

ÉTUDE DE CAS D'UNE INSTALLATION PV À L'UNIVERSITÉ DE ROUEN (MONT SAINT AIGNAN)



Étudiants :

**Olivier Angrand
Amandine Lebailly
Valentin Martine**

**Vincent Lamblot
Louis Leraistre
Manon Rendu**

**Enseignant-responsable du projet :
Jamil Abdul Aziz**

Date de remise du rapport : **18/06/10**

Référence du projet : **STPI/P6-3/2010 – 7**

Intitulé du projet : **Étude de cas d'une installation PV à l'Université de Rouen (Mont Saint Aignan)**

Type de projet : **Bibliographie, modèle**

Objectifs du projet :

L'objectif du projet est d'observer, de comprendre et d'analyser le fonctionnement d'une installation photovoltaïque en se fondant sur un exemple concret : une installation inaugurée l'an dernier à Mont Saint Aignan, sur un bâtiment de TP de la faculté de biologie de l'Université de Rouen.

En outre, il a pour objectif l'apprentissage de la réalisation d'une simulation de production et l'approfondissement des aspects autres que techniques (environnementaux, économiques et sociaux) associés à la mise en place d'une telle installation.

Enfin, le projet doit également être le résultat d'un travail collectif, c'est-à-dire permettre d'associer les capacités de chacun et d'obtenir ce qu'il y a de mieux à l'aide des connaissances disponibles dans un groupe.

TABLE DES MATIÈRES

<u>1. Introduction.....</u>	<u>7</u>
<u>2. Méthodologie / Organisation du travail.....</u>	<u>7</u>
<u>2.1. Organisation du travail et répartition des tâches.....</u>	<u>7</u>
<u>2.2. Solutions de travail collaboratif mises en place.....</u>	<u>8</u>
<u>2.3. Rédaction du rapport.....</u>	<u>8</u>
<u>3. Travail réalisé et résultats.....</u>	<u>9</u>
<u>3.1. Fonctionnement d'une installation PV</u>	<u>9</u>
<u>3.1.1. Le fonctionnement de l'effet PV</u>	<u>9</u>
<u>3.1.2. Les différents types de cellule.....</u>	<u>11</u>
<u>3.1.3. Comment installer ses panneaux PV ?.....</u>	<u>13</u>
<u>3.2. Description technique de l'installation de l'UR.....</u>	<u>14</u>
<u>3.2.1. Historique de l'installation.....</u>	<u>14</u>
<u>3.2.2. La description de l'installation.....</u>	<u>14</u>
<u>3.3. Simulation de la production.....</u>	<u>17</u>
<u>3.3.1. Logiciel PVSYST.....</u>	<u>17</u>
<u>3.3.2. Logiciel Sunsim (cf. Annexe 8).....</u>	<u>18</u>
<u>3.3.3. Logiciel fourni SMA.....</u>	<u>19</u>
<u>3.3.4. Logiciel PVGIS.....</u>	<u>19</u>
<u>3.3.5. Conclusion</u>	<u>20</u>
<u>3.4. Aspects socio-économique et environnemental.....</u>	<u>21</u>
<u>3.4.1. Aspect environnemental.....</u>	<u>21</u>
<u>3.4.2. Aspect social.....</u>	<u>23</u>
<u>3.4.3. Aspect économique.....</u>	<u>23</u>
<u>4. Conclusions et perspectives.....</u>	<u>26</u>
<u>4.1. Conclusions sur le travail réalisé.....</u>	<u>26</u>
<u>4.2. Conclusions sur l'apport personnel.....</u>	<u>26</u>
<u>4.3. Perspectives pour la poursuite de ce projet.....</u>	<u>28</u>

5. Bibliographie.....	29
5.1. Ouvrages.....	29
5.2. Périodiques.....	29
5.3. Sites Internet.....	29
5.3.1. Relatifs à la partie 3.1.....	29
5.3.2. Relatifs à la partie 3.3.....	29
5.3.3. Relatifs à la partie 3.4.....	30
6. Annexes.....	31
6.1. Annexes relatives à la partie 3.1.....	31
6.2. Annexes relatives à la partie 3.3.....	32
6.3. Annexes relatives à la partie 3.4	41

NOTATIONS, ACRONYMES

CPER = Contrat Plan État-Région

DC = Direct Current (Couplage Direct)

EDF = Électricité De France

ERDF = Électricité Réseau Distribution France

EVA = Ethylen Vinyl Acetate (Éthylène-Acétate de Vinyle)

HT = Hors Taxe

kWh = KiloWatt-heure

MSA = Mont Saint Aignan

PV = PhotoVoltaïque

SMA = Sunny MAtrix

TP = Travaux Pratiques

UR = Université de Rouen

Wc = Watt-crête

1. INTRODUCTION

Le 25 Novembre 2009 était inauguré à Mont Saint Aignan le tout nouveau bâtiment de TP de la faculté de biologie de l'Université de Rouen. Mais ce n'est pas un bâtiment de cours ordinaire : sa face sud est recouverte de 170 panneaux PV.

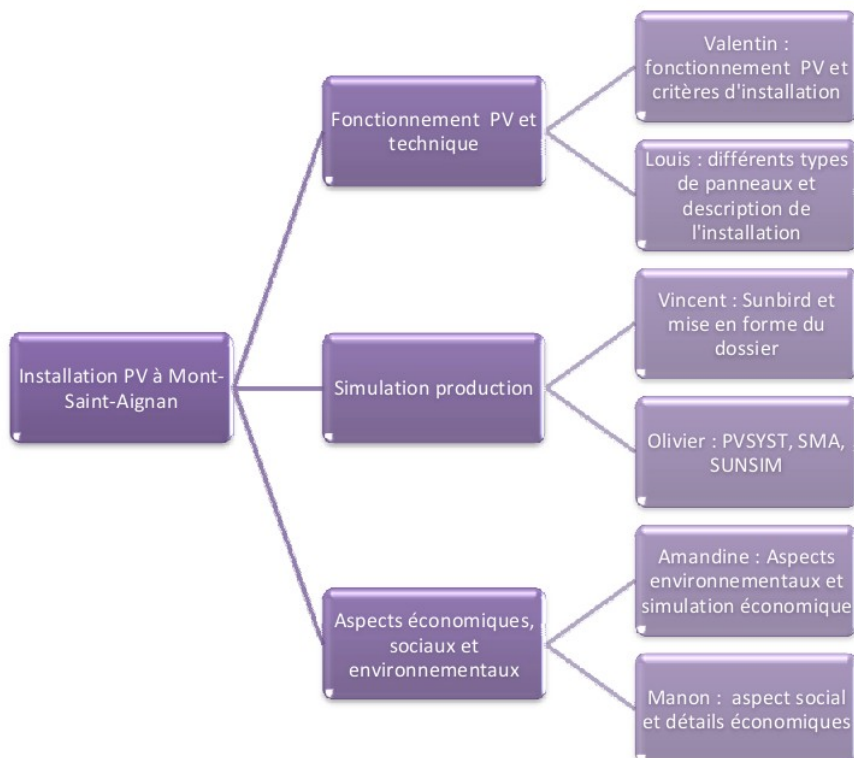
Faisant suite à un projet d'étude de la production PV en général, ce projet va plus loin en effectuant l'étude du cas concret de cette installation. Il ne se limite pas à une description technique, mais en aborde les aspects productifs, socio-économiques et environnementaux. Le but est de mesurer l'impact global qu'a et qu'aura dans les prochaines années cette initiative de l'UR.

Dans ce dossier, nous aborderons donc dans un premier temps le fonctionnement d'une installation PV, puis nous nous focaliserons sur les caractéristiques techniques de l'installation de l'UR. Par la suite nous présenterons les simulations de la production d'électricité réalisées à l'aide de plusieurs logiciels. Enfin nous nous pencherons sur les aspects environnementaux, économiques et sociaux liés à ce projet.

2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

2.1. Organisation du travail et répartition des tâches

Dès la première séance, après avoir pris connaissance des objectifs détaillés du projet, nous nous sommes attribués par binôme les grands axes des objectifs : aspect technique de la production PV, simulation de la production de l'installation, aspects socio-économique et environnemental de l'énergie PV.



Le travail qui a immédiatement suivi était concentré sur la préparation de la rencontre avec l'ingénieur responsable du projet organisée par notre tuteur. En effet, il ne fallait pas oublier que le projet s'appuyait avant tout sur un exemple concret. Chaque binôme prépara donc des questions en rapport avec son axe d'étude (exemple : les caractéristiques des panneaux, finalité du projet).

Après la rencontre, nous avons pu commencer à approfondir nos axes respectifs à partir des informations obtenues : recherche documentaire pour les uns, recherche de solutions de simulation pour les autres.

2.2. Solutions de travail collaboratif mises en place

Dès le début du projet, nous avons mis en place un groupe virtuel « Google Group » afin de disposer d'une liste de diffusion de mails ainsi que de pouvoir mettre en commun des fichiers tels que tableau de bord, photos etc.

2.3. Rédaction du rapport

Chaque binôme était chargé de rédiger la partie de la section « Travail réalisé et résultats » le concernant. La dernière séance était consacrée à la rédaction commune des autres parties.

Enfin, le tout a été mis en page conformément aux critères demandés par une seule personne du groupe afin d'obtenir un dossier visuellement homogène.

Puis juste avant de le rendre, le dossier final a été diffusé à tous les membres du groupe via la liste de diffusion pour corriger les erreurs en tout genre qui auraient pu persister.

3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

3.1. Fonctionnement d'une installation PV

Tout d'abord, il nous semble essentiel de donner une explication générale du mode de fonctionnement des panneaux PV et des notions qui y sont liées avant de traiter des panneaux qui sont installés à MSA.

3.1.1. Le fonctionnement de l'effet PV

C'est en 1839 que le physicien français Alexandre Edmond Becquerel découvre l'effet PV. Il se rend compte que l'absorption de photons par un matériau semi-conducteur génère une tension électrique : c'est l'effet PV. C'est pourquoi, aujourd'hui, on se sert des cellules PV pour la production de courant continu à partir du rayonnement solaire qui va servir par la suite pour alimenter un appareil électrique ou recharger une batterie par exemple.

3.1.1.1 Principes de base

Un courant électrique correspond à un déplacement de charges positives ou négatives dans un matériau dit « conducteur », c'est-à-dire qui permet leur circulation. Un atome est constitué d'un noyau central, lui-même constitué de protons et de neutrons, et d'un nuage d'électrons périphériques. Un électron est un porteur de charge négative tandis qu'un proton est un porteur de charge positive.

Pour deux corps identiques, le corps A étant chargé positivement et le corps B négativement, la tension électrique est la différence de potentiel notée $U_{AB}=V_A-V_B$. Si A et B sont reliés par un conducteur métallique, les charges négatives se mettent en mouvement grâce au principe d'attraction (deux porteurs de charges de signes opposés s'attirent) pour parcourir le chemin A-B jusqu'à ce que les potentiels soient égaux. Un courant électrique est alors créé.

3.1.1.2 Qu'est ce qu'un matériau semi-conducteur ?

Les semi-conducteurs sont des cristaux capables de devenir conducteurs. Les électrons vont normalement occuper les bandes énergétiques des atomes les plus basses. On dit qu'ils occupent les bandes de valence. Les bandes énergétiques sont séparées par des bandes interdites ou « gap ». Les électrons deviennent mobiles et peuvent se déplacer dans le cristal si un apport d'énergie est suffisamment important pour qu'ils puissent traverser la bande interdite et occuper alors la bande de conduction.

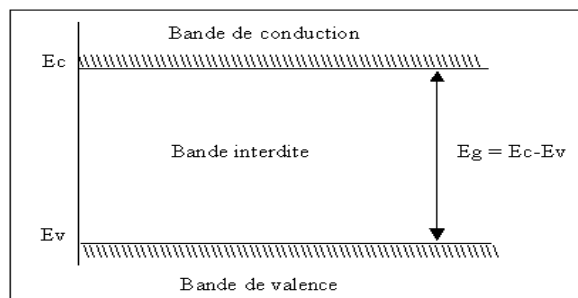


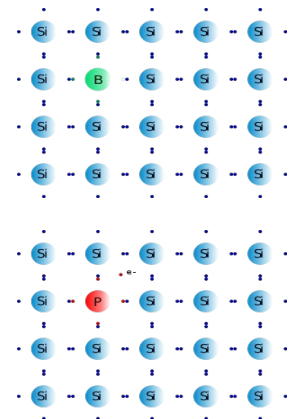
Fig-1 :Diagramme d'énergie.

Dans le cas des semi-conducteurs, les particules de lumière (photons) apportent suffisamment d'énergie pour permettre à l'électron d'être propulsé dans la bande de conduction, ce qui laisse derrière lui un « trou » (particule imaginaire qui se déplacerait dans le sens opposé à l'électron). Le corps est donc devenu conducteur. Ensuite, pour diriger les électrons, il est nécessaire de réaliser un dopage permettant la polarisation des semi-conducteurs.

3.1.1.3 Le dopage

Le principe est de créer un surplus de charges positives ou négatives en introduisant des impuretés dans la structure. Le matériau des cellules PV est généralement le silicium car son réseau cristallin est tel que chaque atome est lié à quatre autres atomes (il a quatre électrons de valence et fait partie de la quatrième colonne du tableau périodique des éléments).

Dopage P : on introduit comme impuretés des atomes ayant seulement 3 électrons de valence (le Bore par exemple), ce qui va créer un manque d'électrons pouvant être comblé par agitation thermique.



Dopage N : les impuretés sont des atomes à 5 électrons de valence (comme le Phosphore). Le nouveau corps présente donc un excès d'électrons qui va pouvoir passer dans la bande de conduction et devenir mobile après agitation thermique en laissant un « trou ».

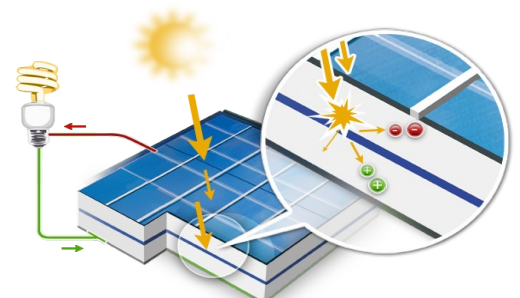
3.1.1.4 La jonction P-N

Lors de la mise en contact des couches dopées P et N, un déplacement des porteurs de charges se produit au niveau de la jonction : le manque d'électrons de la zone P est comblé par les électrons en excès de la zone N. Ces paires électron-trou ne participent alors plus à la conductivité. La polarisation est réalisée. La zone dopée N devient chargée positivement et la zone P négativement.

Mais, tous les électrons en excès ne recouvrent pas tous les trous et certains restent donc dans la zone N. De même, certains trous restent dans la zone P. Au niveau de la zone de contact, il y a donc une recombinaison des charges et une différence de potentiel locale est créée. Elle représente une barrière de potentiel : les trous ne peuvent plus migrer vers la zone N et les électrons excédentaires vers la zone P non plus. Ils sont d'ailleurs repoussés à l'extrémité de leur zone ce qui donne naissance à une jonction dite P-N.

3.1.1.5 Application aux cellules PV

Une cellule PV est une diode constituée de deux couches de matériau semi-conducteur dopées N et P. C'est ce phénomène qui va créer un champ électrique permanent dans la cellule. Il ne permet aux électrons la circulation que dans une seule direction. C'est pourquoi on parle de diode photoélectrique. Lorsque la paire électron-trou est créée, les charges positives sont séparées des charges négatives ce qui donne naissance à une différence de potentiel entre les couches P et N.

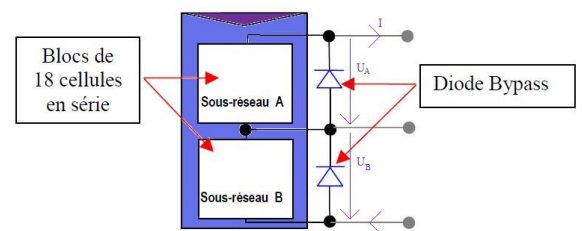


En reliant les deux zones extérieures des zones P et N par un fil conducteur, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P : le courant électrique circule grâce à cette différence de potentiel.

3.1.2. Les différents types de cellule

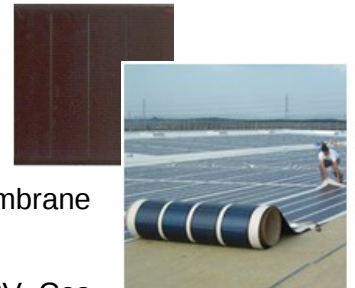
Nous distinguons trois principaux types de cellules PV, qui sont détaillés dans la partie suivante.

Une cellule PV qui est ombragée ne fournira pas autant de courant qu'une cellule éclairée. Le problème réside dans le fait que dans un module, les cellules sont connectées en série, le même courant traverse donc chaque cellule. La cellule ombragée va avoir un courant de court-circuit inférieur à celui des cellules éclairées et elle va agir en récepteur de polarisation inverse et elle va donc faire dissiper la puissance en excès par émission de chaleur. On assistera à la formation d'un point chaud qui peut endommager la cellule et ses voisines. Une cellule ombragée peut donc avoir des effets néfastes sur l'installation en faisant chuter la production et en engrangeant d'éventuels dégâts matériels. C'est pourquoi les **diodes by-pass** sont utiles dans ces cas là car elles permettent de contourner la branche de cellules présentant une anomalie.



3.1.2.1 Cellule en silicium amorphe

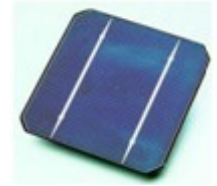
Les cellules en silicium amorphe sont généralement utilisées pour les panneaux souples ou pliables ainsi que dans les toits de locaux industriels : elles peuvent donc être intégrées au sein d'une membrane étanche.



Le silicium est le matériau le plus utilisé pour fabriquer des cellules PV. Ces cellules sont composées de semi-conducteurs fabriqués à partir de silicium (Si), de sulfure de cadmium (CdS) ou de tellure de cadmium (CdTe).

Avantages	Inconvénients
Coûts de production plus faibles	Performances qui diminuent sensiblement avec le temps
Sensibilité aux températures élevées plus faible comparé au mono ou poly-cristallins	Rendement plus de deux fois inférieur à celui du silicium (7 à 10 %)
Fonctionne avec un éclairage plus faible (temps couvert ou intérieur d'un bâtiment)	Rendement faible en plein soleil (60W/m ²)

3.1.2.2 *Cellule en silicium mono-cristallin*



Les cellules en silicium mono-cristallin sont les cellules les plus utilisées aujourd'hui dans le marché public des panneaux PV.

Elles sont très pures en silicium car elles sont constituées directement d'un seul bloc de silicium fondu.

Avantages	Inconvénients
Meilleur rendement (13 à 17 %)	Coûts élevés
	Perte de place : forme octogonale

3.1.2.3 *Cellule en silicium multi-cristallin*



Les cellules en silicium multi-cristallin sont aussi très répandues sur le marché. En effet elles ont parfois un meilleur rapport qualité/prix que les autres types de cellules, celles qui présentent une bonne qualité de production sont parfois équivalentes à des cellules monocristallines.

Fabriquées à partir d'un bloc de silicium cristallisé, nous pouvons voir, à leur surface, les différentes orientations des cristaux au sein de la cellule.

Avantages	Inconvénients
Bon rendement (11 à 15%)	Rendement faible sous éclaircissement faible
Coûts de production plus faible que le mono cristallin	

3.1.2.4 *La recherche*

La recherche au niveau des cellules PV est très active. Chaque année de nouveaux types de cellules sont créés, en voici quelques uns :

- Les cellules Tandem : composées de l'empilement de deux cellules simples. Elles présentent un excellent rendement mais les coûts très élevés dus à l'utilisation de deux cellules freinent les constructeurs.
- Les cellules organiques : constituées de molécules organiques. L'intérêt est une réduction des coûts car les semi-conducteurs organiques sont beaucoup moins coûteux. Par ailleurs les chercheurs espèrent des cellules plus fines.
- Les cellules multi-jonction : fabriquées à partir de plusieurs couches très minces (utilisant la technologie de l'épitaxie), chaque matériau ayant des longueurs d'ondes différentes afin qu'une majorité du spectre solaire soit absorbée. Ce sont donc des cellules très efficaces qui ont été développées pour des applications spatiales.
- Les semi conducteur cis : formés d'un dépôt d'un matériau semi-conducteur sur un support. Ils ne sont pas composés de silicium mais de métaux rares (indium, tellure, gallium, germanium,...) en faible quantité mais avec un coût extrêmement élevé car les ressources sont très faibles. Un développement important des panneaux solaires de ce type entraînerait des limites dues à ces ressources limitées.

3.1.3. Comment installer ses panneaux PV ?






L'électricité est produite grâce aux cellules PV qui sont capables de transformer une partie du rayonnement solaire. Mais pour avoir le meilleur rendement possible, il est nécessaire d'avoir la meilleure installation possible. Il y a donc quelques facteurs importants pour cela.


3.1.3.1 L'ensoleillement

Dans le cas des panneaux PV, on va parler d'irradiation globale. Il s'agit du nombre d'heures où les rayons solaires vont permettre le fonctionnement des panneaux. Ce facteur est variable selon les régions du monde. Dans le Nord de la France, l'ensoleillement est plus faible que dans le Sud mais cela n'enlève rien à la rentabilité des panneaux. À Rouen, l'ensoleillement est de 1 750 heures par an. Il faut savoir que même lorsque le temps est couvert, les panneaux PV produisent de l'électricité.

3.1.3.2 Influence de l'inclinaison

L'inclinaison des panneaux est bien sur le principal facteur à étudier avant l'installation. Il faut savoir que l'énergie produite est variable selon les heures de la journée et selon les saisons puisque l'inclinaison de la Terre varie par rapport au Soleil. Si l'on étudie le tableau suivant, on s'aperçoit que les différentes inclinaisons et orientations des panneaux ne donnent pas le même rendement.

FACTEURS DE CORRECTION POUR UNE INCLINAISON ET UNE ORIENTATION DONNÉES					
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.

Ainsi, en France, comme on peut le voir, la position optimale des panneaux est orientée plein Sud et inclinée de 30-35°

3.1.3.3 L'angle d'incidence

Il s'agit de l'angle formé par les rayons du Soleil et le plan du panneau. Le rendement est absolument lié à l'angle d'incidence. L'équation suivante définit le rendement :

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

où β est l'angle d'incidence en °

On voit donc que le rendement est maximal lorsque $\sin(\beta)$ vaut 1 c'est-à-dire lorsque β vaut 90°.

Le rendement est maximal lorsque les rayons arrivent perpendiculairement aux panneaux.

3.1.3.4 *Autres facteurs (cf. [Annexe 1](#))*

- La température : comme une température élevée réduit la production des panneaux, la température ambiante (20°C) constitue la température idéale.
- L'ombrage : le rendement du module est diminué s'il y a une ombre, même partielle, sur un des capteurs. Il faut donc faire attention à ce que les arbres environnants ne fassent pas d'ombre.
- L'albédo : il s'agit du pouvoir de réflexion de la lumière du sol. C'est un facteur à ne pas négliger car la production peut être augmentée en récupérant une partie de la lumière réfléchiée par le sol (surtout avec la neige par exemple qui est très réfléchive).

3.2. Description technique de l'installation de l'UR

3.2.1. Historique de l'installation

Nous n'avons pas pu avoir beaucoup de détails à ce sujet, autant pour les intervenants au sein du projet que pour les grandes dates. Le projet a débuté en 2009 par un appel d'offre. L'entreprise Sharp a été la plus économique pour l'achat des panneaux solaires et SMA pour les onduleurs. De plus nous savons que l'installation électrique fut réalisée par une entreprise locale. L'inauguration correspond à la mise en fonctionnement de l'installation et a eu lieu le 25 Novembre 2009.

3.2.2. La description de l'installation

L'installation PV de l'UR est composée de différentes parties comme sur toute installation PV, mais celle-ci présente quelques particularités.

Tout d'abord l'installation est composée de 170 panneaux pour une surface totale de 243 m² divisés en trois boucles (« strings » en anglais) c'est-à-dire en trois « branches » de panneaux en série. Chacune de ces boucles est reliée indépendamment à des onduleurs qui ont pour but de transformer le courant continu produit par les panneaux solaire en courant alternatif. Ainsi grâce à ces trois strings un courant triphasé est créé.

Les boucles sont ensuite reliées au disjoncteur, qui est lui-même relié à un parafoudre pour éviter toute éventualité de surtension. Ensuite le disjoncteur est relié à un compteur de production qui permet de mesurer la quantité d'énergie produite qui est transmise sur le réseau électrique (cf. [Annexe 2](#)).

Il n'existe pas de connexion entre l'installation électrique du bâtiment et ce système de production car il est financièrement plus intéressant de revendre sur le réseau l'électricité que de l'utiliser pour les propres besoins de l'UR (cf. [section 3.4.3.](#)).

3.2.2.1 *Exposition de l'installation*

L'exposition des panneaux solaires est très importante. En effet il ne doit y avoir aucune obstruction de la lumière, il ne doit y avoir aucun obstacle entre le soleil et les panneaux solaires. C'est pourquoi les panneaux solaires de cette installation sont orientés plein sud avec un angle de 90° avec le sol, cette position n'est pas optimale mais il a fallu adapter le projet à l'architecture du bâtiment. Également il n'y a aucun obstacle, tel qu'un bâtiment, ni aucune végétation devant les panneaux solaires pour ne pas avoir de parties à l'ombre.

Nous pouvons voir sur la photo de couverture qu'il manque deux panneaux, en effet ils sont tombés suite à des forts vents, la structure était prévue pour résister à ces conditions mais le montage a du être défectueux et ils sont actuellement en train de faire appel à une société pour leur remplacement.

3.2.2.2 *Le panneau solaire Sharp NU-180(E1)*

Les panneaux présents sur le site de MSA sont produits par la société Japonaise Sharp, forte de plus de 50 ans d'expérience dans le domaine du solaire. Le modèle utilisé est le modèle NU-180(E1).

Ce modèle est un ensemble de modules PV haute performance composés de cellules solaires en silicium monocristallin (156,5 mm * 156,5 mm) et qui offrent un rendement de module pouvant atteindre 13,7%.

La surface des cellules texturées associées à la technologie BSF (couche aluminium en face arrière) permettent d'obtenir des rendements électriques particulièrement élevés. Ces modules peuvent ainsi produire de l'électricité intensivement même en cas de faible ensoleillement.

La durée de vie de ces panneaux est assurée par l'utilisation d'un verre blanc trempé, de plastique EVA, d'un film protecteur résistant aux intempéries et d'un cadre en aluminium anodisé avec perforations de drainage. Ces panneaux sont garantis par le fabricant sur une période de 5 ans. Par ailleurs, le fabricant offre une garantie de performance de 10 ans pour une puissance de 90% et de 25 ans pour une puissance de 85%.

Caractéristiques du panneau :

Nombre de cellules par panneau	48
Longueur	1318 mm
Largeur	994 mm
Surface	1,31 m ²
Puissance nominale	180 W

Les panneaux Sharp NU-180(E1) destinés à l'Europe sont assemblés en Allemagne.

3.2.2.3 Onduleur Sunny Mini Central 10000 TL

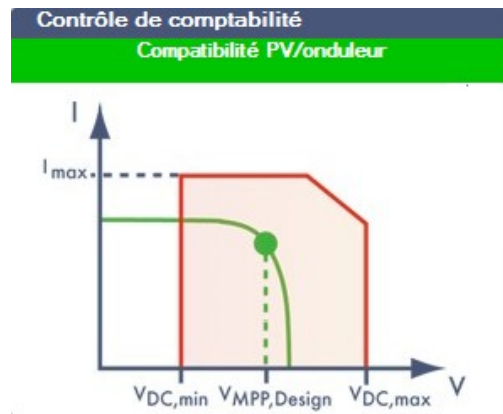
Cet appareil est parfait pour les installations à usage industriel à partir de 25 kW. Une structure triphasée et des classes de puissance échelonnées permettent la réalisation de toutes les tailles d'installation, jusqu'à plusieurs centaines de kilowatts de puissance.

Cet onduleur assure un rendement supérieur à 98% et fonctionne sans transformateur.

3.2.2.4 Choix du panneau et de l'onduleur

Il est bon de savoir que tous les panneaux et onduleurs ne sont pas forcément compatibles.

A l'aide du logiciel fourni par SMA, nous pouvons justifier l'association du panneau PV Sharp NU-180(E1) avec l'onduleur SMA 10000T. En effet, le logiciel nous indique que la configuration du générateur PV et le type d'onduleur sont compatibles ; le rapport de puissance nominale (puissance DC maximum de l'onduleur et puissance de crête PV) se situe dans la zone standard (80%-120%).



3.3. Simulation de la production

3.3.1. Logiciel PVSYST

C'est un logiciel de simulation PV commercial qui permet de modéliser une installation PV. Ce logiciel a été développé par l'Université de Genève.

3.3.1.1 Situation géographique et météo

Le logiciel nécessite un paramétrage assez complexe. Tout d'abord, il faut préciser la nature du projet. En effet, il est nécessaire de mentionner la situation géographique et la météo du site (cf. [Annexe 3](#)).

Dans notre cas, la ville de MSA ne figure pas dans les bases de données du logiciel. Il est donc nécessaire de définir les coordonnées géographiques de MSA.

Ces données géographiques sont utilisées par le logiciel PVSYST afin de créer la trajectoire du soleil à MSA tout au long de l'année en fonction de l'azimut et de l'heure (cf. [Annexe 4](#)).

Après avoir paramétré les données géographiques, il est nécessaire d'entrer les données météorologiques du site de MSA. Pour cela, nous avons utilisé le site www.meteociel.fr afin d'obtenir l'irradiation globale et la température moyenne sur le site sur une période de un an.

Le logiciel demande également la valeur de l'albédo. Nous prendrons une valeur égale à 0,20 (ce qui correspond à une situation urbaine).

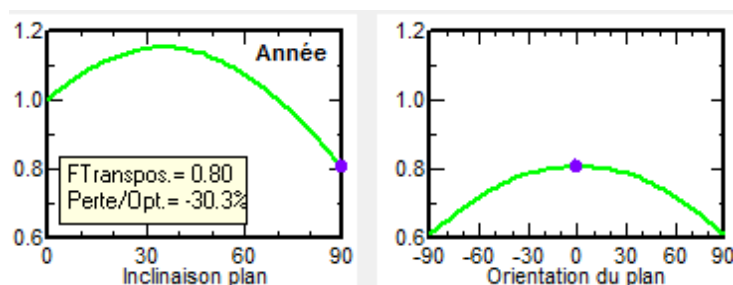
3.3.1.2 Orientation

Dans cette partie du logiciel, il nous est demandé de paramétrer le type de champ ainsi que les paramètres du champ.

Dans notre cas, il s'agit d'un plan incliné fixe. Ce plan est incliné à 90° et est orienté plein Sud c'est à dire que l'azimut est égal à 0° .

Le logiciel nous indique cependant qu'il ne s'agit pas de de l'inclinaison optimale puisqu'on peut observer une perte par rapport a l'optimum de -30,3%. En ce qui concerne l'azimut, une orientation plein Sud est ce qu'il y a de mieux.

Grâce au logiciel, on peut se rendre compte que l'inclinaison optimale correspond à une inclinaison de 35° .



Le logiciel permet également de définir les éventuels ombrages proches, c'est à dire toutes les zones d'ombre qui pourraient exister dans le champ du système PV.

Dans notre étude, aucun ombrage proche n'est à prendre en compte.

Il ne nous reste plus qu'à entrer les données du système (type de panneau, type d'onduleur, 3 onduleurs, 170 panneaux).

3.3.1.3 Résultats

Le logiciel réalise une simulation sur une période d'un an. Cette simulation se présente sous la forme d'un rapport (cf [Annexes 5 à 7](#)).

D'après la simulation que nous venons de réaliser, une telle installation devrait produire **21 007 kWh/an** avec un indice de performance de 80,8%.

On s'aperçoit que l'essentiel de la production se fait du mois d'avril au mois d'août. De plus l'installation se révèle être plus productive en avril que lors des mois d'été étant donné qu'en été les pertes observées au niveau des panneaux et de l'onduleur sont plus importantes.

3.3.2. Logiciel Sunsim (cf. [Annexe 8](#))

Le logiciel SunSim est un logiciel de simulation PV gratuit proposé par la société TransEnergie à l'adresse <http://www.transenergie.eu/simulation-photovoltaique.php>. Cette société créée en 1992 est un bureau d'études spécialisé dans les énergies renouvelables (EnR) et la maîtrise de l'énergie (MDE).

Ce logiciel nous permet de choisir la région où se situe notre installation PV afin de déterminer l'irradiation solaire annuelle de la zone choisie. Dans notre cas, on obtient une irradiance de 1 149 kWh/m².an, valeur proche de celle trouvée avec le logiciel PVSYST.

Ainsi, avec une installation telle que celle présente sur le site de l'UR, le logiciel nous montre que l'on peut envisager de produire environ **21 248 kWh/an** et générer ainsi un revenu approximatif d'environ 12 786 €/an.

Ce type d'installation peut fournir de l'électricité à environ 8 foyers. De plus, on peut réaliser un bilan environnemental grâce à ce logiciel de simulation.

Avec une installation équivalente à celle de l'UR, c'est près de 2 125 kg/an de CO₂ et 63,74 g de déchets radioactifs qui sont évités chaque années. Aussi, le logiciel réalise une analogie avec le nombre de kilomètres parcourus en voiture. On apprend alors que ce type d'installation équivaut à près de 13 799 km/an parcourus en voiture.

Ce logiciel nous présente donc parfaitement les intérêts de ce type d'installation autant d'un point de vue économique que d'un point de vue écologique.

A noter tout de même, que ce logiciel présente des limites puisqu'il ne prend pas en compte dans le bilan environnemental la pollution engendrée avant l'installation et après pour son recyclage.

3.3.3. *Logiciel fourni SMA*

Nous avons également pensé qu'il pourrait être intéressant de réaliser une simulation à l'aide du logiciel fourni sur le site du fabricant de l'onduleur SMA. Avec cette simulation, nous pourrions ainsi comparer les résultats obtenus à l'aide du logiciel indépendant PVSYST et ceux du logiciel fourni par le fabricant de l'onduleur utilisé dans notre étude.

Comme les autres logiciels, le logiciel du fabricant SMA nous demande de rentrer les caractéristiques de l'installation PV et de l'onduleur. Résultats en [Annexe 9](#).

On se rend compte que les résultats obtenus sont grandement différent de ceux obtenus avec les autres logiciels en ce qui concerne l'énergie produite. En effet, le logiciel prévoit une production annuelle d'énergie égale à **16 757 kWh/an**, ce qui est bien en-deçà des prévisions des autres logiciels utilisés.

Cet écart important obtenu entre les résultats s'expliquent certainement en grande partie par le manque de précision du logiciel de la société SMA. En effet, ce logiciel prend les données géographiques et météorologiques de la ville de Paris.

3.3.4. *Logiciel PVGIS*

Nous avons trouvé dès le début du projet un logiciel très intéressant fourni par le Joint Research Center de la European Commission (interface en ligne disponible à l'adresse <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>, cf. [Annexe 10](#)). Les autres logiciels calculaient tous les facteurs de perte à partir du matériel utilisé. Mais ce logiciel demande directement en paramètre, en plus de l'orientation et des données géographiques (à partir desquelles il récupère lui même les données météorologiques), un pourcentage de perte dues au câblage, onduleurs etc. Or nous ne disposions pas d'une telle information. Nous l'avons donc mis de côté dans un premier temps.

Mais comme le logiciel détaillait la production moyenne par mois, nous avons eu l'idée d'effectuer la démarche inverse. Nous sommes allés relever la production effective de l'installation le 25 Mai (soit 6 mois exactement après son inauguration). La production totale depuis l'inauguration était alors de 10 395 kWh. Nous avons alors pu déterminer après plusieurs essais (comparaison entre la somme des productions mensuelles de Décembre à Mai données par le logiciel et la production effective) le facteur de perte correspondant (soit 0,9%).

Plus intéressant, nous pouvons maintenant extrapoler à partir de données bien réelles (la production relevée) pour obtenir une production annuelle qu'on peut supposer correcte : **21 700 kWh/an**.

3.3.5. Conclusion

Nous avons pu comparer aux données réelles la simulation de PVSYST à 6 mois. Voici donc un tableau récapitulatif de nos simulations :

Logiciel	Production annuelle simulée	Écart relatif à 6 mois	Indice de confiance (classement de 1 à 4 lié à la précision du logiciel)
PVSYST	21 007 kWh	2,00%	2
SunSim	21 248 kWh	N/A	3
SMA	16 757 kWh	N/A	4
PVGIS	21 700 kWh	0,00%	1

Si on élimine la simulation de SMA, on peut avancer que l'installation produira en moyenne **21 300 kWh/an.**

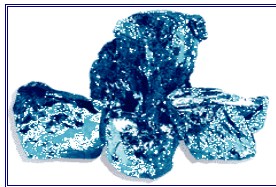
3.4. Aspects socio-économique et environnemental

3.4.1. Aspect environnemental

3.4.1.1 La Production des panneaux PV

Autant la production d'électricité PV n'occasionne pas de pollution particulière, autant la fabrication des modules est un processus industriel qui n'est pas neutre vis-à-vis de l'environnement.

Les dépenses énergétiques



Les cellules PV permettant la production d'électricité à partir d'énergie solaire sont principalement constituées de silicium. Or, l'obtention de ce semi-conducteur à partir de la silice nécessite de très hautes températures, et donc une dépense énergétique phénoménale. En effet, lors de certaines étapes de la formation de cellules, les matériaux doivent être montés à une température de 1700°C.

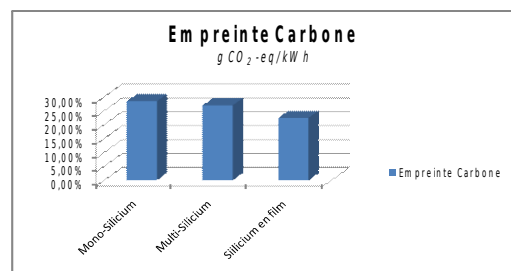
Ensuite, restent des étapes un peu moins « énergivores » telles que le transport, l'installation et le recyclage des produits issus de la production. Cependant, ces éléments provoquent une production d'énergie non négligeable.

Le bilan carbone

Un polémique enfle sur le solaire PV concernant le bilan carbone. Le Syndicat des Énergies Renouvelables a relevé une contre-vérité flagrante en matière d'énergie solaire, dans un rapport du Centre d'Analyse Stratégique sur les perspectives énergétiques de la France. En effet, concernant l'énergie solaire PV, le CAS affirme que le solaire PV émet plus de CO₂ qu'il n'en économise sur sa durée de vie¹.

Effectivement, comme nous allons le voir plus bas, toutes les études démontrent qu'une installation solaire PV raccordée au réseau rembourse l'énergie nécessaire à sa fabrication et à son installation dans une période entre deux et quatre ans, pour une durée de vie d'environ 30 ans. Certes ! Mais il ne faut pas confondre énergie et gaz à effet de serre. Dire que le PV « rembourse » sa dette d'impuretés rejetées dans la nature est une manipulation de l'information, du point de vue des émissions de CO₂.

L'effet de serre a été traduit à l'aide d'un indicateur en kg CO₂-équivalent par kWh produit, correspondant à la quantité de gaz à effet de serre émis lors de la fabrication du système sur sa production électrique pendant 30 ans. Dans l'exemple des panneaux solaires à MSA, les cellules PV sont formées de Mono-Silicium, le matériau ayant l'empreinte carbone malheureusement la plus forte, comme le montre ce schéma.



1 Selon le magazine « Le Moniteur » - Octobre 2007

La France, et la majorité des pays d'Europe, font d'énormes efforts dans le but de réduire ces déchets. Cependant, aujourd'hui, la Chine détient le quasi-monopole de la fabrication de panneaux PV (citons « LDK Solar », « Trina Solar » ou « Suntech Power », le premier producteur mondial de panneaux PV). Or, la Chine est novice dans ce secteur. Ses usines ne sont pas parfaitement équipées pour garantir au maximum le respect de l'environnement. Ainsi, la Chine ne propose pas les mêmes solutions que les pays Européens, et continue, malgré les critiques, de générer des pollutions excessives dans le secteur PV.

Le tableau en [Annexe 12](#) résume les effets polluants de la production de panneaux PV. La fabrication nous révèle une consommation de silicium de 10 à 15 g/Wc, des éléments toxiques présents à l'état de traces (Pb, Br, B, P), l'utilisation de métal aux ressources limitées (Ag), et une dépense énergétique conséquente due à l'aluminium et au silicium (40%). Elle occasionne la génération de rejets chlorés, de boues chargées en silicium et de gaz et d'effluents provenant de l'utilisation de produits chimiques...

3.4.1.2 Recyclage et fin de vie

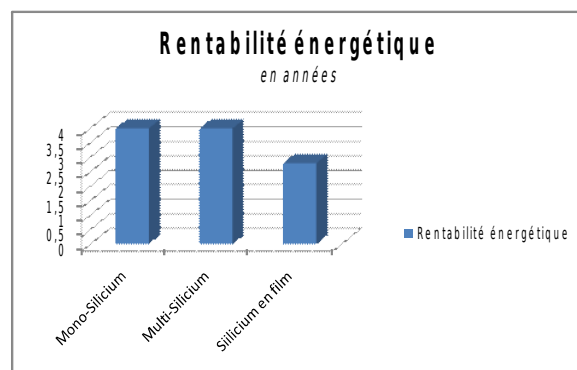
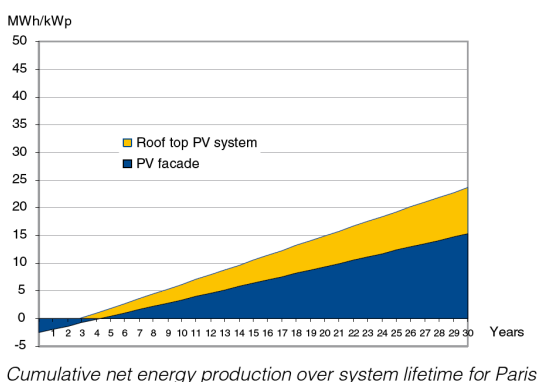
Après près d'une trentaine d'années de bons et loyaux services, les panneaux solaires sont fondus pour séparer leurs composants. Les cellules en silicium sont soumises à un processus de purification pour pouvoir être réutilisées.

Au début de l'apparition des cellules PV, les panneaux solaires n'étaient que très peu recyclés et du fait de leur composition, s'avérait être des matériaux très polluants. Aujourd'hui, un accord a été signé au sein des 27 pays membres de l'Union Européenne : plus de 70 % des panneaux solaires PV sont collectés et recyclés. Grâce à l'association "PV Cycle", les producteurs de panneaux solaires s'engagent sur des objectifs tels que 85 % des matériaux des panneaux PV usagés collectés soient recyclés. Une avancée peu négligeable vis-à-vis de l'impact des panneaux PV sur l'environnement.

3.4.1.3 L'apport environnemental d'une installation PV

Le principal avantage de l'énergie PV est qu'elle peut être installée partout, même dans le Nord ! D'un point de vue écologique, les panneaux solaires sont une énergie propre, non polluante pour l'environnement (une fois le panneau solaire posé). Aucun gaz à effet de serre n'est rejeté durant sa période d'utilisation, et il n'y a aucun déchet radioactif produit (il est important de noter que en France, 85,7% de l'énergie provient du nucléaire). De même, l'énergie solaire est inépuisable, contrairement aux énergies fossiles comme le charbon ou le pétrole. Les panneaux solaires, une fois installés, ne demandent que très peu d'entretien (ou même un « Entretien Zéro » comme nous l'avait indiqué M. Joyeux, l'ingénieur responsable du projet, lors de notre entrevue). Enfin, contrairement aux éoliennes, les panneaux solaires sont silencieux et non dérangeants pour les riverains ou la faune.

Nous avons pu voir plus haut que la production de panneaux consomme une quantité importante d'énergie. Cependant, le temps de retour énergétique d'un système PV complet (pas seulement les modules, mais aussi les câbles, les cadres et les outils électroniques) en fonction de l'irradiation solaire sur Paris et ses alentours est entre 32 et 56 mois pour un système monté en façade. Nous considérerons Rouen assez près de Paris pour nous intéresser à ces résultats :



3.4.2. Aspect social

3.4.2.1 Impact sur le paysage

Ces systèmes une fois posés n'ont aucun autre impact direct sur l'environnement local. Seule la modification visuelle peut être constatée. En effet, la couleur, d'une partie de l'enveloppe du bâtiment-support et, par conséquent, du paysage plus ou moins urbanisé dans lequel ce bâtiment se situe, est différente. L'aspect visuel étant une valeur très subjective, cet impact peut aussi bien être considéré comme positif ou négatif. Cependant dans notre cas, cette installation a été placée sur un bâtiment tout juste rénové. De ce fait, les panneaux PV sont ici symbole de modernité, de respect de l'environnement et de dynamisme pour l'UR. Nous avons décidé d'envoyer un sondage aux étudiants par e-mail pour connaître leur point de vue sur cette installation.

Cependant, il est vrai que l'installation de certaines nouveautés technologiques comme les installations d'énergie renouvelable puisse gêner certaines personnes à cause de leur impact sur le paysage.

Ici, aucune habitation n'a vue sur ces panneaux. Ils sont placés dans une zone où il y a principalement des étudiants et des professeurs. Ces personnes sont souvent très favorables à ce type d'installation.

3.4.2.2 Sondage pour les étudiants de biologie (cf. [Annexe 13](#))

Afin de mieux comprendre l'impact de ces panneaux au niveau social, nous avons eu l'idée d'envoyer un sondage aux étudiants de la faculté de biologie car ce sont les personnes qui sont, pour nous, les plus proches de ce projet. Ce sondage aborde plusieurs domaines comme l'esthétisme, l'utilité de ces panneaux ou encore pourquoi ils sont placés contre l'escalier. Nous avons reçu 140 réponses à ce sondage en 6 jours. Ceci prouve que les étudiants s'intéressent sérieusement à ce projet.

En analysant les réponses aux questions ouvertes, nous pouvons conclure que les étudiants apprécient ce projet pour la plupart. D'autres auraient sûrement préféré que l'argent investi dans ce projet serve à rénover les autres bâtiments de l'UR. Beaucoup d'entre eux expliquent que certains locaux manquent sérieusement d'isolation et donc, que leur rénovation est prioritaire à leurs yeux.

De plus, il semblerait que les étudiants n'aient pas beaucoup de renseignement sur ce projet. En effet, ils déclarent qu'ils n'ont pas eu de visite organisée ou bien de conférence à propos de ces panneaux PV. Il est étonnant de se rendre compte que la plupart des étudiants ne savent pas pourquoi les panneaux sont placés contre l'escalier et ils ne savent pas non plus à quoi sert l'électricité produite. Les étudiants qui connaissent un peu plus le projet ont fait preuve de curiosité. Il est dommage que l'UR n'ait pas plus communiqué sur le projet.

3.4.3. Aspect économique

Lors de notre visite de l'installation, l'ingénieur responsable du projet a précisé le prix du projet : 227 774 €. Nous nous sommes intéressés dans cette partie au financement de ce projet et à son amortissement.

3.4.3.1 Subventions

Afin de promouvoir l'installation de panneaux PV, l'État français met en place des aides financières. Nous avons cherché comment l'installation avait pu être financée. L'ingénieur responsable du projet nous a informé que l'UR avait bénéficié d'un Contrat Plan État-Région avec la Région Haute-Normandie dans le cadre de la rénovation de l'ancien bâtiment de biologie.

3.4.3.2 Rachat EDF

L'EDF a l'obligation de racheter l'électricité produite en totalité que ce soit celle d'un particulier ou non. Cela a pour but d'encourager la filière PV. Cependant, le prix de rachat par EDF dépend de différents paramètres comme le type d'installation. En effet, le prix de rachat n'est pas le même pour 1 watt produite grâce à l'énergie éolienne que pour 1 watt produit grâce à l'énergie solaire.

En ce qui concerne l'énergie solaire PV, il y a encore des différences comme l'endroit où est implantée l'installation ou encore si elle est intégrée au bâti ou non.

Ici, le prix de rachat est de 30 c€/kWh pour la France métropolitaine et 25 c€/kWh en plus grâce au fait que l'installation soit intégrée au bâti. Donc, au total, le prix de rachat pour cette installation est de 55 c€/kWh.

De plus, il faut savoir qu'un contrat est signé entre EDF et le propriétaire de l'installation. Pour les panneaux PV, la durée du contrat est de 20 ans.

Nous pouvons remarquer que le prix de rachat pour les panneaux PV est bien plus élevé que pour toutes les autres énergies renouvelables. Par exemple, il est de 8,2 c€/kWh pour l'éolien ou 12 c€/kWh pour la géothermie.

3.4.3.3 Bilan financier

Cf. [Annexe 14](#). Pour les autres données, il s'agit d'un ordre de grandeur réalisé à partir de réels devis adaptés au site de MSA.

Un site de simulation SunSim (cf. [Annexe 9](#)), nous propose d'estimer la production en énergie par an, et ainsi d'en déduire le revenu approximatif de l'électricité achetée par EDF. De plus, nous avons vu dans la partie 3.3 que la simulation de production de ce site était acceptable.

Ainsi une telle installation devrait rapporter à l'UR : **12 786 €/an**. Ainsi le retour sur investissement sans les subventions est d'un peu moins de 18 ans. On peut noter que l'UR est alors assurée de ce retour par le contrat de 20 ans avec EDF.

Enfin, il est important de prendre en note que l'intégralité du projet à été subventionné par la Région Haute-Normandie, l'État (CPER), le Conseil Scientifique de l'UR.

3.4.3.4 Raccordement au réseau

Pour se raccorder au réseau EDF et ainsi, injecter de l'électricité dans celui-ci, un contrat est indispensable entre ERDF et le propriétaire de l'installation. Il faut suivre une démarche précise décrite sur le site précisé dans la bibliographie.

3.4.3.5 *Entretien et maintenance*

La question de l'entretien fait polémique car suivant la propreté des panneaux, le rendement ne sera pas le même. En effet, on peut trouver de nombreux sites sur Internet qui conseillent aux personnes possédant une installation PV d'effectuer un entretien régulier et d'autres affirment que, dans nos régions, les précipitations seules peuvent suffire au nettoyage des panneaux.

Par exemple, nous avons remarqué que la société Clearama répondait sur beaucoup de forums et nous avons donc envoyé une demande de devis en précisant les caractéristiques de l'installation. Ils nous ont répondu que l'installation devait être nettoyée deux fois par an et que le montant d'une intervention était de 325 € HT. L'UR a fait le choix de ne pas nettoyer ses panneaux. Il faut préciser que ceux qui conseillent le nettoyage régulier des panneaux sont ... des entreprises de nettoyage !

L'installation électrique demande un peu plus d'entretien mais il est rare que l'onduleur tombe en panne avant 10 ou 12 ans de fonctionnement.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

4.1. Conclusions sur le travail réalisé

Notre étude sur le projet de l'UR nous a révélé que cette installation est bien adaptée au site. En effet les simulations réalisées montrent que la production d'énergie et le prix de revente (lié à l'intégration au bâti) permettent un retour sur investissement sans subventions assuré. De plus, l'installation n'est pas passée inaperçue (tout du moins auprès de la communauté étudiante), même si on peut noter un manque de communication autour du projet. Ce dernier a donc globalement su atteindre les objectifs fixés.

D'un point de vue écologique, il faut cependant nuancer. La production photovoltaïque n'est pas totalement « propre ». L'énergie produite est certes moins directement génératrice de CO₂, mais la quantité de gaz à effet de serre générée par la production et le transport des panneaux n'est pas négligeable. Cette quantité est variable selon le pays de fabrication et le sujet porte encore à polémique. On se doit également de prendre en compte les autres agents polluants associés à la fabrication d'une cellule PV qui sont cependant recyclés à plus de 70 %.

4.2. Conclusions sur l'apport personnel

Valentin

« Personnellement, j'ai trouvé très intéressant de travailler sur un tel projet car des panneaux PV représentent l'une des principales alternatives dans le domaine des énergies renouvelables, l'environnement étant l'enjeu le plus important actuellement. En effet, cela m'aura permis d'accroître mes connaissances mais surtout de me rendre compte de la réalité d'une installation et c'est ce côté concret du projet qui m'a le plus séduit. Qui plus est, me destinant au département Génie Civil, je serais peut-être amené dans l'avenir à devoir m'occuper de bâtiments avec panneaux solaires. Enfin, il ne faut pas oublier qu'un tel projet permet de travailler en équipe ce qui est essentiel pour notre futur travail d'ingénieur. »

Louis

« Pour ma part le projet a été une très bonne expérience. En effet au niveau technique j'ai pu comprendre le fonctionnement d'un tel système et surtout connaître tous les éléments qui pouvaient influencer sur la production d'énergie électrique avec des panneaux PV. Par ailleurs j'ai pu découvrir les influences de cette source d'énergie sur l'environnement et son impact au niveau économique et social. Maintenant riche de ces connaissances, j'ai un avis plus juste sur les panneaux PV. Je serais sûrement amené comme beaucoup de citoyens à faire appel à cette source d'énergie qui est présente dans des projets très intéressants comme « Solar Impulse » (<http://www.solarimpulse.com/>).

Également ce projet m'a permis d'accroître ma capacité à mener un projet avec un groupe. Il fut très riche sur ce point avec une communication qui doit toujours être présente pour avancer rapidement et transmettre les informations qui pourraient servir aux autres membres du groupe. »

Amandine

« Je pense avoir beaucoup appris de l'aspect humain du projet de P6-3. Venant tous de groupes différents, nous avons dû apprendre à nous connaître et à travailler ensemble pour être le plus efficace possible. Nous avons donc dû nous adapter (qualité souvent requise dans le métier d'ingénieur) afin de profiter des capacités de tous. De même, l'autonomie de cette EC est bénéfique car elle nous a appris que gérer son temps est un des point fort de la réussite d'un projet.

Du point de vue de notre sujet de P6-3, ayant déjà travaillé sur l'écologie et les panneaux solaires lors de la réalisation de dossier d'actualité, il m'a été bénéfique de pouvoir appliquer mes notions théoriques sur une réelle réalisation, et ainsi de mieux comprendre le fonctionnement de l'énergie solaire. »

Olivier

«J'ai trouvé ce projet très intéressant étant donné qu'il m'a permis de travailler sur l'énergie PV, énergie renouvelable qui est amenée à connaître un fort développement dans les années futures. Tout au long de ce projet j'ai pu découvrir le fonctionnement d'une installation PV, ses aspects économiques et sociaux. Ce projet a également été l'occasion d'aller à la rencontre d'un ingénieur s'occupant de l'installation présente sur le site de MSA.

De plus, ce projet m'a permis de me familiariser avec des logiciels de simulation PV.

Enfin, dernier point et non des moindres, le projet a été l'occasion de travailler en équipe. En tant qu'élève ingénieur, ceci n'est pas à négliger étant donné que l'ingénieur est souvent amené à travailler en équipe lors de projets.»

Manon

« Ce projet a été bénéfique dans différents domaines.

Tout d'abord, il m'a permis de travailler en équipe avec 5 autres personnes. En général, les équipes sont plus réduites et donc l'organisation est plus simple. Ici, je pense que l'on a réussi à mettre en place une bonne organisation qui nous a permis d'être efficaces.

De plus, le sujet sur lequel nous avons à faire notre projet (les panneaux PV) était un sujet qui m'intéressait mais ma connaissance à ce propos n'était pas suffisante selon moi. Après ce projet, je peux dire que je connais les fondamentaux des panneaux PV, tant au niveau de la théorie que de la simulation de la production sur ordinateur, ou encore en ce qui concerne les aspects économiques, sociaux ou environnementaux.

Enfin, j'ai beaucoup apprécié le fait que cette étude n'était pas que théorique, mais qu'elle reposait sur une réelle installation proche de notre école. »

Vincent

« Du point de vue de la forme, une grande réussite du projet je trouve a été la gestion de la répartition des tâches et du temps imparti. Nous avons réussi très tôt à nous entendre, à être rapides et efficaces et c'est un bon exemple pour une conduite de projet future.

Du point de vue du fond, j'ai « découvert » l'énergie photovoltaïque sous tous ses aspects (techniques, économiques et environnementaux principalement). Je me sens maintenant conscient des enjeux de ce type de production d'énergie (conditions, avantages, inconvénients, coûts etc.) autant pour un particulier que pour une collectivité. J'ai beaucoup apprécié le côté concret de l'étude qui nous a motivés à fournir un résultat complet. »

4.3. Perspectives pour la poursuite de ce projet

Nous pensons qu'il y a plusieurs perspectives de poursuite de ce projet. Les étudiants pourraient ajouter à ce dossier une étude comparative avec d'autres énergies (renouvelables ou non) dont la production pourrait être mise en place sur le même lieu.

Une **partie expérimentale** pourrait être intégrée au projet : l'INSA pourrait ainsi mettre à disposition des étudiants un panneau PV ou un pyranomètre (capteur de flux thermique permettant la mesure de la quantité d'énergie solaire) afin d'effectuer des tests sur la période du projet.

Par ailleurs nous estimons qu'il serait particulièrement intéressant de réaliser une **étude de faisabilité** d'une installation PV sur le site de l'INSA de Rouen. Ce projet consisterait à trouver les emplacements idéaux pour une installation PV en réalisant des simulations pour obtenir un rendement optimal tout en assurant un coût minimal.

5. BIBLIOGRAPHIE

5.1. Ouvrages

Bernard Wiesenfeld, « L'énergie en 2050 : Nouveaux défis et Faux espoirs »
Jacques Percebois, « L'énergie solaire : Perspectives économiques »
Robert Dautray, « Quelles énergies pour demain ? »
Claude Ronneau, « Energie, pollution de l'air et développement durable »
Jean-Louis Bobin, « L'énergie de demain : Techniques – environnement – économie »

5.2. Périodiques

Le Moniteur - Octobre 2007
Sciences & Vie n°241
Sciences & Vie n°1090
The Scientist n°451

5.3. Sites Internet

5.3.1. *Relatifs à la partie 3.1*

http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolta%C3%AFque
<http://www.panneauphotovoltaique.com/rendement.html>
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps/pvest.php?lang=en&map=europe>
<http://pagesperso-orange.fr/solar-project/experience.htm>
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Pyranom%C3%A8tre>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Pyranometer>

5.3.2. *Relatifs à la partie 3.3*

http://www.sharp.fr/cps/rde/xchg/fr/hs.xsl/-/html/le_photovoltaique.htm
<http://www.sma-france.com>
<http://www.macoda.com>
<http://www.pvsyst.com>
<http://www.transenergie.eu/carte-simulation-photovoltaique.php>
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

5.3.3. *Relatifs à la partie 3.4*

<http://www.simsun.fr/>

<http://www.photovoltaique.info/>

<http://transenergie.fr/simulation-photovoltaique.php>

<http://mon-energie-solaire.com/panneaux-solaires-analyse-de-leur-cycle-de-vie/>

<http://www.energies-nouvelles.net/outil-calcul-rendement-panneau-photovoltaique-4.html>

http://www.seine-maritime.gouv.fr/IMG/pdf_CPER20072013.pdf (page 26)

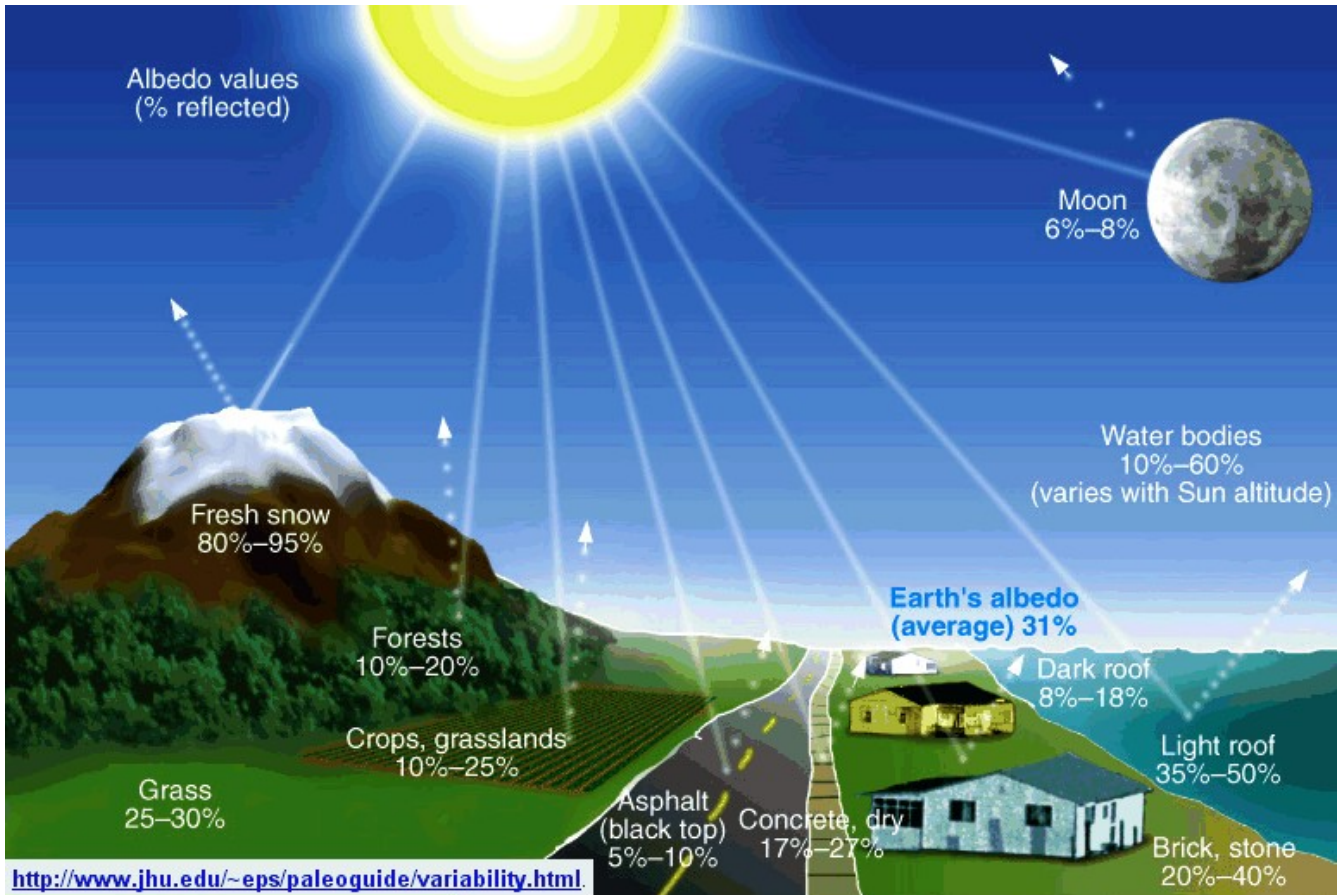
<http://fr.edf.com/obligations-d-achat/contrat-et-tarifs-d-achat-48663.html>

http://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/NOP-RES_55_v7_fev08.pdf

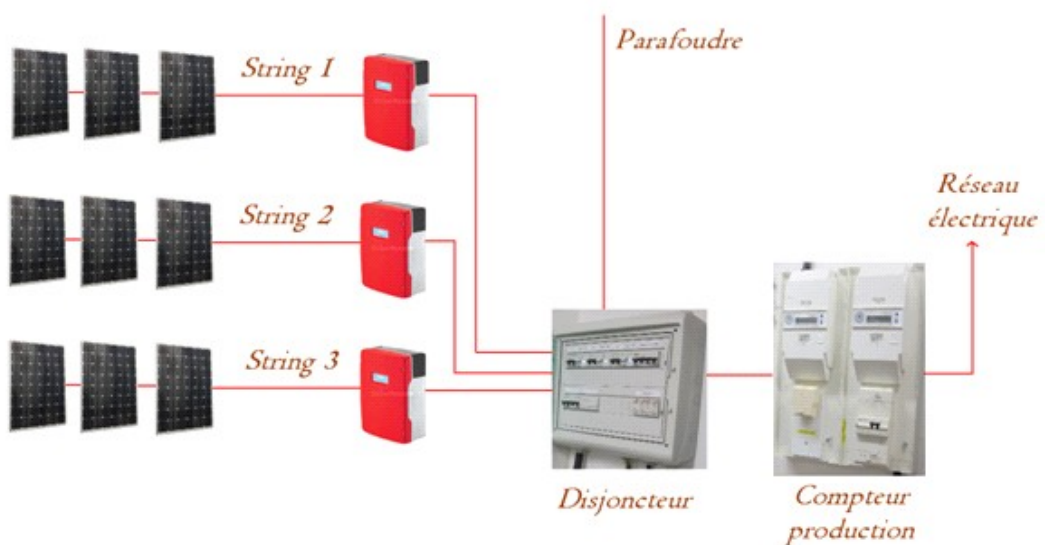
http://www.alterpro.fr/FAQ_Alterpro.html#q6

6. ANNEXES

6.1. Annexes relatives à la partie 3.1



Annexe 1 : Valeur de l'albédo suivant l'environnement



Installation photovoltaïque de l'Université des Sciences de Mont Saint Aignan

6.2. Annexes relatives à la partie 3.3

Lieu

Nom du site


Pays Région

Latitude ° (+= Nord, -= Hemisph. Sud)

Longitude ° (+= Est, -= Ouest de Greenwich)

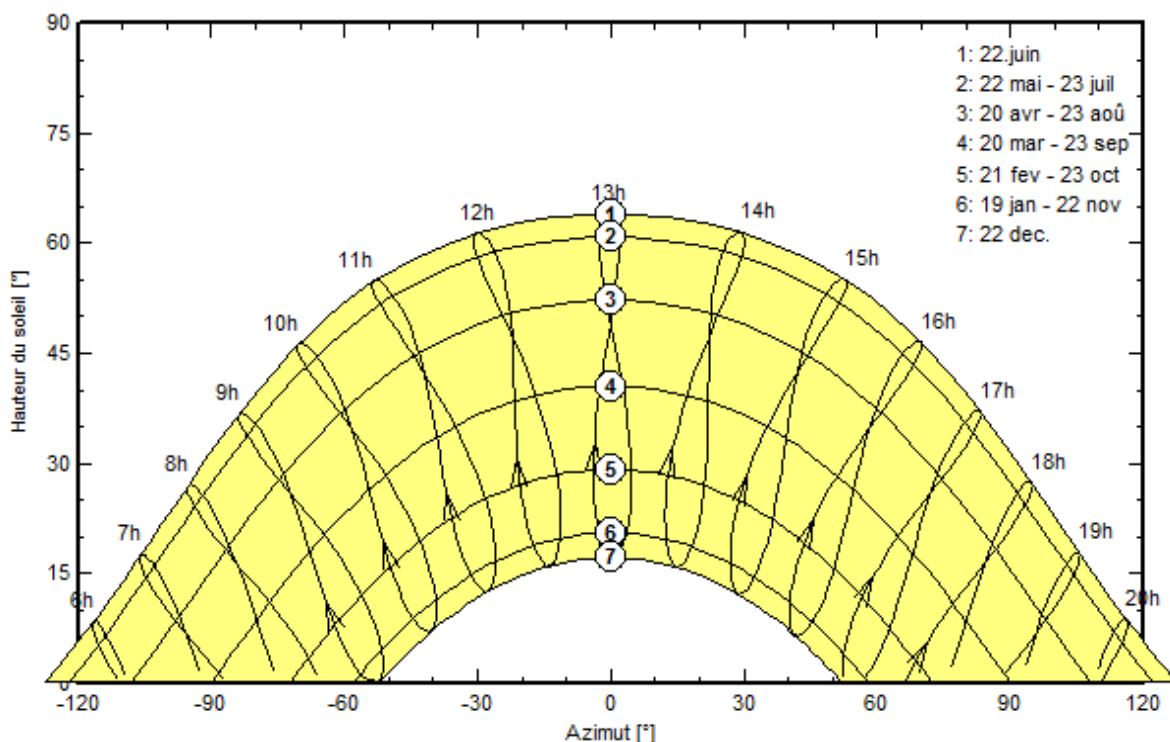
Altitude M au-dessus du niv. de la mer

Fus. horaire Correspondant à une différence moyenne

Temps Légal - Temps Solaire = 1h 0m 

Annexe 3 : Situation géographique de l'installation entrée en paramètres du logiciel PVSYST

Trajectoire du soleil à Mont Saint-Aignan, (Lat. 49.5°N, long. 0.1°E, alt. 147 m)



Annexe 4 : Trajectoire du soleil à MSA en fonction de l'azimut

Système couplé au réseau: Paramètres de simulation

Projet : **Projet PV couplé au réseau at Mont-Saint Aignan**

Site géographique **Mont-Saint Aignan** **Pays** **France**

Situation Latitude 49.5°N Longitude 0.1°E
 Temps défini comme Temps légal Fus. horaire TU+1 Altitude 147 m
 Albédo 0.20

Données météo : Mont-Saint Aignan, Données horaires synthétiques

Variante de simulation : **Nouvelle variante de simulation**

Date de la simulation 03/06/10 à 22h08

Paramètres de simulation

Orientation plan capteurs Inclinaison 90° Azimut 0°

Horizon Pas d'horizon

Ombrages proches Sans ombrages

Caractéristiques du champ de capteurs

Module PV	Si-mono	Modèle	NU-180E1		
		Fabricant	Sharp		
Nombre de modules PV		En série	19 modules	En parallèle	9 chaînes
Nombre total de modules PV		Nbre modules	171	Puissance unitaire	180 Wc
Puissance globale du champ		Nominale (STC)	31 kWc	Aux cond. de fonct.	27 kWc (50°C)
Caractéristiques de fonct. du champ (50°C)		U mpp	392 V	I mpp	69 A
Surface totale		Surface modules	224 m²	Surface cellule	198 m ²

Onduleur		Modèle	Sunny Mini Central 10000 TL		
		Fabricant	SMA		
Caractéristiques	Tension de fonctionnement	333-500 V	Puissance unitaire	10.0 kW AC	
Batterie d'onduleurs	Nombre d'onduleurs	3 unités	Puissance totale	30.0 kW AC	

Facteurs de perte du champ PV

Fact. de pertes thermiques	Uc (const)	20.0 W/m ² K	Uv (vent)	0.0 W/m ² K / m/s
=> Tempér. de fonct. nominale (G=800 W/m ² , Tamb=20°C, Vit. vent = 1m/s.)	NOCT	56 °C		
Perte ohmique de câblage	Rés. globale champ	97 mOhm	Frac. pertes	1.5 % aux STC
Perte de qualité module			Frac. pertes	2.5 %
Perte de "mismatch" modules			Frac. pertes	2.0 % au MPP
Effet d'incidence, paramétrisation ASHRAE	IAM =	1 - bo (1/cos i - 1)	Paramètre bo	0.05

Besoins de l'utilisateur : Charge illimitée (réseau)

Système couplé au réseau: Résultats principaux

Projet : **Projet PV couplé au réseau at Mont-Saint Aignan**

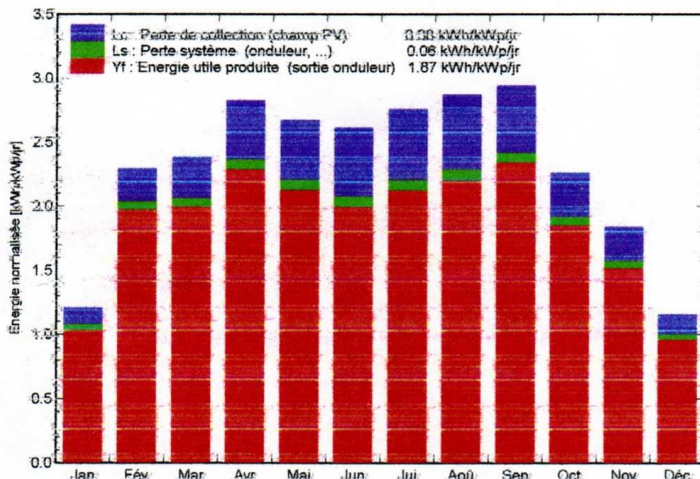
Variante de simulation : **Nouvelle variante de simulation**

Principaux paramètres système	Type de système	Couplé au réseau	
Orientation plan capteurs	inclinaison	90°	azimut 0°
Modules PV	Modèle	NU-180E1	Pnom 180 Wc
Champ PV	Nombre de modules	171	Pnom total 31 kWc
Onduleur	Modèle	Sunny Mini Central 10000	Pnom 10 kW ac
Batterie d'onduleurs	Nombre d'unités	3.0	Pnom total 30 kW ac
Besoins de l'utilisateur	Charge illimitée (réseau)		

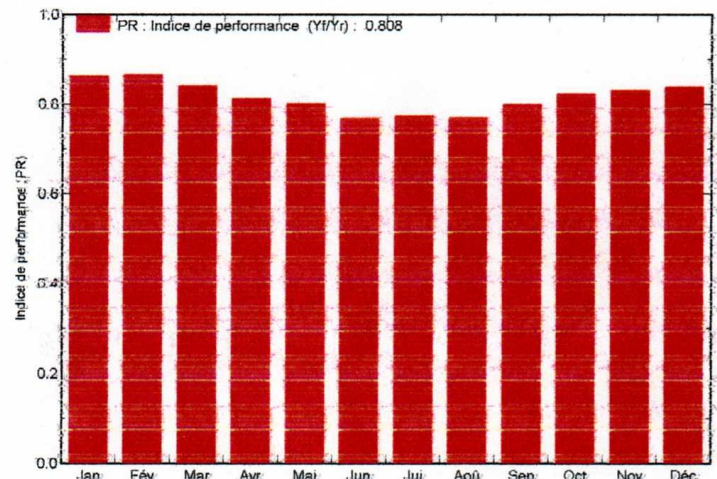
Principaux résultats de la simulation

Production du système	Energie produite	21.01 MWh/an	Productible	682 kWh/kWc/an
	Indice de performance (PR)	80.8 %		

Productions normalisées (par kWp installé): Puissance nominale 31 kWc



Indice de performance (PR)



Nouvelle variante de simulation

Bilans et résultats principaux

	GlobHor	T Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	EffArrR	EffSysR
	kWh/m²	°C	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	%	%
Janvier	24.7	0.70	37.34	36.41	1031	991	12.33	11.85
Février	47.1	3.60	64.12	62.14	1756	1706	12.23	11.87
Mars	77.9	6.30	73.80	70.90	1971	1909	11.92	11.54
Avril	120.8	11.40	84.64	80.19	2181	2114	11.50	11.15
Mai	146.2	13.20	82.69	77.59	2108	2036	11.38	10.99
Juin	160.0	16.20	78.27	72.85	1917	1847	10.93	10.53
Juillet	163.8	17.90	85.39	79.62	2102	2031	10.99	10.61
Août	138.7	18.80	88.92	83.51	2181	2105	10.95	10.57
Septembre	98.2	16.00	88.15	84.05	2233	2167	11.31	10.97
Octobre	58.8	12.00	69.98	67.76	1830	1771	11.67	11.30
Novembre	33.1	9.60	55.17	53.88	1454	1408	11.76	11.39
Décembre	19.1	3.30	35.80	34.99	960	923	11.97	11.51
Année	1088.5	10.78	844.27	803.88	21724	21007	11.49	11.11

Légendes:	GlobHor	Irradiation globale horizontale	EArray	Energie effective sortie champ
	T Amb	Température ambiante	E_Grid	Energie injectée dans le réseau
	GlobInc	Global incident plan capteurs	EffArrR	Effic. Eout champ / surf. brute
	GlobEff	Global "effectif", corr. pour IAM et ombrages	EffSysR	Effic. Eout système / surf. brute

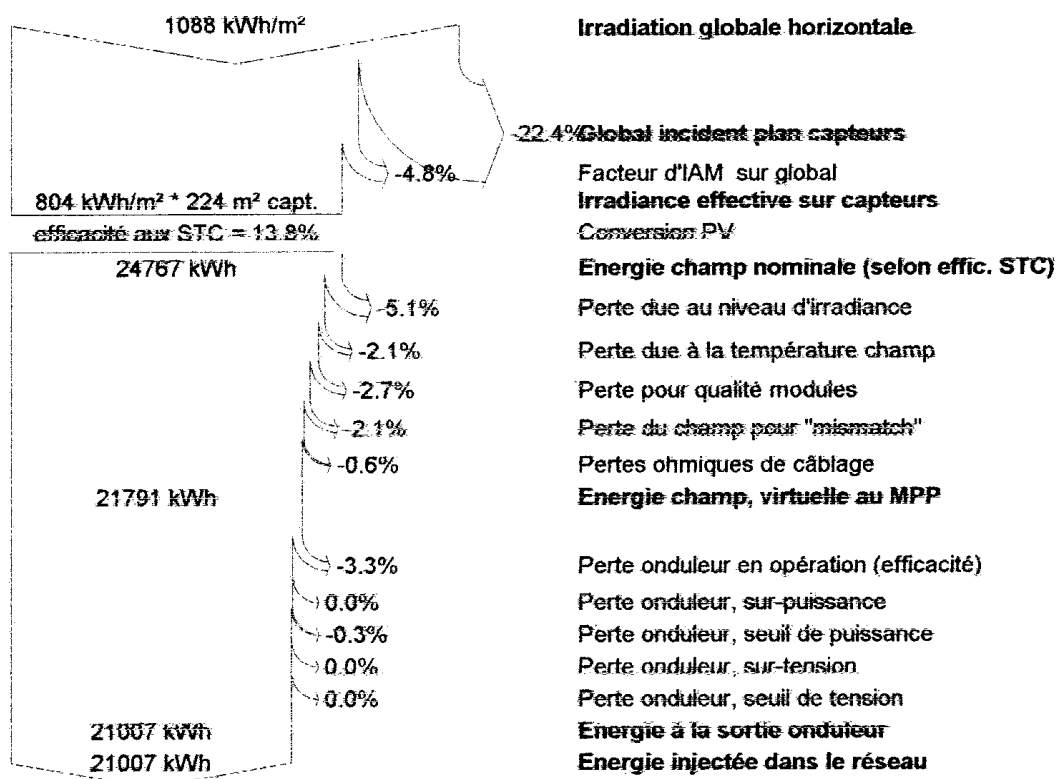
Système couplé au réseau: Diagramme des pertes

Projet : **Projet PV couplé au réseau at Mont-Saint Aignan**

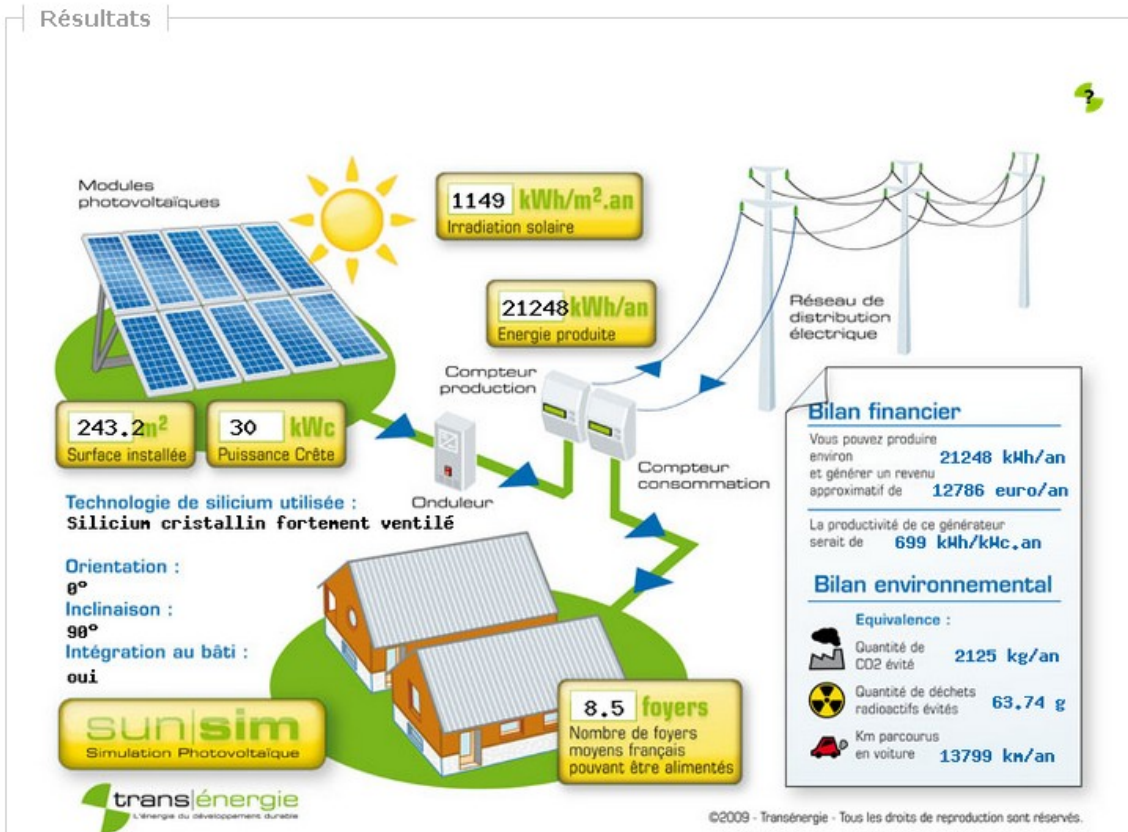
Variante de simulation : **Nouvelle variante de simulation**

Principaux paramètres système	Type de système	Couplé au réseau	
Orientation plan capteurs	inclinaison	90°	azimut 0°
Modules PV	Modèle	NU-180E1	Pnom 180 Wc
Champ PV	Nombre de modules	171	Pnom total 31 kWc
Onduleur	Modèle	Sunny Mini Central 10000 Pnom	10 kW ac
Batterie d'onduleurs	Nombre d'unités	3.0	Pnom total 30 kW ac
Besoins de l'utilisateur	Charge illimitée (réseau)		

Diagramme des pertes sur l'année entière



SunSim - Simulation de projet photovoltaïque



Rappel des hypothèses:

Technologie de silicium : Silicium cristallin fortement ventilé
 In entrant solaire, à l'horizontale (sans masque solaire) : 1149 kWh/m².an
 Orientation : 0°
 Inclinaison : 90°
 Puissance crête désirée : 30.4 kWc
 Intégration au bâti : oui

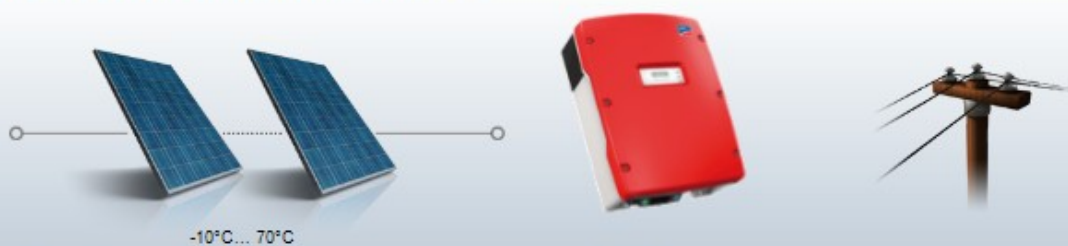
Estimation:

Vous pouvez produire environ **21248 kWh / an** et générer un revenu approximatif de **12786 € / an**.
 Pour cela, il vous faudra environ **243.2 m²**.
 La productivité de ce générateur serait de **699 kWh/kWc.an**.

Equivalence:

Quantité de CO2 non rejeté dans l'atmosphère	2125 kg/an
Quantité de déchet radioactifs évités	63.74 g
Equivalent en km d'un parcours d'une voiture particulière	13799 km/an
Nombre de foyers moyens français pouvant être alimentés	8.5 foyers

Annexe 8 : Résultats du logiciel SunSim

Aperçu du système (France / Paris)

String A

Sharp
 NU-180 (E1)
 Panneaux x string :
 19 x 3
 Inclinaison/azimut:
 90° / 0°

Onduleur

3 x Sunny Mini Central 10000TL
 Taux de rendement max. : 98,1 %
 Rendement énergétique européen: 97,7 %
 Puissance max. AC : 10,00 kW
 Puissance DC max. : 10,35 kW

Données techniques

Puissance DC de pointe de l'onduleur : 30,78 kW
 Nombre total de panneaux: 171
 Surface tot. du générateur PV: 228,0 m²
 Nombre d'onduleurs: 3
 Puissance DC max. : 31,05 kW
 AC-Puissance effective max.: 30,00 kW
 Taux d'utilisation de l'onduleur: 96,2 %

Rapport de puissance nominale: 101 %
 Rendement énergétique annuel *: 16757,3 kWh
 Facteur d'exploitation de l'énergie: 99,8 %
 Ratio de performance *: 78 %
 Rendement énergétique spécifique *: 544 kWh/kWp
 Pertes dues aux câbles (% en énergie PV): Non compte

Annexe 9 : Simulation logiciel SMA

JRC EUROPEAN COMMISSION
Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps

EUROPA > EC > JRC > IES > RE > SOLAREC > PVGIS > Interactive maps >

Contact **Important legal notice**

Europe Africa

e.g., "Ispra, Italy" or "45.256N, 16.9589E"

rouen

cursor position: 49.464, 1.085
 selected position: 49.460, 1.073

Map data ©2010 Tele Atlas - [Terms of Use](#)

POWERED BY Google

Solar radiation Temperature Other maps

PV Estimation Monthly radiation Daily radiation

Performance of Grid-connected PV

PV technology: Crystalline silicon

Installed peak PV power 30.4 kWp

Estimated system losses [0;100] 0.9 %

Fixed mounting options:

Mounting position: Free-standing

Slope [0;90] 90 ° Optimize slope

Azimuth 0 ° Also optimize azimuth

(Azimuth angle from -180 to 180. East=-90, South=0)

Tracking options:

Vertical axis Slope [0;90] 0 ° Optimize

Inclined axis Slope [0;90] 0 ° Optimize

2-axis tracking

Output options

Show graphs Show horizon

Web page Text file PDF

[\[help\]](#)

Annexe 10 : Paramètres à rentrer dans le logiciel PVGIS

Performance of Grid-connected PV

PVGIS estimates of solar electricity generation

Location: 49°27'37" Nord, 1°4'24" Est, Elevation: 143 m a.s.l.,

Nominal power of the PV system: 30.4 kW (crystalline silicon)

Estimated losses due to temperature: 10.4% (using local ambient temperature)

Estimated loss due to angular reflectance effects: 4.4%

Other losses (cables, inverter etc.): 0.9%

Combined PV system losses: 15.2%

Fixed system: inclination=90 deg., orientation=0 deg.				
Mois	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	36.30	1120	1.32	41.0
Fev	58.20	1630	2.13	59.6
Mar	67.40	2090	2.53	78.5
Avr	73.10	2190	2.84	85.3
Mai	65.40	2030	2.62	81.2
Jun	60.50	1820	2.53	75.8
Jul	65.80	2040	2.73	84.7
Aug	71.70	2220	2.92	90.6
Sep	74.00	2220	2.92	87.7
Oct	63.40	1960	2.43	75.3
Nov	49.70	1490	1.82	54.6
Dec	29.20	907	1.06	32.9
Year	59.50	1810	2.32	70.6
Total for year		21700		847

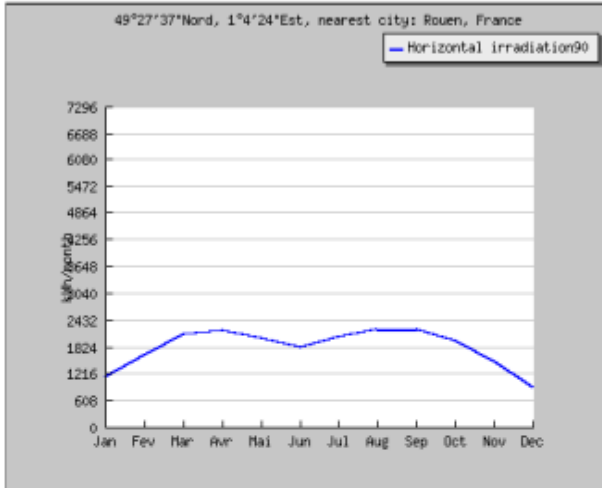
Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh)

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh)

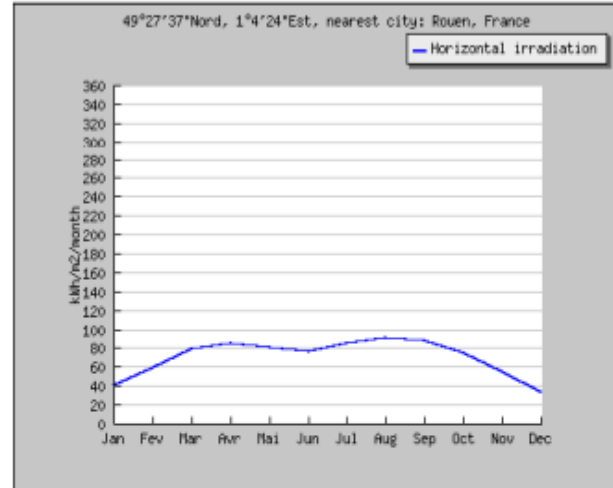
Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)

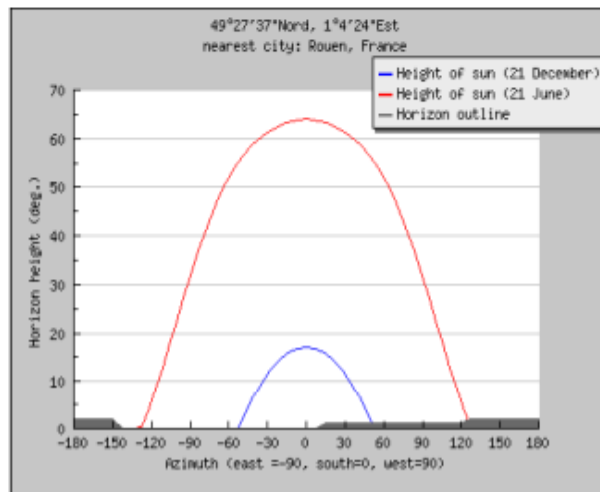
Annexe 11 : Résultats du logiciel PVGIS



Monthly energy output from fixed-angle PV system



Monthly in-plane irradiation for fixed angle



Outline of horizon with sun path for winter and summer solstice

PVGIS (c) European Communities, 2001-2008

Reproduction is authorised, provided the source is acknowledged.

<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

Disclaimer:

The European Commission maintains this website to enhance public access to information about its initiatives and European Union policies in general. However the Commission accepts no responsibility or liability whatsoever with regard to the information on this site.

This information is:

- of a general nature only and is not intended to address the specific circumstances of any particular individual or entity;
- not necessarily comprehensive, complete, accurate or up to date;
- not professional or legal advice (if you need specific advice, you should always consult a suitably qualified professional).

Some data or information on this site may have been created or structured in files or formats that are not error-free and we cannot guarantee that our service will not be interrupted or otherwise affected by such problems. The Commission accepts no responsibility with regard to such problems incurred as a result of using this site or any linked external sites.

6.3. Annexes relatives à la partie 3.4

Et.	Energie finale		Matériaux	Consommables	Rejets
	#	kWhe			
1	Raffinage du silicium				
	pour 1 kg de MG-Si (équiv. 95 Wc)				
Poly-Si	14		sable : ± 3 kg	Charbon, houille, coke, bois : 2,6 kg Graphite	poussières fines
	pour 1 kg de poly-Si procédé Siemens (équiv. 108 Wc)				
	100	51	MG-Si : 1,13 kg	Produits chimiques : 2 kg	produits chlorés
2	Cristallisation du silicium et mise en forme des plaques				
	pour 1 m ² de mc-Si à 240 um (équiv. 140 Wc)				
Plaques	30	1	poly-Si : 1,3 kg	Eau : 65 L Produits chimiques et gaz : 3,7 kg Creuset quartz : 0,4 kg Câble acier, abrasif SiC : 4,1 kg	silicium, slurry, câble, creuset
	Fabrication des cellules				
Cellules	pour 156x156 mm à 285 um (équiv. 3,6 Wc)				
	0,74	0	mc-Si : 1,06 plaque	Eau : 27 L Produits chimiques et gaz : 0,06 kg Polystyrène (emballage) : 10.10 ⁻⁶ kg	gaz à effet de serre, solvants organiques, émissions fluorées, effluents acides et basiques, cellules pv
4	Assemblage des modules				
	pour 60 cellules (équiv. 220 Wc)				
Modules	10,7		61,2 cellules pv Al, boîte jonction, verre, EVA, tedlar, Cu, silicone	Eau : 34 L Solvants organiques : 0,035 kg Carton (emballage) : 1,75 kg	cellules pv, EVA, tedlar

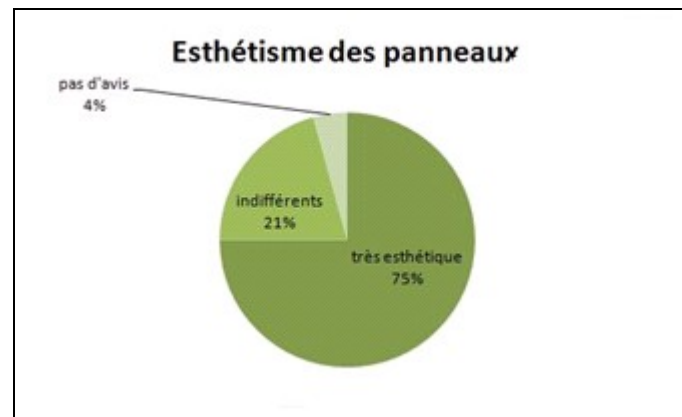
Annexe 12 : Impact environnemental de la fabrication d'un panneau PV

Annexe 13 : Résultat du sondage auprès des étudiants de biologie



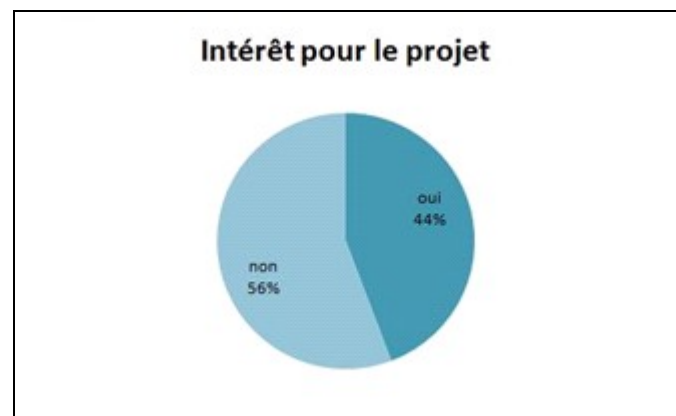
Tout d'abord, nous avons pensé qu'il fallait leur demander s'ils avaient pris connaissance du projet. Nous avons pu remarquer que 2% des étudiants ont déclaré qu'ils ne savaient pas qu'il y avait des panneaux PV dans leur faculté.

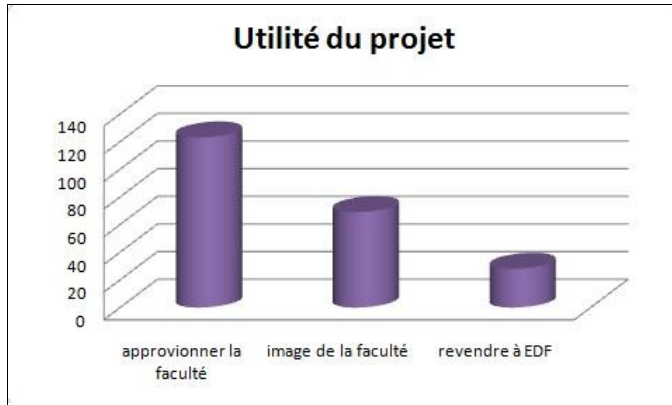
Ensuite, nous avons souhaité recueillir leur avis d'un point de vue esthétique. En effet, pour un projet si important l'aspect esthétique est très important car, s'il est déprécié, cela pourrait entraîner un mauvais impact sur le paysage. Ici, nous pouvons remarquer que la plupart des étudiants trouvent les panneaux esthétiques. Ils pensent que ce projet est symbole de modernité et de respect de l'environnement.



Puis, on a souhaité savoir si l'UR avait organisé des visites ou conférences afin d'intéresser les étudiants au projet. Il est vrai qu'un projet de cette envergure n'existe pas dans toutes les universités et que c'est une réelle chance pour les étudiants de l'UR. Nous avons été étonnés de remarquer que très peu d'étudiants ont pu bénéficier de visites ou bien de conférences.

A la question suivante, nous avons voulu savoir si les étudiants s'intéressaient à l'écologie et au développement durable. Nous avons remarqué qu'il y avait presque autant d'étudiants qui s'y intéressaient que d'étudiants qui ne s'y intéressaient pas.

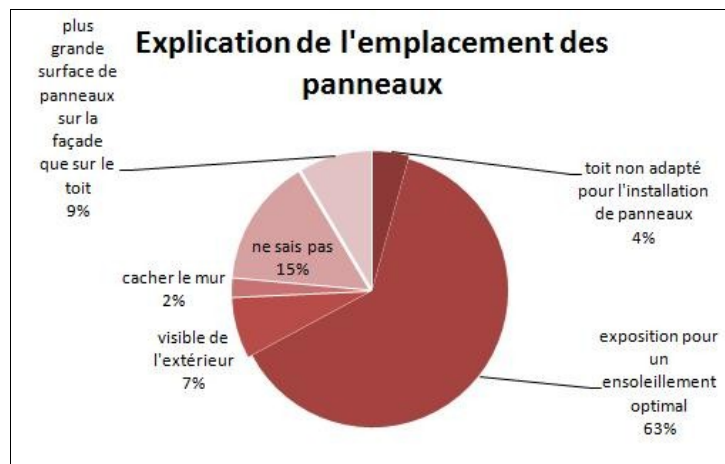




Lors de notre visite de l'installation, nous avons appris que l'électricité produite était entièrement revendue à EDF et donc, pas du tout utilisée dans les locaux. Nous avons donc voulu savoir si ces étudiants savaient où l'électricité produite allait et, plus largement, quel était le but de ce projet de panneaux PV. Ceci était posé sous forme de question fermée : quel est le but de ce projet ?

Nous pouvons donc nous rendre compte que la grande majorité des étudiants ne savent pas à quoi sert l'électricité produite. Seulement 20 étudiants sur 140 savent que cette électricité est directement revendue à EDF.

Enfin, nous leur avons demandé pourquoi les ingénieurs avaient choisi la façade pour installer ces panneaux. Encore une fois, très peu d'étudiants connaissent la vérité. En effet, la grande majorité des étudiants pense que cet emplacement a été choisi pour un ensoleillement optimal alors que l'ensoleillement optimal n'est jamais orienté à 90° ! Près de 10% des étudiants connaissent la raison qui est que les panneaux sont placés contre le mur pour cacher l'escalier de secours et par la même occasion pour les intégrer au bâti.



Désignation	Coût en €
Panneaux Solaires (*)	112770,00 €
Onduleurs et Armoire de raccordement et parafoudre (*)	9379,50 €
Disjoncteurs	1500,00 €
Structure de montage	34000,00 €
Main d'œuvre	18000,00 €
Echafaudage	33000,00 €
Aménagement local onduleur	1200,00 €
Câblage	5000,00 €
Passage des câbles	6000,00 €
Ingénierie	7000,00 €
Estimation	227849,50 €
Réel coût du projet	227774,00 €

Annexe 14 : Bilan financier de l'installation [() Prix réel calculé grâce aux catalogues de produits]*