

Projet de Physique P6-3

STPI/P6-3/2011 – 35

CONCEVOIR UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE SUR UN BÂTIMENT INSA



Etudiants :

Mathilde DANDJINO

Florence DEHAIS

Mihai HODOROGEA

Jeanne MARECHAL

Nicolas ROMANZIN

Vutung Lam TRAN

Nicolas WATTIEZ

Enseignant-responsable du projet :

Jamil ABDUL AZIZ

Date de remise du rapport : 17/06/11

Référence du projet : STPI/P6-3/2011 – 35

Intitulé du projet : **Concevoir une installation photovoltaïque sur un bâtiment Insa**

Type de projet : **Recherches documentaires et bibliographiques**

Etude de cas et de faisabilité

Simulations

Théorie

Objectifs du projet :

L'objectif du projet est multiple :

- **Comprendre le fonctionnement des cellules photovoltaïques, d'un point de vue technique et technologique (fonctionnement concret, différents types de panneaux, différents éléments constituant une installation photovoltaïque)**
- **Evaluer la faisabilité de l'implantation de panneaux photovoltaïques à l'Insa de Rouen (bâtiments, obstacles, raccordement, orientation, inclinaison...)**
- **Simuler la production d'une installation photovoltaïque grâce à des logiciels spécialisés (SunSim, PVSyst, SunnyDesign)**
- **Etudier le cycle de vie et le bilan carbone d'une installation photovoltaïque**

Mots-clefs du projet : **Panneaux photovoltaïques**

Simulation

Faisabilité

Impact environnemental

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	9
2. Méthodologie / Organisation du travail	9
2.1. Découverte du sujet et répartition de la tâche.....	9
2.2. Suivi régulier et échange de documents.....	9
2.3. Rédaction du dossier.....	10
3. Travail réalisé et résultats	11
3.1. Aspects techniques	11
3.1.1. Fonctionnement de l'effet photovoltaïque	11
3.1.2. Techniques de fabrication	14
3.2. Types de cellules photovoltaïques.....	15
3.2.1. Cellule en silicium amorphe.....	15
3.2.2. Cellule en silicium monocristallin	15
3.2.3. Cellule en silicium multicristallin	15
3.2.4. Cellule Tandem.....	16
3.2.5. Cellule photovoltaïque organique	16
3.2.6. Cellule multi-jonction	17
3.2.7. Cellule semi conducteur CGIS	17
3.3. Les facteurs influant pour l'installation du panneau photovoltaïque	18
3.3.1. L'influence de l'angle d'incidence	18
3.3.2. L'influence de l'orientation	18
3.3.3. L'influence de l'angle d'inclinaison.....	18
3.3.4. L'impact du vent et de la température	19
3.4. Choix d'un emplacement sur les bâtiments INSA	19
3.4.1. Observation des toitures	19
3.4.2. Aspects techniques	20
3.4.3. Une installation a posteriori	20
3.4.4. Le principal problème : l'étanchéité	20
3.4.4.1. Pour la fixation des panneaux.....	21
3.4.4.2. Pour les raccordements électriques.....	21
• La proximité de l'armoire électrique « mère »	21

• La technique utilisée.....	22
3.5. Simulations	22
3.5.1. Logiciel Sunny Design.....	22
3.5.2. Logiciel SUNSIM.....	24
3.6. Panneaux PV, Bilan Carbone et cycle de vie	25
3.6.1. Réduction carbothermique de la silice dans un four à arc	26
3.6.2. Raffinage du silicium par procédé Siemens.....	26
3.6.3. Cristallisation du silicium en lingots	26
3.6.4. L'assemblage des modules.....	27
3.6.5. Synthèse	27
3.6.6. Recyclage	27
3.6.7. PV Cycle	28
3.6.8. Impact environnemental	28
3.7. Raccordements et financements	28
3.7.1. Conditions de raccordement.....	28
3.7.1.1. Production inférieure à 100 kWh.....	28
3.7.1.2. Production supérieure à 100 kWh.....	29
3.7.1.3. Achat de la production	29
3.7.1.4. Subventions.....	30
3.7.1.5. Demande de raccordement	30
3.7.1.6. Délais	30
3.7.1.7. Le raccordement.....	30
3.7.1.8. La mise en service.....	30
3.7.2. Les contrats EDF	30
3.7.3. Les CPER (Contrats de Plans Etat-Région)	31
3.7.4. Assurances et maintenance des panneaux PV	31
3.7.4.1. Assurance dommages aux biens	31
3.7.4.2. Assurance responsabilité civile (obligatoire)	31
3.7.4.3. Assurance perte d'exploitation.....	31
4. Conclusions et perspectives.....	32
5. Bibliographie	33
5.1. Techniques PV (3.1, 3.2 et 3.3).....	33
5.2. Simulations (3.5)	33
5.3. Fabrication et impact environnemental (3.6).....	33
5.4. Bilan énergétique des panneaux PV (3.6.5)	33
5.5. Cycle de vie des panneaux PV (3.6.7)	34
5.6. Raccordement et installation de l'installation PV (3.7)	34



5.7. Subventions (3.7.3)	34
5.8. Tarifs de rachat par ErDF (3.7.1.3).....	34
6. Annexes.....	35
6.1. Sondage.....	35
6.2. Résultats de l'étude des toits de l'Insa de Rouen	36
6.3. Résultats des simulations.....	37
6.3.1. Sunny Design (relatif à la partie 3.5.1)	37
6.3.2. SUNSIM (relatif à la partie 3.5.2).....	39
6.4. A priori.....	40



NOTATIONS, ACRONYMES

CPER : Contrats/Plans Etat-Région

EDF : Electricité de France

ErDF : Electricité Réseau Distribution France

kWh : kilowatt heure

MSA : Mont Saint-Aignan

PV : photovoltaïque

TP : travaux pratiques

USD : United States Dollar

Wc : watt-crête



1. INTRODUCTION

Contexte du travail :

- Effectuer un travail en groupe (gestion du temps, répartitions des tâches, rapport écrit et oral)
- Etudier un sujet inconnu ou très peu connu
- Continuation d'un projet de l'année passée

Objectifs à atteindre pour le projet :

- Comprendre l'effet PV
- Savoir choisir correctement un emplacement pour l'installation PV à l'Insa de Rouen
- Simuler la production d'une telle installation à l'aide de plusieurs logiciels
- Connaître les différents paramètres nécessaires à l'optimisation d'une installation de panneaux PV
- Découvrir les enjeux majeurs de l'énergie PV (réelle efficacité, aides financières accordées pour ce type d'installation)

2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

2.1. Découverte du sujet et répartition de la tâche

Durant les 1ères séances, nous avons pris individuellement connaissance du sujet : recherches techniques, lecture du dossier du projet PV de l'année passée, définition des différents axes de notre travail.

Cette découverte du sujet à été l'occasion pour nous de rédiger, individuellement, un a priori sur l'énergie PV. Nous avons pensé intéressant de mettre cela en place : à la fin du projet, relire notre a priori va nous permettre de nous rendre compte des connaissances acquises grâce au projet et pourquoi pas remettre en cause nos idées reçues initiales. Vous trouverez nos a priori dans l'annexe n° de ce dossier.

Au fur et à mesure, nous avons donc mis en évidence différents aspects à étudier des panneaux PV. A partir de cette liste, nous avons distingué deux groupes : le travail à effectué maintenant et celui qui doit attendre que nous ayons avancé sur nos premières recherches. Puis nous avons fait une répartition des tâches : par binôme dans un premier temps et seul plus tard.

2.2. Suivi régulier et échange de documents

Notre enseignant-responsable du projet nous a demandé, dès le commencement de notre projet, de rédiger à chaque fin de séance un compte-rendu. Inconsciemment, ils nous ont permis de recentrer notre travail quand cela était nécessaire, de fixer des échéances temporelles et de suivre l'avancement global du projet, par rapport à tous les objectifs que nous nous étions fixés.



De plus, les bilans rapides et les conseils réguliers que nous donnait notre enseignant-responsable à chaque début de séance nous ont permis de nous conforter dans notre travail.

2.3. Rédaction du dossier

Tout au long du projet, nous nous sommes efforcés de rédiger correctement les recherches que nous effectuions. De cette manière, l'assemblage du dossier a été une chose plutôt facile. Un mois et demi avant l'échéance de notre projet, nous avons commencé la rédaction du dossier.

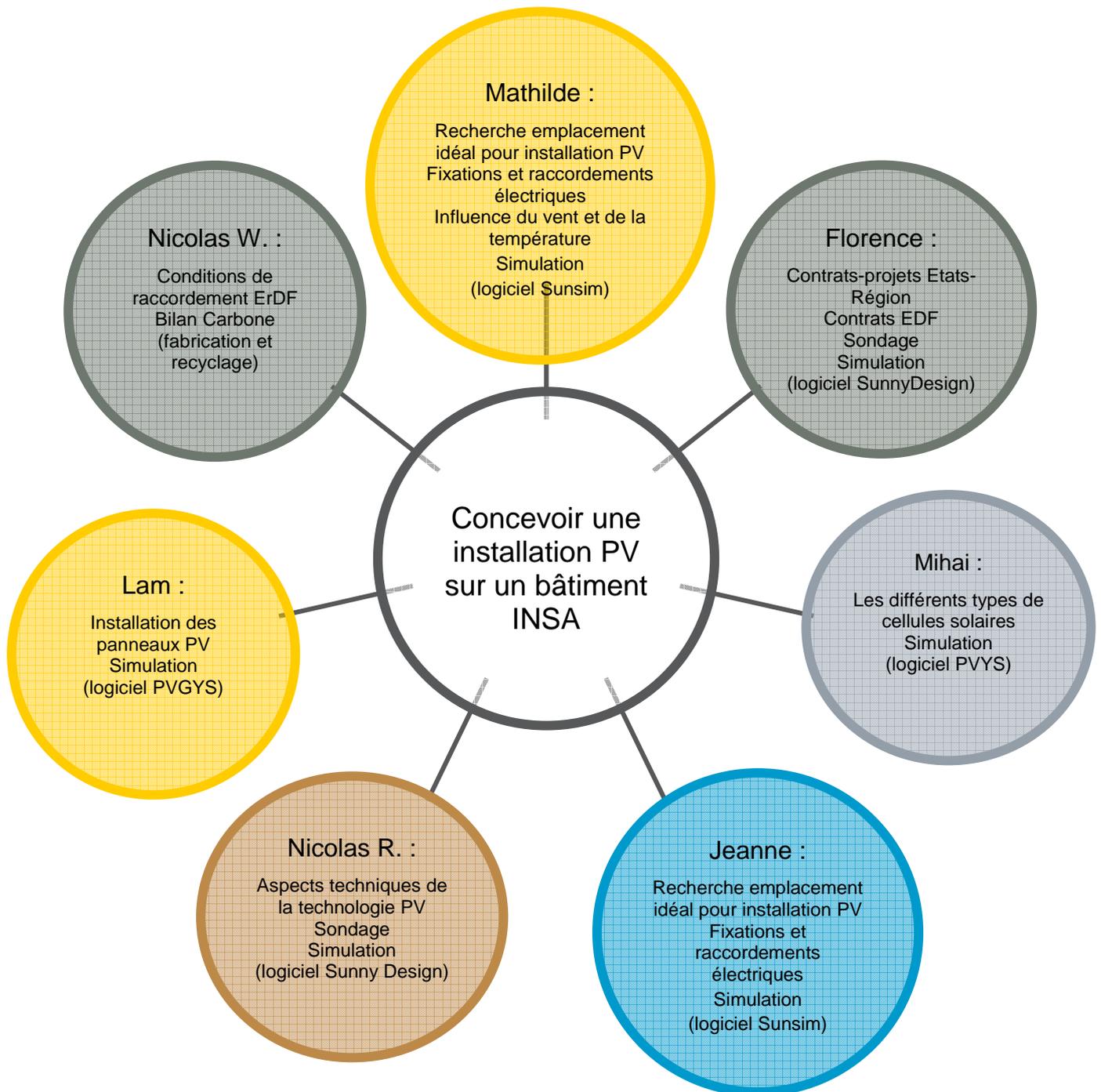


Figure 1 : Organigramme des tâches réalisées par chaque étudiant.

3. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

3.1. Aspects techniques

La technologie des panneaux photovoltaïques repose essentiellement sur la physique des semi-conducteurs, et leur efficacité dépend directement du type de cellules utilisé ainsi que de la pose des panneaux.

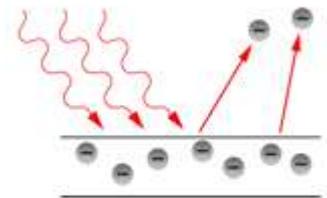
Dans la partie technique de ce dossier, nous détaillerons tout d'abord le fonctionnement de l'effet photovoltaïque; nous nous intéresserons ensuite aux différents types de cellules existants, voire en cours de développement; enfin nous nous pencherons sur les différents critères d'installation des panneaux photovoltaïques.

3.1.1. Fonctionnement de l'effet photovoltaïque

3.1.1.1. Principe de base

L'effet photovoltaïque est le procédé permettant la transformation de l'énergie solaire en électricité. Ce phénomène a été découvert en 1839 par Henri Becquerel et repose essentiellement sur la technologie des semi-conducteurs.

Les photons, qui sont les particules composant les ondes électromagnétiques (dont fait partie la lumière émise par le soleil), vont fournir de l'énergie au semi-conducteur composant la cellule photovoltaïque et créer ainsi un courant électrique exploitable.



3.1.1.2. Les semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont des matériaux intermédiaires entre des métaux et des isolants. En réalité, ils ont les mêmes caractéristiques électriques qu'un isolant, tout en ayant la possibilité de conduire le courant sous certaines conditions.

Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé commercialement, du fait de ses bonnes propriétés, et de son abondance naturelle. En effet, il s'agit du deuxième composé le plus abondant de la croûte terrestre (25,7% de sa masse), après l'oxygène.



Bandes d'énergie

Afin de modéliser le comportement électrique des semi-conducteurs, on utilise en général la théorie des bandes d'énergie. Comme tout autre matériau conducteur, un semi-conducteur possède de nombreuses bandes d'énergie, qui sont en fait différents niveaux d'énergie espacés les uns des autres par des bandes interdites formant des barrières de potentiel (ou « gap »).



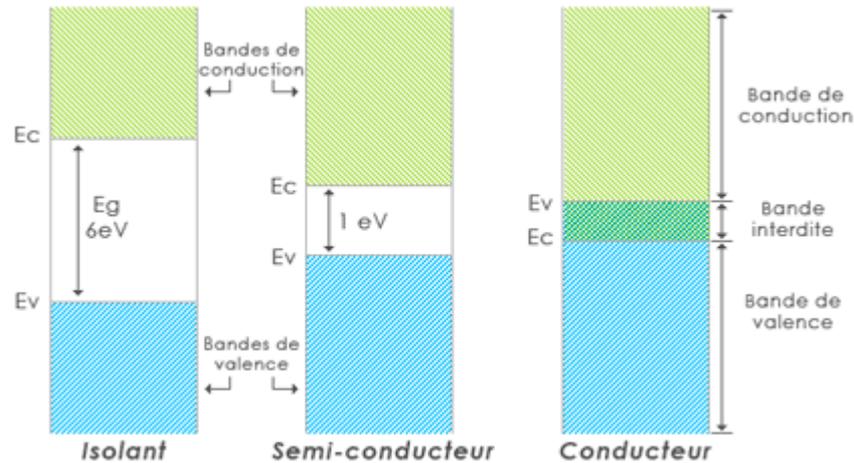


Figure 2 : Schéma des différentes bandes d'énergie pour des matériaux de conduction différente.

Le remplissage des bandes d'énergie avec les électrons disponibles se fait par énergie croissante. La dernière bande d'énergie remplie, donc celle d'énergie la plus haute, est appelée, bande de valence. La première bande inoccupée, par énergie croissante, est appelée la bande de conduction. Elle est située juste au dessus de la bande de valence. Les électrons dont le niveau d'énergie correspond à la bande de conduction peuvent conduire le courant électrique.

Gap

La différence d'énergie entre le haut de la bande de valence et le bas de la bande de conduction s'appelle le gap. L'énergie nécessaire pour franchir le gap est fournie, dans le cas des cellules PV, par les photons.

Pour les semi-conducteurs, ce gap (de l'ordre de 1,17eV pour le silicium) est suffisamment petit afin que les électrons de la bande de valence puissent le franchir afin de rejoindre la bande de conduction.

Trous

Les électrons rejoignant la bande de conduction laissent des « trous » dans la bande de valence. Ces trous sont donc des états inoccupés dans la bande de valence, et sont un concept essentiel afin d'appréhender le comportement électrique des semi-conducteurs.

Dopage

.Principe

Si un potentiel électrique est appliqué aux bornes d'un semi-conducteur, un faible courant électrique apparait, provoqué à la fois par le déplacement de tels électrons et celui des trous.

La conductivité électrique des semi-conducteurs peut être contrôlée par dopage, en introduisant une petite quantité d'impuretés dans le matériau afin de produire un excès d'électrons ou un déficit. Des semi-conducteurs dopés différemment peuvent être mis en contact afin de créer des jonctions, permettant de contrôler la direction et la quantité de courant qui traverse l'ensemble.



.Dopage de type N

On remplace dans un cristal de silicium un atome de silicium (4 électrons de valence) par un autre atome possédant un électron de valence de plus (par exemple un atome de phosphore ou d'arsenic). Le niveau d'énergie de l'électron supplémentaire est en dessous de celui de la bande de conduction et passe très vite dans celle-ci par excitation thermique. Il participe donc à la conduction dans le cristal et se comporte comme un donneur d'électron.

.Dopage de type P

On dope le silicium avec du bore (1 électron de valence de moins). Une orbitale vide du bore se situe au-dessus de la bande de valence donc un électron de celle-ci va très vite occuper ce niveau d'énergie par excitation thermique. On crée un trou dans la bande de valence qui va participer au phénomène de conduction électrique. Le bore est ici un accepteur d'électron.

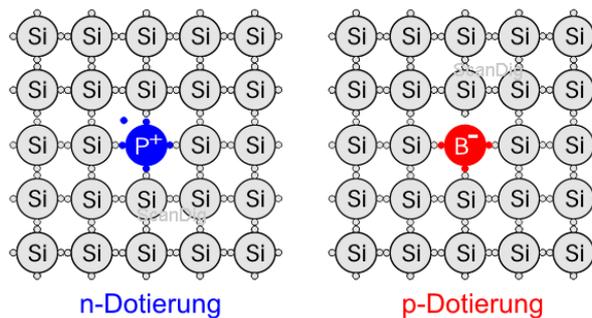


Figure 3 : Schéma des différents dopages

.Jonction PN

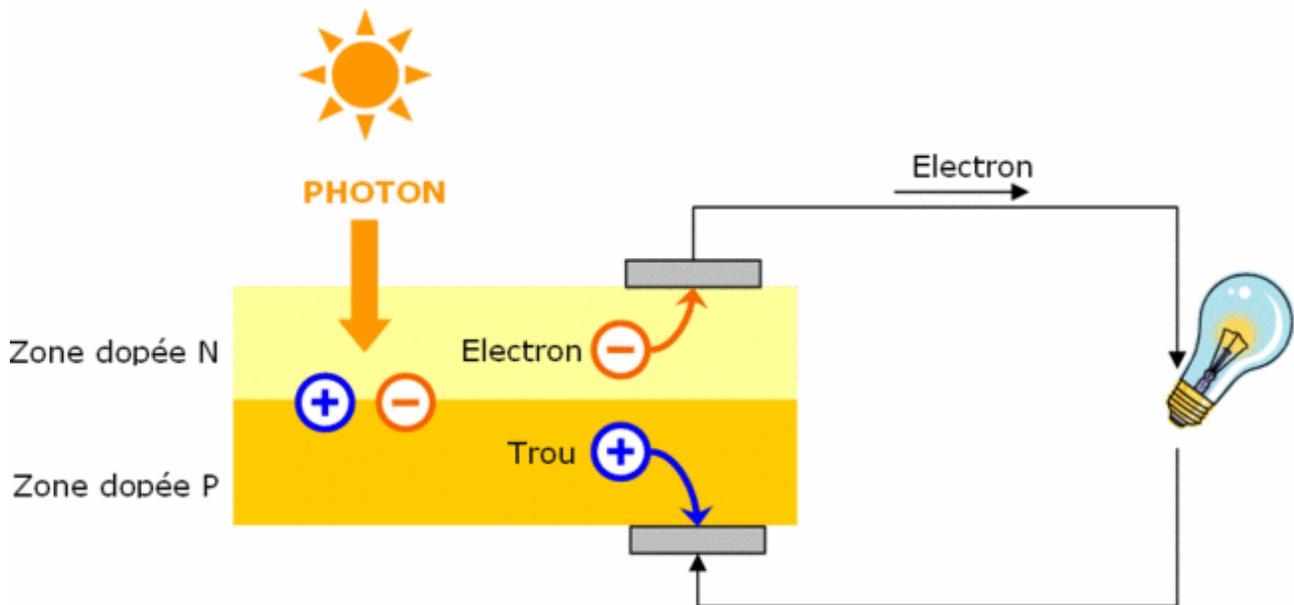


Figure 4 : Schéma de principe de la jonction PN.



Dans le cas des cellules photovoltaïques, c'est la jonction PN qui est utilisée. Il s'agit de mettre en contact une zone de semi-conducteur de type P avec une zone de semi-conducteur de type N. Les trous formés dans la zone P (borne positive) et le surplus d'électrons de la zone N (borne négative) font de la jonction PN un dipôle capable de générer un courant électrique.

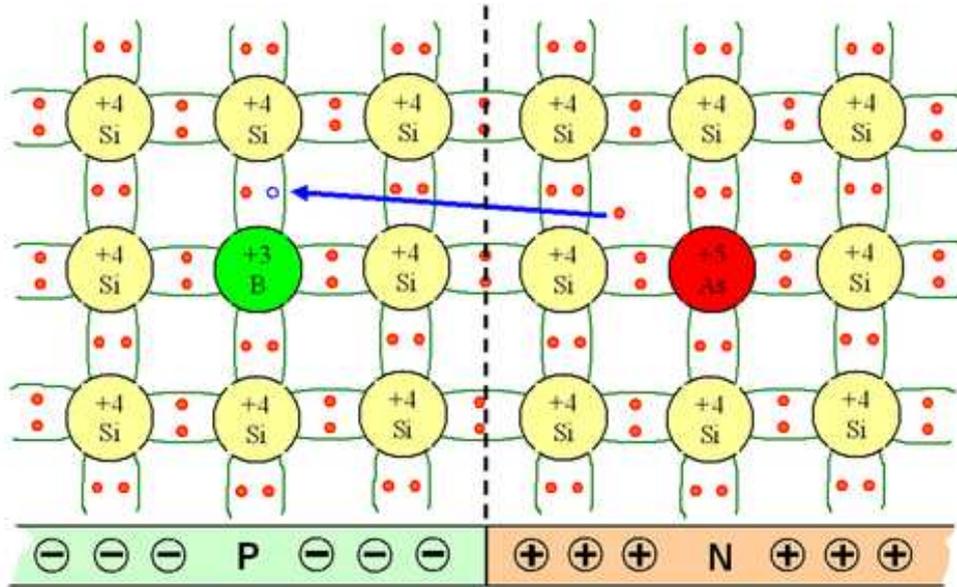


Figure 5 : Schéma représentant la génération du courant électrique grâce à la jonction PN.

3.1.2. Techniques de fabrication

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 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées « wafers ». Après un traitement pour enrichir en éléments dopants (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.

La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'un module photovoltaïque doit fonctionner environ deux à trois ans suivant sa technique de fabrication pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication (retour énergétique du module).

Les matériaux et procédés de fabrication font l'objet de programmes de recherches ambitieux pour réduire les coûts de possession et de recyclage des cellules photovoltaïques. Les techniques couches minces sur substrats banalisés semblent recueillir les suffrages de



l'industrie naissante. En 2006 et 2007, la croissance de la production mondiale de panneaux solaires a été freinée par manque de silicium, et les prix des cellules n'ont pas baissé autant qu'espéré. L'industrie cherche à faire baisser la quantité de silicium utilisé. Les cellules monocristallines sont passées de 300 microns d'épaisseur à 200 et on pense maintenant atteindre rapidement les 180 puis 150 microns, diminuant la quantité de silicium et d'énergie nécessaire, mais aussi les prix.

3.2. Types de cellules photovoltaïques

3.2.1. 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 ».

.Avantages :

- fonctionne avec un éclairage faible ou diffus (même par temps couvert, y compris sous éclairage artificiel de 20 à 3000 lux)
- un peu moins chère que les autres techniques
- intégration sur supports souples ou rigides

.Inconvénients :

- rendement faible en plein soleil, de 5% à 7%
- nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin (ratio Wc/m² plus faible, environ 60 Wc/m²)
- performances qui diminuent avec le temps dans les premiers temps d'exposition à la lumière naturelle (3-6 mois), pour se stabiliser ensuite (-10 à 20% selon la structure de la jonction)



3.2.2. Cellule en silicium monocristallin

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.

.Avantages :

- bon rendement, de 14% à 16%
- bon ratio Wc/m² (~150 Wc/m²) ce qui permet un gain de place si nécessaire
- grand nombre de fabricants

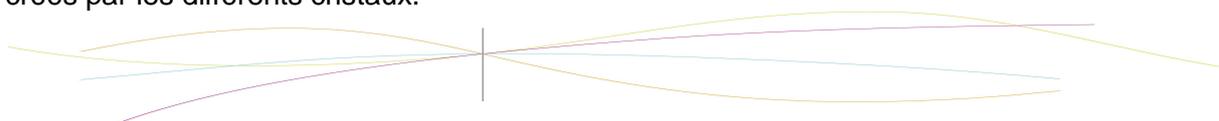
.Inconvénients :

- coût élevé



3.2.3. Cellule en silicium multicristallin

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté non-uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.



.Avantages :

- cellule carrée (à coins arrondis dans le cas du Si monocristallin) permettant un meilleur foisonnement dans un module
- bon rendement de conversion, environ 100 Wc/m², mais cependant un peu moins bon que pour le monocristallin
- lingot moins cher à produire que le monocristallin

.Inconvénients :

- rendement faible sous un faible éclairement.



3.2.4. Cellule Tandem

Empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deux cellules (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin par exemple) 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.

.Avantages :

- sensibilité élevée sur une large plage de longueur d'onde
- excellent rendement

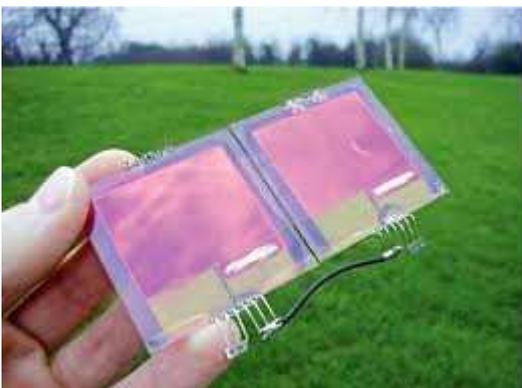
.Inconvénient :

- coût élevé dû à la superposition de deux cellules



3.2.5. Cellule photovoltaïque organique

3.2.5.1. Cellule photovoltaïque organique



Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques.

Elles constituent une tentative de réduction du coût de l'électricité photovoltaïque, sans conteste la principale barrière de cette technologie, mais on espère aussi qu'elles seront plus fines, flexibles, facile et moins chères à produire, tout étant résistante.

Les cellules photovoltaïques organiques bénéficient en effet du faible coût des semi-conducteurs organiques ainsi que de nombreuses simplifications potentielles dans le processus de fabrication.

3.2.5.2. Cellule photovoltaïque en polymères

Les cellules polymères photovoltaïques désignent une technique de cellules solaires organiques produisant de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de polymères semi-conducteurs. Il s'agit d'une technique relativement récente étudiée en laboratoire par des groupes industriels et des universités à travers le monde.

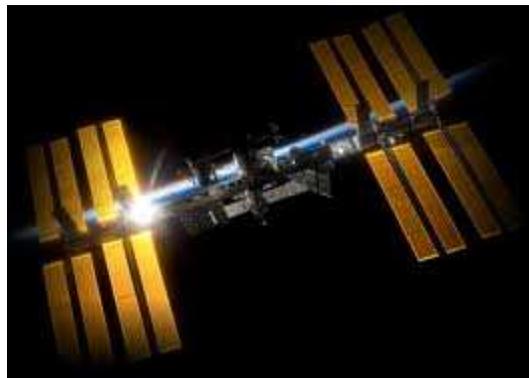


Encore largement au stade expérimental, les cellules polymères photovoltaïques offrent néanmoins d'intéressantes perspectives. Elles reposent sur des macromolécules organiques dérivées de la pétrochimie, dont les procédés de fabrication sont bien moins consommateurs d'énergie que ceux mis en œuvre pour les cellules à base de semi-conducteurs minéraux. Leur coût de revient est bien plus faible et elles sont plus légères et moins fragiles. Leur nature flexible les rend même aptes à s'intégrer à des matériaux souples en polymères organiques ou en silicones, voire à des fibres textiles. Leur développement peut tirer parti des progrès du génie chimique, par exemple dans l'auto-assemblage de ces molécules. Leur principale faiblesse réside dans leur durée de vie encore limitée induite par la dégradation des polymères lorsqu'ils sont exposés au soleil.

3.2.6. *Cellule multi-jonction*

Des cellules ayant une grande efficacité ont été développées pour des applications spatiales. Les cellules multi-jonctions sont constituées de plusieurs couches minces qui utilisent l'épitaxie par jet moléculaire.

Une cellule triple jonction, par exemple, est constituée des semi-conducteurs GaAs, Ge et GaInP₂. Chaque type de semi-conducteur est caractérisé par une longueur d'onde maximale au-delà de laquelle il est incapable de convertir le photon en énergie électrique. D'un autre côté, en deçà de cette longueur d'onde, le surplus d'énergie véhiculé par le photon est perdu. D'où l'intérêt de choisir des matériaux avec des longueurs aussi proches les unes des autres que possible (en multipliant leur nombre d'autant) de manière à ce qu'une majorité du spectre solaire soit absorbé, ce qui génère un maximum d'électricité à partir du flux solaire. Le coût de ces cellules est de l'ordre de USD 40 \$/cm².



3.2.7. *Cellule semi conducteur CGIS*

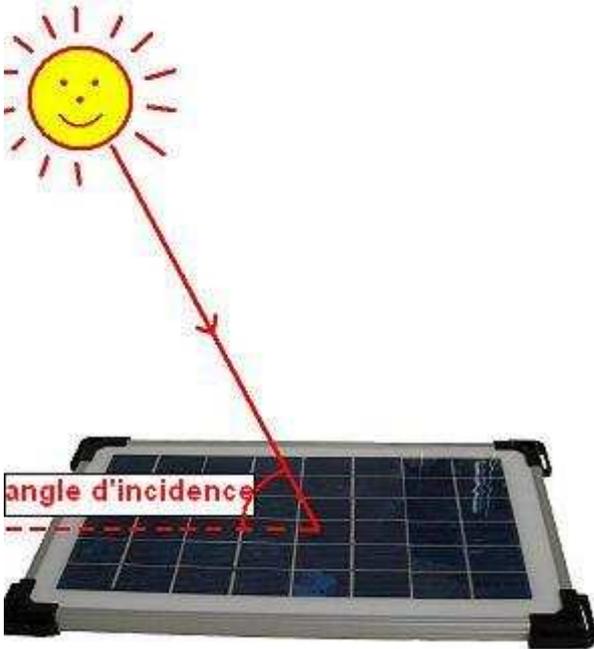
La technique consiste à déposer un matériau semi-conducteur à base de cuivre, de gallium, d'indium et sélénium sur un support.

Une inquiétude cependant : les ressources en matières premières. Ces nouvelles techniques utilisent des métaux rares comme l'indium dont la production mondiale est de 25 tonnes par an et le prix d'avril 2007 de 1000 dollars le kg ; le tellure dont la production mondiale est de 250 tonnes par an ; le gallium d'une production de 55 tonnes par an ; le germanium d'une production de 90 tonnes l'an. Bien que les quantités de ces matières premières nécessaires à la fabrication des cellules solaires soient infinitésimales, un développement massif mondial des panneaux solaires photovoltaïques en couches minces sans silicium ne manquerait pas de se heurter à cette disponibilité physique limitée.



3.3. Les facteurs influant pour l'installation du panneau photovoltaïque

3.3.1. L'influence de l'angle d'incidence



L'angle d'incidence est l'angle formé par le rayon du soleil et le panneau photovoltaïque. L'angle joue un rôle important pour le rendement du panneau. Il est défini par l'équation :

$$R \text{ (en \%)} = \sin\beta * 100$$

Où β est l'angle d'incidence en degrés et R est le rendement du panneau.

Alors, le rendement est maximal lorsque le rayon arrive perpendiculairement au panneau (c'est-à-dire $\sin\beta=1$ et $R=100\%$).

Par exemple, pour un angle de 45° , le rendement est de 70%

L'angle d'incidence est directement lié à l'orientation et l'angle d'inclinaison du panneau.

Figure 6 : Schéma représentant l'angle d'incidence des rayons du soleil sur le panneau PV.

3.3.2. L'influence de l'orientation

Le Soleil se lève à l'Est et se couche à l'Ouest ; 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'à midi, 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

3.3.3. L'influence de l'angle d'inclinaison

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



Figure 7 : Schéma représentant l'angle d'inclinaison des panneaux PV par rapport au sol.

Il est bien un facteur important pour le rendement du panneau. Il faut savoir que l'électricité que le panneau produit varie en fonction des heures et de saisons. En regardant le tableau ci-dessous, on constate que l'électricité sera maximale si l'angle d'inclinaison est de 30° et orienté vers le Sud.



	0°	30°	60°	90°
SUD	87%	100%	93%	67%
SUD-EST SUD-OUEST	87%	95%	86%	62%
EST OUEST	87%	82%	69%	48%

Figure 8 : Tableau récapitulant les rendements d'une installation photovoltaïque en fonction de l'orientation et de l'angle d'inclinaison des panneaux.

3.3.4. L'impact du vent et de la température

Il faut également prendre en compte l'impact du vent sur les panneaux PV. En effet, si le vent ne doit pas être trop important pour ne pas endommager la structure des panneaux, il est indispensable puisqu'il refroidit les cellules. Chaque degré au-delà de 25°C représente une perte de 1% en termes de production pour un panneau photovoltaïque. Le vent est donc un critère important à prendre en considération. Il est d'ailleurs mentionné dans de nombreux logiciels de simulation.

3.4. Choix d'un emplacement sur les bâtiments INSA

3.4.1. Observation des toitures

Pour notre projet, nous avons étudié les différents emplacements possibles que nous offrait une structure comme l'INSA de Rouen.

Pour sélectionner les éventuels bâtiments sur lesquels une installation PV serait envisageable, nous nous sommes basés sur les critères suivants :

- Etat des structures.
- Etude de l'état et d'une possibilité d'installation des cellules PV sur façade.
- Etat des toitures.
- Présence ou non d'obstacles à l'ensoleillement.
- Possibilité d'un raccordement sur le réseau électrique.

L'état des structures est en effet un critère déterminant dans le choix de l'emplacement. En effet, des panneaux PV ont une durée de vie de 30 ans. C'est pourquoi avant toute installation sur un bâtiment, il faut s'assurer que celui-ci n'aura pas besoin de travaux/restauration importants à réaliser dans les 30 années à venir, pour garantir une bonne rentabilité des cellules PV. Pour illustration, les plus anciens bâtiments de l'INSA (Magellan) sont actuellement en cours d'expertise, il n'est donc pas raisonnable de prévoir l'installation de panneaux PV sur cette structure.

Les panneaux PV peuvent être installés soit sur la façade soit sur les toitures. Pour être installé sur la façade, outre les questions techniques et physiques, il faut s'assurer de ne pas dénaturer l'architecture du bâtiment. En effet, la façade des bâtiments INSA sont sous garantie et ne peuvent être modifiés. Nous nous sommes donc logiquement tournés vers une installation sur toitures. Il existe sur les bâtiments INSA deux types de toitures principales :

- Toiture en zinc.
- Toits terrasse.

La toiture en zinc couvre le bâtiment Magellan. La couverture en zinc est un obstacle à l'insertion de cellules PV. En effet, la toiture en zinc devra être conservée après installation. De plus, le perçage de la toiture zinc semble être un problème (difficulté de perçage, étanchéité après installation etc.).



Les toits terrasses couvrent l'ensemble des nouveaux bâtiments (Darwin, Bougainville et Dumont d'Urville). L'entretien des toits terrasses ne semblent pas être un obstacle à priori. Cependant, certaines toitures sont saturées : présence de moteurs (laboratoire chimie), ventilation etc. Il faut aussi étudier la question des tuyauteries et surtout veiller à la présence d'une armoire mère proche permettant un raccordement au réseau.

Enfin, avant toute installation, il faut étudier l'environnement qui entoure les bâtiments et si des obstacles à l'ensoleillement, susceptibles de créer des zones d'ombres et donc de diminuer la rentabilité des panneaux, existent. En l'état actuel des choses, il n'y a semble-t-il pas d'obstacles majeurs. Cependant, en nous renseignant davantage (panneaux de permis de construire), nous avons appris qu'une crèche ainsi que des bureaux et des locaux pour activités commerciales, allaient être construits face au bâtiment Darwin et au bâtiment Dumont d'Urville (côté salles de cours).

Ci-dessous, nous avons réalisé un tableau récapitulatif de toutes nos observations recueillies, grâce à la visite des locaux vus de l'extérieur et des toits terrasse de l'INSA accompagné d'un technicien du service bâtiment de l'école. De plus, l'avis et les renseignements de monsieur Jean-Claude FLEURY, assistant ingénieur immobilier, que nous avons rencontré à plusieurs reprises, nous ont permis d'en apprendre davantage sur l'état des structures et sur les normes principales à respecter.

Toutes ces observations et ces études nous ont conduits à choisir le bâtiment Dumont d'Urville, plus précisément la partie où est située l'administration (au dessus de l'arche verte). En effet, ce bâtiment est idéalement situé (pas d'obstacle), sa toiture gravillonnée (peu d'entretien), la non-saturation du toit ainsi que la présence d'une armoire mère proche laissent à penser qu'il est le meilleur emplacement pour l'installation de panneaux PV.

3.4.2. Aspects techniques

Après avoir éliminé les bâtiments cités précédemment, nous nous sommes donc concentrés sur les bâtiments Dumont D'Urville. Nous avons pu ainsi nous focaliser sur les contraintes techniques qu'impose ce bâtiment.

Pour mieux comprendre comment s'organise le bâtiment Dumont D'Urville, nous avons contacté une des personnes chargées du service immobilier de l'INSA, M. Jean-Claude Fleury. Ainsi, nous avons eu quelques précisions concernant la surface des bâtiments, les emplacements des armoires électriques principales par exemple. De plus, nous avons pu nous rendre sur le toit du bâtiment Dumont D'Urville (bâtiments de l'administration), ce qui nous a été très précieux pour visualiser l'emplacement sur lequel nous avons travaillé.

3.4.3. Une installation a posteriori

De l'avis de professionnels de la construction et après des recherches sur internet, il est clair que l'installation de panneaux PV sur des bâtiments d'une telle importance doit être pensé au moment de l'établissement des plans. En effet, les panneaux doivent être raccordés à l'armoire électrique « mère » du bâtiment : celle-ci doit donc se trouver à une distance raisonnable. De plus, lors d'une installation a posteriori, il faut faire attention à l'étanchéité des toitures lors des raccordements entre les panneaux et l'armoire électrique. Comme cité précédemment, dans le cas de l'INSA, il s'agit de toitures terrasse.

3.4.4. Le principal problème : l'étanchéité

Pour comprendre le problème de l'étanchéité, il faut tout d'abord visualiser la structure d'une toiture terrasse.



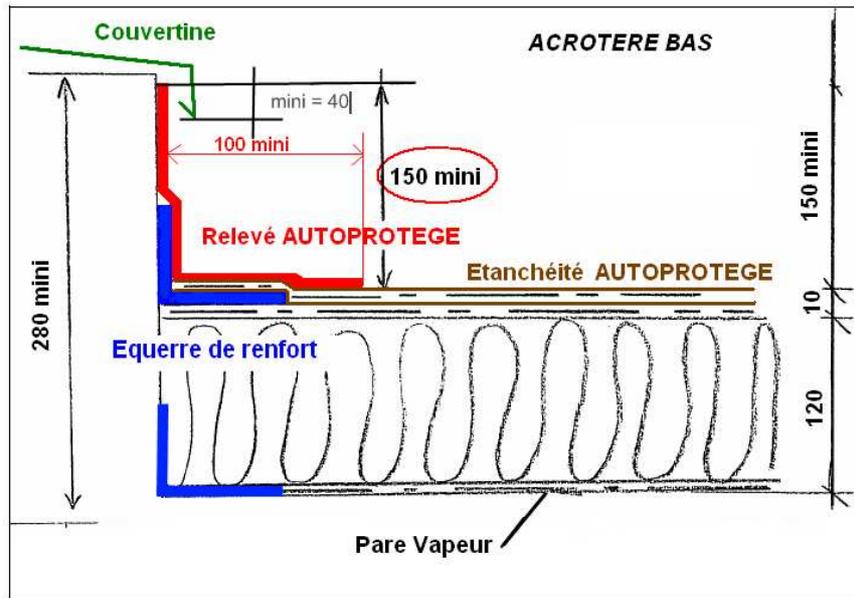


Figure 9 : Schéma présentant le système d'étanchéité d'une toiture terrasse.

On le voit aisément sur le schéma ci-avant : plusieurs couches sont nécessaires afin d'étancher la toiture et d'éviter les infiltrations d'eau de pluie. Or, pour installer des panneaux PV, il est nécessaire d'une part, de les fixer sur la toiture et d'autre part, de les raccorder à l'armoire électrique « mère ». Ces deux conditions nécessitent de percer la toiture et donc l'étanchéité risque de ne plus être assurée.

Nous avons demandé l'avis de professionnels de la construction. Ces derniers nous ont conseillé d'éviter à tout prix les perçages multiples de la toiture. Cependant, si les perçages restent ponctuels et que des installations spécifiques sont utilisées, les risques d'infiltrations sont limités. Il a donc fallu trouver des solutions à propos des perçages pour les supports de panneaux et pour les raccordements électriques.

3.4.4.1. Pour la fixation des panneaux

Il existe divers supports possible. On compte parmi les plus répandus les supports métalliques et les supports béton.

Les supports métalliques sont relativement légers : ils doivent être fixés sur la dalle béton. Or, si l'on estime que 4 points d'ancrage par panneau sont nécessaires, le nombre de perçage s'avère considérable.

Les supports béton sont, eux, très lourds. Selon ces mêmes professionnels, ce poids est suffisant pour que les supports soient stabilisés sur la toiture. On évite ainsi de multiples perçages.

Conclusion concernant les fixations : les fixations béton nous semblent les plus adaptées.

3.4.4.2. Pour les raccordements électriques

- **La proximité de l'armoire électrique « mère ».**

Lors de notre première rencontre, M. Fleury a immédiatement attiré notre attention sur le fait que les panneaux devaient se trouver à une distance raisonnable de l'armoire électrique principale du bâtiment (TGBT : Tableau Général Basse Tension).



Dans le bâtiment Dumont D'Urville, cette armoire se trouve au rez-de-chaussée du bâtiment de l'administration, à l'extrémité, du côté infirmerie. C'est pourquoi nous avons décidé de limiter notre étude à ce bâtiment, et nous avons laissé de côté le bâtiment réservé aux cours et TP.

- **La technique utilisée.**

M. Fleury nous a précisé que le perçage de la dalle était indispensable pour les raccordements des panneaux au réseau électrique. Nous avons donc cherché des solutions permettant de préserver l'étanchéité de la toiture.

La solution la plus simple et la plus efficace s'avère être l'utilisation de crosses électriques.

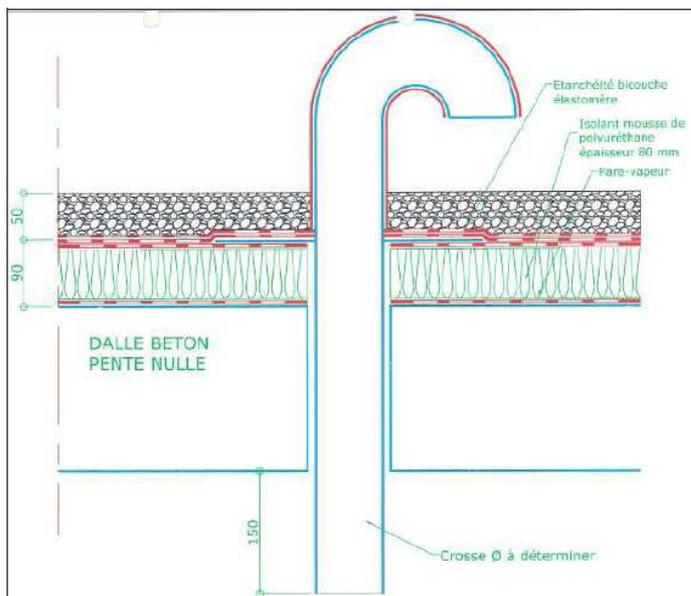


Figure 10 : Schéma et photographie d'une crosse d'étanchéité.

3.5. Simulations

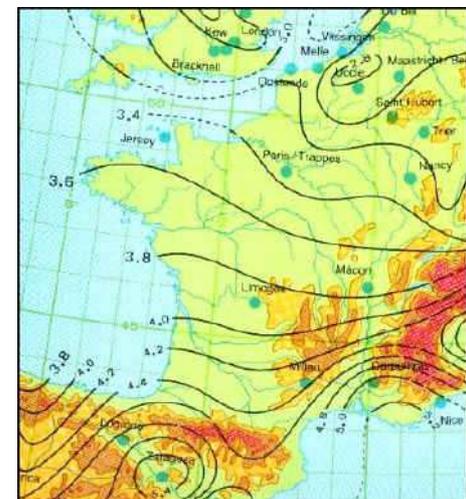
Une fois un emplacement défini, nous avons pu nous concentrer sur des caractéristiques telles que l'orientation et l'inclinaison des panneaux. Pour se faire nous avons utilisé plusieurs logiciels de simulation.

3.5.1. Logiciel Sunny Design

Tout d'abord, le logiciel nous demande d'entrer les paramètres suivants décrivant l'installation photovoltaïque :

Par rapport au site :

- Région : Western Europe
- Pays : France
- Commune : Paris. Le logiciel ne nous permet pas de choisir St Etienne du Rouvray, alors nous avons choisi Paris pour sa proximité géographique et son ensoleillement global annuel équivalent.



Par rapport aux angles du système :

- Angle d'inclinaison : Nous le fixons à 30°. En effet, une autre simulation faite avec le logiciel Sunsim montre que cette inclinaison offre des résultats optimaux. (Nous avons également pu constater que cette valeur correspond à la valeur optimisée par le logiciel Sunny Design).
- Angle azimutal : Nous le choisissons à 0° (plein sud) puisque l'orientation du bâtiment sur lequel seraient installés les cellules le permet.

Par rapport au module :

- Fabricant : Nous avons choisi de privilégier les producteurs français de cellules photovoltaïques, de manière à réduire au maximum le bilan carbone que peut engendrer le transport, par exemple. Nous avons donc retenu les fabricants Tenesol et Photowatt.
- Nombre de panneaux : De manière à pouvoir faire facilement des comparaisons entre nos simulations et l'installation de MSA, nous nous fixons de faire l'étude pour un nombre de panneaux impliquant une surface d'installation du même ordre de grandeur que celle de l'installation de MSA, soit entre 220 et 240 m².

Par rapport à l'onduleur :

- Le logiciel nous fournit pour chaque onduleur sa compatibilité avec le système photovoltaïque. L'onduleur choisi nous semble performant et possède une excellente compatibilité avec le système choisi.

Pour le fabricant Tenesol :

- Type de panneaux : nous allons effectuer une étude sur deux modèles, TE1300(140W) et TE2200(240W).
- Nombre de panneaux :

Pour le TE1300 : 230 panneaux PV, soit une surface totale du générateur de 230 m².

Pour le TE2200 : 153 panneaux PV, soit une surface totale du générateur de 230 m².

- Onduleur : nous avons choisi le Sunny Boy SB 1200 pour les deux types de panneaux.

Pour les panneaux TE1300 : Avec cet onduleur, même si on a sélectionné 230 panneaux, seulement 220 sont retenus du fait de l'onduleur. On a bien une surface globale de 230 m² en utilisant 20 onduleurs.

Le rendement énergétique annuel annoncé est de 26411kWh.

Pour les panneaux TE2200 : Avec cet onduleur, même si on a sélectionné 153 panneaux, seulement 138 sont retenus du fait de l'onduleur. On a bien une surface globale de 230 m² en utilisant 23 onduleurs.

Le rendement énergétique annuel annoncé est de 28810kWh.

Panneaux	Nombre panneaux	Onduleurs	Nombre onduleurs	Surface totale	Puissance crête	Rendement énergétique annuel	Angle inclinaison / azimutal
TE1300	220	SB 1200	20	230 m ²	30,8 kW	26 411 kWh	30° / 0°
TE2200	138	SB 1200	23	230m ²	33,12 kW	28 810 kWh	30° / 0°

Figure 11 : Tableau récapitulatif de la simulation sur les panneaux du fabricant Tenesol.



Pour le fabricant Photowatt :

- Type de panneaux : nous allons effectuer une étude sur deux modèles, PW 6-110 et PW 6-123.
- Nombre de panneaux :
 Pour le PW 6-110 : 240 panneaux PV, soit une surface totale du générateur de 228,6 m².
 Pour le PW 6-123 : 238 panneaux PV, soit une surface totale du générateur de 226,8 m².
- Onduleur : nous avons choisi le Sunny Boy SB 3800 pour les deux types de panneaux.

Le rendement énergétique annuel annoncé est de 23308,4 kWh pour le modèle PW 6-110, et 25951 kWh pour le modèle PW 6-123.

Panneaux	Nombre panneaux	Onduleurs	Nombre onduleurs	Surface totale	Puissance crête	Rendement énergétique annuel	Angle inclinaison / azimutal
PW 6-110	240	SB 3800	6	228,6 m ²	26,4 kW	23 308,4 kWh	30° / 0°
PW 6-123	238	SB 3800	7	226,8 m ²	29,274 kW	25 951 kWh	30° / 0°

Figure 12 : Tableau récapitulatif de la simulation sur les panneaux du fabricant Photowatt.

Grâce au travail effectué par le groupe du projet concernant l'installation PV de MSA, nous pouvons comparer les résultats trouvés pour une installation PV à l'Insa, d'une même superficie qu'à MSA.

Installation	Production moyenne annuelle simulée
SMA	21 300 kWh
Insa de Rouen	25 500 kWh

Figure 13 : Tableau récapitulatif des deux simulations sur SunnyDesign.

Nous pouvons constater que pour une surface identique, il existe une différence de production annuelle de 4 000 kWh en faveur de l'installation de l'Insa de Rouen. Cette large différence peut-être expliquée par le fait que les panneaux PV de MSA sont installés avec un angle d'inclinaison de 90° contrairement à 30° pour l'Insa de Rouen. En effet, les panneaux PV de MSA sont fixés sur une façade du bâtiment verticale : il a fallu adapter l'installation aux bâtiments déjà existants.

Nous avons donc une preuve concrète sur l'importance de l'inclinaison des panneaux PV : la production sera meilleure avec une orientation d'environ 30°.

3.5.2. Logiciel SUNSIM

Nous avons simulé l'installation de panneaux sur une surface de 243m², pour la région de Rouen, pour des modules photovoltaïques en Silicium cristallin fortement ventilé (lame d'air > 15cm) et pour une installation non: -intégrée au bâti en métropole continentale (tarif d'achat 2009 32,8 c€/kWh).

Nous avons dans un premier temps fixé l'orientation des panneaux à 20° afin de déterminer l'orientation qui rapporterait un meilleur rendement. Les résultats sont réunis dans le tableau ci-dessous.



Orientation	Production (kWh / an)	Nombre de foyers moyens français pouvant être alimentés
Est (-90°)	26749	10,7
Sud-est (-45°)	29507	11,8
Plein sud (0°)	30334	12,1
Sud-ouest (45°)	29507	11,8
Ouest (90°)	26749	10,7

Figure 14 : Tableau récapitulatif de la production d’une installation PV en fonction de son orientation.

Nous constatons donc que le rendement des cellules PV semble être le meilleur pour une **orientation plein sud**.

Inclinaison	Production (kWh / an)	Nombre de foyers moyens français pouvant être alimentés
0°	27576	11
10°	29231	11,7
30°	30885	12,4
50°	30058	12
70°	26473	10,6
90°	21234	8,5

Figure 15 : Tableau récapitulatif de la production d’une installation PV en fonction de son inclinaison.

Nous avons réalisé plusieurs simulations pour connaître la meilleure inclinaison possible, c’est-à-dire l’orientation qui serait la plus rentable. Le tableau ci-dessus montre les résultats obtenus grâce au logiciel de simulation SUNSIM. Cette fois, nous avons fixé l’orientation plein sud des panneaux.

Il apparaît que le rendement soit le meilleur pour une **inclinaison de 30°**.

3.6. **Panneaux PV, Bilan Carbone et cycle de vie**

Pour l’installation de notre appareil photovoltaïque à l’INSA il peut nous être demandé un bilan carbone détaillé pour autoriser son installation.

Pour mesurer le bilan carbone du photovoltaïque, il faut faire le rapport entre l’énergie grise nécessaire à la fabrication et recyclage du matériel, et l’énergie verte produite par ce même matériel. On étudie donc le cycle de vie du produit. En regardant l’étude menée en 2006 par l’Agence International de l’Énergie et la fédération de l’industrie photovoltaïque européenne (EPIA) il est dit qu’au bout de 2 à 4 ans un appareil photovoltaïque aura remplacé l’énergie nécessaire à sa fabrication par son énergie produite. Cependant l’énergie nécessaire à la fabrication du module comprend l’extraction, le transport et le raffinage des matières fossiles (essentiellement du silicium) qui après leur cycle de vie vont devenir des déchets qu’il va falloir détruire ou recycler.



Nous regarderons donc en deux temps, l'énergie nécessaire à la fabrication d'un appareil photovoltaïque et l'énergie nécessaire à son recyclage pour vérifier ces dires et voir si effectivement le bilan carbone d'un appareil photovoltaïque est intéressant.

Concernant l'impact environnemental sur la fabrication, nous nous appuyerons sur un document publié par HESPUL en juillet 2009 qui détaille la fabrication d'un module photovoltaïque au silicium cristallin. Les procédés utilisés sont la réduction carbothermique de la silice dans un four à arc, raffinage du silicium par procédé Siemens, cristallisation du silicium en lingots, découpage des plaques, fabrication des cellules photovoltaïque par dopage, polarisation et traitement antireflet l'assemblage des modules par encapsulation dans un feuilleté verre/EVA/Tedlar!, et enfin l'installation du système comprenant câblage et onduleurs.

3.6.1. Réduction carbothermique de la silice dans un four à arc

Réduction de la silice par le carbone à 1700°C



Procédé énergivore car pour 1kg de silicium (MG-Si pour être précis) produit, il faut 14 kWh électrique et le rejet de CO₂ correspond à 3,14 tonnes de CO₂ rejeté pour une tonne de silicium produit.

3.6.2. Raffinage du silicium par procédé Siemens

- Hydrochlorination catalysée par le cuivre à 300-350°C :
 $\text{MG-Si} + 3\text{HCl} \rightarrow \text{SiHCl}_3 + \text{H}_2$
- Distillation du SiHCl₃ à 250°C
- Décomposition thermique à 1100°C par fournée ou en continu :
 $\text{SiHCl}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{SoG-Si} + 3\text{HCl}$

On obtient un rendement de 25% pour une consommation énergétique de 150 Kwh EF/kg. Nous avons aussi un volume important de déchets chlorés à recycler.

3.6.3. Cristallisation du silicium en lingots

Il y a d'abord une élimination des impuretés du silicium par ségrégation puis au choix une cristallisation par tirage Czochralski (meilleur rendement mais dépense énergétique supérieure), une solidification directionnelle (rendement plus faible mais moins énergivore) ou un tirage de ruban (minimise la perte de matière).

Les coûts précis ne sont pas donnés car ils font parti des secrets de fabrication :

- découpage des plaques
- fabrication des cellules photovoltaïque par dopage
- polarisation et traitement antireflet

Ces étapes de fabrication dépendent des industries, donc le coût économique et énergétique change en fonction de la méthode choisie.

Exemple de méthode: décapage, texturation, dopage, bords de plaque, antireflet, champ face arrière, métallisation, test et tri.



3.6.4. L'assemblage des modules

Raccordement des cellules, encapsulation, encadrement et connexion des boîtes de jonction, flash test.

3.6.5. Synthèse

Plus de 40% de l'énergie de fabrication provient du raffinage du silicium. Au niveau énergétique, l'énergie nécessaire à la fabrication est compensée très rapidement par l'énergie produite lors de la durée de vie du module. (2 à 4 ans en moyenne).

En plus du bilan énergétique il est à souligner la production de déchets de matières toxiques (chlore, plomb, argent, aluminium, brome et gaz à effet de serre comme CF₄) qui sont cependant traités pour éviter toute pollution.

Beaucoup de m³ d'eau sont utilisés lors de la production.

Des efforts sont réalisés pour réduire la dépense énergétique de 10 à 20% notamment grâce à de nouvelles voies chimiques explorées, une diminution de l'épaisseur des plaques de silicium et une pose de modules sans cadres.

3.6.6. Recyclage

Les premiers appareils photovoltaïques ayant été installés il y a environ 15 ans, la question du recyclage devient de plus en plus présente. Il convient de trouver des solutions. Nous allons donc voir le procédé de recyclage existant et nous allons parler de PV Cycle.

3.6.6.1 Recyclage des panneaux à base de silicium.

Tous les matériaux constituant les modules à base de silicium cristallin sont récupérés. Un simple traitement thermique (désencapsulation) permet de séparer le silicium, du verre et des métaux (aluminium, cuivre et argent) qui seront réutilisés pour une deuxième vie en tant que nouveau panneau PV par exemple.

En ce qui concerne le plastique et la colle qui ne peuvent être réutilisés, ceux ci sont brûlés par traitement thermique empêchant d'éventuels gaz toxiques de s'échapper d'une combustion.

La réutilisation des matériaux diminue donc les besoins d'extraction des ressources, diminuant de ce fait le bilan carbone.

3.6.6.2 Procédé de recyclage.

- Collecte des panneaux
- Déchiquetage des modules en deux étapes. On casse le module en large morceaux puis on concasse le verre en pièce de 4-5mm pour s'assurer que les liaisons de stratifications sont rompues
- Élimination des films semi-conducteurs par ajout d'acide et de peroxyde d'hydrogène accompagné d'une rotation lente
- Séparation du verre du liquide grâce à une vis tournante qui transporte le verre
- Séparation du verre des matériaux stratifiés grâce à un tamis vibrant
- Rinçage du verre pour éliminer les restes de matière semi-conductrice (recyclage du verre indépendant)
- Séparation des métaux liquides en précipités grâce à une augmentation progressive du pH
- Récupération des matériaux semi-conducteurs non raffinés pour une réutilisation vers de nouveaux modules

Le recyclage des modules PV en couches minces diffère de celui des modules à base de silicium. Ce type de module contient des éléments toxiques, tels que le tellure de



cadmium, l'arséniure de cadmium, le cuivre l'indium ou le sélénium, qui sont difficiles à recycler. Leur recyclage demande plus d'énergie que le silicium.

En ce qui concerne les onduleurs, leur recyclage est pris en charge par le fabricant. Étant constitués principalement de composants électroniques, leur recyclage est similaire à n'importe quel dispositif électronique.

En moyenne 85% des matériaux d'un module PV sont recyclés.

3.6.7. PV Cycle

Pour coordonner le recyclage des modules PV, il existe une association internationale: PV Cycle. Elle réunit différentes entreprises producteurs de panneaux PV.

Association à but non lucratif, elle organise la collecte et le recyclage des panneaux en fin de vie. Par l'intermédiaire d'une entreprise belge Blackbox qui assure la confidentialité des chiffres de ventes des entreprises, elle organise des points de collecte dans l'Europe.

Grâce aux techniques de recyclage déjà développés par les entreprises tel que First Solar, Sunicon ou SolarWorld le système est fiable et effectif.

L'entreprise a été fondée en juillet 2007, opérationnelle dès avril 2008. Son siège se situe à Bruxelles. Grâce à une anticipation des entreprises le procédé de recyclage était déjà au point avant le lancement de récupération des premiers modules.

3.6.8. Impact environnemental

Dans notre cas, les panneaux PV sont intégrés au bâti, c'est-à-dire qu'ils font parti du bâtiment (ils seraient installés sur les toits). En France, c'est la solution qui est la plus souvent choisie : les systèmes sont intégrés à un bâtiment ou à une infrastructure urbaine, plutôt que de s'étendre au sol dans des « parcs photovoltaïques » (ces derniers représentent souvent d'énormes installations).

Il est important de noter que le seul impact des panneaux PV, une fois installés, est un impact visuel dont la perception par les hommes reste très subjective : cet impact peut donc être aussi bien perçu négativement que positivement. On assiste alors à une modification de couleur et de l'allure du « bâtiment-support ».

Il est cependant évident qu'une installation PV s'intègre plus facilement dans un environnement urbain et moderne, comparativement à un environnement riche en patrimoine historique et architectural.

Le gouvernement français incite le développement de l'intégration au bâti des installations PV par l'intermédiaire d'une prime de tarif d'achat.

3.7. Raccordements et financements

3.7.1. Conditions de raccordement

Les conditions pour un raccordement avec ErDF dépendent de la production d'électricité fournit par l'installation photovoltaïque. Quoi qu'il en soit avant de commencer le raccordement il est préférable de remplir une fiche de collecte de renseignement pour faciliter les travaux.

3.7.1.1. Production inférieure à 100 kWh

Pour un raccordement avec une production inférieure à 9 kWh, il faut faire la demande de raccordement à ErDF complété par un devis. Il faut prouver que l'on a trouvé un responsable d'équilibre c'est à dire une société qui rachète l'énergie produite. Il y a en effet



aucun raccordement possible s'il n'y a pas d'acheteur. Un certificat de conformité pour la mise en service et un permis de construire (à défaut un non-refus) délivré par la mairie sont aussi indispensables.

3.7.1.2. Production supérieure à 100 kWh

Les conditions sont les mêmes que pour une production inférieure à 100 kWh mais en plus il faut une autorisation de l'État pour la mise en place de ce nombre conséquent d'appareils. Un dossier sur le cycle de vie du produit est à fournir.

3.7.1.3. Achat de la production

Pour les prix d'achat, le tarif dépend du type d'installation

Type d'installation			Tarif d'achat initial prévu dans le nouveau dispositif
Résidentiel	Intégration au bâti	[0-9kW]	46 c€/kWh
		]9-36kW]	40,25 c€/kWh
		]36-100 kW]	28,83 c€/kWh
	Intégration simplifiée au bâti	[0-36 kW]	30,35 c€/kWh
		]36-100 kW]	28,83 c€/kWh
Enseignement ou santé	Intégration au bâti	[0-36kW]	40,6 c€/kWh
		]36-100kW]	28,83 c€/kWh
	Intégration simplifiée au bâti	[0-36kW]	30,35 c€/kWh
		]36-100kW]	28,83 c€/kWh
Autres bâtiments	Intégration au bâti	[0-9kW]	35,2 c€/kWh
		]9-36kW]	30,35 c€/kWh
		]36-100kW]	28,83 c€/kWh
	Intégration simplifiée au bâti	[0-36kW]	30,35 c€/kWh
		]36-100kW]	28,83 c€/kWh
Installation sans intégration ou > 100 kW, ou au sol	[0-12 MW]	12 c€/kWh	

Tarif d'achat du 10 mars au 30 juin 2011 effectué par ErDF.

Note de synthèse sur les arrêtés publiés au Journal Officiel le 5 mars 2011

http://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/110311_tarif_pv_2011_synthese_enerplan.pdf



3.7.1.4. Subventions

Toutes subventions et aides de l'État qui s'appliquaient pour l'installation d'appareils photovoltaïques n'existent plus. De même il n'y a aucune aide provenant de la région Haute-Normandie.

3.7.1.5. Demande de raccordement

Dans notre cas la production sera supérieure à 36 kWh, il faudra remplir la demande de raccordement spécifique.

http://www.erdfdistribution.fr/medias/DTR_Racc_Conso/ERDF-FOR-RAC_12E.pdf

Il est utile de prendre des photos de l'installation électrique surtout le coffret de branchement.

En réponse ErDF fera une proposition de raccordement détaillant les différentes étapes et le prix des travaux. Si la proposition est acceptée il y aura un contrat de raccordement.

Dans notre cas où la production sera supérieure à 36 kWh le contrat de raccordement sera divisé en 3 documents comprenant une convention de raccordement.

3.7.1.6. Délais

A partir du commencement des travaux il faudra attendre un minimum de 14 jours pour que le raccordement soit terminé.

3.7.1.7. Le raccordement

Pour le raccordement ErDF installera un compteur de vérification de non-consommation, un compteur de production avec un câble de liaison qui reliera le module au compteur de consommation déjà existant.

3.7.1.8. La mise en service

Une fois les travaux effectués, l'attestation de conformité de l'installation obtenue et l'accord du responsable d'équilibre donnée ErDF peut commencer la mise en service qui interviendra dans les 10 jours.

3.7.2. Les contrats EDF

Il faut savoir que chaque producteur d'électricité a le droit de demander à ce qu'EDF rachète sa production. C'est un droit qu'il possède depuis la loi du 10 février 2000. Ainsi, EDF négocie les tarifs et la durée de ce rachat, et signe ces contrats d'« obligation d'achat », avec différentes filières de sources d'énergies.

Concernant la filière de l'énergie photovoltaïque, actuellement, quelques modifications ont été mises en place concernant ces contrats d'« obligation d'achat ». En effet, depuis le décret du 9 décembre 2010, cette obligation est partielle, et ce jusqu'au 10 mars 2011. On peut lire dans ce décret que cette obligation est maintenue pour seules les installations de puissances inférieures ou égales à 3kWc.

L'une des conditions sine qua none pour qu'EDF rachète l'électricité d'une installation PV est que la production de celle-ci doit être raccordée au réseau public de transport (géré



par RTE), ou bien de distribution (géré par ERDF). Les modalités d'un tel contrat sont fixées par les pouvoirs publics. Le nouveau modèle de contrat de l'arrêté du 12 janvier 2010 est présenté ci-dessous :

- Durée de 20 ans
- Tarifs de base fixés par la date de demande de raccordement au réseau ERDF
- Indexation annuelle, à partir du 1^{er} novembre, des tarifs selon les bases d'informations de l'Insee
- Prise d'effet du contrat dès la mise en service de l'installation PV
- Périodicité de facturation suivante la puissance de l'installation

3.7.3. Les CPER (Contrats de Plans Etat-Région)

Un CPER est un contrat qui lie une région et l'Etat français concernant la programmation et le financement pluriannuels d'un projet en matière d'aménagement du territoire, par exemple la construction d'infrastructures. Ce programme est réparti sur plusieurs années, de 5 à 7 ans.

Les CPER existent depuis la loi du 29 juillet 1982 et on évolués 4 fois depuis : la nouvelle génération date de 2007, prévue jusqu'en 2013. Cette nouvelle génération de contrat met l'accent sur les 3 axes suivants :

1. Générer des emplois et agir dans le sens d'un développement économique (« investissements d'envergure nationale à haut effet d'entraînement »)
2. Atteindre les objectifs européens de Lisbonne et Göteborg, c'est à dire « la compétitivité et l'attraction des territoires », « la promotion du développement durable » et la « cohésion sociale et territoriale ».
3. Permettre un réel partenariat entre les départements et la région concernés.

3.7.4. Assurances et maintenance des panneaux PV

Les installations PV ne demandent aucune maintenance ni entretien particulier : en effet, les seules saletés qui puissent nuire au bon fonctionnement des panneaux (feuilles, poussières et autres) sont évacuées naturellement grâce à la pluie et au degré d'inclinaison des panneaux. Globalement, il existe trois types d'assurances concernant les appareils photovoltaïques, mais une seule est obligatoire.

3.7.4.1. Assurance dommages aux biens

Une installation photovoltaïque peut être assurée au même titre qu'un patrimoine : l'assureur peut donc l'inclure, à la demande de l'assuré, à son contrat « Multirisque Habitation ». Par exemple, en cas d'incendie, l'installation sera remplacée à neuf.

3.7.4.2. Assurance responsabilité civile (obligatoire)

Lors de l'établissement du contrat de raccordement d'une installation au réseau, le gestionnaire de réseau demande de fournir l'attestation correspondant à cette assurance. En effet, le fait qu'une telle installation soit reliée à un réseau public de distribution implique qu'un risque d'accident sur l'installation peut se propager. Le seul risque existant serait le suivant : l'électrification d'une personne suite au non fonctionnement de la protection de découplage de l'onduleur.

3.7.4.3. Assurance perte d'exploitation

Cette dernière peut être utile pour les installations importantes, car elle assure un remboursement des bénéfices non fait en cas de panne du système.



4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous pouvons affirmer que ce projet a été très intéressant pour nous tous. En effet, nous avons acquis des connaissances sur l'énergie PV. En les comparants à présent avec nos préjugés initiaux (cf a priori annexe n°4), nous avons la preuve de notre acquisition de connaissances.

De plus, nous avons acquis un savoir-faire, au niveau de la gestion de projet, de la recherche d'information, de l'étude de faisabilité, de la simulation : nous avons eu une réflexion scientifique concrète.

En effet, nous pensons avoir atteint les objectifs que nous nous étions fixés, ce qui est positif. Notre gestion de projet, aidée et régulièrement suivie par notre tuteur, s'est avérée plutôt bonne.

Nous avons songé à faire un sondage, mais nous n'avons pas eu suffisamment de temps pour traiter les réponses. De plus, avec un peu de recul, nous pensons à présent que ce sondage se serait avéré utile si le projet d'installation de modules PV à l'Insa de Rouen existait véritablement. Vous trouverez en annexe n°1 le texte du sondage que nous avons préparé.

En ce qui concerne nos propositions de projets pour les années à venir, nous avons eu les idées suivantes :

- Projet à poursuivre :
 - Comparaison de différentes sources d'énergies durables
- Projet pour l'année à venir :
 - Etude d'un système de production d'électricité nouveau : différence de salinité entre eau douce et eau de mer (expérimentation)
 - Etude écologique de l'Insa : détecter les points faibles (consommation de chauffage et d'électricité, optimiser le recyclage,...) et proposer des solutions concrètes



5. BIBLIOGRAPHIE

5.1. Techniques PV (3.1, 3.2 et 3.3)

- <http://www.cellulephotovoltaique.com/photos.html> (valide à la date du 09/05/2011).
- http://www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaiques (valide à la date du 09/05/2011).
- <http://energies2demain.com/solaire/photovoltaique/les-differents-types-de-cellules-photovoltaiques> (valide à la date du 09/05/2011).
- http://www.questmachine.org/article/Cellule_photovolta%C3%AFque:_principaux_types (valide à la date du 09/05/2011).
- <http://bellouquet.free.fr/6/energies/pilesetsolaire/doc5.pdf> (valide à la date du 09/05/2011).
- <http://tpep.free.fr/effetphotovoltaique/effetphotovoltaique.html> (valide à la date du 09/05/2011).
- <http://www.panneauxsolaires1sa.sitew.com/Conversion.E.htm#Conversion.E> (valide à la date du 09/05/2011).
- <http://www.bpsolar.fr/solaire/photovoltaique/Effet%20Photovoltaique.pdf> (valide à la date du 09/05/2011).
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_bandes (valide à la date du 09/05/2011).
- Christian Ngô et Hélène Ngô, « Les semi-conducteurs, de l'électron aux dispositifs », édition DUNOD, 2003.

5.2. Simulations (3.5)

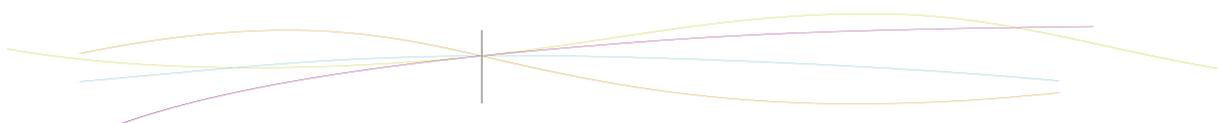
- <http://www.pvsyst.com/index.php>, (valide à la date du 02/05/11).
- <http://www.transenergie.eu/simulation-photovoltaique.php>, (valide à la date du 02/05/11).
- <http://www.sma-france.com/fr/produits/logiciels/sunny-design.html>, (valide à la date du 02/05/11).
- <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps3/pvest.php?lang=fr&map=europe>, (valide à la date du 02/05/11).
- <http://www.photowatt.com/fr/produits/modules/>, (valide à la date du 02/05/11).

5.3. Fabrication et impact environnemental (3.6)

- http://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/PV_Fab_Envnt_final_26082009.pdf (valide à la date du 30/05/2011).

5.4. Bilan énergétique des panneaux PV (3.6.5)

- <http://www.outilssolaires.com/pv/prin-bilan.htm> (valide à la date du 30/05/2011).



5.5. Cycle de vie des panneaux PV (3.6.7)

- <http://www.pvcycle.org/index.php?id=3> (valide à la date du 30/05/2011).
- [http://www.pvcycle.org/fileadmin/pvcycle_docs/images/projects/Cycle de vie des panneaux PV sec.pdf](http://www.pvcycle.org/fileadmin/pvcycle_docs/images/projects/Cycle_de_vie_des_panneaux_PV_sec.pdf) (valide à la date du 30/05/2011).

5.6. Raccordement et installation de l'installation PV (3.7)

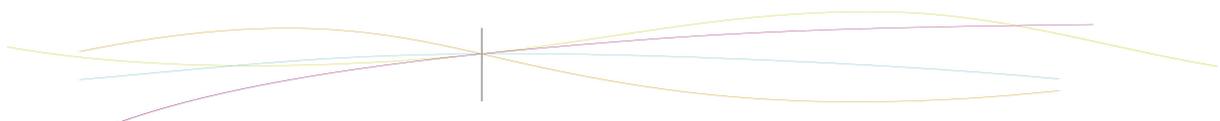
- http://www.erdfdistribution.fr/medias/Prestations/Guide_Raccordement_Installation_Production.pdf (valide à la date du 30/05/2011).
- http://www.erdfdistribution.fr/medias/DTR_Racc_Conso/ERDF-FOR-RAC_12E.pdf (valide à la date du 30/05/2011).

5.7. Subventions (3.7.3)

- http://www.qualit-enr.org/document/Menu_Haut/Particuliers/Decouvrir_EnR/Electricit%C3%A9/Fonctionnement_photovoltaique/index.htm, (valide à la date du 02/05/11).
- <http://www.hautenormandie.fr/Environnement-Transports/Environnement/Le-cheque-Energies>, (valide à la date du 02/05/11).

5.8. Tarifs de rachat par ErDF (3.7.1.3)

- <http://www.bati-depot.fr/solaire/photovoltaique/electricite-solaire/photovoltaique-connexion-reseau.html>, (valide à la date du 02/05/11).



6. ANNEXES

6.1. Sondage

Afin de savoir si un tel projet serait soutenu par les personnes qui fréquentent l'Insa de Rouen, nous avons rédigé un sondage. Suite à des problèmes de listes de diffusion et de temps, nous n'avons pas pu exploiter ce sondage. Vous trouverez néanmoins ci-dessous les questions que nous avons préparées.

A destination des étudiants, des enseignants et de l'administration de l'Insa de Rouen.

1. Pensez-vous que l'énergie PV soit une énergie alternative qui puisse suffire à couvrir les dépenses énergétiques présentes et futures de la planète ?

Oui

Non

Autre :

2. Si un projet consistant à mettre en place des installations photovoltaïques à l'Insa de Rouen venait au jour, seriez-vous :

Pour

Contre

Sans avis

3. Sinon, pourquoi ?

Projet inutile

Pas assez de soleil dans la région

Trop onéreux

Trop fragile

Autre :

4. Question ouverte : Selon vous, qu'apporterait à l'Insa une telle installation ?

5. Question ouverte : D'une manière générale, que pensez-vous de l'énergie photovoltaïque (production, cycle de vie, impact environnemental et visuel) ?

6.2. Résultats de l'étude des toits de l'Insa de Rouen

Bâtiments	Etat	Façade	Toitures	Obstacles	Réseau électrique
Darwin	Bon état des structures	Interdit car dénature la façade qui est sous garantie	Toit terrasse (entretien peu gênant) mais saturé (moteurs labo chimie)	Constructions à venir	Les armoires mères situées à la moitié des bâtiments
Dumont d'Urville	Bon état des structures	Interdit car dénature la façade qui est sous garantie	Oui possible mais attention tuyauterie	Constructions à venir	Présence proche d'une armoire dans l'angle
Magellan (pointe)	Non, en cours d'expertise	Interdit car dénature la façade qui est sous garantie	Toiture en zinc à préserver (perçage) Possible sur le bout de Magellan près de l'administration de Dumont	Non	Armoire principale proche
Halles département mécanique	Non, en cours d'expertise	Interdit car dénature la façade qui est sous garantie	Toiture en zinc doit être conservée après installation Difficultés pour le perçage	Non	Les armoires mères situées à la moitié des bâtiments
Bougainville	Bon état des structures	Interdit car dénature la façade qui est sous garantie	Oui possible, attention tuyauterie	Non	Les armoires mères situées à la moitié des bâtiments



6.3. Résultats des simulations

6.3.1. Sunny Design (relatif à la partie 3.5.1)

Aperçu du système (France / Paris)

String A
 Tenesol
 TE 1300 (140W) 12V
 Panneaux x string :
 11 x 1
 Inclinaison/azimut:
 30° / 0°

Onduleur
 20 x Sunny Boy SB 1200
 Taux de rendement max. : 92,1 %
 Rendement énergétique européen: 90,7 %
 Puissance max. AC : 1,20 kW
 Puissance DC max. : 1,32 kW

Données techniques

Puissance crête du générateur PV: 30,8 kW
Nombre total de panneaux: 220
Surface tot. du générateur PV: 230,0 m ²
Nombre d'onduleurs: 20
Puissance DC max. : 26,40 kW
AC-Puissance effective max.: 24,00 kW
Taux d'utilisation de l'onduleur: 90,1 %

Rapport de puissance nominale: 86 %
Rendement énergétique annuel *: 26410,9 kWh
Facteur d'exploitation de l'énergie: 100,0 %
Ratio de performance *: 79 %
Rendement énergétique spécifique *: 857 kWh/kWp
Pertes dues aux câbles (% en énergie PV): Non compte

Aperçu du système (France / Paris)

String A
 Tenesol
 TE 2200 (240 W)
 Panneaux x string :
 6 x 1
 Inclinaison/azimut:
 30° / 0°

Onduleur
 23 x Sunny Boy SB 1200
 Taux de rendement max. : 92,1 %
 Rendement énergétique européen: 90,7 %
 Puissance max. AC : 1,20 kW
 Puissance DC max. : 1,32 kW

Données techniques

Puissance crête du générateur PV: 33,12 kW
Nombre total de panneaux: 138
Surface tot. du générateur PV: 230,0 m ²
Nombre d'onduleurs: 23
Puissance DC max. : 30,36 kW
AC-Puissance effective max.: 27,60 kW
Taux d'utilisation de l'onduleur: 90,1 %

Rapport de puissance nominale: 92 %
Rendement énergétique annuel *: 28809,5 kWh
Facteur d'exploitation de l'énergie: 100,0 %
Ratio de performance *: 80 %
Rendement énergétique spécifique *: 870 kWh/kWp
Pertes dues aux câbles (% en énergie PV): Non compte

Aperçu du système (France / Lille)



String A
 Photowatt
 PW 6-110
 Panneaux x string :
 20 x 2
 Inclinaison/azimut:
 30° / 0°

Onduleur
 6 x Sunny Boy SB 3800
 Taux de rendement max. : 95,6 %
 Rendement énergétique européen: 94,7 %
 Puissance max. AC : 3,80 kW
 Puissance DC max. : 4,04 kW

Données techniques

Puissance crête du générateur PV: 26,4 kW
Nombre total de panneaux: 240
Surface tot. du générateur PV: 228,6 m ²
Nombre d'onduleurs: 6
Puissance DC max. : 24,24 kW
AC-Puissance effective max.: 22,80 kW
Taux d'utilisation de l'onduleur: 93,7 %

Rapport de puissance nominale: 92 %
Rendement énergétique annuel *: 23308,4 kWh
Facteur d'exploitation de l'énergie: 100,0 %
Ratio de performance *: 80 %
Rendement énergétique spécifique *: 883 kWh/kWp
Pertes dues aux câbles (% en énergie PV): Non compte

Aperçu du système (France / Lille)



String A
 Photowatt
 PW 6-123
 Panneaux x string :
 17 x 2
 Inclinaison/azimut:
 30° / 0°

Onduleur
 7 x Sunny Boy SB 3800/V 0153
 Taux de rendement max. : 95,6 %
 Rendement énergétique européen: 94,7 %
 Puissance max. AC : 3,68 kW
 Puissance DC max. : 3,91 kW

Données techniques

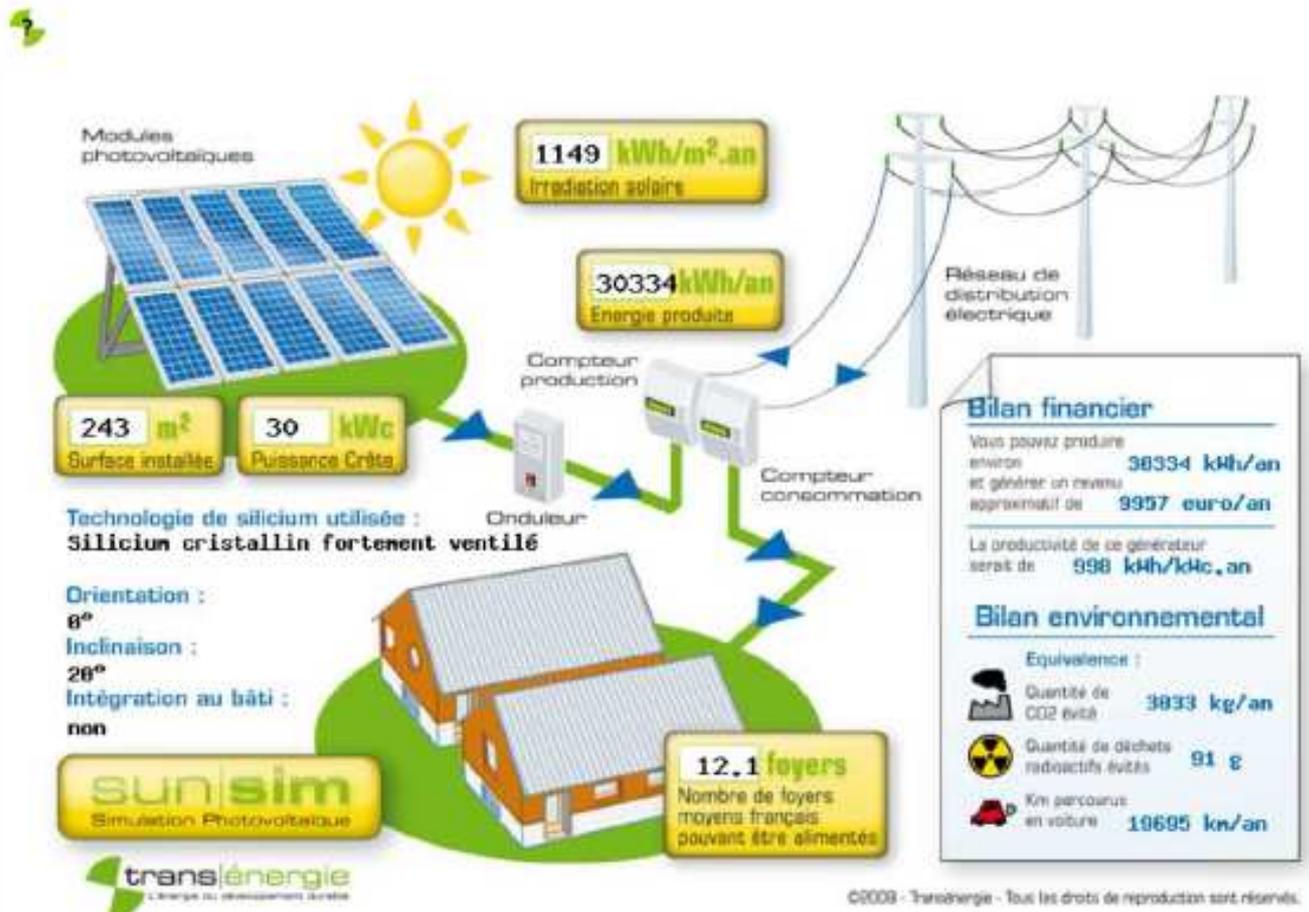
Puissance crête du générateur PV: 29,274 kW
Nombre total de panneaux: 238
Surface tot. du générateur PV: 226,8 m ²
Nombre d'onduleurs: 7
Puissance DC max. : 27,37 kW
AC-Puissance effective max.: 25,76 kW
Taux d'utilisation de l'onduleur: 94,0 %

Rapport de puissance nominale: 93 %
Rendement énergétique annuel *: 25951 kWh
Facteur d'exploitation de l'énergie: 100,0 %
Ratio de performance *: 81 %
Rendement énergétique spécifique *: 886 kWh/kWp
Pertes dues aux câbles (% en énergie PV): Non compte



6.3.2. SUNSIM (relatif à la partie 3.5.2)

Résultats



Rappel des hypothèses:

Technologie de silicium : Silicium cristallin fortement ventilé
 Invariant solaire, à l'horizontale (sans masque solaire) : 1149 kWh/m².an
 Orientation : 0°
 Inclinaison : 20°
 Surface brute disponible : 243 m²
 Intégration au bâti : non

Estimation:

Vous pouvez produire environ **30334 kWh / an** et générer un revenu approximatif de **9957 / an**.
 Vous aurez une puissance crête de **30.38 kWc**.
 La productivité de ce générateur serait de **998 kWh/kWc.an**.

Equivalence:

Quantité de CO2 non rejeté dans l'atmosphère	3033 kg/an
Quantité de déchet radioactifs évités	91 g
Equivalent en km d'un parcours d'une voiture particulière	19695 km/an
Nombre de foyers moyens français pouvant être alimentés	12.1 foyers

6.4. A priori

FLORENCE :

Selon moi, l'énergie photovoltaïque est une énergie très coûteuse en ce qui concerne la production des cellules. Je crois que ces panneaux fonctionnent à vie, tant qu'ils ne sont pas détériorés. L'inconvénient de cette source d'énergie, bien qu'elle soit durable, c'est que les jours où il n'y a pas de soleil, les panneaux ne fournissent aucune énergie.

Cette source d'énergie ne me semble pas encore très développée, en tout cas pas chez les particuliers. Le problème réside sûrement en leur prix très élevé. Je crois qu'un foyer qui possède 4 panneaux peut couvrir ses besoins en électricité, sans nécessité l'énergie d'EDF (excepté la nuit et les jours de mauvais temps). Je sais que les panneaux photovoltaïques sont utilisés sur les satellites et navettes spatiales : tant qu'ils sont exposés au soleil, ils génèrent suffisamment d'énergie pour assurer le bon fonctionnement de l'appareil spatial.

JEANNE :

Comme de plus en plus de personnes, je pense que l'énergie solaire doit être envisagée sérieusement à l'avenir.

Pour le moment, j'ai plutôt l'impression que les installations photovoltaïques placées sur des bâtiments d'entreprises, des bâtiments publics ne répondent qu'à une volonté de se montrer « écolo ». Il s'agit selon moi davantage de communication que d'un réel souci écologique.

Je trouve que l'installation de panneaux photovoltaïques chez des particuliers est une très bonne démarche. Cependant, je doute de la rentabilité d'un tel projet.

Je ne saurais dire exactement comment sont fabriqués les panneaux PV. Or, il s'agit d'un point important si on veut mesurer précisément l'impact sur l'environnement de ces panneaux.

LAN :

Avant de commencer ce projet, ma première idée sur l'énergie photovoltaïque était qu'elle est une potentielle source d'énergie renouvelable. Aujourd'hui, les chercheurs ont fait beaucoup de découvertes sur ce sujet et de nombreux types de panneaux PV ont été développés. On peut donc remplacer peu à peu l'énergie de source fossile par l'énergie solaire. Je pense que cette dernière sera un domaine très important pour la science du XXI siècle.

Ensuite, l'installation de panneaux PV sur un site de l'INSA aura des avantages intéressants car nous avons une toiture suffisamment large pour mettre en place une bonne installation et obtenir un bon rendement. De plus, comme l'utilisation de panneaux PV est financièrement aidée par l'Etat, ce projet sera tout à fait faisable dans le futur.

MATHILDE :

L'énergie photovoltaïque est un concept de plus en plus à la mode. En effet, soucieux de respecter et de préserver notre planète, les ingénieurs, chercheurs et autres scientifiques se creusent la tête pour mettre au point des innovations qui m'apparaissent comme



nécessaires à la survie de la Terre. Au delà de l'idée (utilisation de l'énergie solaire pour créer de l'électricité), je ne connais pas vraiment le fonctionnement des cellules PV.

En ayant rapidement consulté des documents, je me suis aperçu qu'il y avait une grande partie d'électricité à laquelle je n'avais pas pensée. De même, des questions comme son élaboration, la recherche de la meilleure performance, son recyclage ou encore sa réglementation restent très flous. C'est pourquoi, je pense que ce projet sera très intéressant et me permettra de comprendre le fonctionnement d'une installation photovoltaïque ainsi que d'étudier ses intérêts sociaux et économiques.

MIHAI :

Le niveau de civilisation de l'être humain nécessite l'utilisation de l'énergie électrique (au niveau de l'industrie, des ordinateurs, des différents équipements, etc.). La production de cette énergie vitale produit de la pollution dans le milieu naturel ; les ressources naturelles limitées, de plus en plus chères, nous impose une nouvelle approche : l'utilisation des énergies alternatives non-polluantes. Une telle énergie est l'énergie solaire. La transformation de cette énergie en énergie électrique est un grand défi pour la science. J'ai confiance qu'avec le temps et avec l'avancement de la science dans le domaine de cellules photovoltaïques, l'utilisation de l'énergie solaire va devenir quotidienne et tout à fait utile.

NICOLAS R. :

Avant de commencer ce projet, j'avais un à priori plutôt négatif sur l'utilisation des panneaux photovoltaïques, sans toutefois m'être penché sur le sujet en détail.

Malgré qu'ils soient plus écologiques et « propres » que d'autres systèmes d'exploitation des énergies renouvelables, je pensais qu'il était difficile de mettre en place à grande échelle l'énergie solaire pour alimenter des systèmes importants, comme des usines etc. Pour moi, l'énergie solaire ne pouvait être utilisée que pour des installations individuelles (comme des maisons) ou des bâtiments assez peu coûteux en énergie.

Pourtant, le solaire est la seule énergie renouvelable qu'il me semble possible de mettre en place à l'INSA de Rouen, et m'intéressant aux énergies renouvelables, c'est pour cela que j'ai choisi ce projet.

NICOLAS W. :

Pour moi l'énergie photovoltaïque est un moyen écologique de s'alimenter en électricité. Il fournit beaucoup d'énergie par rapport à celle nécessaire à sa fabrication.

Cependant je trouve qu'il y a eu énormément de publicité pour ce moyen d'énergie éclipant les autres possibilités.

