

**CELLULES PHOTOVOLTAIQUES.
Etude et comparaison de deux types de cellules.**

B. AMANA, Ch. RICHTER et O. HECKMANN

La manipulation a pour but l'étude du fonctionnement des cellules photovoltaïques et la comparaison des performances de deux types de cellules : une cellule au silicium mono-cristallin et une cellule au silicium amorphe (7 cellules montées en série).

I-THEORIE.

Seul sera considéré pour exposer le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, le cas des cellules à base de silicium cristallin. La structure électronique d'un semi-conducteur est représentée sur la figure I-1.

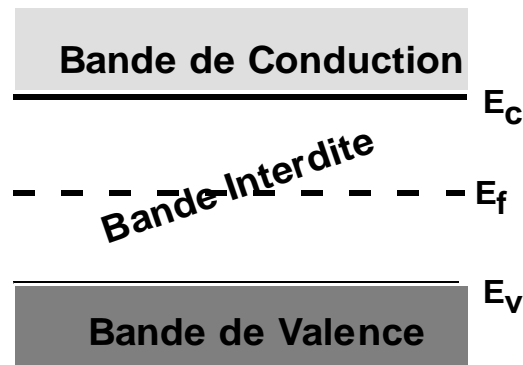


Figure I-1

I-1 Niveaux d'énergie d'un semi-conducteur.

A l'état fondamental ($T = 0$ K) tous les électrons de la couche M du silicium se trouvent dans la bande de valence BV. La formation d'une bande résulte de l'interaction par résonance des 4 états d'hybridation sp^3 des N atomes Si de tout l'échantillon. La largeur totale de la bande de valence est d'une dizaine d'eV. Vu le très grand nombre d'états qu'elle renferme, on peut la considérer comme un quasi continuum. L'énergie du bord supérieur de la BV est notée E_V . Le nombre d'états d'énergie comprise entre E et $E+dE$ est donné par $N(E).dE$ où $N(E)$ est la densité d'états pour l'énergie E .

La bande de conduction BC représente le premier état excité (états anti-liants des électrons formant les liaisons Si-Si). Elle est vide à 0 K. Sa limite inférieure est notée E_c . La région comprise entre les bandes BV et BC s'appelle bande interdite, elle ne contient aucun état susceptible de recevoir un électron. Pour le silicium cristallin sa largeur est de 1,08 eV. A $T \neq 0$, un certain nombre d'électrons sont excités thermiquement de BV vers BC. Pour une température donnée T, la répartition des électrons est régie par la statistique de Fermi-Dirac $f(E)$ qui donne la probabilité pour qu'un état d'énergie E soit occupé :

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_F}{kT}}} \quad (1)$$

E_F est un paramètre (homogène à une énergie) appelé niveau de Fermi et qui se trouve dans la bande interdite. La figure I-2 montre la forme de la fonction $f(E)$. A la température T, le nombre d'électrons n dans la BC est donné par :

$$n = \int_{BC} N(E)f(E)dE \quad (2)$$

On montre que l'on peut écrire une relation de la forme :

$$n = f(E_c)N(E_c) \quad (3)$$

où $N(E_c)$ définit une densité d'états effective dans la bande de conduction.

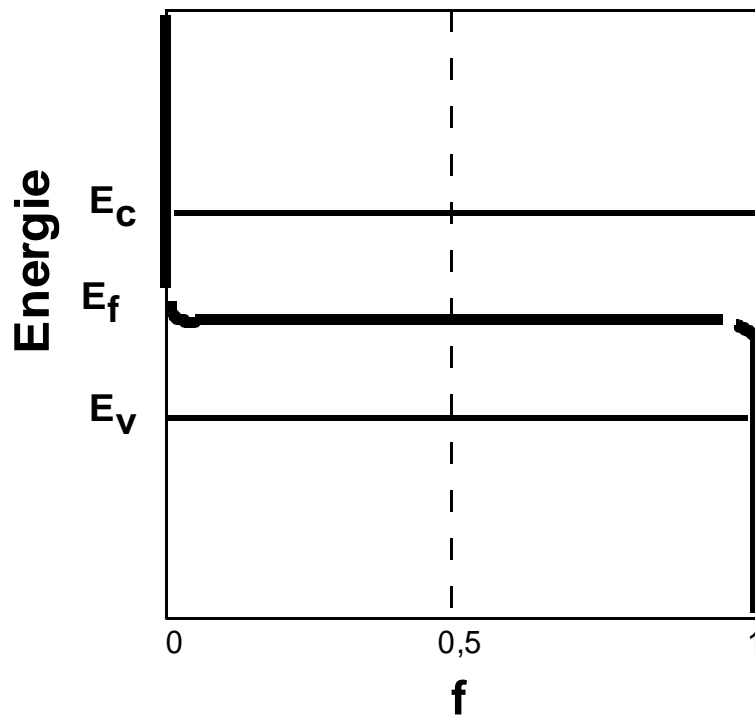


Figure I-2

Aux n électrons excités dans BC correspond un nombre égal p de trous (ou défauts d'électrons) dans BV.

Si l'on applique une tension V aux bornes de l'échantillon, on observe un courant qui correspond à une conductivité σ donnée par :

$$\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p) \quad (4)$$

où q est la charge de l'électron et μ_n et μ_p sont respectivement les mobilités respectives des électrons dans BC et des trous dans BV.

Remarque:

Les unités généralement utilisées dans les problèmes de semi-conducteurs sont données ci-dessous :

- l'énergie s'exprime en électronvolts ($1 \text{ eV} = 1,610^{-19}$ joule)
- la densité d'états $N(E)$ s'exprime en $\text{eV}^{-1}\text{cm}^{-3}$
- la densité d'états effective $N(E_C)$ s'exprime en cm^{-3}
- la concentration n en électrons dans BC et la concentration p en trous dans BV s'expriment en cm^{-3}

I-2 Dopage

Si l'on introduit dans le réseau de silicium des atomes pentavalents tels que le phosphore ou l'arsenic, ils se placent en site de substitution.

Quatre électrons sont utilisés pour les liaisons avec les Si voisins, le cinquième est très peu lié et a une très grande probabilité d'être excité vers BC. On a du silicium dopé n. La répartition des électrons est encore régie par la fonction de Fermi mais cette fois E_F est située dans la moitié supérieure de la bande interdite ainsi que le montre la figure I-3a. Les niveaux électroniques correspondant aux atomes d'impureté sont situés dans la bande interdite et très proches de E_C . Il y a un nombre égal de charges positives sur les atomes donneurs (P ou As) et d'électrons dans la bande de conduction.

Si l'on introduit des atomes trivalents (bore), il manque maintenant un électron pour former les quatre liaisons autour de l'impureté. Un électron sera excité depuis BV pour combler cette lacune et il reste un trou dans BV. La statistique des trous est aussi régie par la fonction de Fermi, E_F est alors dans la moitié inférieure de la bande interdite (figure I-3b).

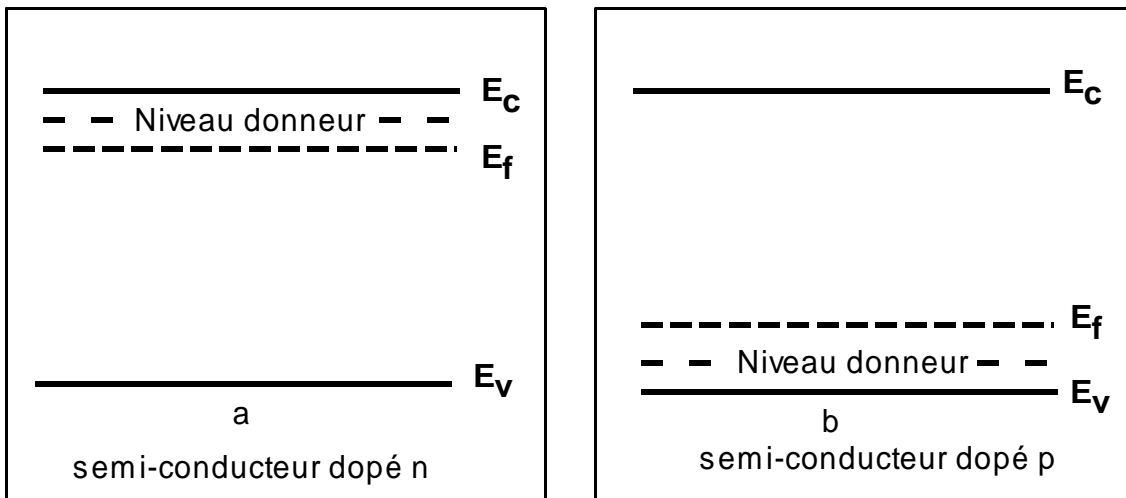


Figure I-3

I-3 Eclairage par une source lumineuse.

Si un semi-conducteur est éclairé avec des photons d'énergie supérieure à la largeur de la bande interdite, ces photons sont absorbés et il en résulte l'excitation d'un certain nombre d'électrons de BV vers BC. Il reste des trous p dans BV. Mais rien ne permet de séparer les paires électron-trou ainsi formées, leur recombinaison est très rapide. On ne peut pas recueillir d'énergie électrique de cette façon. Il faut donc trouver un moyen de séparer les charges initialement formées. Ceci est réalisé dans un dispositif appelé jonction pn.

I-4 Jonction p-n.

Lorsqu'un semi-conducteur dopé p est mis en contact avec un semi-conducteur dopé n, les électrons en excès dans la région n diffusent vers l'interface. Il en résulte une charge d'espace dans une région d'environ 1 μm autour de l'interface, ce qui produit un champ électrique qui peut être calculé grâce à l'équation de Poisson. La barrière de potentiel au niveau de la jonction est donnée par :

$$V_i = \frac{E_{F_n} - E_{F_p}}{q} \quad (5)$$

E_{F_n} et E_{F_p} sont les niveaux de Fermi respectivement dans les régions n et p ; q est la charge élémentaire.

On a un dispositif dit "redresseur", ce qui peut se voir en traçant la caractéristique j-V à l'aide du montage de la figure II-2. En l'absence d'éclairement on obtient la courbe "a" de la figure 4 qui a pour équation :

$$j = j_s (e^{qV/kT} - 1) \quad (6)$$

j_s est appelé courant de saturation et dépend des caractéristiques des semi-conducteurs formant la jonction.

La jonction p-n est le dispositif utilisé dans les cellules photovoltaïques. En effet, quand des photons sont absorbés dans la zone de charge d'espace, les paires électron-trou formées sont séparées par le champ électrique de la jonction qui fait migrer les électrons vers la région n et les trous vers la région p. Si l'on trace la caractéristique j-V avec le même montage que précédemment, on a cette fois une courbe du type "b" de la figure I-4 dont l'équation est calculée dans le paragraphe suivant. La zone hachurée dans le quatrième quadrant correspond à l'énergie disponible ainsi qu'on le verra.

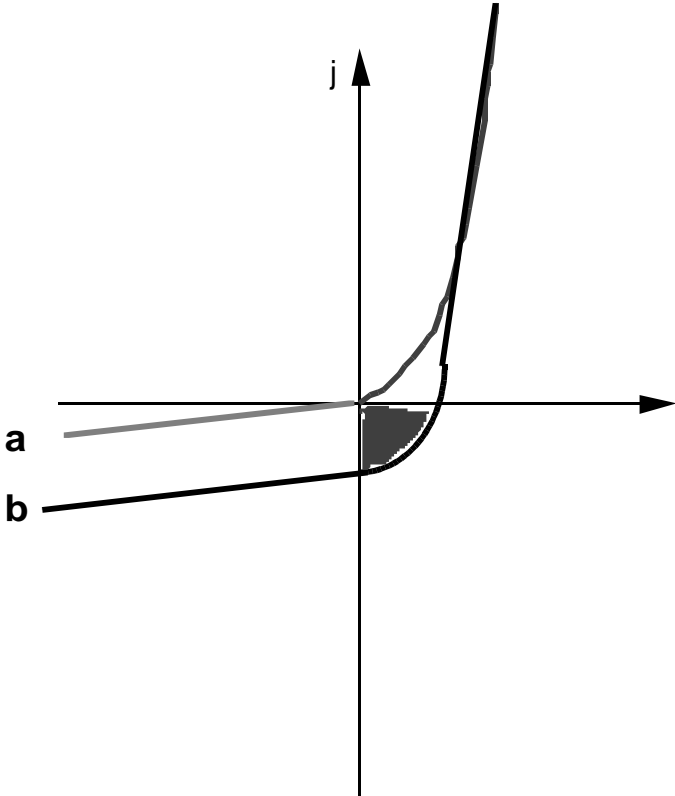


Figure I-4: caractéristique de la jonction pn.

I-5 Cellule photovoltaïque.

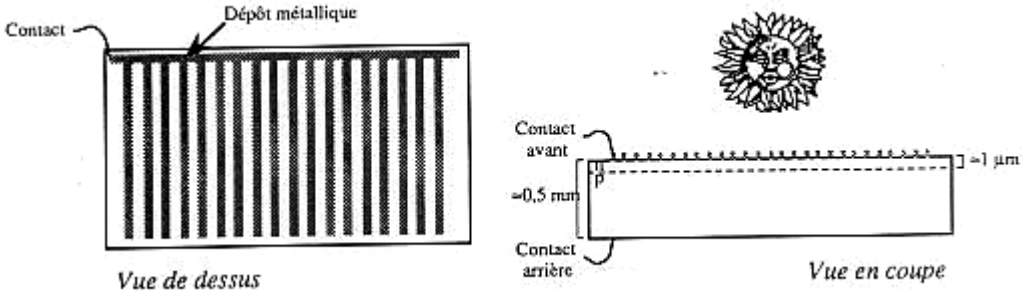


Figure I-5:schéma de la cellule photovoltaïque.

Le schéma d'une cellule photovoltaïque est donné sur la figure I-5.

On a généralement une couche mince de silicium p au-dessus d'une plaquette de silicium n. En surface, un dépôt métallique en forme de peigne a pour rôle de recueillir les charges tout en laissant passer la lumière. Le circuit équivalent est donné sur la figure 6.

La séparation des paires électron-trou par le champ électrique de la jonction pn fait passer au travers de celle-ci un courant j_g (courant généré par la lumière) depuis la région n vers la région p. Simultanément la région p se charge positivement et la région n négativement, créant ainsi une polarisation de la cellule qui en retour fait passer au travers de la jonction un courant inverse j_i de signe opposé à celui de j_g . S'il n'y a pas de connections extérieures, $j_g=j_i$. Par contre, si la cellule est reliée à un circuit d'utilisation simulé par une résistance de charge R_u , une partie de j_g passe par le circuit extérieur.

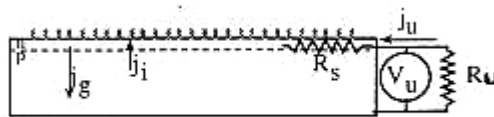


Figure I-6: schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

On a :

$$j_g = j_i + j_u \quad (7)$$

où j_u est le courant passant dans le circuit d'utilisation. L'équation fondamentale de la jonction p-n (équation 6) devient :

$$j_g = j_s \left(e^{qV/KT} - 1 \right) + j_u \quad (8)$$

V est ici la tension de polarisation due au passage du courant j_g . La chute de tension dans le circuit s'écrit donc :

$$V = j_u R_s + V_u \quad (9)$$

où V_u est la tension aux bornes du circuit d'utilisation et R_s la résistance interne de la cellule qui peut être considérée comme étant en série.

La combinaison des relations 8 et 9 conduit à l'équation fondamentale de la cellule photovoltaïque :

$$V_u = \left(\frac{kT}{q} \right) \text{Log} \left(1 + \frac{j_g - j_u}{j_s} \right) - R_s j_u \quad (10)$$

Le courant de court-circuit j_{cc} est le courant qui passe dans le circuit d'utilisation si $R_u=0$. j_{cc} est proportionnel à j_g selon (7), donc proportionnel au flux lumineux. Par suite des pertes électriques, on a toujours $j_{cc} < j_g$.

La tension aux bornes de la cellule est maximum quand $j_u = 0$ soit ($R_u = \infty$).

On définit ainsi la tension de circuit ouvert V_{co} :

$$V_{co} = \left(\frac{kT}{q} \right) \text{Log} \left(1 + \frac{j_{cc}}{j_s} \right) \quad (11)$$

Comme j_{cc} est proportionnel au flux lumineux, V_{co} augmente comme le logarithme du flux.

A chaque valeur de R_u correspond un couple de valeurs V_u , j_u . La caractéristique donnée sur la figure 1-7 est obtenue en faisant varier R_u du court-circuit ($V_u=0$) jusqu'au circuit ouvert ($V_u=V_{co}$).

On notera que la puissance électrique fournie par la cellule, $P=V_u j_u$, dépend de la résistance R_u du circuit extérieur. Ceci est dû au fait que les pertes électriques dans la cellule dépendent du "point de fonctionnement", lui-même déterminé par les caractéristiques du circuit extérieur. Soit P_{max} la puissance fournie par la cellule dans les conditions optimales. La grandeur $P_{max}/V_{co} j_{cc}$ s'appelle facteur de remplissage (fill factor) et est notée FF. Elle est toujours inférieure à 1 (Cf figure 1-7) et joue un rôle important en intervenant dans le calcul du rendement de la cellule.

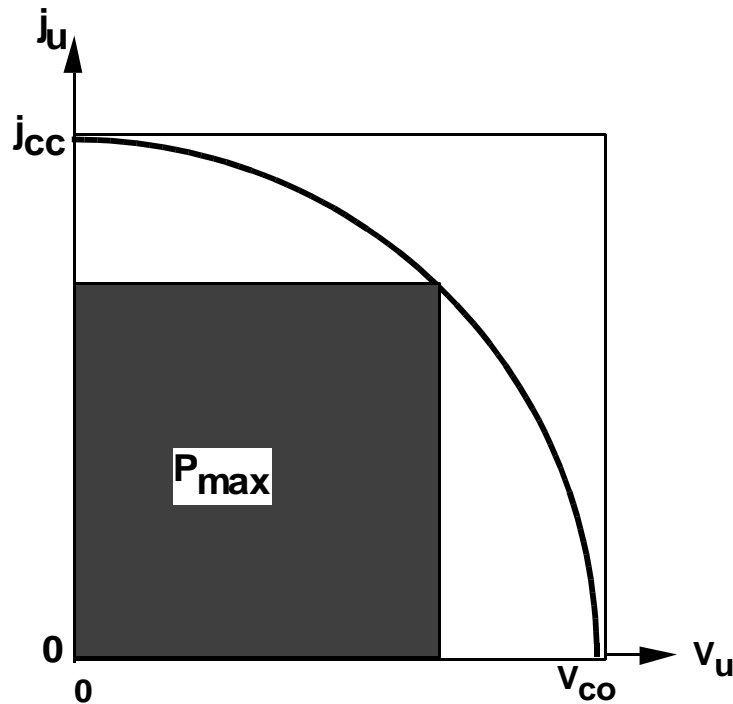


Figure I-7: caractéristique j-V d'une cellule photovoltaïque

I-6 Rendement de conversion photovoltaïque.

Le rendement ρ d'une cellule photovoltaïque est égal au rapport de la puissance électrique fournie à la puissance lumineuse incidente. Le rendement est limité par un certain nombre de facteurs :

-- les pertes par réflexion : une partie de la lumière incidente est réfléchiée à la surface du silicium. Pour un milieu d'indice de réfraction ν le coefficient de réflexion est égal à $[(\nu - 1)(\nu + 1)]^2$. Pour le silicium dont l'indice de réfraction est élevé ($\nu \approx 3,5$) , environ 30 % de la lumière est réfléchiée. Le dépôt d'une couche anti-réfléctrice à la surface permet de diminuer cette perte. On définit le rendement partiel correspondant ρ_R comme le rapport du nombre de photons incidents au nombre de photons pénétrant dans l'échantillon.

-- le spectre de la lumière solaire est très large. Seuls les photons d'énergie supérieure à la largeur de la bande interdite peuvent être absorbés,

soit environ 50 %. De même que ci-dessus le rendement partiel correspondant ρ_A sera le rapport du nombre de photons absorbés au nombre de photons pénétrant dans l'échantillon.

-- les pertes électriques qui interviennent à plusieurs stades. j_{CC} est limité par l'efficacité de collection des charges. Il faut que les photons soient absorbés dans la zone de charge d'espace pour avoir une bonne séparation des paires électron-trou. De plus il faut minimiser les pertes par recombinaison ou piégeage des charges au cours de leur migration vers les contacts extérieurs. V_{CO} est déterminé par les positions des niveaux de Fermi de part et d'autre de la jonction. V_{CO} dépend du flux lumineux et est au maximum de l'ordre de 700 mV ce qui signifie que l'énergie recueillie pour un photon absorbé est au maximum 0,7 eV quelle que soit l'énergie du photon incident. Enfin le facteur FF vient lui aussi limiter le rendement. Il est très sensible à la résistance interne R_S de la cellule ainsi que le montre la relation 10 qui met en évidence la diminution de V_U quand j_U augmente. Le rendement correspondant à l'ensemble des pertes électriques est donné par ρ_E^{FF} .

-- enfin, il faut tenir compte d'une contrainte thermodynamique : l'ensemble qui nous fournit de l'énergie constitue un système qui comprend une source chaude (soleil $T=6000K$) et une source froide (cellule $T=300K$). Le principe de Carnot nous indique que le rendement maximum est $\rho_C=1-(300/6000)=0,95$.

Le rendement global de la cellule s'obtient en faisant le produit des rendements partiels :

$$\rho = \rho_C \rho_R \rho_A \rho_E^{FF} \quad (12)$$

Pour les cellules au silicium mono-cristallin, on calcule un rendement théorique maximum d'environ **20%** qui ne tient compte que des pertes qu'il est impossible d'éliminer. Par suite de difficultés technologiques le rendement des cellules commercialisées est au plus de l'ordre de **15%**.

Pour des raisons économiques évidentes, de nombreuses recherches portent sur la fabrication de cellules ayant un prix de revient moins élevé que celles au silicium mono-cristallin. Outre des essais faits avec d'autres matériaux, la fabrication de cellules au silicium poly-cristallin et au silicium amorphe a été

mise au point. Les rendements sont sensiblement moins élevés (12% pour le silicium poly-cristallin, aux environs de 8% pour les meilleures cellules au silicium amorphe).

II-MANIPULATIONS.

Les différentes étapes de la manipulation sont les suivantes :

-- Etude à l'obscurité et sous éclairage de la caractéristique j - V de la cellule considérée comme jonction p-n.

-- Etude de la caractéristique $j - V$ des cellules. Détermination de j_{cc} , V_{co} et FF.

-- Effet du flux lumineux sur j_{cc} et V_{co}

-- Comparaison de différentes cellules

-- Etude de la réponse spectrale d'une cellule.

II-1 Matériel

Cellules: on dispose de 2 types de cellules :

- **cellule A** au silicium mono-cristallin
- **cellule B** au silicium amorphe composée de 7 éléments montés en série.

Alimentation de tension continue (de couleur jaune) avec bouton de réglage fin

Multimètres: pour les mesures d'intensité, choisir la gamme μA . Pour les mesures de tension choisir la gamme **V=** (tension continue).

Dispositif d'éclairage : il comprend une lampe halogène alimentée par un transformateur à tension variable (**12 V au maximum**).

Boîte de résistances

Filtres neutres: de densités différentes, permettent d'atténuer le flux lumineux de façon identique sur tout l'ensemble du spectre du visible.

Monochromateur (Jobin Yvon): ce monochromateur de focale 200 mm est équipé d'un réseau à 1200 traits/mm. Il a une dispersion de 4 nm/mm. Il permet de sélectionner une longueur d'onde en faisant varier l'orientation du réseau de diffraction à l'aide du bouton gradué. La bande passante dépend de la largeur des fentes d'entrée et de sortie choisies (même valeur pour les deux). La gamme spectrale couverte par le monochromateur (compte tenu du réseau dont il est équipé) s'étend de 350 à 800 nm. Il est utilisable jusqu'à environ 880 nm, mais son facteur de réflexion diminue au-delà de 800 nm. L'affichage des longueurs d'onde est en nanomètre. L'ouverture du monochromateur est de f/4 (les dimensions du réseau sont de 5 cm x 5 cm).

II-2 Réglages préliminaires.

-Réaliser le montage de la figure II-1 donnant un faisceau sensiblement parallèle sur la cellule B (la plus grande).

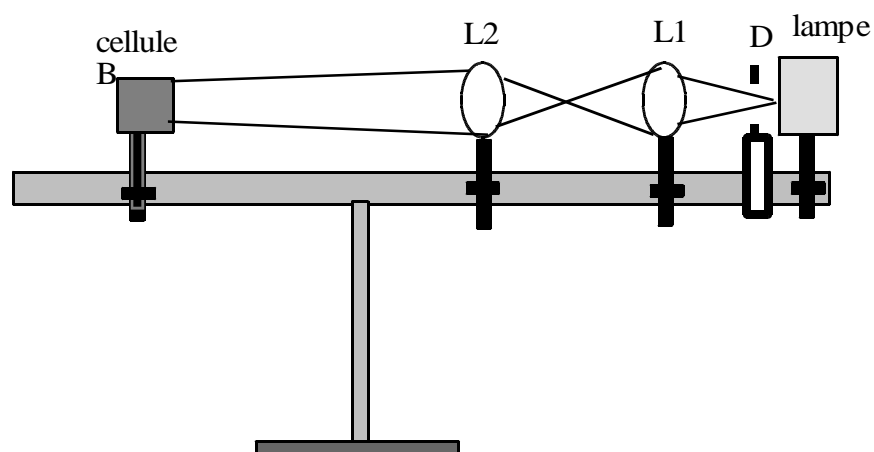


Figure II-1

L1:lentille de 50 mm de distance focale à placer à 15 cm environ de la lampe.

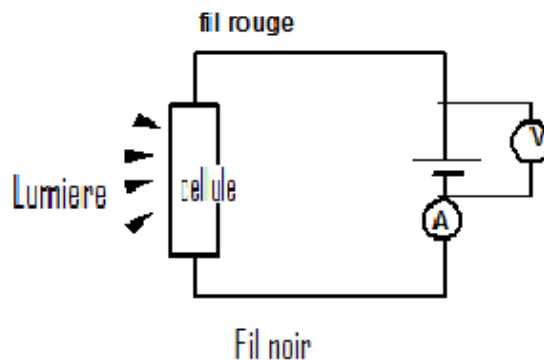
L2: lentille de 100 mm de distance focale à placer à 15 cm environ derrière L1.

D: diaphragme à **ne pas fixer trop près de la lampe** (risque de fusion).

-Placer le support de la cellule B dans une position telle que le faisceau de lumière provenant de L2 éclaire la totalité de sa face avant. Au besoin ajuster la position de L2.

Dans la suite du TP les positions des différents éléments ne changeront pas sauf si on le demande expressément, ceci afin d'avoir le même flux lumineux sur des cellules de surfaces différentes.

II-3 Etude d'une cellule considérée comme jonction p-n (sur cellule B uniquement).



-Réaliser le montage de la figure II-2

Figure II-2

Le but est de tracer la caractéristique j - V en ajustant la tension appliquée fournie par un générateur extérieur, d'une part lorsque la cellule est éclairée et d'autre part à l'obscurité.

-Pour appliquer une tension négative relier la borne rouge à la borne - de l'alimentation.

-En cas de besoin ne pas hésiter à utiliser pour les mesures d'intensité le calibre μA du multimètre.

Remarque: la résistance interne du multimètre pouvant perturber les mesures d'intensité, il est préférable de ne pas changer de calibre pendant toute la durée des mesures.

-Pour chaque valeur de tension de -7 à 0 V , lire la tension sur le multimètre et mesurer j . Continuer à augmenter progressivement la tension et mesurer j .

-Tracer la courbe $j = f(V)$.

-Reprendre la même série de mesures dans l'obscurité (lampe éteinte).;

-Tracer la courbe $j = f(V)$ sur le graphique précédent.

Il pourra être utile de retracer avec plus de précision la région où l'on a $V > 0$ et $j < 0$ (quatrième quadrant de la figure 1-4).

II-4 - Etude de la caractéristique j-V en charge d'une cellule.

L'étude sera faite sur la cellule A en silicium monocristallin puis sur la cellule B en silicium amorphe.



Figure II-3

-Réaliser le montage de la figure II-3. La différence essentielle par rapport au montage précédent est l'absence de source de tension, la cellule elle-même constituant le générateur. Le circuit d'utilisation est simulé par la série de résistances variables.

- Fixer l'alimentation de la lampe sur 12 V. Le circuit des résistances étant ouvert ($R_u = \infty$, donc $j_u = 0$), mesurer V_{CO} .

- Le circuit des résistances étant court-circuité ($R_u=0$ donc $V_u=0$), mesurer j_{CC} et calculer j_{CC}/S ; S étant la surface de la cellule photovoltaïque. Pour la cellule A, S vaut **41,5 mm²** et pour la cellule B, S vaut **760 mm²**.

- Mesurer j_u et V_u pour des valeurs croissantes de R_u . On veillera à ne pas changer le calibre du microampèremètre.

- Tracer la courbe $j_u = f(V_u)$

- Calculer en chaque point la puissance délivrée $P = j_u V_u$ et tracer
$$P = f(V_u)$$
- Déterminer sur la courbe de puissance la valeur maximale P_{\max}
- Déterminer la facteur de remplissage $FF = P_{\max} / V_{co} \cdot j_{cc}$
- Remplacer la cellule A par la cellule B sans changer la distance entre le support de cette cellule et la lentille L2 de façon à ne pas modifier le flux lumineux. Effectuer les mêmes mesures que sur la cellule A.

II-5 Comparaison des deux types de cellules.

- Placer l'ensemble des résultats (V_{co} , J_{cc}/S , FF , P_{\max}/S) dans un tableau.
- Commenter les résultats du tableau en essayant de relier les valeurs obtenues aux caractéristiques des deux types de cellules (s'aider en partie de la théorie exposée auparavant ou de lectures complémentaires).

Remarque: Tenir compte du fait que la cellule B est composée de 7 cellules montées en série pour la discussion concernant les valeurs de V_{co} .

II-6 Effet du flux lumineux sur j_{CC} et V_{CO} .

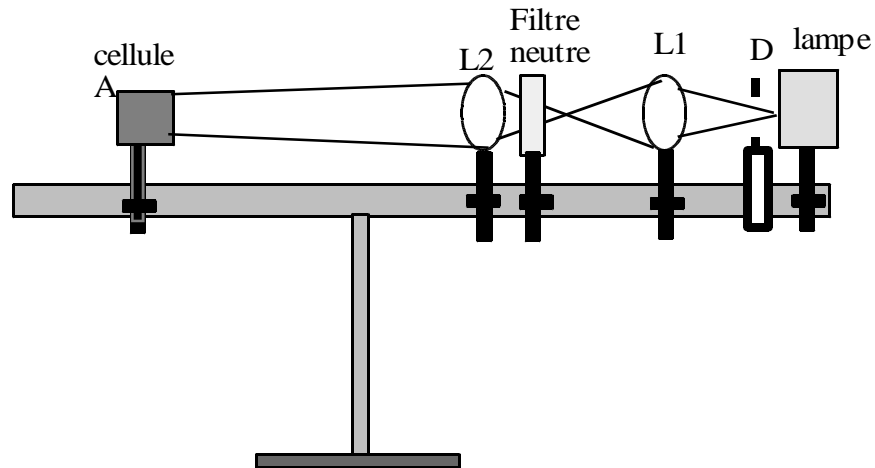


Figure II-4

-Modifier la figure II-1 en intercalant entre L1 et L2 un porte-filtre perpendiculaire à l'axe optique de manière à ce que tout le faisceau passe à travers le filtre (le mettre assez proche de la lentille L2 pour éviter de le griller au point de focalisation entre L1 et L2) (voir figure II-4)..

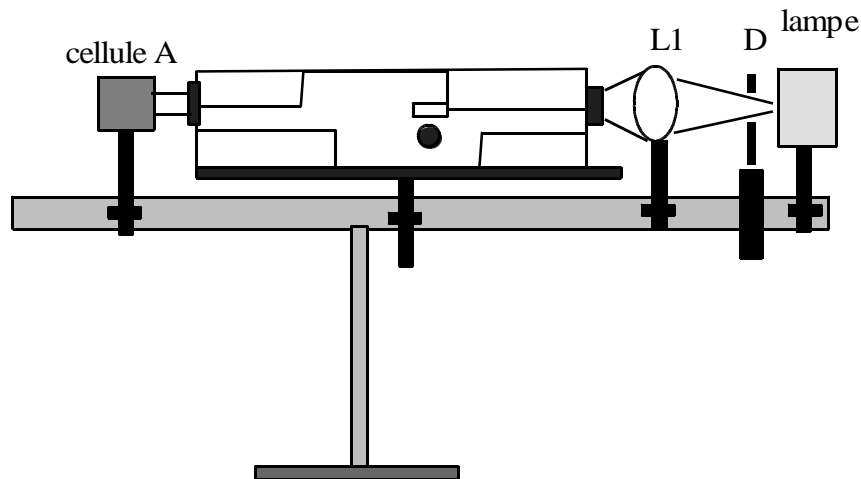
-Avec la cellule A, déterminer les variations de j_{CC} et V_{CO} en fonction du flux lumineux F . Le flux sera atténué par les filtres neutres disponibles. Pour un filtre neutre donné, le flux est égal à $F=F_0.T$, T étant le facteur de transmission du filtre utilisé et F_0 le flux en l'absence de filtre. La valeur d'un filtre est donnée en terme de densité d , avec la relation $d=\log_{10}(1/T)$. On dispose des valeurs de filtres suivantes: filtre 1: $d=0,2$; filtre 2: $d=0,5$; filtre 3: $d=0,7$; filtre 4: $d=1$; filtre 5: $d=2$.

-Mesurer les valeurs de j_{CC} et V_{CO} pour le filtre (grille) de densité inconnue.

-Vérifier en traçant les courbes correspondantes que j_{CC} varie linéairement avec T et V_{CO} avec d . Expliquer.

-Déterminer à partir de vos courbes la densité du filtre inconnu.

II-7 Etude de la réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque



-Réaliser le montage de la figure II-5. Former par L1 l'image du filament de la lampe sur la fente d'entrée du monochromateur. Le faisceau de lumière issue de L1 éclaire toute la fente d'entrée du monochromateur avec une ouverture égale à celle du monochromateur, de façon à éclairer tout le réseau. Les distances filament-L1 et L1-fente d'entrée seront sensiblement égales à $2f_1$.

-Placer la cellule A derrière la fente de sortie du monochromateur à une distance courte suffisante pour examiner à l'aide d'une feuille de papier la couleur utilisée.

-En faisant varier les longueurs d'onde de sortie(de 200 à 880 nm), mesurer la valeur du courant délivré par la cellule. Noter les valeurs précises des minima et des maxima.

Remarque. Faire varier la longueur d'onde très lentement dans la gamme comprise entre 600 et 878 nm.

-Tracer la courbe $R(\lambda) = j/j_{\max} = f(\lambda)$ où j_{\max} est la valeur maximale de courant mesurée. Commenter.

NB: Pour des longueurs d'onde supérieures à 800 nm (infra-rouge) on ne verra évidemment rien à la sortie du monochromateur. Ne pas s'en étonner!

