

Projet de Physique P6
STPI/P6/2015 – #41

Le solaire photovoltaïque. Principe et applications.



Étudiants :

Adrian CHANTREUX

Adrien LATIL

Manon LEBRETON

Benjamin NEUVILLE

Ayoub NOUIBI

Jeremy RANTY

Alexiane VALERA

Enseignant-responsable du projet :

Monsieur Jamil ABDUL AZIZ

Date de remise du rapport : **15/06/2015**

Référence du projet : **STPI/P6/2015 – 41**

Intitulé du projet : ***Le solaire photovoltaïque. Principe et applications.***

Type de projet : ***Bibliographie et expérimentation.***

Objectifs du projet :

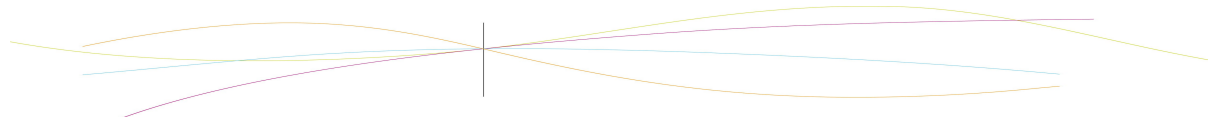
- ***Découvrir plus en détail le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque.***
- ***Vérifier les valeurs théoriques par l'expérience.***
- ***Gestion d'un projet : mise en commun, travail d'équipe, répartition du travail***

Mots-clefs du projet :

- ***énergie***
- ***photovoltaïque***
- ***panneaux solaires***

Sommaire

| | |
|--|----|
| 1.Introduction..... | 5 |
| 2.Méthodologie / Organisation du travail..... | 6 |
| 2.1.Découverte du sujet et répartition du travail..... | 6 |
| 2.2.Rédaction du dossier | 7 |
| 3.Aspect théorique..... | 8 |
| 3.1.Fabrication et fonctionnement des panneaux photovoltaïques..... | 8 |
| 3.2.Caractéristiques d'un panneau photovoltaïque..... | 12 |
| 3.3.Étude théorique du rendement par rapport à l'orientation et à l'inclinaison..... | 14 |
| 4.Aspect Expérimental | 16 |
| 4.1.Présentation du matériel fourni..... | 16 |
| 4.2.Expériences prévues et réalisées..... | 16 |
| 5.Les différents types de cellules photovoltaïques..... | 18 |
| 6.Constraints et limites..... | 21 |
| 7.Conclusions et perspectives..... | 22 |
| 8.Annexes..... | 23 |
| 8.1.Schémas de montages..... | 23 |
| 8.2.Propositions de sujets de projets..... | 25 |
| 8.3.Un peu d'histoire..... | 25 |
| 8.4.Enjeux sociaux, économiques et environnementaux..... | 26 |
| 8.5.Aspect administratif et juridique..... | 28 |
| 8.6.Innovations..... | 30 |
| 9.Bibliographie..... | 33 |



1. INTRODUCTION

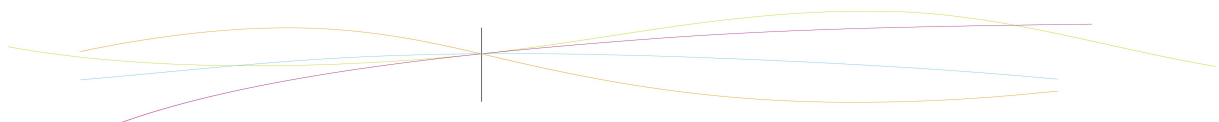
Au cours de notre quatrième semestre, nous avons participé à un projet de physique (P6). Dans notre groupe de 7 étudiants, nous nous sommes intéressés à un thème : le photovoltaïque. Ainsi, chaque semaine, sur un créneau horaire de 1h30, nous avons élaboré ce projet, en présence et avec l'aide de notre enseignant, M. Abdul Aziz.

Notre choix s'est porté sur l'énergie photovoltaïque c'est-à-dire sur l'avenir des énergies renouvelables et également sur le fait que c'est une partie abondante du marché de l'exploitation des énergies vertes, et donc une priorité pour de nombreuses puissances mondiales. L'énergie photovoltaïque est ainsi en plein développement et devrait être compétitive sur le marché énergétique dans les années à venir. Le marché du photovoltaïque est évalué à 77,5 milliards de dollars par an ; 29% de la production revient à l'Europe avec dans celle-ci l'Allemagne en tête. Cette production fournit environ 3% de l'électricité en Europe.

Afin de réaliser ce projet, l'INSA de Rouen a investi dans un véritable panneau photovoltaïque. De plus, ce projet étant mis en place pour la deuxième année consécutive, nous avons eu la chance de bénéficier d'un panneau photovoltaïque muni d'un support inclinable. Grâce à ce support, nous pourrions illustrer et mieux comprendre la partie théorique. En effet, nous avons pour objectif de réaliser des expériences et, ainsi, vérifier les résultats théoriques.

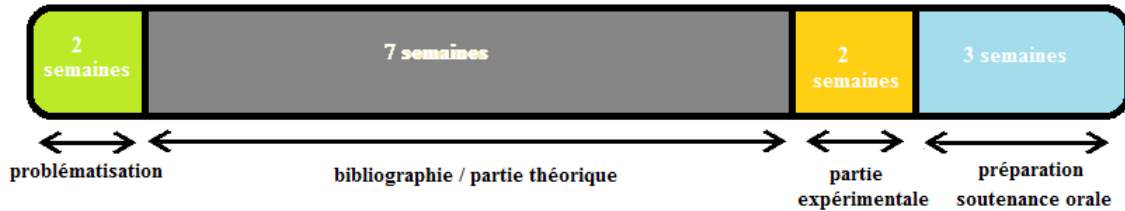
Nous allons au cours de ce projet, tenter de comprendre le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque et de réaliser une bibliographie sur le photovoltaïque. Par la suite, nous tenterons d'appliquer ces connaissances afin de réaliser une expérience permettant d'allumer une lampe grâce à l'énergie solaire.

Par ailleurs, en tant que futurs ingénieurs, nous avons abordé ce projet de P6 dans l'optique de conception et de direction de projet. En effet, notre formation va nous amener à diriger une équipe et ce projet pourra nous permettre à plus petite échelle de nous rendre compte du travail d'équipe. En outre, ce travail demandait de la rigueur et une certaine aisance dans le travail d'équipe, tout en sachant rester autonome.



2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

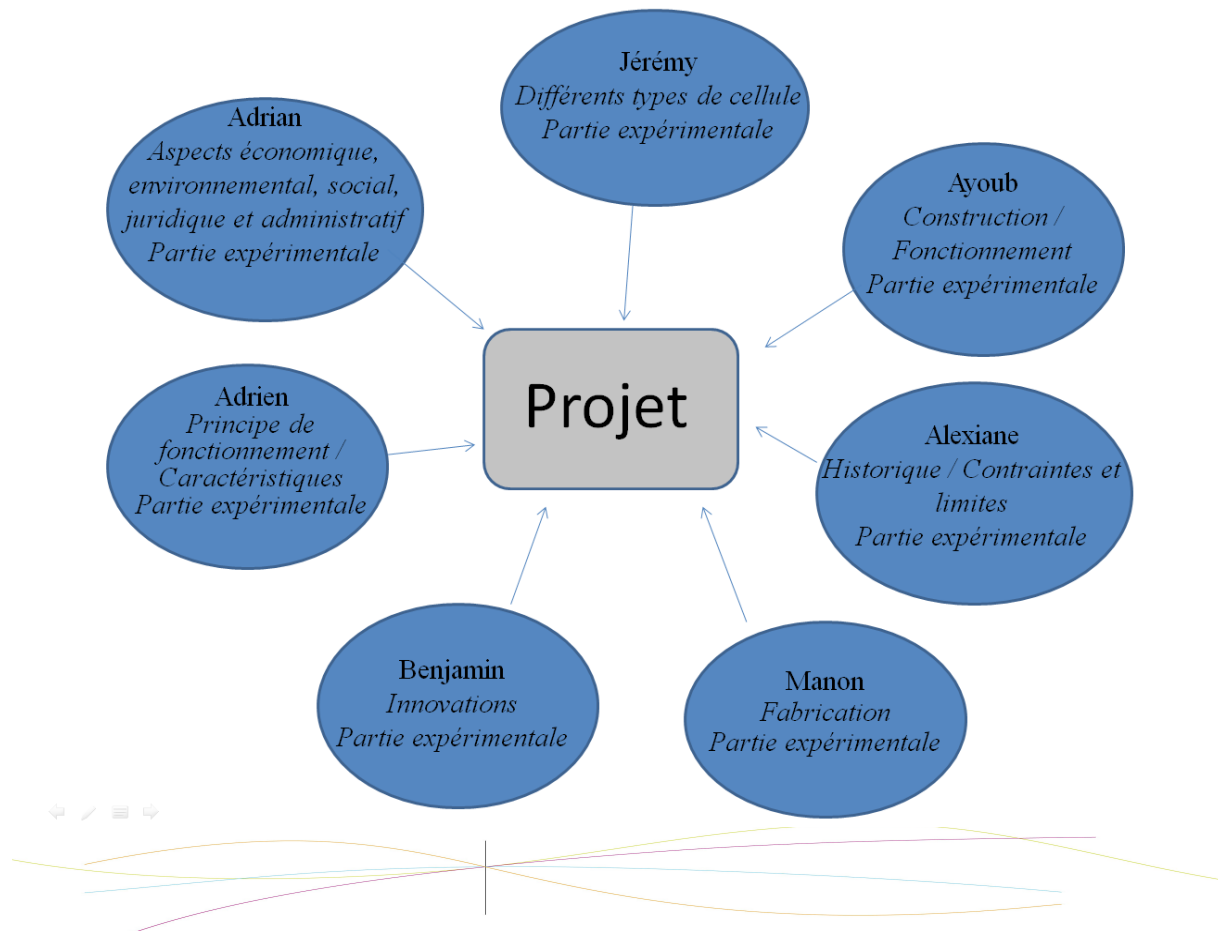
2.1. Découverte du sujet et répartition du travail



Lors des premières séances nous avons décidé de mener des recherches individuelles pour découvrir notre sujet de projet afin de se faire une idée sur les panneaux solaires photovoltaïques. Nous avons pu constater à quel point le sujet était vaste, et qu'il fallait être rigoureux dans la répartition du travail.

Ainsi, individuellement ou par binômes, nous avons choisi un thème de la partie théorique sur lequel travailler pour ensuite le présenter au reste du groupe. Cette méthode de travail nous a permis de couvrir rapidement l'ensemble du sujet tout en le faisant partager régulièrement au reste du groupe.

Par la suite, nous nous sommes occupés tous ensemble de la partie expérimentale qui nous semblait la partie la plus importante. Nous avons fait notre expérience à un moment où la plupart des membres du groupe pouvaient être présents. Puis nous avons fait le compte rendu de nos travaux aux élèves manquants.

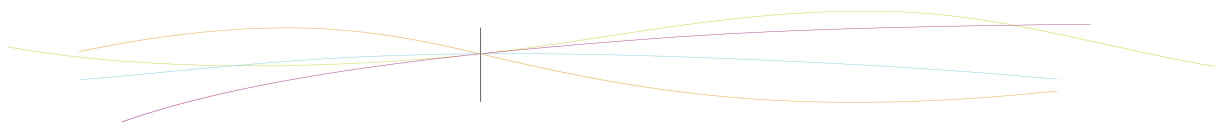


Enfin, nous voulions réserver les dernières séances en groupe afin de préparer la soutenance, car il est important pour nous de se préparer de la meilleure façon possible. En effet, nous avons tout d'abord décidé quels thèmes de notre projet seraient abordés. Enfin, nous avons réalisé notre diaporama pour permettre à l'auditoire de nous suivre.

2.2. Rédaction du dossier

Étant donné la nécessité d'un ensoleillement conséquent pour effectuer nos expériences, nous avons été contraints de rédiger le dossier en deux temps. Tout d'abord, nous nous sommes efforcés de rédiger au cours de chaque séance, les recherches effectuées au préalable concernant la partie théorique. Puis, à la suite de notre travail expérimental, nous avons mis au propre tous les résultats de nos manipulations.

Enfin, lors de nos dernières séances, nous avons complété le dossier et peaufiné les détails de mise en page, avant de préparer la soutenance de notre projet.



3. ASPECT THÉORIQUE

3.1. Fabrication et fonctionnement des panneaux photovoltaïques

3.1.1. Principe

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule photovoltaïque, basée sur un phénomène physique nommé l'effet photovoltaïque. Ce dernier consiste à produire un courant lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

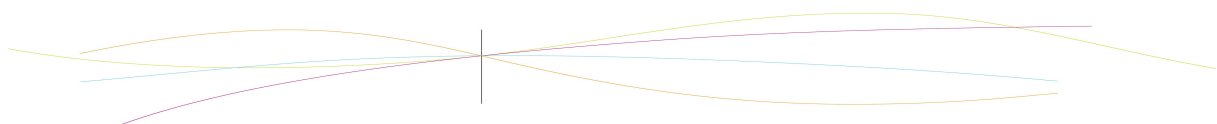
À ce jour, il existe deux technologies de cellules photovoltaïques : les cellules dites cristallines (polycristallines et monocristallines) et les cellules dites couches minces. Le constituant essentiel d'une cellule photovoltaïque responsable de l'effet photovoltaïque est un semi-conducteur. Un matériau semi-conducteur est un matériau isolant dans les conditions normales qui devient un conducteur électrique lorsqu'on lui apporte de l'énergie. Cette énergie permet aux électrons de se détacher des noyaux des atomes et de se déplacer librement dans la structure du matériau. Lorsque cette énergie est apportée sous forme lumineuse, ce sont les photons de la lumière qui cèdent leur énergie aux électrons. On parle alors d'effet photoélectrique. Le principe d'une cellule photovoltaïque est d'exploiter ce déplacement d'électrons pour le convertir en un courant électrique utilisable. Le semi-conducteur le plus utilisé aujourd'hui est le silicium¹.

La fabrication des cellules photovoltaïques se fait en plusieurs étapes : l'extraction et la purification du silicium photovoltaïque puis l'obtention des lingots de silicium ensuite l'obtention des wafers photovoltaïques et enfin le dopage et la jonction P-N.

3.1.2. Extraction et purification du silicium

Le silicium (Si) n'existe pas tel quel dans la nature, il est donc extrait de la silice (SiO_2) ou oxyde de silicium contenu dans le quartz ou le sable grâce à une réduction carbothermique² simplifiée suivante : $SiO_2 + 2C \rightarrow Si + 2CO$. Cette réaction se réalise dans un four à arc³ car elle nécessite de faire fondre la silice à des températures très élevées. De toute la chaîne de production des modules photovoltaïques, c'est l'étape la plus consommatrice en énergie. En effet, il faut environ 14 kWh électriques pour produire 1 kg de silicium métallurgique.

-
- 1 En effet, la silice est le composé chimique le plus répandu dans la croûte terrestre après l'oxygène. Il représente 25 % de la masse de la croûte terrestre. Il se présente généralement sous la forme de sable. Cependant, il ne faut pas oublier que d'autres semi-conducteurs existent comme par exemple le sélénium ou le tellure de cadmium.
 - 2 Cette réaction consiste à porter à des températures très élevées (environ 1700°C) un mélange de quartz et d'espèces carbonées (réducteurs du type coke, houille et bois), qui vont se combiner avec l'oxygène du quartz pour donner du monoxyde puis du dioxyde de carbone.
 - 3 Un four à arc utilise l'énergie thermique de l'arc électrique établi entre une (ou plusieurs) électrode(s) de carbone et le métal pour obtenir une température suffisante à sa fusion. La température du four peut atteindre 3000 °C.



Après cette opération, le silicium est obtenu sous forme liquide. Sa pureté est de 99 %. On distingue trois niveaux de pureté du silicium, désignés en fonction de l'utilisation :

- silicium métallurgique (pureté 99 %), noté MG-Si (en anglais : metallurgical grade) ;
- silicium de qualité solaire (pureté 99,999 9 %), noté SoG-Si (solar grade) ;
- silicium de qualité électronique (pureté 99,999 999 99 %), noté EG-Si (electronic grade).

Il faut le purifier encore de nombreuses fois afin d'obtenir un matériau adéquat pour les applications photovoltaïques. C'est-à-dire qu'au final, le procédé de purification aboutit à l'obtention de lingots de silicium de qualité solaire.

3.1.3. *Obtention des lingots de silicium grâce à la cristallisation*

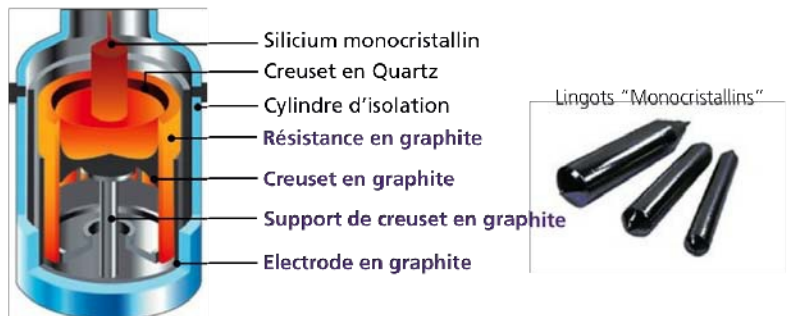
Une fois l'étape de purification terminée, vient l'étape de cristallisation du silicium liquide afin d'obtenir un lingot de silicium à l'état solide. La technique de cristallisation consiste à solidifier progressivement le silicium fondu de manière contrôlée. Il existe deux grandes méthodes de cristallisation. La première permet d'obtenir du silicium polycristallin (composé de plusieurs cristaux). La deuxième permet d'obtenir du silicium monocristallin (composé d'un seul cristal).

- Le silicium polycristallin ou multicristallin :

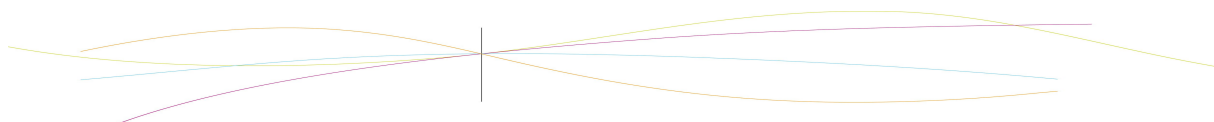
Le silicium polycristallin est constitué d'une mosaïque de cristaux monocristallins de silicium, d'orientation et de tailles différentes. Le silicium liquide est mis dans un creuset en graphite. Le silicium polycristallin est obtenu par coulage en lingotière. On obtient au final des lingots cubiques afin d'optimiser l'espace lorsque les plaquettes (obtenues par découpage en lamelles des lingots de silicium) seront placées en série sur un module photovoltaïque.

- Le silicium monocristallin :

Une des méthodes pour fabriquer du silicium monocristallin est la méthode dite de Czochralski. Le silicium est placé dans un creuset de quartz et maintenu liquide à l'aide d'éléments chauffants. Lorsque la surface est à la température limite de solidification, on y plonge un germe monocristallin. Le silicium se solidifie sur ce germe selon la même orientation cristallographique. On tire lentement le germe vers le haut, avec un mouvement de rotation, tout en contrôlant minutieusement la température et la vitesse. Le silicium monocristallin ainsi obtenu, sous forme de lingots circulaires, est constitué d'un seul type de cristal. Le silicium monocristallin, plus élaboré que le silicium polycristallin, présente un rendement (conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique) supérieur à ce dernier (environ 15%).



Par la suite, on pratique un équeutage qui consiste à éliminer les extrémités du lingot qui sont soit mal cristallisées soit riches en impuretés. Les extrémités sont ensuite refondues pour le départ d'un nouveau cycle de production. Lors du tirage, le diamètre du lingot varie



légèrement ce qui constitue des ondulations à sa surface. Pour obtenir des plaquettes de même diamètre un polissage cylindrique est nécessaire.

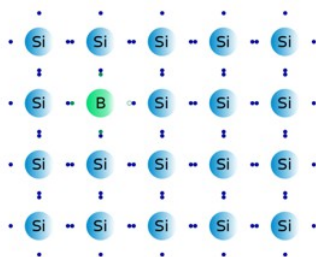
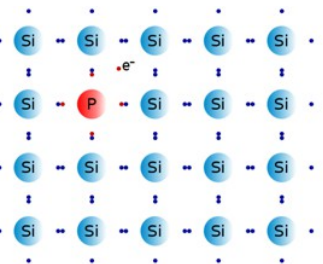
3.1.4. *Obtention des wafers photovoltaïques*

Les lingots cylindriques (silicium monocristallin) ou parallélépipédiques (silicium polycristallin) de silicium obtenus à l'issue de l'étape de solidification sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées « wafers »⁴. La coupe des lingots est effectuée par une scie à fil d'une épaisseur d'environ 250 µm. L'opération est réalisée en présence de slurry, une solution organique contenant des abrasifs en suspension (un mélange de liquide et de carbure de silicium). Ce n'est pas le fil lui-même qui coupe le matériau mais la solution. Le slurry frotte les lingots en coulant le long du fil et joue, en quelque sorte, le rôle des dents d'une scie. Pour que son action soit efficace, il faut que le slurry coule en continu dans la fente de la scie.

3.1.5. *Dopage du silicium et formation de la jonction P-N*

Les wafers de silicium obtenus à l'issue de l'étape de sciage sont alors introduits dans un réacteur de croissance dans lequel va se dérouler l'étape de dopage. Le dopage consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ces propriétés électriques permettant de réaliser la jonction P-N. Le semi-conducteur dopé est alors appelé "semi-conducteur extrinsèque". Il existe deux types de dopage : le type N (Négatif) et le type P (Positif).

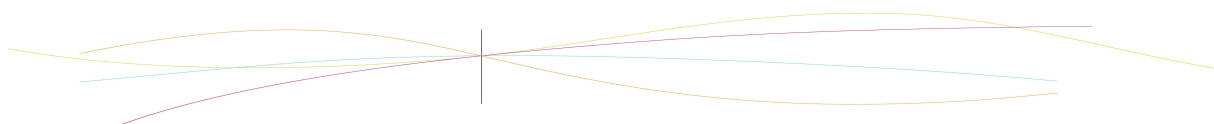
Le dopage de type N consiste à ajouter un atome de phosphore au sein de la structure cristalline du silicium. Le phosphore disposant de 5 électrons sur sa couche électronique externe (structure électronique : (K)2 (L)8 (M)5 va s'associer à 4 atomes de silicium (structure électronique : (K)2 (L)8 (M)4, laissant ainsi libre un électron : cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale négative. On appelle cette zone « bande de valence ».



Le dopage de type P consiste à ajouter un atome de bore au sein de la structure cristalline du silicium. Le bore disposant de 3 électrons sur sa couche électronique externe (structure électronique : (K)2 (L)8 (M)3) va s'associer à 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un trou : cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale positive. On appelle cette zone « bande de conduction ».

Aujourd'hui l'industrie utilise essentiellement le procédé de la diffusion pour doper les cellules photovoltaïques. On utilise un four, dans lequel on injecte des gaz avec une solution dopante pour le silicium. Avec la chaleur, le dopant a une énergie suffisante pour entrer dans la plaquette de silicium. Cette méthode est assez ancienne, et nécessite d'avoir une température uniforme dans le four. Il existe d'autres méthodes telles que la croissance épitaxiale (c'est le même principe que la diffusion mais les dopants sont sous forme solide et disposés sur les plaques) ou le bombardement ionique (on envoie des ions à très grande vitesse sur les plaques).

4 En anglais, "wafer" signifie "galette".



La suite du procédé est d'associer un wafer dopé N avec un wafer type P. La zone de contact devient un isolant et s'appelle la jonction P-N. La tranche dopée N correspondra à la partie de la cellule exposée au rayonnement solaire.

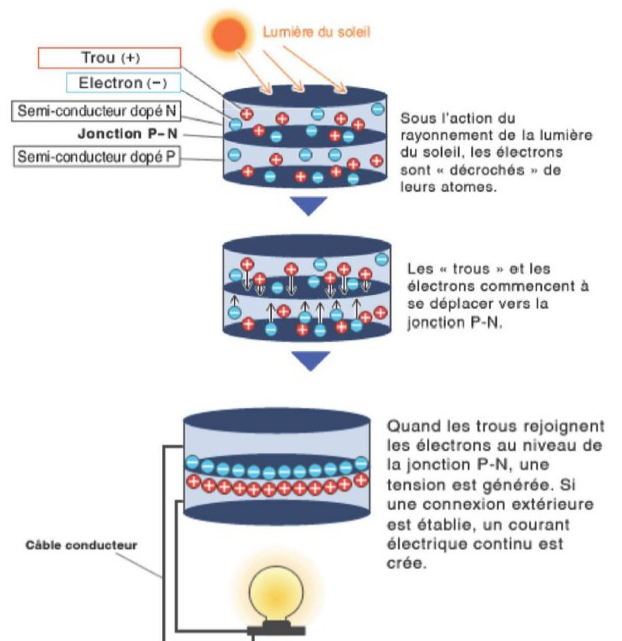
3.1.6. Assemblage des modules

Étant fragiles, les cellules cristallines doivent être protégées contre les chocs et la corrosion et donc intégrées à des modules. La fonction des modules est de protéger les cellules du milieu extérieur et de faciliter leur mise en œuvre, tout en limitant le plus possible les pertes optiques et les baisses de rendement dues à l'échauffement des cellules en fonctionnement. Tout d'abord, les cellules sont raccordées grâce à de fins rubans métalliques (cuivre essentiellement) en plusieurs chaînes pour former une matrice finale. Ensuite, l'encapsulation de la matrice est réalisée par laminage à chaud : les cellules sont montés en température et pressés sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents. Ces films d'EVA⁵ placés entre le verre (face avant) ou le tedlar (face arrière) et les cellules assurent la cohésion de l'ensemble ; de plus, ils permettent d'accroître la durée de vie de la cellule dont l'un des défauts est la fragilité. Selon les cas, le module est encadré ou non d'un cadre en aluminium avec un joint périphérique pour permettre la dilatation. Il est ensuite équipé d'une boîte de jonction permettant son raccordement électrique. Enfin, les modules sont enfin soumis à un test sous lumière artificielle calibrée afin de mesurer leurs caractéristiques électriques réelles. Le système intégré en toiture comprend également une structure porteuse, des composants électroniques et électriques.

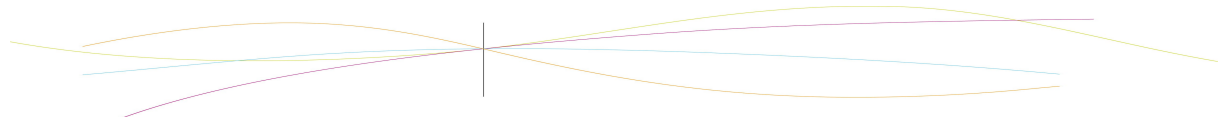
3.1.7. Fonctionnement d'un panneau photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant de quelques millimètres qui, exposé à la lumière produit de l'électricité. Ces cellules sont réunies dans des modules solaires ou panneaux solaires. Elles sont constituées de 2 couches de matériau semi-conducteur (silicium souvent), qui se distinguent par leur dopage, N ou P comme expliqué précédemment.

Les photons qui constituent le rayon lumineux sont des grains d'énergie. Si l'énergie contenue par ce photon est suffisante (soit 1,1 eV), il pourra aider un électron bloqué dans la bande de valence à sauter vers la bande de conduction. Lorsque la zone dopé N est exposée au rayonnement lumineux, un électron de la couche de valence du silicium est arraché, laissant parallèlement un trou. Du fait de l'interaction électromagnétique, les électrons et les trous se concentrent alors au niveau de l'interface entre les deux tranches, formant ainsi une jonction P-N, comme dit plus haut. Par conséquent, une forte différence de potentiel se crée entre les zones P et N et provoque la formation d'un champ électrique permanent de l'ordre du micron. Cela est synonyme d'une forte diminution de la conductibilité dans cette zone.



5 EVA : éthylène vinyl acétate.



D'autre part, la présence du champ électrique provoque une tension d'environ 0.5 à 0.6 volts (V) entre les deux électrodes. Si la cellule est continuellement alimentée par l'énergie solaire, le mouvement des charges électriques se poursuit. Dans ce cas, le champ électrique ainsi créé a tendance à repousser les électrons vers la zone N et les trous vers la zone P.

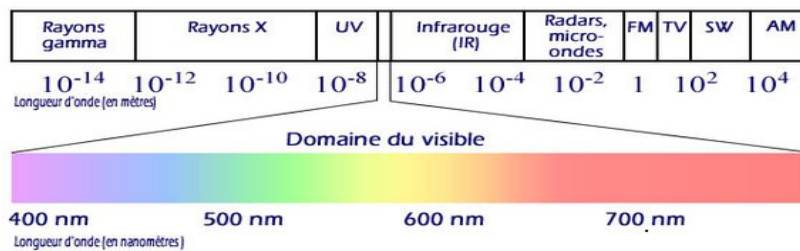
Puis, les électrons s'engagent dans le fil conducteur, les entraînant dans un mouvement ininterrompu tant que les photons alimentent la cellule en énergie. Cependant, une alimentation suffisante est indispensable. En effet, si l'énergie captée par la cellule est inférieure à 1,1 électron-volts (eV) alors les électrons ne franchiront pas la jonction P-N.

Finalement, la cellule photovoltaïque permet l'obtention d'un courant électrique continu, transformé ensuite en courant alternatif grâce à un onduleur.

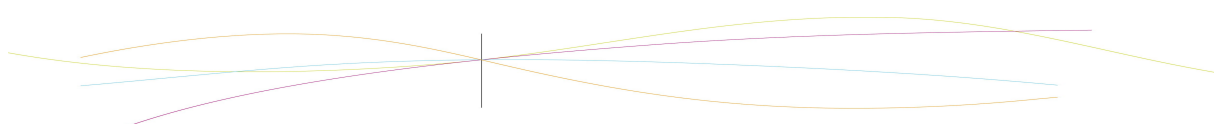
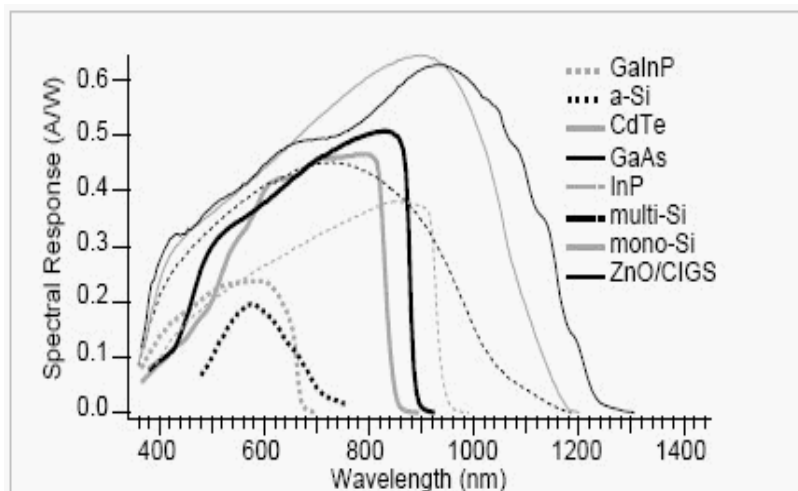
3.2. Caractéristiques d'un panneau photovoltaïque

3.2.1. *Domaine spectral d'un panneau photovoltaïque*

Le rayonnement solaire est composé d'ondes électromagnétiques et se répartit majoritairement dans la lumière visible (environ 50%), dans l'infrarouge (environ 50%) et dans l'ultraviolet (environ 1%).

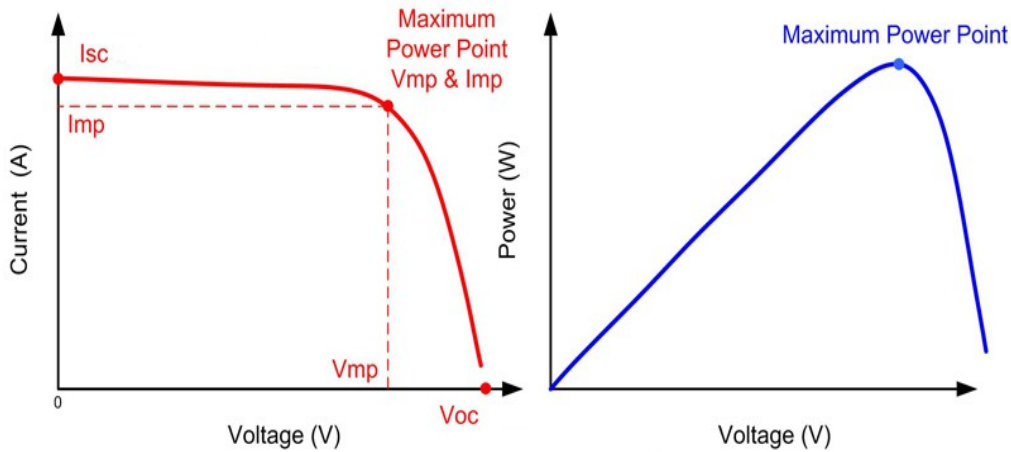


L'Homme n'est sensible qu'à la partie visible du spectre électromagnétique (entre 400 et 800 nm). De même, une cellule photovoltaïque ne réagit qu'à une partie du rayonnement solaire, amplitude qui varie en fonction des technologies utilisées.



Ce graphique représente les courbes de réponse spectrale obtenues pour différents types de jonction utilisée dans le panneau photovoltaïque. On peut remarquer que la plus grande amplitude spectrale est obtenue pour la technique CIGS (complexe semi-conducteur à base de Cuivre, Indium, Gallium, Sélénium et Soufre) et s'étend de 400 à 1300 nm.

3.2.2. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque



Les cellules photovoltaïques permettent l'obtention d'un courant I (A) et d'une tension V (U), en présence d'éclairement solaire.

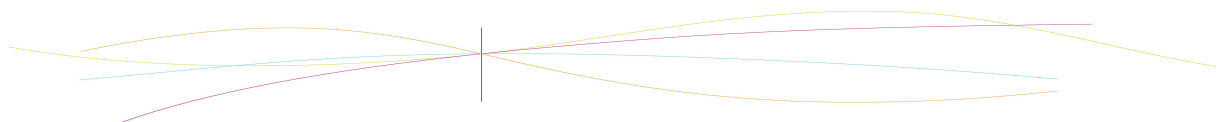
Le premier graphique représente l'intensité en fonction de la tension ; le produit de ces deux grandeurs donne la puissance ($P=U \times I$), représentée en fonction de la tension sur le second graphique. Ces courbes présentent des points particuliers :

- **Voc** (Voltage open circuit) correspond à la tension aux bornes du panneau éclairé mais non raccordé (circuit ouvert).
- **Isc** (courant de court-circuit) indique le courant maximal que peut délivrer le panneau éclairé et raccordé à lui-même (court-circuit).
- Maximum Power Point (MPP) représente le produit du courant de puissance maximale (**Imp**) et de la tension de puissance maximale (**Vmp**).

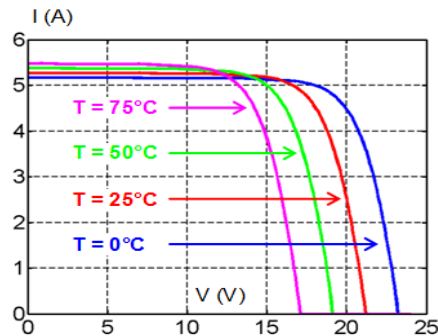
Chaque panneau est donc caractérisé par quatre valeurs (Voc, Isc, Imp et Vmp) qui sont mesurées dans les conditions STC (Standard Test Conditions), c'est-à-dire un éclairement de 1000 W/m^2 , une température du module de 25°C et un coefficient air-masse de 1,5.

D'autres valeurs importantes caractérisent les panneaux photovoltaïques :

- FF : rapport de forme, il représente le rapport entre la puissance maximale et le produit entre le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert : $FF = \frac{MPP}{Isc \times Voc}$
- Rs : valeur de la résistance branchée en série
- Rsh : valeur de la résistance shunt branchée en parallèle.
- EFF représente l'efficacité du panneau photovoltaïque, son rendement



Cependant, ces courbes sont influencées par l'éclairement mais également par le facteur température du module ; ainsi la puissance produite sera d'autant plus importante que le panneau sera froid. Ainsi, la production photovoltaïque est souvent plus élevée au printemps que l'été.



Lorsque la température est supérieure à 25°C, une perte de rendement de 0,4 % par degré fait son apparition.

Le watt-crête représente la puissance maximale que peut délivrer un panneau solaire dans les conditions STC. Cette unité est utile afin de comparer le rendement et le prix des matériaux photovoltaïques.

3.2.3. *Extrapolation d'une cellule photovoltaïque vers un module*

Le nombre de cellules photovoltaïques dépend de l'application. Elles sont connectées électriquement en série pour fournir la tension voulue. Il faut savoir que toutes les cellules photovoltaïques au silicium créent une différence de potentiel (tension) entre 0,4 et 0,5 V en fonctionnement normal. Les caractéristiques s'appliquant à une cellule restent valables pour un groupement de cette cellule. Il faut donc les connecter en série pour obtenir une tension exploitable, par exemple comme dans le cas de notre panneau photovoltaïque, 36 cellules sont nécessaires pour charger une batterie de 12 V. Il faut prendre en compte les pertes dans les câbles, la tension de déchets de la diode non-retour et l'effet de la température.

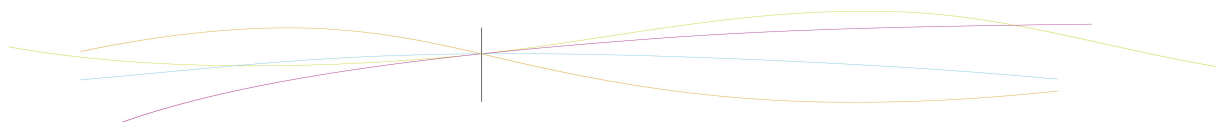
3.3. **Étude théorique du rendement par rapport à l'orientation et à l'inclinaison**

Les panneaux photovoltaïques sont sensibles à la lumière qui se compose :

- du rayonnement direct qui est le plus puissant et nous parvient directement, sans rencontrer d'obstacles (nuages, végétations, constructions...) ;
- du rayonnement diffus qui est issu du rayonnement direct, diffracté et réfléchi par les nuages.

Le rayonnement diffus, d'une intensité moins importante, ne doit cependant pas être négligé puisqu'il permet le fonctionnement des panneaux photovoltaïques même par temps couvert.

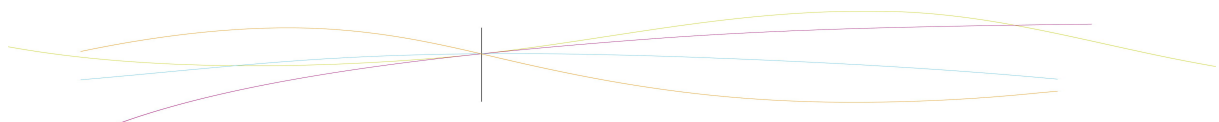
La direction du soleil et son angle d'incidence sur le panneau sont très importants afin de capter un maximum d'énergie. L'orientation perpendiculaire par rapport au soleil est celle qui offre le rendement le plus satisfaisant. L'orientation géographique est également primordiale ; c'est la combinaison idéale entre ces 2 paramètres qui permettra l'obtention d'un rendement optimal.



© www.ef4.be

| | | inclinaison par rapport à l'horizontale (°) | | | | | | |
|-------------|-----------|---|-----|-----|-----------------|-----|-----|-----|
| | | 0 | 15 | 25 | 35 | 50 | 70 | 90 |
| orientation | est | 88% | 87% | 85% | 83% | 77% | 65% | 50% |
| | sud-est | 88% | 93% | 95% | 95% | 92% | 81% | 64% |
| | sud | 88% | 96% | 99% | max 100% | 98% | 87% | 68% |
| | sud-ouest | 88% | 93% | 95% | 95% | 92% | 81% | 64% |
| | ouest | 88% | 87% | 85% | 82% | 76% | 65% | 50% |

On remarque que l'orientation optimale pour un panneau photovoltaïque est en direction du sud avec une inclinaison de 30° par rapport à l'horizontale. Nous aurons alors dans ces conditions le rendement maximum du panneau.



4. ASPECT EXPÉRIMENTAL

4.1. Présentation du matériel fourni

Afin de réaliser nos expériences, nous avons eu besoin du matériel ci-dessous:

- un panneau photovoltaïque monocristallin
- deux rampes éclairantes
- trois ampoules fluocompactes
- un convertisseur de 220V
- une batterie 12V
- un régulateur
- un voltmètre
- un ampèremètre
- des câbles conducteurs
- un rapporteur
- une boussole
- une résistance variable
- un régulateur
- des lampes
- un solarimètre

Un solarimètre est un outil qui permet de mesurer la puissance solaire (entre 1 et 1300 W/m^2) pour les installations photovoltaïques ou thermiques. Le solarimètre qui nous est fourni calcule aussi l'énergie cumulée (en Wh/m^2) et il stocke et enregistre les valeurs moyennes. De plus, ce solarimètre est doté d'une fonction graphique qui permet d'avoir une interprétation rapide du fichier de mesure. Le solarimètre nous permettra de vérifier les conditions d'ensoleillement.

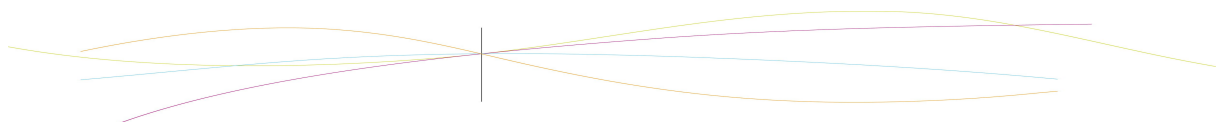
4.2. Expériences prévues et réalisées

Tout d'abord, nous allons vérifier que le panneau fonctionne correctement. Il faut avant tout placer ces expériences dans son contexte. Nous sommes montés sur le toit du bâtiment Dumont D'Urville de l'INSA de Rouen, en Normandie, afin de la réaliser. Nous avons un temps très ensoleillé ($960 W/m^2$), ce qui est idéal pour la réalisation de nos expériences. Et pour ce faire, nous allons faire le montage 1 décrit en annexe et vérifier que les différentes lampes branchées au panneau s'allument. Cette expérience s'est déroulée sans problème. Les deux rampes branchées en parallèle se sont allumées comme on peut le voir sur la photo.



Illustration 1: Photo de l'expérience avec les deux rampes de LED allumées.

Par la suite, nous allons chercher à obtenir expérimentalement les valeurs de I_{sc} et de V_{oc} c'est-à-dire les points extrêmes de la courbe de performance (voir les schémas et la courbe en annexe) qui est fournie avec le panneau photovoltaïque. Pour ce faire, nous allons mettre le panneau en circuit ouvert et mesurer la tension comme montré sur le schéma 2 pour avoir la V_{oc} . Puis nous allons le mettre en court-circuit afin d'obtenir l' I_{sc} comme sur le schéma 3.



Nous avons ensuite orienté le panneau selon les conditions théoriques maximales c'est-à-dire un angle de 30° et une orientation SUD. Pour la Voc, nous obtenons une valeur de 20,9 V et pour l'Isc nous obtenons une valeur de 4,7 A, pour un ensoleillement de 830 W/m^2 . Ces valeurs diffèrent légèrement des valeurs théoriques car nous n'avons pas les mêmes conditions que lors du calcul des valeurs théoriques.

Puis nous ferons varier la tension, à l'aide d'une résistance variable, et nous mesurerons l'intensité afin de placer des points et de pouvoir obtenir finalement la courbe qui nous a été donnée et qui correspond donc à notre première expérience. Nous ferons le montage 4. Cependant n'ayant pu trouver de boîte à résistance variable adaptée à la forte intensité du courant, nous n'avons pu réaliser ce montage.

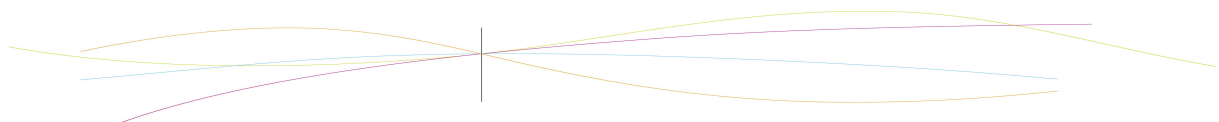
La troisième expérience consiste à faire varier l'angle d'inclinaison et l'orientation du panneau afin de vérifier le tableau donné précédemment. On retrouve alors les valeurs suivantes pour une orientation SUD qui correspond aux valeurs attendues :

| | | | | | |
|-----------------------------------|-----|------|-----|------|------|
| Angles ($^\circ\text{C}$) | 4,4 | 28,3 | 45 | 61,2 | 78,5 |
| Ensoleillement (W/m^2) | 817 | 960 | 950 | 927 | 805 |

Ainsi, nous avons pu vérifier que le panneau photovoltaïque fonctionnait correctement. Nous avons pu allumer deux rampes de LED et également une lampe classique grâce au convertisseur. Nous avons tenté de refaire la courbe de performance mais nous avons rencontré quelques difficultés face à la forte intensité du courant. Enfin, nous avons pu vérifier la théorie des angles et des orientations pour une meilleure performance du panneau. Ces expériences nous ont permis d'en apprendre davantage sur le panneau photovoltaïque et donc l'énergie solaire. Nous avons également vérifié que les connaissances expliquées lors de la partie théorique était bien acquises.






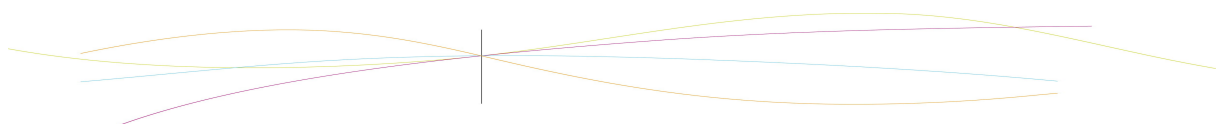
Illustration 2: Réalisation de l'expérience sur les toits de l'INSA.



5. LES DIFFÉRENTS TYPES DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Utilisées depuis les années 60, les cellules à base de silicium (Si) représentent plus de 80 % du marché mondial des technologies photovoltaïques.

| Types de cellules | Caractéristiques | Rendement | Durée de vie | Avantages | Inconvénients |
|---|--|------------|---------------|---|---|
| Monocristallines  | <ul style="list-style-type: none"> - Lames octogonales rigides de couleur bleue uniforme. - Cristallisation lente. | - 13 à 17% | - 35 à 40 ans | <ul style="list-style-type: none"> - Un rendement très performant (ratio de 150 Wc/m²). - Longue durée de vie. | <ul style="list-style-type: none"> - Cellules très chères. - Fabrication très difficile (besoin de silicium pur) et énergivore. - Baisse du rendement en faible éclairage et à des températures élevées. |
| Polycristallines  | <ul style="list-style-type: none"> - Cristallisation rapide. - Cellules rectangulaires de couleur bleue nuit. | - 11 à 15% | - 30 à 35 ans | <ul style="list-style-type: none"> - Bon rendement. - Méthode de fabrication moins coûteuse, plus simple et peu énergivore. - Meilleur rapport qualité/prix. - Très bonne durée de vie. | <ul style="list-style-type: none"> - Rendement plus faible sous un soleil diffus. |
| Amorphes  | <ul style="list-style-type: none"> - Vaporisation sous vide d'un gaz de silicium sur un matériau. - Couleur gris très foncé. - Application quotidienne (écran de calculatrice). | - 5 à 8 % | - 30 à 35 ans | <ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement en toutes conditions (soleil diffus et température élevée). - Coût moindre (nécessitent 100 fois moins de silicium). - Utilisation sur support souple ou rigide. | <ul style="list-style-type: none"> - Rendement faible. |


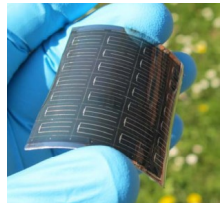


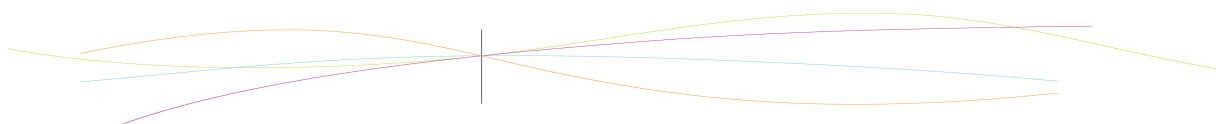
Association de couches minces :

Utilisées pour des applications spatiales, les cellules multi-jonctions sont composées d'une superposition de couches minces. Dans ce système, chaque matériau constituant une couche est caractérisé par une longueur d'onde à laquelle il est capable de convertir l'énergie lumineuse reçue en énergie électrique. Ainsi, une couche servira à absorber les couleurs vertes, une autre les couleurs rouges... De cette manière, les cellules multi-jonctions peuvent absorber une grande majorité du spectre solaire et obtenir ainsi le meilleur rendement au monde pour des cellules photovoltaïques (42 %). Leur utilisation pourrait s'étendre dans les années à venir en se retrouvant sur certaines voitures électriques.

Les cellules dites « tandems » sont également une application du système de multi-jonctions. Elles ne sont en réalité que la superposition de deux cellules simples (une cellule monocristalline avec une cellule amorphe par exemple).

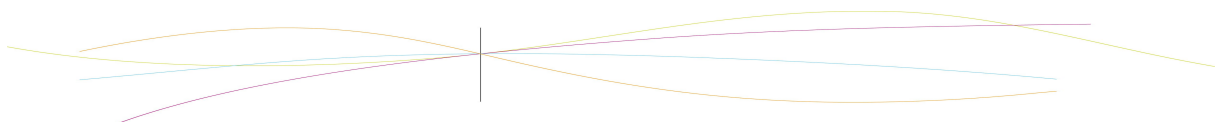
Depuis quelques années, en raison des prix élevés du silicium pur utilisé pour les cellules cristallines, les entreprises recourent à de nouveaux composés semi-conducteurs plus performants et moins onéreux que le silicium.

| Types de cellules | Caractéristiques | Rendement | Durée de vie | Avantages | Inconvénients |
|--|--|-----------|--------------|--|--|
| Tellure de cadmium  | <ul style="list-style-type: none"> - Couche d'absorption en tellure de cadmium (CdTe). - 6 % du marché mondial du photovoltaïque. | - 18 % | - 25 ans | <ul style="list-style-type: none"> - Un rendement très bon. - Un prix faible . - Une excellente capacité d'absorption. - Un bon fonctionnement par faible luminosité. - L'empreinte carbone la plus faible du marché. | - Les cellules seraient potentiellement toxiques. |
| CIS et CIGS  | <ul style="list-style-type: none"> - Composées d'un alliage de cuivre, d'indium de sélénium (et de gallium pour les CIGS). - Substrat souple de couleur noir ayant des capacités photovoltaïques remarquables. | - 14 % | - 25 ans | <ul style="list-style-type: none"> - Souplesse du matériau. - Rendement moyen (record à 20%). | <ul style="list-style-type: none"> - Réserve en indium très faible. - Nécessitent une plus grande surface pour atteindre un niveau de production performant. |



Les cellules photovoltaïques organiques :

Les cellules photovoltaïques organiques sont entièrement constituées d'éléments organiques au niveau de leur couche externe. Ces éléments (composés de carbone) possèdent des capacités semi-conductrices qui leur permettent de réaliser l'effet photovoltaïque tout comme les cellules inorganiques. La plupart du temps, les cellules sont produites en rouleau par des méthodes de type jet d'encre ou sérigraphie. Cette innovation a vu le jour dans les années 1990 et n'a cessé d'évoluer depuis. Elle a notamment été créée dans le but de concurrencer les prix onéreux des cellules de silicium purs qui, du fait de la difficulté de leur production, sont excessivement chères. Ainsi, de nos jours, on peut observer trois types de cellules photovoltaïques organiques : les cellules photovoltaïques organiques moléculaires, les cellules photovoltaïques organiques en polymères et les cellules photovoltaïques organiques hybrides.



6. CONTRAINTES ET LIMITES

Quelles sont les contraintes des panneaux photovoltaïques ?

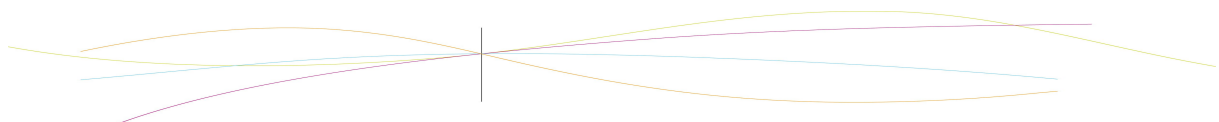
Pour optimiser la production d'énergie, il est nécessaire de porter un soin tout particulier à l'inclinaison des panneaux par rapport au soleil, afin d'optimiser le temps d'exposition quotidien. Il est donc nécessaire que les panneaux soient orientés de manière à assurer une production maximale quelle que soit la période de la journée : c'est à midi, lorsque le soleil est au zénith, que les cellules photovoltaïques captent un maximum de photons. Il est généralement recommandé d'orienter les panneaux vers l'est, car le cas échéant la surface exposée serait affaiblie. Dans le contexte d'une installation autonome (donc ne revendant pas son surplus d'électricité), il est nécessaire d'envisager la mise en place de batteries dont il faudra tenir compte dans le budget.

Quels sont les inconvénients des panneaux photovoltaïques ?

Par définition, les panneaux solaires photovoltaïques ne produisent de l'énergie qu'en période d'ensoleillement. La production est donc irrégulière et imprévisible : elle dépend des saisons (journées plus longues en été, plus courtes en hiver), des intempéries et de l'alternance jour/nuit. Comme le pic de consommation d'électricité se trouve en hiver (notamment avec le chauffage), la production d'énergie photovoltaïque se révèle souvent insuffisante à cette saison. Par ailleurs, le rendement de ce type d'installation est encore relativement faible (évalué entre 10 et 30% selon les spécialistes) et diminue avec le temps (on constate généralement une perte d'environ 1% par an). Ce type d'installation convient plus volontiers à des projets dont les besoins sont faibles (une maison individuelle par exemple).

Coût et devis pour l'installation de panneaux photovoltaïques :

Le prix d'une installation photovoltaïque est assez cher puisqu'il faut compter entre 250 et 300 euros par mètre carré. Ce prix se justifie par les investissements très coûteux engendrés en recherche et développement. Par ailleurs, vous avez la possibilité de réinjecter l'intégralité ou seulement le surplus d'électricité produite par votre installation. En France, il faut environ 10 mètres carrés de capteurs pour produire 1000 kWh par an en moyenne. Malheureusement, si le tarif de rachat de l'électricité photovoltaïque par EDF était intéressant il y a quelques années, il l'est aujourd'hui beaucoup moins. Un spécialiste sera en mesure de vous aider à évaluer le seuil de rentabilité de votre investissement, en fonction du tarif de rachat actuel et d'effacer les incertitudes vis-à-vis d'un éventuel crédit d'impôt (ou d'une prime d'intégration).



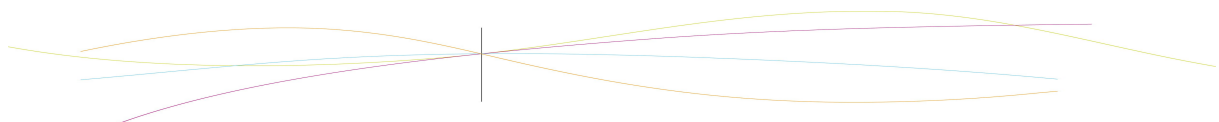
7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ainsi au cours de ce projet, nous sommes tous d'accord pour dire que nous avons acquis de nombreuses connaissances tant bien techniques que humaines. Nous avons pu en apprendre plus sur les panneaux solaires et sur leurs applications. Nous avons appris grâce à ce projet l'importance d'effectuer des études théoriques avant de commencer la pratique et cela s'applique autant au monde de la recherche qu'au monde du travail. En effet, grâce à de nombreuses recherches théoriques, nous avons observé que le solaire est une méthode simple et efficace pour produire de l'énergie.

De plus, nous avons eu la chance de travailler également sur un véritable panneau solaire ce qui a rendu nos recherches plus concrètes. Grâce au travail des précédents groupes sur ce panneau solaire, nous avons aussi pu bénéficier d'un support inclinable très pratique pour faire des mesures.

Avant ce projet, la plupart d'entre nous ne connaissaient pas bien l'énergie solaire et encore moins son fonctionnement. Ce sujet est très intéressant pour de futurs ingénieurs comme nous. En effet, nous serons sûrement amenés à étudier ce type de production d'énergie dans le futur. Tout au long de ce projet nous avons également été amenés à adopter une démarche scientifique : poser une problématique, choisir les aspects à étudier, effectuer des recherches, faire une étude théorique, effectuer des mesures expérimentales, comparer avec les données attendues afin de pouvoir répondre à la problématique. Ce mode de travail nous a permis de nous rendre compte à notre échelle de ce qu'est le travail en entreprise.

En outre, le fait de travailler en équipe lors de ce projet est un plus pour notre formation en tant qu'ingénieur. Ce travail nous a permis de prendre en compte l'opinion de chacun et de réfléchir aux meilleures solutions possibles pour convenir au plus de monde. De plus, un tel projet demande de l'organisation et du travail de la part de chacun. Nous avons appris à travailler ensemble et à faire avec le caractère de chacun d'entre nous.



8. ANNEXES

8.1. Schémas de montages

Cette courbe représente les performances énergétiques du panneau solaire de l'Insa.

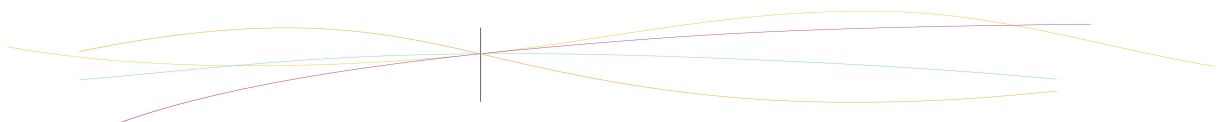
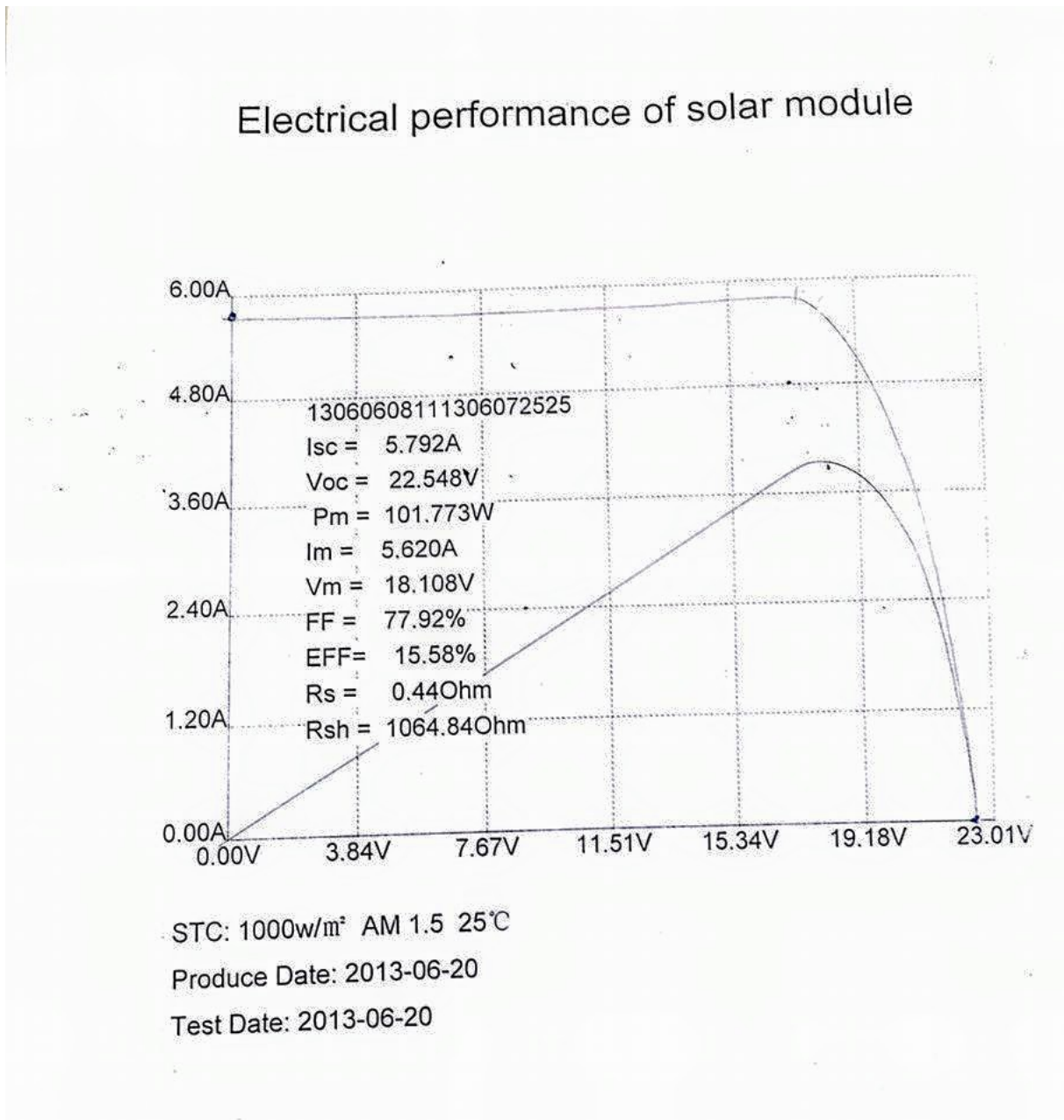




Schéma 1: Montage de raccordement d'un panneau photovoltaïque.

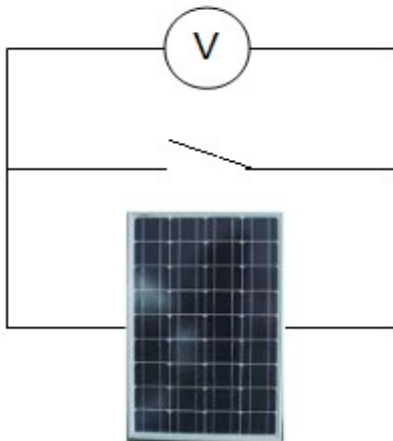


Schéma 3: Montage en circuit ouvert.

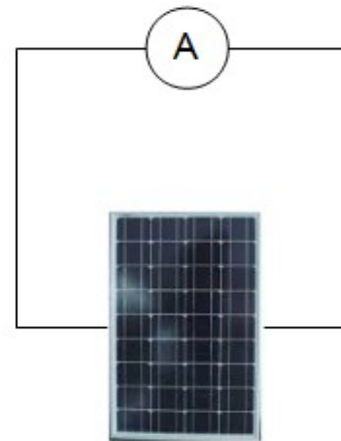


Schéma 2: Montage en court-circuit.

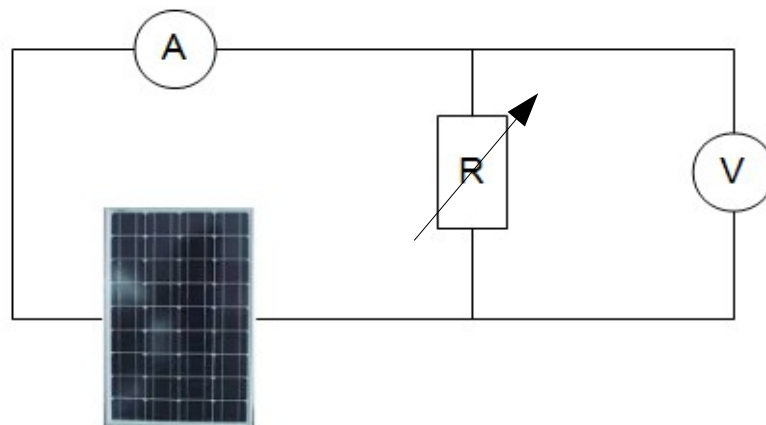
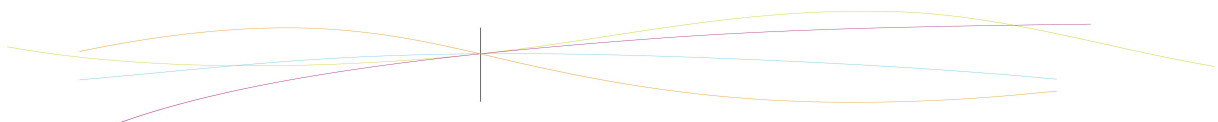


Schéma 4: Montage expérimental.



8.2. Propositions de sujets de projets

Nous avons, à la fin de notre projet, réfléchi à quelques idées de sujets pour les prochains projets de P6 et nous avons pensé aux suivants :

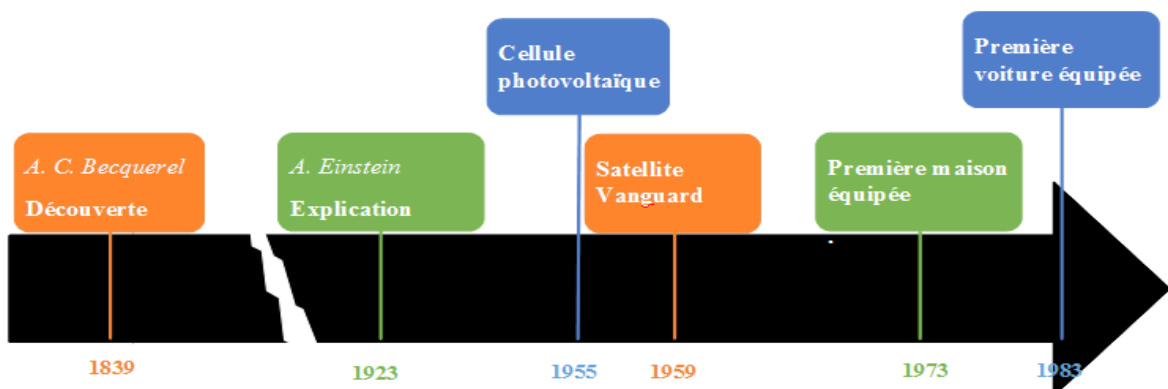
- Réalisation d'une course de voitures fonctionnant à l'énergie solaire.
- Étude comparative entre les différentes énergies renouvelables (éolien, solaire, maréomotrice...).

8.3. Un peu d'histoire

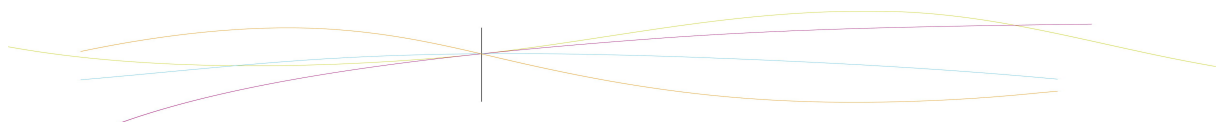
C'est en 1839 que le physicien Antoine César Becquerel découvre l'existence du principe photovoltaïque et sa capacité à transformer l'énergie lumineuse en électricité. Reposant sur la technologie des semi-conducteurs, cette transformation consiste à utiliser les photons afin de libérer les électrons et créer de ce fait une différence de potentiel entre les bornes de la cellule, générant ainsi un courant électrique continu.

Les premières applications ont été effectuées dès les années 60, à l'aide de satellites spatiaux. Les premières utilisations terrestres ont, quant à elles, vu le jour à partir des années 70. Voici ci-dessous quelques dates clés de l'Histoire du photovoltaïque :

- 1923 : Albert Einstein explique pour la toute première fois le principe photovoltaïque, avec à la clé le Prix Nobel de physique.
- 1955 Chapin, Fuller, Pearson et Prince, quatre chercheurs américains développent une cellule photovoltaïque à haut rendement de 6%.
- 1959 les Américains lancent le satellite Vanguard, alimenté par des piles photovoltaïques ayant un rendement de 9%.
- 1973 la première maison avec une installation photovoltaïque voit le jour, à l'Université de Delaware, aux États-Unis.
- 1983 la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt environ 4000 kilomètres en Australie.



Aujourd'hui, l'énergie photovoltaïque est à la disposition des entreprises et des particuliers, et les panneaux photovoltaïques ont des rendements de l'ordre de 20%. Cette énergie est plus présente dans notre quotidien qu'elle ne l'était dans les décennies antérieures,



puisqu'elle se doit d'être apte à répondre à une demande croissante d'énergie renouvelable. Elle est considérée comme devant prendre une part significative dans l'approvisionnement énergétique mondial.

8.4. Enjeux sociaux, économiques et environnementaux

8.4.1. *Le marché et l'industrie:*

Le marché s'est créé pour fournir aux besoins d'électrification de systèmes isolés par rapport au réseau principal comme les satellites, les bateaux et d'autres objets mobiles. C'est à partir de 1990 que la baisse des coûts de production permet une production en masse pour alimenter le réseaux électriques. En effet la baisse des prix des modules continue et entre 2009 et 2012 elle correspond à 33% pour les modules polycristallins, 26% pour les monocristallins et 48% pour les modules de silicium. Dans ces mêmes dates le coût de production du Watt est passé de 1€/W à 0,46€/W.

En 2013 la puissance cumulée mondiale du solaire photovoltaïque est de 138,4 GW permettant de produire de 166 TWh d'électricité ce qui équivaut à la production de 32 grandes centrales de charbon.

En France, la capacité photovoltaïque a atteint 4.300 MW en 2013. Cela permet de produire 4,5 TWh d'électricité solaire, sur la base d'une année complète tandis qu'en Allemagne, la capacité installée est 8 fois plus grande, bien que ce pays ne dispose pas d'un potentiel photovoltaïque aussi important que la France.

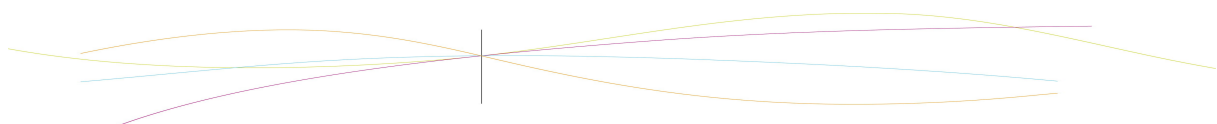
Comment vendre l'électricité produite?

La France a opté pour l'obligation d'achat. EDF et les entreprises locales de (distribution ELD) sont obligés d'acheter la production photovoltaïque à un tarif fixé, par contre le producteur n'est pas contraint de leur vendre son électricité produite par le panneau photovoltaïque.

La CSPE (Contribution au Service Public de l'Électricité), permet à EDF et aux entreprises locales de distribution d'acheter l'électricité produite à un tarif réglementé par les arrêtés tarifaires.

Le contrat d'obligation d'achat est signé pour une durée de 20 ans, permettant ainsi aux investisseurs d'évaluer l'évolution de leurs recettes financières.

Avant le 15 mars 2014 les producteurs d'énergie photovoltaïque bénéficiaient d'un taux de 7% pour les travaux justifiant d'un devis signé et accepté, les taux de TVA normaux sont à 20%. De plus le crédit d'impôt pour une installation solaire photovoltaïque qui était de 11% en 2013 a été supprimé le 1^{er} janvier 2014.



Puissance photovoltaïque installée : principaux pays et mondial (en Mwc) :

| Cumul | Allemagne | Espagne | Italie | France | EU 27 | Japon | États-Unis | Monde |
|-------------|-----------|---------|--------|--------|--------|--------|------------|---------------|
| 2000 | 114 | 12 | 22 | 11 | 185 | 320 | 140 | 1 280 |
| 2005 | 1 910 | 58 | 46 | 26 | 2 170 | 1 420 | 480 | 5 100 |
| 2006 | 2 740 | 175 | 50 | 34 | 3 150 | 1 710 | 620 | 6 600 |
| 2007 | 3 850 | 735 | 120 | 47 | 4 940 | 1 920 | 830 | 9 200 |
| 2008 | 6 020 | 3 420 | 460 | 104 | 10 380 | 2 150 | 1 170 | 15 800 |
| 2009 | 9 960 | 3 440 | 1 160 | 335 | 16 300 | 2 630 | 1 650 | 23 100 |
| 2010 | 17 380 | 3 810 | 3 480 | 950 | 29 320 | 3 620 | 2 530 | 40 200 |
| 2011 | 24 880 | 4 210 | 12 760 | 2 560 | 51 360 | 4 700 | 4 200 | 70 200 |
| 2012 | 32 200 | 4 400 | 16 400 | 3 580 | 68 100 | 7 200 | 7 400 | 99 700 |
| 2013 | 35 700 | - | 17 500 | 4 320 | 78 200 | 14 100 | 12 200 | 137 000 |

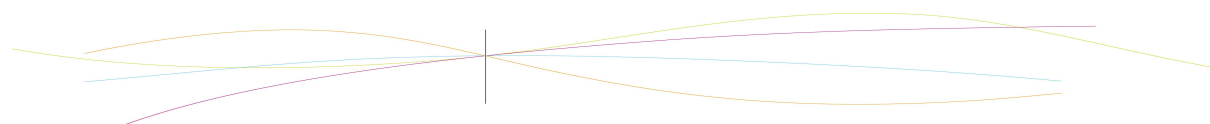
On peut voir qu'au niveau mondial, l'Union Européenne concentre la plus grande partie de la puissance photovoltaïque et qu'au sein de celle-ci c'est l'Allemagne qui concentre la plupart de la puissance photovoltaïque.

8.4.2. Risques et environnement

L'un des principaux avantages du photovoltaïque et sa production non polluante mais son installation peut causer certains dégâts sur l'environnement de ce fait les installations ainsi que les panneaux solaires doivent être recyclés.

L'installation de parcs photovoltaïque nécessite d'une grande surface de sol et parfois un conflit entre l'agriculture et le photovoltaïque peut apparaître quant à l'utilisation de ces surfaces, en effet les deux activités nécessitent de grandes surfaces de sol ensoleillées. Certaines solutions sont apparues, l'installation des parcs photovoltaïques peut se faire sur des sols pollués et non fertiles.

Une autre solution à ce problème est le parc photovoltaïque flottant: le premier système flottant de 14 kWc a été installé en 2011 sur un lac de carrière à Piolenc, dans le Vaucluse, une centrale de 1 MWc a été mise en service en 2013 à Okegawa, au Japon, une autre de 200 kWc en 2014 sur un réservoir d'irrigation dans le comté de Berkshire situé à l'ouest de Londres ; des projets de centrales sont en développement en Corée du Sud et en Thaïlande. Ces centrales flottantes peuvent être installées sur d'anciens lacs de carrière, des bassins d'irrigation ou de régulation des crues, des réservoirs d'eau potable, des bassins industriels pollués ou des terrains inondables.



8.4.3. Recyclage

Aujourd'hui, les fabricants garantissent 80% de la puissance initiale après 25 ans. Cela ne signifie pas que l'installation doit être démontée après 25 ans, puisqu'elle reste encore en mesure de produire 80% de sa puissance initiale. L'utilisation ou non de la fin de vie du panneau est donc décidé par le producteur, selon ses besoins de production (par rapport à ses besoins de consommation par exemple).

Le recyclage d'une installation photovoltaïque nécessite de deux opérations préalables au recyclage des panneaux.

Le démantèlement d'une installation photovoltaïque consiste à déposer tous les éléments constitutifs du système, depuis les modules jusqu'aux câbles électriques en passant par les structures de support.

Les opérations de collecte sont d'ordre logistique, et adressent des problématiques d'emballage, d'étiquetage, de stockage et de transport vers les centres de traitement.

Après séparation mécanique des câbles, boîtes de jonction et cadres métalliques, le recyclage des modules à base de silicium cristallin peut se faire de deux façons différentes. Celle du traitement thermique qui va permettre d'éliminer le polymère encapsulant en le brûlant et de séparer ainsi les différents éléments du module photovoltaïque (cellules, verre et métaux : aluminium, cuivre et argent). Ainsi que celle du traitement chimique consiste à broyer l'ensemble du module puis à extraire des matériaux secondaires par fractions, selon différentes méthodes.

Une fois séparées des modules, les cellules subissent un traitement chimique qui permet d'extirper les contacts métalliques et la couche anti-reflet.

Ensuite les plaquettes sont soit utilisées pour la fabrication de nouveaux modules, si elles ont été récupérées dans leur intégrité, soit fondues et intégrées dans le processus de fabrication des lingots de silicium.

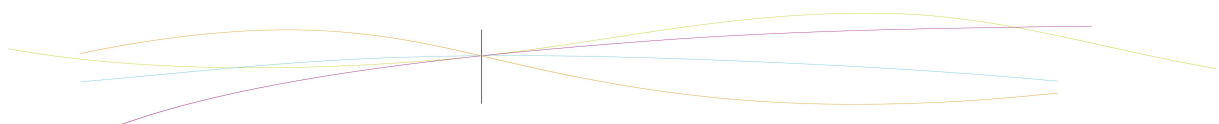
8.5. Aspect administratif et juridique

L'installation d'une structure photovoltaïque nécessite une démarche administrative impliquant le respect de quelques normes en vigueur imposé par le gouvernement français. Parmi les règles permettant d'organiser le domaine des panneaux photovoltaïques, on cite :

8.5.1. Les autorisations d'urbanisme:

Avant de vous lancer dans l'installation de panneaux solaires, vous devez vous renseigner, pour ne pas enfreindre les lois, auprès de :

- votre **mairie** : votre commune peut imposer l'aspect de votre maison (couleurs, matériaux, toits, etc.), ce qui vous obligera à adapter votre choix d'installation.
- votre **copropriété** : si vous souhaitez installer des panneaux dans un immeuble, vous devez demander l'accord de l'assemblée générale des copropriétaires.
- la **Direction départementale de l'équipement (DDE)** : elle vous expliquera comment suivre le plan local d'urbanisme (PLU), qui fixe les règles d'utilisation des sols et



d'aspect extérieur des bâtiments. Le PLU précise les contraintes pour la pose de panneaux solaires, selon la région.

Dans tous les cas, vous devez mentionner la pose des panneaux solaires dans votre permis de construire, s'il s'agit d'une construction neuve. Si le bâtiment est ancien, une autorisation de travaux peut être nécessaire.

8.5.2. *Attention à l'interdiction des panneaux solaires*

Si vous habitez à proximité d'un bâtiment classé ou d'un site historique ou protégé, vous devrez obtenir l'accord des Architectes des bâtiments de France (ABF). L'organisation peut poser un veto sur votre projet. De plus, si vous ne respectez pas le PLU, votre projet peut également tomber à l'eau.

La DDE vous précisera également si votre construction se situe dans une zone spécifique du territoire : zone de protection du patrimoine architectural urbain et paysager, périmètre de protection d'un site classé, périmètre de rénovation immobilière, plan de sauvegarde et de mise en valeur, etc.

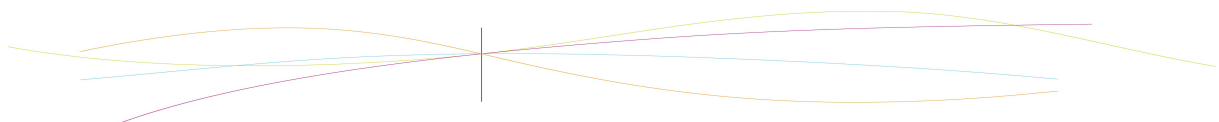
8.5.3. *Réglementation : spécificités des champs photovoltaïques*

Pour les installations solaires au sol (champs de panneaux photovoltaïques), une réglementation spécifique s'applique. Selon la puissance et la taille du système, les procédures d'installation sont variables :

- Puissance inférieure à 3 kWc : vous devez réaliser une déclaration préalable de travaux. Si la hauteur de l'installation est inférieure à 1,80 m, vous êtes dispensé de cette déclaration.
- Puissance entre 3 et 250 kWc : vous devez réaliser une déclaration préalable de travaux. Si la zone est proche d'un site classé, vous devez obtenir un permis de construire.
- Puissance supérieure à 250 kWc : vous devez faire réaliser une étude d'impact, une enquête publique, et obtenir un permis de construire.

Pour pouvoir exploiter votre installation solaire photovoltaïque, vous devez effectuer des démarches, selon la puissance du parc :

- Puissance inférieure à 250 kWc : l'installation est réputée déclarée, vous n'avez pas de démarche à faire.
- Puissance entre 250 et 4 500 kWc : vous devez déposer une déclaration d'exploiter.
- Puissance supérieure à 4 500 kWc : vous devez obtenir une autorisation d'exploiter.

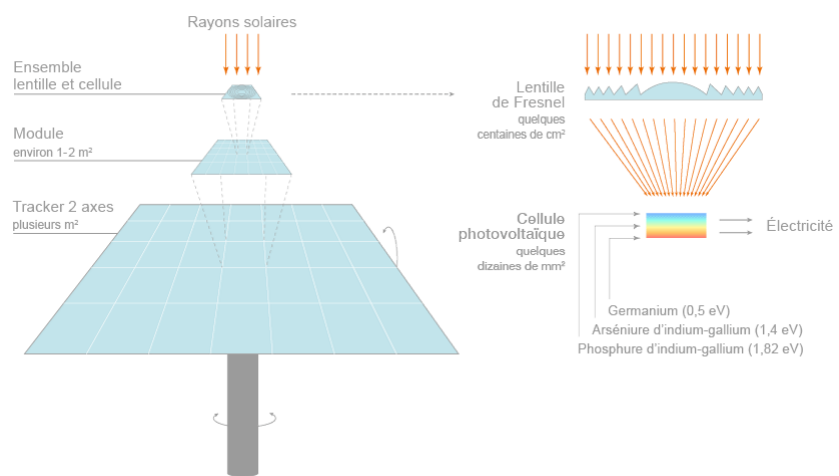


8.6. Innovations

Le panneau photovoltaïque est une technologie récente qui présente encore certains défauts, et points d'amélioration. En effet, il est rigide, sa performance est variable, il nécessite des conditions très spéciales, il prend de la place, il coûte cher, autant de raisons qui poussent les chercheurs à innover. L'industrie du photovoltaïque se tourne durant ce 21ème siècle vers le développement de techniques qui utiliseront à terme beaucoup moins de matière ou des matériaux moins onéreux. Le solaire à concentration, le dépôt sur ruban, les panneaux à couche fine et les matériaux organiques constituent aujourd'hui les principaux axes de recherche et d'innovation future. Le SprayLD, les panneaux imprimables, et d'autres variantes font également l'objet d'étude.

8.6.1. Le solaire photovoltaïque concentré

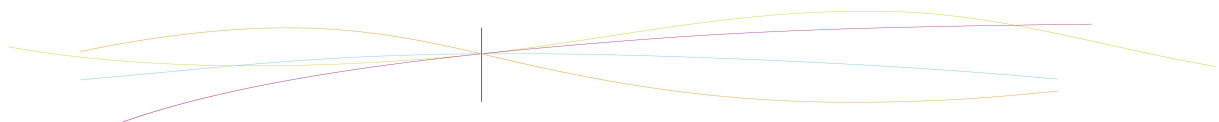
Ce nouveau système se base sur l'utilisation de systèmes optiques tels que les lentilles ou les miroirs afin d'augmenter l'énergie incidente provenant du soleil et ainsi de multiplier l'énergie produite par le module photovoltaïque. Les rayons du soleil sont concentrés sur une petite cellule solaire photovoltaïque à haut rendement.



Grâce à cette technologie, les matériaux semi-conducteurs peuvent être remplacés par des systèmes optiques moins coûteux. Il y a également un gain d'espace très intéressant. Le rendement théorique maximum de la conversion photon-électron est de l'ordre de 85 %. Pour le moment, le rendement expérimental maximal obtenu avec cette technologie est de 40,7 %.

8.6.2. Les constituants organiques (polymères)

L'utilisation de matériaux polymères vise à remplacer les matériaux minéraux par des semi-conducteurs organiques, autrement dit des plastiques, pour la fabrication de cellules photovoltaïques. Ceux-ci sont bon marché, ont des bonnes propriétés d'absorption et sont faciles à déposer. Leur coût de revient très faible se double de caractéristiques particulièrement attrayantes : plus légères et moins fragiles, leur nature flexible laisse même envisager des matériaux souples en polymères organiques ou en silicones, voire des fibres textiles et des encres photovoltaïques. Néanmoins, d'une durée de vie courte, elles n'offrent pour l'instant que des rendements de moins de 5 % en laboratoire et devront donc être améliorées avant de pouvoir servir de base au développement d'une filière industrielle.

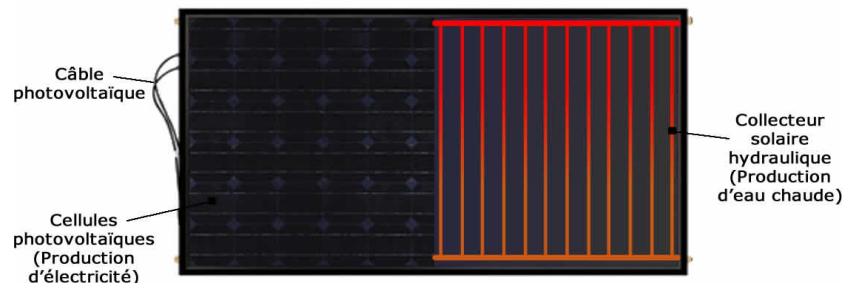


8.6.3. *Les cellules hybrides : thermiques et photovoltaïques*

Après des études, des scientifiques développent des capteurs solaires hybrides mariant le photovoltaïque et le thermique. La couleur foncée des cellules fait qu'elles s'échauffent au soleil, or leur rendement de production électrique diminue avec la chaleur, notamment au-dessus de 45°C.

Dans un panneau PV-T, le collecteur de chaleur capte les calories solaires, ce qui refroidit les cellules PV et augmente leur production notamment lors des pics d'insolation. La chaleur est injectée dans un accumulateur (circuit

fermé eau/glycol en général) grâce au courant produit par les cellules photovoltaïques ; cela améliore significativement la production électrique. Le refroidissement permanent des panneaux améliore également leur durée de vie et leur efficacité.

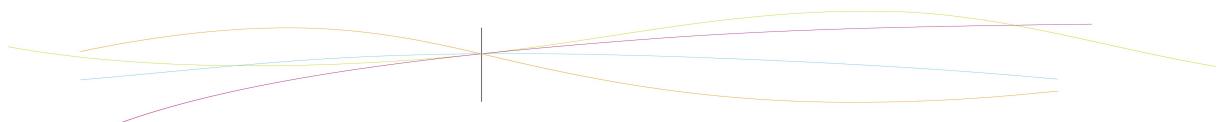


8.6.4. *SprayLD (layer deposition) : le spray qui transforme n'importe quel support en panneau photovoltaïque*

Au Canada, une équipe de chercheurs de l'université de Toronto a mis au point le SprayLD, un spray capable de transformer n'importe quelle surface en panneau énergétique. Ce spray diffuse en effet des microparticules photosensibles, comme les panneaux photovoltaïques, qui se répandent sur la surface ciblée. Ces particules vont permettre d'emmagasiner l'énergie perçue du soleil. Commercialisé 1000 \$, ce spray "magique" possède un taux de conversion de 7,2 % en moyenne.

8.6.5. *La pérovskite : une alternative aux cellules photovoltaïques en silicium*

Ces nouvelles cellules appartenant à la famille des cellules solaires organiques sont plus abordables et plus faciles à construire. De plus, leur utilisation a un double intérêt pour l'industrie photovoltaïque. L'estimation du coût de fabrication de ce type de cellules est cinq fois moins élevée que celui des panneaux classiques. En outre, les cellules solaires semi-transparentes de couleur neutre produites à base de pérovskite pourront être utilisées pour remplacer les fenêtres des immeubles et des automobiles. Cependant, leur rendement reste faible (11%) puisqu'elles captent beaucoup moins bien la partie infrarouge des rayons solaires. Il serait envisageable de construire un panneau hybride silicium/pérovskite qui pourrait théoriquement dépasser les 30% de rendement. L'explication d'une telle amélioration de performance provient du fait que la pérovskite et le silicium ne captent pas exactement la même partie du spectre lumineux. La pérovskite récolte seulement les photons de la partie visible du spectre, alors que le silicium travaille sur le visible et l'infrarouge à la fois. La technologie n'est cependant pas encore prête à sortir des laboratoires. Le problème de la longévité de la pérovskite n'a pas été résolu. Ce matériau se détériore rapidement lorsqu'il est exposé à la lumière et à l'eau. Il faut maintenant trouver un moyen de le rendre plus résistant pour que les cellules en pérovskite puissent tenir aussi longtemps que les cellules en silicium auxquelles elles sont alliées (environ 25 ans). De plus, elles contiennent des substances toxiques qui pourraient constituer un obstacle à leur commercialisation.



8.6.6. *Tuile solaire photovoltaïque : le panneau solaire de demain*

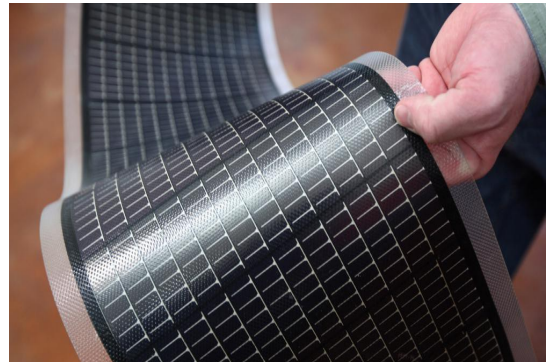
La tuile solaire commence à faire son apparition depuis quelques années. Tout comme pour le panneau photovoltaïque, la tuile solaire photovoltaïque consiste en un assemblage de plusieurs petits panneaux installés à même le toit. Les tuiles solaires ont un rendement industriel qui se situe aujourd'hui aux alentours de 14% et 20%. Les cellules de ces tuiles sont généralement faites à partir d'une couche très mince de CIGS (Cuivre, Indium, Gallium et Sélénium). Il existe également des tuiles solaires réalisées à partir de silicium qui présente exactement les mêmes rendements que les panneaux photovoltaïques.



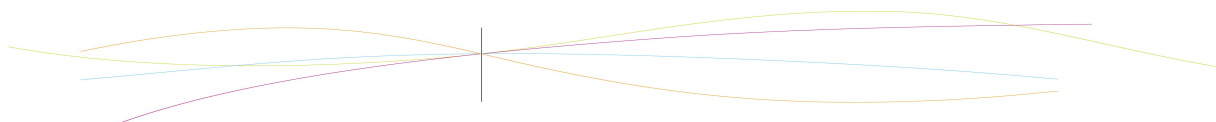
Si la tuile solaire possède tous les avantages du panneau photovoltaïque, elle a en plus le mérite de s'intégrer parfaitement au bâti en remplaçant une installation de tuiles standards. Le toit de la maison est alors parfaitement étanche et revisitera à toutes les intempéries (pluie, grêle, neige, ...), et la mousse ne pousse pas dessus du fait de l'inertie du matériau.

8.6.7. *Les panneaux solaires imprimables*

De leur côté, des chercheurs australiens du Victorian Organic Solar Cell Consortium (Vicosc) ont construit une machine pouvant imprimer 10 mètres de cellules solaires flexibles en une minute, a rapporté le site Wired.co.uk en mai dernier. Cette technologie devrait réduire considérablement le coût de fabrication. Tandis que la plupart des panneaux solaires sont traditionnellement fabriqués à partir de silicium, les chercheurs mobilisés sur ce projet ont élaboré une encre contenant des polymères organiques aux propriétés semi-conductrices: cette dernière a la faculté de recueillir la lumière avant de la convertir en électricité. L'encre peut être imprimée sur des matériaux plastiques ou métalliques, révélant de ce fait la plausibilité de l'intégrer facilement à l'architecture de futurs immeubles.



Pour conclure sur les innovations, nous pouvons voir que les idées ne manquent pas mais qu'il faut encore les affiner pour les voir un jour sur le marché. Ces technologies visent à corriger les défauts du panneau standard, c'est-à-dire : prendre moins de place, coûter moins cher (matériaux plus communs), obtenir un meilleur rendement, être plus esthétique, être moins fragile, accroître la durée de vie, et être non-polluant, facilement recyclable. De nombreux centres de recherche et entreprises y travaillent.



9. BIBLIOGRAPHIE

- [3] lien internet : <http://www2.cnrs.fr/presse/communique/371.htm> (valide à la date du 19/05/2015)
- [3] lien internet : <http://www.energie-photovoltaique-et-solaire.com/historique.html> (valide à la date du 19/05/2015)
- [3] lien internet : <http://energieideale.fr/photovoltaique-panneaux-solaires-contraintes-installation-devis> (valide à la date du 19/05/2015)
- [3] lien internet : <http://www.dekloo.net/projets-en-cours/photovoltaique-autoconsommation/caracteristiques-essentielles-dun-panneau-solaire-photovoltaique/689> (valide à la date du 19/05/2015)
- [3] lien internet : http://www.photovoltaique.guidenr.fr/III_1_caracteristique-courant-tension-module-photovoltaique.php (valide à la date du 19/05/2015)
- [3] lien internet : www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/electrothermie-industrielle-42270210/fours-a-arc-d5920/ (valide à la date du 19/05/2015)
- [3] lien internet : www.photowatt.com/panneaux-solaires/energie-solaire-en-France/panneaux-solaires-haut-rendement.html (valide à la date du 19/05/2015)
- [3] lien internet : www.photovoltaique.info/IMG/pdf/PV_Fab_Envt_final_26082009.pdf (valide à la date du 19/05/2015)
- [3] lien internet : https://www.youtube.com/watch?v=r0mC_X0WrDM (valide à la date du 19/05/2015)
- [3] lien internet : <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique> (valide à la date du 19/05/2015)
- [3] lien internet : http://www.francetvinfo.fr/monde/environnement/economie-d-energie-5-innovations-qui-allegeront-la-facture-du-futur_366846.html (valide à la date du 19/05/2015)
- [3] lien internet : <http://123solaire.fr/blog/revolution-imprimable/> (valide à la date du 19/05/2015)
- [3] lien internet : <http://www.ddmagazine.com/1442-Nanosolar-le-panneau-solaire-photovoltaique-reinvente.html> (valide à la date du 19/05/2015)
- [3] lien internet : <http://www.paristechreview.com/2013/04/19/photovoltaique-futur/> (valide à la date du 19/05/2015)
- [3] lien internet : <http://www.quelleenergie.fr/magazine/technologies/nouvelles-technologies-photovoltaique-6364/> (valide à la date du 19/05/2015)
- [3] lien internet : <https://www.lenergieenquestions.fr/la-perovskite-une-alternative-aux-cellules-photovoltaiques-en-silicium/> (valide à la date du 19/05/2015)
- [3] lien internet : <http://123solaire.fr/blog/tuile-solaire-photovoltaique-panneau-solaire-demain/> (valide à la date du 19/05/2015)

[3] lien internet : <https://www.lenergieenquestions.fr/tag/perovskite/> (valide à la date du 19/05/2015)

[3] lien internet : <http://dailygeekshow.com/2014/12/15/spray-surface-capteur-solaire/> (valide à la date du 19/05/2015)

[3] lien internet : <http://blog.lefigaro.fr/green-business/2014/01/une-innovation-prometteuse-dans-le-photovoltaïque.html> (valide à la date du 19/05/2015)

[3] lien internet : <http://www.creapills.com/idee/sprayld-le-spray-qui-transforme-n-importe-quel-support-en-panneau-photovoltaïque> (valide à la date du 19/05/2015)

[3] lien internet : http://fr.wikipedia.org/wiki/Panneau_photovoltaïque_thermique (valide à la date du 19/05/2015)

[3] lien internet : <http://erm-electronique.perso.sfr.fr/> (valide à la date du 19/05/2015)

[3] lien internet : <http://www.photovoltaïque.info/Gestion-et-valorisation-des> (valide à la date du 19/05/2015)

[3] lien internet : http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_photovoltaïque (valide à la date du 19/05/2015)

[3] lien internet : <http://www.euroobserv-er.org/> (valide à la date du 19/05/2015)

[3] lien internet : <http://www.consoglobe.com/panneaux-photovoltaïques-rentables-3574-cg/2> (valide à la date du 19/05/2015)

[3] lien internet : <http://www.photovoltaïque.info/Les-composantes-de-la-lumière,239.html> (valide à la date du 19/05/2015)

[3] lien internet : <http://www.ef4.be/fr/photovoltaïque/aspects-techniques/orientation-structure.html> (valide à la date du 19/05/2015)

[3] lien internet : <http://www.dekloo.net/projets-en-cours/photovoltaïque-autoconsommation/caracteristiques-essentielles-dun-panneau-solaire-photovoltaïque/689> (valide à la date du 19/05/2015)

[3] lien internet : http://energeia.voila.net/solaire/solaire_pv_monde.htm (valide à la date du 19/05/2015)

[3] lien internet : http://www.photovoltaïque.guidenr.fr/III_1_caracteristique-courant-tension-module-photovoltaïque.php (valide à la date du 19/05/2015)

[3] lien internet : <http://www.photovoltaïque.info/L-effet-photovoltaïque.html> (valide à la date du 19/05/2015)

[3] lien internet : <http://ines.solaire.free.fr/solpv/page4.html> (valide à la date du 19/05/2015)

[3] lien internet : <http://www.magnetosynergie.com/Archives/DocumentsForum/LeRayonnementSolaireEtLePhotovoltaïque.pdf> (valide à la date du 19/05/2015)

