

ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE



Etudiants :

Valentin DUBUC

Marie MAS

Inès PATTON

Audrey JOLIBOIS

Victor PASQUIER

Enseignant-responsable du projet :

Monsieur Jamil ABDUL AZIZ

Date de remise du rapport : **19/06/2017**

Référence du projet : **STPI/P6/2017 – #41**

Intitulé du projet : **Énergie solaire photovoltaïque**

Type de projet : **Théorique, étude de cas, expérimental.**

Objectifs du projet :

- **Acquérir des connaissances sur les énergies solaires photovoltaïques et les panneaux photovoltaïques.**
- **Gérer un projet en groupe (répartition du travail, travail d'équipe, rédaction d'un rapport, remise des travaux dans un temps donné...).**
- **Réaliser des expériences afin de vérifier les valeurs théoriques de nos recherches.**

Mots-clefs du projet :

- **Photovoltaïque**
- **Énergies renouvelables**
- **Panneau solaire**

TABLE DES MATIERES

1. Introduction.....	5
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	6
3. Présentation du photovoltaïque.....	7
3.1. Histoire du photovoltaïque.....	7
3.2. Fabrication du photovoltaïque.....	7
3.3. Les différents types de panneaux.....	8
3.4. Principe et fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques.....	9
3.4.1. L'effet photovoltaïque.....	9
3.4.2. Les cellules photovoltaïques.....	9
3.4.3. Les panneaux photovoltaïques.....	10
3.4.4. Caractéristiques d'un panneau et explication de l'unité de mesure.....	10
4. Aspect expérimental.....	11
4.1. Vérification du fonctionnement du panneau.....	11
4.2. Expérience 1 : L'inclinaison.....	12
4.3. Expérience 2 : Vérification des caractéristiques de notre panneau photovoltaïque.....	13
4.4. Expérience 3 : Les effets de l'ombre.....	14
5. Enjeux et innovations.....	16
5.1. Le photovoltaïque dans le Monde.....	16
5.1.1. Une économie en plein essor.....	16
5.1.2. Photovoltaïque et développement.....	16
5.2. Le photovoltaïque en France.....	17
5.3. Enjeux environnementaux.....	17
5.4. Innovations.....	19
6. Conclusion et perspectives.....	21
7, Bibliographie.....	22
8. Annexes.....	24

1. INTRODUCTION

Nous avons réalisé un projet de physique sur les panneaux solaires photovoltaïques au cours de notre deuxième année d'études à l'INSA de Rouen. Ce projet a pour but de nous apprendre à travailler en groupe, ainsi que de s'organiser de façon autonome, durant 14 semaines.

Il a été mis à notre disposition un panneau solaire photovoltaïque, et du matériel électrique, afin que nous puissions réaliser des expériences. Enfin, pour nous guider, nous pouvions consulter les rapports des années précédentes.

La majeure partie de ce projet a été la recherche bibliographique sur le sujet : nous avons ainsi pu acquérir des connaissances techniques, mais aussi nous intéresser au contexte économique et environnemental. En effet, cette réflexion est d'actualité : le domaine du photovoltaïque est en plein essor, se démocratise et est très prometteur dans le cadre de la transition énergétique.

Nous avons enfin été amenés à réaliser des expériences pour comprendre au mieux le fonctionnement d'un panneau solaire, et d'en mesurer l'efficacité.

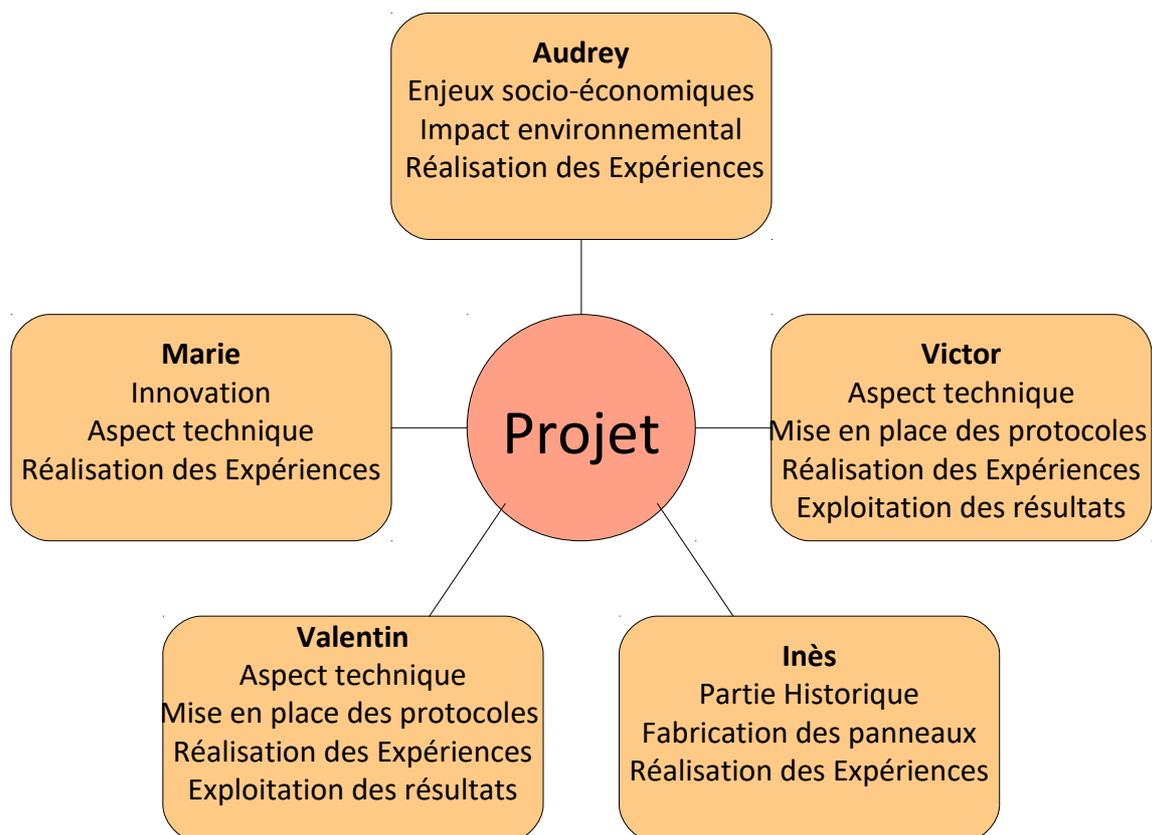
Ce projet était très complet et enrichissant notamment car les tâches que nous avons à effectuer étaient très diversifiées.

2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Notre projet s'est organisé en 14 semaines. Au début de celui-ci, nous avons tous effectué des recherches générales, puis nous nous sommes répartis les tâches. A chaque séance, nous avançons nos recherches que nous partageons sur un Gdoc. Ainsi, tout le monde pouvait avoir une idée globale de l'avancement du projet.

Le mardi 23 mai, nous avons pu, grâce à une météo favorable, réaliser nos expériences sur le toit de l'INSA.

Enfin, les dernières séances ont été dédiées à la mise en page du rapport, la réalisation de notre poster et la préparation de notre soutenance.



3. PRÉSENTATION DU PHOTOVOLTAÏQUE

3.1. Histoire du photovoltaïque

En 1839, Antoine Becquerel observa que certains matériaux avaient la capacité de produire un courant électrique s'ils étaient exposés à la lumière. Il découvrit ainsi l'effet photovoltaïque, qu'il exposa à l'académie des sciences la même année.

Ce n'est qu'en 1883 que l'américain Charles Fritts exploita cet effet pour produire la première cellule photovoltaïque. Cette cellule était composée de sélénium recouvert d'une fine couche d'or qui, exposée à la lumière, créait un échange d'électrons. Ce projet fut néanmoins vite abandonné car le rendement de cette cellule était très faible (de l'ordre de 1%), et l'or et le sélénium étaient des matériaux très onéreux.

En 1905, Albert Einstein étudia l'effet photoélectrique et exposa sa théorie sur les photons. Il posa ainsi les bases théoriques de la technologie photovoltaïque.

En 1954, trois américains des laboratoires Bell (Gerald Pearson, Darryl Chapin et Calvin Fuller) développèrent un panneau solaire composé de silicium, dont le rendement atteignait 6%.

L'énergie solaire photovoltaïque commença réellement à être exploitée durant la guerre froide, lors de la conquête de l'espace entre l'Union Soviétique et les États-Unis. En effet, les scientifiques cherchaient un moyen d'approvisionner en continu leurs satellites en énergie, et ce sans que les dispositifs ne prennent trop de place et ne soient trop lourds dans les engins spatiaux. En 1958, le premier satellite alimenté par des cellules photovoltaïques fut envoyé dans l'espace.

La crise pétrolière des années 70 fit prendre conscience de l'intérêt à porter aux autres méthodes de production d'énergie. Les énergies propres et renouvelables connurent depuis de grandes avancées et l'énergie solaire photovoltaïque est de nos jours largement répandue dans le monde entier.

3.2. Fabrication des panneaux photovoltaïques

Le Silicium, matériau semi-conducteur, est la matière première utilisée dans la fabrication des panneaux photovoltaïques. La silice étant le deuxième élément le plus abondant sur Terre, elle n'existe pas à l'état naturel, mais sous différentes formes de minéraux, comme le sable ou encore le quartz.

Pour obtenir le silicium, il est nécessaire de porter un mélange de quartz et d'espèces carbonées (telles que le bois ou le charbon) à haute température, pour convertir l'oxyde de silicium en silicium (on extrait donc l'oxygène de la silice).

Le silicium brut ainsi obtenu est ensuite purifié jusqu'à atteindre une qualité suffisante, le silicium solaire (ou encore silicium polycristallin).

Cette matière va par la suite être à nouveau fondue à 1450°C, puis solidifiées en blocs : les lingots. Ces lingots de silicium pur sont découpés en tranches très fines (de l'ordre de 0.25 à 0.4 mm d'épaisseur), appelées wafer. Les wafer sont ensuite traités de façon à obtenir une jonction semi-conductrice, appelée le dopage. Le principe du dopage sera expliqué dans la sous-partie « Principe et fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques ».

Pour obtenir un panneau solaire photovoltaïque, il faut ensuite assembler les cellules solaires en les raccordant en chaîne. Les chaînes sont interconnectées entre elles pour former une matrice. Il faut alors procéder à l'encapsulation de la matrice.¹

La matrice est disposée entre deux couches transparentes d'encapsulants. Un film EVA (Ethylène Vinyl Acétate) est placé sur la face arrière (entre les cellules et le tedlar) ou sur la face avant (entre le verre et les cellules). Ce film EVA assure la cohésion de l'ensemble. L'empilement est ainsi chauffé, afin de créer une enveloppe protectrice étanche autour des cellules solaires. Souvent, un cadre en aluminium sur le pourtour est ajouté au module.

Pour finir, chaque module est équipé d'une boîte de jonction (à l'arrière du panneau solaire) contenant des diodes de protection permettant le raccordement électrique. Ces diodes anti-retour sont des diodes placées en série à la sortie du panneau photovoltaïque, qui empêchent le courant électrique de revenir dans le panneau. En effet, un panneau solaire photovoltaïque est un panneau qui doit produire de l'électricité. Il produit donc de l'électricité uniquement le jour, en présence de rayonnements solaires.

La nuit en revanche, les panneaux solaires ne produisent plus d'électricité et la batterie risquerait de se décharger dans le panneau photovoltaïque. Un retour de courant dans le dispositif photovoltaïque impliquerait que celui-ci se comporte comme un consommateur d'électricité, au lieu d'un producteur. Cela endommagerait le panneau photovoltaïque, d'où l'utilité d'une diode anti-retour.

A l'issue de la fabrication des panneaux solaires photovoltaïques, les modules sont soumis à un test sous lumière artificielle calibrée (flash test) afin de mesurer leurs caractéristiques électriques réelles.

3.3. Les différents types de panneaux

Selon la fabrication, on peut trouver trois types de panneaux : les panneaux monocristallins (comme celui de l'INSA), les panneaux polycristallins et les panneaux amorphes.

Lorsque le silicium refroidi et ne forme qu'un seul cristal, on parle alors de **cellules en silicium monocristallin**. Dans ce cas-là, le cristal a une couleur très foncée et uniforme sur toute la cellule car le cristal est très homogène. C'est avec ces panneaux que l'on obtient le plus grand rendement (12% à 20%). Néanmoins, ce sont les panneaux solaires photovoltaïques les plus chers à fabriquer.



Si le silicium refroidi en formant plusieurs cristaux, il s'agit alors de **cellules en silicium polycristallin**. Le panneau est alors bleu foncé non uniforme. Le rendement est un peu plus faible que celui de panneaux photovoltaïques en silicium monocristallin (11% à 15%), mais est moins cher à fabriquer et représente ainsi le meilleur rapport qualité-prix.

Enfin, lors de sa transformation, le silicium produit un gaz qui peut être exploité pour la création de **cellules en silicium amorphe**. Le gaz est projeté sur une feuille de verre. Cela donne une cellule grise ou marron.

Le faible rendement de ce type de cellule (5% à 9%) ne permet pas d'alimenter une habitation en électricité, mais peut par exemple servir à recharger une montre ou une calculatrice, d'autant plus qu'il peut fonctionner avec un faible éclaircissement.

¹ Voir annexe 1

3.4. Principe et fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques

3.4.1. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel. C'est grâce à cet effet que fonctionne la majorité des panneaux solaires photovoltaïques d'aujourd'hui. Son principe est simple : lorsqu'un semi-conducteur rentre en contact avec de la lumière, le choc des photons produit une énergie suffisante pour que des électrons de la couche de valence passent dans la couche de conduction. Des électrons peuvent alors être transmis et créer un courant continu.

3.4.2. Les cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est un composant électrique qui produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Elles sont majoritairement composées de 2 couches d'un semi-conducteur, le silicium.

Comme on peut le voir sur le schéma en annexe², la première couche est dite de type N ou dopée N. Cela signifie qu'on a augmenté la densité en électrons dans cette couche. Pour réaliser cela, il faut combiner au semi-conducteur un atome qui a plus d'électrons de valence. Dans l'exemple du silicium, celui-ci a 4 électrons de valence. On va donc chercher à inclure des atomes avec 5 électrons de valence comme le phosphore. Ainsi, le 5ème électron sera libre et, n'étant pas un électron de liaison, il pourra facilement être excité vers la bande de conduction.

La deuxième couche est dite de type P ou dopée P. Cela signifie qu'on a baissé la densité en électrons dans cette couche. C'est le principe inverse du dopage N, et il faut donc combiner au semi-conducteur un atome qui a moins d'électrons de valence. Pour le silicium, il faudra inclure des atomes avec 3 électrons de valence comme le Bore. Celui-ci ne pourra créer que 3 liaisons covalentes. Il y aura alors un "trou" dans la structure.

Au voisinage de l'interface entre les deux couches, le déplacement des électrons entraîne une recombinaison entre les trous et les électrons (l'électron mobile va venir combler le trou). Ce phénomène produit une zone électriquement non neutre d'atomes de phosphore chargée positivement et une zone non neutre électriquement d'atomes de bore chargée négativement. On obtient ainsi un champ électrique au sein du semi-conducteur : cette région est appelée **jonction PN**.

Lorsque les rayons du soleil frappent une cellule photovoltaïque sur laquelle on a disposé deux bornes, **les photons de la lumière** transmettent leur énergie aux électrons qui sont arrachés des atomes dans lesquels ils laissent des trous. Les électrons et les trous ainsi formés vont avoir tendance à se recombiner, mais lorsque le phénomène a lieu dans, ou au voisinage de la jonction PN, le champ électrique va au contraire contribuer à séparer les charges positives et négatives. Les électrons cherchant à se combiner avec les trous sont alors obligés de passer par un circuit extérieur pour rejoindre les trous (fil électrique) créant ainsi un courant électrique continu que l'on appelle le **photocourant**.

² Voir annexe 2

3.4.3. Les panneaux photovoltaïques

Un panneau solaire photovoltaïque est une mise en série de plusieurs cellules photovoltaïques. Les tensions produites par chaque cellule photovoltaïque sont ajoutées entre-elles, offrant une plus grande tension finale.

Sur le schéma représentant le spectre solaire³, la partie bleue correspond à la partie que les cellules de silicium peuvent convertir en énergie électrique, le reste en orange et rouge est perdu. Au final, seulement 10 à 15% du spectre solaire est exploitable ce qui explique le rendement faible des panneaux solaires.

3.4.4. Caractéristiques d'un panneau et explication de l'unité de mesure

Une cellule photovoltaïque produit, lorsqu'elle est éclairée, un courant I en Ampère et une tension U en Volt. On peut donc tracer un graphe de la tension en fonction de l'intensité⁴.

Sur ces courbes, on peut remarquer quatre points particuliers. L' I_{cc} est le courant de court circuit et correspond au courant généré lorsqu'une cellule photovoltaïque est raccordée à elle-même. Le V_{co} est la tension en circuit ouvert qui est générée par une cellule éclairée mais non raccordée. L' I_{mpp} est le courant de puissance maximale et le V_{mpp} est la tension de puissance maximale. Ces points sont les caractéristiques d'un panneau solaire. Les valeurs de ces caractéristiques, données par les constructeurs, sont mesurées dans les conditions standards, soit une température de 25°C, un éclairement de 1000 W/m² et un coefficient de masse de l'air de 1,5.

En effet la température influe sur ces courbes et on remarque que lorsque la température augmente, le V_{co} et le V_{mp} diminuent ce qui provoque une diminution de la puissance maximale produite. Cela peut être expliqué par l'effet Joule qui dissipe une partie de l'énergie transmise en chaleur. Cet effet augmente avec la température, et il faut donc, pour avoir une grande puissance produite, que le panneau ne soit pas trop chaud. C'est pourquoi on observe souvent un meilleur rendement au printemps qu'à l'été.

De même l'éclairement joue un rôle important dans la production d'énergie. Plus il est faible, plus la production d'énergie est faible. Cela est dû au fait que lorsque l'ensoleillement diminue, le nombre de photons qui arrivent sur le panneau et donc le déplacement des électrons dans le panneau diminuent aussi. L'intensité de sortie et donc la puissance de sortie sont plus grandes si l'ensoleillement est bon.

Le Watt-Crête dans un dispositif photovoltaïque est la puissance maximale que le dispositif peut fournir en électricité dans des conditions standards, c'est-à-dire :

- Une irradiance de 1000 W/m²
- Une température au sol de l'ordre de 25°C

Un panneau photovoltaïque ne fonctionne que rarement à sa puissance maximale, notamment à cause des nuages qui réduisent l'ensoleillement du dispositif, ainsi que les variations de température.

L'unité Watt-Crête peut servir à comparer le rendement de panneaux photovoltaïques, ou encore à indiquer la taille du dispositif photovoltaïque.

3 Voir annexe 3

4 Voir annexe 4

4. ASPECT EXPÉRIMENTAL

Dans le cadre de notre projet, nous avons été amenés à effectuer de nombreuses expériences afin de mieux comprendre le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque.

Celles-ci nous ont aussi permis de vérifier diverses données fournies par les constructeurs.

Nous avons donc réalisé trois expériences sur le toit de l'INSA, avec le matériel nécessaire :

- un panneau photovoltaïque
- un régulateur
- une ampoule 12V
- un onduleur
- un voltmètre
- une feuille de papier opaque
- un ampèremètre
- des fils
- un support orientable
- un solarimètre
- un interrupteur
- une serviette de papier
- une résistance

4.1. Vérification du fonctionnement du panneau

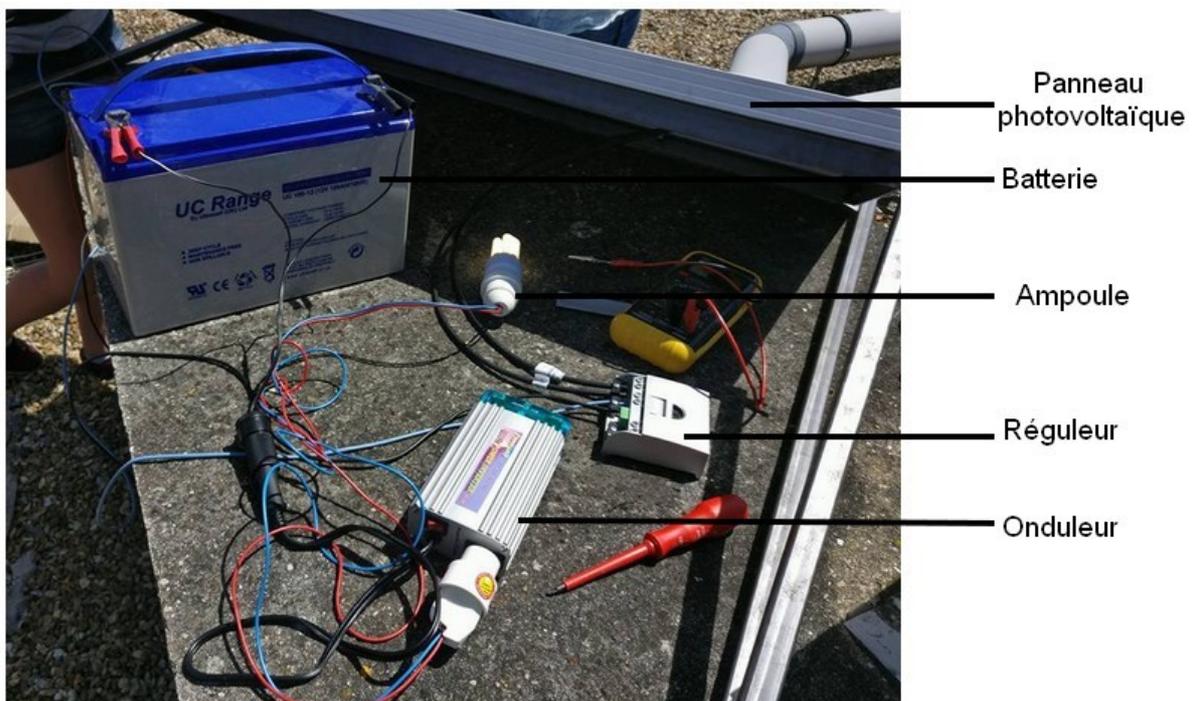
Objectif

Cette première manipulation a pour but de vérifier le fonctionnement de notre panneau.

Protocole expérimental

Nous allons brancher le panneau à un régulateur qui va permettre d'obtenir une tension de 12V. Ensuite nous allons le relier à une ampoule. Si celle-ci s'allume, le panneau fonctionne.

Résultats



Conclusion

Le panneau fonctionne correctement car l'ampoule s'est allumée.

4.2. Expérience 1 : L'inclinaison

But de l'expérience

Le but de cette expérience est de démontrer que l'inclinaison d'un panneau photovoltaïque a une influence sur la production d'énergie.

Protocole expérimental

Nous allons réaliser le montage 1⁵ en orientant notre panneau face au soleil, c'est-à-dire orienté vers le sud dans notre cas. Puis nous mesurerons à l'aide du solarimètre l'intensité du rayonnement solaire en faisant varier l'angle d'inclinaison α du panneau photovoltaïque de 15° en 15°. Nous effectuerons deux mesures de l'intensité lumineuse, et nous en ferons une moyenne.

Résultats

degré d'inclinaison	90	75	60	45	30	0
mesure n°1 de l'intensité lumineuse (W/m ²)	556	715	855	933	921	797
mesure n°2 de l'intensité lumineuse (W/m ²)	590	764	862	920	958	789
moyenne (W/m ²)	573	739.5	858.5	926.5	939.5	793

Analyses

dégré d'inclinaison	90	75	60	45	30	0
moyenne (W/m ²)	573	739.5	858.5	926.5	939.5	793

On remarque que la valeur optimale de l'inclinaison du panneau pour avoir la meilleure intensité lumineuse est de 36° dans notre cas⁶.

5 Voir annexe 5

6 Voir annexe 6

Conclusion

Ce résultat correspond à la valeur attendue (35°). L'inclinaison optimale est obtenue lorsque les rayons lumineux ont une incidence normale avec le panneau. Au moment des mesures, les rayons du soleil forment donc un angle de 54° avec la Terre.

Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	mai	Jui.	Jui.	Août.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
+13°	+7°	0°	-7°	-13°	-20°	-13°	-7°	0°	+7°	+13°	+20°

Longitude INSA Rouen : 49°

D'après le tableau, nous devons retirer 13 à la longitude pour obtenir l'inclinaison optimale
D'où Valeur théorique : $49 - 13 = 36^\circ =$ Valeur expérimentale. L'inclinaison optimale pour un panneau solaire au mois de mai à Rouen est donc de 36°.

4.3. Expérience 2 : Vérification des caractéristiques de notre panneau photovoltaïque

But de l'expérience

Le but de cette expérience est de vérifier les valeurs de la tension en circuit ouvert (Voc) et du courant en court-circuit (Icc). Pour cela nous allons effectuer 2 manipulations différentes.

Protocole expérimental

Manipulation 1

Nous réalisons le montage 2. Nous allons brancher le panneau à un interrupteur, et brancher en parallèle de celui-ci un voltmètre. En ouvrant l'interrupteur, on pourra alors mesurer la Voc.⁷

Manipulation 2

Nous réalisons le montage 3. Nous allons relier notre panneau en série avec un ampèremètre, nous pourrions ainsi, mesurer le courant en court-circuit Icc.⁸

Résultats

Manipulation 1 : Uco = 20.8 V pour un éclairement de 966 W/m²

Manipulation 2 : Icc = 5.21 A pour un éclairement de 1001 W/m²

Analyses

Manipulation 1 : Valeur théorique : 22.54 V

Ecart relatif : 8%

Manipulation 2 : Valeur théorique : 5.76 A

Ecart relatif : 11%

⁷ Voir annexe 7

⁸ Voir annexe 8

Conclusion

Les caractéristiques données par le constructeur concernant notre panneau photovoltaïque sont vérifiées (les écarts relatifs sont faibles). Les écarts de valeur peuvent être dues à l'éclairage. En effet, en usine, les panneaux sont testés à partir de lumière artificielle, dont l'intensité lumineuse est optimale et ne varie pas.

Nous avons pour objectif de tracer la caractéristique de notre panneau photovoltaïque ainsi que de calculer son point de puissance maximale. Cependant, nous avons rencontré des problèmes lors de la mise en place de l'expérience.

4.4. Expérience 3 : Les effets de l'ombre

But de l'expérience

L'objectif de cette expérience est de démontrer que l'ombre, sur un panneau photovoltaïque, est capable de couper toute la puissance de celui-ci. Le but est aussi de comprendre l'importance des diodes anti-retour qui permettent de ne pas endommager le panneau lorsqu'une cellule n'est plus en contact avec la lumière notamment à cause de l'ombre.

Protocole expérimental

Brancher la résistance au panneau. Brancher le voltmètre en parallèle de la résistance. Tout d'abord, on cache une ligne de cellules photovoltaïques du panneau et on relève les valeurs d'intensité et de tension. Puis nous recommençons pour deux lignes cachées, puis trois et enfin quatre..

On pourra alors calculer la puissance délivrée par le panneau, puis le rendement.

Résultats

Nombre de lignes cachées	intensité (A)	Tension (V)	Eclairage (W/m ²)
0	5.3	20.8	1030
1	0.3	19.5	1032
2	0.15	17.95	1017
3	0.04	16.20	1028

Analyses

Nombre de lignes cachées	Intensité (A)	Tension (V)	Eclairement (W/m ²)	Plumineuse (W)	Pelec (W)	Rendement (%)
0	5.3	20.8	1030	673.0	110.2	16.37
1	0.3	19.5	1032	674.3	5.85	0.87
2	0.15	17.95	1017	664.5	2.69	0.41
3	0.04	16.20	1028	671.7	0.648	0.096

Dimensions panneau : 121 x 54.

Surface panneau : 0.6534m²

Pour calculer la puissance électrique de notre panneau, nous faisons $Pelec = intensité \times tension$.

La puissance lumineuse fournie par le soleil se calcule elle par $Plumineuse = éclairement \times surface \text{ panneau}$.

Le rendement se calcule avec la relation $Rendement = Pelec / Plumineuse$.

Nous pouvons observer une nette diminution du rendement dès lors que nous cachons une ligne de notre panneau solaire. Le rendement du panneau continue de diminuer lorsque nous cachons des lignes de cellules photovoltaïques supplémentaires. Ce phénomène est provoqué par les diodes anti-retour (fonction expliquée dans la partie fabrication).

Conclusion

Le rendement d'un panneau photovoltaïque diminue fortement à cause de l'ombre. C'est pourquoi, lors de l'installation, il faut anticiper l'ombrage que pourrait avoir un arbre sur le panneau. Ces effets de l'ombre peuvent être néfastes pour notre panneau photovoltaïque.

5. ENJEUX ET INNOVATION

5.1. Le photovoltaïque dans le monde

5.1.1. Une économie en pleine essor

Si actuellement la part de production d'électricité grâce au photovoltaïque reste faible (moins de 1% de la production mondiale, celle-ci étant largement dominée par le charbon et le nucléaire), cela devrait changer d'ici quelques années. En effet, la puissance cumulée du photovoltaïque dans le Monde accroît considérablement depuis 2010, atteignant presque 180 391 MW en 2011.⁹

La prise de conscience d'une nécessité de transition énergétique, ainsi que la baisse du coût de production des panneaux solaires entraînent la démocratisation de ceux-ci. Autrefois considérée comme une énergie inaccessible car peu rentable, l'énergie solaire photovoltaïque est aujourd'hui compétitive.

Le prix d'un module de silicium a été divisé par cinq en cinq ans, pour se stabiliser à 0,56€ /W.

En couplant cela à son avantage d'un point de vue écologique, Ce n'est donc pas étonnant qu'elle séduise de plus en plus de pays. Si l'Allemagne (et en général l'Europe) reste pour l'instant leader du marché, cela tend à s'équilibrer. La Chine par exemple, arrive actuellement en seconde place du marché, et sa capacité solaire a septuplée depuis 5 ans.

5.1.2. Photovoltaïque et développement

La majorité des pays engagés dans la production de cette énergie sont les pays développés (comme les pays d'Europe), et les pays dont le développement est déjà assez avancé (la Chine). Pour le reste du monde, les énergies renouvelables, comme le photovoltaïque, ne sont pas encore la priorité.

Énergie et développement sont étroitement liés : d'un côté, l'accès à l'énergie favorise le développement, tout comme se développer entraîne une plus forte consommation d'énergie. Historiquement, cela reflète le schéma de développement des pays développés : en Occident, le développement économique a eu pour conséquence une forte augmentation des gaz à effet de serre, et ce n'est qu'une fois le pays développé que la transition énergétique vers des énergies plus propres a commencé à s'effectuer.

Dans l'idéal, une transition énergétique directe vers des énergies plus propres (dont le photovoltaïque) dans les pays en développement (donc susceptibles de consommer le plus) serait bénéfique d'un point de vue environnemental.

En réalité, il y a plusieurs obstacles à ce type de projet :

- Un obstacle financier : les coûts initiaux d'installation sont élevés.
- Des obstacles institutionnels : ces pays souffrent d'un fort lobby des entreprises des énergies fossiles.

La solution serait un support financier international pour un passage à l'énergie propre.

⁹ Voir Annexe 9

Malgré ces difficultés, des projets voient quand même le jour. En effet, beaucoup des pays en voie de développement bénéficient d'un fort ensoleillement (notamment sur le continent Africain). Le potentiel de ces régions est donc très fort.

Justement, en Afrique, le marché se démocratise de plus en plus. Il a quadruplé sa puissance installée en deux ans. Cela s'explique par la baisse de coût des installations qui les rendraient compétitives dans certains pays. Enfin, cette alternative séduit car par son autonomie, elle permet d'électrifier des zones plus reculées et difficiles à relier au réseau. Ainsi, fin 2015, le continent disposait de 2100 MW d'installations solaires (notons cependant que la répartition est inégalitaire, 65% des installations sont concentrées en Afrique du sud). Ce résultat, bien qu'encourageant, reste bien modeste face à ce qui pourrait être fait sur place. En effet, l'irradiation solaire des pays africains est comprise entre 1750Kw/m²/an et 2500.

En comparaison avec l'Allemagne (premier producteur mondial), l'irradiation africaine est double. On peut donc espérer une plus large démocratisation dans les années à venir.

5.2. Le photovoltaïque en France

A la sixième place du marché mondial de la production d'électricité grâce au photovoltaïque, la France se tourne elle aussi de plus en plus vers cette technologie.

En France, la puissance raccordée sur l'ensemble du territoire français est de 6722 MW, contre 878 en 2010.¹⁰

Cette augmentation s'explique par une volonté d'entamer progressivement une transition énergétique. Ainsi, jusqu'en 2014, il existait un crédit d'impôt pour l'installation de panneaux photovoltaïques. Si celui-ci n'est plus d'actualité, il existe des subventions locales. Enfin, EDF se propose, si l'installation est raccordée au réseau, de racheter une partie de l'électricité produite, en cas de surplus.

Les installations sont de toutes tailles et touchent aussi bien les particuliers (avec des installations résidentielles) que les entreprises énergétiques qui se spécialisent dans le domaine, avec la création de fermes solaires.

L'heure est aussi à l'innovation : Le 22 décembre dernier fut inaugurée la première route solaire dans l'Orne. Longue de 1 km, elle couvre une route départementale normande.

Si la construction de ce tronçon est une image forte pour promouvoir la transition énergétique, reste à savoir à quel point cette installation sera rentable d'un point de vue énergétique.

5.3. Enjeux environnementaux

Le fonctionnement d'une structure photovoltaïque n'a pas d'impact négatif sur l'environnement lors de son utilisation, mais les impacts environnementaux se situent en début de chaîne (lors de la fabrication), puis en fin de vie, après le démontage.

Voici les 5 étapes de fabrication à analyser pour comprendre l'impact du photovoltaïque sur l'environnement.

¹⁰ Voir annexe 10

- Etape 1 : raffinage du silicium
- Etape 2 : Cristallisation de ce silicium solaire pour former des plaques.
- Etape 3 : Transformation de ce silicium cristallisé en composant actif pour devenir une cellule photovoltaïque.
- Etape 4 : Assemblage des cellules photovoltaïques en module photovoltaïque.
- Etape 5 : Groupement de plusieurs modules pour réaliser un système photovoltaïque

Etape 1 : Il y a une consommation de 40000 tonnes de silicium par an pour 5GW de panneaux solaires.

Le silicium est obtenu à partir de la silice, dont on a extrait l'oxygène. Ce procédé consomme énormément d'énergie, puisque les émissions de CO₂ sont très élevées : 3.14 tonnes de CO₂ rejetées pour une production d'une tonne de silicium. De plus, il est nécessaire de consommer 14kWh pour produire un kg de silicium.

Ensuite, le silicium doit être purifié pour ne garder que le silicium solaire SoG-Si. Il existe deux méthodes :

La première, chimique, est le procédé Siemens. Utilisant du chlore, il a pour conséquence la génération de grands volumes de déchets chlorés. Par ailleurs, il n'a un rendement que de 25%.

La deuxième solution est le procédé Elkem, à voie métallurgique. Si le rendement est plus faible (entre 15 et 16%, il consomme seulement 20% de la dépense du procédé Siemens).

Etape 2 : On passe ensuite à la cristallisation du silicium. Cette étape est marquée par une importante utilisation de produits chimiques, qui ne sont pas toujours recyclables : HNO₃, NaOH, HCL... Ces produits chimiques et polluants impactent l'eau.

Etape 3 : Il faut savoir que la fabrication des cellules rejette des gaz à effet de serre, notamment le CF₄.

Etape 4 et 5 : Enfin, l'assemblage des cellules photovoltaïques, ainsi que la réalisation du système est aussi consommateur d'énergie grise : gaz à effet de serre et rejet de composants fluorés.

Néanmoins, l'enjeu est de pouvoir traiter ou même réutiliser les déchets. 70% du CF₄ peut être fractionné afin d'être traité, ce qui est non négligeable, même si malheureusement son traitement n'est pas réglementé : certaines entreprises ne le font donc pas. De plus, certains matériaux, comme le fluide utilisé pour découper les panneaux est réutilisable à 80%.

Au final, le bilan énergétique de l'analyse du cycle de production du panneau est favorable.

En France, le retour énergétique se fait sur trois ans. Sachant que le panneau a une durée de vie de 30 ans, le panneau remboursera d'environ 10 fois sa dette.

L'impact majeur se fait par le raffinage du silicium (environ 40% du total). Pour améliorer l'impact énergétique, de nombreuses améliorations sont possibles : diminution de l'épaisseur des plaques (économie de matériau) ou encore fabrication de modules sans cadres.

Enfin, la recherche se fait dans l'augmentation du rendement des cellules, ce qui diminuerait le temps de retour énergétique.

Nous devons maintenant nous intéresser au recyclage des panneaux solaires. En effet, ceux-ci ont une durée de vie d'environ 30 ans. Au-delà de cette période, ils deviennent inutilisables. L'enjeu est donc de donner une seconde vie aux matériaux les composant. Avant 2012, le photovoltaïque était exempt de traités obligeant à recycler des déchets, afin de booster le secteur. Une directive européenne a cependant été mise en place, en vue de l'augmentation de la quantité de déchets à prévoir dans quelques temps : d'ici une dizaine d'années, une première vague de panneaux photovoltaïques de première génération sera à recycler. Selon l'association PV cycle (engagée dans la collecte des déchets, notamment

ceux photovoltaïques), il faudra gérer 130 000 tonnes de déchets photovoltaïques par an en Europe d'ici 2030. Nous sommes actuellement à 1000 tonnes par an. C'est pourquoi nous devons y réfléchir dès maintenant.

Actuellement, 85% du poids du panneau est recyclable, le verre et l'aluminium l'étant très facilement. En revanche, certains matériaux, comme le plomb ou le silicium doivent auparavant subir un traitement purificateur, pour ensuite être réutilisés dans la conception de cellules photovoltaïques.

Le problème le plus important reste les autres composants : certains sont nocifs, comme le tellure de cadmium, cancérigène. Leur recyclage est, par ailleurs, difficile, et ne devrait pas dépasser les 30% avant 2030.

Néanmoins, grâce à des associations comme Pv cycle, et à la prise en compte de l'enjeu de ce recyclage, celui-ci pourrait permettre de rejeter 800 à 1200 kg de CO₂ par tonne en moins dans l'atmosphère.

5.4. Innovations

L'énergie photovoltaïque est donc une énergie de l'avenir, mais est encore loin d'être parfaite. C'est pourquoi des recherches sont en cours afin d'augmenter le rendement des panneaux solaires, de réduire leur coût ou encore de minimiser leur impact environnemental en utilisant d'autres matériaux. On trouve des innovations telles que:

La fleur intelligente



C'est un générateur solaire en forme de tournesol qui suit le soleil durant la journée. Elle produit environ 40% d'énergie de plus qu'un système sur toiture. Le problème est son prix trop élevé d'environ 20 000 €, qui ne peut être amorti par la revente d'électricité.

La sphère solaire

C'est une sphère qui crée un effet loupe afin de démultiplier les rayons du soleil. Ceci est possible car elle est transparente et remplie d'eau, ce qui permet de concentrer les rayons du soleil en un point où l'on place des panneaux photovoltaïques. Cela permet d'avoir le même rendement avec beaucoup moins de matière première. Son prix d'environ 6000 euros est également élevé, mais on peut



en trouver des petites qui peuvent par exemple recharger un téléphone portable pour 149 euros.

Des tuiles et ardoises photovoltaïques



L'entreprise Tesla a mis au point des tuiles et des ardoises photovoltaïques qui s'intègrent mieux au paysage que les panneaux classiques. Selon Elon Musk, le dirigeant de Tesla, les modules qu'ils ont conçus sont bien plus solides que leur équivalent

classique, et inusables. Ils sont réalisés en quartz et permettent aussi une meilleure isolation. Cependant, aucune précision n'est disponible en ce qui concerne le rendement de ces modules.

Les panneaux solaires en spray

Des chercheurs anglais ont développé un procédé permettant de transformer n'importe quelle surface en surface produisant de l'énergie en y vaporisant un spray. Ce spray est composé de perovskite (titanium et calcium) beaucoup moins coûteux que le silicium. L'application est simple et beaucoup moins chère que la pose de panneaux solaires. De plus le spectre d'absorption du perovskite est plus large que celui du silicium. Cependant, ce procédé est pour l'instant moins efficace que les panneaux habituels. Le perovskite a également une longévité très faible et ne peut donc pas être utilisé sur le long terme.

Les panneaux solaire transparents

Une équipe de chercheurs californiens a mis au point une cellule photovoltaïque n'absorbant que le rayonnement infrarouge. Ces cellules pourraient donc fonctionner tout en étant presque transparente ce qui permettrait de transformer les fenêtres, les pare-brises, les écrans en producteurs d'énergie. Cette technologie ne permet pour le moment de convertir que 4 % du rayonnement solaire en électricité ce qui est très peu, mais le coût de fabrication de ces cellules est beaucoup moins importants que celui des panneaux basiques.

Les cellules multijonctions

Nous avons vu plus tôt que le silicium n'exploitait pas tout le spectre solaire. Ces cellules multijonctions permettent de remédier à ce problème. Elles sont constituées d'un empilement de plusieurs cellules photovoltaïques qui absorbent chacune une partie différente du spectre solaire. La plupart du temps, ces cellules sont constituées de trois jonctions successives associant des semi-conducteurs qui absorbent l'énergie solaire sur un spectre lumineux beaucoup plus large que le silicium, chaque couche étant adaptée à une partie du spectre lumineux. La première jonction est constituée de GaInP (Gallium Indium Phosphide) et absorbe les ultra-violets qui sont les photons les plus énergétiques. La deuxième, constituée de GaInAs (Gallium Indium Arsenide), correspond aux longueurs d'ondes moyennes (domaine du visible). La dernière est constituée de Ge (Germanium) est absorbe les photons de faible énergie, et donc les infrarouges.¹¹

Toutes ces innovations montrent une envie de développer encore plus le domaine du photovoltaïque mais présentent toujours des inconvénients et ne remplacent pour l'instant pas les panneaux solaires classiques. Il faut donc continuer à travailler et innover pour trouver des solutions qui mettront vraiment l'énergie solaire en avant.

11 Voir Annexe 11

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce projet nous a permis d'acquérir des connaissances sur un sujet avec lequel nous n'étions pas familier : les énergies solaires photovoltaïques.

Au-delà de l'acquisition de connaissances, ce projet nous a également permis d'apprendre à nous organiser et travailler en groupe. Nous avons rendu compte chaque semaine des avancées de notre travail, ce qui nous a obligé à fournir un travail régulier et à finir notre projet dans les temps. Nous avons dû réfléchir à des expériences, à la manière dont nous allions les mettre en place et les réaliser.

Nous avons dû faire preuve d'autonomie dans la rédaction de notre rapport et dans la recherche d'informations, même si nous avons été guidés par notre professeur Monsieur Jamil ABDUL AZIZ tout au long du projet.

Toutes les connaissances et méthodes de travail que nous avons acquises durant ce semestre au cours de ce projet nous seront sûrement utiles pour notre futur métier d'ingénieur. En effet, un ingénieur doit savoir s'adapter à toutes les contraintes auxquelles nous avons été confrontés.

7. BIBLIOGRAPHIE

1. Présentation du photovoltaïque

Liens internet:(valides le 08/06)

- [1] <http://www.cipcsp.com/tutorial/panneau-solaire.html>
- [2] <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16696>
- [3] http://www.photovoltaique.guidenr.fr/III_3_effet-temperature-module-photovoltaique.php
- [4] <http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu/371.htm>
- [5] <http://www.panneaux-solaires-france.com/historique-panneaux-solaires>
- [6] <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique>
- [7] <http://www.total.com/fr/expertise-energies/exploration-production/solaire/sunpower-technologie-solaire>
- [8] <http://www.yinglisolar.com/fr/solar-basics/>
- [9] <http://www.megasol.ch/fr/savoir/fabrication.html>
- [10] http://www.energie2020.ch/photovoltaque_technique_3.htm
- [11] http://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/PV_Fab_Envt_final_26082009.pdf
- [12] <http://www.tpepanneauxsolaires.fr/fonctionnement.html>
- [13] <http://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/photovoltaique/comment-fonctionne-le-panneau-solaire-photovoltaique/definition-principe-fonctionnement-photovoltaique/>
- [14] <http://panneaux-solaires-photovoltaiques.evasol.fr/photovoltaique-pourquoi-fois-je-le-faire.html>
- [15] <http://www.photovoltaique.info/L-effet-photovoltaique.html>
- [16] <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique>
- [17] <https://fr.solar-energia.net/definitions/effet-photovoltaique.html>

2. Aspect expérimental

Liens internet :(valides le 07/06)

- [1] <http://tpeenergiephotovoltaique.e-monsite.com/pages/la-cellule-photovoltaique/experience-1-rendement-d-une-cellule-photovoltaique.html>
- [2] <https://sites.google.com/site/tpeepv/4-experience-1>
- [3] <http://solar-project.pagesperso-orange.fr/experience.htm>
- [4] <http://glloq69.free.fr/TPE/experience.php>

3. Enjeux et innovations

Liens internet :(valides le 06/06)

- [1] <http://www.photovoltaique.info/-Contexte-mondial-.html>
- [2] <https://lejournel.cnrs.fr/infographies/energie-solaire-dans-le-monde-les-chiffres>
- [3] http://www.francetvinfo.fr/monde/chine/la-chine-numero-un-mondial-du-solaire_1086819.html
- [4] <http://www.lenergiesoutcompris.fr/actualites-et-informations/photovoltaique-solaire/l-energie-solaire-photovoltaique-les-chiffres-cles-en-france-47786>
- [5] <http://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaiques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/17/>
- [6] <https://www.industrie-techno.com/photovoltaique>
- [7] <http://notresolairephotovoltaique.e-monsite.com/pages/un-projet-prometteur-les-panneaux-solaires-3eme-generation/un-projet-prometteur-les-panneaux-solaires-3eme-generation.html>

Rapports :

Quoilin, S. (2008) *Energie et développement, quels enjeux ?*. Université de Lieges, institut des sciences humaines et sociales, Aout.

[1] http://www.labothonp.ulg.ac.be/staff/squoilin/files/energie_developpement_SQ090201.pdf

Ronan Levilly (2014), *Panneaux Photovoltaïques, les déchets du futur* INRS, décembre.

[2] [https://www.google.fr/url?](https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0ahUKEwiUur7UxLLSAhULbRQKHS2FC0oQFggvMAM&url=http%3A%2F%2Fwww.hst.fr%2Fdms%2Fhst%2Fdata%2Farticles%2FHST%2FTI-VP-7%2Fvp7.pdf&usg=AFQjCNF5kRU_tjtS9BffnDiuQbTsmNJYhQ&sig2=IGFQTLpS501MFesEz8DZoQ&cad=rja)

[sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0ahUKEwiUur7UxLLSAhULbRQKHS2FC0oQFggvMAM&url=http%3A%2F%2Fwww.hst.fr%2Fdms%2Fhst%2Fdata%2Farticles%2FHST%2FTI-VP-](https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0ahUKEwiUur7UxLLSAhULbRQKHS2FC0oQFggvMAM&url=http%3A%2F%2Fwww.hst.fr%2Fdms%2Fhst%2Fdata%2Farticles%2FHST%2FTI-VP-7%2Fvp7.pdf&usg=AFQjCNF5kRU_tjtS9BffnDiuQbTsmNJYhQ&sig2=IGFQTLpS501MFesEz8DZoQ&cad=rja)

[7%2Fvp7.pdf&usg=AFQjCNF5kRU_tjtS9BffnDiuQbTsmNJYhQ&sig2=IGFQTLpS501MFesEz8DZoQ&cad=rja](https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0ahUKEwiUur7UxLLSAhULbRQKHS2FC0oQFggvMAM&url=http%3A%2F%2Fwww.hst.fr%2Fdms%2Fhst%2Fdata%2Farticles%2FHST%2FTI-VP-7%2Fvp7.pdf&usg=AFQjCNF5kRU_tjtS9BffnDiuQbTsmNJYhQ&sig2=IGFQTLpS501MFesEz8DZoQ&cad=rja)

Articles :

[1] Marion Douet, (2017) Energie : quand le soleil se lève sur le continent africain. *Jeune Afrique* [en ligne] (25 janvier 2017), Disponible sur :

<http://www.jeuneafrique.com/mag/392979/economie/energie-solaire-se-leve-continent-africain/> [valide le 06/06/2017]

[2] Amandine Perraut (2015) Le photovoltaïque devient compétitif. *Les smart grids* [en ligne] (09 octobre 2015), Disponible sur :

<http://www.les-smartgrids.fr/emplois-industries-et-marches/09102015,le-photovoltaique-devient-competitif,1185.html> [valide le 06/06/2017]

[3] Charline Fornari, (2016) Quoi de neuf du côté des panneaux solaires ? zoom sur 3 innovations.

<http://www.up-inspirer.fr/30718-quoi-de-neuf-du-cote-des-panneaux-solaires-zoom-sur-3-innovations>

[4] Philippe Passebon, (2016) Ce que cachent les tuiles et les ardoises photovoltaïques d'Elon Musk.

<https://www.industrie-techno.com/ce-que-cachent-les-tuiles-et-les-ardoises-photovoltaiques-d-elon-musk.46569>

[5] Luis Pino, (2015) L'énergie solaire progresse à pas de géant.

<http://sites.arte.tv/futuremag/fr/energie-solaire-progresse-pas-de-geant-futuremag>

8. ANNEXES

ANNEXE 1

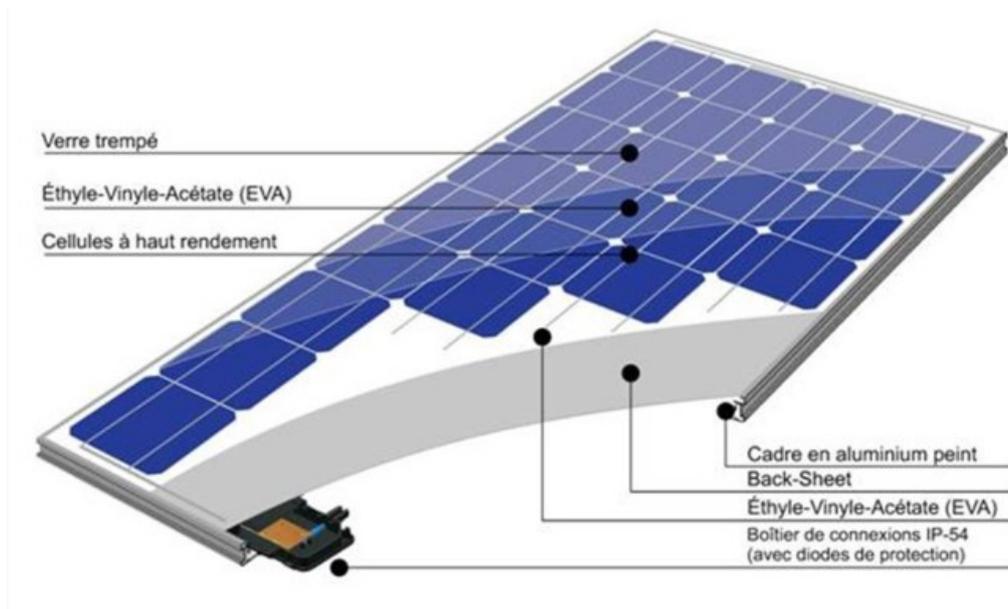


Schéma représentant les différents composants d'une cellule photovoltaïque

ANNEXE 2

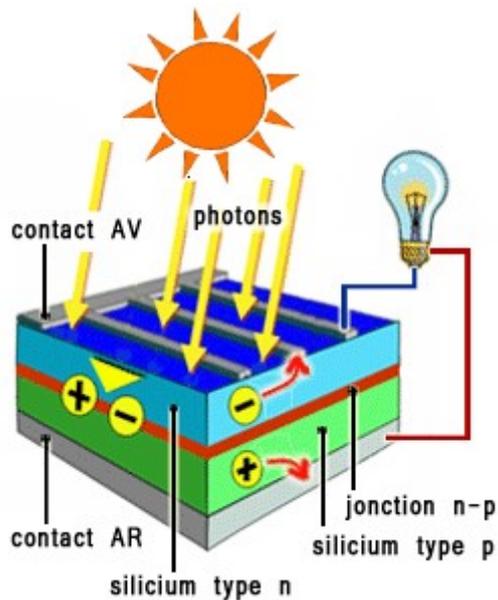


Schéma représentant le dopage d'une cellule photovoltaïque

ANNEXE 3

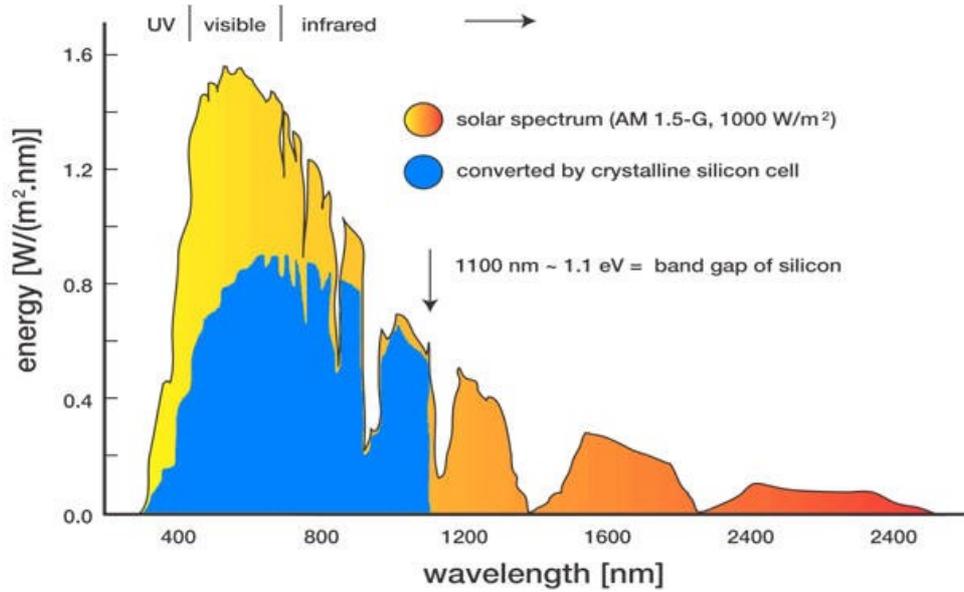
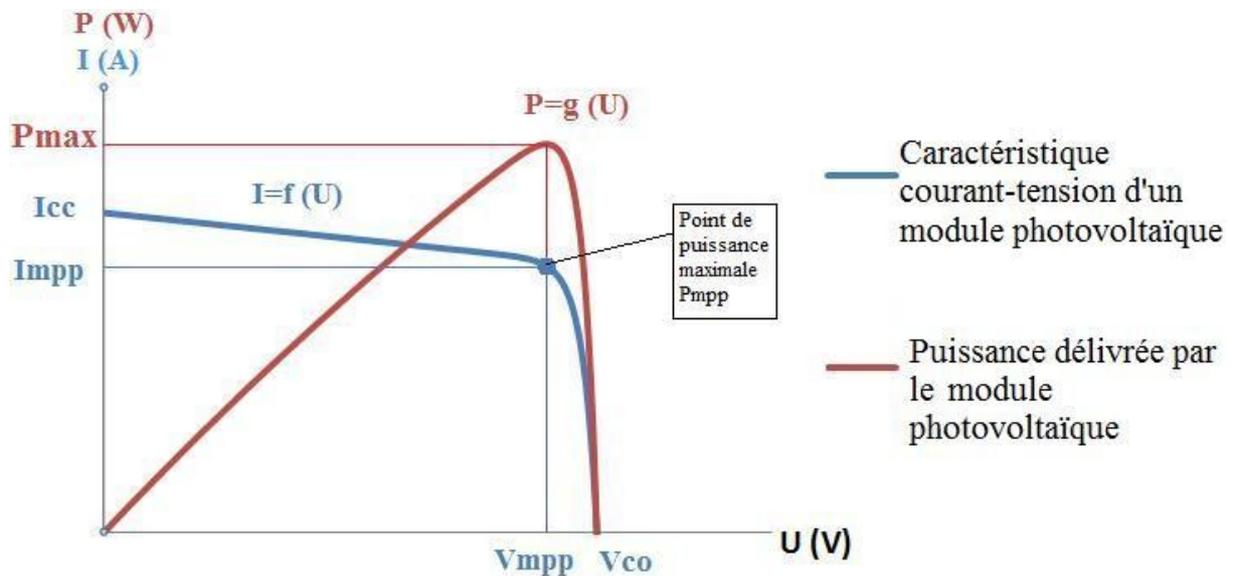


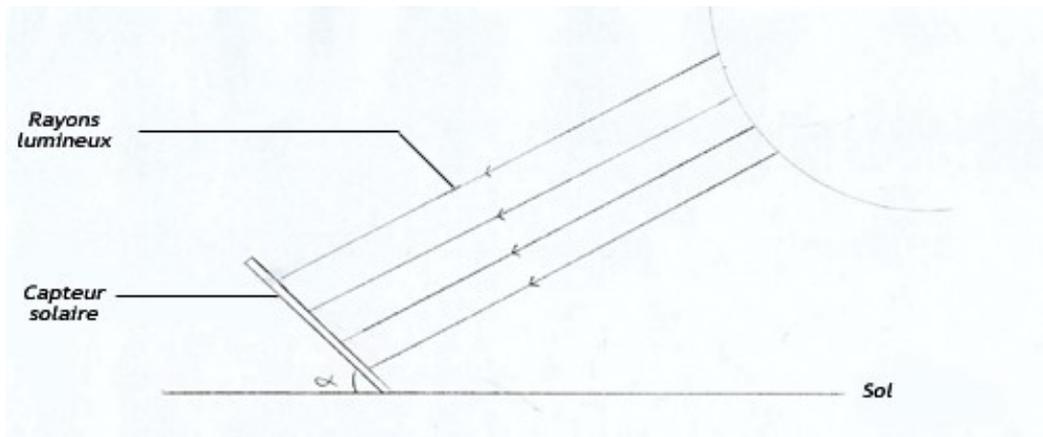
Schéma représentant le spectre solaire

ANNEXE 4



Graphe de la tension en fonction de l'intensité

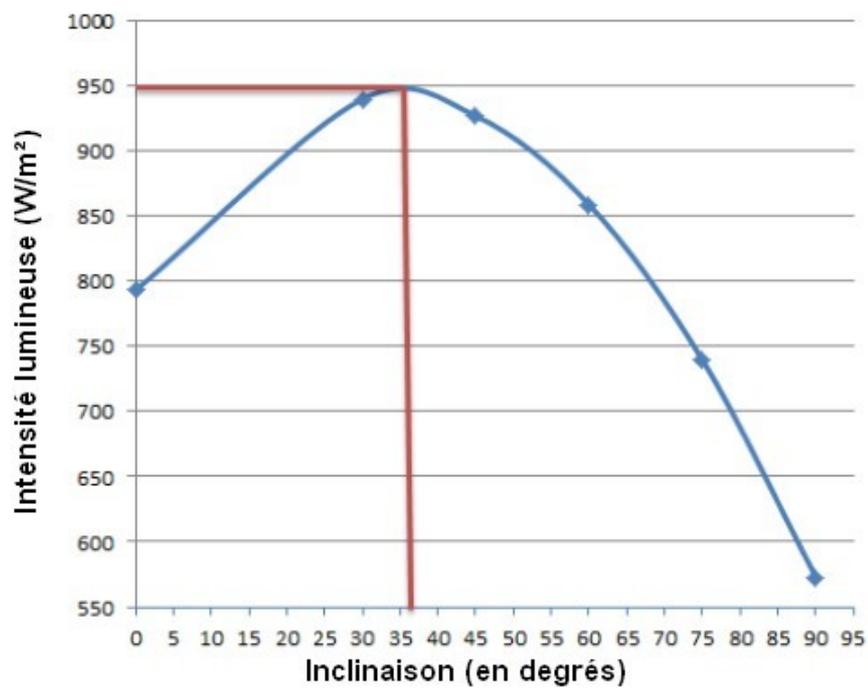
ANNEXE 5



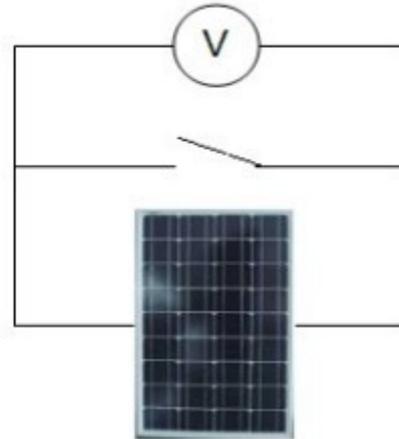
Montage 1

ANNEXE 6

Intensité lumineuse en fonction de l'inclinaison

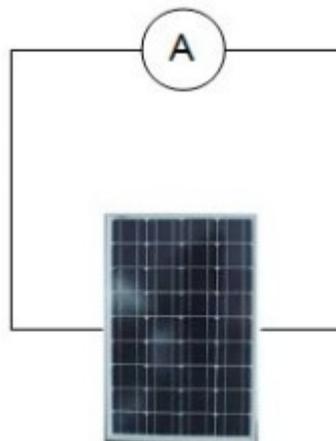


ANNEXE 7



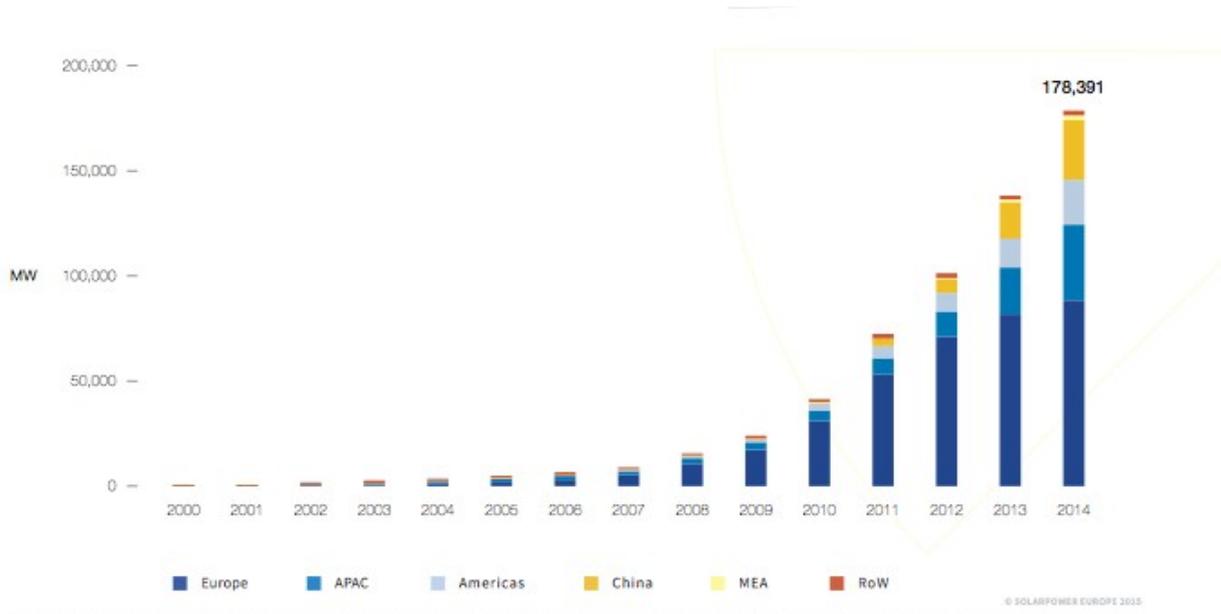
Montage 2

ANNEXE 8



Montage 3

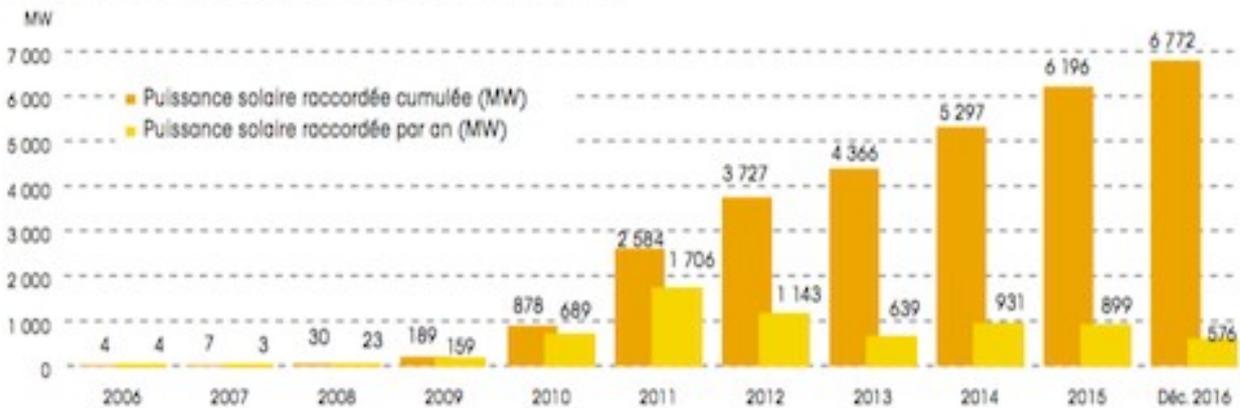
ANNEXE 9



Graphique représentant la puissance cumulée du photovoltaïque dans le Monde en fonction des années

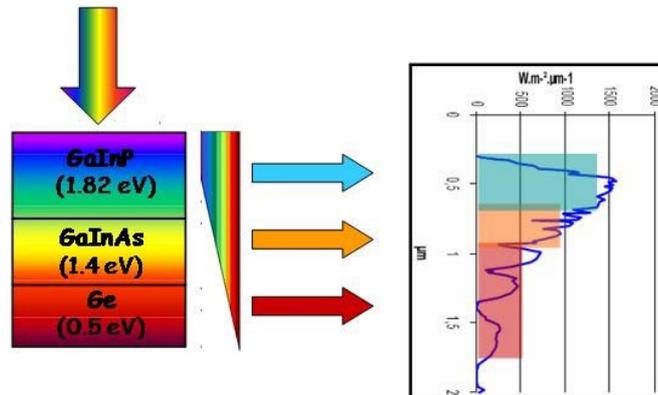
ANNEXE 10

Evolution de la puissance solaire raccordée (MW)



Graphique représentant l'évolution de la puissance solaire raccordée en France en fonction des années

ANNEXE 11



Rayonnement solaire absorbé par les différentes jonctions des cellules GaInP/GaInAs/Ge