

Installation solaire photovoltaïque



1 Description :

L'énergie produite par le rayonnement solaire est à l'origine de toute la vie sur la planète. C'est elle qui permet la croissance des végétaux, l'évaporation de l'eau de mer créant ainsi le cycle de l'eau. Cette énergie peut donc être indirectement utilisable par exemple en brûlant du bois pour créer de la chaleur, biomasse actuelle, ou bien en utilisant du pétrole ou du charbon biomasse fossile emprisonnée dans la profondeur de la croûte terrestre.

Cette énergie solaire peut aussi s'utiliser directement en étant convertie en énergie électrique ou en énergie thermique.

2 Exemples d'équipements autonomes :



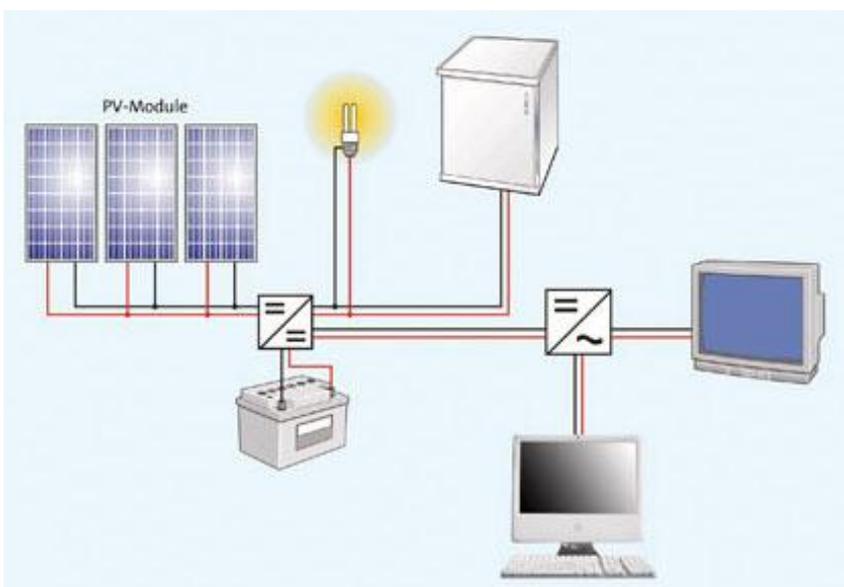
Lampadaire autonome à leds société NES Energy

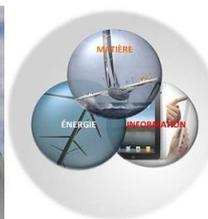
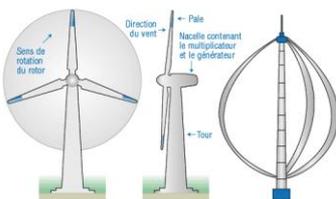
Alimentation d'un relais de télécommunication



3 Description d'une installation isolée :

Le schéma ci-dessous présente tous les principaux éléments d'une installation solaire de production d'électricité photovoltaïque en site isolé, (*non relié à la distribution électrique d'EDF*).





4 Les différentes énergies mises en jeu :

Le diagramme ci-dessous nous indique les différentes formes d'énergie ainsi que les transformations qui permettent de passer de l'une à l'autre¹.

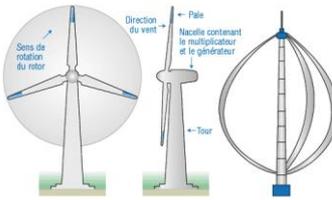


5 Le soleil source d'énergie :

Le soleil est une source d'énergie parfaite ... uniquement les jours sans nuages ... d'autre part l'expérience commune nous montre les différences entre les jours d'été et les jours d'hiver concernant à la fois l'ensoleillement et la quantité d'énergie reçue. Deux problèmes se posent donc, bien orienter les capteurs solaires, ensuite estimer la quantité d'énergie reçue. Evaluer le potentiel d'un site en étudiant l'incidence des ombres portées sur le champ de capteur. (on les appellent effet de masque)

L'énergie reçue annuelle moyenne est connue en France et est donnée à titre indicative sur la carte ci-dessous. Ceci ne tient pas compte évidemment des effets de masques.

¹ Voir Technologies première STI2D T.1 du réel au modèle, Hachette technique, 2011, p. 99.



LE SOLEIL SOURCE D'ENERGIE

La terre reçoit du soleil plus de 10 000 fois la puissance énergétique totale installée par l'homme aujourd'hui. Le soleil constitue donc une ressource énergétique fondamentale.

Ensoleillement Heures / an	Energie reçue * kWh / m ² / an
< 1750	< 1220
de 1750 à 2000	de 1220 à 1350
de 2000 à 2250	de 1350 à 1490
de 2250 à 2500	de 1490 à 1620
de 2500 à 2750	de 1620 à 1760
> 2750	> 1760

* Valeur de l'énergie du rayonnement solaire reçu sur un plan d'inclinaison égal à la latitude et orienté vers le Sud.

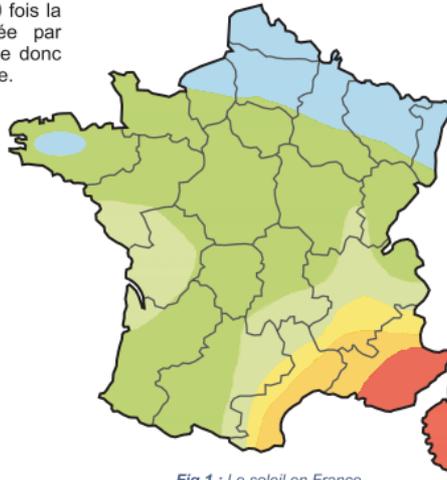
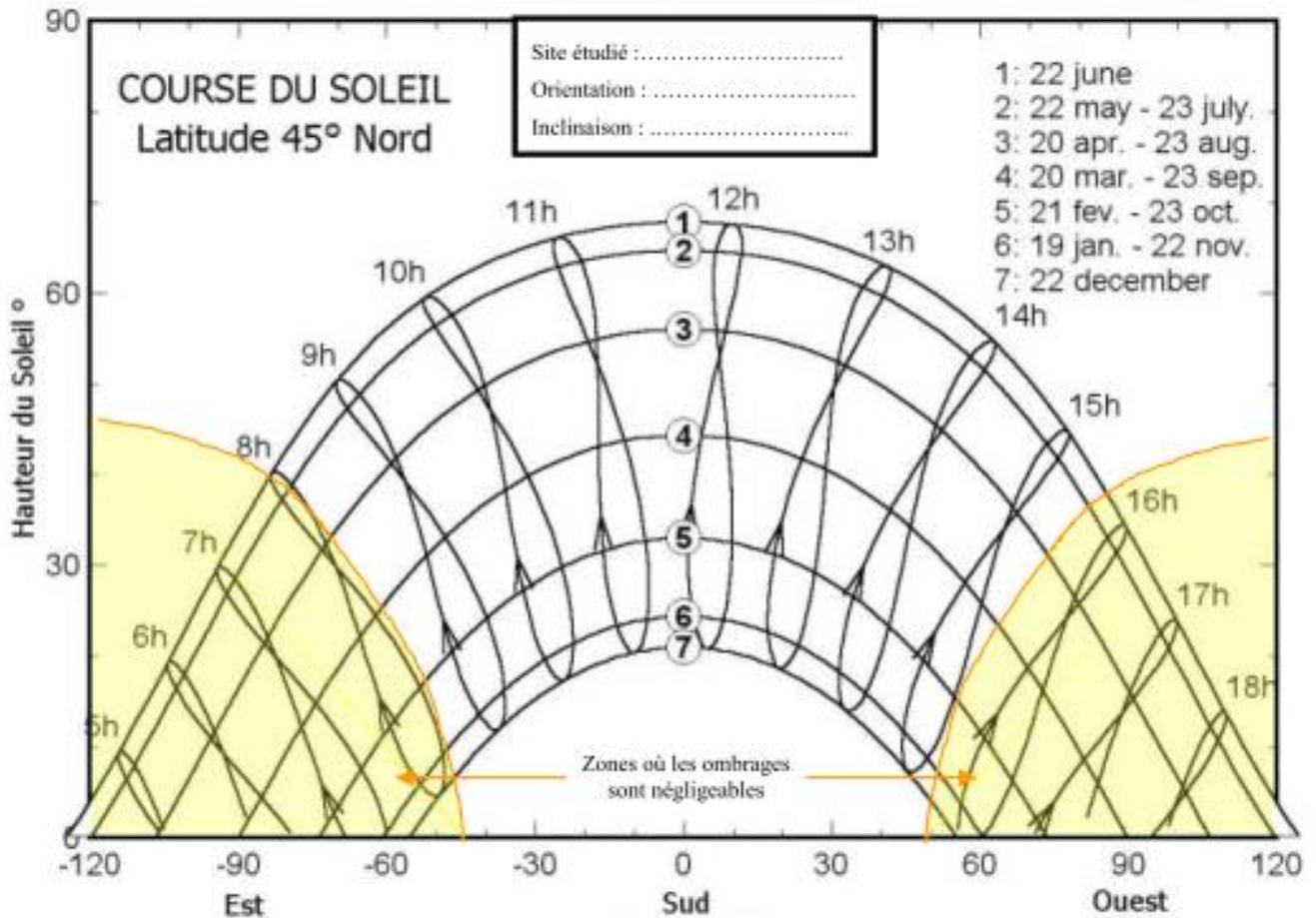
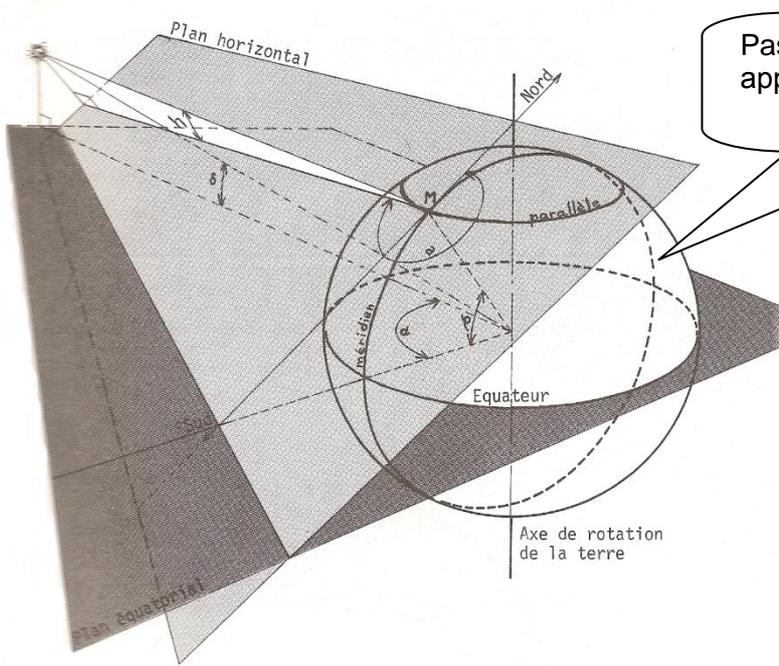
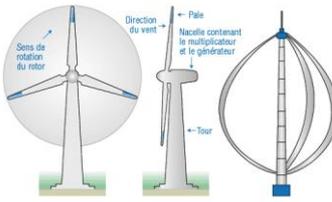


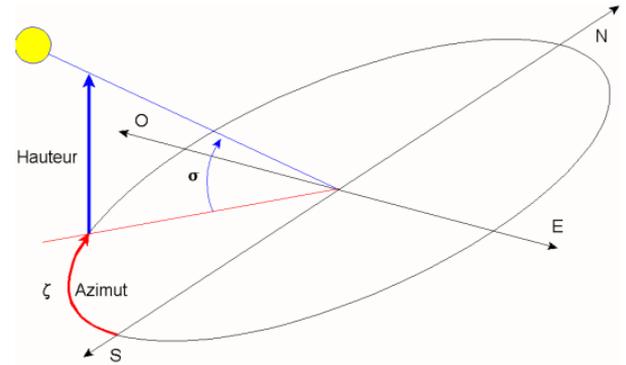
Fig.1 : Le soleil en France

Pour étudier l'incidence des ombres il faut connaître la position du soleil en fonction des coordonnées du lieu, de l'heure (heure solaire) et de la date de la journée. Pour toute la France on peut approximer la position en prenant 45° de latitude Nord ce qui donne le diagramme suivant :



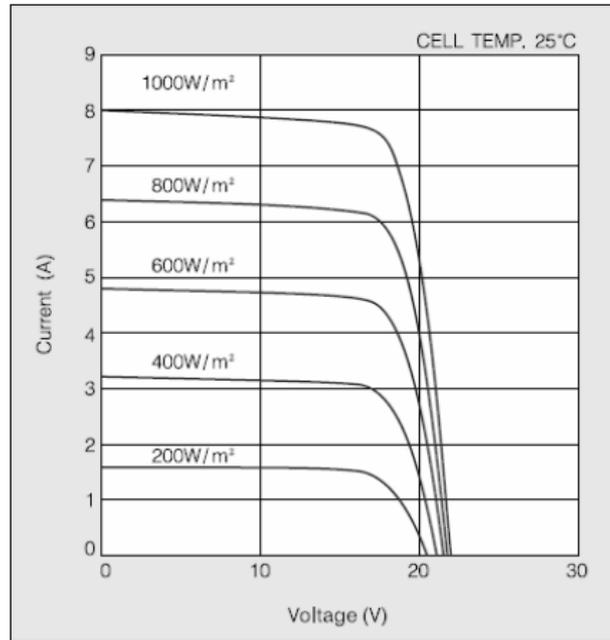
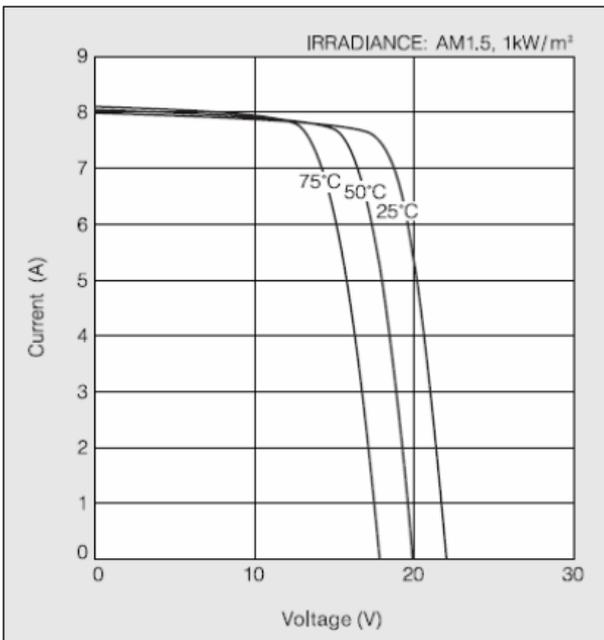


Pas facile de calculer la position apparente du soleil sur l'horizon !

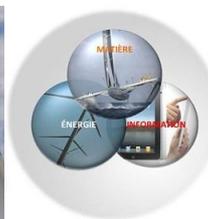


6 Le panneau solaire photovoltaïque :

Le panneau solaire est constitué d'un assemblage de cellules solaires. Il peut donc être de différentes dimensions. Nous étudions ici les caractéristiques du module solaire de la marque kyocera KC-130.

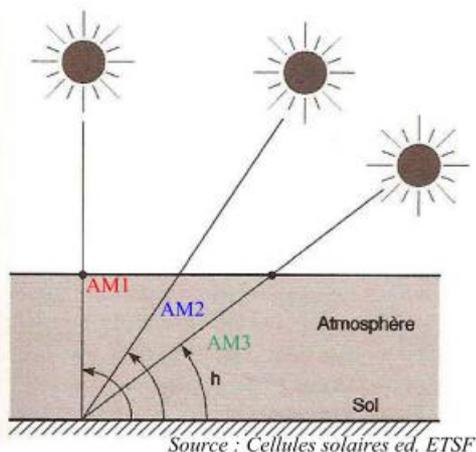


Commenter ces courbes. Quel est l'effet de la température ? Quel est l'effet de l'irradiance ?



6.1 Conditions normalisées de présentation des caractéristiques d'un module :

Normalisation : Les conditions standards de qualification des modules photovoltaïques sont : un spectre AM1.5 sous un éclairage de 1000W/m² et une température de 25°C. Les constructeurs de panneaux solaires spécifient les performances de leur matériel dans les conditions normalisées citées ci-dessus (S.T.C. : Standard Test Conditions).



6.2 Analyse du module PWX850 de Photowatt (Bourgoin Jallieu)

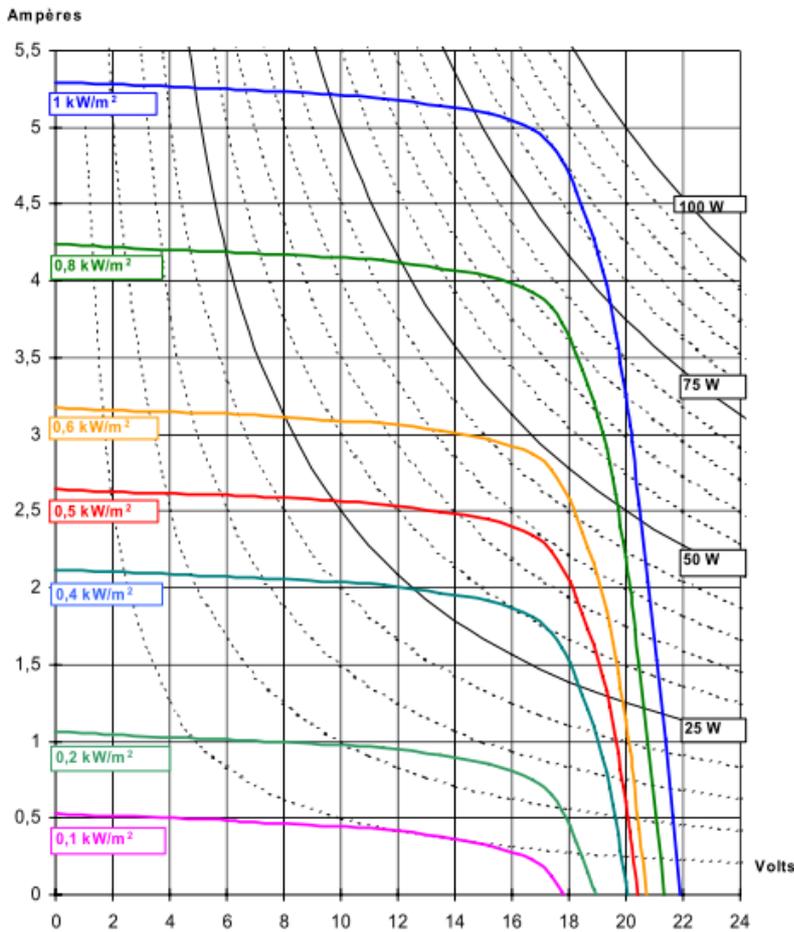
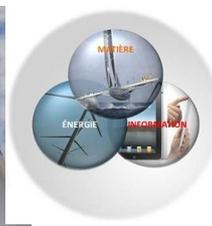
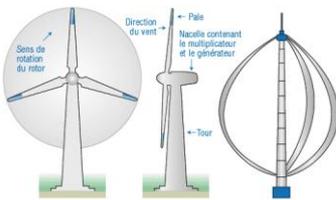
Les caractéristiques sont résumées ci-dessous :

PWX850		Configuration 12 V		
Puissance typique	W	75	80	85
Puissance minimale	W	70,1	75,1	80,1
Tension à la puissance typique	V	17	17,2	17,3
Intensité à la puissance typique	A	4,4	4,6	4,9
Intensité de court circuit	A	4,7	5	5,3
Tension en circuit ouvert	V	21,5	21,6	21,6
Tension maximum du circuit	V	600V DC		
Coefficient de température		$\alpha = +1,46 \text{ mA}/^\circ\text{C} ; \beta = -79 \text{ mV}/^\circ\text{C} ; \gamma \text{ P/P} = -0,43 \% /^\circ\text{C}$		
Power specifications at 1000 W/m² : 25°C : AM 1,5				

Nous pouvons vérifier sur les caractéristiques $I=f(\text{Irradiance})$:

L'intensité de court circuit :

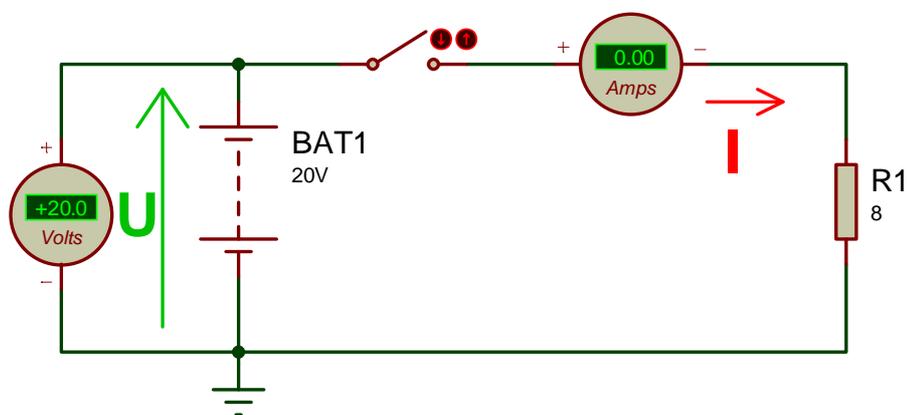
La tension en circuit ouvert :

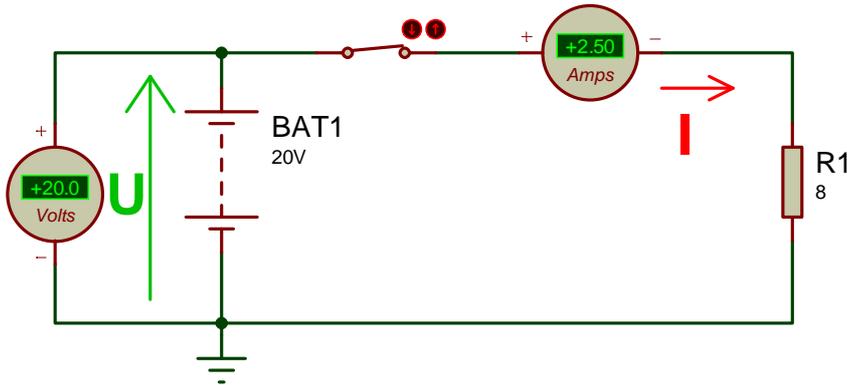
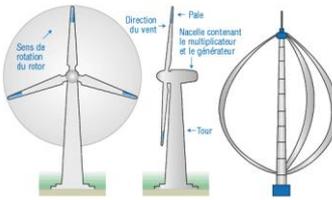


7 La puissance électrique :

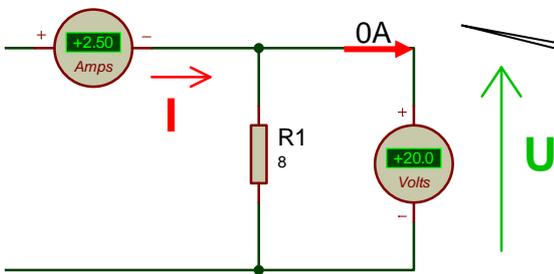
7.1 En courant continu

Connectons une source de tension continue de 20V à une résistance de 8Ω , lorsque l'interrupteur est fermé la source débite un courant électrique I . Ce courant est dû au déplacement des électrons du pôle - vers le pôle + du générateur de tension (le sens conventionnel positif du courant I est du pôle + vers le pôle -).





La puissance délivrée à la charge est égale au produit de la tension par l'intensité du courant électrique.
Soit ici : $2,5 \cdot 20 = 50 \text{ W}$



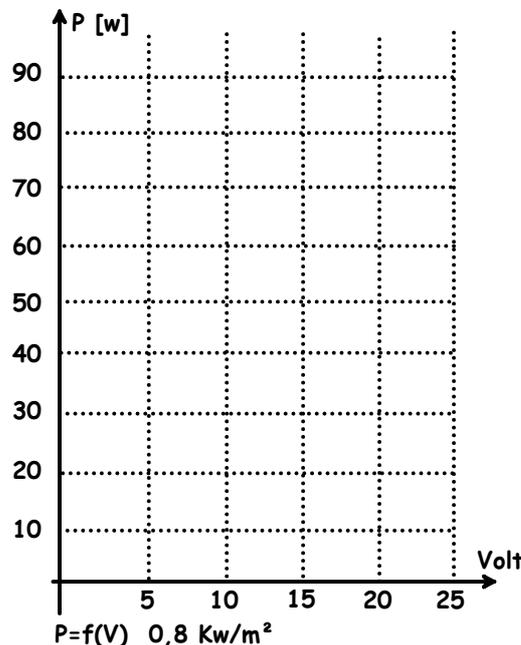
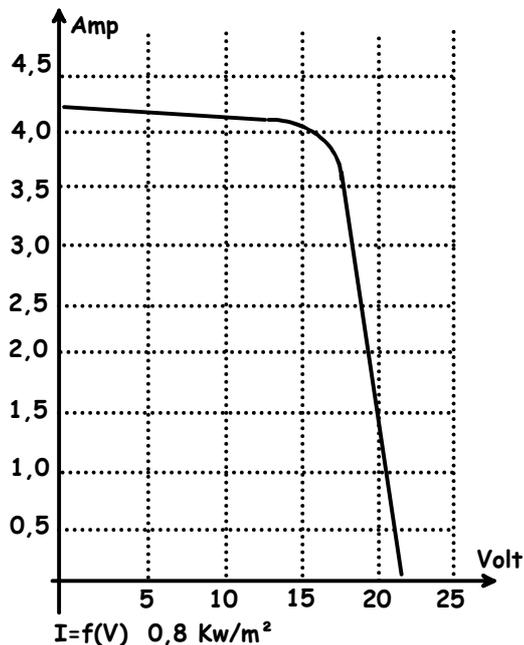
Le courant traversant l'appareil de mesure de la tension est très faible, il est donc négligé.

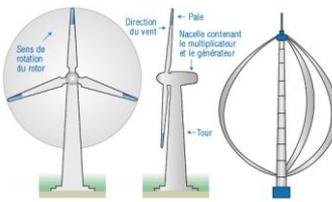
$$P = U \cdot I$$

7.2 Puissance délivrée par le module solaire :

Pour étudier la puissance disponible en sortie du module solaire il faut tracer la courbe de puissance. Pour cela on détermine $P=f(V)$ en fonction de l'irradiance :

Caractéristique du Module PWX850





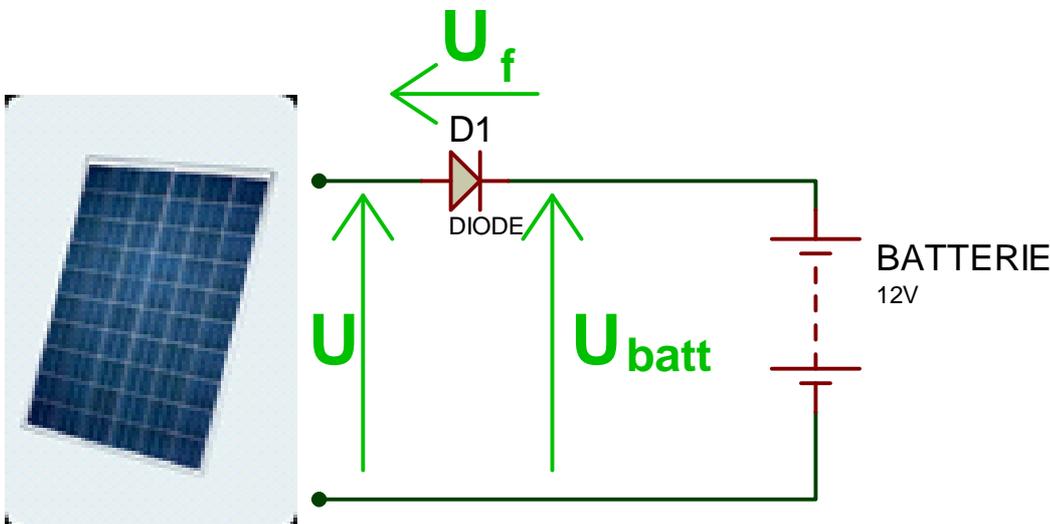
A partir de ce graphe on observe un maximum de la puissance délivrée par le module pour une tension de U_M Volt.

Quelle est cette valeur ?

Ce maximum est-il indépendant de l'irradiance ?

Conséquence, si on branche une batterie de 12 V directement au module solaire avec une diode anti retour selon le schéma de principe ci-dessous :

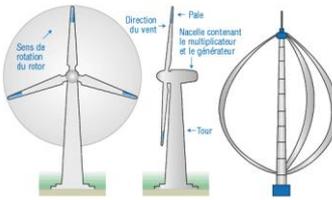
la tension imposée au module solaire est alors de : $U_{mod} = U_{batt} + U_f = 12 + 1 = 13V$
 quelle est la puissance reçue par la batterie ?
 comparer avec la puissance maximale théoriquement disponible.



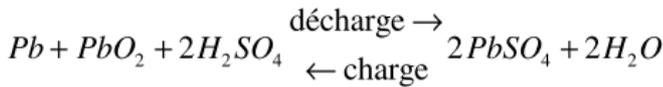
8 Etude des batteries techno énergie chimique AH SOC

Une installation solaire photovoltaïque isolée, non reliée au secteur, doit stocker l'énergie. La solution la plus courante consiste à utiliser des batteries. Différentes technologies de batteries, ou accumulateurs, existent. Citons les accumulateurs au plomb ($Pb-PbO_2$), les accumulateurs au Nickel-Cadmium (Ni-Cd), les accumulateurs Nickel-Metal-Hybride (Ni-MH). Comparons les principales caractéristiques :

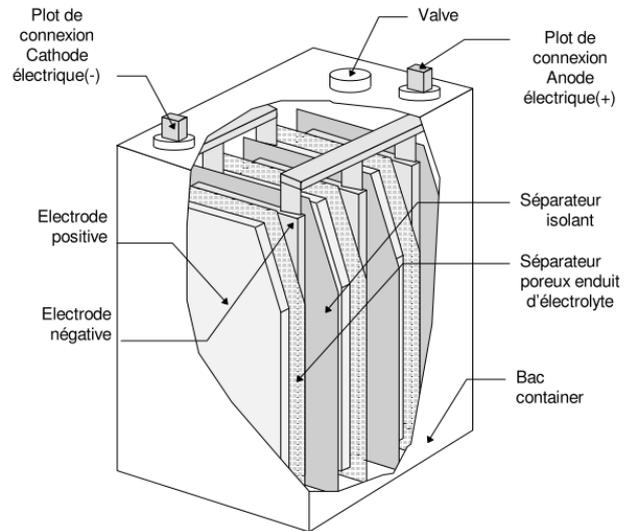
Batterie Couple	Energie /Poids	Tension d'une cellule	Tension en fin de décharge lente/rapide	Nombre de cycle	Température de fonctionnement	Remarques
Nickel-Fer <i>Ni-Fe</i>	25Wh/kg	1,2V		900	-20°C	la capacité décroît très fortement avec la température
Plomb <i>Pb-PbO₂</i>	45 Wh/kg	2 V	1,8 à 1,65 V	600 à 1000	20 à 50°C	coût de 1000 à 1500 ff/kWh
Nickel Hydrogène <i>Ni-H₂</i>	56Wh/kg	1,2 V		10000	-20 à +60°C	doit résister à de forte pression interne
Nickel Cadmium <i>Ni-Cd</i>	60 Wh/kg	1,2 V	1,09V / 0,7V		20 à 50°C	
Nickel Zinc <i>Ni-Zn</i>	90 Wh/kg	1,5 V		600 à 1000	20 à 50°C	
Sodium Soufre <i>Na-S</i>	100 Wh/kg				325 °C	
Lithium ion <i>Li-ion</i>	120 Wh/kg	3,9 V	2,75V / 1,45V		-20 à +55 °C	
Nickel Métal Hybride <i>Ni-MH</i>					20 à 50°C	



Les accumulateurs au plomb sont les plus utilisés pour des raisons économiques, la réaction chimique interne permet de stocker de l'électricité lors de la charge et de la restituée lors de la décharge. L'équation est la suivante :



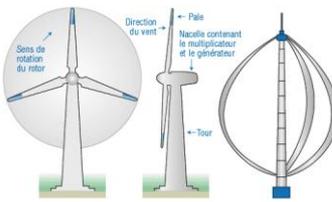
L'accumulateur au plomb ouvert, nécessite le maintien du niveau de son électrolyte par des appoints réguliers d'eau déminéralisée, peut en fonctionnement dégager des gaz dangereux tel que l'hydrogène (H₂). De ce fait ce sont maintenant des accumulateurs au plomb fermé étanche, à recombinaison de gaz, qui sont utilisés dans les équipements.



8.1 Principales grandeurs caractérisant un accumulateur :

Examinons les caractéristiques d'une batterie au plomb étanche industrielle

CARACTERISTIQUES MECANIQUES PHYSICAL SPECIFICATIONS		
TENSION NOMINALE / NOMINAL VOLTAGE		12 V
CAPACITE / NOMINAL CAPACITY (20HR)		129 Ah
DIMENSIONS	Longueur / Length	410 mm
	Largeur / Width	177 mm
	Hauteur / Total Height (with terminal)	225 mm
MASSE / WEIGHT		38 Kg
TYPE DE BORNE / STANDARD TERMINAL		Insert femelle M6 / Female insert M6
COUPLE DE SERRAGE / CLAMPING TORQUE		8 Nm
CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES ELECTRICAL SPECIFICATIONS		
CAPACITE / RATED CAPACITY 1,8 V/élément - 1,8 V/cell	20 hour rate (28,4 A)	129 AH
	10 hour rate (54,7 A)	124 AH
	5 hour rate (98,5 A)	110 AH
	3 hour rate (149A)	91.2 AH
	1 hour rate (338 A)	84.6 AH
INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LA CAPACITE / CAPACITY AFFECTED BY TEMPERATURE	40°C (104°F)	103%
	25°C (77°F)	100%
	0°C (32°F)	86%
RESISTANCE INTERNE / INTERNAL RESISTANCE	Fully charged battery 3,6 milliohms (25°C, 77°F)	
COURANT MAXI EN 10 sec. / CURRENT MAXI 10S		1.43 KA (end of voltage 1,6V/cell)
COURANT MAXI EN 5 sec. / CURRENT MAXI 5S		2 KA (end of voltage 1,6V/cell)
COURANT DE COURT-CIRCUIT / SHORT-CIRCUIT CURRENT		2.9 KA



Nous trouvons tout d'abord sa capacité soit ici 129 Ah, sa tension nominale 12V.

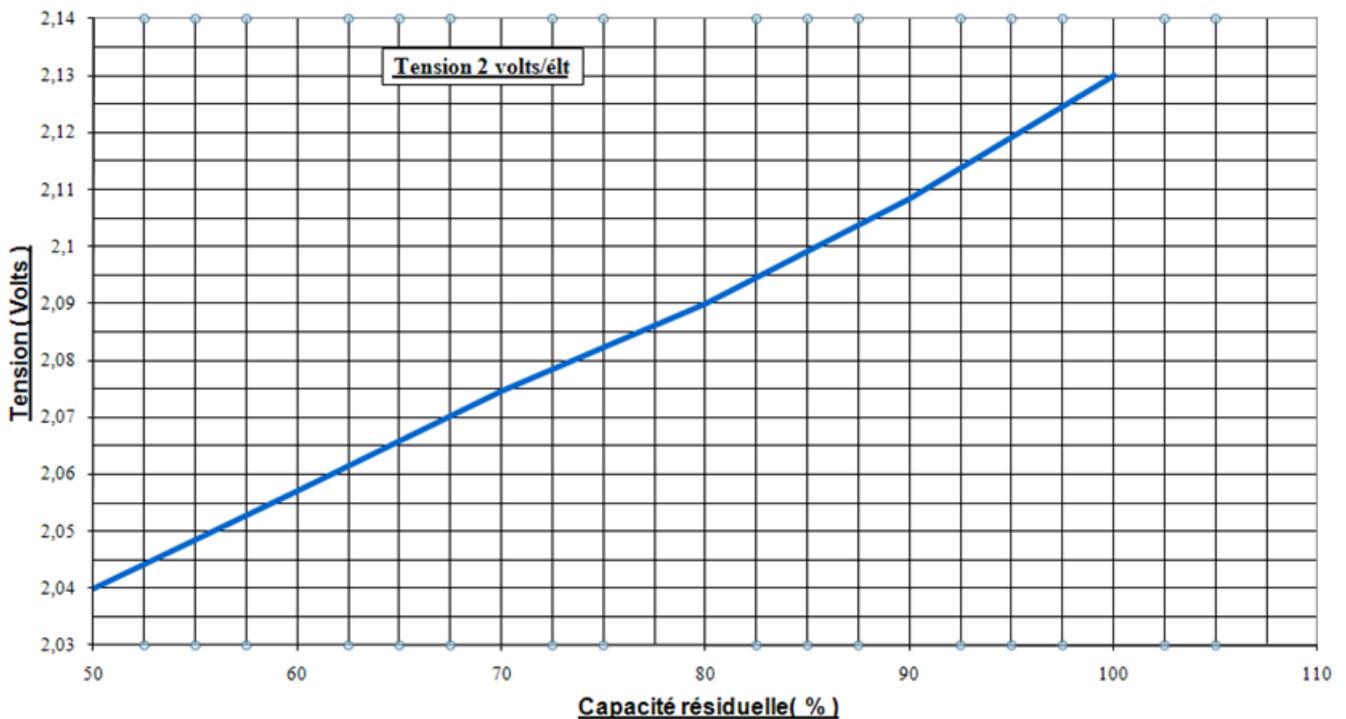
Nous voyons aussi que la capacité dépend du courant de décharge, elle varie de 129AH à 84,6AH selon la grandeur du courant soit ici 28,4A à 338A. La capacité dépend aussi de la température.

8.2 Quel différence de potentiel trouve t'on aux bornes d'un accumulateur ?

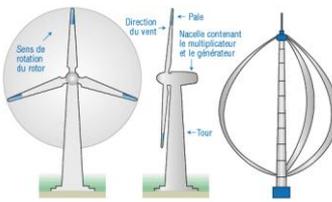
Un accumulateur au plomb est un système non linéaire, dont l'état de fonctionnement présent dépend des conditions de ce fonctionnement : courant débité en charge ou en décharge, capacité de la batterie ; mais aussi dépend du passé, du vécu en quelque sorte de cet accumulateur.

Néanmoins la mesure de la tension à ses bornes, la batterie étant au repos $I=0A$, permet d'avoir une idée de la capacité restante. Attention ces mesures sont toujours rapportées à un élément de l'accumulateur. Donc la mesure est divisée par 6 pour un accumulateur 12V, l'utilisation d'un multimètre 20000 points est indispensable. Une différence de potentiel de 0,1V étant significative !

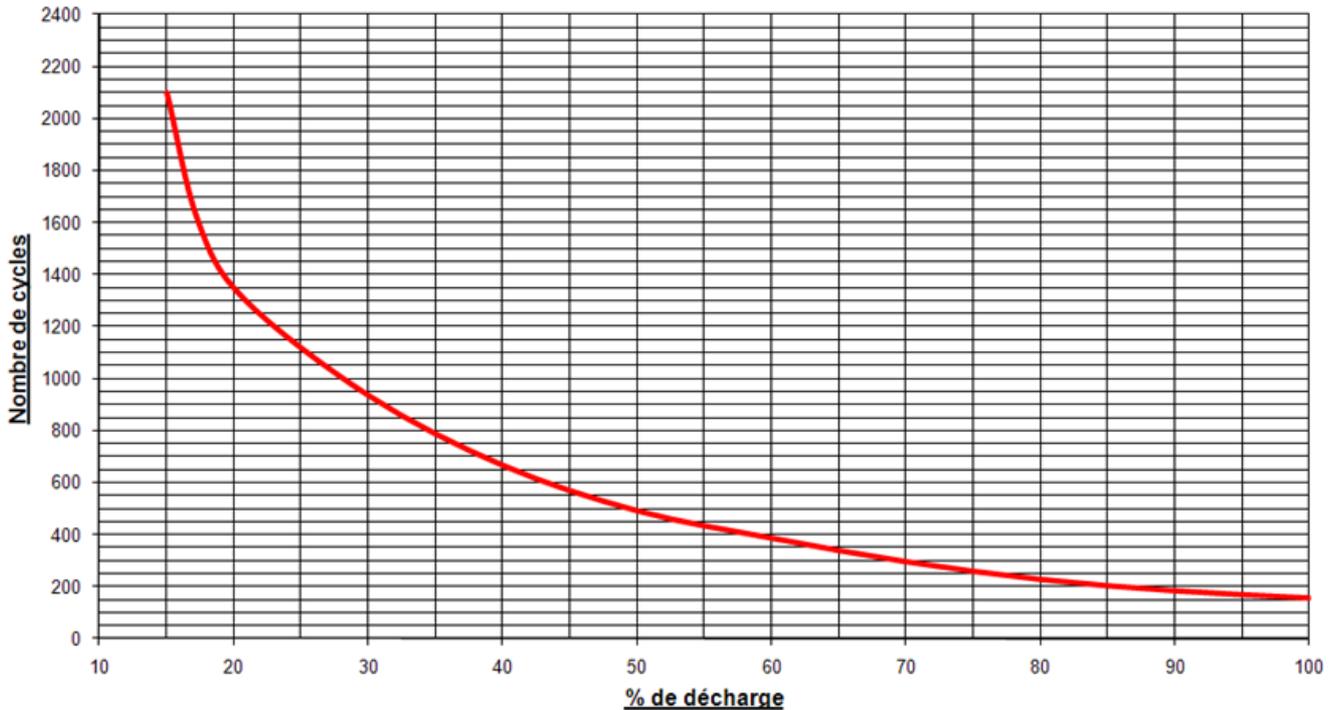
**Capacité résiduelle en fonction de la tension f.e.m.
batteries étanches**



Un autre paramètre très important est le nombre de cycle c'est-à-dire le nombre de charge décharge que peut réaliser une batterie durant sa vie. Ce nombre de cycle dépend de la profondeur de celui-ci :



Nombre de cycles en fonction du % de décharge



Exemple : si on décharge la batterie de 30% on peut réaliser 900 cycles. Si il y a un cycle par jour cela donne une durée de vie de deux ans et demi.

8.3 Les contraintes à respecter dans l'utilisation d'un parc de batteries.

La bonne utilisation d'une batterie doit respecter d'une part une charge jusqu'à une tension maximale à ne pas dépasser sous peine de production de gaz, et d'autre part interdire les décharges profondes qui sont très préjudiciables à la durée de vie de la batterie.

Ces fonctions sont réalisées par les automates de contrôles de la charge et décharge des parcs de batteries, autrement appelés régulateur solaires. Il en existe de différents principes voir plus loin.

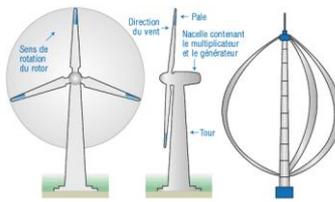
8.4 Evaluer l'état de charge SOC (*State of Charge*).

Au vu de cette étude très simplifiée, on observe la difficulté de déterminer la quantité d'électricité disponible à un instant t dans un parc d'accumulateur. Cette donnée est très importante car c'est elle qui permet de déterminer par exemple le nombre de Km restant à parcourir pour un véhicule électrique, avant de tomber en panne d'électricité !

La détermination du SOC est donc d'un enjeux technologique majeur et reste difficile car il faut le déterminer en intégrant toutes les conditions de fonctionnement du parc, son histoire. Cette tâche est dévolue à des algorithmes 'pointus' d'analyse de données et d'identification, reste l'objet d'une recherche scientifique importante.

9 Etude des régulateurs de charge solaire.

Pour protéger la durée de vie de la batterie, il est impératif d'utiliser une régulation de charge. Celle-ci peu être de différentes performances selon le fabricant. Citons les trois principales possibilités :



Régulation sur la mesure directe de la tension aux bornes des batteries. Autoriser la charge quand la tension mesurée aux bornes des batteries est inférieure à la valeur maximum possible. Autoriser la consommation d'énergie sur la batterie quand la tension mesurée est supérieure au minimum possible.

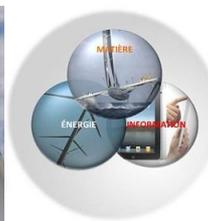
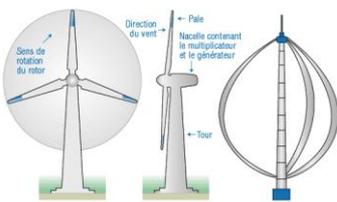
Ce fonctionnement est le plus simple et le moins performant. En effet une mesure directe de la tension aux bornes des batteries ne donne qu'une image imparfaite de l'état de charge de celle-ci.

Régulation par détermination du SOC, certains régulateurs déterminent l'état de charge SOC du parc d'accumulateurs par des algorithmes d'estimation en temps réel. La gestion se fait alors sur cette valeur du SOC.

Régulation MPPT, La dernière génération de régulateur la plus performante détermine le meilleur point de fonctionnement entre le champ de modules photovoltaïques et l'état des batteries. C'est le MPPT qui permet la poursuite du point de fonctionnement optimal. (Maximum Power Point Tracker).



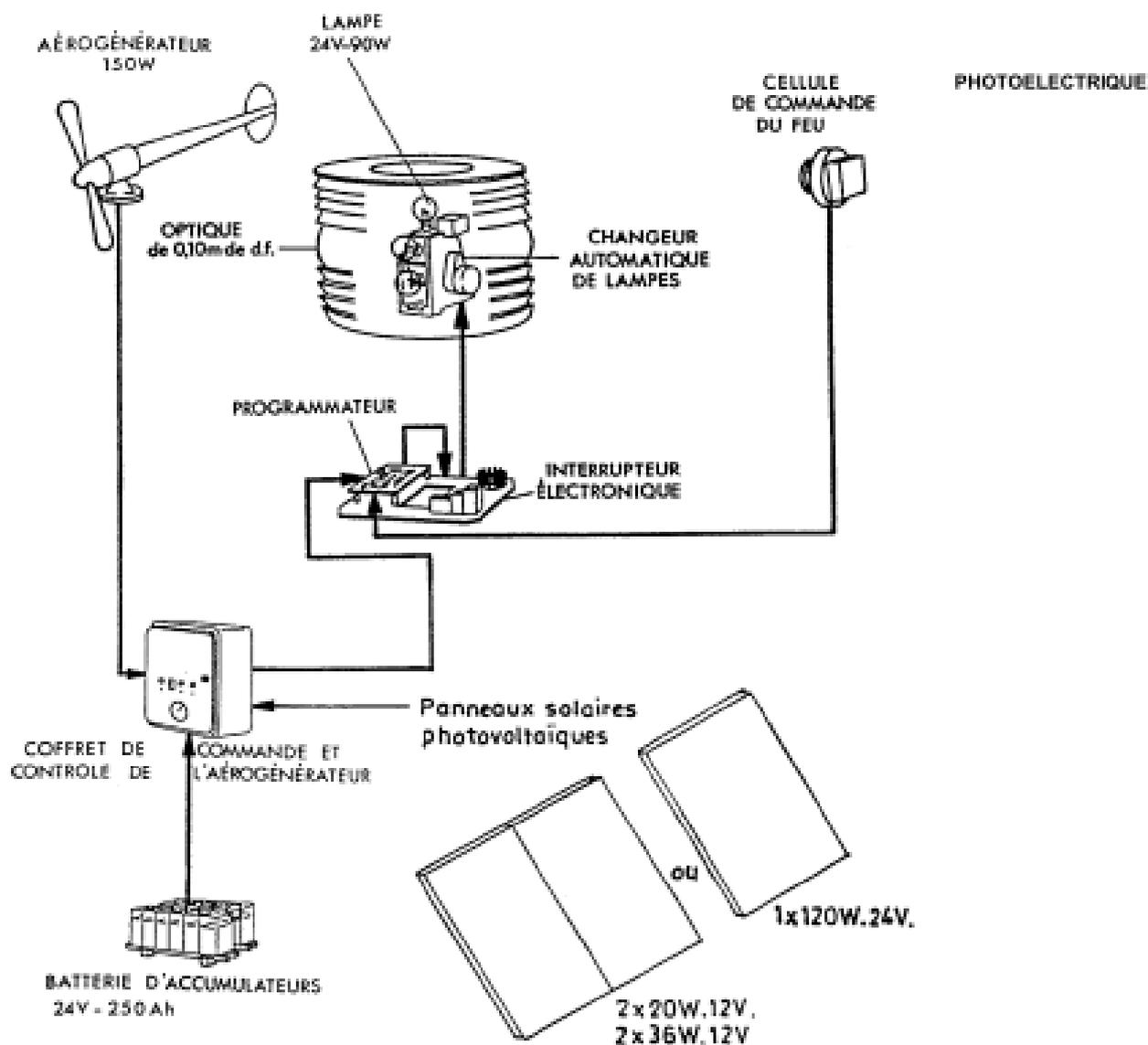
La gestion de ces régulateurs fait appel à une technique de conception de système de commandes basée sur les automates séquentiels. Ceux-ci feront l'objet d'un prochain cours.



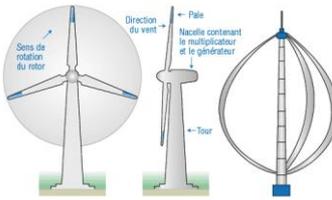
Pour approfondir

10 Etude de l'autonomie d'un site isolé (D'après le sujet de BAC SSI Polynésie 2005)

Le phare de l'île noire assure la sécurité de la navigation en mer dans la baie de Morlaix, Finistère. Le schéma de l'installation est le suivant :



La source lumineuse est une lampe halogène d'une puissance de 90 W. Elle est alimentée sous une tension continue de 24 V. Un système optique est mis en place, ce qui permet d'augmenter l'intensité lumineuse de la lampe et la visibilité du phare. Ce système optique s'appelle « lentilles de Fresnel » du nom de son inventeur. Il est réalisé en polycarbonate.



La commande du phare est électronique, le coffret et la carte de commande assurent plusieurs fonctions:

Détection de la luminosité minimale : grâce à une détection par cellule photoélectrique de la lumière ambiante, le phare va s'allumer automatiquement, dès que la luminosité ne permet plus une visibilité suffisante (nuit, brouillard).

Définition du rythme du signal lumineux : une mémoire programmée contient tous les rythmes normalisés. Le choix du rythme du signal lumineux se fait grâce à une roue codeuse.

Contrôle de l'état de la batterie : le phare s'éteint en cas de décharge excessive de la batterie pour éviter de la détériorer. Elle interrompt également la charge de la batterie lorsque celle-ci est complètement chargée.

Contrôle de l'état de la lampe : la détection de fonctionnement de la lampe permet de mettre en route le changeur de lampe si le filament est rompu.

Télesurveillance du fonctionnement général : les informations de sécurité relatives à l'état du phare sont transmises vers un poste de surveillance à terre.

La batterie d'accumulateur au plomb étanche réalise l'alimentation électrique autonome de la lampe. Les caractéristiques sont : Caractéristiques :

Tension nominale : 24 V continu

Capacité nominale : 250 Ah

Le panneau solaire est constitué de cellules photovoltaïques qui convertissent l'éclairement énergétique du soleil en courant continu. L'assemblage des cellules en série permet d'obtenir une tension compatible avec la charge de la batterie. Le courant produit par le panneau est directement proportionnel à l'ensoleillement reçu : le panneau solaire fonctionne comme un générateur de courant. Les conditions d'installation du panneau solaire permettent la meilleure exposition au soleil tout au long de l'année : orientation sud, inclinaison égale à la latitude.



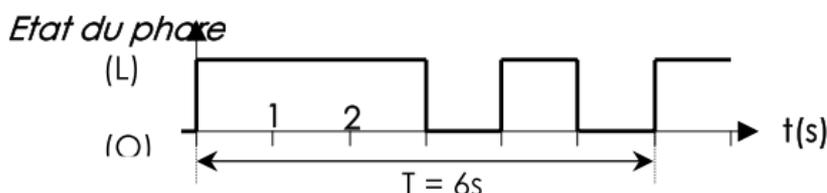
L'éclairement énergétique définit la puissance du rayonnement solaire reçue par unité de surface. Il s'exprime en W/m².

10.1 Etude de l'autonomie du phare

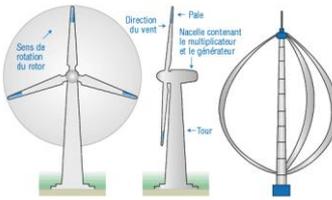
Calculer l'intensité du courant qui traverse la lampe IMAX.

Quelles sont les situations météorologiques qui conditionnent la prise en compte d'un fonctionnement autonome uniquement sur l'énergie stockée dans les accumulateurs ?

On considère une réserve d'autonomie de 10 jours comme suffisante. Le graphe ci-dessous donne le cycle de fonctionnement de la lampe du phare L=Lumière O=Obscurité :



Calculer l'intensité moyenne consommée pour un cycle.



En hiver la durée de la nuit est de 15 heures. Calculer la quantité d'électricité Q_d consommée par le phare en une nuit. ($Q = I \cdot t$)

Sur période de 24 heures (un jour et une nuit), la batterie fournit au phare un courant moyen égal à 1,56 A.

A l'aide du document technique N°1, déterminer la capacité réelle de la batterie C correspondant à ce courant de décharge.

Calculer T_a , le nombre de jours consécutifs de fonctionnement qu'autorise la batterie chargée ?

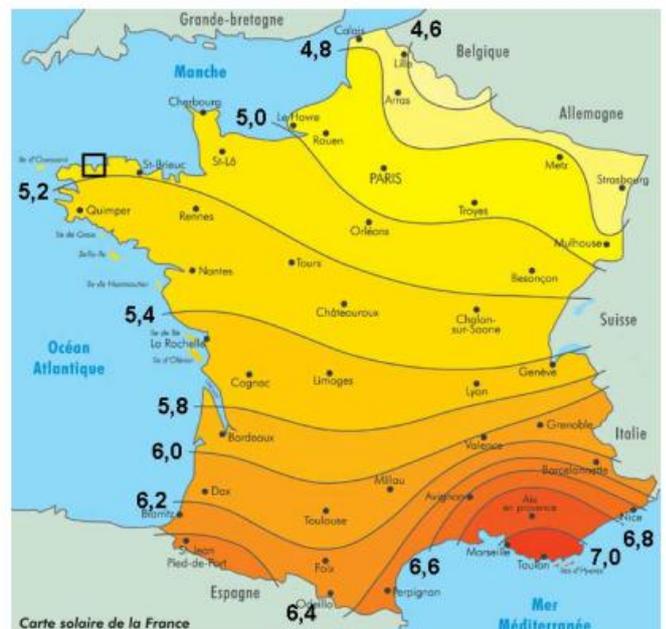
La batterie est-elle correctement dimensionnée (justifier la réponse) ?

10.2 Dimensionnement du panneau solaire.

La carte ci-contre donne la mesure de **l'irradiation*** solaire reçue au niveau du sol en **kWh/m^2 par jour** (moyenne au mois de juillet). La localisation du phare est matérialisée par le carré noir.

***L'irradiation** définit la quantité d'éclairement énergétique cumulé dans le temps : c'est l'énergie du rayonnement solaire reçue par unité de surface. Elle s'exprime en Wh/m^2 .

Exemple : pour une irradiation de 1 kWh/m^2 par jour le panneau solaire reçoit un éclairement énergétique équivalent à 1 kW/m^2 pendant une heure.



A l'aide de la carte donnée ci-dessus, déterminer approximativement R_a l'irradiation moyenne reçue quotidiennement par le panneau solaire au mois de juillet.

En déduire le nombre d'heures T_e d'exposition quotidienne du panneau à éclairement énergétique équivalent à 1 kW/m^2 .

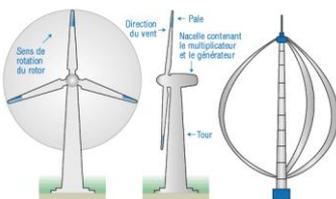
A l'aide du document technique N°1, déterminer la valeur du courant I_p fourni par le panneau exposé à un éclairement énergétique de 1 kW/m^2 pour une tension de 24 V.

En utilisant les résultats précédents, calculer la quantité d'électricité Q_p produite par le panneau solaire en un jour.

Au mois de juillet, la quantité d'électricité Q_d consommée quotidiennement par le phare s'établit à 23 Ah en moyenne.

En tenant compte du rendement de la batterie η_b défini ci-dessous, calculer la quantité d'électricité Q_c à fournir à la batterie pour assurer sa recharge complète.

Le rendement en quantité d'électricité η_b définit le rapport entre le nombre d'Ampère-heures Q_d restitués par la batterie lors de la décharge et la quantité d'électricité Q_c reçue lors de la charge : $\eta_b = Q_d / Q_c$. Ce rendement est estimé à 85 % dans les conditions de fonctionnement de l'application.



Conclure quant à la capacité du panneau solaire à recharger seul la batterie pendant le mois de juillet (le mois le plus ensoleillé de l'année).

11 Etude d'un site Grenoblois.

Le lycée du Grésivaudan propose sur un site internet spécifique l'accès aux données de production de sa centrale solaire. Cette centrale est directement reliée au réseau EDF.

Le site est visible ici : <http://solaire.lgm.ac-grenoble.fr/>

Après visite du site :

Résumer ses principales caractéristiques. Surface de panneaux, technologie ...

Comparer la production moyenne de deux mois en été et en hiver.

En déduire la production moyenne d'un m² de panneau solaire pendant une année sur ce site.



12 Analyse d'une consommation EDF domestique.

Procurer vous la facture EDF de votre domicile et trouvez le nombre de KWh consommé sur un mois. Déduire la surface de panneaux solaires nécessaire pour assurer seule cette consommation. On ne tient pas compte des problèmes de stockage de l'électricité ni des cycles jours / nuits.

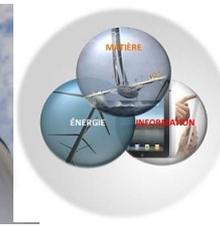
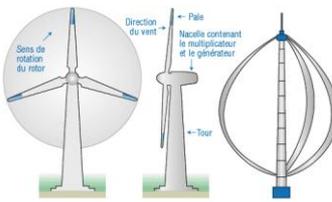
13 Bilan de consommation.

Voilà quelques données concernant la consommation de quelques appareils électriques courants :

t pour finir, quelques petits rappels :
 une TV : entre 60 et 150W
 un ordinateur portable de bureau : entre 40 et 100W
 un ordinateur de gamer : environ 500W
 un vieux frigo : environ 1500 à 2000Wh/j
 un frigo A++ : entre 400 et 700Wh/j
 un frigo solaire A++ : entre 70 et 200Wh/j
 une lampe à incandescence : c'est marqué dessus 40, 60, 75, 100W
 un halogène: 300 à 500W
 une lampe à économie d'énergie : entre 9 et 20W
 une lampe LED : entre 1 et 4W
 une machine à laver: entre 2000 et 3000Wh par cycle
 une cafetière : 2000W environ
 un micro ondes : 900W



Vous souhaitez vivre en autonomie complète dans votre chalet en montagne, dimensionner vos besoins en électricité en fonction de vos choix de matériels. Pour chaque équipement donner : son nom / sa consommation instantanée ou journalière / le nombre d'heures d'utilisation par jour / la consommation totale par jour en Kwh. Puis faire le bilan ...



DT N°1 sur la batterie d'accumulateurs et le panneau solaire

BATTERIE D'ACCUMULATEURS

La batterie est constituée de 12 accumulateurs montés en série. La tension à ses bornes est de 24V. Elle varie entre 21 V et 29 V selon l'état de charge.

Capacité

La capacité C de la batterie s'exprime en ampères-heures (Ah). C'est la quantité d'électricité que la batterie chargée peut restituer au cours d'une décharge complète. La capacité nominale C_{10} est définie pour une décharge complète à courant constant pendant 10 heures. Le courant constant débité est noté I_{10} .

Si $C_{10} = 250 \text{ Ah}$: la décharge durera 10 heures pour un courant de décharge I_{10} constant et égal à 25 A.

La capacité réelle de la batterie dépend du courant de décharge :

- Si le courant moyen de décharge est inférieur à I_{10} , la capacité de la batterie est supérieure à C_{10} .
- Si le courant moyen de décharge est supérieur à I_{10} , la capacité de la batterie est inférieure à C_{10} .

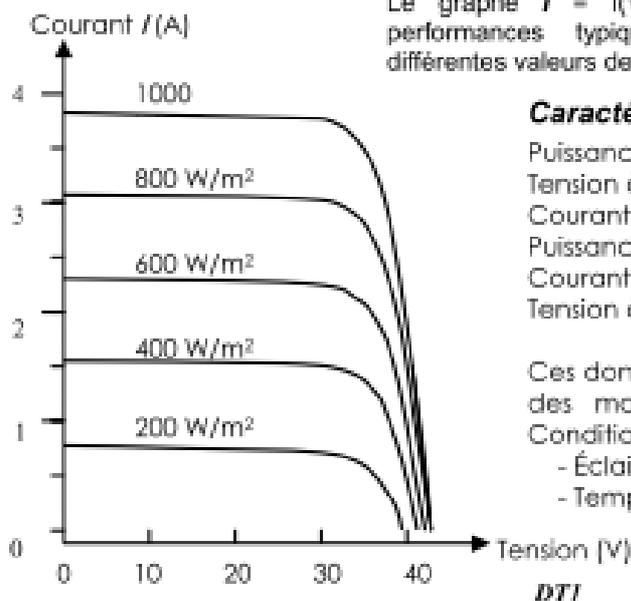
Le tableau suivant indique la capacité de la batterie en fonction du courant de décharge :

Courant de décharge (A)	25	12,5	7	5	3,9	3,1	1,6
Capacité (Ah)	250	300	335	360	370	375	390

PANNEAU SOLAIRE

Le panneau solaire est constitué de 72 cellules photovoltaïques montées en série qui lui permettent de charger des batteries de 24 V. Il produit un courant continu I proportionnel à l'éclairement énergétique reçu.

Caractéristique Courant (I) en fonction de la tension (V)



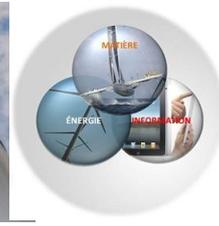
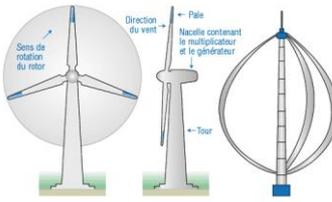
Le graphe $I = f(V)$ donné ci-dessous indique les performances typiques du panneau solaire pour différentes valeurs de l'éclairement énergétique :

Caractéristiques électriques

Puissance typique P_{typ} : 120 W
 Tension à la puissance typique V_{typ} : 33,7 V
 Courant à la puissance typique I_{typ} : 3,56 A
 Puissance minimale garantie P_{min} : 110 W
 Courant de court-circuit I_{sc} : 3,8 A
 Tension à circuit ouvert V_{oc} : 42,1 V

Ces données caractérisent la performance des modules types mesurées dans les Conditions d'Essai Standard (STC) :

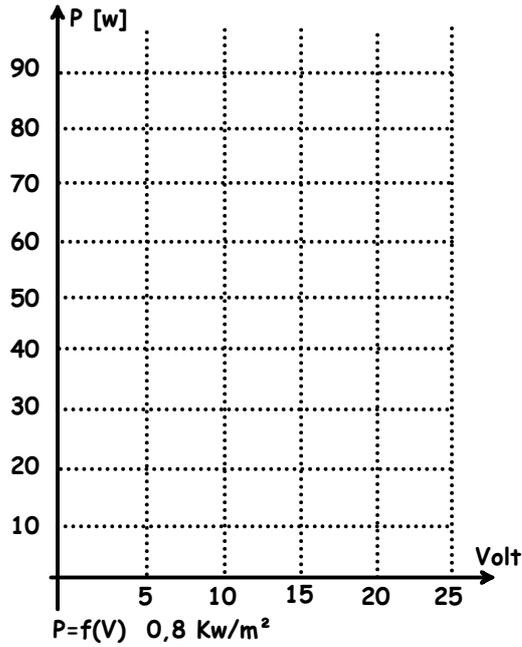
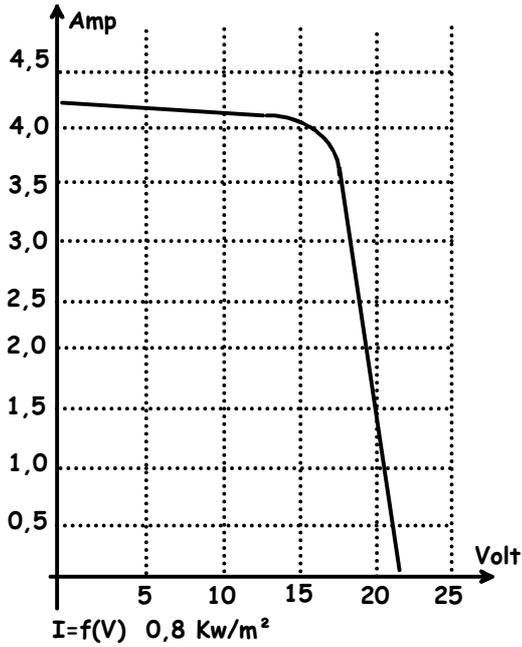
- Éclairement énergétique de 1 kW/m²
- Température de la cellule : 25 °C

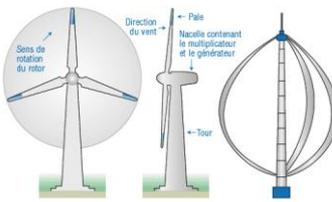


14 Puissance délivrée par un module solaire.

Pour étudier la puissance disponible en sortie du module solaire il faut tracer la courbe de puissance. Pour cela on détermine $P=f(V)$ en fonction de l'irradiance :

Caractéristique du Module PWX850





15 Installation solaire photovoltaïque reliée au réseau

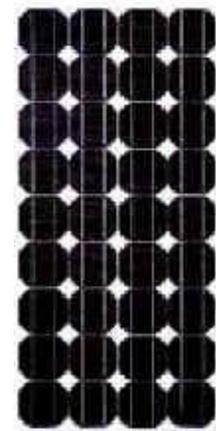
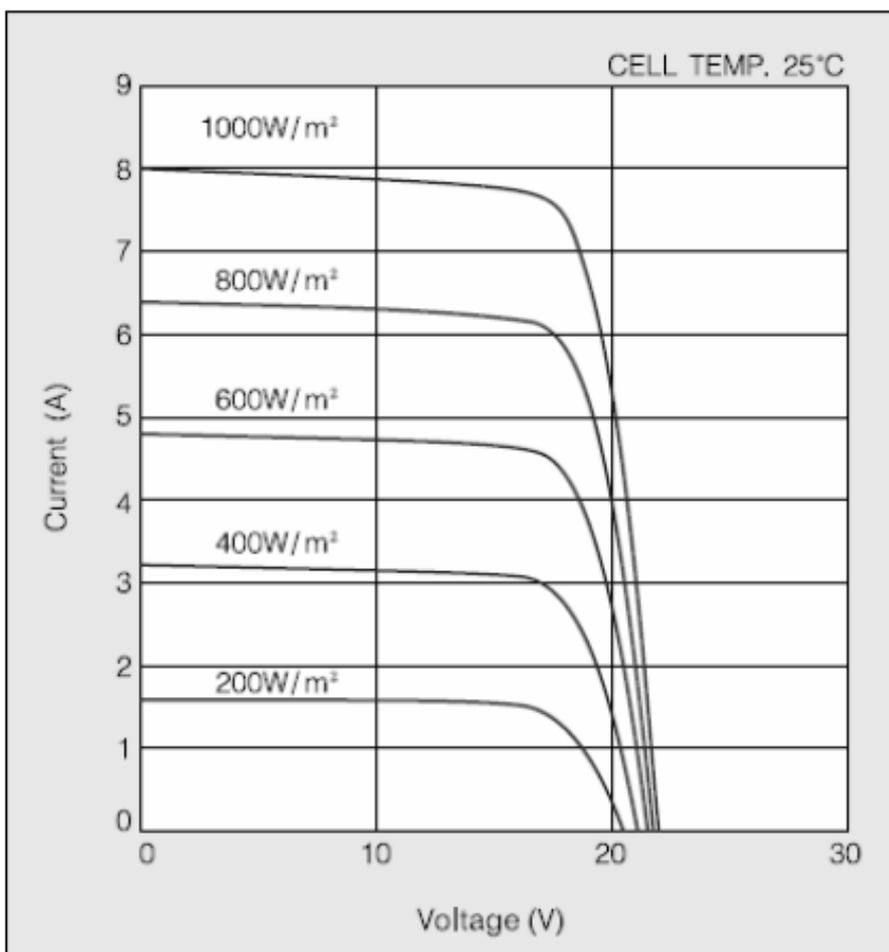
15.1 Une installation solaire reliée au réseau est réalisée avec des modules solaires dont les caractéristiques sont données ci-après :

- Puissance maximale : 130 Watts
- Tension maximale : 17,6 Volts
- Courant maximal : 7,39 Ampères
- Tension circuit ouvert : 21,9 Volts
- Courant de court circuit : 8,02 Ampères

Ces caractéristiques sont données pour les conditions normalisées de rayonnement de 1000W/m² AM 1.5 et 25°C

Donner la tension à vide d'une cellule constituant le module solaire.

Représenter sur le graphe ci-dessous le point correspondant au courant de court circuit et le point correspondant au circuit ouvert.

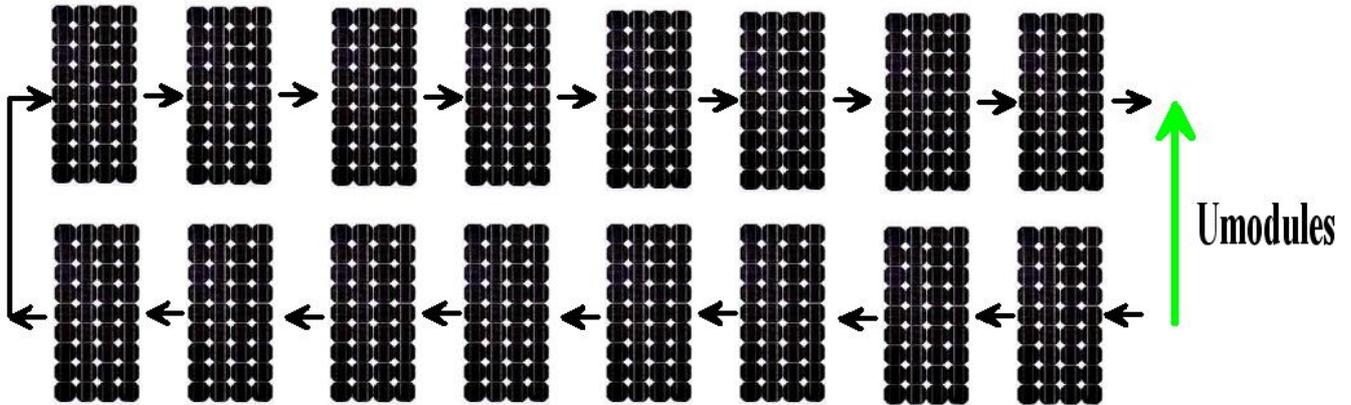
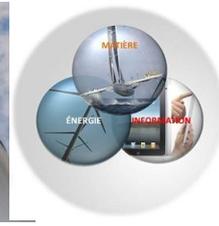
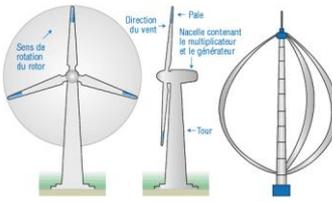


Un module

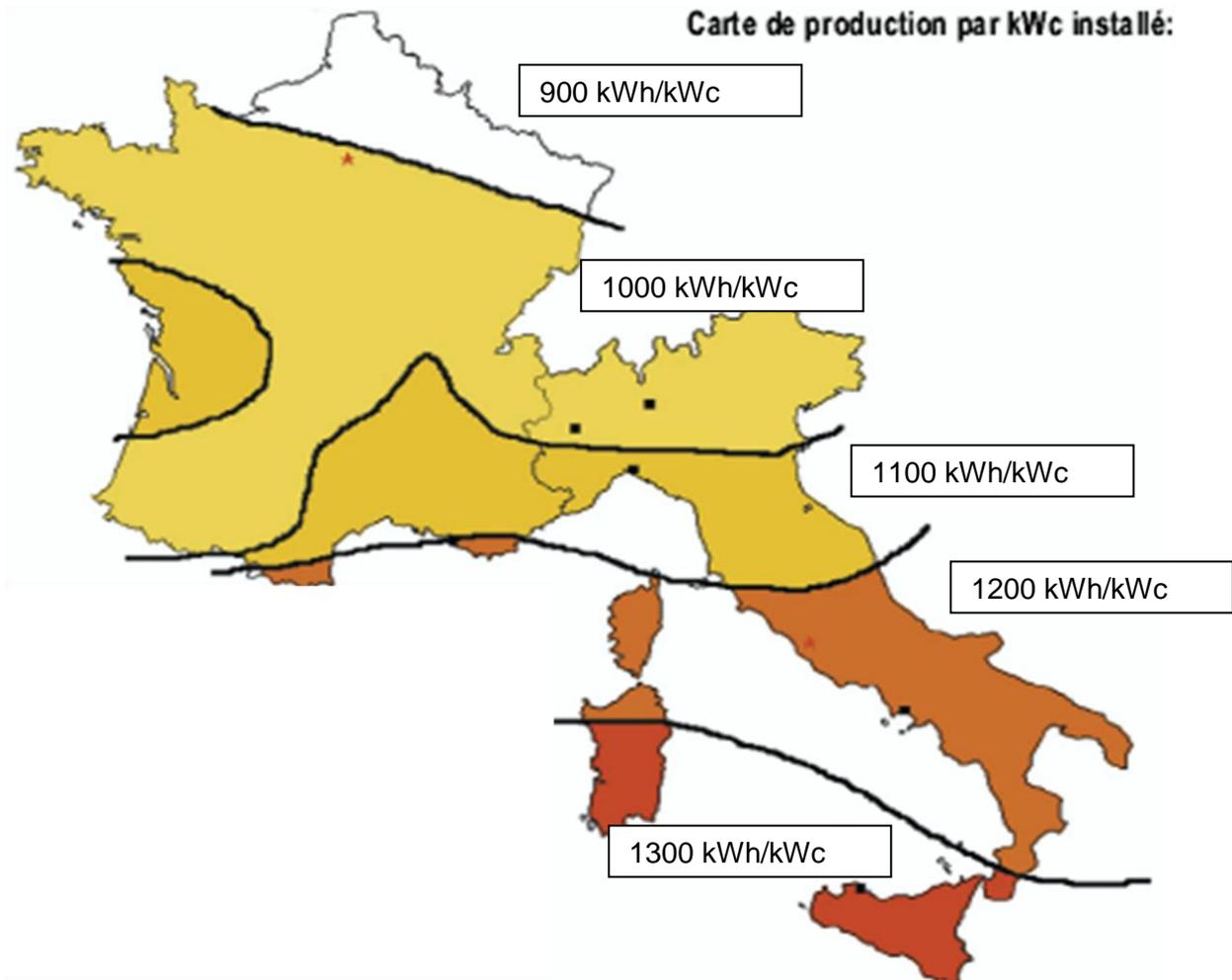
L'installation est composée de 16 modules en série, donner la tension de circuit ouvert obtenue.

La puissance maximale du panneau vaut 130 Watts, aussi appelée puissance crête d'où la valeur de 130 Wc (Watts crête).

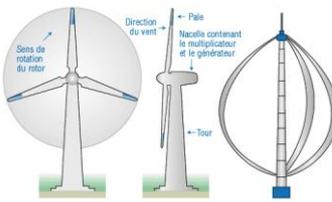
Donner la puissance crête totale disponible.



La carte ci-dessous donne la quantité d'énergie moyenne produite sur une année par kWc de panneaux installés.



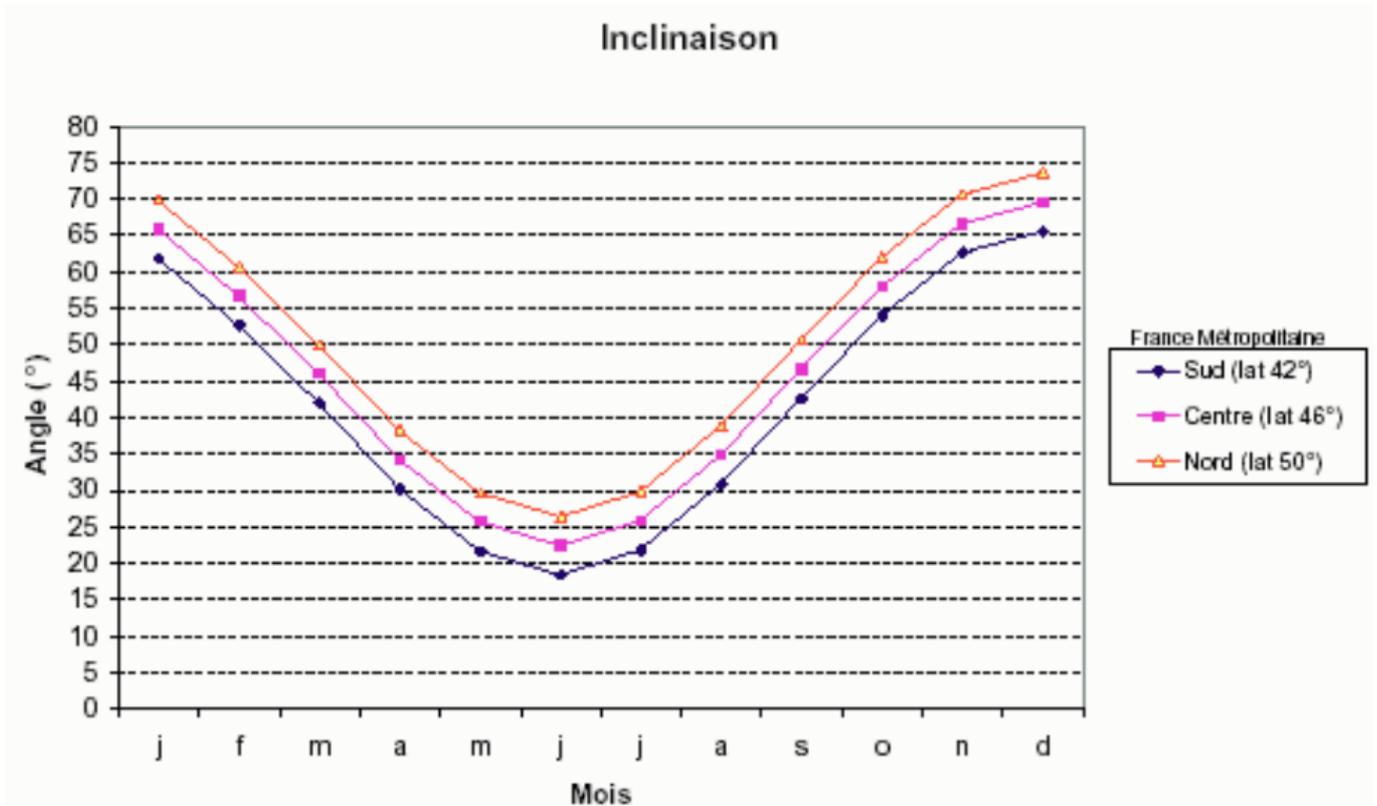
Quelle est la production moyenne prévisible du groupe de panneaux solaires installés à Grenoble, (correctement orienté vers le Sud avec une inclinaison de 45°).



16 Inclinaison optimale des panneaux solaires.

Qu'ils soient photovoltaïques ou bien thermiques les panneaux solaires doivent être orientés vers le soleil pour avoir le meilleur rendement possible. Comme la hauteur du soleil sur l'horizon varie en fonction de l'heure du jour et de la saison, l'inclinaison et l'orientation optimale est affaire de compromis, à moins de monter les panneaux sur un système de poursuite (tracker) automatique.

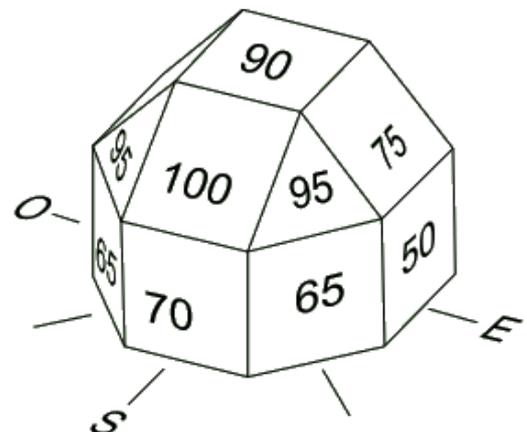
L'inclinaison des panneaux par rapport à l'horizontale est donnée sur le graphe ci-dessous, on observe une légère différence selon la latitude du lieu où est implanté l'installation :



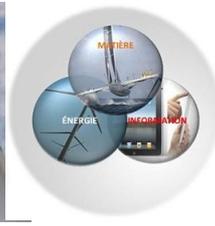
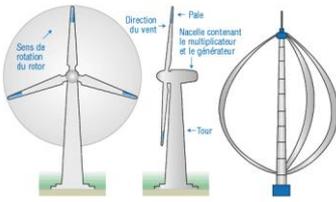
En France Métropolitaine on conseil d'incliner les modules solaires d'un angle de 45° correspondant à la latitude moyenne. Justifier cette valeur avec le graphique ci-dessus. Donner l'inclinaison la plus favorable en Hiver, et en été.

Des considérations architecturales peuvent intervenir. Il y a lieu alors de tenir compte d'un coefficient intégrant cette donnée. Le croquis ci-dessous² donne un aperçu simplifié de ces valeurs :

Donner l'inclinaison et l'orientation optimale. Combien perd t'on en pourcentage si on pose les modules vers le Sud-Ouest verticalement.

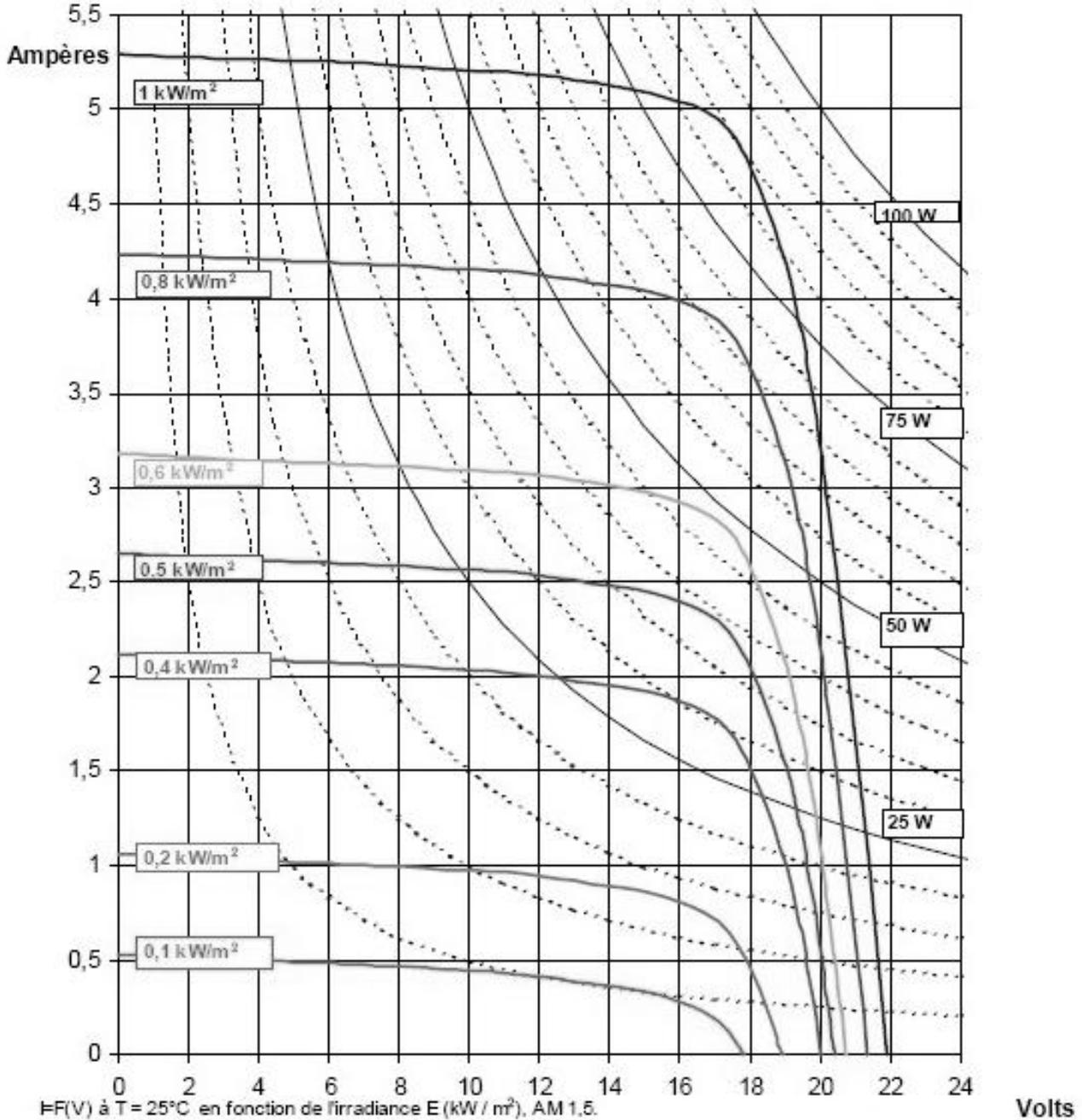


² Source Schneider Electric



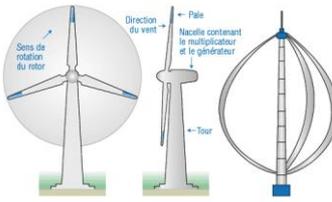
17 Recherche du point de fonctionnement maximum

Nous avons ci-dessous la caractéristique d'un module solaire photovoltaïque de 85 W.



Sur la page suivante tracer toutes les caractéristiques $P=f(U)$ pour les différentes valeurs de l'irradiance.

Donner ensuite dans un tableau les valeurs $P_{\max}=f(\text{Irradiance})$

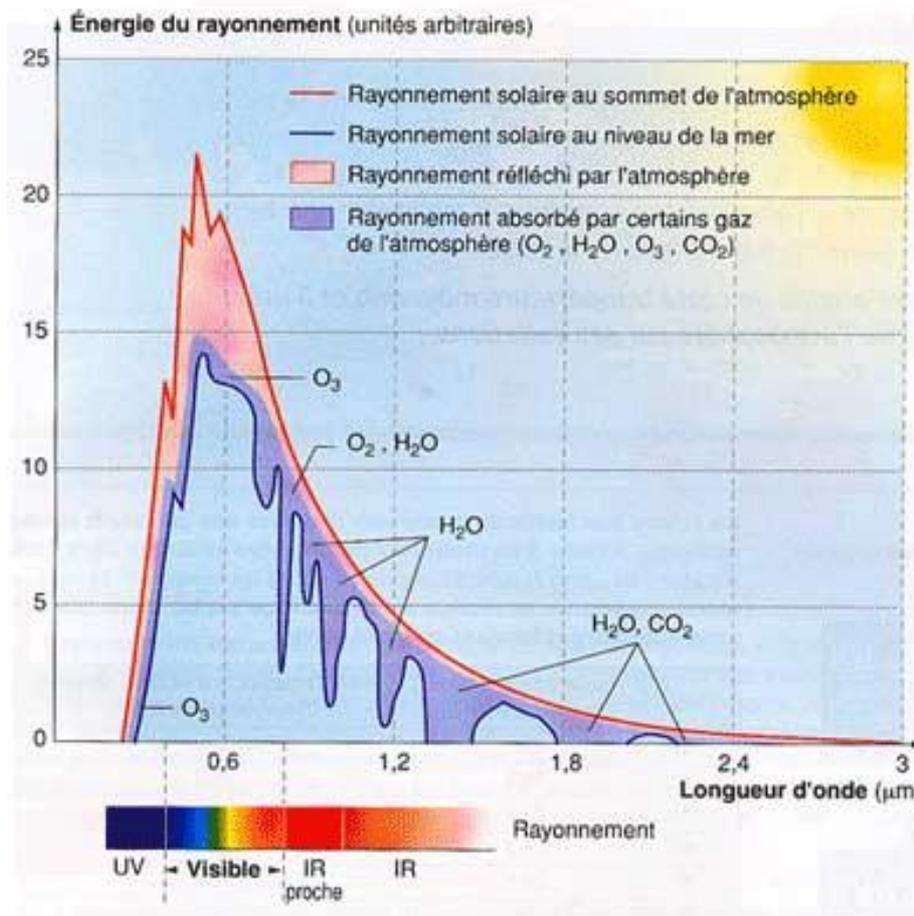


Le fonctionnement d'une cellule solaire

1 L'énergie solaire

Une cellule solaire photovoltaïque transforme l'énergie reçue d'origine rayonnante en électricité. L'énergie rayonnante provient d'une source lumineuse, naturelle le soleil, ou artificielle.

La puissance du rayonnement solaire est de l'ordre de 1350 Watt par m² à la limite de l'atmosphère. Ce rayonnement est ensuite absorbé en partie par l'atmosphère et certaines composantes monochromatiques vont être absorbées, ce qui donne les 'pics' sur le graphe ci-dessous.

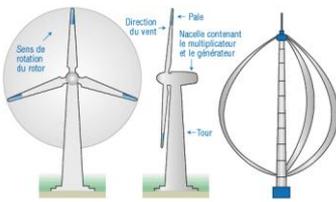


L'énergie portée par une onde électromagnétique monochromatique est associée à un corpuscule nommé photon elle est liée à la fréquence de cette onde :

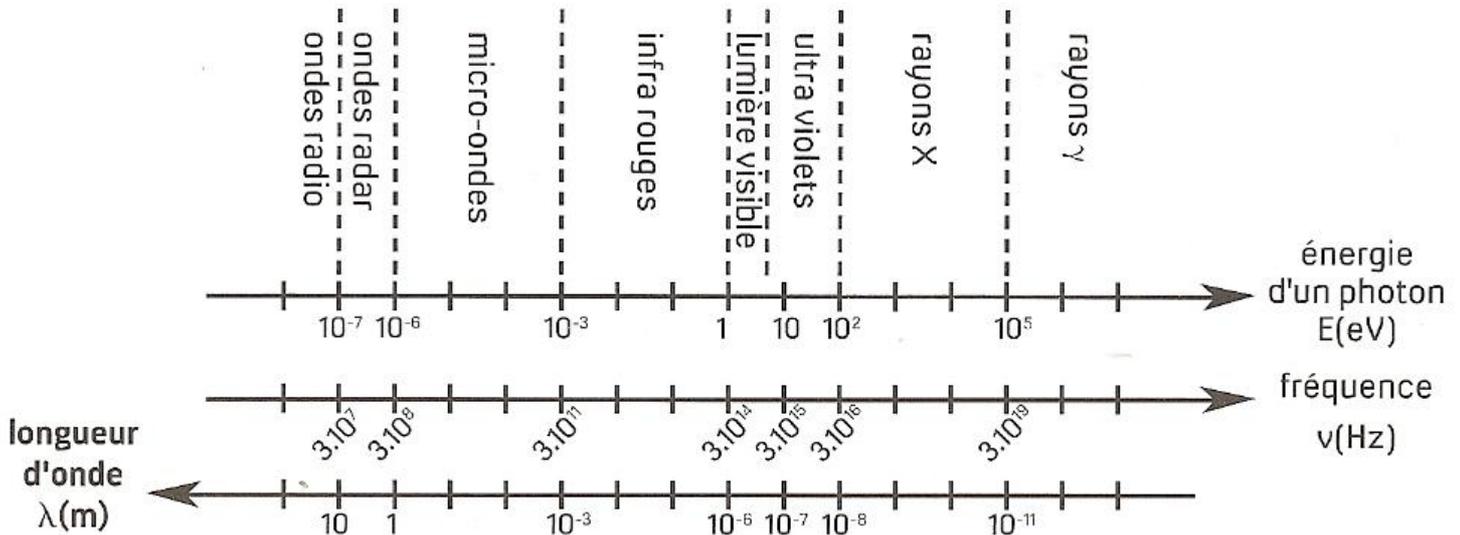
$$E = h \cdot \nu \quad (\text{J}) \quad \quad h \text{ constante de Planck } h = 6.62606910 \cdot 10^{-34} \text{ J.s et } 1 \text{ eV} = 1,60217653 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

La longueur d'onde λ d'un rayonnement monochromatique est liée à la fréquence ν par la relation :

$$\nu = c/\lambda \quad (\text{Hz}) \quad \quad \text{où } c \text{ est la vitesse de la lumière } c=3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$$



La figure ci-dessous nous montre la correspondance entre l'énergie d'un photon sa fréquence et sa longueur d'onde.

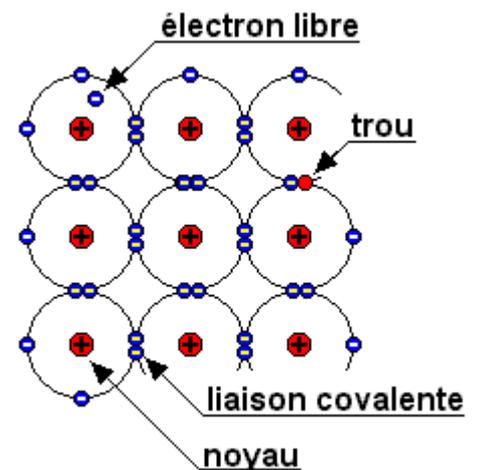


2 La cellule solaire

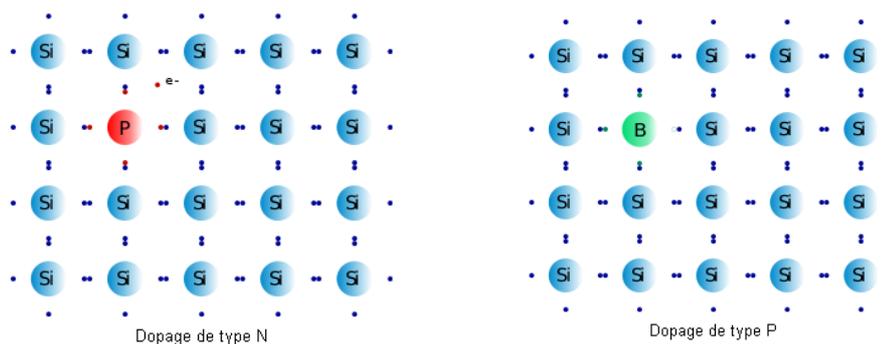
2.1 Une cellule solaire est constituée d'atomes de silicium.

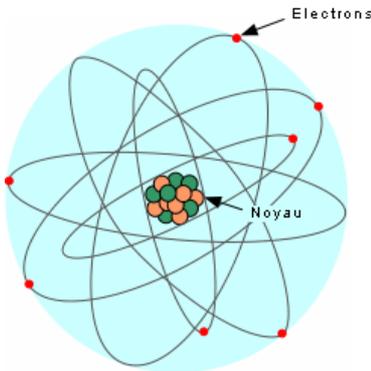
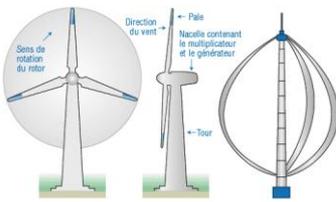
Les atomes sont constitués d'un noyau et d'électrons qui 'gravitent' autour. Le modèle utilisé pour représenter l'atome vient de l'analogie avec le système solaire, le soleil et les planètes gravitant autour. En fait cette représentation est assez simplifiée. Les électrons occupent des distances entre eux et le noyau qui sont mesurées en niveaux d'énergie.

Les atomes sont reliés entre eux en partageant, dans certaines conditions, des électrons. Ce sont des liaisons de covalence. Sur la figure ci-contre on observe une schématique d'atomes de Si qui partagent chacun 4 électrons avec leurs voisins proches.



Le dopage consiste à introduire des impuretés dans le Silicium soit en ajoutant des atomes de Phosphore (dopage N) ou de Bore (dopage P). L'association d'une couche mince dopée N avec un substrat dopé P donne une cellule photoélectrique, (épaisseur 1 mm).

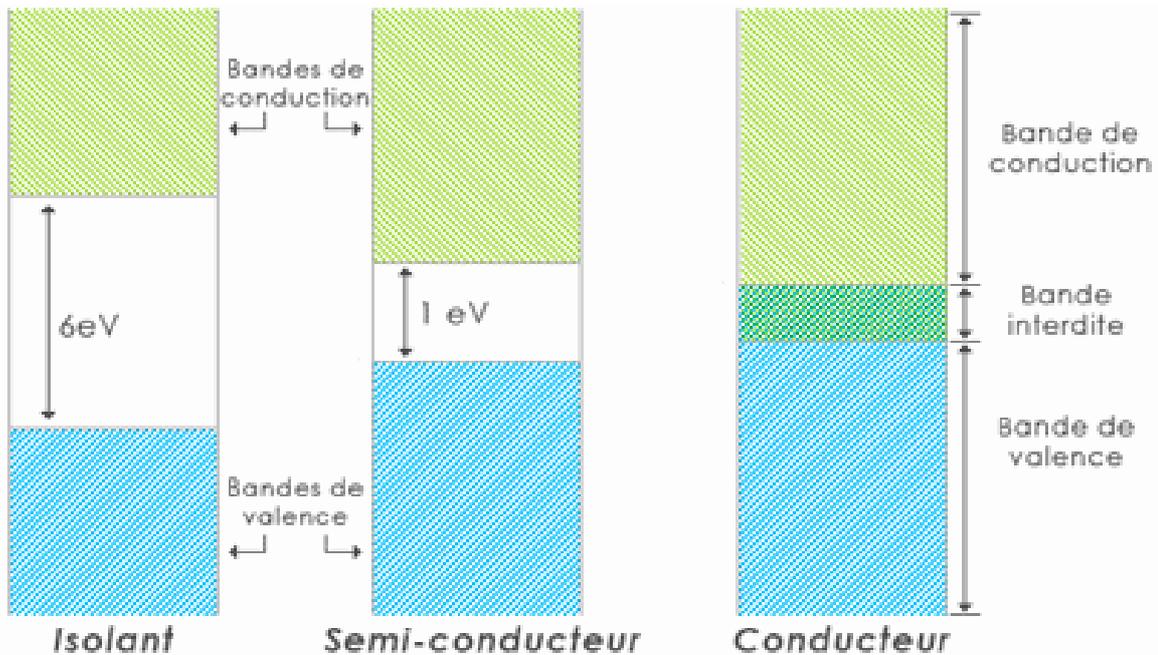




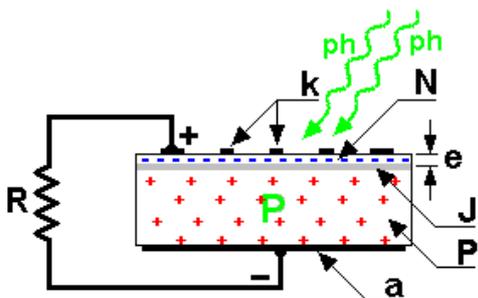
Le modèle 'planétaire' d'un atome

Les niveaux d'énergie occupés par les électrons dépendent du matériau. La bande de valence représente les niveaux d'énergie des liaisons entre les atomes, la bande de conduction les niveaux d'énergie où les électrons sont 'libérés' de l'attraction du noyau et de la liaison covalente, ils deviennent mobiles sous l'action d'un champ électrique, se sont des électrons libres.

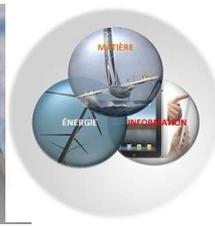
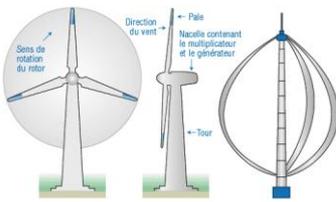
La figure ci-dessous présente les trois catégories de matériaux, isolants, semi-conducteurs, conducteurs. Qu'observez-vous ?



La cellule solaire photovoltaïque est un semi-conducteur. Pour que le courant électrique soit produit il faut que l'énergie incidente soit supérieure au gap du matériau, $E_g = 1,1 \text{ eV}$ pour du silicium. (Entre 0,7 et 4eV pour un matériau photovoltaïque solaire).

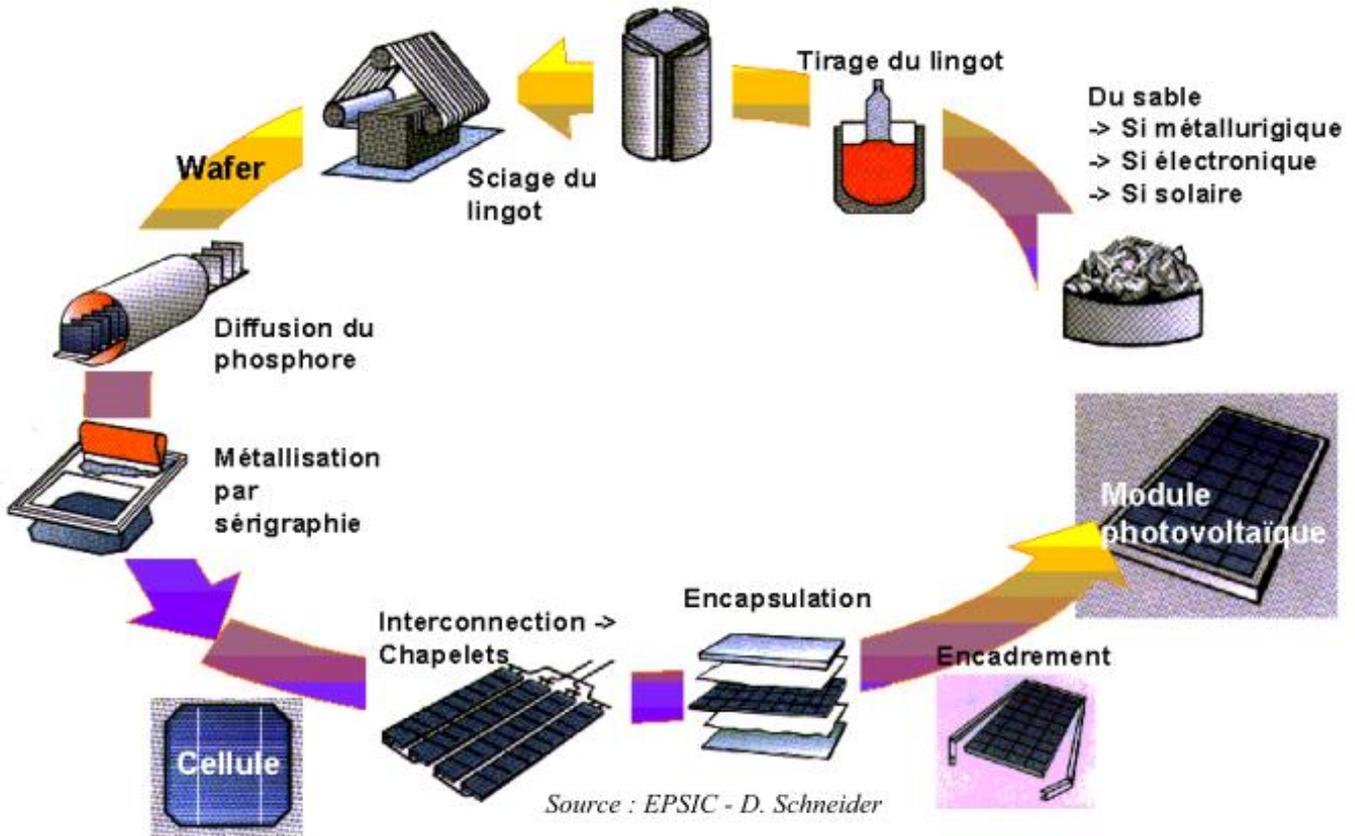


- une couche de protection translucide (n'est pas sur le schéma)
- une couche conductrice (k) qui sert de cathode (pôle -) (grille métallique)
- une couche avec porteurs de charges libres négatives (N), d'épaisseur e
- une jonction entre (N) et (P)
- une couche avec porteurs de charges libres positives (P) (cristal semi-conducteur)
- une couche de contact conductrice en métal (a) qui joue le rôle de l'anode (pôle +)
- une couverture pour la protection contre les influences externes (n'est pas sur le schéma)



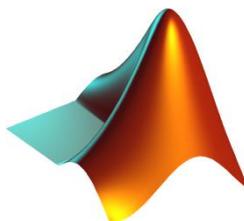
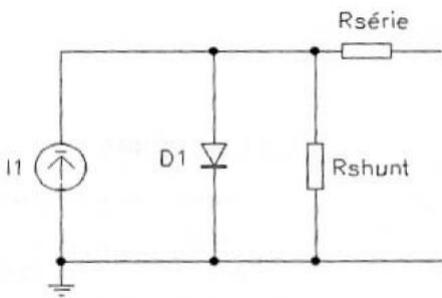
3 Fabrication des modules solaires

Les modules solaires industriels sont fabriqués avec du silicium. Les procédés de fabrication du silicium sont proches de ceux utilisés pour les technologies de composants électroniques numériques. Le cycle ci-dessous donne un aperçu des grandes étapes de la fabrication d'un module solaire.

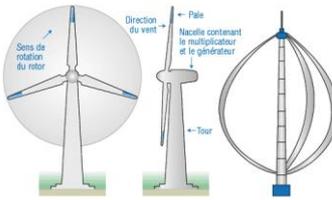


4 Du réel au modèle

Le modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque et par conséquent d'un module photovoltaïque a été élaboré.



Voilà un projet d'utilisation des possibilités de simulation de matlab / Simulink



Pour approfondir

1 Énergie transportée par les photons à la limite du spectre visible

Les longueurs d'ondes du spectre visible s'étendent de $\lambda = 0,4 \mu\text{m}$ pour l'ultra violet à $\lambda = 0,78 \mu\text{m}$ pour l'infra rouge. Calculer l'énergie transportée par les photons dans ces deux cas de figure, on exprimera cette énergie en eV.

$$h = 6.62606910^{-34} \text{ Js} \quad 1\text{eV} = 1,60217653 \times 10^{-19} \text{ J} \quad c = 3.10^8 \text{ ms}^{-1}$$

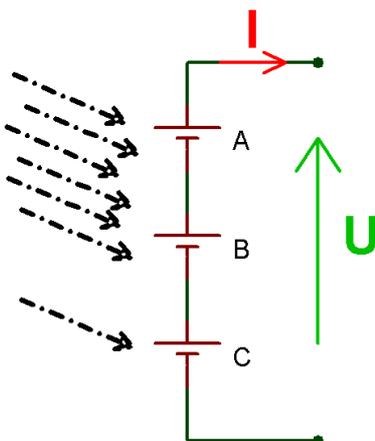
2 Technologie des cellules solaires

Faites une recherche sur les différentes technologies des cellules solaires.

- Quels sont les différents matériaux utilisés.
- Quelles sont les différentes performances des cellules en fonction de la nature de leur matériau.
- Etudier la plus ou moins grande sensibilité de la technologie au spectre de la lumière reçue.
- Perspectives de la recherche actuelle.

3 Le problème du point chaud, ou hot spot

Considérons trois cellules photovoltaïques montées en série. (Rappelons qu'un module solaire comprend souvent 36 cellules montées en série). Les cellules A et B sont éclairées de manières identiques et sont à la même température. La cellule C est partiellement occultée. Les caractéristiques $I=f(U)$ pour les trois cellules sont données graphiquement.



Tracer sur le graphe la caractéristique globale équivalente à l'ensemble des trois cellules. Pour le faire on balaye le faisceau des trois caractéristiques (droite Ligne I commun aux trois cellules) et on relève U_a, U_b, U_c . on trace alors le point obtenu $I, U_a+U_b+U_c$. On arrête le tracé quand $U_c+U_b+U_a=0$.

Cette valeur correspond à la cellule C qui, en polarisation inverse a sa tension qui annule les tensions produites par les cellules A et B il n'y a donc plus de courant dans le circuit.

Cette cellule ne fonctionne plus en générateur, elle doit dissiper la puissance $I.U$, c'est le phénomène de point chaud.

