



جامعة وهران للعلوم والتكنولوجيا محمد بوضياف
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf

Faculté de Physique

Département de Physique Energétique

POLYCOPIE DES TRAVAUX PRATIQUES

Destiné aux étudiants en 3^{ème} année Licence, Option : Energie Renouvelable

Titre :

Lumière et Cellule Solaire



Elaboré par :

Mlle. **Fatiha GHALEB**

Mr. **Kamel BENDJBAR**

Mlle. **Souad HAOUARI**

Maître Conférence B,
Directeur technique et formateur
en Energie photovoltaïque,
Maître Assistance A,

USTO-MB

EURL GMCE

USTO-MB

Polycopié des Travaux Pratiques

LUMIERE ET CELLULE SOLAIRE

- Fatiha GHALEB, Kamel Eddine BENDJBAR & Souad HAOUARI -

Faculté de Physique

Licence L3 : Energie Renouvelable

Année 2014-2015

TABLE DES MATIERES

I.	Préface.....	03
II.	RAPPELS THEORIQUES.....	04
1.	Introduction.....	04
2.	Qu'est-Ce Que La Lumière ?.....	04
3.	Couleur et Longueur d'Onde.....	04
4.	La Transformation de la Lumière en Energie Electrique.....	06
5.	L'effet Photovoltaïque	07
6.	Conversion Photovoltaïque	07
7.	Le Principe de Conversion Photovoltaïque.....	07
8.	Types d'Assemblages Electriques.....	08
9.	Fonctionnement Electrique d'un Photogénérateur.....	09
III.	TP N°1 : Caractéristique d'une cellule solaire.....	11
1.	Rappel Théorique.....	11
2.	Mesures et exploitation de résultats.....	12
IV.	TP N°2 : Analogie avec la Diode.....	13
1.	Partie Théorique.....	13
2.	Montage et Réalisation.....	14
V.	TP N°3 : L'éclairement d'une cellule photovoltaïque.....	15
	Partie Théorique.....	15
	Partie Expérimentale.....	15
VI.	TP N°4 : Mesure de rayonnement solaire.....	18
1.	Partie Théorique.....	18
2.	Exploitation des résultats.....	20
VII.	TP N°5 : Ombrage partiel d'une cellule.....	21
1.	Exploitation des résultats.....	21

I. PREFACE

La production mondiale d'électricité à partir de cellules solaires augmente de façon exponentielle et présente de nombreux avantages : propreté, silence, fiabilité et surtout c'est une source renouvelable. Ce dernier point présente un intérêt majeur dans le contexte actuel de la fin du pétrole bon marché. Toutefois, la part de l'électricité photovoltaïque reste aujourd'hui très marginale dans le paysage énergétique mondial : moins de 0,001% de la production d'électricité, une goutte dans l'océan.

Les obstacles qui s'opposent à ce que cette forme de production électrique trouve une vraie «place au soleil » sont nombreux : rendement faible, concurrence avec d'autres sources d'énergie (nucléaire, pétrole...), politiques peu volontaristes dans de nombreux pays, etc...

Pour lever ces barrières, il est important d'améliorer les différentes technologies pour abaisser les coûts de production, d'installer de façon optimale les panneaux solaires. Il existe de grands enjeux liés à une utilisation intelligente de l'énergie solaire car il y a du soleil partout ; c'est donc un pas significatif vers une indépendance énergétique pour tous. Pour cela nous avons abordé dans ce polycopié des applications en optoélectroniques alimentées par des panneaux solaire de différentes surfaces avec des composantes électroniques.

Ce polycopié des travaux pratiques, souvent abrégés en *TP*, constituent un type d'enseignement fondé sur l'apprentissage pratique avec en particulier la réalisation d'expériences permettant de vérifier et compléter les connaissances dispensées dans les cours théoriques.

Les travaux pratiques concernent généralement les sciences de la lumière expérimentales, et la lumière à l'électricité : Performances de cellules solaires.

II. RAPPELS THEORIQUES

1. INTRODUCTION

Les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Il existe plusieurs types de sources d'énergies renouvelables parmi eux : l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Les sources d'énergies renouvelables proviennent directement ou indirectement du soleil.

L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies ensuite avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker d'énergie électrique pendant les heures sans soleil.

Effet photovoltaïque : effet par lequel l'énergie lumineuse est directement transformée en énergie électrique dans un semi-conducteur.

En général, une cellule photovoltaïque est une plaquette de *silicium* (semi-conducteur) dopée dans sa partie supérieure au bore (coté P) et dans sa partie inférieure au phosphore (coté N). Au voisinage de cette *jonction P-N*, un champ électrique maintient la séparation des charges électriques. Lorsqu'un photon vient frapper la cellule, il arrache des électrons par *effet photoélectrique* et crée un pair *électron - trou*. L'électron a suffisamment d'énergie pour franchir la jonction et il est collecté du côté N. Un courant électrique est créé.

Un ensemble de cellules forme des modules solaires dont la fabrication a été multipliée par 8 sur la dernière décennie et dont le coût a baissé de 50 % en 5 ans. Actuellement, le rendement de ces cellules ne dépasse pas 15 %. Des recherches sont effectuées sur d'autres matériaux, comme le diséléniure de cuivre et d'indium ou le tellure de cadmium.

2. QU'EST-CE QUE LA LUMIÈRE ?

Un peu de physique

Un faisceau lumineux est un déplacement de petits corps porteurs d'énergie, ou photons, comme l'a décrit Einstein en 1905, pour expliquer l'effet photoélectrique.

Depuis l'équivalence onde-corpuscule mise en évidence par Louis de Broglie en 1924, la lumière est décrite également comme une onde électromagnétique, comme les rayons X ou les ondes radiofréquences. Tout est une question de longueur d'onde, ou de fréquence, pour ces oscillations qui traversent l'espace et parfois la matière. Chaque photon porte une quantité d'énergie directement liée à sa longueur d'onde.

3. COULEUR ET LONGUEUR D'ONDE

La longueur d'onde d'un faisceau lumineux caractérise sa couleur, telle que la perçoit notre œil. Bien sûr, tous les rayonnements ne sont pas perceptibles par l'œil, mais ils ont aussi leur longueur d'onde, qui dépend de leur fréquence : fréquences radio, micro-ondes...

Puisque la photopile a pour vocation de fournir de l'électricité dans le monde où nous vivons, elle est conçue pour convertir les longueurs d'onde disponibles dans notre environnement, et propres au développement de la vie.

Regardons de quoi se compose le rayonnement du soleil parvenant à la surface de la terre : l'infrarouge procure de la chaleur, le visible est nécessaire à la croissance des plantes et des animaux (dont nous faisons partie, s'il est besoin de le préciser), et l'ultraviolet brunit la peau et tue les bactéries. Le spectre du soleil s'étend de 200 nm à 3 μm (= 3 000 nm).

Quoi de plus naturel pour les physiciens du siècle dernier que de nommer « ultraviolet » la lumière plus bleue que le bleu-violet perceptible par l'œil, et « infrarouge » la lumière moins rouge que celle que notre œil détecte ? En effet, la perception oculaire moyenne de l'homme s'étend du bleu (longueur d'onde 380 nm) au rouge (longueur d'onde 780 nm), en passant par les couleurs que l'arc-en-ciel nous dévoile lorsque les gouttes de pluie décomposent la lumière blanche.

On réalise la même décomposition avec un prisme (figure 1).

On appelle spectre, ou répartition spectrale, d'une source de lumière l'ensemble des couleurs, ou longueurs d'onde, qui la constituent.

Une lumière rouge est une portion de lumière blanche, de même qu'une lumière bleue ou orange. Les lampes artificielles les plus courantes, quoique blanches à l'œil, diffèrent par leur spectre.

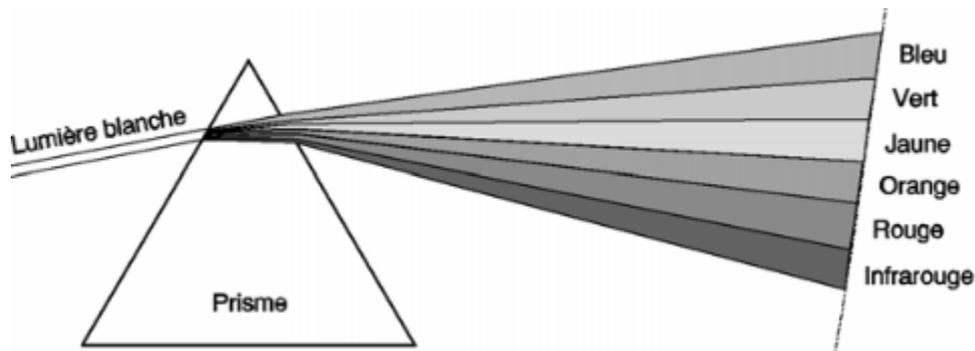


Figure 1 : Décomposition de la lumière blanche par un prisme

Que voit la photopile ?

Les différents types de photopiles, mais précisons dès à présent qu'elles se différencient par leur sensibilité spectrale, ou capacité à convertir certaines longueurs d'onde.

Les photopiles au silicium amorphe ont une sensibilité spectrale très proche de celle de l'œil (figure 2). Ainsi, le silicium amorphe est particulièrement bien adapté en éclairage intérieur car les tubes néon et fluorescents ont un spectre d'émission qui est prévu pour l'œil humain.

Les photopiles au silicium cristallin sont destinées à un usage extérieur sous fort ensoleillement, à cause de leur sensibilité plus grande au proche infrarouge et de leur médiocre comportement dans le bleu.

Pour clore ce paragraphe un peu théorique, récapitulons les ondes connues avec leurs fréquences et longueurs d'onde dans le tableau 1

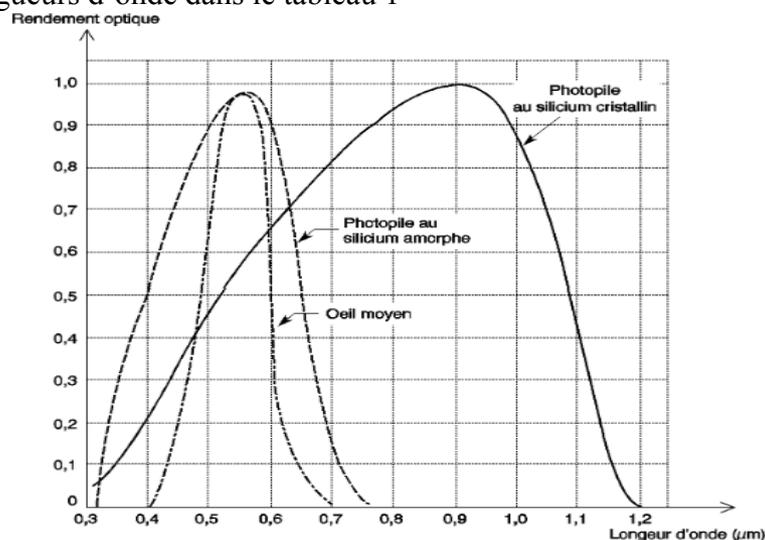


Figure 2 : Réponse spectrale des photopiles et sensibilité de l'œil humain

Tableau 1. Principales ondes connues avec leurs longueurs d'onde, leurs fréquences et leurs usages.

Type d'onde	Longueur d'onde	Fréquence	Usages
<i>Ondes radio</i>	> 1mm	$< 3 \times 10^{11}$ Hz	Radio, TV, radars
<i>Infrarouge</i>	1mm à 0,8 μm	3×10^{11} à 4×10^{14} Hz	Vision nocturne, télécommandes
<i>Lumière visible</i>	0,8 à 0,4 μm	$3,7 \times 10^{14}$ à $7,5 \times 10^{14}$ Hz	Vision diurne, photosynthèse
<i>Ultraviolet</i>	0,4 à 0,05 μm	$7,5 \times 10^{14}$ à 6×10^{15} Hz	Bronzage, purification de l'eau
<i>Rayons X</i>	0,05 μm à 10^{-2} A°	6×10^{13} à 3×10^{20} Hz	Radiographie
<i>Rayons gamma</i>	$< 10^{-2}$ A°	$> 3 \times 10^{20}$ Hz	

4. LA TRANSFORMATION DE LA LUMIERE EN ENERGIE ELECTRIQUE

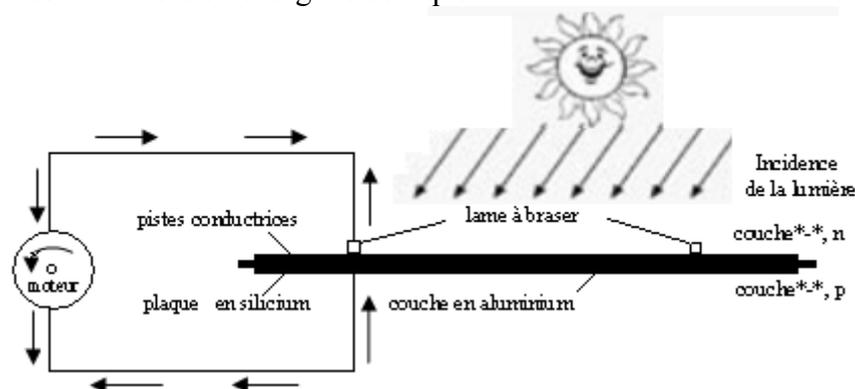
Le fonctionnement

La lumière est composée d'innombrables petits porteurs d'énergie que l'on appelle les photons. Si ces photons entrent en contact avec la cellule solaire, les électrons sont alors dégagés/libérés sur la couche n. (un photon d'énergie suffisante arrache un électron).

Ces électrons tentent de se replacer sur la couche p (l'électron trouve rapidement un trou pour se replacer, et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée). Cette migration/ce déplacement est appelé(e) **conduction électrique**. Celle-ci part toujours du – vers le +.

Si un appareil est branché à la cellule solaire, la migration/le déplacement de l'électron passe par l'appareil et actionne par exemple chez un moteur l'axe moteur.

Transformation de la lumière en énergie électrique



Une cellule solaire produit une tension continue. En fonction de la qualité de la cellule, cette tension peut varier entre 0,5 et 0,65 Volt. La taille de la cellule solaire détermine le courant.

a. Energie électrique :

Une source de courant i donne de l'énergie cinétique aux électrons, une source de tension U leur donne de l'énergie électrostatique, et dans les 2 cas, cette énergie sera transformée par les composants du circuit. La puissance électrique instantanée est $P = U \times i$ donc pendant une durée Δt , l'énergie fournie par le générateur est $E = U \times i \times \Delta t$.

Cas particulier fréquent : si les composants du circuit sont linéaires (cas des circuits RLC), U et i sont proportionnels (loi d'Ohm $U = R \times i$) donc l'énergie sera proportionnelle au carré du courant ou de la tension.

Si on considère un générateur de tension U variable, il aura fourni $E = \int i(t)U(t) dt = \int i(U)dU$ à sommer de U initiale à U finale.

5. L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE

Découvert en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel, l'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire.

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives.

Parmi les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés on trouve le silicium, le germanium, le sulfure de Gallium et l'arséniure de Gallium.

6. CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

La possibilité de transformer directement l'énergie lumineuse, et en particulier le rayonnement solaire en énergie électrique est apparue en 1954 avec la découverte de l'effet photovoltaïque. Cet effet utilise les propriétés quantiques de la lumière permettant la transformation de l'énergie incidente en courant électrique dont la cellule solaire ou photopile, est l'élément de base de cette conversion photovoltaïque

7. LE PRINCIPE DE CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

➤ Comment fonctionne une cellule solaire photovoltaïque?

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi un paire électron - trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule, voir la figure 3.

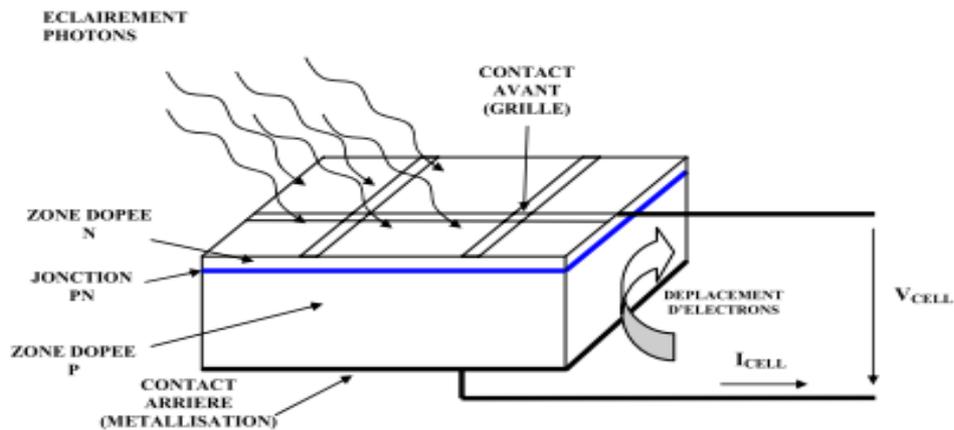


Figure 3 : Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque

8. TYPES D'ASSEMBLAGES ELECTRIQUES

Il est possible de relier des cellules en série pour augmenter la tension, en parallèle pour augmenter le courant et en série-parallèle pour augmenter les deux paramètres simultanément. Dans tous les cas, la puissance électrique augmente avec le nombre de cellules qui sont généralement identiques pour faciliter les processus industriels et optimiser le rendement des capteurs

a) Assemblage en série

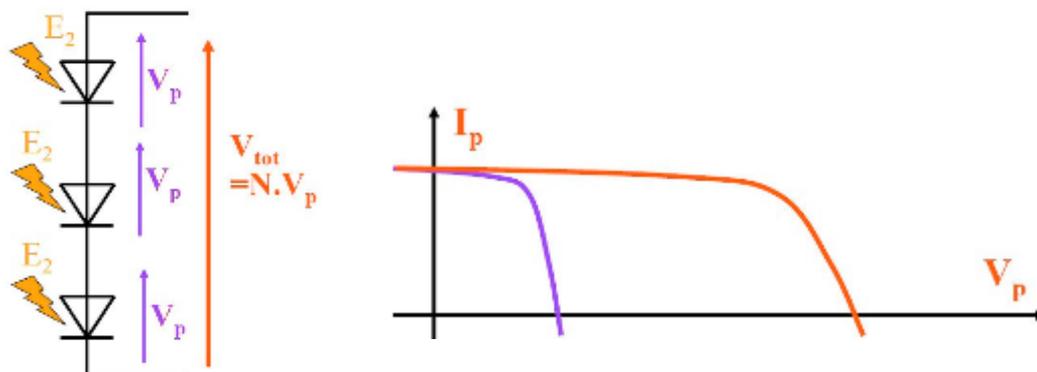


Figure 4 : Assemblage en série : un courant unique limité par la diode la moins éclairée

b) Assemblage en parallèle

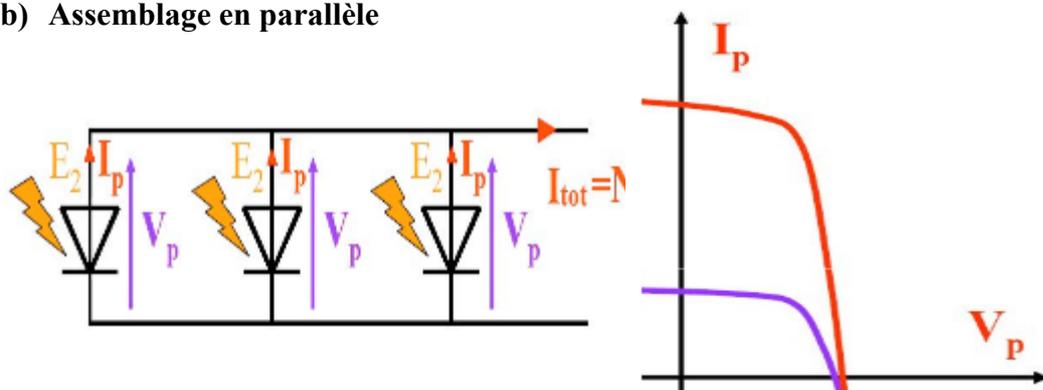


Figure 5 : Assemblage en parallèle : une tension unique limité par la diode la moins éclairée

c) Assemblage en série – parallèle

Le câblage série-parallèle est utilisé pour obtenir un générateur aux caractéristiques souhaitées.

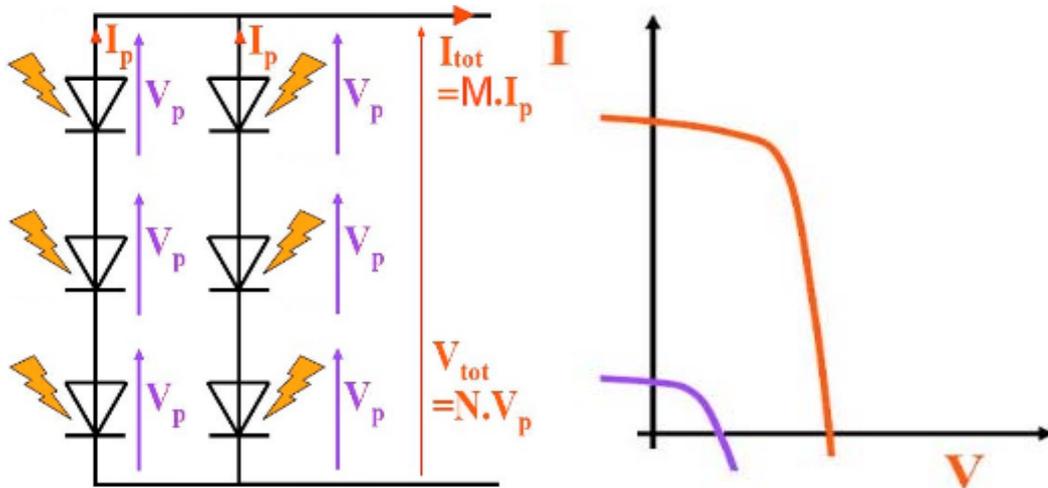


Figure 6 : Assemblage en série-parallèle : la puissance est multipliée par un facteur important

L'assemblage électrique le plus utilisé dans les modules est l'assemblage série pour des raisons de conversions électriques. Il faut faire attention à ce que toutes les photopiles soient éclairées de la même façon. En effet, une photopile ombragée (même partiellement) voit sa tension et surtout son intensité baisser considérablement. Une perte de puissance risque de provoquer une polarisation inverse avec dissipation d'énergie dans la diode défailante

9. FONCTIONNEMENT ÉLECTRIQUE D'UN PHOTOGÉNÉRATEUR

Un photogénérateur débite un certain courant, sous une différence de potentiel (ou « tension » en langage courant).

Nous allons décrire ici cette relation courant-tension (figure 7) qui conditionne le fonctionnement électrique du photogénérateur et son couplage avec un récepteur.

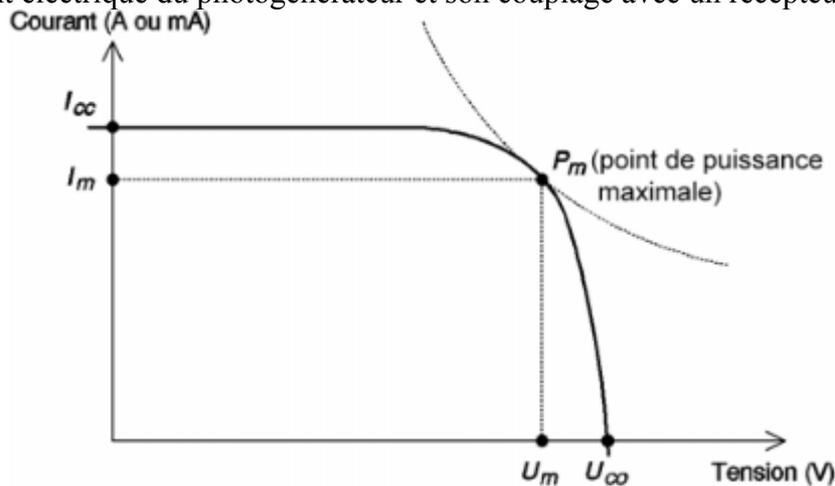


Figure 7 : Courbe courant-tension d'un photogénérateur

a. Tension de circuit ouvert : U_{CO}

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur, elle peut générer à ses bornes une tension continue maximale, dite tension de circuit ouvert U_{CO} ou tension à vide.

On la mesure à l'aide d'un voltmètre. Cette tension est de l'ordre de 0,7 V pour une cellule élémentaire (elle varie avec la technologie et l'éclairage). Un photogénérateur étant une association de cellules élémentaires,

La tension à vide U_{co} sera typiquement égale à :

$$U_{CO} = n \times 0.7 V$$

où n est le nombre de cellules. Par exemple, $U_{co} = 4,2 V$ si $n = 6$ cellules en série.

La tension maximale que cette photopile peut délivrer sous l'éclairage considéré est de 4,2 V. Mais, dans cet état, la photo-pile ne débite aucun courant et ne peut alimenter aucun récepteur. C'est sous une tension inférieure que la photopile sera utilisée, afin qu'elle débite tension et courant pour alimenter le récepteur

b. Courant de court-circuit : I_{CC}

À l'inverse du point de circuit ouvert, lorsqu'on place le photogénérateur en court-circuit, il débite son courant maximal, mais aucune tension. C'est le courant que l'on peut mesurer en branchement direct sur un ampèremètre.

On appelle ce courant maximal à tension nulle courant de court-circuit

c. Point de puissance maximale : P_m

L'utilisation optimale d'une photopile consiste à alimenter une charge sous la tension maximale et à un courant maximal.

En effet, suivant la formule $P=UI$, pour que la puissance soit maximale : il faut être dans les conditions où le produit UI est maximal : c'est le point de charge idéal de la photopile, ou point de puissance maximale P_m (figure 7).

On a coutume d'appeler U_m et I_m la tension et le courant correspondant à ce point $P_m = U_m \cdot I_m$.

d. Le rendement :

Le rendement est le rapport de l'énergie réellement utile résultant d'une transformation, divisée par l'énergie totale disponible initialement. Pour une durée donnée, on évalue le rendement aussi bien en faisant le rapport des énergies que le rapport des puissances :

$$\eta = \frac{E_{après}}{E_{avant}} = \frac{P_{utile} \Delta t}{P_{totale disponible} \Delta t} = \frac{P_{utile}}{P_{disponible}} :$$

⇒ Un rendement est toujours ≤ 1 car $\eta = E_{utile} / (E_{utile} + E_{dissipée})$. On ne peut pas produire d'énergie à partir de rien, mais par contre, une partie de l'énergie utile va se dissiper sous forme de chaleur (frottements, effet Joule, réaction exothermiques,...) ou de déformations irréversibles (micro-fissures dans un matériau, dénaturation d'une protéine,...) ⇒ Si on procède à 2 transformations successives de rendement r_1 et r_2 , alors $E_{finale} = r_2 E_{intermédiaire} = r_2 r_1 E_{initiale}$. **Le rendement global est le produit des rendements Intermédiaires.** Il sera toujours inférieur au plus faible des rendements intervenant dans la chaîne.

Quelques ordres de grandeur :

- alternateur électrique de haute qualité : énergie mécanique → électrique, rendement > 95%
- dynamo de vélo : idem mais rendement' 15% à 80% (le plus souvent < 30%) moteur thermique : énergie chimique → thermique + pression → cinétique : variable selon T, dépasse rarement 30%
- cellule photovoltaïque : énergie lumineuse → électrique : rendement' 10 à 20%
- biocarburant : énergie solaire → chimique → thermique + pression → cinétique : rendement global ~1% !

TP N°1 : CARACTERISTIQUE D'UNE CELLULE SOLAIRE

Nom : Prénom : Groupe :	Nom : Prénom : Groupe :
Date :	Note :

1. But :

D'étudier les caractéristiques d'une cellule solaire, et de mesurer I_{cc} , et V_{oc} .

Tracer la tension en fonction du courant électrique $V=f(I)$.

2. Partie Théorique

Cellule solaire :

L'énergie solaire est une source d'énergie propre et abondante qui peut nous aider à combler une bonne partie de nos besoins en énergie. Une bonne partie de cette énergie solaire peut être donc utilisée pour produire de l'électricité.

La cellule solaire utilisée dans ce travail est fabriquée en silicium amorphe, présentée par l'image suivante :



Courant court circuit I_{cc} : Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$).

Tension de circuit ouvert V_{oc} : La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse

Puissance électrique P : La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule)

Le rendement η : Le rendement, η des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in}

Facteur de forme ff : Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement $PM (I_m, V_m)$ de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I_{cc} et tension comprise entre 0 et V_{oc}). Ce point Pm est obtenu en modifiant la valeur de la résistance externe, quand l'aire du rectangle défini par les axes Ox , Oy et les droites $x = I_m$ et $y = V_m$ passe par un maximum.

Le nom "facteur de forme" (*fill factor*) dérive de la représentation graphique. Il est défini par la relation suivante:

$$ff = \frac{P_{\max}}{V_{oc} \times I_{cc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{cc}}$$

3. Mesures et exploitation de résultats :

- *Mesure I_{cc} , avec un Ampèremètre*

Branchez la cellule solaire avec un ampèremètre, on prendra la lumière du jour et du néon, puis vous lisez la valeur du courant électrique de court circuit I_{cc} ?

- Eteindre le néon et mesurer le courant I_{cc}
- Calculer le I_{cc} au soleil, et essayez d'orienter la cellule pour avoir un courant maximum I_{ccMax}
- *Mesure V_{oc} , avec un Voltmètre*
- *Le schéma du montage à étudier est le suivant: le montage est constitué de l'appareillage suivant :*
 - Cellule solaire fabriqué en silicium amorphe
 - Un Ampèremètre, Un Voltmètre
 - Une résistance variable R

a. Remplir le tableau suivant :

R (Ω)	0	10	110	1110	11110	111110	1111110	11111110	
I (mA)									
V(V)									
P (I*V)									

- Tracer sur un papier millimétré, en choisissant de façon judicieuse l'échelle $I=f(V)$, et $P=f(V)$, préciser le nom des axes, le titre du graphique et l'échelle.
- Déterminer graphiquement I_{cc} et V_{oc} , comparer avec les valeurs mesurées initialement. Que remarquez-vous ?
- Calculer le rendement lumineux de la cellule solaire η , on prendra énergie E de notre ville égale à $1000w/m^2$?
- Déduire le facteur de forme ff par deux méthode différentes graphiquement $I=f(V)$ et en fonction de η ? Que remarquez-vous ?

TP N°2 : ANALOGIE AVEC LA DIODE

Nom : Prénom : Groupe :	Nom : Prénom : Groupe :
Date :	Note :

1. But :

La cellule photovoltaïque est l'élément de base de la conversion photovoltaïque.
 Dans l'obscurité, elle se comporte comme une jonction PN (diode)

2. Partie Théorique : Modèle équivalent

Le modèle mathématique associé à une cellule se trouve à partir de celui d'une jonction PN.
 On y ajoute le courant I_{ph} , proportionnel à l'éclairement, ainsi qu'un terme modélisant les phénomènes internes. Le courant I issu de la cellule s'écrit alors :

$$I = I_{ph} - I_{0d} \left(e^{\frac{q \cdot (U + R_s \cdot I)}{K \cdot T}} - 1 \right) - \frac{U + R_s \cdot I}{R_{sh}}$$

$$I_d = I_{0d} \left(e^{\frac{q \cdot (U + R_s \cdot I)}{K \cdot T}} - 1 \right)$$

Avec : I_{ph} : photocourant, ou courant généré par l'éclairement

I_{0d} : courant de saturation de la diode

R_s : résistance série

R_{sh} : résistance shunt

K : constante de Boltzmann ($K=1,38 \cdot 10^{-23}$)

q : charge de l'électron ($q=1,602 \cdot 10^{-19}$ C)

T : Température de la cellule (°K)

On peut déduire de cette expérience un schéma équivalent, comme le montre la figure 1 :

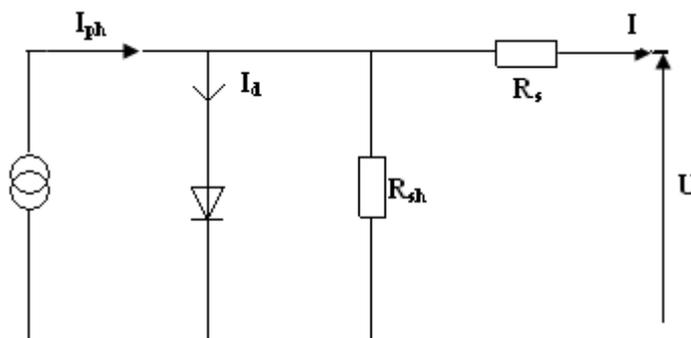


Figure 1 : schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité. Le générateur de courant modélise le courant I_{ph} généré par un éclairage.

Enfin, les deux résistances modélisent les pertes internes :

Résistance série R_s : modélise les pertes ohmiques du matériau

Résistance shunt R_{sh} : modélise les courants parasites qui traversent la cellule

Idéalement, on peut négliger R_s et I devant U , puis travailler avec un modèle simplifié :

$$I = I_{ph} - I_{0d} \left(e^{\frac{q \cdot U}{k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{U}{R_{sh}}$$

Comme la résistance shunt est beaucoup plus élevée que la résistance série, on peut encore négliger le courant dévié dans R_{sh} . On peut obtenir :

$$I = I_{ph} - I_{0d} \left(e^{\frac{q \cdot U}{k \cdot T}} - 1 \right)$$

Le schéma équivalent de la figure 2 correspond est celui de la cellule idéale :

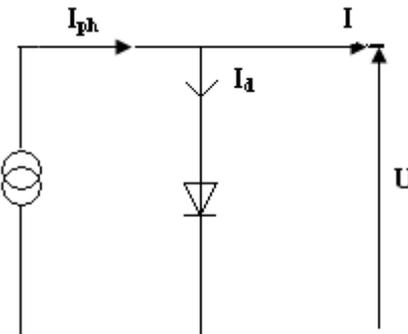
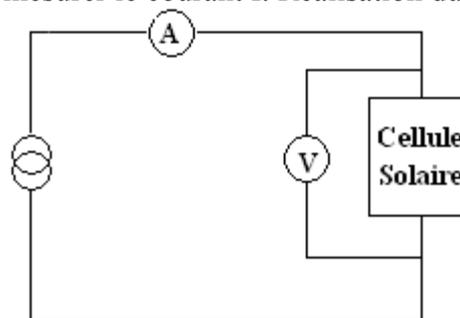


Figure 2 : schéma équivalent simplifié

3. Montage et Réalisation

1. Appliquer une tension et mesurer le courant I . Réalisation du circuit suivant :



2. Remplir le tableau suivant :

I_d (mA)							
V(V)							

3. Tracer le graphe ; $I=f(V)$, que déduisez vous

TP N°3 : L'ECLAIREMENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

Nom : Prénom : Groupe :	Nom : Prénom : Groupe :
Date :	Note :

1. But :

Etudier l'importance de l'éclairage d'une cellule photovoltaïque ainsi que les caractéristiques de cette cellule

2. Partie Théorique

I) Importance de l'éclairage

Composition d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est éclairée par une lampe de bureau distante de 10 cm.

L'éclairage de la lampe est mesuré avec un luxmètre.

Le lux est une unité de mesure de l'éclairage lumineux (symbole : lx) Il caractérise le flux lumineux reçu par unité de surface¹. Un lux est l'éclairage d'une surface qui reçoit, d'une manière uniformément répartie, un flux lumineux d'un lumen par mètre carré :

$$1 \text{ lx} = 1 \text{ Lm/m}^2.$$

L'appareil de mesure de l'éclairage lumineux est le luxmètre. Il comporte généralement une partie à cellule photosensible et une partie d'affichage. La sensibilité d'un récepteur tel que l'œil ou une caméra vidéo se définit également en lux et correspond généralement au niveau d'éclairage minimum de sensibilité acceptable. Concernant l'œil humain, cette sensibilité diminue d'environ 25 % entre les âges de 20 et 60 ans. L'œil humain peut s'accommoder à des niveaux d'éclairage très variables, de **130 000 lux** (une journée ensoleillée d'été) à 1 lux (une nuit de pleine lune). Néanmoins certains niveaux minimaux sont requis : par exemple **5 lux** pour se déplacer, **150 lux** pour la lecture et l'écriture, etc.

Mesurer la valeur de l'éclairage du soleil pour avoir une idée de sa valeur.

Quelle est la correspondance entre les lux et les watts/m² ?

3. Partie Expérimentale

Matériel

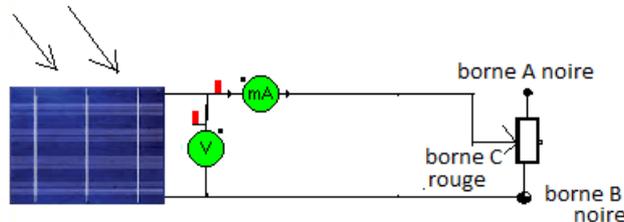
- une cellule photovoltaïque
- un luxmètre
- 1 voltmètre
- 1 ampèremètre
- un rhéostat de 23 Ω
- une diode
- une ampoule de faible puissance
- 5 feuilles de papier calque+ un papier couleur (rouge, vert, bleu, jaune)



I. Placer une puis 2 puis 3 etc. feuille de papier calque contre la source lumineuse de manière à faire varier la valeur de l'éclairement. On placera la cellule à 10 cm de la source lumineuse. Réaliser le montage suivant

Placer aux bornes de la cellule photovoltaïque un voltmètre.

Noter pour chaque valeur d'éclairement en Lux (lx) la valeur de l'intensité i du courant produit par la cellule. On règlera à $R = 23 \Omega$ la valeur de la résistance du rhéostat.



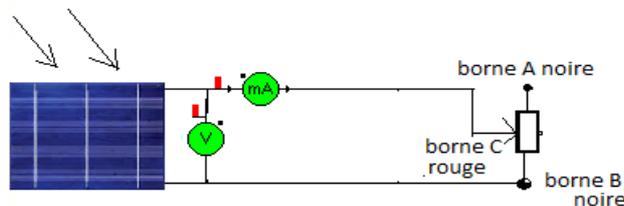
nombre de feuille	0	1	2	3	4	5	P.Couleur						
							R	V	B	J			
éclairement(Lx.10)													
$i(\text{mA})$													

- Quel est le protocole permettant de mettre en évidence l'importance de l'éclairement sur l'intensité du courant débité par la cellule photovoltaïque.
- Quelle conclusion tirez-vous de vos mesures ?

D) Caractéristiques de la Cellule Photovoltaïque

1. Tracé de la caractéristique courant-tension $i = f(U)$

1. Imaginer un protocole permettant de tracer la caractéristique intensité-tension $i = f(U)$ de la cellule photovoltaïque. Le rhéostat a pour valeur $R = 23 \Omega$. On fera varier sa résistance pour faire varier le courant i débité par la cellule. On prendra le cas où l'éclairement E est maximum.



Relever la valeur de l'éclairement de la cellule

Remarque : la borne A n'est pas reliée au montage.

U(V)													
$i(\text{mA})$													
$i(\text{A})$													
P(W)													

2. Tracer la caractéristique $i = f(U)$. Attention de convertir i en ampère et d'insérer U sur la première ligne du tableur Excel puisqu'il s'agit de la grandeur physique en abscisse. Commenter l'allure de la courbe.

3. On distingue 2 types de dipôle électrique: les générateurs et les récepteurs. La caractéristique d'un récepteur passe-t-elle par l'origine? Même question pour un générateur. La cellule est-elle un récepteur ou un générateur?

4. I_{cc} est l'intensité du courant produite par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle. I_{cc} signifie intensité du courant de court circuit. Les bornes de la cellule sont alors reliées par un fil. La résistance électrique du fil étant nulle, on court-circuite la cellule (d'où le nom de courant de court circuit).

La tension en circuit ouvert également appelé tension à vide, est noté U_0 . Entre les bornes de la cellule il y a alors une résistance électrique infini (l'air ne conduit pas l'électricité). U_0 correspond à la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle ne débite aucun courant.

Déterminer à l'aide de votre courbe la valeur de U_0 et de I_{cc} .

2. Tracé de la caractéristique courant-tension $P = f(U)$

1. La puissance électrique fournit par un générateur est donnée par la formule:

$$P(W) = U(V).i(A)$$

Ajouter une ligne dans le tableur Excel, tracer la courbe $P = f(I)$ puis la commenter.

2. Quelle est la puissance maximale P_{max} fournit par la cellule?

3. Le rendement r d'une cellule photovoltaïque est donné par la formule:

$$r = \frac{P_{max}}{P_{Lumineuse}} = \frac{P}{E \cdot S}$$

P_{max} : puissance électrique maximale en Watt(W) fournit par la cellule

$P_{Lumineuse}$: puissance lumineuse reçue par la cellule en Watt

E : éclairement en $W.m^{-2}$

S : surface de la cellule en m^2 .

a) On admettra que 100 lux correspond à un éclairement de $1W.m^{-2}$. Calculer la valeur de l'éclairement E de la cellule

b) Calculer la surface S de la cellule, en déduire la puissance lumineuse reçue par la cellule

c) En déduire la valeur du rendement.

4. Peut-on alimenter une ampoule ou une diode avec la cellule?

TP N°4 MESURE DE RAYONNEMENT SOLAIRE

Nom : Prénom : Groupe :	Nom : Prénom : Groupe :
Date :	Note :

1. But :

Pour la production d'énergie solaire, il est essentiel de déterminer l'ensoleillement en un lieu et un moment donnés, cela signifie de mesurer le rayonnement solaire d'une journée d'ensoleillement.

1. Partie Théorique

• Définition :

Énergie naturelle par excellence, le Soleil, cet astre incandescent dont la température de surface est voisine de 5 500 °C, nous dispense chaleur et lumière. Centre de notre système planétaire, sa place est si grande dans l'activité terrestre sous toutes ses formes qu'il fut bien souvent objet d'adoration.

Source indirecte des énergies usuelles de notre temps (sous forme chimique et biochimique en particulier), ce n'est qu'au XVIIe siècle que l'on songea à utiliser directement le Soleil à des fins techniques : Lavoisier a, l'un des premiers, employé une lentille convergente de 1,30 m de diamètre pour obtenir la fusion d'un morceau de fer placé à son foyer.

Ce n'est qu'en 1954 que les premières piles solaires produisant de l'électricité firent leur apparition, grâce aux travaux de Bell Laboratoires (États-Unis).

• Rayonnement solaire et atmosphère

La distance de la Terre au Soleil 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 du soleil mettent donc environ 8 min à nous parvenir.

La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au Soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1 360 W/m² (bien qu'elle varie de quelques % dans l'année à cause des légères variations de la distance Terre-Soleil).

Le watt par m²(W/m²) est l'unité la plus utilisée pour quantifier le rayonnement solaire. C'est un flux, une puissance par unité de surface. 1 W/m² est aussi égal à 1 Joule par seconde et par m² puisque 1 W = 1 J/s. Ici l'énergie est électromagnétique, mais les unités sont les mêmes que pour une énergie électrique.

Lors de la traversée de l'atmosphère, ce rayonnement de 1 360 W/m² subit des déperditions, du fait de son absorption partielle par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau. Ainsi, le flux reçu sur la Terre est inférieur au flux « initial » et dépend de l'angle d'incidence, et donc de l'épaisseur d'atmosphère traversée.

En effet, si l'on fait face au Soleil, on le voit à une certaine hauteur, qu'on appelle hauteur apparente. C'est l'angle h entre le plan horizontal situé sous nos pieds et une droite pointée vers le Soleil.

-On voit bien sur la figure 1 que cet angle h détermine la distance parcourue par le soleil à travers l'atmosphère et donc les pertes engendrées.

-On appelle m (masse atmosphérique), ou Air Mass, cette distance calculée en multiples de la distance parcourue si le soleil était à la verticale du lieu.

Sur notre figure 1, $m = 1$ si le Soleil entre dans l'atmosphère au point A, et $m = 2$ s'il y entre en M, donc :

$$m = 1/\sin(h)$$

Quant aux conditions normalisées de test des panneaux solaires, elles sont caractérisées par un rayonnement instantané de $1\,000\text{ W/m}^2$, un spectre solaire AM 1,5 et 25 °C de température ambiante. Ces conditions sont appelées STC (Standard Test Conditions).

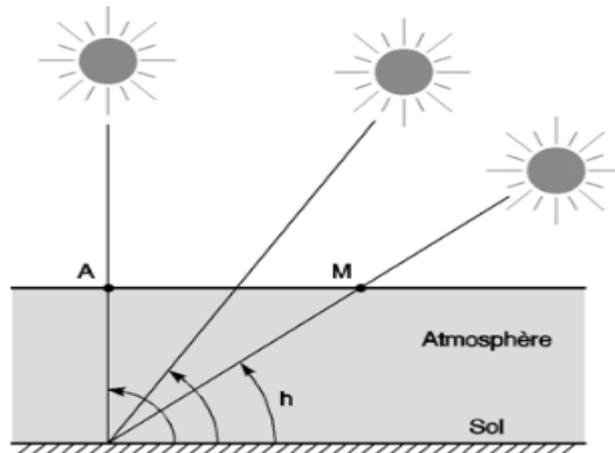


Figure 1 : Définition de l'Air Mass : $m = 1/\sin(h)$

Figure 2, nous montre l'influence de cette couverture nuageuse sur le rayonnement reçu sur la Terre. Notons au passage la différence entre le rayonnement direct, les rayons du soleil qui nous parviennent en ligne droite, et le rayonnement diffus, les rayons qui subissent de multiples réflexions et nous parviennent alors de toutes les directions à travers les nuages. Le rayonnement solaire est entièrement diffus lorsqu'on ne peut plus voir où se trouve le soleil. Quant au rayonnement global, c'est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

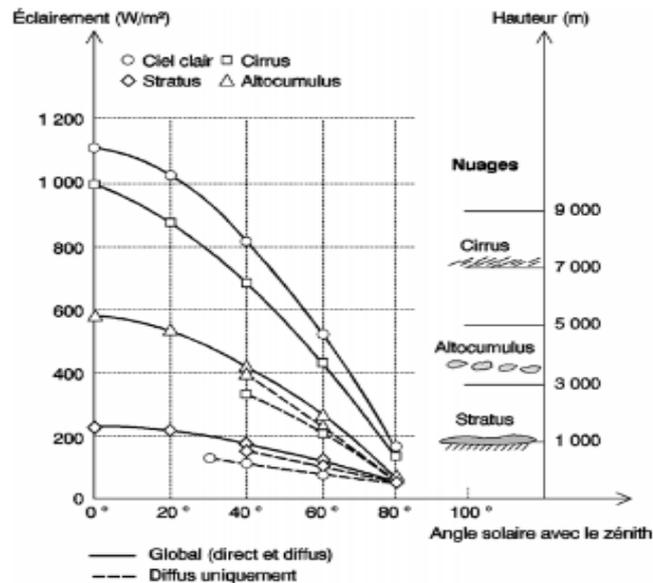


Figure 2: Influence des nuages sur le rayonnement solaire

Pour résumer, le soleil dispense typiquement à un instant t sur la terre (en rayonnement global) :

- $1\,000\text{ W/m}^2$ avec un soleil au zénith et un ciel parfaitement dégagé ;
- $100\text{-}500\text{ W/m}^2$ sous un ciel nuageux ;

- moins de 50 W/m^2 sous un ciel vraiment couvert.

Lieu géographique, orientation, saison, heure de la journée, etc. jouent directement sur le rayonnement instantané. C'est ce qui dérouté bien souvent les utilisateurs pour définir leurs systèmes solaires. L'énergie délivrée par un panneau solaire est hautement variable !

L'éclairement instantané n'est d'ailleurs pas très utile, il faut bien distinguer le rayonnement instantané (en W/m^2), appelé aussi éclairement, qui est un flux lumineux reçu à un moment donné, et le rayonnement intégré (ou cumulé) (en Wh/m^2 ou kWh/m^2), qui est l'énergie totale disponible pendant un certain temps. En général, cette période de base est de 24 h : on parle alors de $\text{Wh/m}^2 \cdot \text{jour}$ (watts-heure par m^2 et par jour). On obtient cette énergie globale en multipliant le rayonnement instantané par le temps. Pour un rayonnement variable, c'est l'intégrale du rayonnement sur le temps considéré.

2. Exploitation des résultats

1. Remplir le tableau suivant, on reporte la décomposition dans le temps et le total en Wh/m^2 sur cette journée.

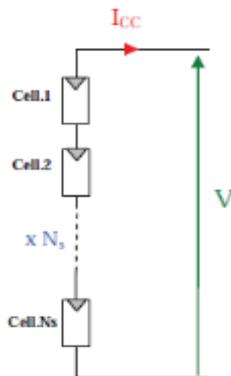
Horaire	W/m^2	Durée (h)	Résultat (Wh/m^2)
8h à 9h		1	
9h à 10h		1	
10h à 11h		1	
11h à 13h		2	
13h à 15h		2	
15h à 16h		1	
Total par jour			

2. Tracer un schéma d'une journée d'ensoleillement, qui représente éclairement instantané (W/m^2) en fonction de l'heure dans la journée ?
3. Donner une interprétation brève (en quelques lignes) du schéma obtenu.
4. Comment placer les panneaux solaires pour récupérer un maximum de rayonnement solaire et comment savoir quelle énergie on va récupérer ?
5. Comment associer les cellules entre elles (dérivation ou série) ? calculer le nombre de cellules nécessaires ? pour alimenter un petit moteur électrique : Tension minimale 1,6 V et Intensité du courant : inférieur à 10 mA.

Groupement en série

$I_{scc} = I_{cc}$: le courant de court-circuit.

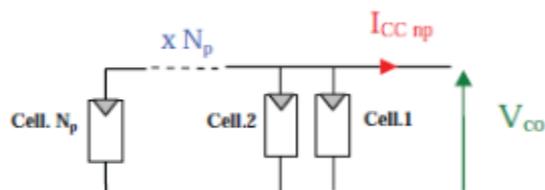
$V_{sco} = n_s V_{co}$: la tension de circuit ouvert.



Groupement en parallèle

$I_{pcc} = n_p I_{cc}$: le courant de court-circuit.

$V_{pco} = V_{co}$: la tension de circuit ouvert.



TP N°5 : OMBRAGE PARTIEL D'UNE CELLULE

Nom :	Nom :
Prénom :	Prénom :
Groupe :	Groupe :
Date :	Note :

1. But :

Mesurer l'influence d'un ombrage partiel du panneau en le recouvrant en partie avec une plaque opaque.

2. Partie Expérimentale : Utilisation du panneau

1 - Inclinaison

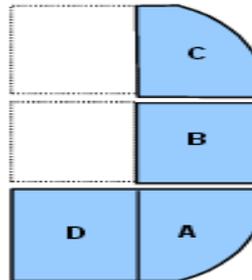
Pour un éclairement de 100 klux et une inclinaison du panneau d'angle α par rapport à l'horizontale, relever la courbe $P_c = f(\alpha)$ à $E = \text{cte}$ où P_c est la puissance crête. Celle-ci sera directement obtenue par l'analyseur. Tracer cette courbe

Commenter ces résultats, sont-ils conformes à ce qui était attendu ?

Mesurer l'influence d'un ombrage partiel du panneau en le recouvrant en partie avec une plaque opaque. Pour un éclairement de 100 klux, relever la tension à circuit ouvert U_{OC} , le courant de court-circuit I_{CS} et la puissance crête P_c dans les 5 cas suivants.

Ombrage :

- n°1 : A
- n°2 : A+B
- n°3 : A+B+C
- n°4 : A + D



Recouvrement des cellules :	aucun 0%	A 50%	A+B 2*50%	A+B+C 3*50	A+D 100%
U_{OC} (V)					
I_{CS} (mA)					
P_c (W)					

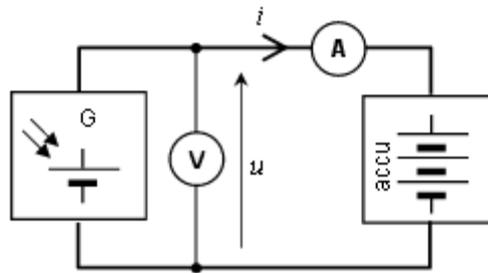
Expliquer les résultats obtenus :

2. Branchement direct du panneau sur l'utilisation : Point de fonctionnement

- Brancher la lampe à économie d'énergie 12V directement au panneau solaire. Observer la lampe lorsque le panneau est entièrement éclairé. Mesurer la tension aux bornes de la lampe. Expliquez ce que vous observez en plaçant le point de fonctionnement sur la caractéristique $I = f(U)$. Calculer la puissance transmise par le panneau à la lampe
- Recommencer l'expérience avec la lampe tubulaire 12V. Qu'observez-vous ? A quoi faut-il faire attention pour le branchement direct d'une charge au panneau.

Branchement sur un accumulateur 12V

-Réaliser le montage ci-contre et mesurer le courant et la tension à l'aide du module Cassy, pour un éclairement maximal du panneau



-Reprendre la mesure lorsque le projecteur est arrêté puis lorsqu'il est complètement occulté avec un carton :

Eclairement maximal

U(V)	
I(mA)	

Eclairement nul

U(V)	
I(mA)	

Panneau occulté

U(V)	
I(mA)	

-Compléter le schéma ci-dessus avec une diode Schott ky. Justifier la technologie de cette diode.

Référence :

- [1] Anne Labouret, Pascal Cumunel, Jean-Paul Braun, Benjamin Faraggi, « Cellules solaires », Editions techniques et scientifiques françaises (ETSF), livre 118 pages, 2001
- [2] A. Labouret, P. Cumunel, J.P. Braun et B. Faraggi, « cellules solaires les bases de l'énergie photovoltaïque », 5^e édition ETSF 2010
- [3] Energie de demain, J.L., Huffer, E. Bobin, H. Niefenecker recueil publié sous la direction de J.M. Jancovici, éd. EDP Grenoble Sciences, Une mine d'informations très utiles sur les sources d'énergie renouvelables, le bilan des filières de production d'énergie, la comparaison avec les énergies fossiles.
- [4] Revue *Systèmes Solaires, Journal des Énergies Renouvelables*
http://www.energies-renouvelables.org/accueil_systemes_solaires.asp
- [5] Anne LABOURET et Michel VILLOZ, « *Énergie solaire photovoltaïque* », Dunod, 4^e édition, 2009.
- [6] Les lois du monde (notre environnement expliqué par la physique), Lehoucq, Courty & Kierlik, éd. Belin. Assez superficiel, mais peut donner envie d'en savoir plus
- [7] La physique de tous les jours, Istvan Berkes, éd. Vuibert.**
- [8] Les cellules solaires, F. JUSTER, Editions Techniques et Scientifiques Françaises, Paris, 1980
- [9] Cellules solaires - les bases de l'énergie photovoltaïque, Anne Labouret, Pascal Cumunel, Jean-Paul Braun, Benjamin Faraggi, Editions Techniques et Scientifiques Françaises, Paris, 2003
- [10] Caractérisation de cellules solaires**
www.cime.inpg.fr/images/caracterisation/TP_carac_elec_PV.pdf
- [11] Les caractéristiques électriques des cellules et modules
<http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16696>
- [12] La cellule photovoltaïque
http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaique-2011/I_caracteristique-courant-tension-cellule-1.php
- [13] F. Giamarchi, « Cellule Solaire : Modèle Spice », IUT de Nîmes : Départ GE2I, 2008
- [14] A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud et I. Youm, « Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque », *Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3, 473 – 483(2008)*
- [15] *Cellule photovoltaïque–Photodiode, TP Photodiode. DOC–C. Baillet–ENCPB / RNChimie eduscol.education.fr/rnchimie/phys/baillet/06/tp_photod.pdf*
- [16] Systèmes de mesure du rayonnement solaire
<http://www.vaisala.fr/fr/energy/powergeneration/solarradiation/Pages/default.aspx>
- [17] Généralités sur les cellules photovoltaïques
<https://bloggerinfo27.files.wordpress.com/2013/01/chapitre-i23-09.doc>