



INSTITUT
NATIONAL
des SCIENCES
APPLIQUÉES



Projet de Physique P6-3 STPI/P6-3/2008 – 2009



Nom des étudiants

Bastien DUPUIS

Benjamin MATHIEU

Aline GUEGOU

Kévin MENNESON

Btissam HAJOUJI IDRISSE

Arnaud SOISSON

Enseignant responsable du projet

J. ABDUL AZIZ



Etude et simulation d'une installation photovoltaïque en Haute-Normandie



À TAILLE
HUMAINE
À L'ECHELLE
DU MONDE

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE ROUEN

Département Sciences et Techniques Pour l'Ingénieur

BP 8 – place Emile Blondel - 76131 Mont-Saint-Aignan - tél : 33 2 35 52 83 00 - fax : 33 2 35 52 83 69

Date de remise du rapport : 22/06/09

Référence du projet : STPI/P6-3/2008 – 2009

Intitulé du projet : Etude et simulation d'une installation photovoltaïque en Haute Normandie

Type de projet : (bibliographique, calcul, simulation)

Objectifs du projet :

L'objectif du projet est de comprendre le principe de fonctionnement et de fabrication du photovoltaïque afin de savoir comment l'intégrer au mieux à notre environnement.

Il doit également nous permettre de travailler en groupe, c'est-à-dire de partager le travail à effectuer pour en amoindrir la charge tout en continuant à réaliser un projet commun où les idées de chacun sont écoutées.

TABLE DES MATIERES

| | | |
|----------|---|----|
| 1. | Méthodologie / Organisation du travail..... | 6 |
| 2. | Travail réalisé et résultats | 7 |
| 2.1. | Photovoltaïque : le fonctionnement | 7 |
| 2.1.1. | Les semi-conducteurs | 7 |
| 2.1.2. | Dopage d'un semi-conducteur..... | 7 |
| 2.1.3. | Création d'une jonction (dite p-n) | 8 |
| 2.1.4. | L'effet photovoltaïque | 9 |
| 2.1.5. | Les composants d'une installation photovoltaïque | 10 |
| 2.2. | Fabrication et impact sur l'environnement..... | 11 |
| 2.2.1. | Techniques de fabrication d'une cellule photovoltaïque | 11 |
| 2.2.2. | Une production très polluante..... | 12 |
| 2.3. | Comment avoir une bonne installation ? | 14 |
| 2.3.1. | Définition..... | 14 |
| 2.3.2. | Influence de l'ensoleillement | 14 |
| 2.3.3. | Influence de l'inclinaison du toit par rapport à la position du Soleil..... | 16 |
| 2.3.4. | Qualité du silicium..... | 18 |
| 2.3.5. | Position des capteurs : récapitulatif..... | 18 |
| 2.4. | Analyse économique : aides, subventions et dépenses à prévoir | 19 |
| 2.4.1. | Coût de l'installation | 19 |
| 2.4.2. | Primes et subventions | 20 |
| 2.4.2.1. | La subvention du Conseil Régional (subventions directes) | 20 |
| 2.4.2.2. | Les financements indirects | 20 |
| 2.4.2.3. | Peut-on bénéficier d'aides supplémentaires ? | 21 |
| 2.4.3. | Prix de rachat de l'électricité par EDF | 21 |
| 2.4.4. | Coût raccordement réseau | 22 |
| 2.5. | La rentabilité | 23 |
| 2.5.1. | L'ensoleillement | 23 |
| 2.5.2. | L'exposition et l'inclinaison | 23 |
| 2.5.3. | Les caractéristiques des panneaux photovoltaïques | 24 |
| 2.5.4. | Entretien et maintenance..... | 24 |
| 2.6. | Impact sur l'environnement après l'installation | 26 |
| 2.6.1. | Paysage et environnement local | 26 |
| 2.6.2. | Déchets et recyclage | 27 |
| 2.7. | Etude d'une installation en Haute Normandie | 29 |
| 2.8. | Simulation sur Capelle..... | 30 |
| 3. | Conclusions et perspectives | 32 |
| 4. | Bibliographie..... | 33 |

INTRODUCTION

Face aux prévisions d'épuisement inéluctable des ressources en énergie fossile (pétrole, gaz, charbon...) la science s'est intéressée aux énergies dites « renouvelables ». Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant de ressources naturelles capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par les hommes.

Nous sommes tous concernés par la considération de ces énergies renouvelables dans notre consommation d'énergie. Le but étant d'encourager une politique globale, responsable de la cohérence écologique. Nul doute que, parmi les éoliennes ou les méthodes micro-hydrauliques, l'énergie solaire reste la plus prolifique des énergies renouvelables. Elle permet de produire de l'électricité par la transformation d'une partie du rayonnement solaire.

Notre étude portera, dans un premier temps, sur le fonctionnement, la fabrication et l'installation des cellules photovoltaïques. Puis, nous développerons l'aspect socio-économique, la rentabilité et enfin les impacts environnementaux.

Nous avons tenté à plusieurs reprises de contacter des particuliers ou des professionnels afin de visiter une installation existante en Haute-Normandie mais sans succès. Par manque d'informations, nous avons alors pris l'initiative, avec l'accord de J. ABDUL AZIZ, de faire une simulation d'une installation photovoltaïque sur les toits de la Résidence Capelle (76 130 Mont Saint Aignan).

Après cette étude, et grâce à l'aide du professeur, nous avons réussi à obtenir quelques détails sur une installation dans le département de l'Eure.

1. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Après avoir découvert le sujet et écouté les attentes du professeur, nous avons commencé nos recherches, exclusivement par le biais d'internet. Nous nous sommes mis d'accord sur les différents thèmes à aborder (fonctionnement, fabrication, rendement, installation, impact environnemental, coûts et aides financières...)

Chacun s'est vu alors attribué un thème, choix qui s'est fait naturellement car chacun semblait avoir plus d'affinités pour un thème qu'un autre. Le partage du travail a été fait comme suit :

- Fonctionnement [Bastien]
- Fabrication et impact sur l'environnement [Arnaud]
- Installation (azimut, ensoleillement, orientation) [Btissam]
- Aspect socio-économique (aides, finances, législation) [Kévin]
- Rentabilité [Bastien]
- Impact sur l'environnement après l'installation [Aline]
- Présentation d'une installation existante [Arnaud]
- Simulation [Benjamin]

Nous devons commencer les recherches hors séance afin d'avoir matière à travailler pour la prochaine fois. Nous avons mis ces recherches en commun, essayant de voir ce qui manquait et ainsi pouvoir aider les autres personnes du groupe.

Seulement après avoir rassemblé un grand nombre d'information provenant de différents sites internet (particulier, professionnel, encyclopédie...), nous avons commencé la rédaction du rapport.

Dans un premier temps, chacun a écrit une partie du rapport, qui est en réalité la partie sur le thème qui lui avait été attribué, puis nous avons mis le tout en commun. Nous avons vu ensemble les différents arrangements et transitions à apporter afin d'obtenir un tout cohérent.

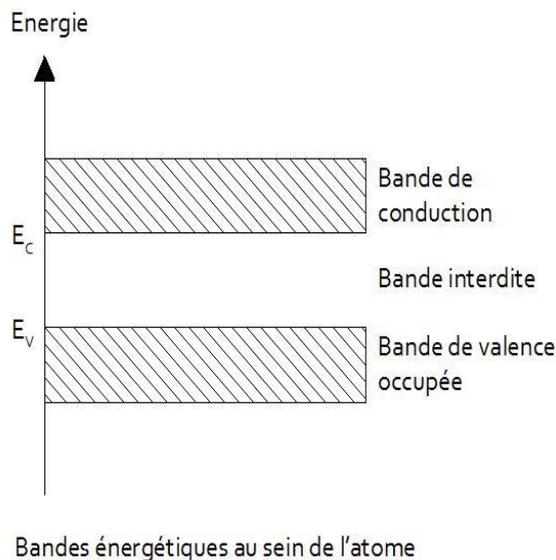
2. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

2.1. Photovoltaïque : le fonctionnement

L'effet photovoltaïque permet de convertir l'énergie lumineuse en électricité. Ce principe a été découvert en 1839 par Henry Becquerel.

2.1.1. Les semi-conducteurs

Les semi-conducteurs, éléments de la colonne IV du tableau périodique des éléments, sont des cristaux qui peuvent devenir des conducteurs sous certaines conditions.



Les électrons occupent, dans leur état normal, les bandes énergétiques les plus basses. Ces différentes bandes d'énergie accessibles sont séparées par des bandes énergétiques interdites appelées « gap ».

Lorsqu'il y a apport d'énergie suffisant, comme c'est le cas avec un rayon lumineux, les électrons de la bande de valence sont capables de traverser la bande interdite et de passer dans la bande de conduction.

Ainsi, ces électrons deviennent libres et peuvent se déplacer à l'intérieur du cristal.

2.1.2. Dopage d'un semi-conducteur

La technique du dopage d'un cristal semi-conducteur consiste en l'appauvrissement ou l'enrichissement du nombre d'électrons au sein de ce cristal.

Pour ce faire, on introduit au sein de la structure du cristal semi-conducteur un atome donneur ou accepteur d'électrons.

Le silicium, utilisé dans la plupart des cellules photovoltaïques, a été choisi pour la présence de 4 électrons de valence sur sa couche périphérique (colonne IV du tableau périodique des éléments).

Dans le silicium solide, chaque atome est lié à 4 atomes voisins, et chacun des électrons de la couche périphérique participe aux liaisons.

Si un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne V (le phosphore par exemple), un de ses cinq électrons de valence ne participe pas aux liaisons. Ainsi, par agitation thermique, cet électron va très facilement passer dans la bande de conduction et

devenir libre de se déplacer dans le cristal. Il va laisser derrière lui un « trou » (défaut d'électron) fixe lié à l'atome dopant. 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 (le bore par exemple), à 3 électrons de valence, il en manque un pour réaliser toutes les liaisons. Ainsi, par agitation thermique, un électron peut venir rapidement combler ce manque. Le semi-conducteur est dit dopé de type « p ».

La couche exposée à la lumière subit un dopage de type « n », et à l'inverse, la face arrière subit un dopage de type « p ».

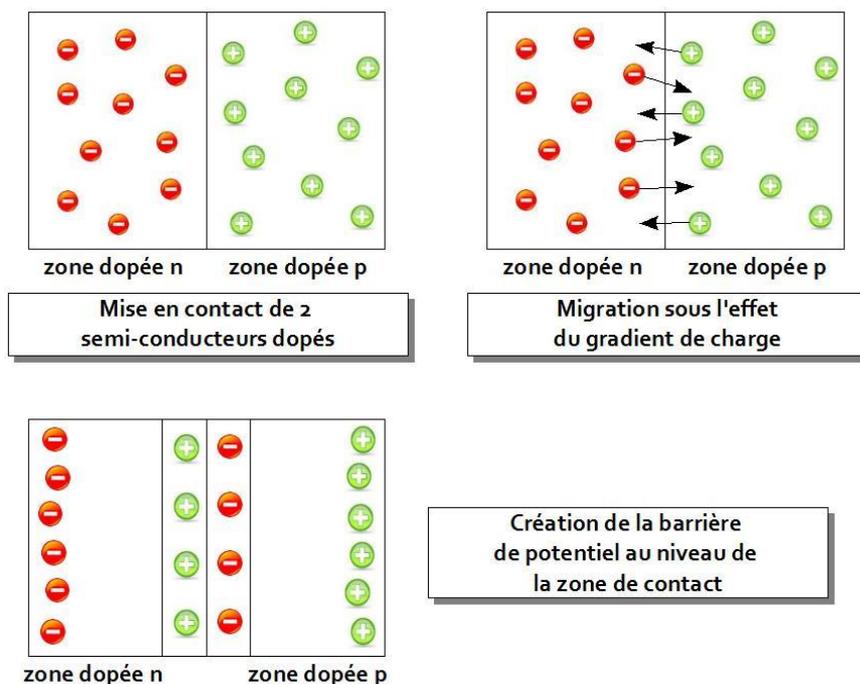
2.1.3. Création d'une jonction (dite p-n)

Lorsque la couche de type « n » est mise en contact avec la couche de type « p », les électrons en excès dans le matériau « n » se diffusent dans le matériau « p ». La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement.

Cependant, tous les électrons excédentaires ne possèdent pas une énergie suffisante pour recouvrir tous les « trous » de la zone p. Certains de ces électrons vont donc rester du côté n. Il en est de même pour certains « trous », ils ne migrent pas tous vers la zone n.

Il en résulte une recombinaison des charges au niveau de la zone de contact et la création d'une différence de potentiel (DDP) locale au niveau de cette zone de contact.

Cette DDP représente une barrière de potentiel. Elle ne permet plus la migration d'éventuels électrons libres de la zone n vers la zone p et de « trous » de la zone p vers la zone n. Ils sont au contraire repoussés vers les bords de leur zone d'appartenance. La jonction p-n est ainsi réalisée.



2.1.4. *L'effet photovoltaïque*

Lorsque qu'un rayon lumineux éclaire la jonction p-n, les photons transmettent leur énergie aux électrons lors de leurs impacts avec le semi-conducteur.

Si l'énergie transmise est suffisante, les électrons des bandes de valence vont pouvoir passer dans la bande de conduction et devenir libres. Cela va créer au sein du semi-conducteur la création de paire électron-« trou ».

Du fait de la barrière de potentiel, ils vont s'accumuler sur chacune des faces extérieures des zones p et n.

Si on relie les 2 faces par un fil conducteur, les électrons de la zone n rejoignent les « trous » de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule.

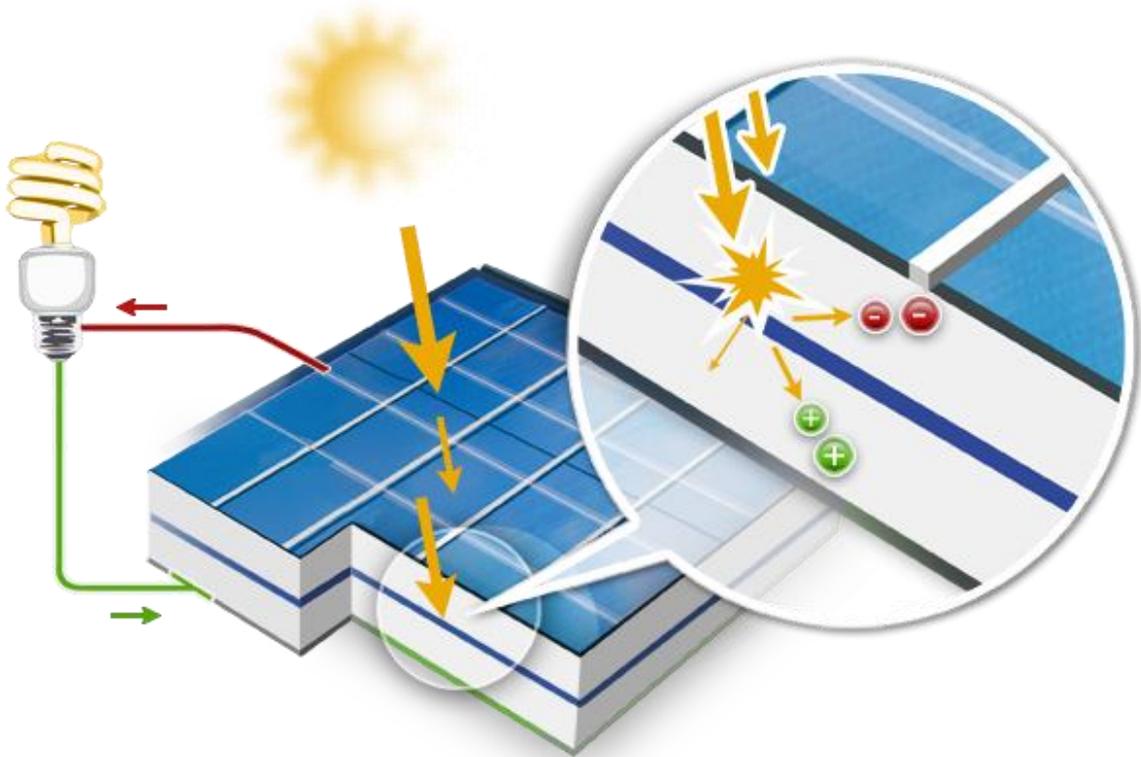


Image 1 : <http://www.photovoltaique.info/local/cache-vignettes/L623xH464/cellule-52209.png>

2.1.5. Les composants d'une installation photovoltaïque

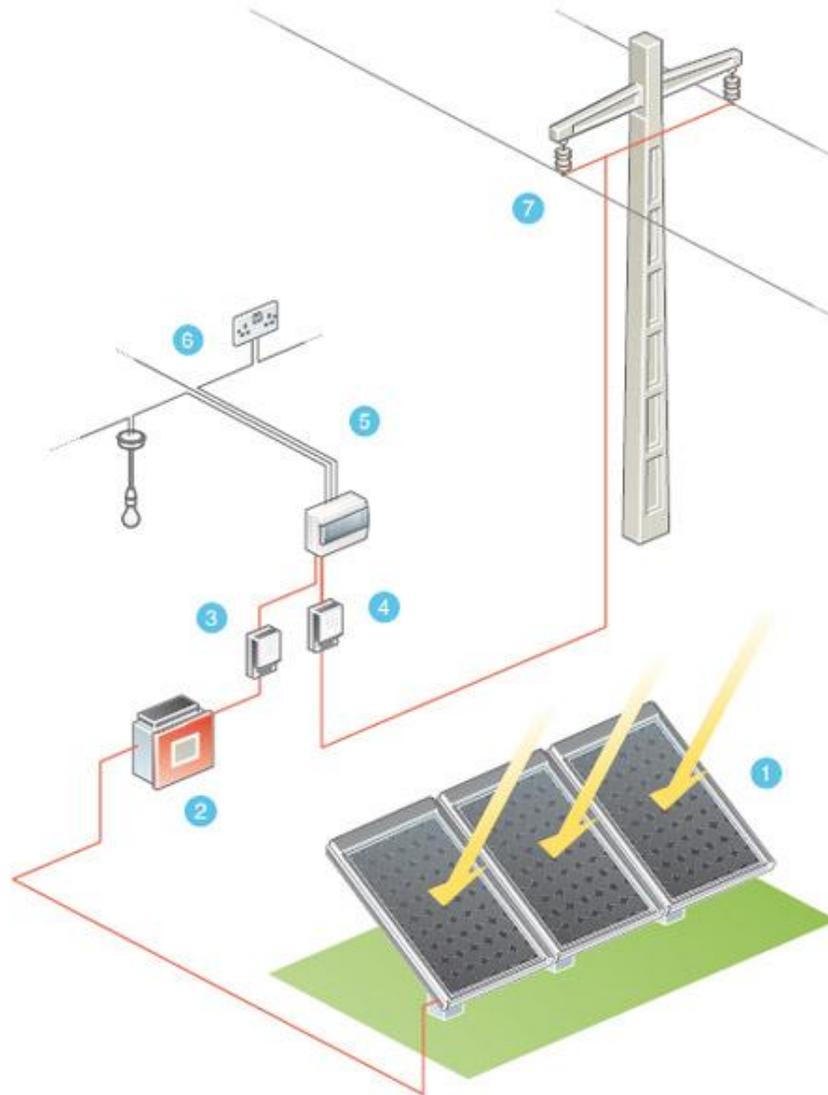


Image 2 : <http://www.castorama.fr/images-je-decouvre/composants-installation.jpg>

Le système comprend les éléments suivants :

1. Les modules solaires intégrés à la couverture ou installés en surimposition (10 à 30m²).
2. Un onduleur qui transforme le courant monophasé en courant alternatif, utilisable par les appareils et injectable dans le réseau public.
3. Un compteur de production pour comptabiliser la production injectée dans le réseau.
4. Un compteur d'utilisation du courant issu du réseau.
5. Un disjoncteur de branchement (500 mA) et un dispositif de protection (30 mA) et de coupure.
6. Un raccordement à l'installation domestique.
7. Un raccordement au réseau public.

2.2. Fabrication et impact sur l'environnement

2.2.1. Techniques de fabrication d'une cellule photovoltaïque

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. On l'obtient par réduction à partir de silice, composé le plus abondant dans la croûte terrestre et notamment dans le sable ou le quartz. La première étape est la production de silicium dit métallurgique, pur à 98% seulement, obtenu à partir de morceaux de quartz provenant de galets ou d'un gisement filonien (la technique de production industrielle ne permet pas de partir du sable). Le silicium de qualité photovoltaïque doit être purifié jusqu'à plus de 99,999%, ce qui s'obtient en transformant le silicium en un composé chimique qui sera distillé puis retransformé en silicium.

Le silicium est produit sous forme de barres nommées « lingots » de section ronde ou carrée. Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques mises au carré (si nécessaire) de 200µm d'épaisseur qui sont appelées « wafers ». Après un traitement pour enrichir en éléments dopant (P, As, Sb ou B) et ainsi obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N, les wafers sont « métallisés » : des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés les wafers sont devenus des cellules photovoltaïques.

| | Technique de fabrication | Avantages | Inconvénients |
|---|--|---|--|
| Cellule en silicium amorphe | Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires". | <ul style="list-style-type: none"> ✓ fonctionne avec un faible éclaircissement ✓ le moins cher ✓ moins sensible aux températures élevées | <ul style="list-style-type: none"> ✓ rendement module commercial faible : 5 à 9 % ✓ diminution sensible des performances dans le temps |
| Cellule en silicium mono cristallin | Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ cellule carrée à bords arrondis ✓ rendement module commercial élevé : 12 à 20 % | <ul style="list-style-type: none"> ✓ très cher |
| Cellule en silicium multi cristallin | Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ cellule carrée ✓ bon rendement module commercial : 11 à 15 % ✓ moins cher que le monocristallin | <ul style="list-style-type: none"> ✓ rendement faible sous éclaircissement faible |
| Cellule tandem | Empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deux cellules (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin) absorbant dans des domaines spectraux se chevauchant, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Excellent rendement théorique (40 % en laboratoire) | <ul style="list-style-type: none"> ✓ coût élevé dû à la superposition de deux cellules |

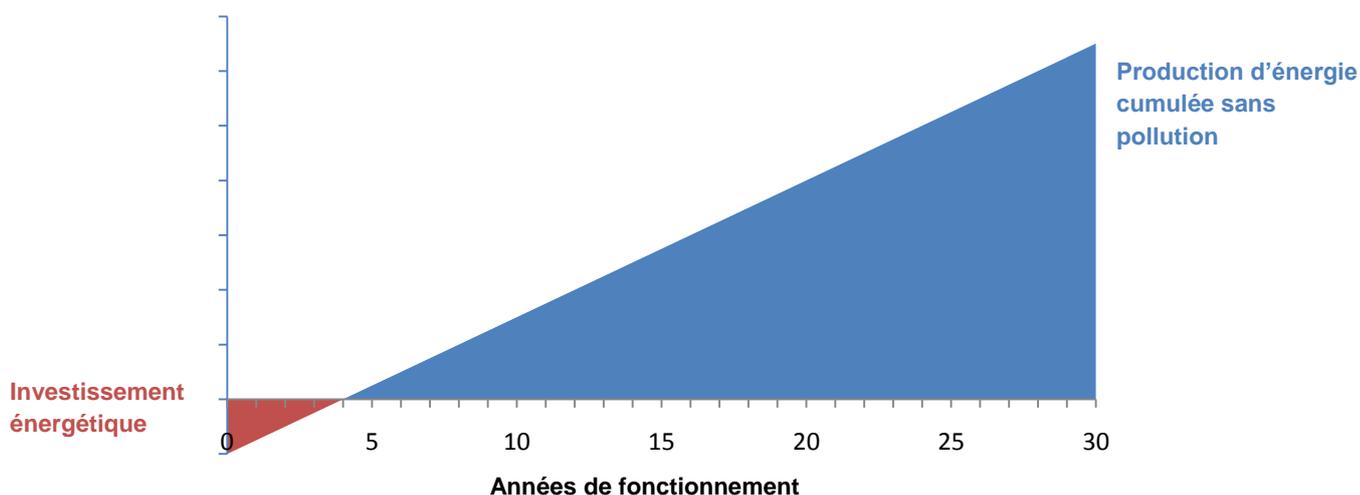
2.2.2. Une production très polluante

2.2.2.1. Bilan énergétique

La production des cellules photovoltaïques nécessite beaucoup d'énergie. En effet, la consommation d'énergie nécessaire pour la fabrication de systèmes photovoltaïques est comparable avec l'énergie consommée dans l'extraction, le transport et le raffinage des énergies fossiles, mais celles-ci vont ensuite produire des déchets et contribuer à la pollution.

On estime qu'un module photovoltaïque doit fonctionner :

- 2 à 4 ans pour un système PV utilisant des cellules poly cristallines. Les variations sont dues au climat local et à l'inclinaison des modules (en toiture ou en façade).
- moins de 3 ans pour un système PV utilisant des modules photovoltaïques amorphes.



Avec une durée de vie de 30 ans, on peut dire qu'un système photovoltaïque va produire de l'électricité sans aucune pollution pendant près de 90% de sa vie.

Une étude¹ (publiée en avril 2006) réalisée par l'Agence Internationale de l'Énergie et la Fédération de l'Industrie Photovoltaïque Européenne (EPIA), donne une analyse comparée du bilan énergétique de systèmes photovoltaïques dans le monde.

| | PARIS | | LYON | | MARSEILLE | |
|--|---------|--------|---------|--------|-----------|--------|
| | toiture | façade | toiture | façade | toiture | façade |
| Production annuelle (kWh/kWc) | 872 | 595 | 984 | 632 | 1 317 | 878 |
| Temps de retour énergétique en années | 2,9 | 4,3 | 2,6 | 4,0 | 1,9 | 2,9 |

¹ Cette étude apporte des réponses sur les perspectives d'approvisionnements énergétiques et sur l'influence sur les marchés énergétiques mondiaux d'un nouvel accord international visant la stabilisation des émissions de gaz à effet de serre.

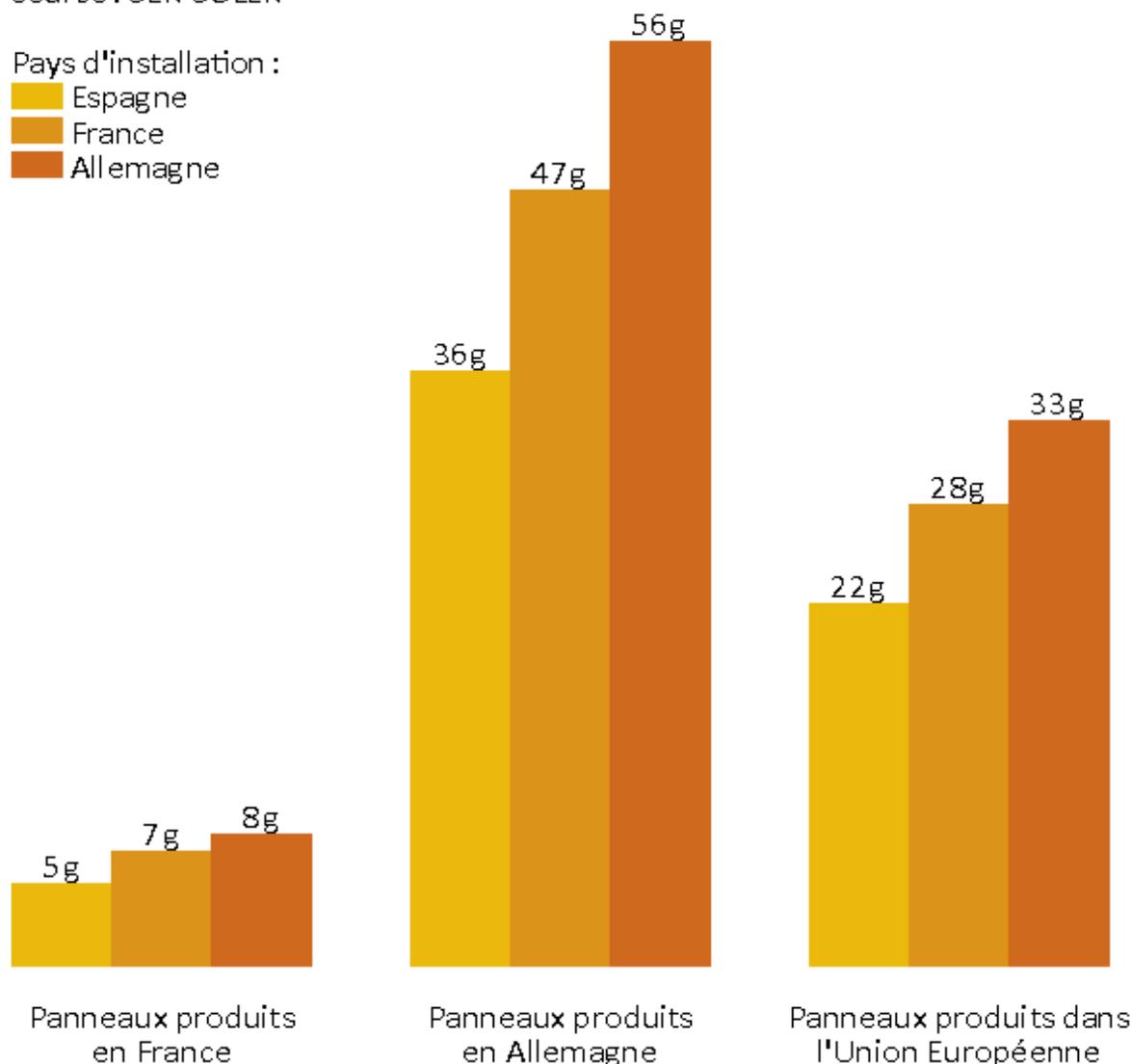
2.2.2.2. Bilan carbone²

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 CO₂ d'un kWh photovoltaïque. Le process 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 CO₂ dans l'atmosphère, le même kWh produit en Allemagne entraîne une émission de 574 g de CO₂, 508 g, au Japon ou 609 g aux États-Unis.

Contenu en CO₂ d'un kWh photovoltaïque en fonction des pays de production et d'installation des panneaux

source : SER-SOLER

Pays d'installation :
■ Espagne
■ France
■ Allemagne



² Outil développé par l'ADEME qui permet d'évaluer les émissions de gaz à effet de serre engendrées par l'ensemble des processus physiques nécessaires à l'existence d'une activité ou organisation humaine. L'outil prend en compte les émissions directes et les émissions indirectes (transport par exemple).

2.3. Comment avoir une bonne installation ?

2.3.1. Définition

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable permettant de produire de l'électricité par transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque. Afin d'avoir un bon rendement, il faut avoir une bonne installation.

Pour cela, il faut respecter les critères suivants :

2.3.2. Influence de l'ensoleillement

2.3.2.1. Explication du phénomène

Un panneau solaire n'est pas 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 la production électrique du panneau varie également en permanence en fonction de la position du soleil et n'est jamais à son maximum sauf au « midi solaire³ ». La production en fin de journée est donc une somme de productions partielles. Par temps couvert, donc en l'absence de soleil, la luminosité ambiante, alors que le soleil est caché, permet quand même une toute petite production électrique, et ces petites productions additionnées finissent par faire des kWh. En fin d'année à partir du total de la production électrique on obtient le nombre d'heures d'équivalent plein soleil de l'année qui n'a rien à voir avec le nombre d'heures d'ensoleillement⁴ au sens météo.

Le nombre d'heures d'ensoleillement vu par les services météo ou les climatologues n'est pas de la même nature. On constate que Rouen est située sur la ligne des 1750 heures d'ensoleillement par an, alors que le nombre d'heures d'équivalent plein soleil y est proche de 1100 heures.

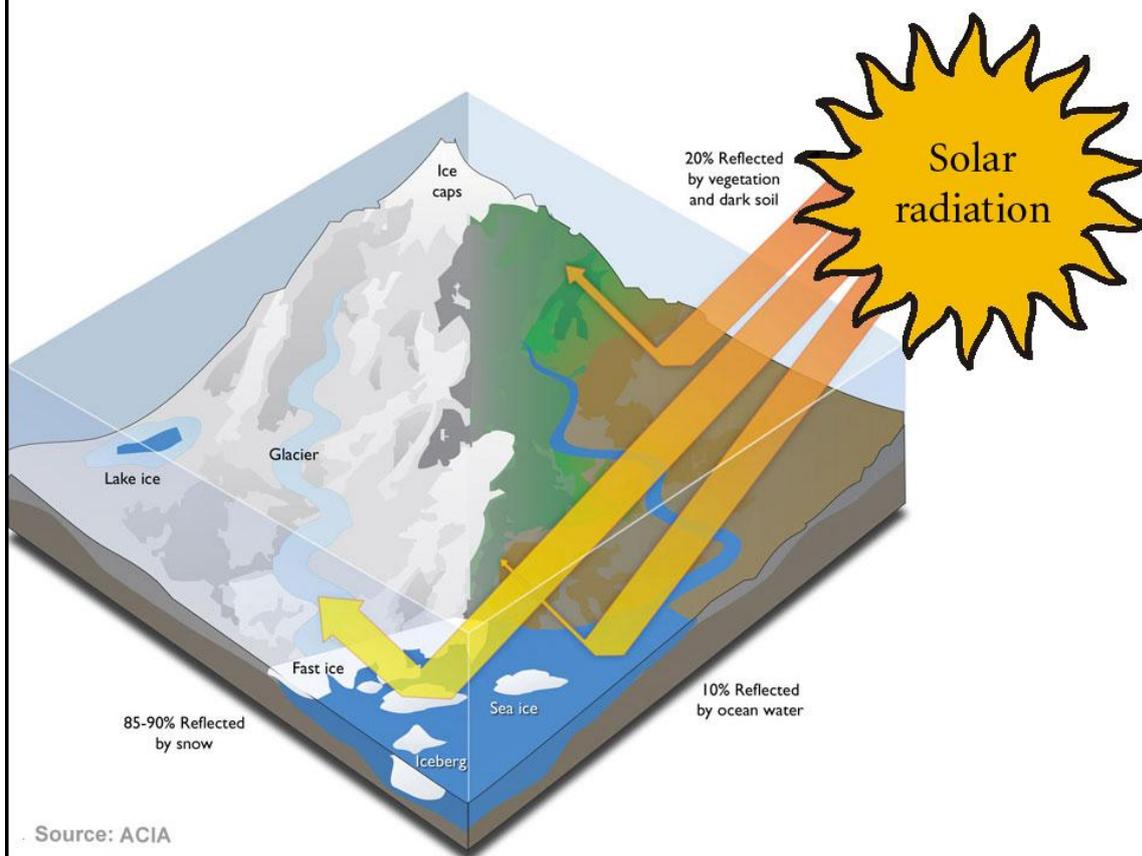
2.3.2.2. L'albédo

Il faudrait aussi tenir compte de l'albédo du sol, c'est-à-dire de son pouvoir de réflexion de la lumière. Lorsqu'une installation est environnée de neige par exemple, donc d'un environnement très réfléchissant, la production d'une installation augmente parce qu'elle récupère une petite partie de la lumière réfléchiée par la neige alentour. Mais cette variable n'est pas facile à quantifier et se trouve, de fait, incluse dans le nombre d'heures d'équivalent plein soleil.

³ Instant où le Soleil atteint son point le plus élevé dans le ciel.

⁴ Puissance d'énergie par rapport à la surface du lieu où l'on se trouve ; l'idéal est d'avoir 120 W/m².

Albedo physics



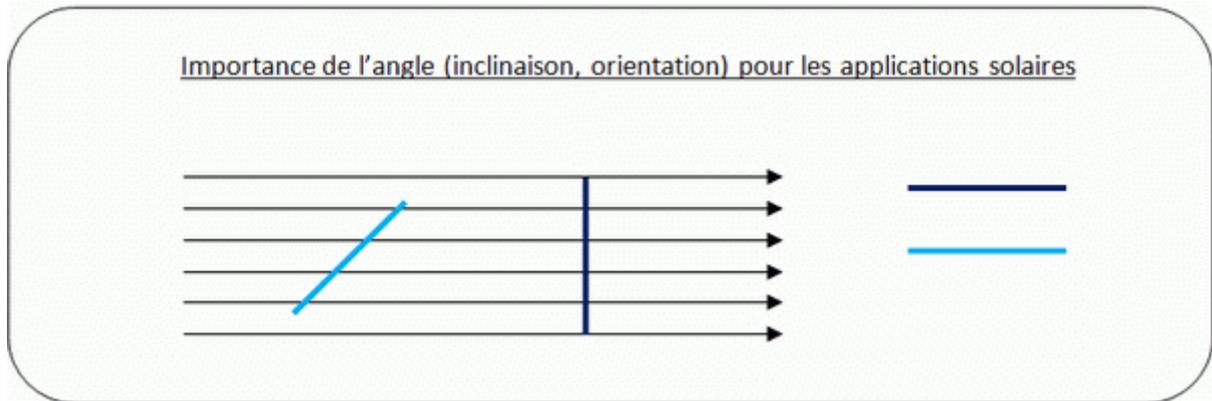
2.3.2.3. Cas de la France

La France se situe dans l'hémisphère Nord à une latitude de 45° environ, le Soleil au zénith est donc vers le Sud.

Globalement, les rayons du Soleil viennent donc plus du Sud que des autres directions; d'autant plus qu'au midi solaire, lorsque le Soleil est au zénith et donc plein Sud, le rayonnement est le plus intense. La meilleure orientation pour un panneau solaire est donc vers le Sud.

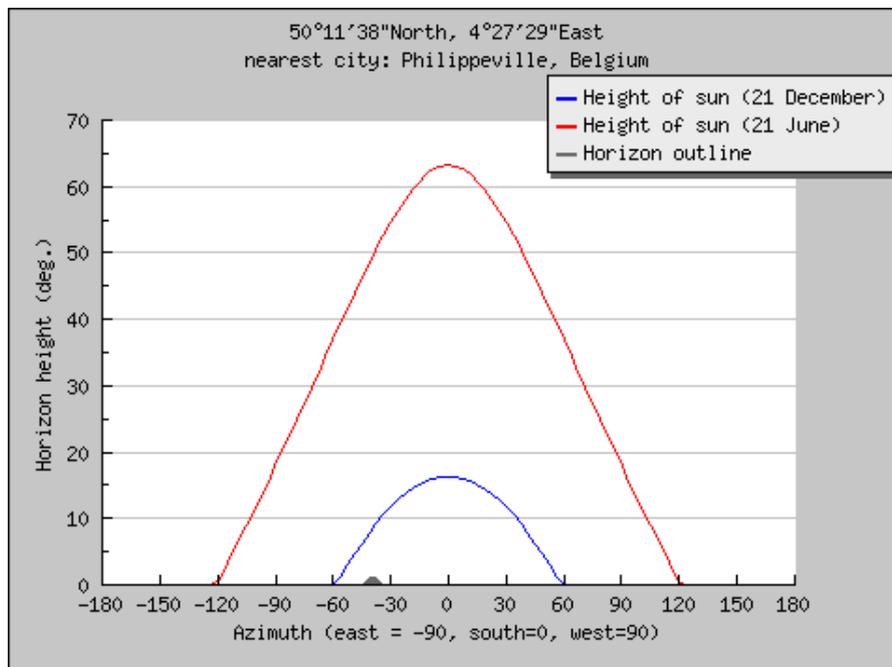
2.3.3. Influence de l'inclinaison du toit par rapport à la position du Soleil

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



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 au 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. 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 soleil⁵ » dans le ciel en fonction de l'azimut⁶ lors du solstice d'été (21 juin, en rouge) et lors du solstice d'hiver (21 décembre, en bleu).



Graphique 1 : PVGIS © European Communities, 2001-2006

⁵ Angle que fait la direction de visée du Soleil avec le plan horizontal.

⁶ Angle horizontal entre la direction d'un objet et une direction de référence.

2.3.3.1. Importance de l'angle d'incidence

L'angle d'incidence est l'angle formé par les rayons du Soleil et le plan du panneau. 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 :

$$R = \sin \beta \times 100$$

avec R rendement en % et β angle d'incidence en $^{\circ}$

Ainsi, comme on pouvait s'en douter, le rendement est maximal lorsque les rayons arrivent perpendiculairement au panneau.

$$100 = \sin \beta \times 100$$

$$\sin \beta = 1$$

$$\beta = 90^{\circ}$$

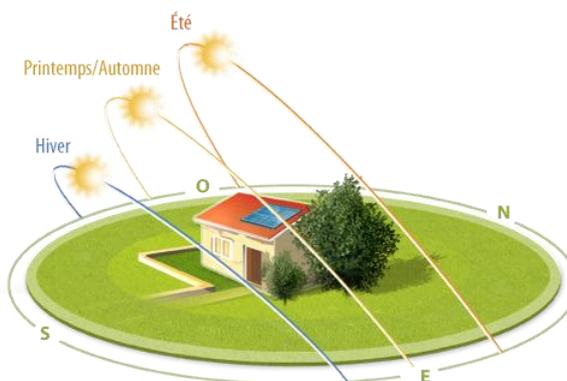


Image 3 : <http://www.photovoltaique.info/local/cache-vignettes/L532xH422/horizon-b4e7d.png>

2.3.3.2. Importance de l'angle d'inclinaison

L'angle d'inclinaison est l'angle formé par le plan du sol et le plan du panneau.



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.

2.3.4. Qualité du silicium

Il existe 4 types de cellules photovoltaïques qui varient selon la méthode de fabrication du silicium (cf. tableau page 11).

Un rendement de 10% signifie que pour une puissance de 1000 W donnée, le panneau en produirait 100 W.

2.3.5. Position des capteurs : récapitulatif

En dehors de la latitude du lieu où l'on se trouve qui détermine l'ensoleillement annuel moyen que le générateur va recevoir, quatre paramètres influent sur le rendement des panneaux photovoltaïques :

- ***l'orientation des capteurs*** : l'orientation idéale est plein sud ; une déviation de plus ou moins 45° (soit une orientation de sud-ouest à sud-est) aura un impact inférieur à -10% sur le rendement de l'installation.
- ***l'inclinaison des capteurs*** : l'inclinaison idéale varie entre 30° et 40° selon la latitude du lieu où l'on se trouve en France.
- ***la température ambiante*** : la température idéale de fonctionnement se situe autour de 20°. Les températures élevées réduisent le rendement des cellules.
- ***l'ombrage*** : le capteur doit être bien dégagé des arbres et des constructions environnants car une ombre sur un module, même partielle, diminue le rendement de l'ensemble du module : un module ne produit que la quantité de courant fournie par sa cellule la moins productive.

2.4. Analyse économique : aides, subventions et dépenses à prévoir

Le solaire photovoltaïque véhicule encore une image d'énergie chère, voire économiquement peu rentable. Ce paragraphe tend donc à éclaircir la situation financière de cette technologie.

2.4.1. Coût de l'installation

Le coût d'une centrale photovoltaïque raccordée au réseau dépend à la fois du coup des éléments (modules, onduleur, câbles...) mais également de la main d'œuvre associée à leur pose.

A titre d'exemple, citons le « kit standard » de l'association Hespul, correspondant à une puissance crête de 1,1 kWc et assurant entre 30 et 60 % de la consommation d'un foyer classique (hors chauffage et eau chaude sanitaire). C'est un « kit » prêt à l'emploi comprenant les modules photovoltaïques, l'onduleur et les différents accessoires. Seul un parafoudre a été acheté en plus. Par ailleurs, la pose a été effectuée par le particulier lui-même.

| | |
|-----------------------------------|------------------|
| « kit photovoltaïque » HT | 5981,66 € |
| Accessoire (parafoudre) HT | 73,48 € |
| Pose et main d'œuvre | 0,00 € |
| Coût total TTC | 7241,95 € |
| Coût de l'installation TTC | hors subvention |

Ce kit représente en général un investissement de 7500 €. Ce qui représente un coût brut d'installation de 6.8 €/Wc. On en conclut bien évidemment qu'une centrale photovoltaïque représente un investissement considérable. Cependant, de nombreuses aides financières peuvent vous être accordées.

2.4.2. Primes et subventions

Le solaire photovoltaïque est une technologie très soutenue financièrement. En France, différentes primes permettent d'alléger le coût d'une installation. Ces subventions sont partagées entre financement direct (subvention) et indirect.

2.4.2.1. La subvention du Conseil Régional (subventions directes)

La région Haute-Normandie propose une aide aux installations solaires photovoltaïques pour les particuliers et collectivités. Cette aide porte sur dépenses non éligibles au crédit d'impôt, dans la limite de 1600€. L'entreprise procédant à l'installation doit être certifiée QualiPV⁷.

- **Pour les particuliers :**
 - Aide sur le matériel non éligible au crédit d'impôt, dans la limite de 1600 € d'aide
 - Communauté d'Agglomération des Portes de l'Eure : 800€ sur main d'œuvre
- **Pour les collectivités locales, établissements publics, syndicats de copropriétés, associations, bailleurs sociaux publics ou privés :**
 - Aides forfaitaires de 3,5 euros du watt / crête. (plafond 15 kWc par installation)
 - Communauté d'Agglomération des Portes de l'Eure : 1,75 €/Wc (max 15 kWc)

2.4.2.2. Les financements indirects

Des financements indirects peuvent être récupérés sur l'installation d'une centrale photovoltaïque.

- Ainsi, une **TVA à 5.5 %** peut être obtenue sous certaines conditions (habitation principale achevée depuis plus de deux ans et unicité de l'entreprise pour le matériel et la pose).
- De la même manière, un crédit d'impôt sur le matériel limité à 8000 € peut être obtenu pour une habitation principale et unicité de l'entreprise. Le montant pris en compte concerne le coût TTC des équipements (matériel uniquement) déduction faite des autres « aides à l'investissement » perçues. Tout le monde bénéficie du crédit d'impôt, que l'on soit imposable ou non (même si vous ne payez pas d'impôt, il vous sera remboursé).
- **Conditions pour bénéficier du crédit d'impôt :**
 - ✓ Posséder une installation dont la puissance est inférieure à 3kWc, ou bien avoir une consommation électrique supérieure à la moitié de la capacité de production.
 - ✓ Vendre la totalité de sa production
 - ✓ Ne disposer que d'une seule facture pour le matériel et la main-d'œuvre

⁷ Appellation pour la qualité d'installation des générateurs photovoltaïques raccordés au réseau.

- **Montant du crédit** : pour un même foyer fiscal et une même habitation, le montant maximum de dépenses ouvrant droit au crédit d'impôt, pour la période du 1er janvier 2005 au 31 décembre 2012 est de :
 - ✓ 8 000 € pour une personne seule (célibataire, veuve ou divorcée)
 - ✓ 16 000 € pour un couple marié ou pacsé soumis à une imposition commune
 - ✓ 400 € supplémentaire par personne à charge. Cette somme est divisée par deux lorsqu'il s'agit d'enfants à charge égale des parents.

2.4.2.3. Peut-on bénéficier d'aides supplémentaires ?

L'ANAH (Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat) peut attribuer une prime complémentaire maximale de 1800€ pour un système combiné sous certaines conditions :

- L'attribution est soumise à plafond de ressource (destinés aux revenus modestes)
- Le bâtiment doit avoir plus de 15 ans
- Faire appel à un installateur Qualisol⁸
- Installer un équipement visé par le CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment)

Pour des installations sur sites isolés, des subventions peuvent être accordées par l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie).

2.4.3. Prix de rachat de l'électricité par EDF

Le tarif d'achat 2008 était fixé à 0,57 €/kWh. Il a augmenté en 2009 pour atteindre au maximum un prix d'achat de 0,60176 €/kWh, ceci en fonction de votre installation.

En effet, EDF s'engage à vous acheter votre électricité à un taux de base de 0,32823 €/kWh si les panneaux sont posés sur la toiture.

La prime à l'intégration au bâti a pour objectif de promouvoir les équipements photovoltaïques qui assurent également une fonction technique ou architecturale essentielle à l'acte de construction. Si les panneaux sont intégrés dans la toiture, et font office d'étanchéité, le tarif s'élève à 0,60176 €/kWh (Prime à l'intégration : 0,27353 €/kWh, à rajouter au taux de base).

Les contrats entre producteur et EDF ont une durée de 20 ans (ce qui représente environ la durée de vie des panneaux photovoltaïques).

⁸ appellation pour la qualité d'installation des systèmes solaires thermiques, à savoir les chauffe-eau solaires individuels (CESI) qui produisent de l'eau chaude sanitaire et les systèmes solaires combinés (SSC) qui procurent à la fois eau chaude sanitaire et chauffage

2.4.4. Coût raccordement réseau

Il faut également signaler qu'un raccordement ainsi qu'un rachat officiel nécessite des investissements supplémentaires.

Ce coût s'étend de 646,21 € pour le rachat du surplus d'électricité uniquement, à 827,11 € dans le cas où la totalité de l'électricité produite est rachetée par EDF.

Néanmoins, ces tarifs de raccordement restent souvent aléatoires. Le prix du raccordement n'est pas fixe et peut varier en fonction de chaque situation. En effet, si des renforcements de réseaux sont à prévoir ou encore des boîtiers de protection à rajouter, le prix peut être plus important que la moyenne. ERDF (**Électricité Réseau Distribution France** est une société anonyme à conseil de surveillance et directoire, filiale à 100% d'EDF en charge de la gestion de la plus grande partie du réseau de distribution d'électricité en France) est la seule entité pouvant évaluer ce prix.

Une PTF (**Proposition Technique et Financière**) correspondant au devis du raccordement est d'abord envoyée pour vous faire connaître le coût du raccordement. Ainsi de manière générale, une installation de taille inférieure à 36 kWc verra son prix de raccordement aux alentours de 1 000 €.

Depuis fin 2006, c'est obligatoirement ERDF qui est propriétaire des compteurs et qui réalise (ou fait réaliser) les travaux de pose. Le producteur doit s'acquitter annuellement d'une redevance dite TURP (pour **Tarif d'Utilisation du Réseaux Public de Distribution d'Electricité**), dont le niveau est fixé par l'État, qui comprend une composante de gestion et une composante de comptage (cette dernière incluant des redevances de location et d'entretien, de relève, de contrôle et de profilage). Pour un petit producteur (installation inférieure à 18 kWc), ces frais sont environ de 22 € HT annuels s'il est raccordé en vente du surplus et de 47 € HT pour la vente de la totalité.

2.5. La rentabilité

Il ne fait aucun doute que l'installation de panneaux photovoltaïques est une pratique onéreuse. Cependant, avec les nombreuses aides financières accordées, cet investissement peut finalement s'avérer avantageux. Avant de conclure sur le niveau de rentabilité des installations photovoltaïques, voyons quels sont les différents éléments à prendre en compte pour effectuer ce calcul.

2.5.1. L'ensoleillement

Il constitue l'élément fondamental sur lequel repose cette technologie. Il faut savoir que l'énergie solaire captée par la Terre pendant une heure pourrait suffire à couvrir pendant un an les besoins énergétiques mondiaux. Ainsi, pour avoir un rendement maximal, il faut s'assurer que les panneaux photovoltaïques ne soient pas à l'ombre quelques soient la saison et le moment de la journée.

2.5.2. L'exposition et l'inclinaison

Comme nous l'avons déjà évoqué, l'exposition et l'inclinaison sont deux éléments indispensables à prendre en compte lors de l'installation de panneaux photovoltaïques. Comme on peut le lire sur le tableau, en France, une inclinaison de 30° orientée plein sud permet d'obtenir le meilleur rendement.

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

 : 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.

2.5.3. Les caractéristiques des panneaux photovoltaïques

La puissance d'un panneau photovoltaïque (en kWc, kilowatt-crête) mesure sa capacité de production d'électricité. C'est une caractéristique technique qui ne dépend que du panneau en lui-même, et pas de l'endroit où il est posé. La puissance est donc déterminée par le matériau qui constitue le panneau et par sa surface.

La puissance de production photovoltaïque s'exprime en Kilowatts-crête (kWc). Le kilowatt-crête représente la puissance de production d'électricité pour un ensoleillement de 1000 W/m² à 25°C.

Le rendement d'un panneau photovoltaïque dépend du type des cellules qui le composent (*voir tableau page 11*) Ainsi, la puissance « crête » d'un panneau photovoltaïque varie de 100 à 200 W/m².

La durée de vie des panneaux photovoltaïques est de 25 à 30 ans.

2.5.4. Entretien et maintenance

On estime que le coût de la maintenance représente moins de 1% du montant de l'investissement initial par an. Ce coût est du au fait qu'il faut changer l'onduleur tout les 10 ans environ.

L'entretien consiste à nettoyer régulièrement les panneaux pour retirer les dépôts de poussières ou saletés

Exemples :

Prenons l'exemple d'une installation d'une puissance de 3kWc, soit 25m² de panneaux photovoltaïques, montée chez un couple de particuliers (bénéficie d'un crédit d'impôt plus important). Les panneaux sont intégrés à la toiture, ce qui nous permet d'avoir un prix d'achat d'environ 0,6€/kWh. L'inclinaison est de 30°, orienté plein sud. Le coût total de l'investissement s'élève à environ 25 000€. On fera la simulation sur 20 ans. Pour les aides financières on tiendra compte également des subventions régionales.

Tout d'abord, les panneaux sont installés à Rouen

| | |
|---|-------------------|
| Productivité électrique annuelle par kW de puissance crête | 968,40 kWh/kWc an |
| Recette annuelle | 1748,32 € par an |
| Temps de retour sur investissement | 7,30 ans |
| Gain en fin d'exercice | 189664,00 € |
| Temps de retour énergétique | 3,10 ans |

Maintenant les panneaux sont installés à Toulon

| | |
|---|--------------------|
| Productivité électrique annuelle par kW de puissance crête | 1512,90 kWh/kWc an |
| Recette annuelle | 2731,27 € par an |
| Temps de retour sur investissement | 5 ans |
| Gain en fin d'exercice | 37125,50 € |
| Temps de retour énergétique | 2 ans |

Notons que s'il n'y avait aucunes aides financières, le temps de retour sur investissement serait de 16,7 ans pour Rouen et de 10,1 pour Toulon. De même, le gain en fin d'exercice serait de 4966,4 € pour Rouen et de 24 625,5 € pour Toulon.

2.6. Impact sur l'environnement après l'installation

2.6.1. Paysage et environnement local

En l'absence d'émissions et de nuisances dues au fonctionnement, les systèmes photovoltaïques affectent l'environnement à deux niveaux selon qu'ils sont installés sur les bâtiments ou au sol.

2.6.1.1. Systèmes liés aux bâtis

Actuellement, la plupart des installations utilisent des modules conçus pour être fixés sur un support ou un toit incliné. En effet, la majorité des systèmes photovoltaïques est liée à un bâtiment (maison individuelle, équipements publics...) ou à une infrastructure urbaine (couverture de parking...). Ces systèmes, une fois posés, n'ont aucun autre impact direct sur l'environnement local que la **modification visuelle**, notamment la couleur, d'une partie du bâtiment-support. Cet effet peut aussi bien être considéré comme positif que négatif, l'aspect visuel étant très subjectif. Mais il est vrai que les modifications engendrées peuvent avoir une forte charge culturelle si elles ont lieu, par exemple, dans un environnement patrimonial ou historique remarquable.

Cependant, les exemples réussis et convaincants de systèmes photovoltaïques sont nombreux, contribuant ainsi à donner une bonne image de cette méthode et à la développer.

Outre cela, de nouveaux produits arrivent sur le marché afin de concurrencer ces panneaux souvent rébarbatifs. Par exemple, différents types de tuiles ou d'ardoises photovoltaïques permettent une intégration plus aisée aux toits traditionnels et des modules semi-transparents peuvent s'associer aux vitrages.

2.6.1.2. Systèmes au sol

De leur côté, les installations au sol ont un caractère plus « passe-partout ». En effet, par leur structure horizontale, elles choquent moins qu'une éolienne par exemple. De plus, du fait de leur couleur sombre, elles se fondent dans le paysage. Ces caractéristiques permettent de limiter considérablement l'impact perçu.

Malgré cela, l'impact sur le paysage et surtout sur l'écosystème local est indéniable. En effet, il est parfois nécessaire, pour des questions de sécurité, de clôturer les zones d'installation (s'étalant parfois sur des dizaines d'hectares) pouvant entraîner ainsi un déplacement de la faune sauvage et également occuper l'espace cultivable.



Image 4 : <http://www.aclimate-13.com/images/integration/site1g.jpg>

2.6.2. Déchets et recyclage

2.6.2.1. Le recyclage

Dans la chaîne de fabrication des panneaux PV, le processus consiste à purifier le silicium. Ce dernier doit passer du niveau de qualité suffisant pour l'industrie métallurgique à celui nécessaire pour le solaire, soit plus de 99% de pureté. Pour parvenir à cette performance, le silicium réagit à très hautes températures avec des produits dangereux tels que l'acide chlorhydrique. Les impacts environnementaux sont surtout liés à la consommation d'énergie. C'est pourquoi le recyclage des panneaux solaires en fin de vie est recommandable.

Cependant, outre la pollution lors de la fabrication, le recyclage des cellules pose également des problèmes environnementaux. Un module photovoltaïque est essentiellement composé de matériaux recyclables (verre et métal). Toutefois, le problème est plus délicat, lors de la récupération du silicium et aussi, en faible quantité, du plomb et du cadmium (contenus dans les modules et les onduleurs) qui constituent principalement les installations.

Le recyclage des modules à base de silicium cristallin consiste en un simple traitement thermique servant à séparer les différents éléments du module photovoltaïque et permet de récupérer les cellules photovoltaïques, le verre et les métaux (aluminium, cuivre et argent).

Le plastique comme le film en face arrière des modules, la colle, les joints, les gaines de câble ou la boîte de connexion sont brûlés par le traitement thermique. Les plaquettes recyclées peuvent alors être intégrées dans le processus de fabrication d'autres cellules et utilisées pour la fabrication de nouveaux modules ou alors être fondues et intégrées dans le processus de fabrication des lingots de silicium. Ensuite, les cellules en silicium seront soumises à un procédé de purification qui va permettre leur réutilisation dans des nouveaux modules PV.

Ces nouveaux panneaux photovoltaïques auront une garantie de 25 ans et **l'énergie grise incorporée sera nettement inférieure aux panneaux avec des composants neufs** ; c'est tout l'intérêt de cette méthode.

2.6.2.1. L'association PV Cycle

L'association PV CYCLE, regroupant des industriels du secteur solaire photovoltaïque, a été créée en juillet 2007 à Bruxelles pour promouvoir la protection du climat et de l'environnement en encourageant l'usage durable de la technologie photovoltaïque. Considérant que cette industrie contribue de manière significative aux trois piliers du développement durable (environnement, économique et social), l'association s'intéresse à la gestion des panneaux solaires en fin de vie. L'objectif est d'établir un schéma volontaire de récupération des déchets et de devenir le corps de recyclage de l'Europe. PV CYCLE s'engage à reprendre un minimum de 65% des panneaux installés en Europe depuis 1990 et à en recycler 85% des déchets. La filière PV Cycle organisera la mise en place et l'optimisation de collecte et du recyclage de ces panneaux dès 2009.

Le cycle de vie idéal des panneaux solaires photovoltaïques (en silicium cristallin par exemple) se construit comme suit.

CYCLE DE VIE DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES EN SILICIUM CRISTALLIN

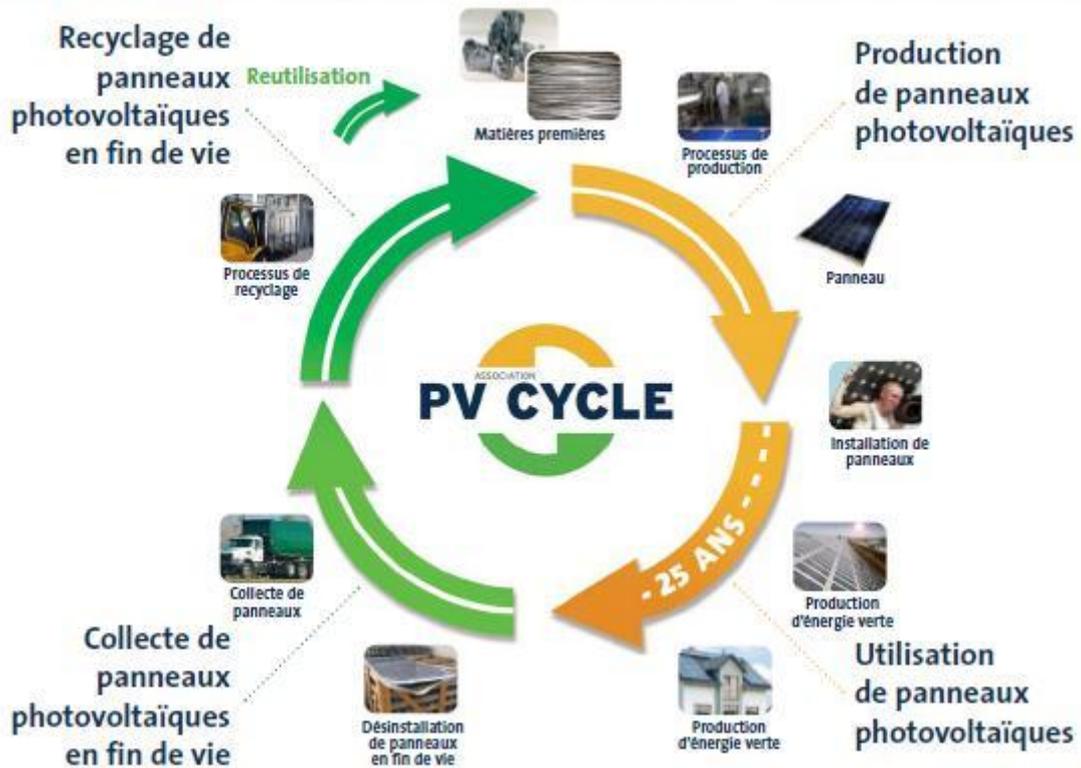


Image 5 : <http://www.ecolo-trader.fr/PV-Cycle-la-filiere-de-recyclage-des-panneaux-sola-vtptc-252.php>

2.7. Etude d'une installation en Haute Normandie

Nous venons de voir les différents points importants concernant le cycle de vie du photovoltaïque, de la fabrication au recyclage.

Afin de montrer qu'une telle technologie n'est pas qu'utopique, nous allons maintenant présenter une installation solaire photovoltaïque existante.

Il s'agit d'une installation inaugurée en avril 2009 à Bouchevilliers, dans l'Eure. L'installation fut réalisée sur le toit d'un bâtiment agricole.



Voyons quelques détails concernant l'installation :

- **surface d'installation** : 1 150 m²
- **surface installée de panneaux photovoltaïques** : 588 m²
- **capacité de production** : 69 000 kWh/an
- **investissement total** : 454 000 €
 - *subvention du Département de l'Eure* : 30 000 €
 - *subvention de la Région Haute-Normandie* : 39 700 €
- **mise aux normes** : 170 000 €
- **orientation** : Sud 18° Ouest
- **inclinaison du toit** : 45°

Cette installation énergie renouvelable, la première de ce type dans l'Eure, s'inscrit dans les objectifs du Plan Climat départemental.

L'installation est capable de produire 69 000 kWh/an, correspondant à la consommation théorique d'une trentaine de foyers soit la commune de Bouchevilliers.

Au travers de cet investissement de 454 000 €, l'agriculteur poursuit plusieurs objectifs. Le premier est de valoriser le bâtiment et contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre en produisant de l'électricité d'origine solaire. Le second est de réaliser chez lui un projet d'envergure qui ait valeur d'exemple dans le département. Le troisième est de tester un modèle économique.

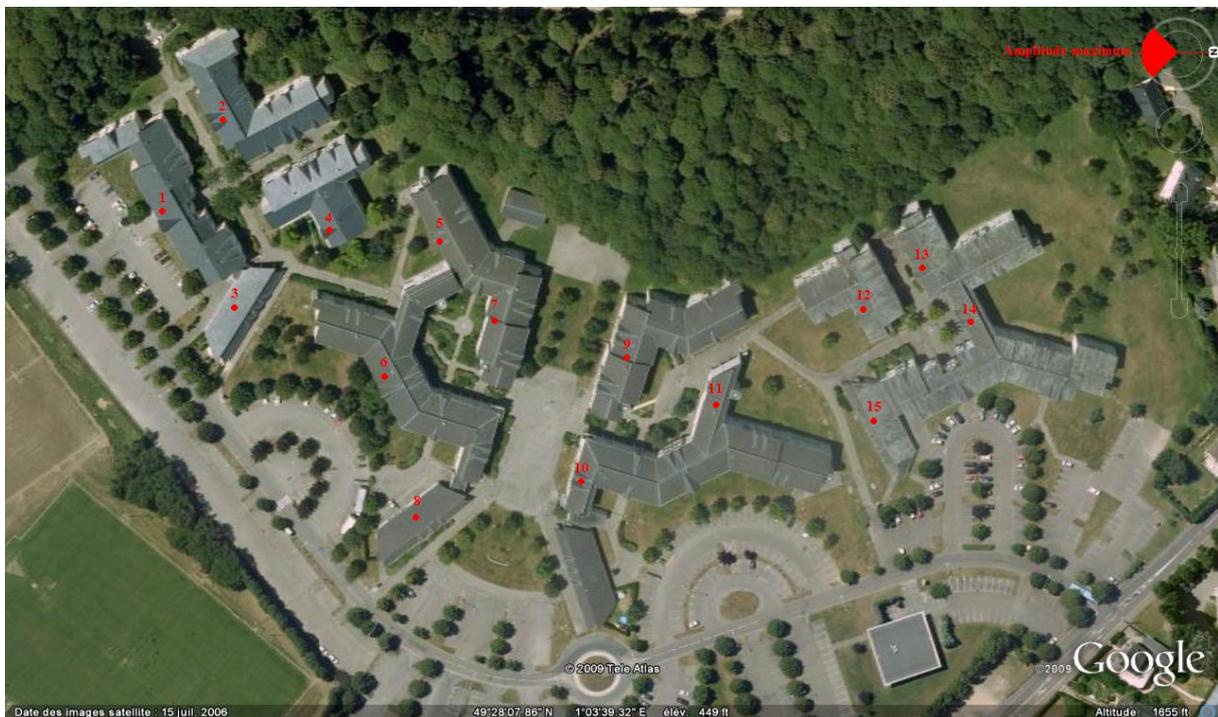
2.8. Simulation sur Capelle

Après avoir vu un maximum d'aspect sur la question photovoltaïque, il semble nécessaire d'évoquer une simulation. Pour cela il est judicieux prendre un exemple nous concernant : Capelle.

On va donc déterminer quels investissements sont nécessaires et quels bénéfices sont attendus, tant financiers que pratiques.

Sur cette photo aérienne nous pouvons voir la Résidence universitaire de Capelle, aussi les toits sélectionnés pour notre petite simulation d'installation photovoltaïque. Google Earth permet une mesure des distances nécessaires pour le calcul des surfaces. Il est entendu que nous avons pris une photo de face d'un toit pour connaître l'angle d'inclinaison de ce dernier (obtention de largeur du toit, soit 7,25 m).

Après calcul nous en arrivons à une inclinaison de $18,31^\circ$ et une surface totale de $2\,925\text{ m}^2$. Cela représente un investissement total de $1\,020\,000\text{ €}$.



La simulation aura pour conditions suivantes :

- **investissement moyen** : $8,00\text{ € / W}$
- **apport électrique moyen** : $1,00\text{ kW / }10,00\text{ m}^2$
- **tarif d'achat au kW par EDF** : $0,62\text{ € / kWh}$
- **durée de vie de l'installation** : 20 ans
- **taux de conversion électrique** : 75%
- **subvention espérée** : 45% sur investissement

Nous avons utilisé ce logiciel en ligne pour effectuer la simulation :
http://ines.solaire.free.fr/pvreseau_1.php

Il nous a été recommandé par l'association Eure Solaire



En reprenant les informations apportées au dossier avant, nous pouvons construire le tableau suivant :

| TOIT | ORIENTATION | GAIN / AN | RENTABLE EN | GAIN TOTAL |
|------|---------------|-------------|-------------|--------------|
| 1 | Sud-15° (Est) | 19 237,00 € | 2017 | 244 309,90 € |
| 2 | Sud-15° (Est) | 12 924,00 € | 2017 | 164 134,80 € |
| 6 | Sud-15° (Est) | 10 312,00 € | 2017 | 130 962,40 € |
| 7 | Sud | 9 277,00 € | 2017 | 117 817,90 € |
| 9 | Sud | 16 371,00 € | 2017 | 207 911,70 € |
| 10 | Sud | 9 713,00 € | 2017 | 123 355,10 € |
| 11 | Sud | 10 368,00 € | 2017 | 131 673,60 € |
| 12 | Sud | 5 457,00 € | 2017 | 69 303,90 € |
| 14 | Sud | 8 731,00 € | 2017 | 110 883,70 € |

Après la mise en synthèse de ces résultats nous prévoyons un gain total de 1 300 000,00 €.

3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

D'après les éléments que nous avons pu trouver, il semble que le photovoltaïque soit une bonne alternative aux énergies fossiles. Il rejette peu de CO₂, si on tient compte du processus de fabrication, et il ne dénature pas le paysage, contrairement aux éoliennes par exemple, car les panneaux solaires peuvent être inclus à des installations déjà existante.

Cependant le photovoltaïque n'a pas un rendement très élevé (20% pour les meilleures panneaux), mais surtout, il n'a pas un bon rapport qualité/prix du fait d'un investissement coûteux malgré les aides financières accordés.

Nuançons nos propos car cet investissement est très vite rentabilisé pour les régions du sud de la France (4 à 5ans) et plus sur le moyen terme dans le nord de la France, comme la Normandie (9 à 10ans).

Nos ressources en énergie s'appauvrissant, le photovoltaïque semble être une des solutions à ne pas négliger en matière d'énergies renouvelables. Des efforts doivent cependant continuer à être fait afin d'améliorer le rendement et de diminuer le coût de production pour une meilleure intégration au sein de notre société.

Grâce à cet UV, nous avons pu, une fois encore, développer nos capacités de recherche, d'analyse et de synthèse.

Par ailleurs, le travail de groupe, indispensable à l'ingénieur, a permis la réussite du projet. C'est un point qu'il ne faut pas négliger : à l'avenir, nous serons amenés à travailler en équipe. Nous avons discuté et décidé ensemble des thèmes à aborder, partagé les tâches...

Ce qui nous a manqué, c'est que ce projet était essentiellement théorique. En effet, nous aurions apprécié de pouvoir fabriquer ne serait-ce qu'une imitation d'un panneau photovoltaïque.

Nous souhaitons également ajouter qu'un tel projet, comme d'autres du même genre, ne doit pas être mis de côté mais permettre au contraire de trouver une alternative aux problèmes énergétiques auxquels nous faisons face.

4. BIBLIOGRAPHIE

Liens internet (valides à la date du 02/06/2009) :

- <http://fr.wikipedia.org/wiki/Photo%C3%A9lectricit%C3%A9>
- <http://fr.wikipedia.org/wiki/Photovolta%C3%AFque>
- http://ines.solaire.free.fr/pvreseau_1.php
- <http://kyrnedia.kyrnesole.com/post/Fabrication-d-une-cellule-photovolta%C3%AFque>
- <http://leblogduphotovoltaique.midiblogs.com/archive/2008/03/30/la-toiture-photovoltaique-ideale.html>
- <http://ma-tvideo.france2.fr/video/iLyROoafyCk.html>
- <http://photovoltaique.canalblog.com/tag/orientation>
- <http://photovoltaique.pureforum.net/>
- <http://web.univ-pau.fr/~scholle/ecosystemes/4-pv/42-fab/42-pg-fr.htm>
- http://www.ademe.fr/particuliers/fiches/aides_financieres/rub5.htm
- <http://www.batiactu.com/edito/panneaux-photovoltaiques---a-l-heure-du-recyclage-21939.php>
- http://www.capvent.fr/reglementation_solaire.php
- <http://www.castorama.fr/store/conseils/je-decouvre/dossiers/la-maison-ecologique/produire-son-electricite>
- http://www.cg27.fr/cg27/site/eure/cache/offonce/departement_eure/vivre_mieux/actualite_vivre_mieux?id_actu=2829
- http://www.dolceville.gazdefrance.fr/portailClients/client/c/2/projets/energie_solaire/sommaire_photovoltaique
- http://www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaiques
- <http://www.ef4.be/fr/photovoltaique/aspect-environnemental.html>
- <http://www.enerzine.com/1/6759+limiter-limpact-de-lindustrie-du-photovoltaique+.html>
- <http://www.outilssolaires.com/>
- <http://www.panneauxphotovoltaiques.com/>
- http://www.paris-normandie.fr/index.php/cms/13/article/137351/Une_electricite_verte
- <http://www.photovoltaique.info/>
- <http://www.qualit-enr.org/qualipv/QualiPV-en-bref/Charte-QualiPV-:-les-10-points-photovoltaiques-122>
- <http://www.qualit-enr.org/qualisol/qualisol-enBref/presentation-65>
- <http://www.sunvalor.com/pages/nos-metiers/bilan-carbone.php>