoriquement les panneaux solaires, mais à cause d'un manque aigu de moyens, je n'avais pas eu l'occasion de voir un système PV grandeur nature.

Grâce au Comité de Liaison des EnR (CLER), j'ai pu visiter à la fin de mon stage une centrale PV de 22 kWc pour 220 m² de panneaux polycristallins de 110Wc chacun. L'orientation des panneaux est plein sud et l'inclinaison de 35° pour profiter au maximum du soleil de mai-juin. Il y a 6 zones de panneaux et 9 unités électriques de 2,2 ou 2,6 kWc reliées à un onduleur de 2 ou 2,5 kW.

La production annuelle estimée est de 20000kWh, mais elle est jusqu'à présent toujours supérieure. Dans le bâtiment, un écran permet de visualiser diverses informations sur la centrale : puissance et éclairage instantanés, température des modules, production journalière et cumulée.

Cette installation, qui évite l'émission de 12 tonnes de CO₂ par an, se trouve sur la terrasse d'un HLM à Montreuil (93). Elle a été initiée par Greenpeace et le CLER, étudiée par le bureau d'études Hespul, réputé pour son expérience en photovoltaïque et financée par divers acteurs (Europe, Région, OPHLM...).

Depuis sa mise en service en avril 2002, la centrale a produit près de 95000 kWh, soit 27 fois la consommation électrique annuelle d'un foyer moyen (2 adultes et 2 enfants) hors chauffage. Certains mois, la production électrique dépasse les 3000 kWh. En décembre, la production est au minimum avec 350 kWh environ.

Lors de ma visite, le ciel était couvert et il a même plu, l'éclairage était en conséquence assez bas (300W/m²) et pourtant la centrale présentait une puissance instantanée de 60kW. Le rendement baisse un peu avec la luminosité (-10%) mais le résultat est intéressant à voir.

Conclusion

Ce stage m'a permis de prendre un premier vrai contact avec le monde du travail et de tester mes possibilités d'adaptation personnelles. J'ai eu l'occasion de mettre en pratique les connaissances apprises au cours de mon D.U.T. que ce soit en électronique, propriétés des matériaux, optique ou encore en communication.

Dans l'ensemble, je pense qu'il s'agit d'une expérience enrichissante de par les rencontres faites et la documentation mise à disposition que j'ai beaucoup consulté, mais un problème inhérent à cette petite association sur le plan des finances et du matériel a constitué un obstacle à la réalisation des mesures que je comptais faire. En effet, les comparaisons de panneaux solaires s'effectuent dans des normes données avec des paramètres connus et fixes : je n'avais même pas de luxmètre pour quantifier la luminosité!

J'ai apprécié la partie du stage consacrée au diagnostic énergétique de l'habitation qui m'a permis de faire le lien avec l'un de mes objectifs professionnels : maîtriser la consommation énergétique. Je connais désormais de nombreux ordres de grandeurs pour des appareils électriques et sais évaluer leurs performances énergétiques. Mon objectif étant une licence professionnelle abordant entre autres la maîtrise de l'énergie, je pense que c'est une expérience qui me sera utile. J'aimerais à terme devenir économe de flux : ce métier consiste à organiser les économies d'énergies et d'eau au sein d'une collectivité locale en s'appuyant sur des arguments techniques et économiques. Il est d'ailleurs difficile de tenir des engagements de consommation sobres même pour des personnes volontaires sur le sujet. Trop de gaspillages subsistent, c'est un travail où il faut beaucoup de patience et de détermination.

De façon générale, je voyais d'un bon œil l'univers associatif de par mes affinités personnelles mais je me suis rendu compte que si certaines associations ont un fonctionnement très professionnel, ce n'était pas toujours le cas chez HomeEnergy. Cela ne m'a pas démotivé pour travailler dans le secteur associatif mais je serai plus attentif à l'avenir sur le sérieux de mes interlocuteurs. Ceci étant, HomeEnergy peut devenir un acteur local des énergies renouvelables en élargissant son champ de compétences.

Parfois, les tâches effectuées n'étaient pas en rapport direct avec mon sujet initial : j'ai donc appris que le monde du travail est aussi fait de concessions.

Bibliographie

- *Le soleil pour tous - initiation à l'énergie solaire pratique*, Raymond BRUCKERT, Au signal, Lausanne, 1980.
- *Les cellules solaires*, F. JUSTER, Editions Techniques et Scientifiques Françaises, Paris, 1980
- *Cellules solaires - les bases de l'énergie photovoltaïque*, Anne LABOURET, Pascal CUMUNEL, Jean-Paul BRAUN, Benjamin FARAGGI, Editions Techniques et Scientifiques Françaises, Paris, 2003
- *Systèmes Solaires, L'observateur des énergies renouvelables* :
n°149 : mai - juin 2002 ; n°166 : mars - avril 2005 ; n°172 : mars - avril 2006
- *La conversion des énergies*, Régis DAVID, coll. " Que sais-je " n°1205, Presses Universitaires de France, 1966
- *L'énergie solaire*, Roger PEYTURAUX, coll. " Que sais-je " n°1294, Presses Universitaires de France, 1968
- *Perseus - Guide des installations photovoltaïques raccordées au réseau électrique destiné aux usagers*, Rhônealpeénergie-Environnement, Lyon, juillet 2002
- *La maison écologique* n°9, Dossier " solaire photovoltaïque : comment tomber dans le panneau ! ", Vire, juin - juillet 2002
- *Renewable Energy Journal* n°10, Systèmes Solaires & The Franklin Company Consultants Ltd. , juin 2000
- *CLER infos* n°42, " Dossier : Solaire photovoltaïque ", Comité de Liaison des Energies Renouvelables, Montreuil, juillet - août 2004
- *Le baromètre européen 2005 des énergies renouvelables*, EurObserv'ER, Paris, décembre 2006
- Rapport de stage de Nicolas BODEREAU, " *Etude du système d'expérimentation de cellules photovoltaïques en couche mince à base de CuInSe₂ électrodéposé* ", I.U.T. Paris Jussieu, 2002
- *Le Monde, Dossiers et documents* n°9 - mars 2006

Annexes

Affiche annonçant l'exposition sur les EnR

Photos de l'exposition sur les EnR

Article paru dans le journal local *L'éveil de Pont-Audemer*