

## Innovation technologique :

# Traqueur Solaire photovoltaïque



### Etudiants :

Lorène Cure-Durif

Reda Drissi

Isabelle Guillabert

Anthony Trochet

Thomas Vaillant

Julie Zimmer

### Enseignant responsable :

Jamil Abdul Aziz



Date de remise du rapport : **17/06/2012**

Référence du projet : **STPI/P6/2012 – n°7**

Intitulé du projet : **Innovation technologique – Traqueur solaire photovoltaïque**

Type de projet : ***Bibliographie / Modélisation / Expérimentation***

Objectifs du projet :

***Un des objectifs majeurs du projet est évidemment de comprendre le fonctionnement du tracking solaire, et de la technologie photovoltaïque. Mais nous avons aussi à étudier une installation existante et la comparer à une installation classique à l'aide de logiciels de simulation.***

***Ce projet doit ainsi nous apprendre à travailler en équipe afin de mener l'étude scientifique d'une innovation technologique.***

Mots-clefs du projet (4 maxi) : ***Traqueur, Panneaux, Solaire, Photovoltaïque***

# Sommaire

---

Introduction .....	1
Méthodologie, organisation du travail .....	2
A priori .....	3
I – Aspects théoriques .....	4
1. Aspects théoriques du photovoltaïque.....	4
2. Les problèmes liés à l’orientation du panneau solaire .....	10
3. La solution : les traqueurs solaires .....	14
II – Aspects pratiques et financiers.....	18
1. Fabrication.....	18
2. Impacts sur l’environnement.....	19
3. Analyse économique .....	22
III – Etudes, comparaison .....	25
1. Etude d’une installation classique .....	25
2. Etude d’une installation avec traqueur .....	26
3. Comparaison de la production et du rendement .....	28
Conclusion.....	32
Bibliographie .....	33

## Introduction

Dans le cadre de notre formation d'ingénieur INSA, nous avons souvent l'opportunité de travailler en groupe que cela soit lors de recherches, exposés, présentations ou en encore projets. En effet un ingénieur doit être capable de mener des travaux en équipe dans des domaines variés. Ainsi au quatrième semestre nous avons dû effectuer un projet de physique. De nombreux sujets nous ont été proposés. Ces projets pouvaient être de différents types : théorique, expérimental, simulation numérique, ou documentation.

Le nôtre a pour but l'étude d'une innovation technologique. En effet, face aux prévisions d'épuisement inévitable des ressources en énergie fossile, comme le pétrole ou le gaz, la science s'est intéressée aux énergies dites « renouvelables ». Le soleil, le vent, l'eau et encore bien d'autres, sont capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par des scientifiques. Dans ce projet nous allons nous intéresser au soleil, et plus particulièrement aux panneaux photovoltaïques. De nouvelles technologies se sont développées dans ce domaine, c'est pourquoi nous avons dû étudier les traqueurs photovoltaïques.

Notre projet « Innovation technologique : Traqueur solaire photovoltaïque » s'est déroulé sur une période de 14 semaines sous la supervision de Mr Jamil Abdul Aziz. Son rôle a été de suivre l'avancement de notre projet et éventuellement de nous aider si besoin il y avait.

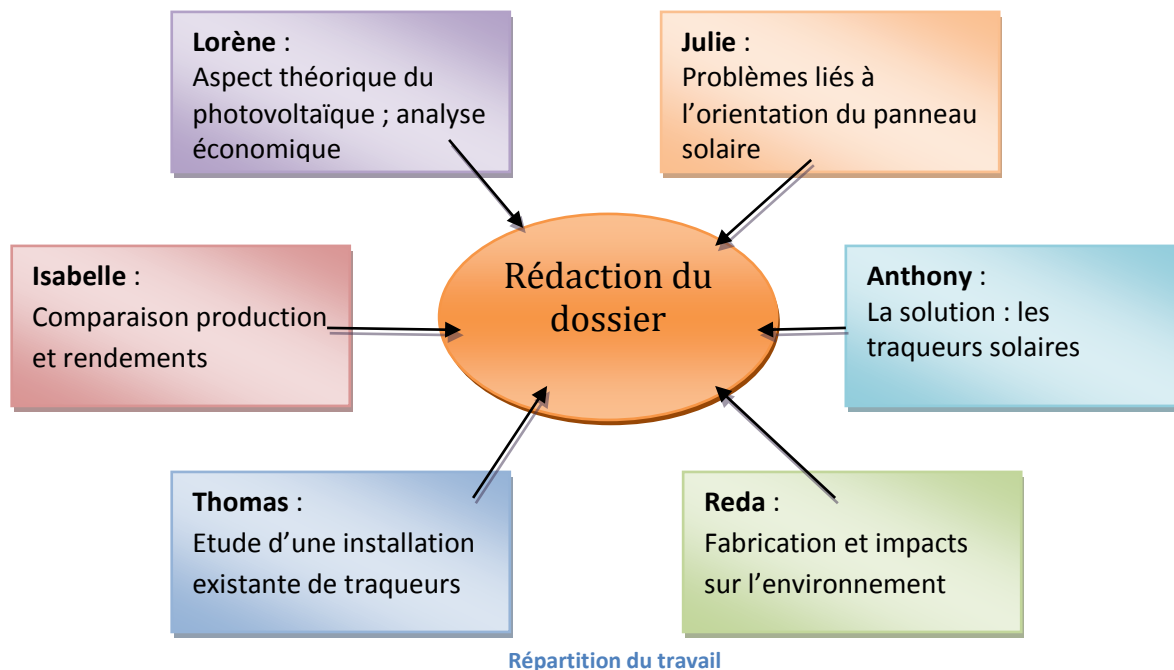
Dans un premier temps, nous allons étudier l'aspect théorique du panneau photovoltaïque puis du traqueur solaire. Dans un second temps nous discuterons des aspects pratiques et financiers d'une telle installation. Puis dans une dernière partie nous réaliserons des études et comparaisons entre les installations classiques et les traqueurs solaires.

## Méthodologie, organisation du travail

Lors des deux premières séances, nous avons pris connaissance du sujet et des objectifs liés à notre projet. Pour cela nous nous sommes concentrés sur des recherches bibliographiques mais également sur les rapports des années précédentes. Ces recherches nous ont permis de partir sur de bonnes bases, quant à cette nouvelle technologie : le traqueur solaire, qui nous paraissait assez floue.

Lors des autres séances, nous nous sommes répartis les axes de recherches afin de mieux appréhender les différents aspects du traqueur solaire et de pouvoir commencer la rédaction du dossier au plus tôt. Nous nous sommes répartis en deux groupes principalement : un travaillant sur l'aspect théorique d'une telle installation, l'autre sur la partie expérimentale. Lors de la cinquième séance, nous avons profité du beau temps pour aller mesurer l'irradiation globale moyenne dans certains endroits de l'INSA, afin de nous familiariser avec ces mesures.

Pour pouvoir avoir des données, et ainsi comparer une installation classique et une installation avec traqueur, il nous a fallu trouver et contacter un gérant d'une société possédant des panneaux solaires photovoltaïques, et des traqueurs solaires. Après avoir trouvé le numéro de M. Morée, gérant de l'entreprise Ozélaïr, Thomas s'est chargé de lui adresser un mail pour lui demander les données et les caractéristiques de ses installations.



En dehors des séances de P6 prévues par l'administration, nous avons parfois dû prendre sur notre temps libre, pour finir ce qui n'avait pu être fini en cours, comme notamment la rédaction du projet. Pour cela nous avons mis en place un groupe Facebook, et un Google Doc, afin de faciliter les échanges d'informations entre les membres du groupe. Dans notre équipe, chacun devait rédiger sa partie du dossier. La dernière séance a permis de mettre toutes nos parties en commun, de vérifier qu'aucun point n'avait été abordé plusieurs fois, et bien évidemment de vérifier qu'aucunes fautes d'orthographe ou de frappe n'avaient été commises. Puis nous avons effectué la mise en page de notre rapport, selon le modèle déposé sur Moodle.

## **A priori**

### **Thomas**

Je pense que les traqueurs photovoltaïques sont encore très peu utilisés en raison de leur coût élevé. Surtout dans des régions peu ensoleillées comme la Normandie, il doit être difficile de les rentabiliser.

### **Anthony**

Personnellement, j'avais déjà entendu parler des panneaux solaires photovoltaïques et je pense que c'est une bonne alternative pour produire de l'énergie plus propre. Par contre, je ne connais pas vraiment les traqueurs solaires mais il me semble qu'ils permettent un meilleur rendement. Mais ces produits ne sont pas vraiment développés, peut-être à cause de leurs coûts.

### **Reda**

Il me paraissait évident que l'efficacité d'un panneau solaire pouvait être améliorée grâce à l'installation d'un moteur lui permettant de toujours offrir la plus grande surface exposée. Cependant j'ignore si ce changement apportera un réel bénéfice et si oui ou non son installation pourrait devenir indispensable sur tous les panneaux solaires. Par ailleurs je me demande également si l'on peut réduire le bilan carbone des panneaux solaires dont la fabrication pollue grâce à un traqueur solaire.

### **Lorène**

J'avais déjà entendu parler de panneaux solaires (cela me semblait d'ailleurs un bon moyen de produire de l'énergie sans polluer) mais jamais encore de traqueurs solaires. Cependant, il me semble qu'un tel système doit augmenter le rendement de manière conséquente. Cela pourrait donc pallier aux problèmes de profits liés à l'installation de panneaux photovoltaïques standards.

### **Isabelle**

J'ai entendu dire que l'exploitation de l'énergie solaire n'était pas assez rentable étant donné le coût de l'installation et la durée de vie d'un panneau. Cependant j'espère apprendre que depuis, des progrès ont été faits et que le fait de l'associer à un système de tracking rend l'investissement assez profitable.

### **Julie**

Personnellement, je n'avais seulement qu'une vague idée de ce qu'était le panneau solaire photovoltaïque. Je ne connaissais que les grandes lignes. Je savais que cela permettait de produire de l'énergie grâce aux rayons du soleil, mais je ne savais pas comment cela fonctionnait. Cependant je n'avais aucune idée de ce qu'était le traqueur photovoltaïque.

# I – Aspects théoriques

## 1. Aspects théoriques du photovoltaïque

### a) Définition du photovoltaïque

Le terme photovoltaïque provient du grec ancien « photos », c'est à dire lumière ou clarté et du nom du physicien Alessandro Volta qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de tension électrique, le volt.

L'effet photovoltaïque désigne la capacité que possèdent certains matériaux, notamment les semi-conducteurs, à convertir directement les différentes composantes de la lumière du soleil (et non sa chaleur) en électricité.

### b) Histoire de la technologie photovoltaïque

L'effet photovoltaïque fut découvert en 1839 par le français Becquerel. En 1875, Werner Von Siemens expose devant l'académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Cependant, cette découverte reste anecdotique pendant les grandes guerres mondiales et ce n'est qu'en 1954 que trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement. Coïncidence ? C'est justement à ce moment que l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites. 4 ans plus tard, une cellule avec un rendement de 9% équipe les premiers satellites solaires envoyés dans l'espace. En 1973, pour la première fois une maison est alimentée par des cellules photovoltaïques aux États-Unis et une voiture alimentée par le soleil parcourra 4 000 km en Australie en 1983. En 1995, c'est au Japon et en Allemagne que des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, et on voit bien qu'ils se généralisent au monde entier.

### c) Fonctionnement de la technologie photovoltaïque

Un semi-conducteur possède deux parties : une présentant un excès d'électrons, et l'autre un déficit en électrons. Elles sont respectivement dites dopées de types n et de type p. Dans la couche dopée de type n, il existe une quantité d'électrons libres supérieure à une couche de silicium pur. Dans l'autre couche, il y aura donc une quantité électrons libres inférieure à une couche de silicium pur, d'où le fait que le matériau reste électriquement neutre.

On utilise la théorie des bandes d'énergie pour décrire le fonctionnement des cellules photovoltaïques : la structure périodique des atomes dans un solide entraîne des bandes d'énergie interdites pour l'électron et chaque matériau est caractérisé par une largeur de bande interdite (gap) exprimée en eV dont la valeur détermine la nature du matériau (conducteur, semi-conducteur ou isolant). Pour les semi-conducteurs, ce gap est suffisamment petit pour que les électrons de la bande de valence puissent rejoindre la bande de conduction. Cette bande interdite correspond à l'énergie nécessaire pour faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction. On différencie 4 types de couches : la bande de valence, de conduction, interdite et permise.



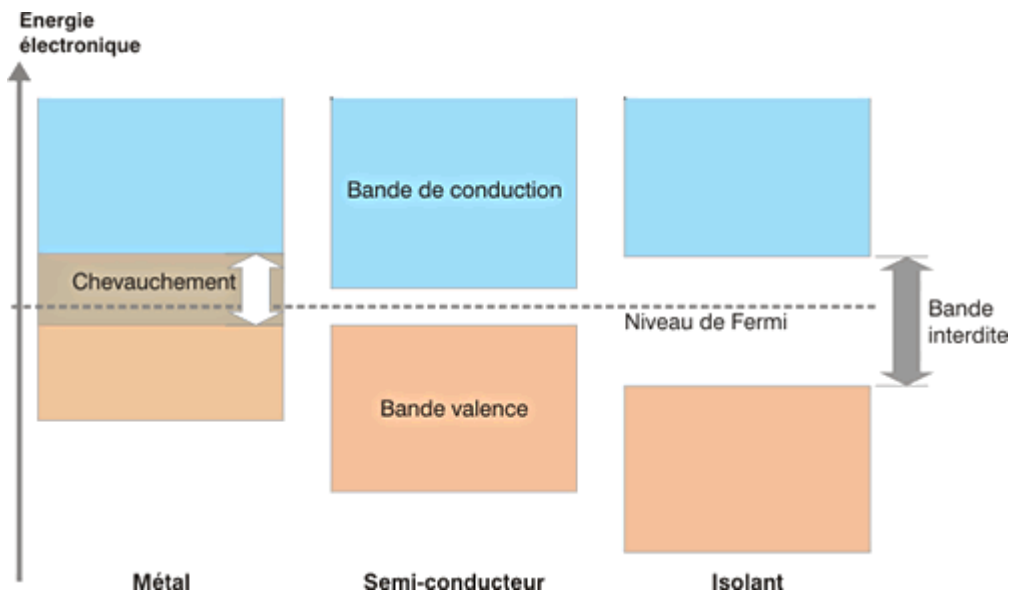


Figure 1 : Les bandes d'énergie

L'effet photovoltaïque repose donc sur les propriétés des semi-conducteurs, mais aussi sur leur dopage. En effet, il est possible de doper les couches de silicium afin d'augmenter leur conductivité. Le silicium employé aujourd'hui dans la majorité des cellules a été choisi pour la présence de quatre électrons de valence sur sa couche extérieure. Dans le silicium, chaque atome est lié à quatre atomes voisins. Ainsi, si un atome de silicium est remplacé par un atome de phosphore par exemple (l'atome remplaçant doit être situé sur la colonne V du tableau de Mendeleïev), un des 5 électrons de valence ne participera pas aux liaisons. Par agitation thermique, il va passer rapidement dans la bande de conduction et ainsi devenir libre de se déplacer dans le cristal, laissant un trou fixe derrière lui, lié à l'atome de dopant. Il y a alors conduction par un électron, et le semi-conducteur est dit dopé de type n. Si au contraire un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne III, il lui manquera un électron de valence pour réaliser toutes les liaisons, et un électron viendra très vite combler ce manque et occuper l'orbitale vacante par agitation thermique. Il en résulte un trou dans la bande de valence, qui va contribuer à la conduction. On aura alors un dopage dit de type p.

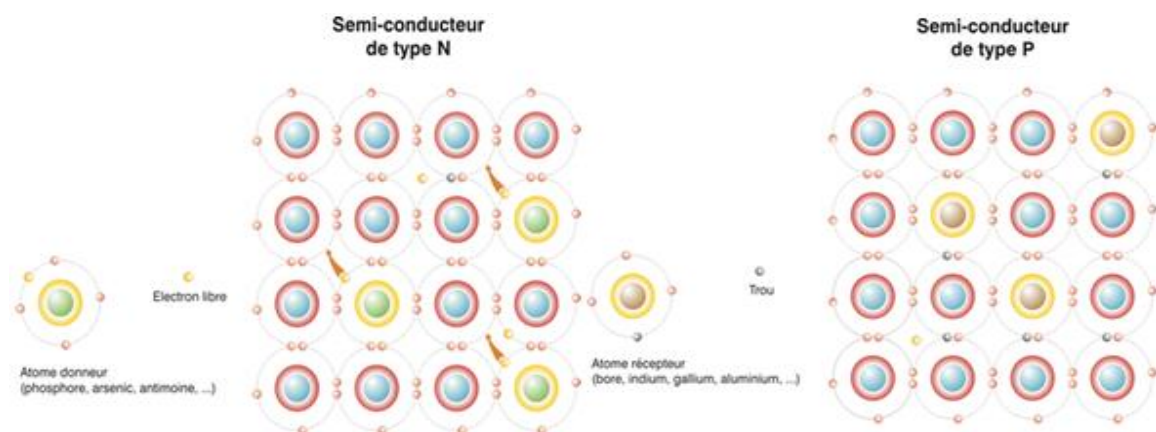


Figure 2 : Les différents types de dopages

Les atomes tels que le phosphore ou le bore sont donc des dopants du silicium.

Lorsqu'il y a contact, les électrons de la couche n se diffusent dans la couche p en créant au passage un « trou ». La zone alors dopée n devient chargée positivement, tandis que la zone p se charge négativement. Il se crée alors un champ électrique qui tend à repousser les électrons vers la zone n et les « trous » vers la zone p. On dit qu'une jonction p-n est alors formée.

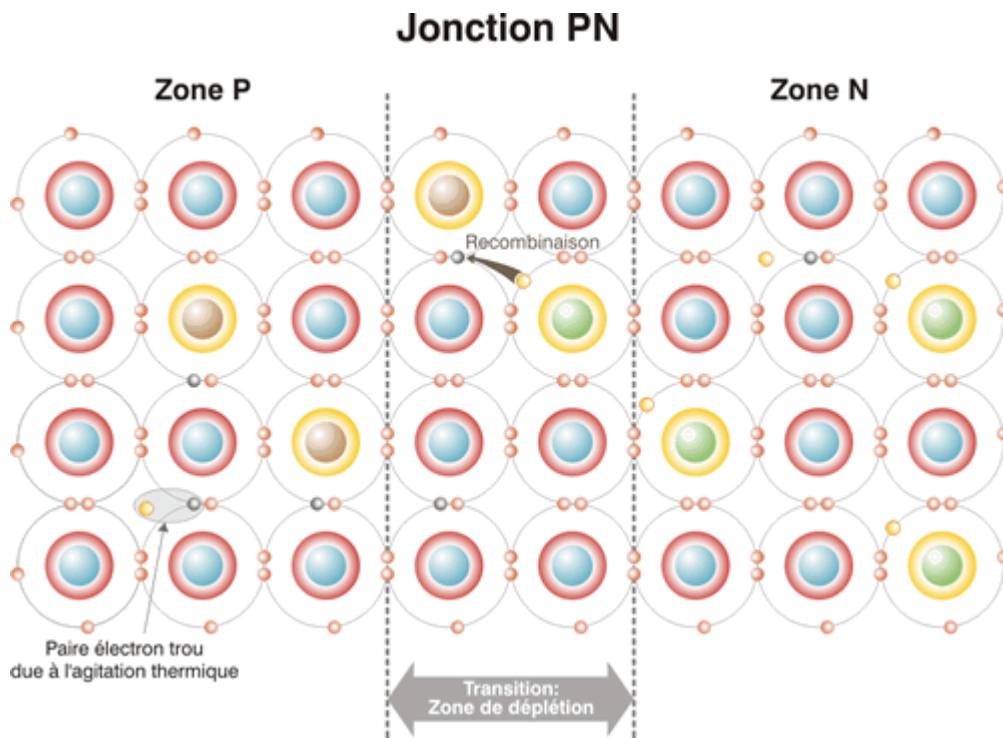


Figure 3 : Jonction p-n

En ajoutant des contacts métalliques entre les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie supérieure ou égale à la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse ainsi un trou capable de se déplacer, engendrant une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p par la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : on a alors apparition d'une circulation de courant.

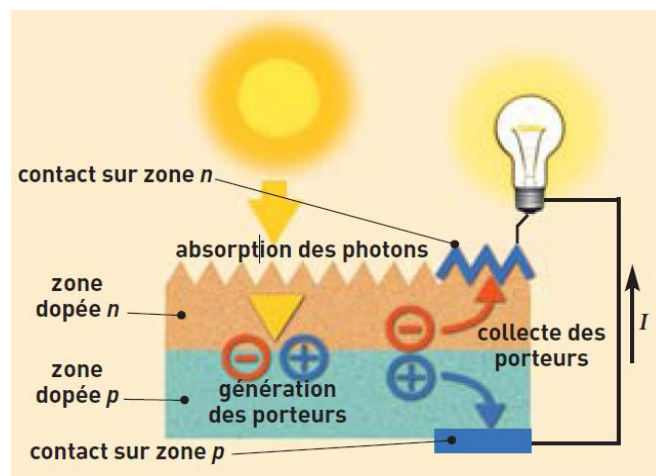


Figure 4 : Schéma récapitulatif

#### **d) Les différents types de cellules**

On distingue 3 générations de cellules photovoltaïques en fonction des développements technologiques. Les cellules de la première génération sont basées sur une seule jonction p-n et utilisent le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. Les couches minces constituent la deuxième génération. Dans le cas de couches minces, la couche de semi conducteur est directement déposée sur un substrat (par exemple du verre). La production de ce type de cellules est moins coûteuse que la première génération cependant, le problème des cellules de seconde génération est le rendement moindre de ce type de cellules (6-7% et 14% en laboratoire) et la toxicité de certains éléments (cadmium) pour leur fabrication. Enfin, la troisième génération vise à passer la limite maximale de rendement des cellules actuelles, qui est d'environ 30%.

##### **Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin (1<sup>ère</sup> génération) :**

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie pour ne former qu'un seul cristal de grande dimension. Celui-ci est alors découpé en fines tranches bleues uniformes : ce seront les cellules à proprement parler. Ce type de cellules a un bon rendement (14 à 16%) mais reste cher.

##### **Cellule photovoltaïque en silicium multicristallin ou polycristallin (1<sup>ère</sup> génération) :**

Au contraire du silicium monocristallin, le silicium refroidit dans une lingotière, où il forme plusieurs cristaux. L'avantage d'un tel dispositif est qu'il a un bon rendement de conversion, certes moins que le monocristallin, et qu'il se trouve aussi être moins cher. Néanmoins, son rendement reste faible dans le cas d'un éclairage faible ou diffus.

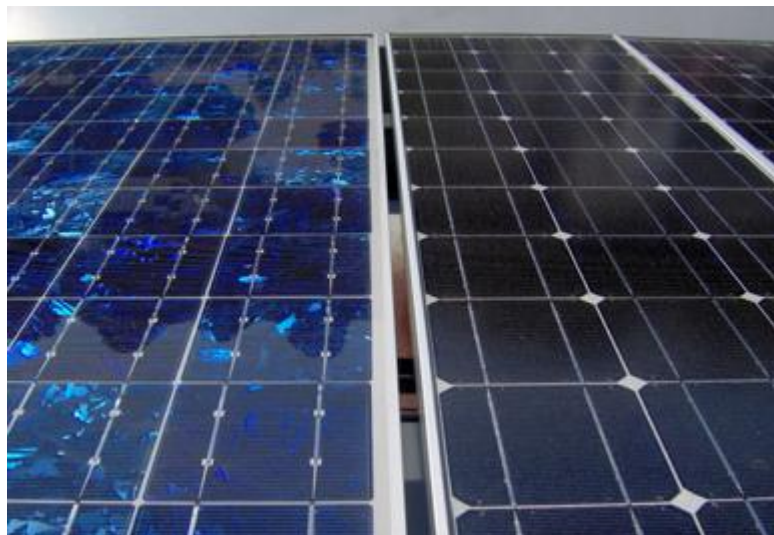


Figure 5 : Module polycristallin (à gauche) & monocristallin (à droite)

##### **Cellule photovoltaïque tandem (1<sup>ère</sup> génération) :**

C'est un empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deux cellules absorbant dans des domaines spectraux se chevauchant, on améliore le rendement théorique par rapport aux cellules simples. Le seul inconvénient de cette cellule est son prix, élevé dû à la superposition de deux cellules.

### **Cellule photovoltaïque en silicium amorphe (2<sup>ème</sup> génération) :**

Le silicium produit un gaz lors de sa transformation, qui est projeté sur une feuille de verre. Le résultat est gris foncé, et ce type de cellule est utilisé pour les calculatrices et montres solaires. La cellule en silicium amorphe a pour avantage de fonctionner avec un éclairage faible, d'être peu onéreuse et d'être facilement intégrée sur des supports souples ou rigides. Cependant, son rendement reste faible (5 à 7%) et ses performances diminuent avec le temps.

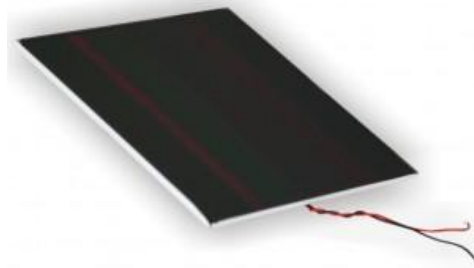


Figure 6 : Module en silicium amorphe

### **Cellule photovoltaïque CIGS (2<sup>ème</sup> génération) :**

Le sigle CIGS est pour cuivre, indium gallium et sélénium. Ces matériaux forment un semi-conducteur qu'on place sur un support. Bien qu'elle ait un excellent rendement, cette cellule présente le problème des ressources premières, qui sont bien moins communes que le silicium. La production de ces cellules CIGS en masse est donc impossible.

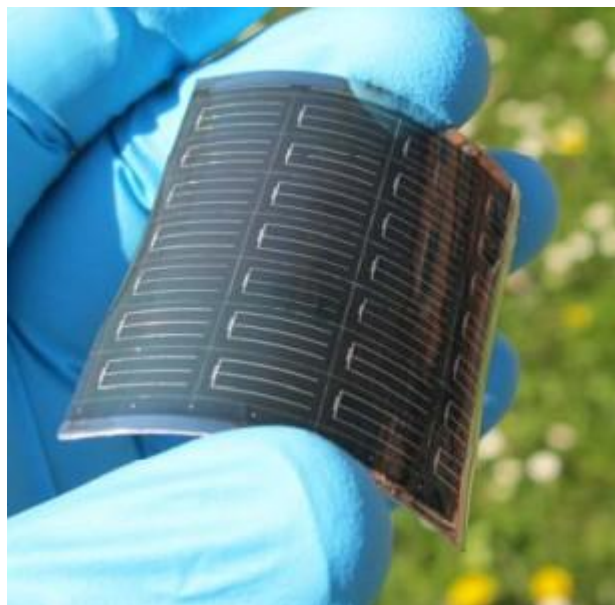


Figure 7 : Cellule CIGS

### **Cellule photovoltaïque organique (3<sup>ème</sup> génération) :**

C'est une cellule dont au moins la couche active est constituée de cellules organiques. Elles ont pour but de réduire le coût de l'électricité photovoltaïque, en plus d'être plus fines, flexibles et moins chères à produire, tout en restant résistantes. Elles bénéficient donc du faible coût des semi-conducteurs amorphes, ainsi que de simplifications possibles dans le processus de fabrication. Il existe trois types de cellules organiques : moléculaires, en polymère ou hybrides.

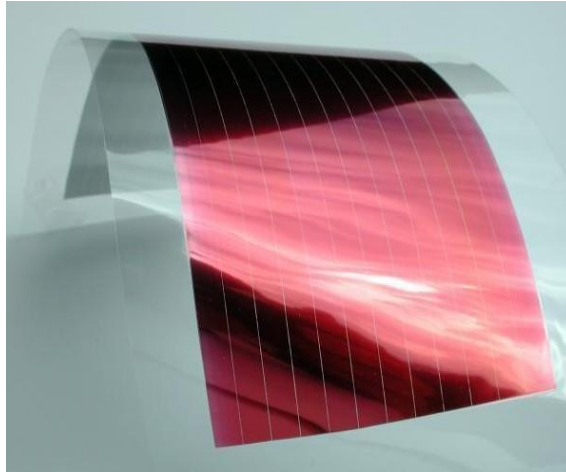


Figure 8 : Cellule organique

### **Cellule photovoltaïque multi-jonction (3<sup>ème</sup> génération) :**

Elles sont constituées de plusieurs couches minces qui utilisent l'épitaxie, qui est une technique de croissance orientée de deux cristaux possédant des éléments de symétrie communs dans leurs réseaux cristallins. Chaque type de semi-conducteur utilisé dans cette structure est caractérisé par une longueur d'onde maximale au delà de laquelle il est impossible de convertir l'énergie du photon en énergie électrique. En dessous de cette longueur d'onde, le surplus d'énergie du photon est perdu, d'où l'intérêt de choisir des semi-conducteurs avec des longueurs d'onde proches de façon à ce que le maximum du spectre solaire soit absorbé, ce qui augmente le rendement de ces cellules. Il est cependant évident que de telles cellules sont très chères à fabriquer, et elles sont pour l'instant uniquement utilisées pour des applications spatiales.

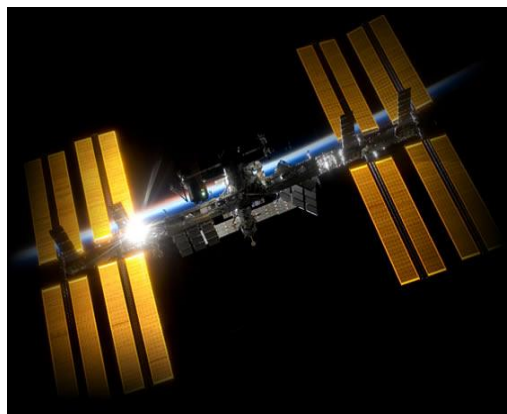


Figure 9 : Modules multi-jonctions

### **Systèmes photovoltaïques à concentration :**

Ce nouveau système se base sur l'utilisation de lentilles ou de miroirs afin d'augmenter l'énergie incidente provenant du soleil et ainsi de multiplier l'énergie produite par le module photovoltaïque. Cependant, ce système est encore peu employé. En effet, bien qu'il augmente conséquemment la production d'électricité, la complexité des choix des composants (lentilles, miroirs, cellules ...) en fait un système qui est encore très rare par rapport aux modules photovoltaïques standards.

## **2. Les problèmes liés à l'orientation du panneau solaire**

Afin de maximiser la production d'électricité d'une installation photovoltaïque, il convient de palier les problèmes liés à l'orientation du panneau solaire. Il est donc nécessaire d'orienter les modules de façon optimale afin de capter un maximum du rayonnement solaire.

### **a) Explication du phénomène**

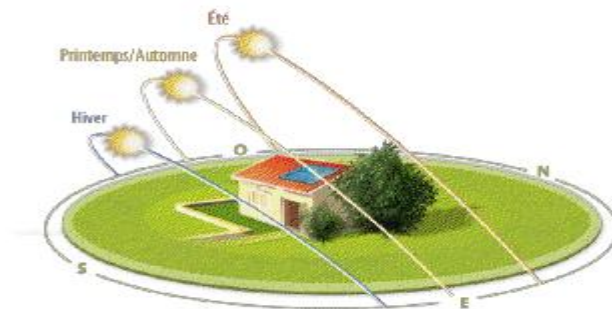
Un panneau solaire fixe ne peut pas être toujours exactement face au soleil puisque la terre tourne sans arrêt et que l'inclinaison du soleil par rapport au panneau évolue en permanence.

#### **Au cours d'une journée :**

Au cours d'une journée la production électrique du panneau varie en fonction de la position du soleil et n'est jamais à son maximum sauf au « midi solaire » (instant où le soleil atteint son point le plus élevé dans le ciel). La production en fin de journée est donc une somme de productions partielles.

#### **Au cours d'une année :**

Ce phénomène peut également être observé selon les différentes saisons. A un même endroit, le soleil ne se trouve pas à la même hauteur dans le ciel en été ou en hiver par exemple.



**Figure 10 : Trajectoire du soleil selon la saison**

Comme on peut le voir sur le graphique ci-dessous, la position du soleil dans le ciel est plus haute en été qu'en hiver. On représente sur ce graphique la « hauteur du soleil » (angle que fait la direction de visée du Soleil avec le plan horizontal) dans le ciel en fonction de « l'azimut » (angle horizontal entre la direction d'un objet et une direction de référence) lors du solstice d'été (21 Juin en rouge) et lors du solstice d'hiver (21 décembre en bleu).



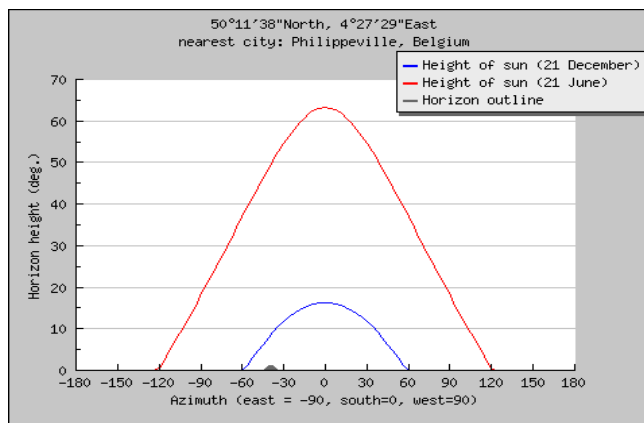


Figure 11 : Hauteur du soleil aux solstices d'été et d'hiver

Si nous voulons être encore plus précis il faudrait également tenir compte de l'albédo du sol, c'est-à-dire de son pouvoir de réflexion de la lumière. En effet si le sol est enneigé par exemple la réflexion sera plus importante, la production augmentera donc.

### Selon la position géographique :

La situation géographique est également à prendre en compte. L'ensoleillement varie selon la situation géographique et les conditions climatiques locales. Ainsi, le rayonnement incident, qui correspond à l'énergie lumineuse du soleil par unité de surface au sol (environ 1000 W/m<sup>2</sup> en France) varie selon les régions. Pour estimer le gisement solaire, les installateurs font appel à des « cartes solaires » qui donnent avec une précision moindre mais suffisante le rayonnement incident du lieu.

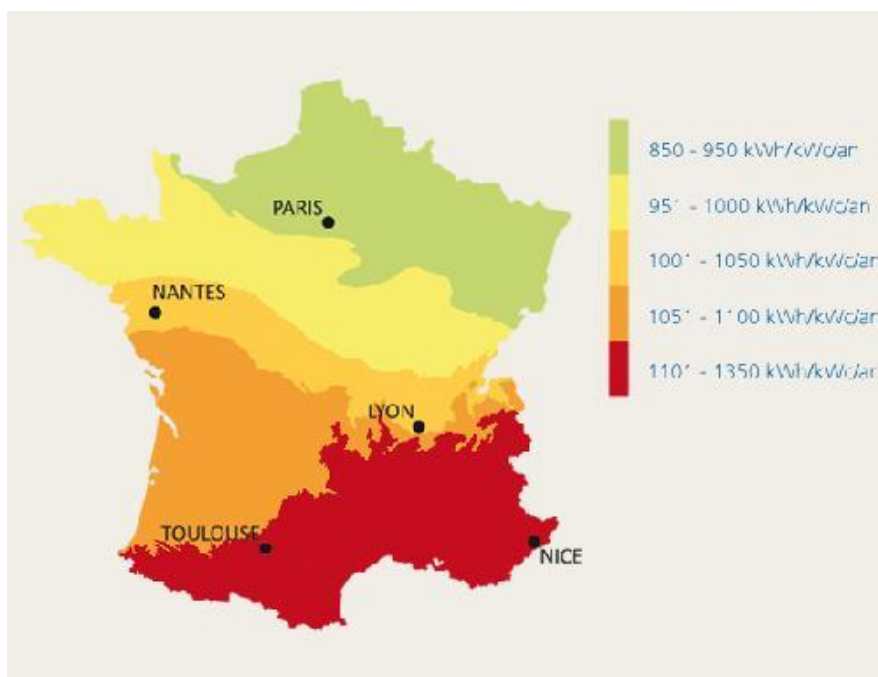


Figure 12 : Carte de la production électrique en France

## b) Comment résoudre ce problème ?

L'énergie solaire reçue par une surface de modules photovoltaïques sera plus importante si cette surface est perpendiculaire aux rayons directs du soleil.

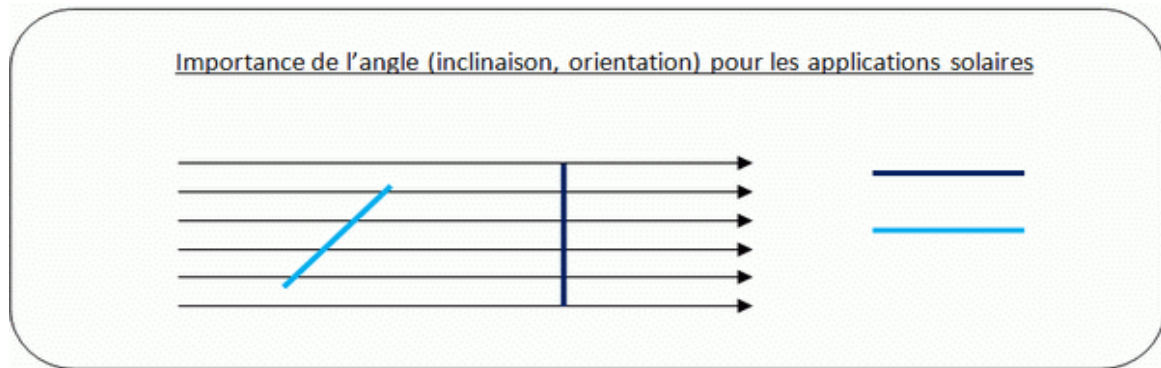


Figure 13 : Importance de l'angle pour les applications solaires

Dans le jargon des solaristes, l'angle d'incidence est l'angle entre le toit et le plan horizontal. Il est directement lié à l'orientation et à l'angle d'inclinaison du panneau. L'angle d'incidence joue un rôle majeur pour les rendements du panneau. Il est défini selon l'équation suivante :  $R = \sin \beta * 100$  (avec R rendement en % et  $\beta$  angle d'incidence en °).

$$100 = \sin \beta * 100$$

$$\sin \beta = 1$$

$$\beta = 90^\circ$$

Ainsi, une surface perpendiculaire au flux lumineux capte davantage de rayons lumineux que la même surface disposée avec une inclinaison différente. De façon générale, on choisira toujours une orientation sud ou proche. En ce qui concerne l'inclinaison des panneaux par rapport à l'horizontale, l'approche se fonde sur la hauteur du soleil dans le ciel.

La France se trouve à une latitude 45° Nord, ainsi, l'angle d'inclinaison idéal est 45° Sud, le panneau se retrouvant donc perpendiculaire aux rayons du Soleil. Cependant, selon les saisons, l'inclinaison de la Terre varie. Pour garder une production d'énergie du panneau la plus régulière possible tout au long de l'année, on va garder l'angle de 45° Sud. Le panneau sera donc incliné comme ci-dessous au cours de l'année.



<b>FACTEURS DE CORRECTION POUR UNE INCLINAISON ET UNE ORIENTATION DONNEES</b>					
INCLINAISON \ ORIENTATION		0° —	30° /	60° /	90°
Est		<b>0,93</b>	<b>0,90</b>	<b>0,78</b>	<b>0,55</b>
Sud-Est		<b>0,93</b>	<b>0,96</b>	<b>0,88</b>	<b>0,66</b>
Sud		<b>0,93</b>	<b>1,00</b>	<b>0,91</b>	<b>0,68</b>
Sud-Ouest		<b>0,93</b>	<b>0,96</b>	<b>0,88</b>	<b>0,66</b>
Ouest		<b>0,93</b>	<b>0,90</b>	<b>0,78</b>	<b>0,55</b>

: position à éviter si elle n'est pas imposée par une intégration architecturale

source Hespul

NB : ces chiffres n'incluent pas les possibles masques qui pourraient réduire la production annuelle.

Figure 14 : Coefficient de correction en fonction de l'inclinaison et de l'orientation du panneau solaire

Le coefficient de correction est déterminé à partir de l'inclinaison et de l'orientation des panneaux et sert à évaluer leur impact sur la production d'électricité photovoltaïque. Plus il est proche de 1 et plus le rendement de l'installation sera important.

### c) Vers d'autres technologies

Abstraction faite des régions exposées à une longue période d'enneigement, nous écartons d'emblée l'orientation verticale d'un panneau photovoltaïque, justifiée exclusivement en vue d'éviter un entretien journalier. Par ailleurs cet entretien est porté à une fois par an sur les panneaux solaires quelque soit leurs emplacements si l'on veut garantir une capacité optimale. Il est d'usage de maintenir une orientation comprise du sud-est au sud-ouest et de respecter une inclinaison de 30 à 60 degrés.

Le problème d'orientation et d'inclinaison a mené des ingénieurs à créer des panneaux orientables, ce qui permet de modifier l'inclinaison tous les mois, mais par facilité, on peut également choisir une inclinaison pour l'été, une autre pour l'hiver. On utilise généralement ce genre de structure pour des applications au sol ou sur des toits plats. Pour ces systèmes à inclinaison variable, il existe un angle d'inclinaison des panneaux par rapport à l'horizontale, qui permet de maximiser la production d'électricité mensuelle. Les valeurs de cet angle mensuel optimum sont reprises dans le graphique ci-dessous.

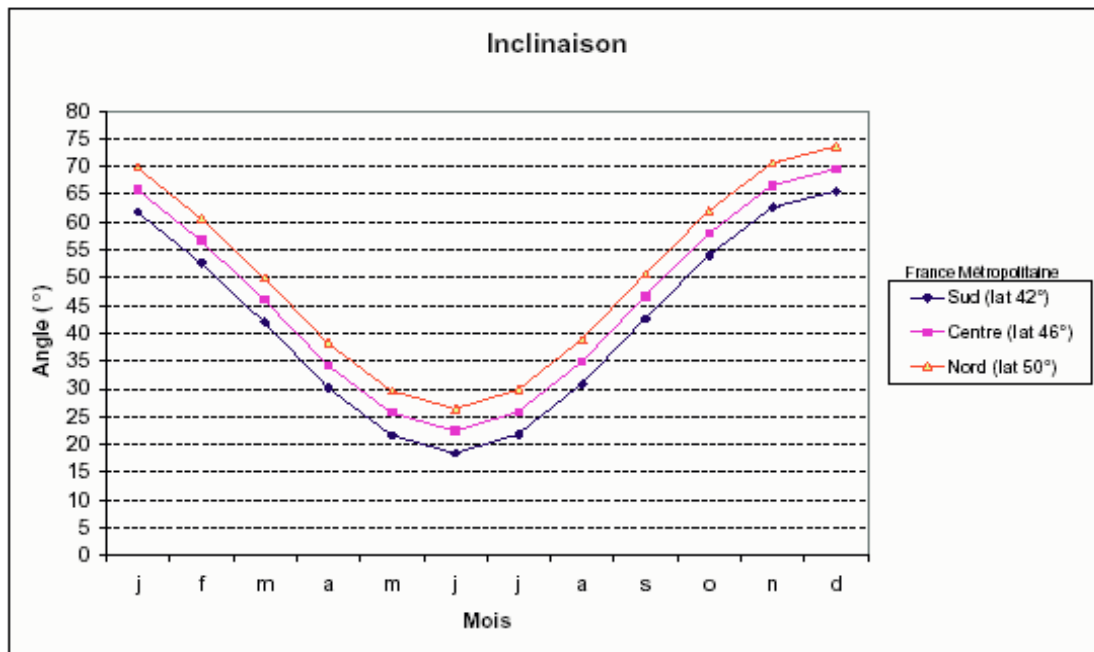


Figure 15 : Angles mensuels optimaux

### 3. La solution : les traqueurs solaires

#### a) Définition

Le traqueur solaire ou suiveur solaire est une installation similaire aux panneaux photovoltaïques normaux. C'est, plus précisément, un dispositif mobile qui utilise le principe de l'héliostat pour produire de l'électricité. Grâce à une structure qui porte les panneaux solaires, il est possible d'orienter ceux-ci afin d'améliorer considérablement leur productivité. Le principe de l'héliostat est un système permettant de suivre le soleil, pour cela les panneaux photovoltaïques sont placés sur un support motorisé.

Lors d'une séance, nous avons effectué des mesures du rayonnement du soleil à l'extérieur grâce à un solarimètre prêté par notre responsable de projet. Le solarimètre est composé d'un capteur qui contient une cellule en silicium peu sensible aux variations thermiques. En effectuant diverses mesures sur des durées de 5 minutes, nous avons pu nous rendre compte que les mesures effectuées perpendiculairement au soleil étaient plus importantes que lorsque l'on posait le solarimètre à plat sur le sol. En effet, on obtenait  $600\text{W/m}^2$  à plat contre  $928\text{W/m}^2$  lorsque le solarimètre était orienté vers le soleil pour un même laps de temps.

La production d'énergie solaire est donc à son maximum lorsque le panneau solaire est perpendiculaire au rayonnement du soleil. Dans ce but, les traqueurs solaires cherchent à optimiser l'orientation des panneaux photovoltaïques pour une meilleure productivité. Pour l'orientation, des capteurs de luminosité font en sorte d'être repositionnés selon l'endroit où se trouve le soleil afin de recevoir la meilleure luminosité. Dans les pays à climat tempéré, le rendement est considérable par rapport aux panneaux solaires classiques d'où le développement de ces derniers.

En théorie, les traqueurs solaires peuvent supporter n'importe quel modèle de panneau solaire photovoltaïque, tous les modules sont supposés être compatibles tels que les modules classiques PV ou photovoltaïque concentré CPV. Mais seulement en théorie car dans la pratique, seuls quelques traqueurs peuvent supporter tous les types précités car les coûts induits sont très hauts et cela induirait des risques supplémentaires ainsi qu'une maintenance régulière. Concernant la capacité des traqueurs solaires, en terme spatial, ces derniers peuvent supporter de 4 à 220 m<sup>2</sup> de panneaux solaires.

Le principe de fonctionnement des suiveurs solaires est donc de s'orienter vers le Soleil au cours de la journée, c'est-à-dire de suivre les mouvements du soleil. Il existe différents types de suiveurs solaires. Différentes caractéristiques permettent de différencier les traqueurs solaires entre eux. En effet, il est possible de les comparer principalement selon leurs gains en production électrique, le système utilisé mono ou bi-axial qui seront définis ci-après. Bien évidemment, il est aussi possible de les comparer selon leur coût, leur fiabilité ou leur robustesse, c'est-à-dire leur tenue face au vent.



Figure 16 : Traqueur solaire en Espagne

## b) Différents principes

### Système mono-axial :

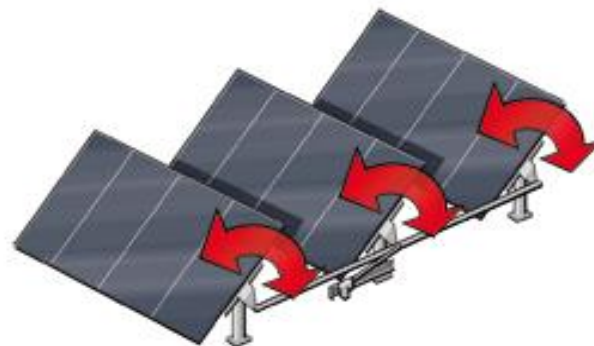


Figure 17 : Panneaux solaires avec système de poursuite mono-axiale

Comme son nom l'indique, le traqueur solaire tourne autour d'un axe simple. Le trajet suivi par cet axe est souvent en azimut, c'est-à-dire d'est en ouest au fil de la journée. Dans ce cas, l'axe est donc vertical. L'angle du panneau est fixe, il est placé selon l'angle le plus propice à recevoir le maximum

de rayons du soleil. Il est placé selon la latitude du lieu où est disposé le traqueur solaire. Ainsi, l'angle du panneau reste constant mais sa position varie au cours de la journée afin d'améliorer le rendement. Par exemple, les panneaux solaires peuvent être orientés dans une direction fixe et tout comme le soleil qui va d'est en ouest, la position des panneaux évoluera pour accroître le rendement. Ce système est le plus simple et donc le plus utilisé actuellement.

### **Système bi-axial :**



Figure 18 : Panneau solaire avec système de poursuite bi-axiale

Contrairement au précédent, ce traqueur solaire possède deux axes ce qui lui permet de ne pas suivre seulement un mouvement en azimut. En effet, grâce à son deuxième axe, le traqueur peut s'orienter en hauteur au gré des saisons. Ainsi ce système suit le soleil sous des angles multiples afin d'être toujours dans la meilleure position à chaque instant pour que le panneau soit irradié au maximum. La méthode de suivi solaire à deux axes est donc idéale puisqu'elle permet de suivre la course du soleil tout au long de la journée en variant la hauteur si nécessaire pour un résultat optimal. Ce type de traqueur est très imposant et peut être vu de très loin.

### **c) La solution**

Grâce à ces différents systèmes permettant de recevoir un maximum de rayons du soleil à chaque instant de la journée, les traqueurs solaires offrent une importante amélioration du rendement en comparaison avec les panneaux solaires photovoltaïques classiques. Lorsqu'une grande productivité est recherchée, les systèmes traqueurs solaires sont donc la solution la plus adaptée actuellement. Ces systèmes de suiveurs solaires n'offrent pas la possibilité de valoriser au mieux la surface de terrain disponible, dû au fait que ceux-ci génèrent des ombres importantes. Mais lors de l'installation de traqueurs solaires, c'est généralement pour une meilleure production par Wc installé par rapport aux panneaux solaires classiques et non pour une meilleure production par m<sup>2</sup>. Le Wc (Watt Crête) caractérisant la puissance d'un panneau photovoltaïque. Le coefficient d'occupation des terrains par les traqueurs solaires ne peut techniquement pas dépasser 30%.

Les traqueurs solaires sont donc une solution parfaite pour améliorer le rendement mais il faut choisir le système le plus adapté. Le système mono-axial permet un gain d'environ 20%, il est moins imposant que le traqueur bi-axial, moins coûteux et permet d'installer plus de puissance sur un terrain donné. Quant au traqueur bi-axial, il permet un gain d'environ 30%, ce qui représente tout de même 10% de plus que le mono-axial.

Le principal inconvénient des traqueurs solaires est leur faible résistance aux vents. En effet, ceux-ci se replient lorsque le vent atteint des vitesses supérieures à 40-50km/h. En France, les principales entreprises qui fabriquent et installent des traqueurs solaires sont Prestige Solaire, Accord Energies et Exosun.

## II – Aspects pratiques et financiers

### 1. Fabrication

#### a) Dopage des tranches

L'étape la plus importante de la fabrication (celle qui va transformer la « tranche » de silicium en photopile) est la réalisation de la jonction P-N. On réalise une structure de diode en dopant le matériau en volume avec un élément tel que le bore qui le rend positif (zone « P ») et en le contre-dopant dans une zone superficielle avec du phosphore qui le rend négatif (zone « N »).

La face qui sera exposée à la lumière est polie et dopée avec du phosphore (zone « N »). Dans la plupart des cas, le dopage est effectué à partir de phosphore par diffusion thermique. La température de dopage type est comprise entre + 800 et + 900 °C. Les deux techniques utilisées pour le dopage de la face avant sont :

- Le dépôt par centrifugation d'un film de silice polymérique contenant du phosphore et la diffusion par traitement thermique. Le film devra être ensuite enlevé.
- Le dopage par voie chimique par barbotage d'un gaz neutre dans du chlorure de phosphore dans un four haute température. C'est aujourd'hui la méthode la plus répandue.

#### b) Le dépôt de la couche anti-reflets

Afin de faciliter au maximum la pénétration des photons à travers la surface, ou plutôt de minimiser la réflexion des photons, on dépose une couche anti-reflet sur la face avant des cellules PV. Elle est traditionnellement réalisée en oxyde de titane et déposée sur une surface dépolie. Un autre procédé consiste à remplacer l'oxyde de titane par du nitrure de silicium, produit à partir d'un mélange silane / ammoniac et déposé dans un réacteur plasma.

#### c) La pose des contacts métalliques

Les contacts métalliques sont déposés de façon optimale pour ne pas trop réduire la surface de la cellule occultée, tout en permettant le transfert d'un maximum d'électrons. Ils sont ensuite appliqués selon une technique de lithographie, avec une pâte métallique sur les faces avant et arrière. Puis les plaquettes sont recuites pour renforcer les contacts et obtenir une résistance optimale.

#### d) L'enchaînement

Toutes les cellules composant un module photovoltaïque doivent être identiques. Ainsi, les cellules arrivant dans une usine de production de modules photovoltaïques sont sélectionnées individuellement. Elles sont appariées en fonction de leurs propriétés électriques.

#### e) Les liaisons électriques entre les cellules

Les cellules sont ensuite connectées plusieurs fois les unes aux autres pour former des chaînes, le nombre de cellules connectées en parallèle et en série définissant les caractéristiques du module photovoltaïque.

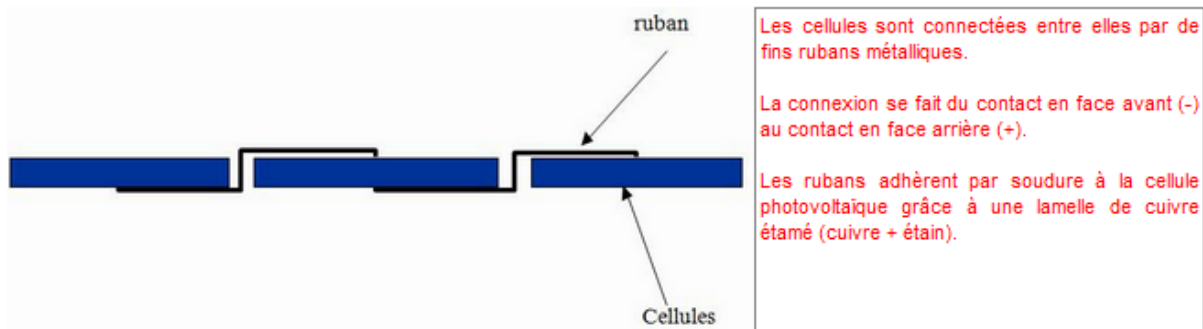


Figure 19 : Les liaisons électriques entre les cellules

### f) L'encapsulation

Les chaînes de cellules sont encapsulées dans un plastique éthylène vinyle acétate pour les protéger des agressions extérieures (rayons UV, humidité) et les isoler électriquement. L'ensemble est protégé sur la surface avant par un verre trempé à haute transmission et ayant une bonne résistance mécanique, et sur la face arrière par une feuille de Tedlar ou de polyéthylène. Les différents composants sont soudés à haute température en un laminé protégé de la majorité des agressions extérieures.

Enfin, après plusieurs vérifications le module peut être mis sur le marché.

## 2. Impacts sur l'environnement

L'industrie photovoltaïque est une industrie jeune qui développe une technologie qui contribuera à répondre aux besoins mondiaux d'électricité à partir d'une source gratuite et non polluante : le soleil. C'est donc une industrie préoccupée à la base par les problématiques environnementales et qui, dès le début de sa croissance, a cherché à limiter son impact environnemental.

### a) Bilan carbone en France

Avant de produire de l'électricité, la fabrication et l'installation des systèmes photovoltaïques a nécessité une certaine quantité d'énergie (environ 2 500 kWh par kW produit). C'est sur la base de cette consommation d'énergie que l'on calcule le contenu CO<sub>2</sub> d'un kWh photovoltaïque. Le processus de fabrication des systèmes photovoltaïques est particulièrement consommateur d'électricité. Or la France dispose d'un kWh électrique fortement décarboné. Quand 1 kWh électrique produit en France émet 80 g de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, le même kWh produit en Allemagne entraîne une émission de 574 g de CO<sub>2</sub>, 508 g, au Japon ou 609 g aux États-Unis. Aujourd'hui, la très grande majorité des panneaux photovoltaïques est fabriquée en Asie et plus particulièrement en Chine. Ces pays producteurs étant bien moins regardant sur l'impact écologique de leur fabrication ont réussi à casser les prix et donc à prendre le monopole de ce marché qui était aux mains de l'Allemagne et de la France au début des années 2000.

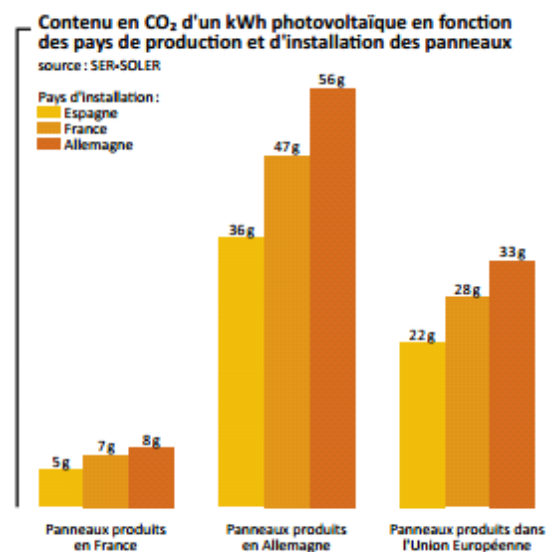


Figure 20 : Bilans carbone

## b) Impact de la production

### Energie grise :

Parmi ces matériaux, ceux qui nécessitent le plus d'énergie pour leur élaboration sont le silicium et l'aluminium.

### Silicium :

Le silicium polycristallin est actuellement un enjeu important de réduction de la consommation énergétique avec la multiplication des procédés de production du silicium solaire. A titre comparatif, il faut 60 fois plus d'énergie pour produire du silicium solaire (1 GJ EP/kg) que du verre (16 MJ EP/kg).

### Aluminium :

L'aluminium est présent en petite quantité comme contact arrière des cellules photovoltaïques et en masse dans le cadre, la structure de montage et l'onduleur. La production d'aluminium est très consommatrice en énergie et génère des émissions d'hexafluorure de soufre ou SF6, gaz à effet de serre à très haut pouvoir réchauffant (coefficient de 22 200 contre 1 pour le CO2).

### Substances dangereuses :

On trouve dans le système la présence d'éléments toxiques comme le plomb et le brome.

### Plomb :

Utilisé comme additif dans les fibres de verre contenues dans les pâtes métalliques servant à former les contacts électriques des cellules et comme additif également dans l'alliage à l'étain utilisé pour les soudures d'interconnexion des cellules. Sa toxicité est à l'origine du saturnisme, maladie qui atteint le système nerveux.

### Brome :

Présent comme retardateur de flamme dans les matières plastiques de l'onduleur.

	Composés	Dangers	Protection des personnes	Polluants de l'air	Polluants de l'eau	Traitement des rejets	
<b>Etape 1. Raffinage du silicium</b>							
silice	SiO <sub>2</sub>	irritant	masque	poussières fines		filtres	
acide chlorhydrique	HCl	toxique	extraction,	SiH <sub>4</sub> ,		lavage des gaz, neutralisation des effluents liquides	
hydrogène	H <sub>2</sub>	explosif	équipements	SiHCl <sub>3</sub> ,	HCl		
trichlorosilane	SiHCl <sub>3</sub>	toxique	personnels	SiH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> ,			
<b>Etape 2. Mise en forme des plaques</b>							
slurry	PEG, SiC	--	--	--	PEG, SiC,	Sté spécialisée	
<b>Etape 3. Fabrication des cellules</b>							
acide fluorhydrique	HF	toxique	extraction, équipements personnels de protection	HF	HF	lavage des gaz, neutralisation des effluents liquides	
acide acétique	CH <sub>3</sub> COOH	corrosif		H <sup>+</sup>	CH <sub>3</sub> COOH		
acide nitrique	HNO <sub>3</sub>	corrosif		NO <sub>x</sub>	HNO <sub>3</sub>		
soude	NaOH	corrosif		NaOH	NaOH		
alcool isopropylique	IPA	irritant		COV	--		
trichlorure de phosphore	POCl <sub>3</sub>	toxique		HCl	--		
tétrafluorure de méthane	CF <sub>4</sub>	effet de serre		HF, SiF <sub>4</sub> ,	COF <sub>2</sub> , CO,		--
silane	SiH <sub>4</sub>	pyrophorique		F <sub>2</sub>			
ammoniac	NH <sub>3</sub>	toxique		SiO <sub>2</sub>	--		
fibre de verre	Pb	toxique		NH <sub>3</sub>	--		
aluminium	Al			Pb	--		
argent	Ag			Al	--		
liant des pâtes métalliques	Solvants org.	irritant	Ag	--			
			COV	--	condensation et combustion		

Figure 21 : Tableau récapitulatif des produits chimiques utilisés pour la fabrication des panneaux PV



### c) Bilan énergétique

Le panneau solaire produit beaucoup plus d'énergie qu'il n'en faut pour le fabriquer et le transporter. Aujourd'hui, l'énergie « grise » totale d'un panneau de silicium à la pose est estimée à 3000 kWh par kWc. Dans les conditions d'ensoleillement de la France (environ 1000 kWh produits par kWc), il faut seulement 3 ans pour restituer l'énergie grise (bien sur un peu plus à Lille et un peu moins à Nice). Les panneaux ont une durée de vie d'au moins 25 ans (probablement plus de 30 ans). Un panneau restitue donc entre 8 et 10 fois l'énergie nécessaire à sa fabrication. Donc, indubitablement, l'énergie photovoltaïque répond très efficacement à la problématique de la fin des énergies fossiles.

### d) Impact direct sur les facteurs environnementaux

L'énergie solaire photovoltaïque, tout comme d'autres énergies renouvelables, constitue, face aux combustibles fossiles, une source inépuisable d'énergie. Cette énergie contribue à l'auto approvisionnement énergétique national et est moins nuisible pour l'environnement, car elle permet d'éviter les effets de son utilisation directe (pollution atmosphérique, résidus, etc.) et ceux dérivés de sa production (excavations, mines, carrières, etc.). Les effets de l'énergie solaire photovoltaïque sur les principaux facteurs environnementaux sont les suivants :

- > Climat : la génération d'énergie électrique directement à partir de la lumière solaire ne requiert aucun type de combustion, et donc aucune émission de gaz à effet de serre.
- > Géologie : les cellules photovoltaïques sont fabriquées avec du silicium, élément obtenu du sable, très abondant dans la nature et dont on ne requiert pas de quantités significatives. Par conséquent, les modifications topographiques ou structurelles de terrain et les impacts sur l'environnement engendrés par la fabrication de panneaux solaires photovoltaïques sont nuls.
- > Sol : ne produisant ni polluants, ni déchets, ni mouvements de terre, l'incidence sur les caractéristiques physico-chimiques du sol ou son facteur d'érosion est nulle.
- > Eaux superficielles et souterraines : aucune modification des nappes phréatiques ou des eaux superficielles. Pas de consommation, ni de pollution par des résidus ou des déchets.
- > Flore et faune : la répercussion sur la végétation est nulle, et, en éliminant la pose de poteaux électriques, on évite les possibles effets nuisibles pour les oiseaux.
- > Paysage : les panneaux solaires photovoltaïques peuvent s'intégrer de différentes façons dans le paysage destiné à les recevoir. Il est possible d'harmoniser leur intégration dans différents types de structures afin de diminuer l'impact visuel de leur présence. De plus, s'agissant de systèmes autonomes, le paysage n'est pas altéré par l'installation de postes et de lignes électriques.
- > Bruit : le système photovoltaïque est absolument silencieux, ce qui représente un avantage clair face aux groupes électrogènes classiques dans les logements isolés.
- > Moyen social : l'espace nécessaire pour installer un système solaire photovoltaïque de dimension moyenne, ne représente pas une place significative pouvant avoir un fort impact. De plus, dans la majorité des cas, ils peuvent être intégrés sur les toits des logements.

Enfin, l'énergie solaire photovoltaïque représente aujourd'hui la meilleure solution pour les lieux que l'on souhaite approvisionner en énergie électrique tout en préservant les conditions environnementales ; c'est le cas par exemple des espaces naturels protégés.

### e) Recyclage

Tous les composants d'une installation photovoltaïque peuvent être recyclés. Le cœur de l'installation, c'est à dire la cellule photovoltaïque, sera recyclé pour servir à nouveau de matière de base à l'industrie photovoltaïque. L'aluminium, les verres et les câblages nécessaires à la fabrication des modules sont, pour leur part, recyclés dans les filières existantes pour ces produits.

Il existe déjà des unités de recyclage des modules photovoltaïques. En effet, des producteurs de cellules comme l'américain First Solar ou l'allemand Deutsche Solar ont mis en place des circuits de recyclage de leurs modules aussi bien pour la technologie cristalline que celle des films minces.



Figure 22 : Cycle de vie des panneaux PV

## 3. Analyse économique

### a) Coût d'une installation

Pour le coût d'installation d'un système photovoltaïque, il y a plusieurs principaux critères à prendre en compte :

- Le coût d'une étude préalable (pour un montage juridique ou un système de moyenne ou grande taille)
- Le coût du matériel et de son installation
- Le coût du raccordement au réseau
- Le coût éventuel des intérêts d'emprunt

L'étude préalable est en général effectuée par un bureau d'étude et permet d'apporter au constructeur les détails techniques et financiers quant à son installation future. Elle permet d'estimer la production attendue en tenant compte des contraintes du lieu (temps, éventuel ombrage près de l'installation ...) mais aussi d'évaluer les contraintes éventuelles de raccordement réseau (bout de ligne, mauvaise qualité du réseau ...).

Le prix du matériel dépend principalement du type de système et de la localisation de son emplacement. On raisonne en général en puissance crête et non en m<sup>2</sup>, car en fonction de la technologie choisie, la surface peut varier pour une même puissance.

Pour les traqueurs solaires, le coût de l'équipement est plus important, puisque l'installation ne se limite pas à un panneau, mais bien à une structure particulière à même de suivre le soleil au fur et à mesure de la journée. Ci contre, un exemple du coût d'une installation de traqueur deux axes équipé de 30 m<sup>2</sup> de panneaux solaires (energie12.info) :

Poste	Libellé	Quantité	Prix Net total
1	Panneaux HECKERT HS-PXL 210W	20	
2	Onduleur SMA Sunny Boy SB4000TL-20	1	
3	Suiveur DEGERTRAKER 5000NT + Control Box	1	
4	Frais de transport international et manutention	1	
5	Coffret AC, disjoncteur, gaines et câbles XVB et DC	1	
6	Socket en béton armé	1	
7	Placement, raccordement, réglages, schémas et documents	60	
	<b>Total hors TVA (€)</b>		22000,00
	TVA 6%		13 20,00
	<b>Total TVA comprise (€)</b>		23320,00

Le producteur devra également supporter les frais de raccordement, c'est à dire la pose des compteurs et disjoncteurs, du coupe circuit et du câblage (nécessaire à l'établissement d'une liaison de branchement dédiée à l'installation photovoltaïque. Dans le cas d'installations complexes, ces travaux peuvent revenir jusqu'à 1 500 €.

Il est donc évident que l'installation d'un système de traqueurs solaires demande un important investissement de départ (plus conséquent que dans le cas d'une installation classique). Cependant, le rendement beaucoup plus important du suiveur solaire permet d'amortir cet investissement en quelques années. Ce retour sur investissement dépendra de la localisation ainsi que des tarifs énergétiques en vigueur. Ce délai d'amortissement avoisine, selon plusieurs sources, uniquement 4 ou 5 ans par rapport au coût d'installation, et 9 ans pour faire des bénéfices (contre 12 ans pour une installation classique). Comme on peut le voir sur la courbe ci-dessous, en plus d'être plus rapidement rentables, les dispositifs photovoltaïques avec tracking se révèlent également plus lucratifs sur le long terme.

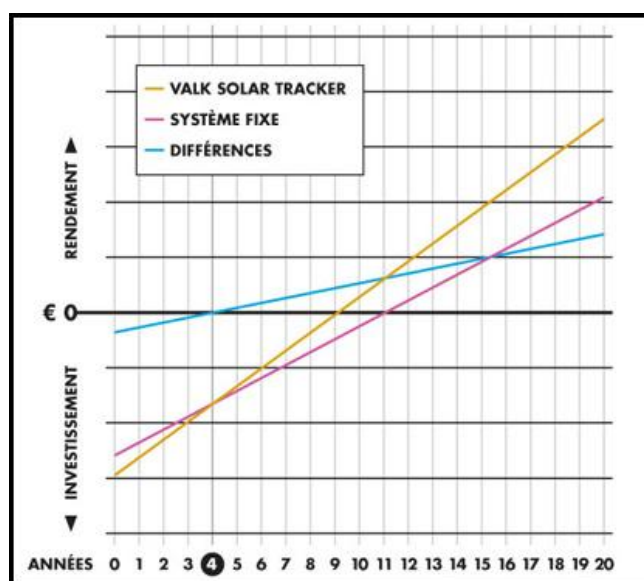


Figure 23 : Amortissement des différents systèmes

## b) Tarifs d'achat par ErDF

Type et puissance de l'installation			10/03/2011 au 30/06/2011	01/07/2011 au 30/09/2011	01/10/2011 au 31/12/2011	01/01/2012 au 31/03/2012
						nh
Résidentiel	Intégration au bâti	[0-9kWc]	46	42,55	40,63	38,8
		[9-36kWc]	40,25	37,23	35,55	33,95
	Intégration simplifiée au bâti	[0-36kWc]	30,35	27,46	24,85	22,49
		[36-100kWc]	28,83	26,09	23,61	21,37
Enseignement ou santé	Intégration au bâti	[0-9kWc]	40,6	36,74	33,25	30,09
		[9-36kWc]	40,6	36,74	33,25	30,09
	Intégration simplifiée au bâti	[0-36 kWc]	30,35	27,46	24,85	22,49
		[36-100 kWc]	28,83	26,09	23,61	21,37
Autres bâtiments	Intégration au bâti	[0-9kWc]	35,2	31,85	28,82	26,09
	Intégration simplifiée au bâti	[0-36kWc]	30,35	27,46	24,85	22,49
		[36-100kWc]	28,83	26,09	23,61	21,37
Tout type d'installation		[0-12MW]	12,00	11,68	11,38	11,08

C'est la puissance totale des installations raccordées sur un même bâtiment qui sont prises en compte pour les seuils de puissance. De plus, des coefficients de dégressivité peuvent s'appliquer aux tarifs précédemment cités, en fonction du nombre de demandes de raccordement au réseau déjà effectuées. Finalement, deux simulateurs photovoltaïques de tarifs d'achat sont disponibles sur les sites de la DGEC et du CEIAB.

## c) Subventions et aides

La France encourageant la production d'énergie verte, il existe différentes aides pour les personnes qui souhaiteraient produire grâce aux traqueurs photovoltaïques : tout d'abord, une réduction d'impôts leur est accordée. En effet, on peut bénéficier d'un crédit d'impôt de 22 % sur le montant investi pour les fournitures du système (hors main d'œuvre). Le montant de ce crédit ne doit cependant pas excéder 8 000 € pour une personne seule, 16 000 € pour un couple auxquels on ajoute 400 € par enfant à charge, et l'installation ne doit pas dépasser une puissance de 3 kWc.

De plus, le propriétaire pourra bénéficier de Certificats Verts (dits CV) : ces primes sont données aux producteurs d'énergie verte, instaurées en France en 2000. Contrairement à d'autres pays européens, le marché des certificats verts en France est privé et non soutenu par la réglementation, mais il apporte un gain supplémentaire aux propriétaires de traqueurs

En plus de ces avantages fiscaux, certaines installations sont subventionnées par différentes organisations régionales ou nationales ; par exemple, en Gironde, la première centrale de traqueurs en France a reçu des aides du Conseil Régional d'Aquitaine, de l'ADEME et du FEDER.

### III – Etudes, comparaison

#### 1. Etude d'une installation classique

Nous venons de voir les différents points importants concernant le photovoltaïque. Afin de montrer qu'une telle technologie n'est pas qu'utopique nous allons maintenant présenter une installation solaire photovoltaïque existante, que nous comparerons plus tard à une installation photovoltaïque avec traqueur.

Il s'agit d'une centrale solaire photovoltaïque MALO inaugurée le 13 Septembre 2010 à Goderville (coordonnées GPS : 49,6N 0,37W), en Seine Maritime. Cette installation est la propriété de M. Morée, gérant de l'entreprise spécialisée en énergies renouvelables Ozélair. Nous le remercions de nous avoir donné accès à son interface de gestion, nous permettant ainsi d'étudier la production de son installation.



Figure 24 : Ozelair.com

L'installation comporte 140 modules Shunda SDM170/X-72M (185 W), de surface 1,27 m<sup>2</sup> et de puissance crête 185 Wc. Au total, nous arrivons donc à une surface de 177,8m<sup>2</sup> et à une puissance crête de 25,9 kWc.



Figure 25 : Installation classique



Depuis sa mise en service, l'installation de M. Morée a produit 41 320 kWh, revendu 22 684 € à EDF.

Le rendement-type d'une journée ensoleillée a cette allure :

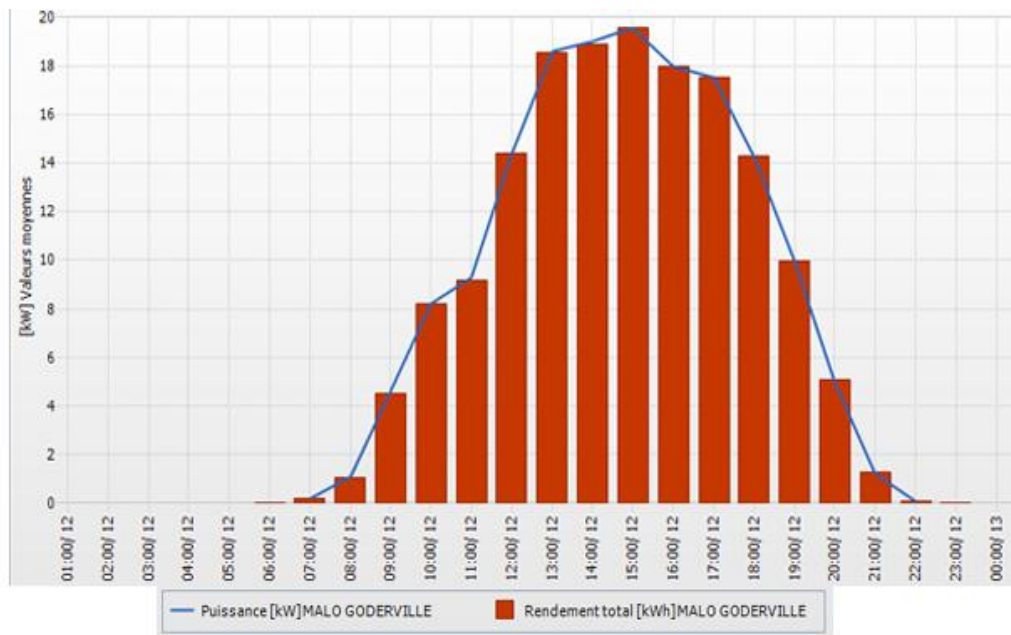


Figure 26 : "Rendement-type" d'une installation classique

Nous pouvons voir que selon l'heure, le rendement n'est pas toujours maximal. Le rendement est maximal principalement entre 12h00 et 17h00.

## 2. Etude d'une installation avec traqueur

Pour l'étude d'une installation avec tracking, nous avons choisi une installation en Haute-Normandie, plus précisément à Bréauté (coordonnées GPS: 49,6N 0,4W). Cette installation appartient au même exploitant que l'installation classique, M. Morée.

Il s'agit de deux traqueurs 2 axes, comportant chacun 30 modules Shunda SDM170/X-72M (panneaux solaires monocristallins) de 1,27 m<sup>2</sup> avec une puissance crête de 185 W. Au total, nous arrivons donc à une surface de 76,2 m<sup>2</sup> avec une puissance crête de 11,1 kW. L'installation a été mise en service le 23 mars 2011, mais nous ne disposons cependant que des données de l'année 2012.



Photo 1 : L'installation

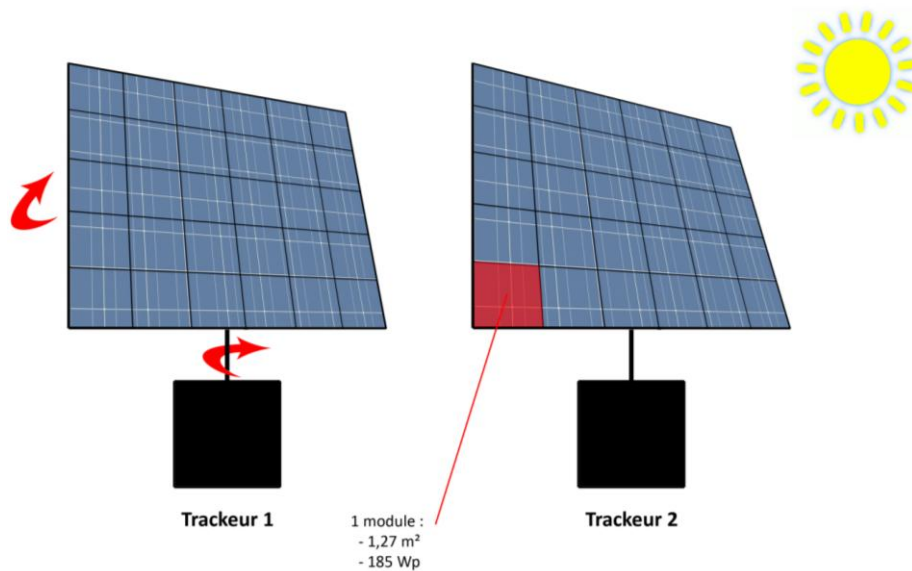


Figure 27 : Schématisation de l'installation

Depuis sa mise en service, l'installation de M. Morée a produit 44 840 kWh, revendu 14 349 € à EDF. Le rendement-type d'une journée ensoleillée a cette allure :

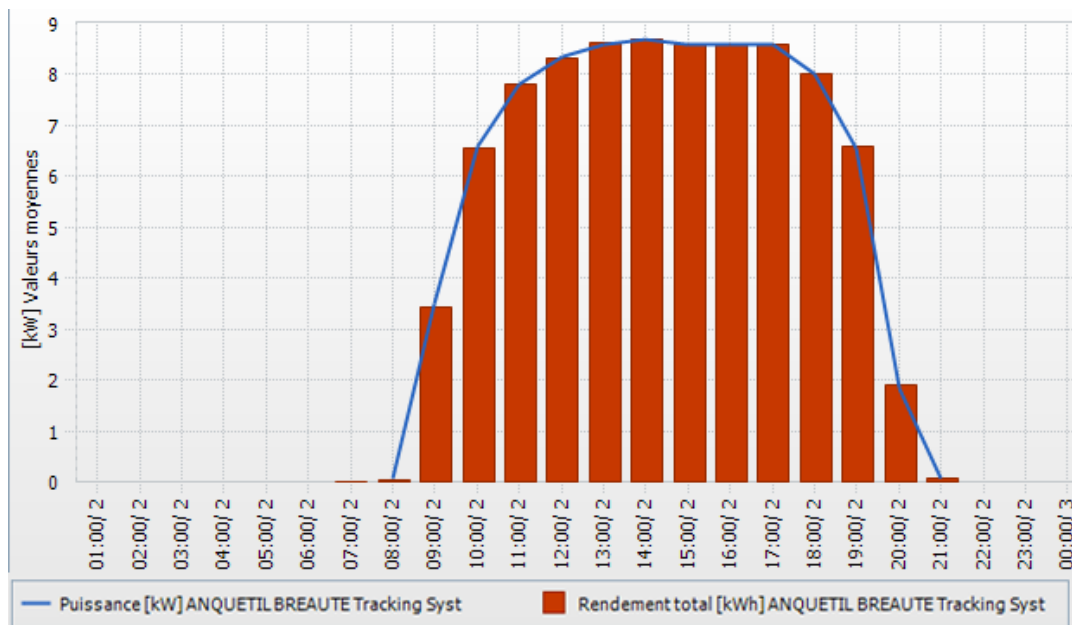


Figure 28 : "Rendement-type" d'une installation avec trackers

Nous pouvons voir que le rendement est quasiment maximal quelle que soit l'heure de la journée, puis tombe brutalement à zéro. Cela est dû au fait que le panneau solaire suit exactement la trajectoire du soleil, aussi bien en azimut (d'Est en Ouest) qu'en hauteur (selon la saison). Ainsi, le rendement est optimisé.

### 3. Comparaison de la production et du rendement

#### a) Le rendement

Il existe plusieurs types de rendements. Un premier défini à partir de l'angle d'incidence, comme expliqué dans I-2.b).

L'énergie lumineuse fournie par le soleil reçue par une surface d'1 m<sup>2</sup> correspond au rendement exprimé en kWh/kWc. Ce dernier se calcule à partir de la puissance du gisement solaire et du coefficient de correction – mentionné dans I-2.b) :

$$\text{Puissance du gisement} * \text{coefficient de correction} = \text{rendement (kWh / kWc)}$$

Il ne faut pas oublier que les panneaux photovoltaïques ne sont capables de convertir qu'une petite partie de l'énergie solaire en électricité. Selon la technologie utilisée, les panneaux photovoltaïques peuvent convertir entre 6% et 14% de l'énergie reçue. Ces chiffres sont les rendements du matériel photovoltaïque. En effet le rendement de l'installation dépend également du rendement des différents éléments du système photovoltaïque. La quantité d'énergie transformée varie donc selon le type de panneau utilisé.

	Panneau de silicium amorphe	Panneau de silicium polycristallin	Panneau de silicium monocristallin
<b>Rendement</b>	6%	11,5%	14,5%

Figure 29 : Rendement du matériel photovoltaïque

Enfin, la quantité d'énergie solaire transformée par 1 m<sup>2</sup> de panneaux photovoltaïques décrit le rendement en kWh/m<sup>2</sup>. Il se calcule à partir du rendement des panneaux et du rendement kWh/kWc :

$$\text{Rendement (kWh / kWc)} * \text{rendement des panneaux (\%)} = \text{rendement (kWh / m}^2\text{)}$$

#### b) Comparaison des deux installations existantes

Si on compare les rendements des deux installations de M. Morée, on peut voir d'après les deux graphiques – qui indiquent l'allure de la puissance des installations au cours de journées ensoleillées quelconques – que l'installation mobile sera plus puissante et de ce fait produira plus d'énergie.

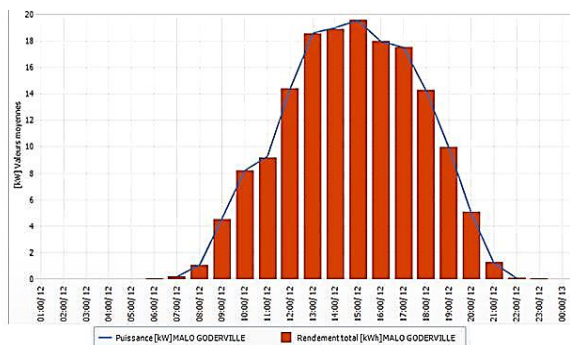


Figure 30 : "Rendement-type" d'une installation classique

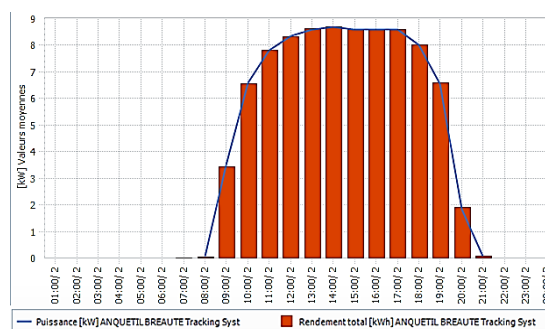


Figure 31 : "Rendement-type" d'une installation avec tracking



Ainsi, la courbe 29 forme un « V » retourné, c'est-à-dire que la puissance augmente progressivement pour atteindre un maximum puis diminue de la même manière. Concernant l'installation avec tracking, la courbe forme plutôt un « U » retourné : en effet on observe que le maximum de la puissance est atteint rapidement et pendant plusieurs heures. Etant de même pour le rendement, une installation avec traqueurs paraît bien plus rentable.

Plus particulièrement, la puissance est maximum pendant 5h pour l'installation classique tandis que pour celle avec tracking elle est maximum pendant 8h. De plus au vu des heures d'ensoleillement et des valeurs moyennes en kW, on peut supposer que la courbe 30 correspond à un jour d'un mois plus proche de l'hiver que la courbe 29. On ne comparera donc pas les valeurs de ces 2 graphiques car ils ne correspondent pas au même jour, ni à la même surface.

Malgré des chiffres quotidiens de production qui prédiraient le contraire, l'installation mobile, mise en service 6 mois après l'installation fixe, a déjà dépassé la production de cette dernière : 44 840 kWh pour 41 320 kWh (ces valeurs sont mises à jour quotidiennement).

De plus, nous connaissons, grâce au site internet auquel nous avons accès, la production annuelle de chacune. Avec cela, la puissance des deux installations (calculées dans III.1 et III.2 à partir de la surface et puissance de chaque module). A partir de ces données, nous pouvons calculer l'énergie lumineuse fournie par le soleil et reçue par 1 m<sup>2</sup> en faisant  $\frac{\text{production annuelle}}{\text{puissance de l'installation}}$ .

On obtient le tableau suivant :

	Installation fixe (GODERVILLE)	Traqueurs (BREAUTE)
<b>Nb de modules (de 185W)</b>	140	60
<b>Surface de l'installation (m<sup>2</sup>)</b>	177.8	76.2
<b>Puissance de l'installation (kWc)</b>	25.90	11.1
<b>Production annuelle (kWh)</b>	25 123	14 985
<b>Energie reçue par 1 m<sup>2</sup> (kWh/kWc)</b>	970	1350

Ainsi on voit que la surface de l'installation avec traqueurs ne fait que ~40% de l'installation fixe, et pourtant sa production annuelle en représente ~60%.

$$\frac{76,2 \cdot 100}{177,8} = 42,9 \% \text{ et } \frac{14985 \cdot 100}{25123} = 59,6 \%$$

Mais surtout, l'énergie reçue par 1m<sup>2</sup> de l'installation fixe est ~30% inférieure à celle de l'installation mobile.

On peut donc concrètement confirmer l'intérêt de prendre une installation avec traqueurs plutôt qu'une fixe : elle est plus rentable, plus efficace et c'est donc un investissement justifié.

### c) Comparaison avec PVGIS

A l'aide du logiciel en ligne PVGIS, nous avons effectué plusieurs simulations sur Bréauté pour pouvoir comparer avec le site de M. Morée. On a ainsi pu savoir par exemple que l'installation ANQUETIL BREaute n'était victime d'aucune perte dans le système.

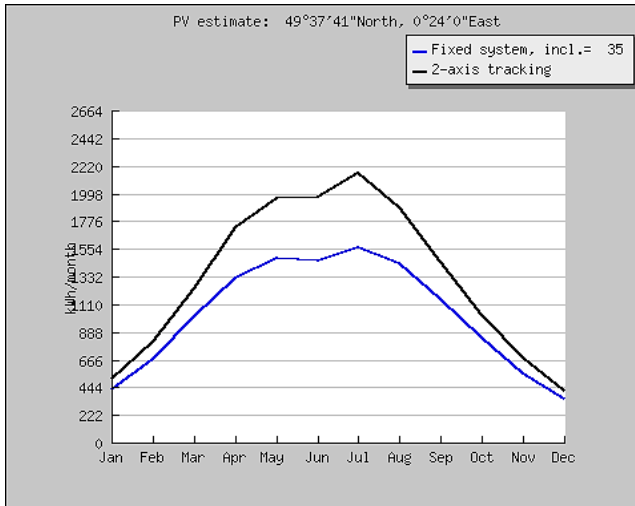


Figure 33 : Simulation sur l'année PVGIS

2-axis tracking system		
Month	Ed	Em
Jan	16.60	515
Feb	28.90	810
Mar	39.80	1230
Apr	57.40	1720
May	63.40	1960
Jun	65.90	1980
Jul	69.70	2160
Aug	60.90	1890
Sep	48.40	1450
Oct	33.20	1030
Nov	22.70	681
Dec	13.50	417
Year	43.40	1320
Total for year		15800

Figure 32 : Simulation PVGIS valeurs

(Em = électricité moyenne mensuelle en kWh)

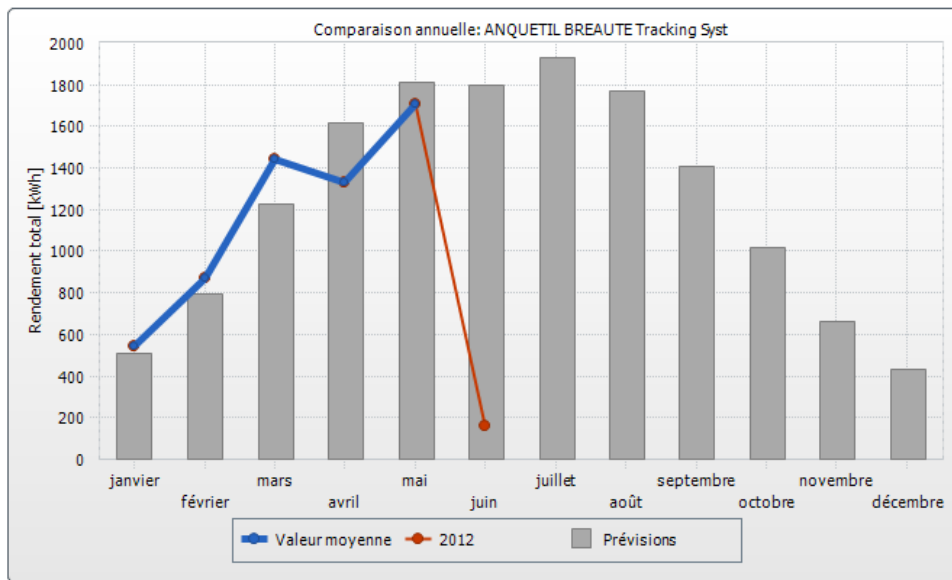


Figure 34 : Energie produite par mois sur l'année 2012

**Rendement total [kWh] pour Bréauté (avec tracking)** (consultation début juin)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	Total
<b>2012</b>	543,94	874,10	1440,72	1332,73	1710,01	162,72							6064,22
<b>Valeur moyenne</b>	543,94	874,10	1440,72	1332,73	1710,01								
<b>Prévisions</b>	509,49	794,21	1228,77	1618,38	1813,19	1798,20	1933,07	1768,23	1408,59	1018,98	659,34	434,57	14985,00

Figure 35 : Bilan de production mensuel et annuel

Après comparaison, les données correspondent globalement. Par exemple le mois de janvier correspond à peu près à 515 kWh. Sur l'année l'installation sur Bréauté prévoit un rendement total de 15 000 kWh tandis que la simulation PVGIS prévoit 15 800 kWh. Si on fait le rapport Bréauté/PVGIS =  $15000/15800$  on obtient que l'installation existante représente 95% de la simulation.

De plus PVGIS affirme également, sur la figure 32, qu'une installation avec traqueurs produit plus d'énergie qu'une installation fixe puisque la courbe bleue (système fixe) est constamment en dessous de la courbe représentant un traqueur sur 2 axes (noire).

Pour conclure, ces comparaisons ont montré que le système avec traqueurs est une solution face aux problèmes liés à l'orientation du panneau.

## Conclusion

Ce projet a été très instructif pour tous les membres du groupe, nous avons appris au fil des semaines à comprendre l'énergie photovoltaïque et plus précisément les traqueurs solaires qui sont une véritable alternative en termes d'énergies renouvelables. En effet, comme il est dit dans le dossier, le rendement est beaucoup plus important.

Nous pensons avoir rempli les objectifs que nous nous étions fixés. Or comme nous avons pu le voir en relisant les a priori, personne ne connaissait réellement ce qu'étaient les traqueurs solaires. Ce projet a donc été enrichissant pour chacun d'entre nous. De plus, en revoyant le questionnaire d'évaluation rempli en début de projet, nous avons pu constater les réels progrès que nous avons effectués en termes de connaissances sur le photovoltaïque.

Notre gestion de ce projet en groupe a été plutôt réussie avec de bonnes avancées au fil des semaines avec le suivi de notre responsable de projet. De plus, ce projet était encadré afin que nous n'avancions pas dans de mauvaises directions cependant nous étions libres, car nous avons la possibilité de mener à bien ce projet par nous même. Nous serons d'ailleurs confrontés à cette problématique dans notre futur métier.

Nous aurions aimé réaliser une maquette de traqueur solaire photovoltaïque mais nous nous sommes assez vite aperçu qu'un tel projet n'était pas envisageable, le temps et le coût nécessaire à une telle réalisation n'était pas dans nos cordes. Nous aurions aussi aimé visiter des installations de traqueurs solaires mais celles-ci étant trop loin, la distance ne nous permettait pas de réaliser ce projet.

Pour conclure, nous aimerions remercier M. Morée pour nous avoir été d'une aide précieuse tout au long de ce projet en ayant eu la gentillesse de nous donner de précieuses informations concernant ses installations photovoltaïques ainsi que l'accès à son site de données sur internet. Grâce à lui, nous avons pu réaliser des comparaisons concrètes entre les panneaux solaires classiques et les traqueurs solaires photovoltaïques. Nous aimerions aussi remercier M. Abdul Aziz qui nous a permis d'acquérir des connaissances certaines dans le domaine du photovoltaïque ainsi que pour nous avoir suivi tout au long de ce projet.

## Bibliographie

### Livres

- A. Labouret, P. Cumunel, J.P. Braun, B. Faraggi, « *Cellules solaires – les bases de l'énergie photovoltaïque* », Dunod, 2005.
- A. Labouret, M. Viloz, « *Energie solaire photovoltaïque* », Dunod, 2006.
- A. Labouret, M. Viloz, « *Energie solaire photovoltaïque, le manuel du professionnel* », Dunod, 2003.

### Logiciels en ligne

- PVGIS : <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#> [Valide à la date du : 21/05/2012].

### Sites Internet

- [http://collegetech.free.fr/index.php?option=com\\_content&view=article&catid=7:realisation-4eme&id=29:suiveur-solaire](http://collegetech.free.fr/index.php?option=com_content&view=article&catid=7:realisation-4eme&id=29:suiveur-solaire) [Valide à la date du : 25/05/2012].
- <http://www.desimone.be/fr/> [Valide à la date du : 24/05/2012].
- <http://www.ef4.be/fr/photovoltaique/aspects-techniques/cellules-photovoltaiques.html> [Valide à la date du : 28/05/2012].
- <http://www.elektor.fr/Uploads/2011/7/Suiveur-solaire.pdf> [Valide à la date du : 25/05/2012].
- [http://www.eleves.ens.fr/home/gbousque/presentation\\_13.pdf](http://www.eleves.ens.fr/home/gbousque/presentation_13.pdf) [Valide à la date du : 25/05/2012].
- [http://www.energie12.info/fr/documentation/suiveurs\\_3kwc.pdf](http://www.energie12.info/fr/documentation/suiveurs_3kwc.pdf) [Valide à la date du : 28/05/2012].
- [http://www.energieplus-lesite.be/energieplus/page\\_16679.htm?reload](http://www.energieplus-lesite.be/energieplus/page_16679.htm?reload) [Valide à la date du : 25/05/2012].
- [http://www.etapenergie.com/panneau\\_solaire.html](http://www.etapenergie.com/panneau_solaire.html) [Valide à la date du : 21/05/2012].
- <http://www.everkinetiq.fr/index.php/?Veelgestelde-vragen> [Valide à la date du : 24/05/2012].
- <http://www.ideesmaison.com/Energies/Solaire/Photovoltaique/Rendement-photovoltaique.html> [Valide à la date du : 24/05/2012].
- <http://www.ozelair.com/> [Valide à la date du : 21/05/2012].
- <http://panneaux-photovoltaiques.quotatis.fr/conseils/rendement-photovoltaique> [Valide à la date du : 04/06/2012].
- <http://www.photovoltaique.info/Le-recyclage-des-installations.html> [Valide à la date du : 25/05/2012].
- <http://www.solairepremium.fr/informations-sur-le-tracker-solaire> [Valide à la date du : 25/05/2012].
- <http://www.solar-kit.com/tracker-solaire/suiveur-solaire> [Valide à la date du : 25/05/2012].
- <http://www.solar-tracking.fr/> [Valide à la date du : 25/05/2012].

### Encyclopédies en ligne

- [http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule\\_photovoltaïque](http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovoltaïque) [Date de consultation : 25/05/2012].
- [http://fr.wikipedia.org/wiki/Tracker\\_solaire](http://fr.wikipedia.org/wiki/Tracker_solaire) [Date de consultation : 26/05/2012].