

Projet de Physique P6
STPI/P6/2014 – Sujet 42

Solaire photovoltaïque : Principe et applications



Etudiants :

Charles DAGICOUR

Alice MATHIEU

Quentin SICARD

Charlotte LABROUSSE

Sarah PALMER

Enseignant-responsable du projet :

Jamil ABDUL AZIZ

Date de remise du rapport : *16/06/2014*

Référence du projet : *STPI/P6/2014 – 42*

Intitulé du projet : *Solaire photovoltaïque : Principe et applications*

Type de projet : *expérimental, bibliographique*

Objectifs du projet :

- *étudier et appréhender le fonctionnement d'un panneau solaire*
- *observer l'influence de la variation de l'éclairement en fonction de l'angle d'inclinaison du panneau et son orientation*
- *gestion d'un projet : sécurité, installations, autorisations, inventivité*
- *préparation pour le projet de l'année prochaine (support...)*

Mots-clefs du projet : *photovoltaïque – angles – rayonnement - puissance*

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction.....	5
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	6
3. Travail réalisé et résultats.....	7
3.1. Recherches bibliographiques.....	7
3.1.1. Généralités sur le photovoltaïque.....	7
3.1.2. Fonctionnement des panneaux photovoltaïques.....	8
3.1.3. Rayonnement, angles et orientation.....	8
3.1.4. Caractéristique d'un panneau solaire.....	10
3.2. Déroulement du projet.....	12
3.3. Matériel et mesures.....	14
3.3.1. Étude du panneau : caractéristiques, dimensions, description du matériel.....	14
3.3.2. Section de câble.....	14
3.3.3. Réalisation des mesures.....	15
3.3.4. Analyse des résultats.....	17
4. Conclusions et perspectives.....	19
5. Bibliographie.....	21
6. Annexes	23
6.1. Documentation technique.....	23
6.1.1. Les différents types de panneaux.....	23
6.1.2. Application du photovoltaïque.....	24
6.2. Schémas de montages, plans du support :.....	26
6.2.1. Plans du support :.....	26
6.2.2. Courbes caractéristiques de notre panneau :.....	31
6.2.3. Montages réalisés :.....	32
6.3. Propositions de sujets de projets	33

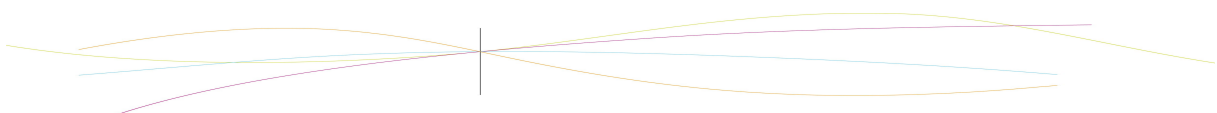
1. INTRODUCTION

Dans le cadre de notre formation d'ingénieur à l'INSA de Rouen, nous avons été amenés à réaliser un projet de physique par groupe de 5 étudiants. Le principal but de ce travail est de permettre aux étudiants d'appréhender la gestion d'un projet, ainsi que le travail en groupe et en autonomie. Trois notions importantes qui nous seront essentielles dans notre futur métier d'ingénieur. L'intérêt de ce projet est aussi de tester nos connaissances, jusqu'alors théoriques, de manière plus pratique. De plus, il permet à chaque étudiant d'acquérir des notions de physique sur un sujet bien précis.

Parmi les nombreux sujets de projets qui nous ont été proposés, nous avons choisis le thème « Solaire photovoltaïque: Principe et applications ». Il nous a paru intéressant d'étudier un sujet très actuel. En effet, l'énergie solaire photovoltaïque est en fort développement. Cette énergie électrique renouvelable progresse rapidement en termes d'efficacité et de baisse de coûts. En France, elle devrait être économiquement compétitive dans les prochaines années. Nous remarquons de plus en plus de panneaux solaires installés sur les toits de bâtiments et d'habitations, mais aussi d'objets fonctionnant grâce à des cellules photovoltaïques. Depuis quelques années, des centrales photovoltaïques ou « parcs solaires » ont été installés dans le monde entier. Environ 3500 W sont produits chaque seconde par des panneaux photovoltaïques dans le monde, soit une production de 104.5 TWh en 2012. En comparaison, la consommation française en électricité s'élève à 489,5 TWh en 2012. La part de la production d'électricité photovoltaïque dans la production mondiale était de 0,5 % et sa part dans la production électricité renouvelable de 2,2 %. Cependant, la production ne cesse d'augmenter d'année en année.

L'énergie solaire photovoltaïque étant en plein développement, nous avons voulu en comprendre le principe. Ce projet n'avait jamais été réalisé auparavant. Nous avons été très enthousiastes lorsque nous avons su que nous allions pouvoir tester un panneau solaire commandé spécialement pour ce nouveau projet. Un kit solaire photovoltaïque était à notre disposition. Notre objectif était de l'installer sur un toit de l'INSA afin d'effectuer des mesures. Nous avons par la suite décidé de concevoir un support inclinable pour le panneau solaire.

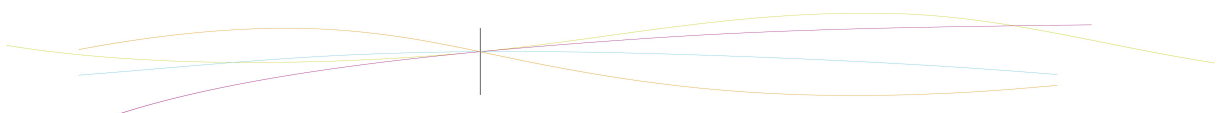
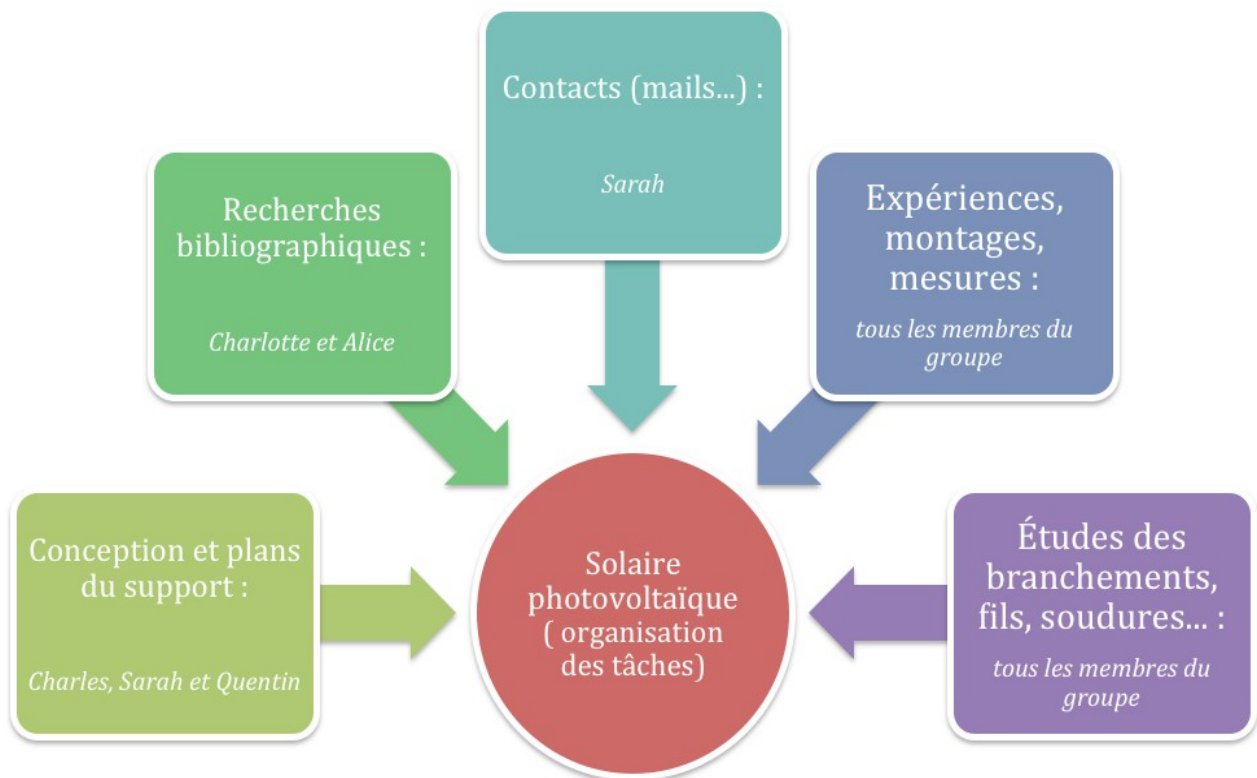
Parmi les différentes tâches effectuées lors de ce projet, une grande partie a été dédiée à la gestion. En effet, nous avons dû prendre beaucoup de contacts. Tout d'abord afin d'avoir l'autorisation d'accéder aux toits, puis avec les techniciens pour la conception de notre support mais aussi au niveau du fournisseur du kit solaire photovoltaïque. Enfin, nous avons rencontré de nombreuses difficultés lors de la réalisation de ce nouveau projet. Néanmoins, celles-ci ne nous ont pas empêchés de réaliser à la fois la gestion de projet et la partie expérimentale.



2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Au début de notre projet, nous avons décidé d'effectuer des recherches plutôt générales sur les panneaux solaires et sur le photovoltaïque afin d'approfondir nos connaissances sur le sujet. Ensuite nous nous sommes répartis les tâches concernant la partie théorique du rapport et la création de plans pour notre support.

Nous avons décidé de tous nous occuper des différentes tâches concernant les branchements, avec les soudures par exemple et les mesures expérimentales.



3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

3.1. Recherches bibliographiques

3.1.1. Généralités sur le photovoltaïque

· Énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque provient de la transformation d'une source d'énergie lumineuse en électricité.

Les cellules solaires et modules photovoltaïques sont des composants qui produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière.

On parle le plus souvent d'énergie solaire photovoltaïque puisque le soleil est la source la plus intense existante sur Terre. Cependant, on utilise aussi le terme d'énergie lumière car toute source lumineuse, naturelle comme artificielle, peut générer une énergie électrique à travers une cellule solaire.

· Effet photoélectrique (EPE)

L'effet photoélectrique correspond à l'ensemble des phénomènes électriques d'un matériau, le plus souvent métallique, provoqué par l'action de la lumière. On peut distinguer deux principaux effets : d'une part des électrons sont délogés du matériau, c'est ce qu'on appelle une émission photoélectrique. D'autre part, il apparaît une modification de la conductivité du matériau en question.

Un faisceau lumineux est un déplacement de petits corps porteurs d'énergie appelés «photons». Lorsqu'un matériau est soumis à un rayon lumineux, toute l'énergie des photons incidents est transmise aux électrons. En effet, extraire un électron d'un atome nécessite une quantité d'énergie minimale.

Il existe deux applications de l'effet photoélectrique : externe et interne. Nous allons nous intéresser à cette dernière. L'EPE se déroule dans un semi-conducteur, dans lequel les électrons ne peuvent se déplacer que si on leur apporte une certaine énergie pour les libérer de leurs atomes. Lorsque la lumière pénètre le semi-conducteur, les photons apportent cette énergie, leur permettant de se libérer et de se déplacer dans la matière. Il y a alors génération d'un courant électrique. Dans le cas des cellules photovoltaïques, celui-ci est alors récolté.

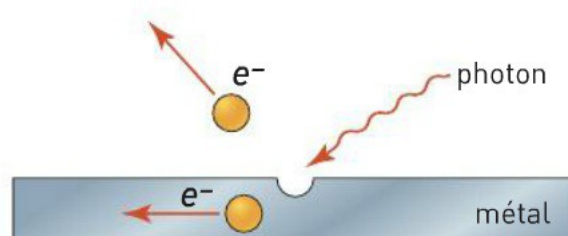
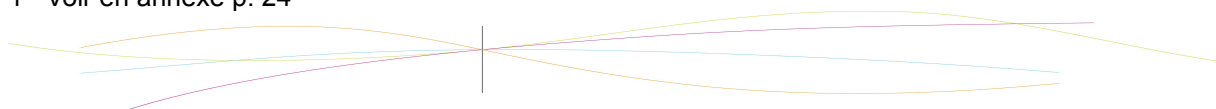


figure 1 :Schéma illustrant l'énergie photoélectrique

Il existe de nombreuses applications au photovoltaïque¹.

1 Voir en annexe p. 24



3.1.2. Fonctionnement des panneaux photovoltaïques

Tout d'abord, un photo-générateur est composé d'une plaque semi-conductrice. Le semi-conducteur le plus utilisé est le Silicium (Si) puisqu'il est présent en grande quantité sur Terre (dans le sable sous forme de silice et de silicates). On place ensuite sur chaque face de la tranche de silicium deux électrodes métalliques (+) et (-) afin de collecter le courant produit

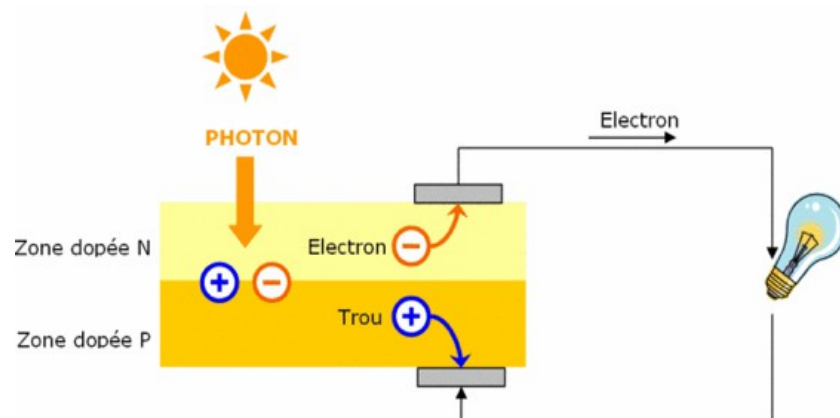
Il est important de créer une « force interne » pour attirer les électrons vers les électrodes et ainsi générer un courant électrique. On crée donc une différence de potentiel entre les électrodes en dopant les couches inférieures et supérieures de la tranche de silicium.

Sur la couche supérieure, on réalise un dopage de type n. On ajoute des atomes de phosphore (P). Ceux-ci contiennent plus d'électrons périphériques que les atomes de silicium.

Sur la couche inférieure, on effectue un dopage de type p. On ajoute des atomes de bore (B). Ceux-là contiennent moins d'électrons périphériques que les atomes de silicium.

On obtient alors une jonction p-n possédant un champ électrique interne afin d'entraîner les charges électriques lorsque la cellule est soumise à un rayonnement lumineux.

Quand un photon libère un électron, créant un électron libre et un trou, sous l'effet de ce champ électrique ils partent chacun à l'opposé : les électrons s'accumulent dans une couche dopée n (qui devient le pôle négatif), tandis que les trous s'accumulent dans la couche dopée p (qui devient le pôle positif).



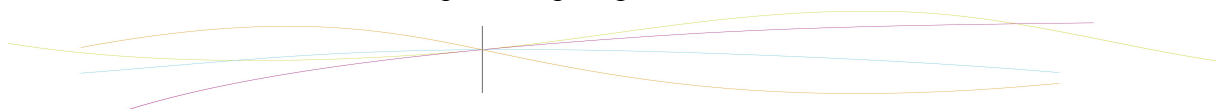
3.1.3. Rayonnement, angles et orientation

• Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Il les émet de manière isotrope, c'est à dire identique dans toutes les directions.

o Rayonnement direct et diffus

Le rayonnement global correspond à la somme d'un rayonnement direct, associé aux rayons solaires et d'un rayonnement diffus. Le rayonnement direct, par beau temps, est associé à une puissance beaucoup plus élevée que le rayonnement diffus. Ce dernier se manifeste lorsque le rayonnement solaire direct se disperse dans les nuages et les particules atmosphériques. Il résulte donc de la diffraction de la lumière par les nuages et les différentes molécules en suspension dans l'atmosphère, et de sa réfraction par le sol. Le rayonnement solaire est entièrement diffus lorsqu'on ne peut plus voir le soleil.



Par conséquent, une partie du rayonnement solaire existe même en présence de nuages, lorsqu'il fait jour.

figure 3 :Schéma du rayonnement global

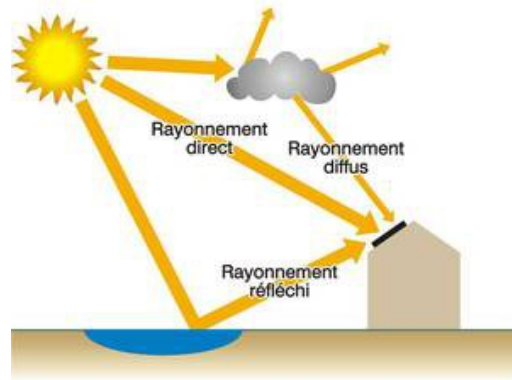
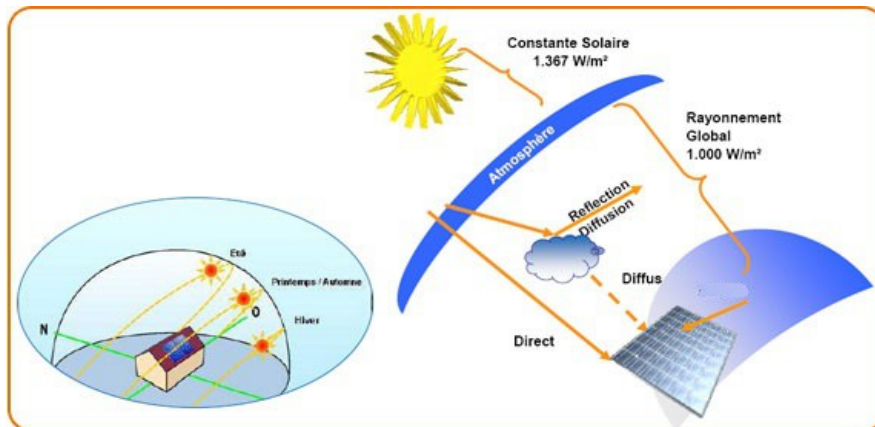


Tableau % de rayonnement disponible

A	B*	B*	C	D	D
Temps clair et ensoleillé	Brumeux	Nuageux*	Très nuageux	Couvert	Très couvert
~90% à ~115%	~85% à ~100%	~60% à ~120%	~30% à ~100%	~20% à ~60%	~10% à ~40%

*En réfléchissant la lumière, les nuages proches peuvent augmenter le rayonnement disponible.

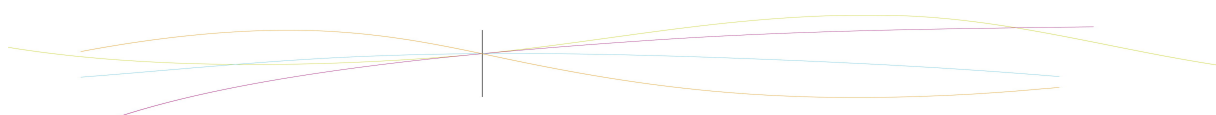
Pourcentages donnés par rapport à l'éclairement maximal moyen : 1000 W/m²



o Traversée de l'atmosphère

La distance du Soleil à la Terre est d'environ 150 millions de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300 000 km/s. Les rayons mettent donc environ 8 min à nous parvenir.

On appelle constante solaire la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au Soleil. Même si sa valeur varie selon la période de l'année à cause des variations de distance Terre/Soleil, on la prend en général égale à 1367 W/m².



Lorsque ce rayonnement traverse l'atmosphère, il subit des déperditions, à cause de l'absorption partielle due par les gaz atmosphériques. Par conséquent, le flux reçu sur la Terre est inférieur au flux initialement émis par le Soleil. Celui-ci dépend de l'épaisseur de la couche atmosphérique traversée et donc de l'angle d'incidence.. Ce flux est à peu près égal à 1000W/m² mais varie selon beaucoup de paramètres: période de l'année, de la journée, conditions climatiques...

• **Orientation et Angles**

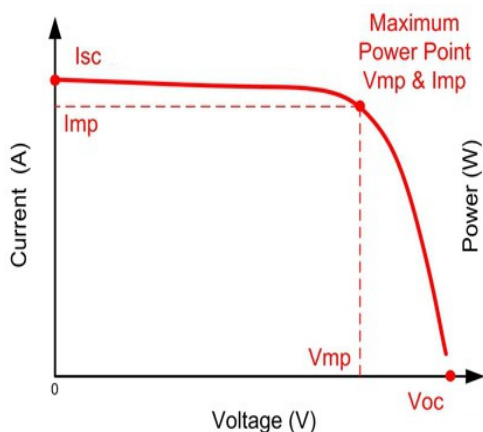
© www.ef4.be

		inclinaison par rapport à l'horizontale (°)						
		0	15	25	35	50	70	90
orientation	est	88%	87%	85%	83%	77%	65%	50%
	sud-est	88%	93%	95%	95%	92%	81%	64%
	sud	88%	96%	99%	max 100%	98%	87%	68%
	sud-ouest	88%	93%	95%	95%	92%	81%	64%
	ouest	88%	87%	85%	82%	76%	65%	50%

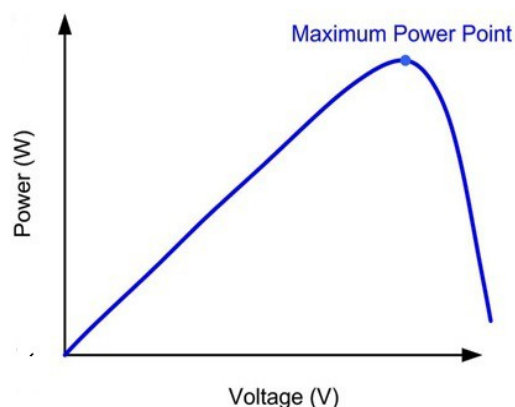
Les panneaux solaires doivent idéalement être orientés perpendiculairement aux rayons du soleil. Le meilleur compromis pour une installation solaire sous nos latitudes est une orientation au sud et avec une inclinaison de 30°. Cette configuration n'est pas toujours possible, le tableau ci-dessus présente les facteurs de correction en fonction de l'orientation et de l'inclinaison. L'ombrage sur la zone d'implantation des modules solaires a aussi son importance.

3.1.4. Caractéristique d'un panneau solaire

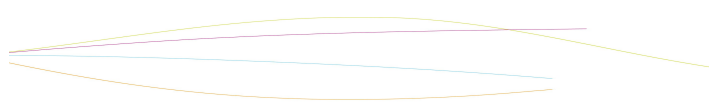
En présence de soleil, chacune des cellules du panneau produit un courant I (A) et une tension U (V). On peut ainsi tracer des courbes caractéristiques pour chaque panneau afin de déterminer la puissance produite avec la relation $P=U \times I$.



On a ici l'apparence générale de l'intensité en fonction de la tension délivrée pour un panneau quelconque. Deux points importants sont à noter : Isc et Voc. Isc représente l'intensité mesurée en sortie du panneau en court circuit (short circuit), tandis que Voc indique la tension en circuit ouvert (open circuit). On peut aussi remarquer le point de puissance maximum (Maximum Power Point) et ses coordonnées Imp et Vmp.

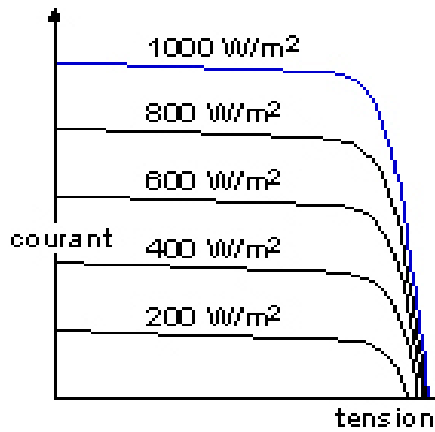
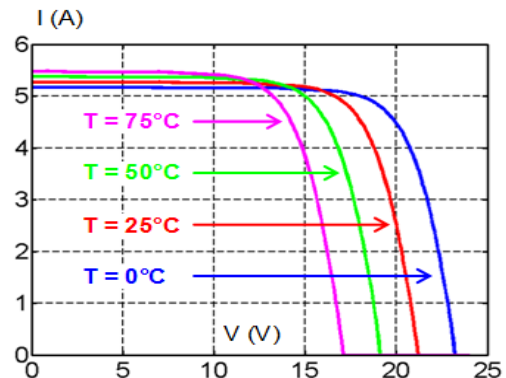


On peut également tracer une courbe caractéristique représentant la puissance en fonction de la tension. On voit alors clairement le maximum de puissance atteint pour la tension Vmp.

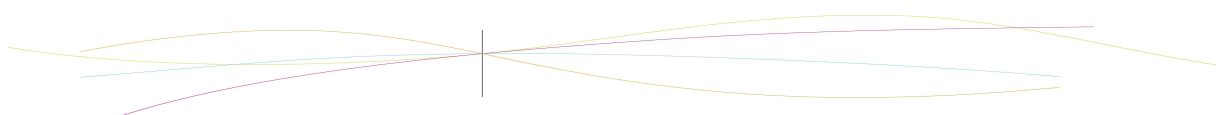


Cependant, ces courbes caractéristiques changent : en fonction de la température ; ainsi, comme on le voit dans le graphique ci-dessous, plus la température de surface du panneau sera basse, plus la puissance produite sera grande.

Cela est dû en grande partie à l'effet Joule, qui dissipe une partie de l'énergie transmise en chaleur : plus le panneau est froid, moins cet effet est important et plus la puissance produite est grande. Ainsi, la production d'un panneau photovoltaïque sera plus importante au printemps qu'en été par exemple.



L'énergie produite par un panneau photovoltaïque dépend directement de l'ensoleillement auquel il est soumis. Si l'ensoleillement diminue, le nombre de photons incidents est moindre, impliquant un déplacement des électrons dans les cellules du panneau moins important. L'intensité de sortie I_{cc} est donc directement impactée, tandis que la tension de sortie ne varie quasiment pas. Un bon éclairage aura donc pour conséquence une meilleure puissance de sortie, d'où les systèmes de suivi du soleil existant dans le commerce, permettant d'avoir tout au long de la journée le meilleur ensoleillement possible.



3.2. Déroulement du projet

Après avoir tous effectué des recherches sur les panneaux solaires, nous avons remarqué l'influence de l'orientation de celui-ci et de son angle d'inclinaison sur l'éclaircement. Pour réaliser nos mesures en reproduisant ce phénomène, nous avons du créer un support. Le support nous a paru comme une difficulté au début car nous n'avions jamais conçu de plans auparavant.

Tout d'abord, nous avons cherché le moyen le plus simple d'incliner le support en faisant des dessins et en s'aidant de nos connaissances. Nous sommes passés voir les techniciens mécaniciens pour leur demander conseil, ils ont été très compréhensifs avec nous et nous ont beaucoup aidés. Ils étaient d'accord pour faire notre support à condition qu'on leur apporte des plans détaillés.

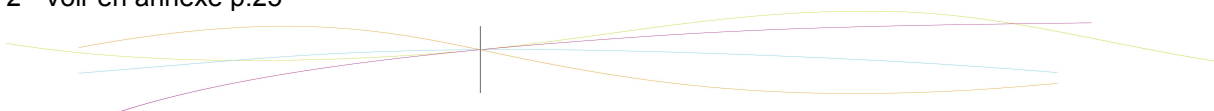
Nous avons donc commencé par les faire sur le papier, puis nous les avons réalisés sur ordinateur grâce au logiciel Autodesk (gratuit pour les étudiants).

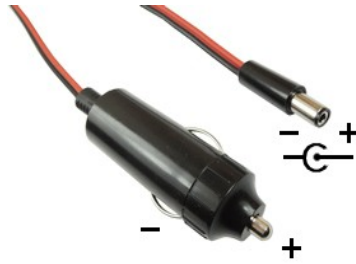
La majeure difficulté pour la conception de ces plans était bien sur que nous n'avions aucune connaissance de ce logiciel. Ne faisant pas CTI3 et n'ayant pas fait SI au lycée, nous avons donc découvert Autodesk "sur le tas". Même si le plan du panneau n'était, en soit, pas difficile à concevoir, puisque nous l'avons pensé au plus simple pour éviter tout désagrément, c'est la prise en main du logiciel qui a pris le plus de temps. Après la modélisation des pièces, l'assemblage des celles-ci les unes aux autres a posé problème. En effet, avant de pouvoir assembler les pièces entre elles, il faut tout d'abord prévoir les trous. Cela a donc nécessité quelques calculs de notre part pour définir les endroits où percer à partir de longueurs de pièces définies. Ensuite, la plus grosse difficulté du travail a consisté à définir quels mouvements étaient autorisés entre chaque pièce. Cependant, après avoir compris le principe pour une, il était facile de faire les suivantes. Enfin, une fois le panneau modélisé, nous avons du faire des dessins industriels² de celui-ci et de chaque pièce qui le compose pour que les techniciens puissent le produire.

Ils nous ont expliqués que le support serait fait en acier car les coûts sont moins élevés que pour de l'aluminium. Notre première crainte concernait le poids mais ils nous ont rapidement rassurés : les barres d'acier qui allaient être utilisées étaient creuses et ne rendraient pas le support trop lourd à transporter.

Tout au long des séances, nous avons cherché des lieux possibles pour faire nos mesures (toits des amphithéâtres, terrasses du bâtiment Darwin, toit de Dumont D'urville) ; nous avons en parallèle travaillé sur les différents branchements pour relier le panneau au régulateur, puis le régulateur à la batterie, et ensuite le convertisseur. Il nous a fallu faire des soudures pour mettre des pinces crocodiles sur certains câbles électriques. Ces différentes connections entre les appareils nous ont posé problème. Tout d'abord, le convertisseur ne pouvait être branché directement sur la batterie parce qu'il était muni d'une prise allume-cigare. À l'origine, son utilisation devait se faire dans une voiture ou un camping car. Pour trouver une solution, nous avons contacté Énergies Douces (la société qui nous a livré le kit solaire complet) pour savoir ce qu'il était possible de faire. Étienne COTTRANT nous a répondu très rapidement, en nous expliquant qu'il était possible de démonter la prise allume-cigare et en nous indiquant bien la polarité de la prise (borne plus et moins) :

2 Voir en annexe p.25





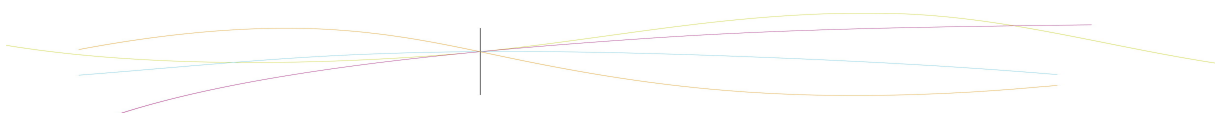
Par ailleurs, en ce qui concerne les autres câbles et les branchements au régulateur nous avons demandé conseil aux techniciens. Ils nous ont expliqués qu'en les dénudant et les enchevêtrant avec les fils électriques des multimètres dans le régulateur, la connexion se faisait sans soucis.

Plus tard, nous avons constaté que le convertisseur ne fonctionnait pas lorsqu'on le branchait à la batterie ; nous avons donc contacté le service après-vente pour savoir s'il fallait leur renvoyer. Comme ce n'était plus de notre ressort concernant ce projet, notre enseignant s'est occupé de renvoyer l'appareil contre un neuf et de se procurer une prise allume cigare femelle afin de faciliter le branchement à la batterie.

Nous voulons tout de même pointer le fait que le kit est censé être près à monter, et que nous avons connu beaucoup de difficultés pour toutes les connections ainsi que pour le convertisseur qui n'était pas fait pour être branché sur la batterie fournie.

Dans le cadre de ce projet, nous avons dû joindre beaucoup de personnes au sein de l'INSA pour obtenir les autorisations nécessaires afin de faire nos mesures sur les toits : tout d'abord du service hygiène et sécurité de l'école, qui nous a dirigés vers M. PARRIER. Avant de nous donner l'autorisation d'aller sur les toits, il fallait que l'on détermine lequel allait nous être utile avec quelqu'un du département maintenance et immobilier. Nous avons connu beaucoup de difficultés pour rencontrer cette personne et savoir si nous devions être accompagnés pour faire nos mesures. En effet, chaque personne que nous contactions nous renvoyait vers une autre. Au final, c'est avec M.OSSART que nous avons choisi le toit le plus sécurisé.

Nous avons retenu le toit de Dumont D'Urville car il est protégé par une rambarde de plus d'un mètre de hauteur, nous pouvions donc y accéder sans être attachés. Après s'être procurer les clés de l'accès au toit, nous avons pu y installer notre panneau deux joudis consécutifs pour prendre des mesures. Nous avons eu des conditions d'ensoleillement très différentes : la première fois avec un grand soleil, la seconde avec un temps nuageux, nous donnant des résultats intéressants à exploiter de par leurs différences. Par contre, nous avons rencontré des problèmes avec le rhéostat qui ne supportait pas la puissance délivrée par le panneau solaire. Ainsi nos mesures ont surtout été réalisées avec de grandes résistances pour éviter de brûler l'appareil.



3.3. Matériel et mesures

3.3.1. Étude du panneau : caractéristiques, dimensions, description du matériel

Afin de mener nos expériences dans le cadre de notre projet sur la production d'énergie solaire photovoltaïque, nous avons eu la chance de disposer d'un kit solaire 100 W complet. Il est composé d'un panneau solaire mono-cristallin de puissance maximale 120 W, d'un régulateur solaire 12/24 V, d'une batterie étanche de 120 Ampères, d'un convertisseur 12V / 230 V d'une puissance de 200 W ainsi que d'ampoules et de LED que l'on peut alimenter grâce au dispositif fourni. Nous en avons profité pour faire des recherches sur les différents types de panneaux³.

Le panneau peut produire entre 350 et 450 Wh d'énergie chaque jour⁴. Il est équipé d'un cadre en aluminium permettant une fixation plus facile. Lors du déroulement de notre projet nous avons ainsi pris les mesures de ce cadre et la distance entre les trous qui y avaient été percés afin de réaliser notre support en fonction du matériel fourni. Le kit a été livré avec les courbes caractéristiques du panneau⁵.

Le régulateur est équipé d'un écran affichant l'état de la charge ainsi que l'état de la batterie. L'appareil surveille en permanence et automatiquement la charge de la batterie, sans que notre présence soit nécessaire. De plus, si nous souhaitons augmenter la puissance de notre kit en ajoutant un ou plusieurs panneaux supplémentaires le régulateur fourni pourrait toujours être utilisé, il accepte en effet jusqu'à 300 Watts de panneaux solaires (soit l'équivalent de 3 panneaux environ).

La batterie au plomb de 32 kg permet de disposer d'une autonomie de 2 à 3 jours⁶ sans soleil. La batterie se recharge la journée et stocke ensuite l'énergie qui est de cette façon utilisable de jour comme de nuit. Celle-ci est prévue pour résister au froid et au gel, elle peut donc être placée à l'intérieur mais aussi à l'extérieur, à l'ombre.

Le convertisseur transforme le courant continu fourni par le panneau solaire, et stocké grâce à la batterie, en courant alternatif utilisable par toutes sortes d'appareils domestiques. La puissance de démarrage de ces derniers ne doit cependant pas dépasser 180 Wh.

Le kit comporte enfin 2 rampes de 30 LED et de 3 ampoules fluo compactes Phocos 15 W. Chacune des rampes fonctionne en 12 V et éclaire sur un angle de 120°, donc peuvent être directement branchées au panneau.

3.3.2. Section de câble

Les câbles électriques sont généralement en cuivre, un métal très conducteur sur de faibles distances mais lorsque celle-ci augmente, le problème de l'effet Joule peut devenir très dangereux. Il faut donc un moyen d'éviter la surchauffe.

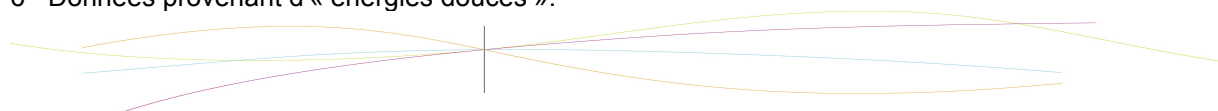
Chaque métal est caractérisé par sa résistivité, ce qui correspond à sa capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique. Il est alors possible de calculer la résistance du conducteur grâce à la formule suivante : $R=L/s$, R représente la résistivité, L la longueur et s la section.

3 Voir en annexe p.23

4 Pour l'ensoleillement moyen en France.

5 Voir en annexe p.31

6 Données provenant d'« énergies douces ».



Ainsi nous pouvons remarquer qu'en augmentant la section d'un câble électrique, sa résistance diminue, donc l'effet Joule aussi. Il faut par conséquent prévoir la section du câble en fonction de sa longueur et du métal utilisé. Il vaut mieux prévoir une section plus convenable, une trop petite qui risquerait de surchauffer et de démarrer un incendie.

Pour effectuer nos mesures nous avons besoin de différents câbles électriques. Ainsi, pour les choisir correctement, nous devons faire attention aux sections de fil adaptées à nos besoins et à notre matériel.

3.3.3. Réalisation des mesures



Expérience 1 : Mesure ensoleillement en fonction de l'angle d'inclinaison

Conditions climatiques: Ciel dégagé/ Soleil

Angle (°)	Bord Gauche (W/m ²)	Milieu (W/m ²)	Bord Droit (W/m ²)
30	1050	1055	1061
60	868	865	860

Conditions climatiques: Intervalles nuageux/ vent

Angle (°)	0	15	30	45	60	75	90
Ensoleillement (W/m ²)	1000	1090	1150	1090	952	780	550

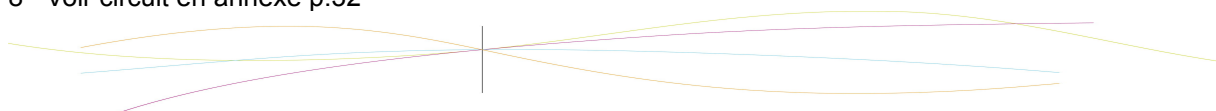
Expérience 2: Mesure Intensité et Tension / Courbe caractéristique d'un module solaire photovoltaïque

Conditions climatiques: Soleil

Tension à vide (circuit ouvert) ⁷	20,9 V
Intensité (court-circuit) ⁸	4,6 A

7 Voir circuit en annexe p.32

8 Voir circuit en annexe p.32



Pour un angle de 30°

Ω	5	100	150	200	300	400	500	600	700	800	900
I (A)	3,12	0,22	0,16	0,12	0,09	0,07	0,06	0,055	0,05	0,045	0,04
U (V)	-	20,5	20,6	20,5	20,6	20,55	20,6	20,6	20,6	20,6	20,7
P (W)	-	4,51	3,29	2,46	1,85	1,44	1,24	1,13	1,03	0,93	0,83

Pour un angle de 60°

Ω	30	50	100
I (A)	0,22	0,42	0,69
U (V)	20,4	20,2	20,1
P (W)	4,49	8,48	13,87

Les courbes n'étaient pas exploitables donc nous avons réalisé de nouvelles mesures.

Conditions climatiques: Intervalles nuageux/ vent

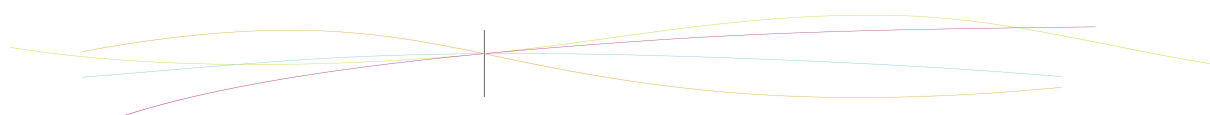
Tension à vide (circuit ouvert)	21,5 V
Intensité (court-circuit)	5,80 A

Ω	500	400	300	250	200	150	100	80	70	60	55	50	40
I (A)	0,055	0,07	0,09	0,10	0,12	0,16	0,23	0,27	0,30	0,37	0,40	0,44	1,89
U (V)	20	16,6	20,2	20,7	20,3	21,6	21,5	19,6	19,3	21,2	21,1	20,8	19,3
P (W)	1,1	1,16	1,82	2,07	2,44	3,46	4,94	5,29	5,79	7,84	8,44	9,15	36,5

Ensoleillement non uniforme: les valeurs varient beaucoup

Expérience 3: Montage complet du kit solaire

Voir le schéma de montage en annexe p.31





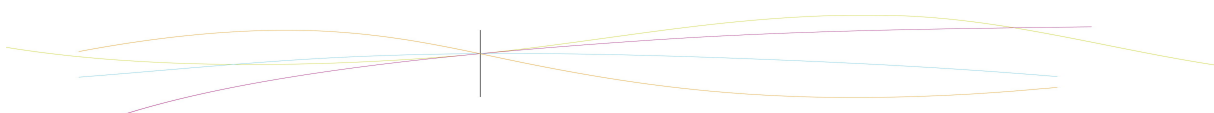
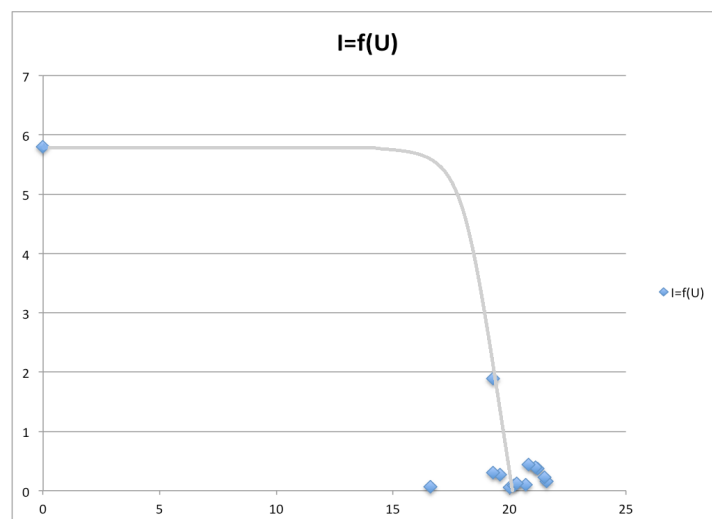
Nous avons vérifié que les lampes à LED fonctionnaient correctement lorsqu'on les reliait au régulateur et qu'il était possible de brancher un appareil 220V au convertisseur. En revanche il a fallu faire très attention, car un appareil 220V consomme au minimum deux sa puissance au démarrage : nous avons donc brancher 100W sur notre convertisseur 200W.

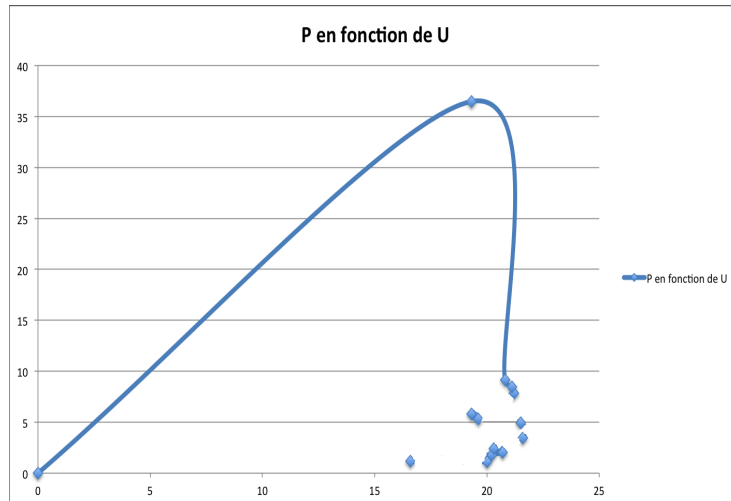
3.3.4. Analyse des résultats

Expérience 1 : Nous avons constaté que l'éclairage varie beaucoup en fonction de l'inclinaison du panneau. Nous avons pu vérifier que l'angle de 30° permet d'avoir un éclairage maximal, ce qui confirme nos recherches théoriques. De plus, nous avons remarqué que même avec cet angles, si un nuage passe, l'éclairage baisse énormément (jusqu'à 150W seulement) en quelques secondes.

Expérience 2 : Nous avons tracé les courbes caractéristiques du panneau: $I = f(U)$ et $P = f(U)$ pour déterminer le point de puissance maximum.

Puissance max mesurée (W)	36,47
Tension à la puissance max mesurée (V)	19,3



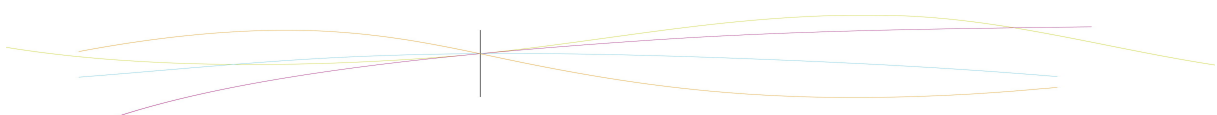


Nous avons rencontré quelques difficultés lors de nos mesures, car pour faire varier l'intensité du courant nous avons utilisé un rhéostat qui ne supportait pas la puissance délivrée par le panneau solaire. Nous n'avons pu avoir qu'une partie de la courbe puisque nous n'avons utilisé que de grandes valeurs de résistance. De plus, du fait des variations importantes de l'éclairement à cause du passage de nuages, nos mesures varient beaucoup. Ce qui explique les petites oscillations visibles sur les courbes.

En ce qui concerne la courbe $I=f(U)$, nous n'avons pas de valeurs intermédiaires entre le point I_{sc} (courant en court-circuit) et nos mesures. En réalité, la courbe devrait être plutôt constante au départ et chuter sur la fin, comme indiqué par la courbe grise.

Enfin, quant à $P=f(U)$, la courbe a une allure normale ; mais nous n'avons pu atteindre la vraie puissance maximale (100W) à cause du rhéostat et de l'ensoleillement insuffisant. Il aurait été possible d'atteindre cette valeur avec une très faible résistance.

Expérience 3 : Nous avons pu vérifier le fonctionnement de tout le système, et surtout du convertisseur. De plus, nous avons constaté qu'il était possible de brancher des barres de LED à la sortie du régulateur donc encore à 12V, ainsi que des appareils de 220V à la sortie du convertisseur (par exemple chargeur de téléphone).



4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Conclusions sur le travail réalisé

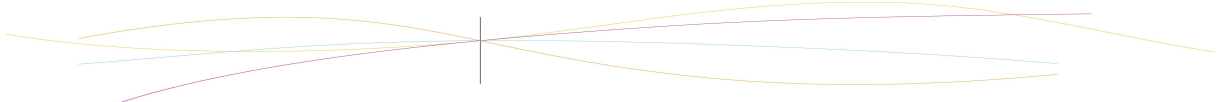
Nous avons eu la chance d'étudier un panneau solaire et d'effectuer des mesures avec celui-ci. Nous avons commencé par beaucoup de gestion et de recherches théoriques, pour arriver à mettre le projet en route. De plus nous avons rencontré de nombreuses difficultés que nous avons réussi à surmonter, par exemple la conception d'un support inclinable. Nous souhaitons remercier David PARESY, technicien mécanicien, car il nous a beaucoup aidé et nous a conseillé des logiciels pour modéliser nos pièces ainsi qu'effectuer des dessins industriels. Par ailleurs, nous n'avons pu réaliser nos mesures que très tardivement- seulement quelques semaines avant la fin- car il nous a fallu attendre toutes les autorisations pour aller sur les toits de l'INSA. Les mesures réalisées lors de nos deux sorties, nous ont permis de mieux comprendre le fonctionnement d'un panneau et d'analyser nos résultats.

Conclusions sur l'apport personnel de cet E.C. Projet

Sarah : Je pense que ce projet a été très bénéfique pour nous tous. Tout d'abord, j'ai trouvé ce sujet très intéressant car le photovoltaïque fait partie des énergies du futur, que tout ingénieur peut être amené à rencontrer. J'ai donc énormément enrichi ma connaissance dans ce domaine. Ensuite, la gestion de projet était très présente et m'a appris à devenir autonome. Ce n'est pas évident au début de contacter beaucoup de personnes et de leur faire comprendre à quel point nos requêtes sont importantes pour l'avancement du projet. D'ailleurs j'ai retenu que c'était toujours plus efficace d'aller voir la personne directement et de lui parler en face de nos objectifs ou de fixer un rendez-vous. De plus, j'ai compris qu'il n'y avait jamais de vrais problèmes car dans tous les cas nous pouvons trouver une solution. Pour finir, nous serons amenés à travailler en équipe dans notre métier, donc je trouve que nous habituer dès maintenant au travail en groupe est une bonne idée. Cela demande de l'organisation, il faut se répartir les tâches pour avancer plus vite et être plus efficace. La mise en commun de nos opinions est aussi très enrichissante car c'est comme ça qu'il est possible de trouver des solutions.

Alice : Ce projet était celui que je préférais dans la liste des sujets qui nous ont été proposés au début du semestre, d'une part car les énergies renouvelables m'intéressent particulièrement depuis plusieurs années mais aussi parce que les énergie nouvelles et leur développement sont essentiels dans notre société actuelle. Grâce à ce projet j'ai pu découvrir que nous étions capable, même à notre niveau, de prendre des initiatives, de gérer des contacts avec l'administration ou une entreprise (Énergies Douces) et de trouver des solutions à tous les problèmes rencontrés afin de mener à bien notre projet. Ce cours m' a permis de découvrir ce que représentait réellement la gestion d'un projet et le travail de groupe. Nous avons appris à nous organiser ensemble, à partager nos connaissances et nos opinions afin de progresser dans la mise en œuvre de notre projet.

Charlotte: Grâce à ce projet, j'ai pu assimiler des connaissances théoriques sur l'énergie photovoltaïque en étudiant le fonctionnement d'un panneau solaire. Je trouve que ce projet, m'a permis d'avoir une vision beaucoup plus concrète sur ce sujet. En effet, le fait que nous ayons pu utiliser un vrai panneau solaire, nous a permis d'acquérir de nombreuses notions. Comme par exemple, la gestion du matériel, prendre contact avec le fournisseur, obtenir des autorisations.. Les nombreuses difficultés rencontrées, nous ont montrés qu'il faut prendre des initiatives et persévérer afin d'aboutir à un résultat. Par ailleurs, j'ai apprécié le fait que nous ayons 1h30 par semaine consacrée à ce projet. Cela permet de se retrouver



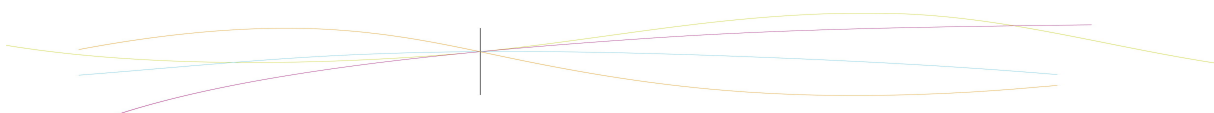
facilement en groupe sur cet horaire, et de se répartir les tâches afin de travailler de façon autonome chez soi. Nous avons donc pu expérimenter à la fois le travail en groupe et en autonomie.

Quentin : ce projet a été très intéressant personnellement de par notre autonomie. Il nous a permis de voir qu'un projet mélange plusieurs aspects diamétralement opposés, qu'on ne peut en aucun cas négliger. Il a bien sûr impliqué des connaissances théoriques et techniques que nous avons déjà, ou que nous avons dû acquérir au cours du projet, mais il a également fallu passer par d'autres disciplines que la physique pour le mener à bien. Ayant rencontré quelques difficultés avec le kit de départ, nous avons pris contact avec le fournisseur pour savoir quelles manipulations nous pouvions réaliser sans endommager le matériel ; nous avons également réalisé le support du panneau, nécessitant l'utilisation d'un logiciel de CAO et l'implication des techniciens du département mécanique. Enfin, il a fallu obtenir les autorisations pour aller prendre des mesures sur le toit du bâtiment Dumont d'Urville. On peut dire qu'à une échelle moindre, nous avons pu appréhender le déroulement d'un projet pour des ingénieurs dans une entreprise. Ce fut très enrichissant, et nous a montré que l'organisation, la planification, ainsi que la communication au sein du groupe, sont essentielles.

Charles : Le développement de ce projet a été quelque chose de vraiment très intéressant pour nous puisqu'il nous a permis d'appréhender des nombreuses notions scientifiques et humaines. Nous en avons tout d'abord appris plus sur la production d'énergie des panneaux solaires photovoltaïques qui seront sans nul doute l'un des principaux moyens de production d'énergie de demain. Nous avons donc approfondi nos connaissances techniques sur le fonctionnement d'un panneau solaire et apprécié sa grande sensibilité à la luminosité. En effet, lors de notre deuxième prise de mesures sous un temps partiellement nuageux, nous avons pu observer la décroissance très rapide de la tension en sortie du panneau lorsque le Soleil était masqué. Ensuite, ce projet m'a poussé à découvrir les logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (notamment Autodesk Inventor) avec lesquels je n'étais pas du tout familier dans le but de produire un support modulable avec l'aide des techniciens de l'INSA. Toujours dans cette optique de production, nous avons pu découvrir quelques unes des démarches à mener pour assurer le financement nécessaire à la production de ce support. Enfin, nous avons pris conscience de la difficulté d'obtenir les autorisations en rapport avec la sécurité. Pour se faire, il faut en effet prendre contact avec différents acteurs dans les services et cela peut vite s'avérer compliqué.

Perspectives pour la poursuite de ce projet

Pour la suite de ce projet, nous avons eu différentes idées. Il serait possible d'effectuer des mesures par tous les temps et ainsi de calculer l'influence de la température ou de la saison car l'inclinaison des rayons du soleil peuvent varier. Par ailleurs, il serait possible de calculer le rendement journalier d'un panneau solaire. Pour aller plus loin, en se renseignant sur la consommation de l'INSA en électricité, nous pourrions prévoir la surface photovoltaïque nécessaire pour la rendre autonome par exemple.



5. BIBLIOGRAPHIE

Anne Labouret, Pascal Cumunel, Jean-Paul Braun (et al), « Cellules solaires : les bases de l'énergie photovoltaïque », Paris : ETSF, Éd. techniques et scientifiques françaises, 2010.

Anne Labouret, Michel Villos, « Énergie solaire photovoltaïque », Paris : Dunod, 2009

lien internet : http://fr.wikipedia.org/wiki/Énergie_solaire_photovoltaïque (valide à la date du 23/05/2014).

lien internet : http://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur_solaire_photovolta%C3%AFque (valide à la date du 23/05/2014).

lien internet : http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolta%C3%AFque (valide à la date du 23/05/2014).

lien internet : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Watt-cr%C3%AAte> (valide à la date du 23/05/2014).

lien internet : http://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_photovolta%C3%AFque (valide à la date du 23/05/2014).

lien internet : <http://www.edfenr.com/le-photovoltaique/types-de-panneaux-solaires-n798-1.aspx> (valide à la date du 23/05/2014).

lien internet : <http://www.edfenr.com/le-photovoltaique/energie-photovoltaique-n801-1.aspx> (valide à la date du 23/05/2014).

lien internet : <http://sti.tice.ac-orleans-tours.fr/spip2/spip.php?article437> (valide à la date du 23/05/2014).

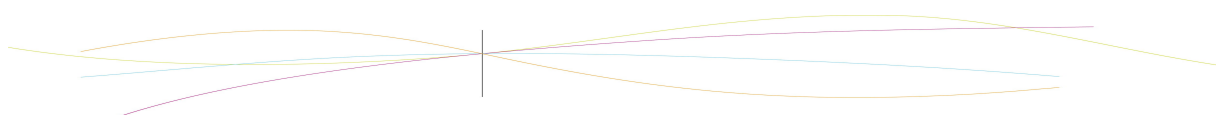
lien internet : http://www.photeis.fr/index.php?option=com_content&view=article&id=101:les-applications-de-lelectricite-dorigine-photovoltaique-histoire-et-perspectives&catid=37:actualite&Itemid=63 (valide à la date du 23/05/2014).

lien internet : http://www.sbenergy.fr/wp_super_faq/quelle-est-la-difference-entre-les-panneaux-monocristallins-polycristallins-et-couche-mince/ (valide à la date du 23/05/2014).

lien internet : <http://panneausolaire.free.fr/> (valide à la date du 23/05/2014).

lien internet : <http://energies-renouvelables.consoneo.com/guide/entreprise-ecologique/les-differents-modeles-panneaux-photovoltaiques/1260/> (valide à la date du 23/05/2014).

lien internet : <http://www.panneaux-solaires-france.com/node/3> (valide à la date du 23/05/2014).



lien internet : <http://www.ac-grenoble.fr/cite.scolaire.internationale/Peda/Discipli/SVT/lycee/seconde/Seconde%201/OMHtmlExport/PAnneauxSolairesPhilippeEngelmannAntoineCinottiArnaudDEsquerreAd%C3%A8leGarnier.pdf> (valide à la date du 23/05/2014).

lien internet : <http://www.photovoltaique.info/L-effet-photovoltaique.html> (valide à la date du 23/05/2014).

lien internet : <http://www.ecologie-shop.com/conseils/fonctionnement-d-un-panneau-photovoltaique-les-differents-types-de-panneaux-solaires-photovoltaiques-1> (valide à la date du 23/05/2014).

lien internet : http://panneausolaire.free.fr/fabrication_fonctionnement.php#a (valide à la date du 23/05/2014).

lien internet : <http://www.ef4.be/fr/photovoltaique/aspects-techniques/orientation-structure.html> (valide à la date du 23/05/2014).

lien internet : <http://www.ef4.be/fr/photovoltaique/> (valide à la date du 23/05/2014).

lien internet : <http://www.energie douce.com/> (valide à la date du 23/05/2014).

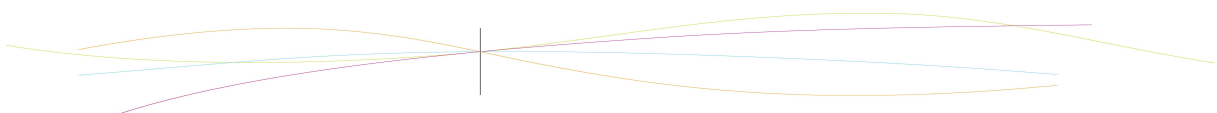
lien internet : <http://www.ecolodis-solaire.com/conseils/cablage-et-securite-d-une-installation-photovoltaique-en-site-isole-choisir-son-cablage-solaire-39> (valide à la date du 23/05/2014).

lien internet : http://www.solariflex.com/content/9-rayonnement_orientation (valide à la date du 23/05/2014).

lien internet : <http://www.dekloo.net/projets-en-cours/photovoltaique-autoconsommation/caracteristiques-essentielles-dun-panneau-solaire-photovoltaique/689/> (valide à la date du 25/05/2014).

lien internet : <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16697> (valide à la date du 25/05/2014).

lien internet : http://cipcsp.com/tutorial/panneau_photovoltaique0.html (valide à la date du 03/06/2014).



6. ANNEXES

6.1. Documentation technique

6.1.1. Les différents types de panneaux

Il existe aujourd'hui en France, trois principaux types de panneaux photovoltaïques. Chacun d'eux est adapté à un type de toiture, un ensoleillement spécifique. Composés de cellules à base de Silicium pour la plupart, ils se différencient par le mode de fabrication de ces cellules.

- *Les panneaux monocristallins :*

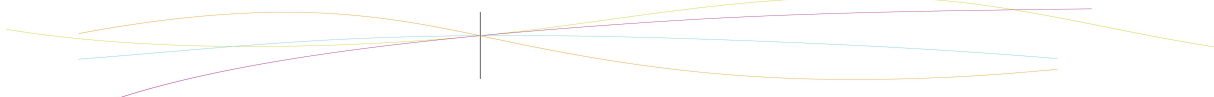
Ils sont composés de cellules de Silicium monocristallin très pures car obtenues à partir d'un seul bloc de Silicium fondu puis cristallisé. Ces cellules rondes ou carrées sont de couleur uniforme grise ou bleue foncée. Ce type de panneau est l'un des plus chers, en effet, la production de cristaux de silicium purs est complexe et donc plus coûteuse. Cependant, les cellules monocristallines permettent d'obtenir des panneaux avec un rendement plus élevé (de 14 % à 19 %). D'après Photon International 2012, la production de cellules formées de Silicium monocristallin représentaient 13 % de la production de cellules en 2011.

- *Les panneaux polycristallin :*

Ce type de panneau est également composé de cellules de Silicium. Dans ce cas par contre, plusieurs cristaux se forment lors du refroidissement du bloc de Silicium. Les cellules polycristallines, souvent rectangulaires, sont la plupart du temps bleues mais non uniforme, on peut en effet apercevoir des reflets ou des motifs à leur surface. Ces diverses formes sont dues au nombre plus ou moins élevé de cristaux formant une cellule. Les cellules polycristallines, produites plus facilement et avec un bon rendement (entre 11 % et 15%), permettent de produire des panneaux photovoltaïques avec un bon rapport qualité/prix, le meilleur à ce jour. Cependant, les panneaux polycristallins ont l'inconvénient d'avoir un très bas rendement lorsque le ciel est couvert tandis que leurs confrères monocristallins auront une efficacité, certes un peu plus faible mais assez peu éloignée de leur rendement maximal. Le rapport qualité/prix des panneaux polycristallins leur apporte tout de même un avantage conséquent sur le marché de la production des cellules photovoltaïques. En effet les cellules polycristallines représentaient 57 % de la production mondiale en 2011.(note : d'après photon international 2012)

- *La filière couche-mince et le Silicium amorphe :*

Lors de sa transformation le Silicium produit un gaz que l'on projette ensuite sur du verre, du plastique souple, ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide afin de créer des cellules photovoltaïques de type couche mince. La souplesse de ce Silicium dit amorphe permet d'utiliser ce type de cellules pour fabriquer des panneaux flexibles ou enroulables. Les cellules de Silicium amorphe sont très foncées, parfois marrons et fonctionnent très bien avec un éclairage diffus ou faible, notamment dans un bâtiment, ou encore avec une lumière



artificielle, de plus elles supportent bien les hautes températures. Cependant, à l'inverse des cellules cristallines, elles ont un rendement faible lorsque l'éclairage est important. De manière générale leur rendement n'est pas très important (entre 5 % et 9 %) mais leur coût très bas proportionnellement à leur efficacité leur donne un avantage. Ce type de cellules et de panneaux est aujourd'hui utilisé pour les appareils portables qui ont besoin d'une faible puissance, comme les montres ou les calculatrices solaires, ou alors dans des cas où leur souplesse est utile.

Le faible coût de production des cellules photovoltaïques en couche-mince intéresse le domaine de la recherche dans le photovoltaïque qui essaie d'augmenter le rendement de cellules de ce type. Les cellules CIS, par exemple, ont ainsi vu le jour. Ces cellules à base de cuivre, d'indium et de sélénium ont un rendement un petit peu plus élevé que celles à base de Silicium (9 % à 11%) . L'utilisation de ce type de panneaux photovoltaïques est tout de même restreinte aujourd'hui puisque leur efficacité est inférieure à celle des panneaux cristallins, ainsi pour un rendement équivalent la surface à couvrir serait plus grande.

6.1.2. Application du photovoltaïque

Les applications du photovoltaïque sont nombreuses et peuvent être séparées en deux catégories principales ; les applications autonomes et celles qui sont raccordées au réseau public de distribution d'électricité.

- *Les applications autonomes*

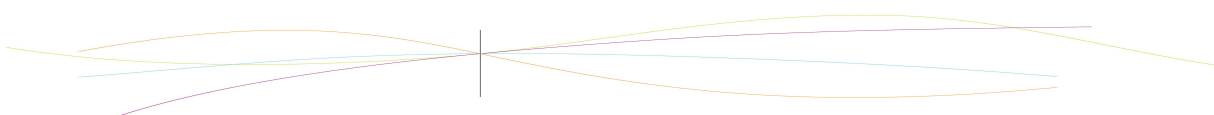
Ces applications sont celles qui sont apparues en premier, elles peuvent elles-mêmes se diviser en 4 catégories.

On utilise d'abord l'énergie photovoltaïque pour fournir l'électricité nécessaire aux satellites artificiels. La plate-forme doit alors fabriquer, stocker puis distribuer l'énergie à l'appareil grâce aux cellules photovoltaïques en arséniure de gallium dont il est pourvu. Ces cellules, que l'on trouve uniquement dans le domaine spatial à cause de leur coût, ont un rendement qui peut aller jusqu'à 29 %.

L'énergie photovoltaïque est également utilisée de façon autonome dans des appareils portables comme les montres, les calculatrices mais elle se développe aussi dans le domaine de la randonnée avec des chargeurs fonctionnant à l'énergie solaire et peu à peu avec les téléphones portables qui se rechargeront grâce à l'énergie du soleil.

Cette énergie permet également d'apporter de l'électricité aux zones isolées qui ne peuvent pas, souvent à cause de problèmes de coût, être reliées au réseau de distribution d'électricité. Il peut s'agir de gîtes en haute montagne comme d'une école ou d'un dispensaire dans un pays en voie de développement. Dans ces différents cas, l'installation de panneaux solaires sur le bâtiment est plus rentable qu'un raccordement au réseau. En ce qui concerne les pays en développement, le photovoltaïque permet de fournir un accès à l'eau potable (purification et pompage de l'eau) aux habitants ainsi que l'électricité nécessaire à l'éclairage et aux moyens de communication. De plus, certaines installations, plus grandes, permettent de fournir l'électricité nécessaire à des écoles ou à des hôpitaux.

Enfin, il existe d'autres applications du photovoltaïque dites « professionnelles ». En effet les panneaux solaires sont maintenant présents sur les balises maritimes et



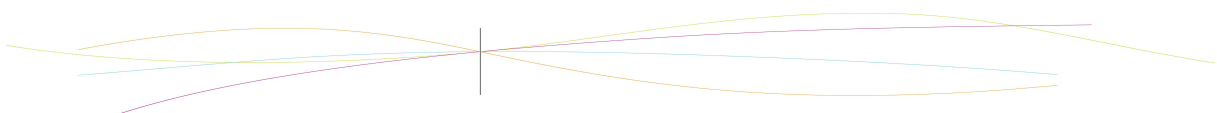
aéroportuaires, certains panneaux de la signalisation routière, les horodateurs de stationnement ou encore sur les bornes de secours autoroutières.

- *Les applications raccordées au réseau public*

On trouve d'abord des installations photovoltaïques sur des bâtiments consommateurs d'électricité, qu'il s'agisse de maisons, de bureaux ou de commerces. Ces panneaux, qui produisent alors de l'électricité récupérée ensuite par le réseau de distribution publique, peuvent être « sur-imposés » à la toiture, c'est-à-dire qu'ils sont simplement ajoutés à la structure sans assurer le clos ni le couvert ou bien intégrés au bâti et ainsi assurer leur fonction de fournisseur d'énergie mais également une autre qualité du bâtiment comme le clos et le couvert ou un garde-corps.

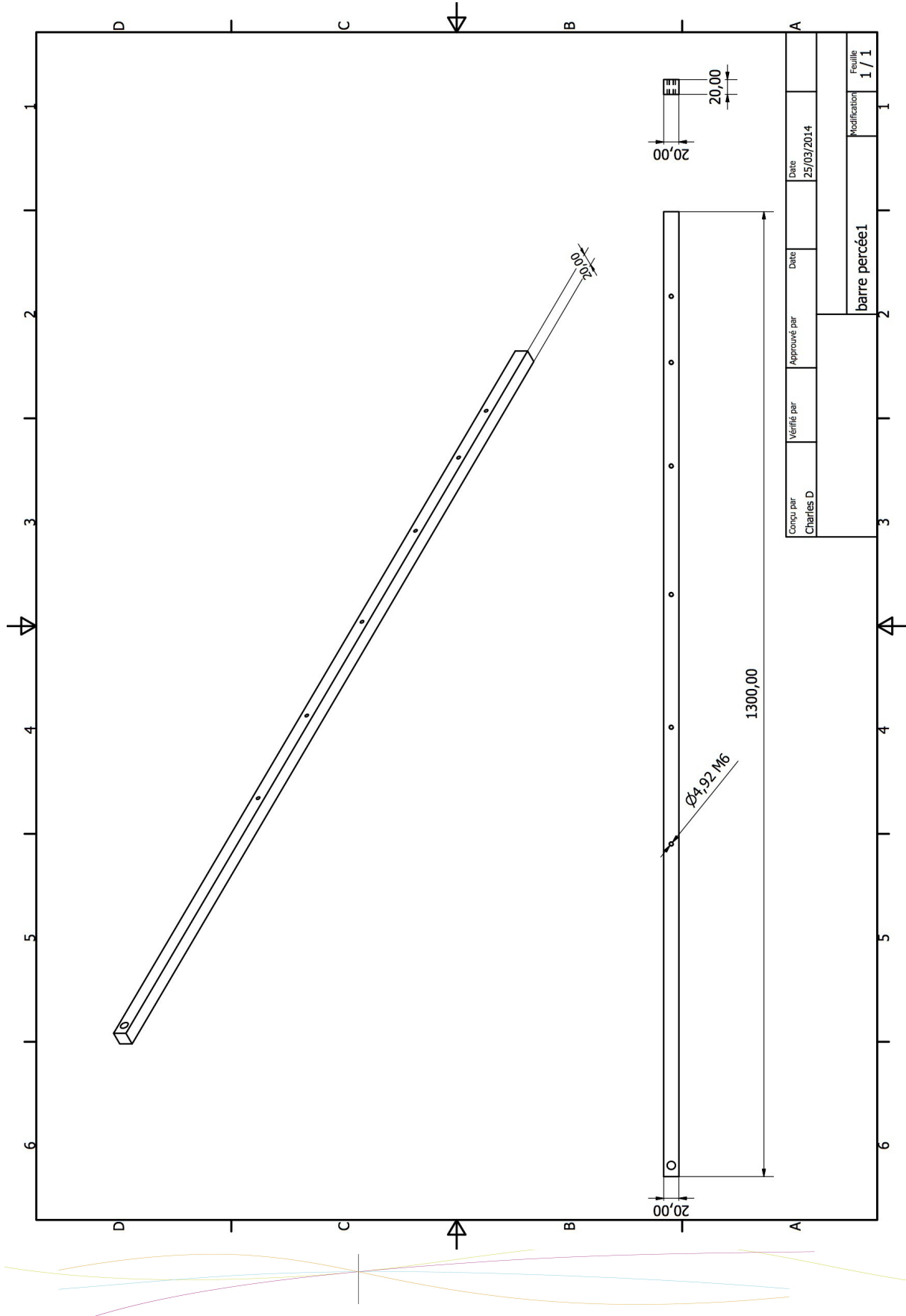
Des panneaux photovoltaïques sont également installés sur des structures qui ne consomment pas d'énergie mais pour lesquels ils remplissent une autre fonctionnalité. On trouve par exemple des panneaux photovoltaïques qui servent d'ombrière de parking ou de mur antibruit.

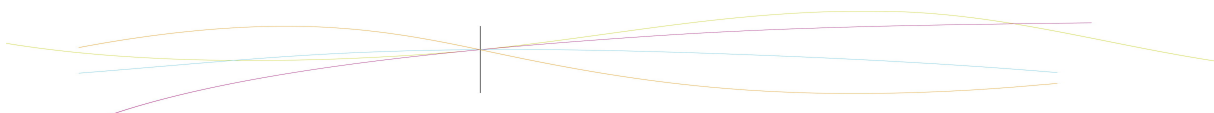
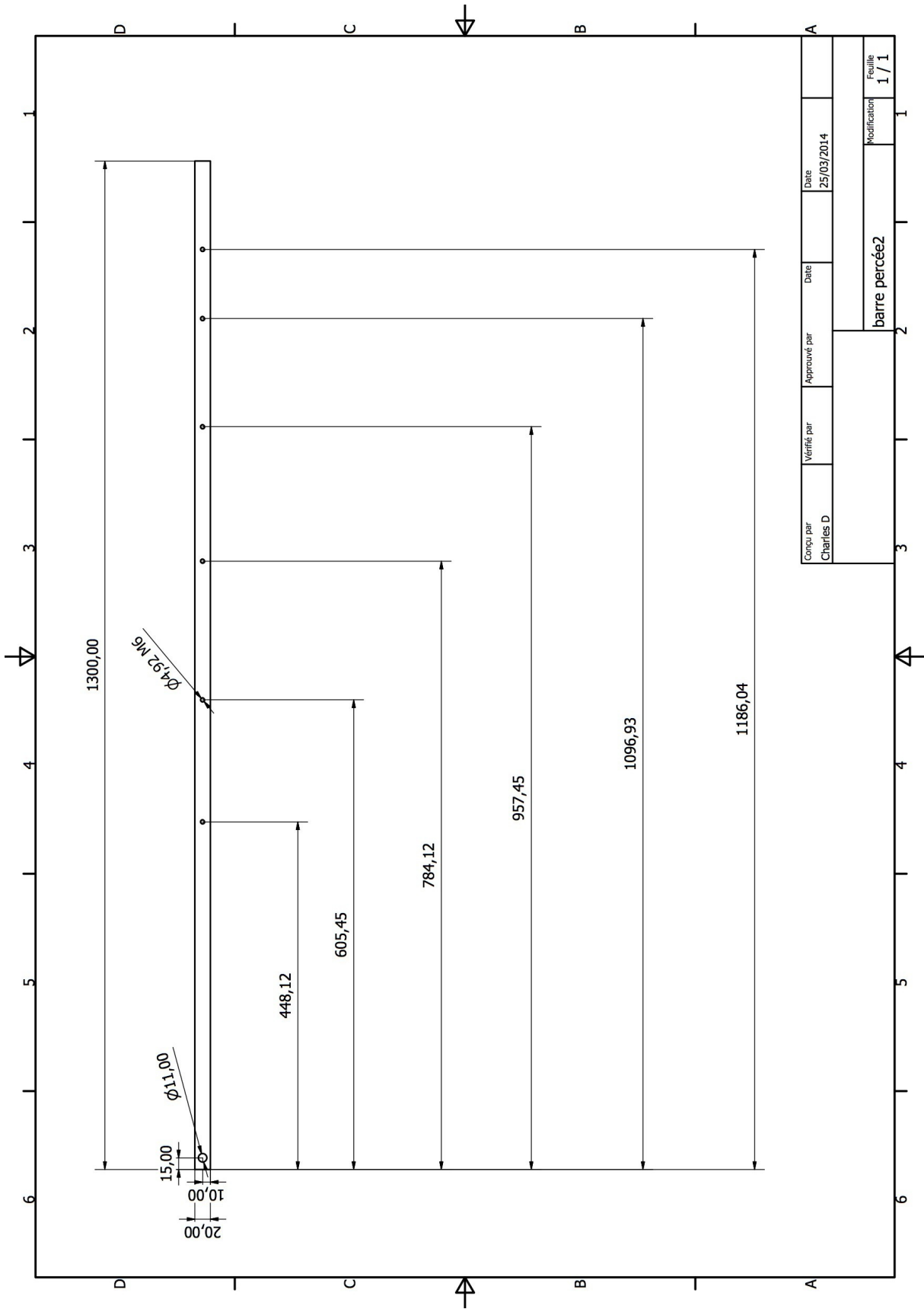
Enfin des centrales photovoltaïques produisent également de l'énergie pour le réseau de distribution national. Ces parcs de panneaux photovoltaïques au sol sont soutenus par des structures porteuses plus ou moins complexes. En effet certaines restent fixes tandis que d'autres, plus coûteuses permettent de modifier l'orientation et l'inclinaison des panneaux en même temps que le soleil se déplace, elles peuvent ainsi augmenter de 30 % le rendement de ces centrales.

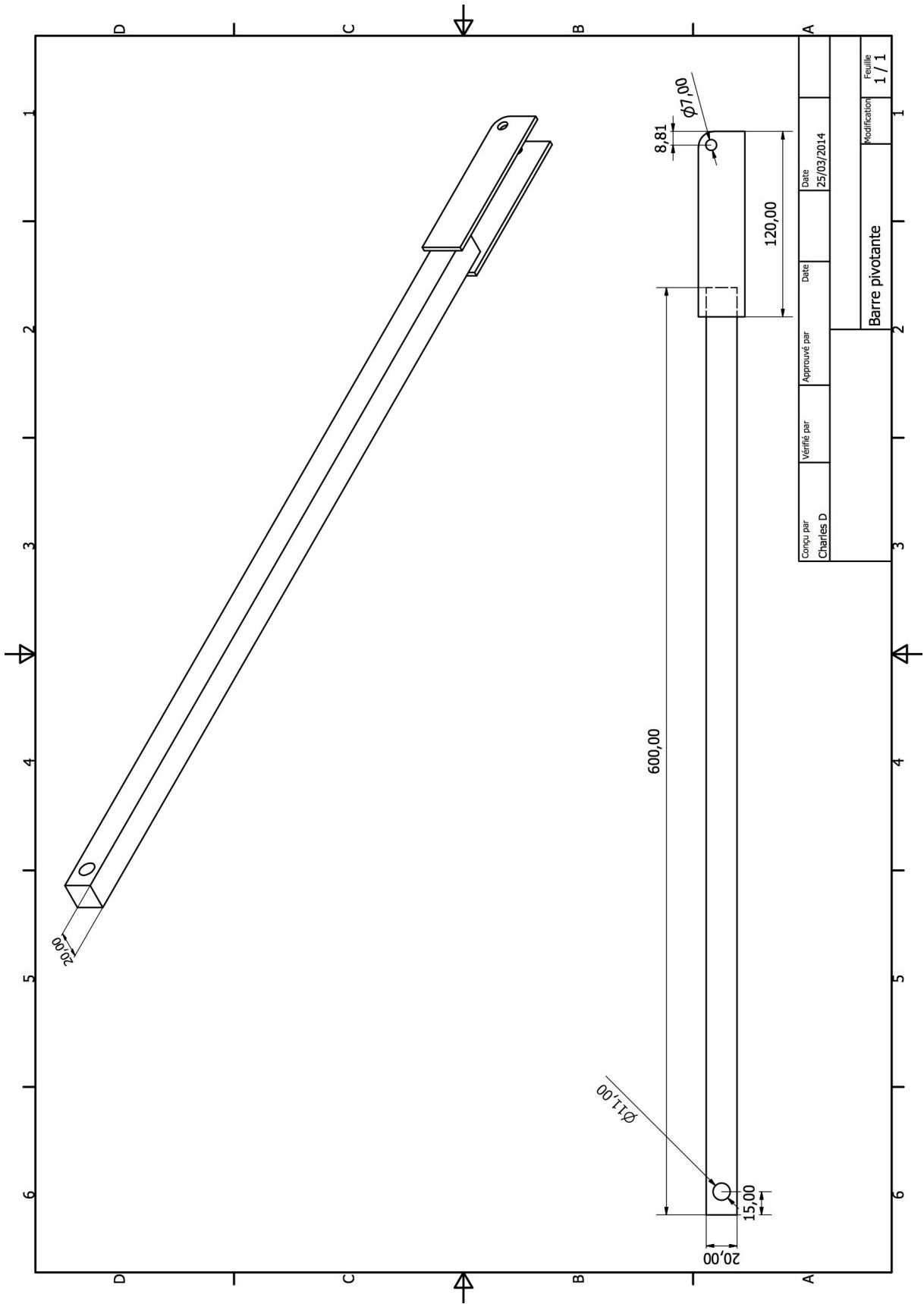


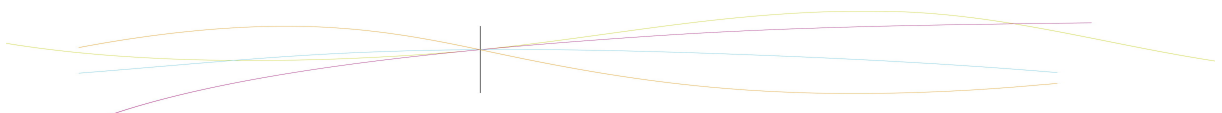
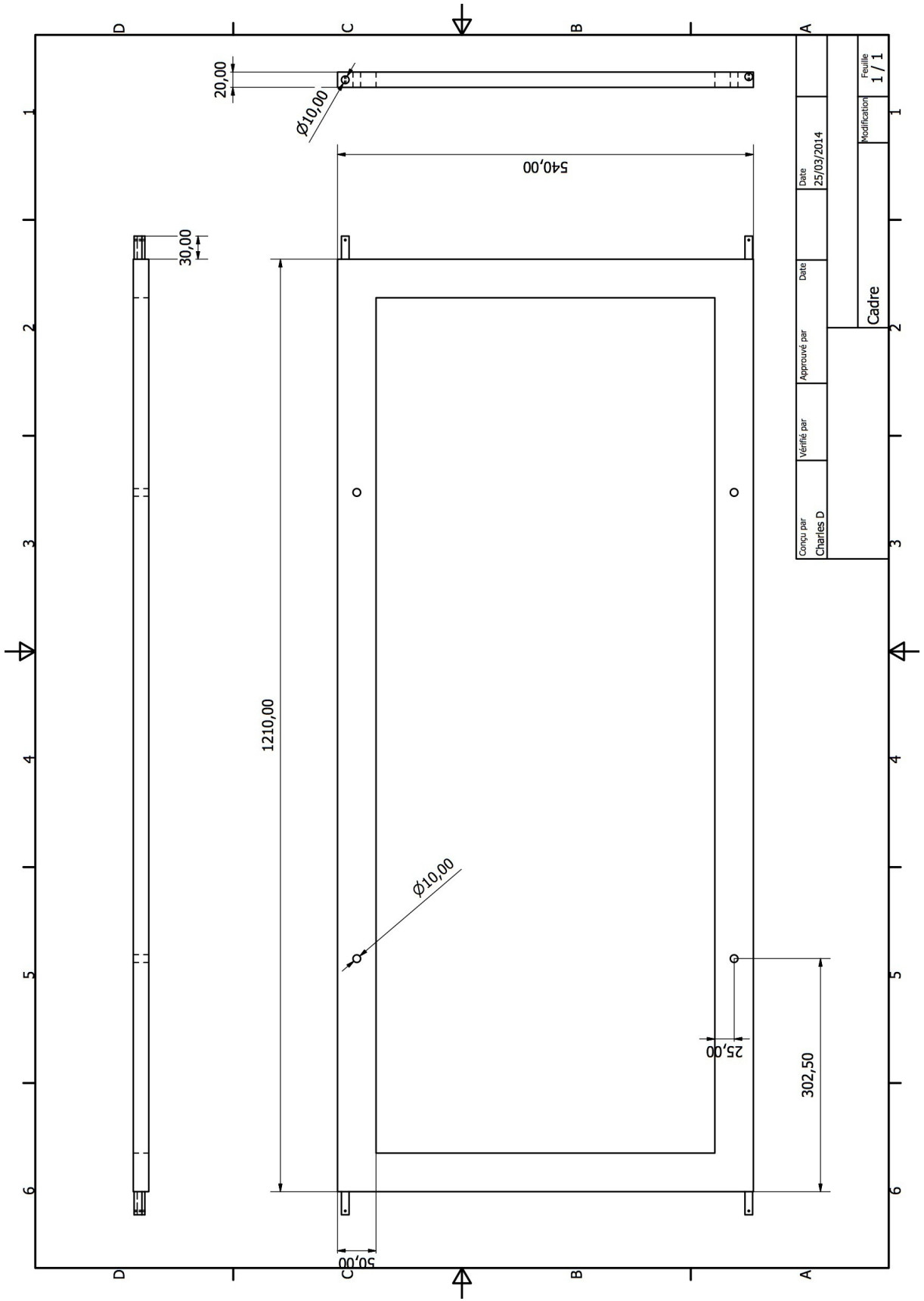
6.2. Schémas de montages, plans du support :

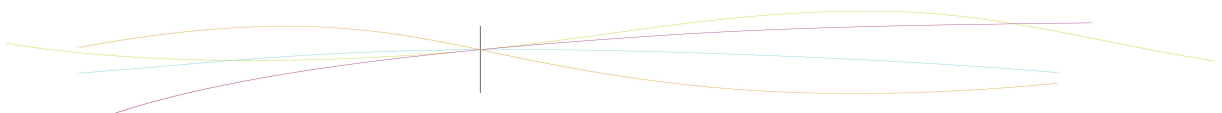
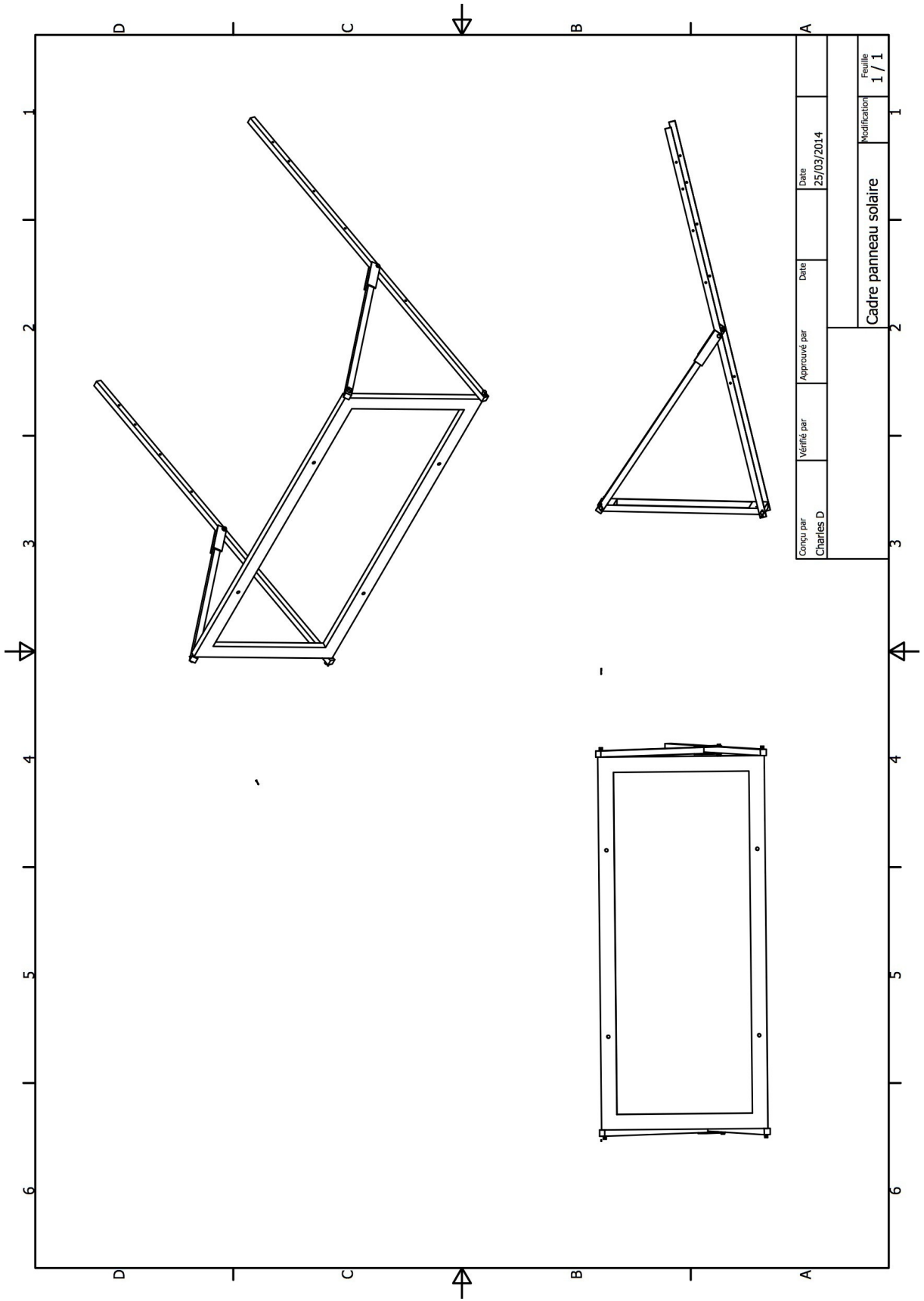
6.2.1. Plans du support :





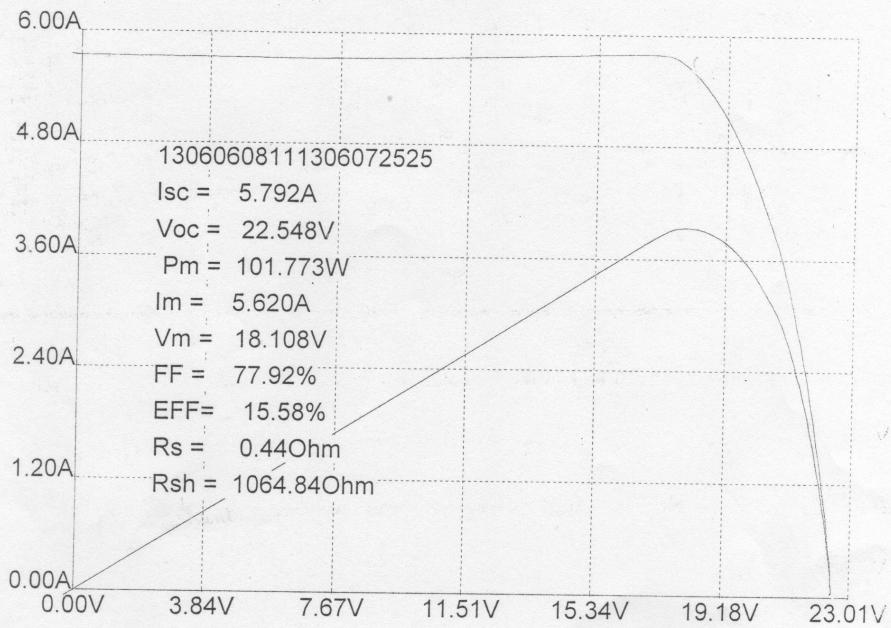






6.2.2. Courbes caractéristiques de notre panneau :

Electrical performance of solar module



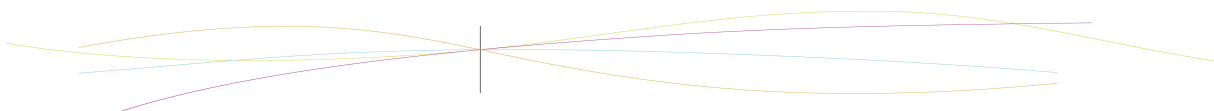
STC: 1000w/m² AM 1.5 25°C

Produce Date: 2013-06-20

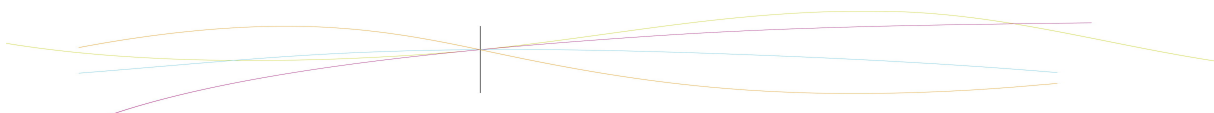
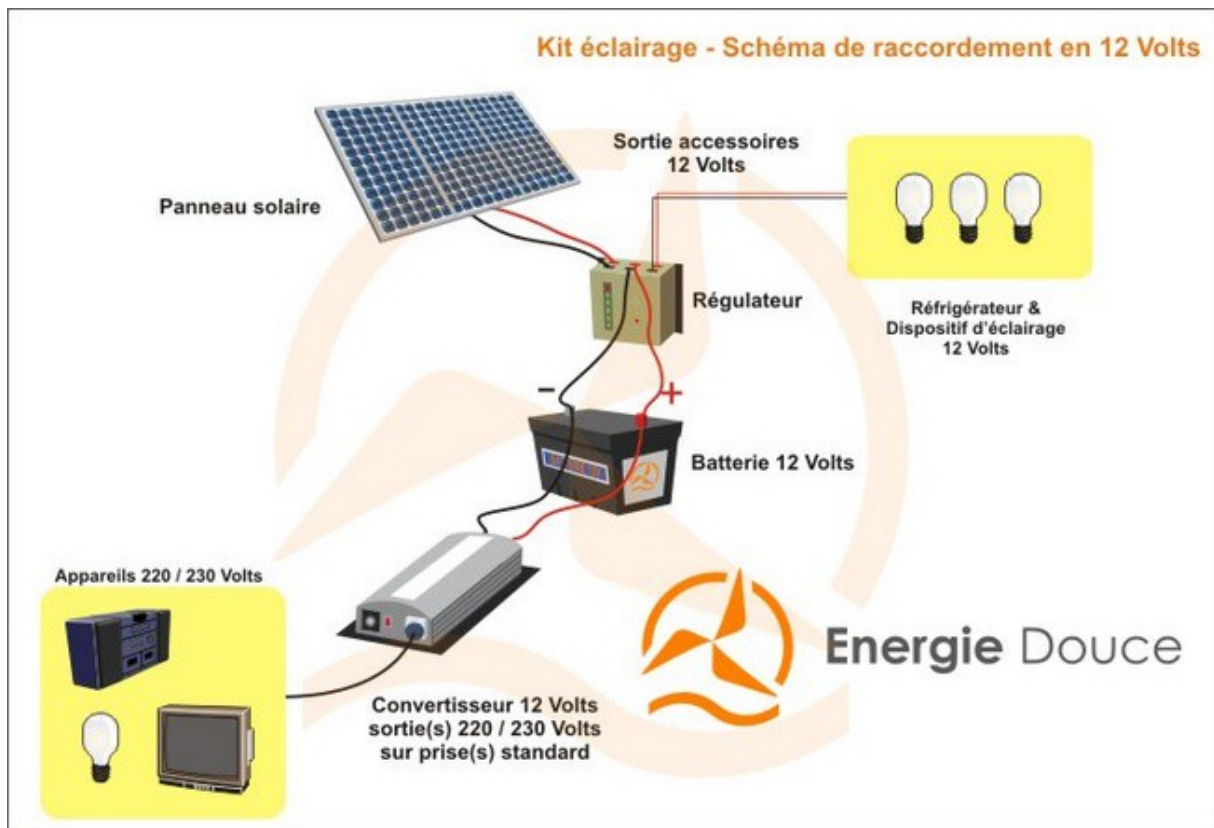
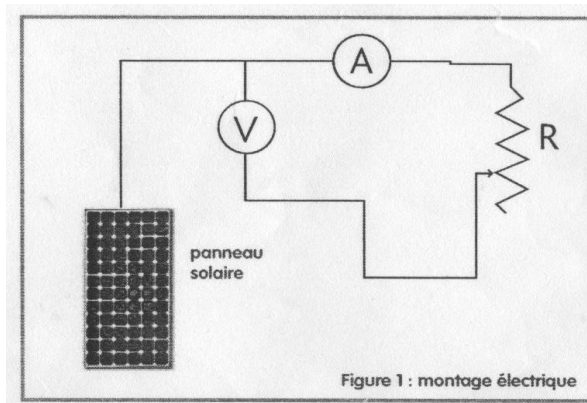
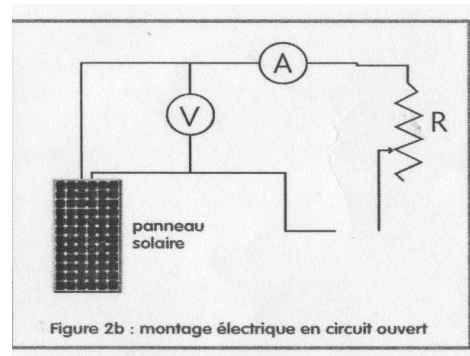
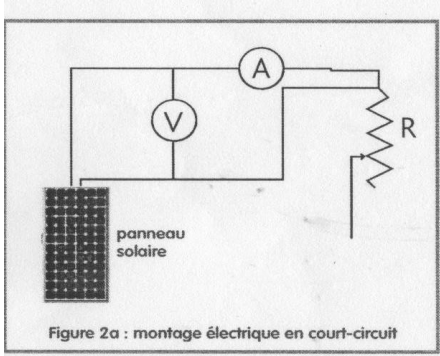
Test Date: 2013-06-20

- P_m → Puissance max
- I_{sc} → courant en court circuit
- V_{oc} → Tension en court circuit
- I_m → Intensité max
- V_m → tension max
- EFF → efficiency, rendement.

R_{sh} = résistance shunt (due au courant de fuite au niveau de la jonction PN)



6.2.3. Montages réalisés :



6.3. Propositions de sujets de projets

- Trouver un système de refroidissement du panneau solaire pour favoriser sa production d'énergie électrique ou alors trouver un moyen de recycler l'énergie thermique évacuée par le panneau.
- Fabrication d'une petite éolienne.
- Assemblage d'un moteur (thermique, électrique ...)

