

Margaux Roux
Gabrielle Laloy-Borgna
Lilian Guillemeney

CAPES

Réussir le CAPES de physique-chimie

Rappels de cours, méthodes
et annales corrigées

2^e édition

- Fiches de cours de Physique
- Fiches de cours de Chimie
- Annales corrigées des épreuves disciplinaires 2017 à 2024



◆ SUJET 2017 ◆

LES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES ET LEUR INSTALLATION

Ce sujet propose, à travers cinq parties largement indépendantes, d'étudier les panneaux photovoltaïques puis leur installation.

Partie A : Propriétés électriques des semi-conducteurs

Partie B : Modification des caractéristiques électriques des semi-conducteurs

Partie C : De la fonction PN à l'effet photovoltaïque

Partie D : Des panneaux photovoltaïques au réseau électrique

Partie E : Optimisation du positionnement des panneaux solaires

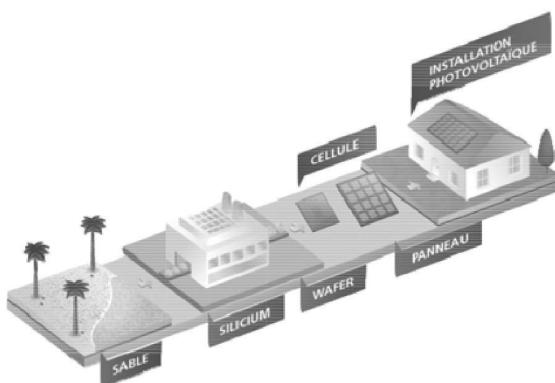


FIGURE 1 – Du soleil au réseau <http://www.edfenr.com/>

PARTIE A - PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DES SEMI-CONDUCTEURS

Dans un semi-conducteur pur, à très basse température (0 K), on tend vers la structure idéale où tous les électrons de valence sont engagés dans des liaisons covalentes. À une température T, l'agitation thermique rompt quelques liaisons covalentes. Un électron, de charge $-e$, faisant habituellement partie d'une liaison covalente est délogé et devient alors libre laissant une liaison covalente incomplète appelée trou auquel on associe une charge $+e$. Les trous comme les électrons contribuent à la conduction électrique.

On note n la concentration en électrons et p la concentration en trous.

Pour un semi-conducteur pur, appelé aussi semi-conducteur intrinsèque, les concentrations en trous et électrons sont égales, soit $n = p = n_i$, où n_i est appelée concentration intrinsèque.

Q1 À l'aide de l'annexe 6, représenter sur un diagramme énergétique les niveaux d'énergie que peuvent occuper les électrons dans un conducteur, dans un semi-conducteur, puis dans un isolant.

Q2) Pour le silicium, à 300 K, comparer la concentration intrinsèque donnée en annexe 6, au nombre d'atomes de silicium par unité de volume et commenter.

Sous l'action d'un champ électrique \vec{E} , les électrons et les trous se mettent en mouvement. La vitesse d'ensemble d'un type de porteurs est liée au champ électrique par la relation $\vec{v}_i = \mu_i \vec{E}$, où μ_i est la mobilité du porteur. L'indice i fait référence à un type de porteur particulier.

Q3) Qu'appelle-t-on vitesse d'ensemble d'un type de porteur ? Quelle est l'unité de μ_i dans le système international ?

On notera μ_n et μ_p les mobilités respectives des électrons libres et des trous dont les valeurs sont données en annexe 2. Donner une interprétation qualitative de la différence d'ordre de grandeur entre ces deux valeurs.

On associe au mouvement d'ensemble de charges le vecteur densité de courant électrique \vec{j} .

Q4) Donner l'expression de \vec{j} en fonction de n_i , e , \vec{v}_n et \vec{v}_p , puis en fonction de n_i , e , μ_n , μ_p et \vec{E} . Donner la dimension de \vec{j} et son unité.

Q5) Après avoir énoncé la loi d'Ohm locale, exprimer la conductivité électrique σ du semi-conducteur pur en fonction de n_i , e , μ_n et μ_p . Quelle est l'unité de σ dans le système international ? Donner la valeur numérique de σ pour le silicium à 300 K.

Q6) Expliquer qualitativement comment varie la concentration intrinsèque n_i , puis la conductivité électrique dans un semi-conducteur avec la température.

Q7) À partir de la loi d'Ohm locale, établir la loi d'Ohm intégrale pour un barreau cylindrique de section droite S et de longueur ℓ parcouru par un courant axial permanent réparti uniformément. En déduire l'expression de sa résistance R en fonction de σ , ℓ et S .

Calculer R pour un barreau de silicium de longueur $\ell = 1$ cm et de rayon $r = 1$ mm, à 300 K.

Q8) Dans le cas d'un métal, comment varie la résistance R avec la température ? Justifier qualitativement en limitant la réponse à quelques lignes. Calculer R pour un barreau de cuivre de mêmes dimensions que le barreau décrit à la question 7.

Q9) Lors de l'étude d'une thermistance réalisée avec des poudres semi-conductrices agglomérées, un professeur d'une classe de terminale S a fait mesurer à ses élèves la résistance du dipôle à différentes températures lors d'une activité expérimentale en enseignement de spécialité (extrait du programme en annexe 8). À trois températures différentes, les valeurs suivantes de la tension aux bornes du dipôle et de l'intensité du courant qui le traverse en convention récepteur ont été collectées par les différents groupes.

À T=278 K

Binôme	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U(V)	5,65	4,37	5,72	6,54	5,21	5,90	6,13	5,45	5,76
I(mA)	1,01	0,82	1,09	1,25	1,01	1,17	1,12	1,14	1,05

À T=288 K

Binôme	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U(V)	4,52	6,76	5,14	4,78	7,45	5,23	4,98	5,64	5,53
I(mA)	1,40	2,32	1,61	1,57	2,36	1,67	1,64	1,72	1,73

À T=313 K

Binôme	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U(V)	4,78	5,43	5,76	4,89	5,61	5,37	4,80	5,57	5,49
I(mA)	4,47	5,12	5,36	4,61	5,16	4,87	4,56	5,15	5,13

À partir de l'ensemble des mesures effectuées par les neuf binômes, et en explicitant la démarche suivie, déterminer, pour la température T = 278 K, la valeur moyenne de la résistance ainsi qu'une estimation de l'incertitude sur cette valeur.

Proposer une exploitation pédagogique de l'ensemble des données collectées par les élèves.

PARTIE B - MODIFICATION DES CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES DES SEMI-CONDUCTEURS

I) DIFFUSION D'IMPURETÉS

Pour augmenter le nombre de porteurs mobiles dans le silicium et modifier ainsi ses propriétés électriques, on introduit dans le cristal, de façon très précise, des atomes différents du silicium qu'on qualifie d'impuretés. On dit alors que l'on effectue un dopage et que le semi-conducteur est dopé. Le dopage s'effectue par un phénomène de diffusion qui a lieu à température élevée. Lorsque le système est ramené à température ambiante, les impuretés sont alors figées.

On note $c(M,t)$ la concentration en impuretés en un point M à un instant t.

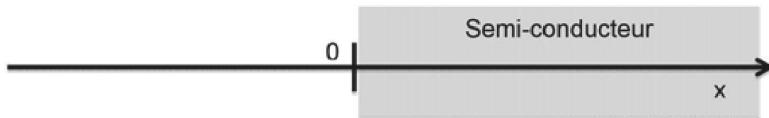
L'inhomogénéité en concentration entraîne un mouvement des impuretés caractérisé par un vecteur densité de courant de particules $\vec{j}_d(M,t)$.

Q10) En 1855, A. Fick a proposé une loi phénoménologique de diffusion qui porte son nom et fait apparaître un coefficient de diffusion D de l'impureté dans le semi-conducteur. Son expression mathématique est :

$$\vec{j}_d(M,t) = -D \overrightarrow{\text{grad}}(c(M,t)).$$

Interpréter cette loi en précisant les unités de chaque grandeur.

Le semi-conducteur intrinsèque est assimilé à un milieu homogène et on suppose la diffusion unidirectionnelle.



On note $c(x,t)$ la concentration en impuretés.

Q11) Dans un volume élémentaire de section S et d'épaisseur dx , situé entre les abscisses x et $x+dx$, effectuer un bilan de matière portant sur les impuretés afin d'établir une relation entre $\vec{j}_d(x, t)$ et $c(x, t)$. Ce bilan traduit la conservation du nombre d'impuretés.

Q12) En déduire l'équation de diffusion sous la forme :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}.$$

À l'instant initial ($t=0$), la concentration en impuretés est nulle en tout point du semi-conducteur. On note N_0 le nombre d'impuretés par unité de surface introduites à partir de l'instant initial en $x=0$ à la surface du semi-conducteur considéré comme semi-infini s'étendant de $x=0$ à $x = +\infty$.

Q13) On cherche, pour $t>0$, une solution de l'équation de diffusion sous la forme :

$$c(x, t) = A(t) e^{\left(-\frac{x^2}{B(t)}\right)}.$$

Déterminer les expressions de $A(t)$ et $B(t)$ en détaillant les calculs.

Q14) On admettra pour la suite l'expression ci-dessous :

$$c(x, t) = \frac{N_0}{\sqrt{\pi D t}} e^{\left(-\frac{x^2}{4 D t}\right)}.$$

Tracer l'allure de la concentration c en fonction de x à deux instants, t_1 et $t_2 > t_1$.

Q15) À une date t_0 fixée, à quelle profondeur δ la concentration est-elle moitié de celle en $x=0$? Exprimer δ en fonction de D et t_0 . Le coefficient de diffusion du phosphore dans le silicium à 1000°C vaut $D = 3.10^{-14} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Calculer δ au bout d'une heure.

II) DOPAGE N ET P DU SILICIUM

Si les impuretés augmentent la concentration en électrons libres dans le semi-conducteur, on dit que les impuretés sont de type N et que le semi-conducteur est de type N. L'atome d'impureté se substitue à un atome de silicium dans le réseau

cristallin en apportant un électron de plus que l'atome qu'il remplace. On note c_- la nouvelle concentration en électrons libres et on néglige la concentration en trous.

Si les impuretés augmentent la concentration en trous dans le semi-conducteur, on dit que les impuretés sont de type P et que le semi-conducteur est de type P. L'atome d'impureté apporte ici un électron de moins que l'atome qu'il remplace dans le réseau cristallin. On note c_+ la nouvelle concentration en trous et on néglige la concentration en électrons libres.

Q16) À l'aide de la classification périodique donnée en annexe 5, lorsque le semi-conducteur pur est le silicium, déterminer la nature des impuretés utilisées pour réaliser un dopage de type N et un dopage de type P. Donner un exemple pour chaque type de dopage.

Q17) Exprimer les conductivités électriques σ' (resp. σ'') du semi-conducteur dopé N (resp. P) en fonction de c_- (resp. c_+), e et μ_n (resp. μ_p). Calculer les valeurs numériques de σ' et σ'' pour $c_- = c_+ = 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ et commenter.

PARTIE C - DE LA JONCTION PN À L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE

I) LA JONCTION PN À L'ÉQUILIBRE

On crée une jonction PN en dopant différemment deux parties d'un matériau semi-conducteur, un dopage de type P pour une partie, un dopage de type N pour l'autre.

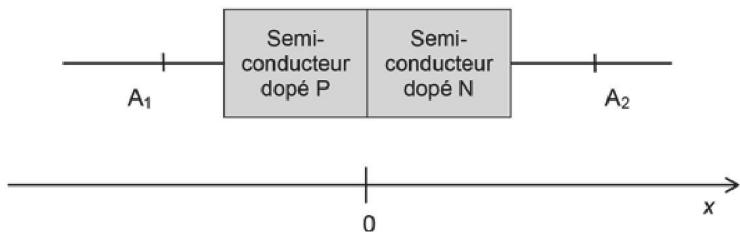


FIGURE 2 – Schéma représentant la jonction PN

Les électrons de la partie du semi-conducteur dopée N diffusent dans la partie du semi-conducteur dopée P où la concentration en électrons libres est plus faible. De même, les trous de la partie du semi-conducteur dopée P diffusent dans la partie du semi-conducteur dopée N car la concentration en trous y est plus faible. Lorsque la jonction n'est plus traversée par aucun courant, il s'établit alors un état d'équilibre.

Q18) Une fois l'équilibre atteint :

- la région $[x_1, 0]$ avec $x_1 < 0$ est chargée avec une densité volumique algébrique de charge uniforme ρ_1 ;

- la région $[0, x_2]$, avec $x_2 > 0$ est chargée avec une densité volumique de charge algébrique uniforme ρ_2 ;
- en dehors de la zone $[x_1, x_2]$ appelée zone de déplétion, la densité de charge volumique est nulle (figure 3).

Justifier que dans la zone de déplétion, à l'équilibre, les signes des densités volumiques de charges sont respectivement $\rho_1 < 0$ et $\rho_2 > 0$. Les charges qui la constituent sont-elles fixes ou mobiles ?

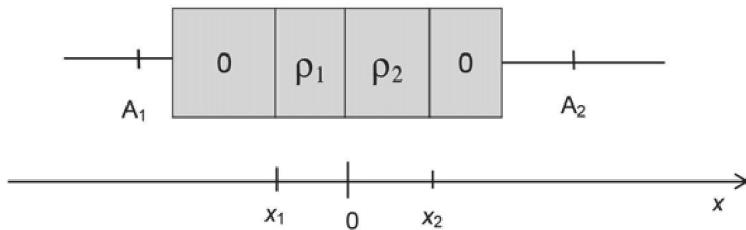


FIGURE 3 – Schéma représentant l'état d'équilibre

Q19) Établir, en exprimant la neutralité de la zone de déplétion, une relation entre ρ_1 , ρ_2 , x_1 et x_2 .

Q20) La présence d'une distribution volumique de charges dans la zone de déplétion se traduit par l'existence d'un champ électrique. Dans le silicium, les lois de l'électrostatique s'appliquent en remplaçant ϵ_0 par $\epsilon_0 \times \epsilon_r$ où ϵ_r est la permittivité relative du silicium.

De plus, la largeur de la zone de déplétion est très faible devant les dimensions du semi-conducteur. On négligera donc les effets de bord dans les directions orthogonales à l'axe Ox.

Justifier que le champ électrique puisse s'écrire $\vec{E} = E(x) \vec{e}_x$ dans la jonction.

On admet que le champ électrique est nul dans la zone $x < x_1$.

Q21) Exprimer le champ électrique en tout point puis tracer l'allure de $E(x)$ en fonction de x . Justifier alors l'existence d'un équilibre de la jonction.

Q22) Rappeler la relation entre le potentiel V et le champ électrique en régime stationnaire. Exprimer le potentiel électrique, puis tracer son allure en fonction de x . On choisira $V(x = 0) = 0$.

Q23) Exprimer la différence de potentiel $U_d = V_{A_2} - V_{A_1}$ entre les bornes A_1 et A_2 puis la calculer pour $\rho_1 = -1,0.10^2 \text{ C.m}^{-3}$, $\rho_2 = 3,0.10^4 \text{ C.m}^{-3}$, $x_1 = -1,1 \mu\text{m}$.

Q24) La diode à jonction, dipôle passif d'usage très courant en électronique est constituée d'une jonction PN. Représenter le symbole normalisé d'une diode, faire le lien entre ce schéma et les zones P et N de la jonction. Tracer l'allure de la caractéristique courant-tension d'une diode à jonction, en précisant les conventions d'orientation choisies sur le symbole normalisé.

II) L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE

Découvert par Antoine Becquerel en 1839, l'effet photovoltaïque permet « la transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique ».

Lorsqu'un photon suffisamment énergétique frappe la jonction PN au niveau de la zone de déplétion, il fait passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction, et crée ainsi une paire électron-libre-trou libre. Sous l'action du champ électrique dans la zone de déplétion étudié dans la partie C-I, l'électron et le trou vont se déplacer dans le semi-conducteur. Les cellules photovoltaïques fonctionnent sur ce principe.

Q25) Exprimer l'énergie d'un photon en précisant le nom et l'unité de chaque terme. Après avoir rappelé l'intervalle des longueurs d'onde dans le vide correspondant à la lumière visible, exprimer les énergies minimale et maximale des photons pour la lumière visible. On donnera les résultats numériques dans une unité adaptée à la situation.

Q26) Comparer l'énergie de gap du silicium aux valeurs des énergies des photons de la lumière visible. Quelle en est la conséquence lorsqu'une jonction est éclairée par de la lumière visible ?

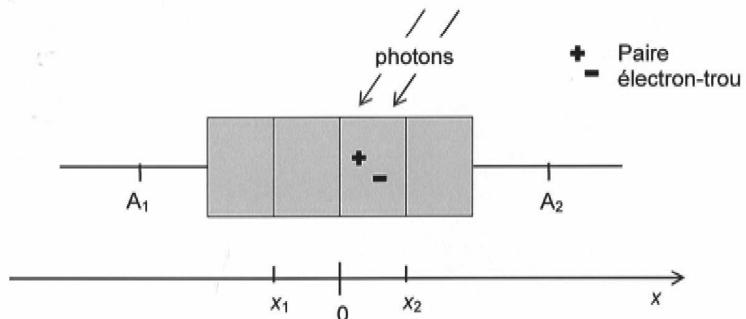


FIGURE 4 – Schéma représentant l'effet d'un photon

Q27) Sur le schéma 1 du document en annexe 9 à rendre avec la copie, représenter le champ électrique en différents points de la zone de déplétion, ainsi que les forces électriques subies par un électron ou un trou qui serait situé dans la zone de déplétion.

Q28) Lorsqu'on place une résistance aux bornes de la jonction PN, comme indiqué sur le schéma 2 de l'annexe 9, on constate que celle-ci est traversée par un courant électrique. Expliquer l'origine de ce courant. Indiquer très précisément son sens sur le schéma 2 du document en annexe 9 à rendre avec la copie.

III) LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

Sur la figure 5 sont tracées les caractéristiques tension-intensité d'une cellule photovoltaïque obtenues pour diverses valeurs de puissance surfacique lumineuse reçue. La température de la cellule est maintenue à 25°C.

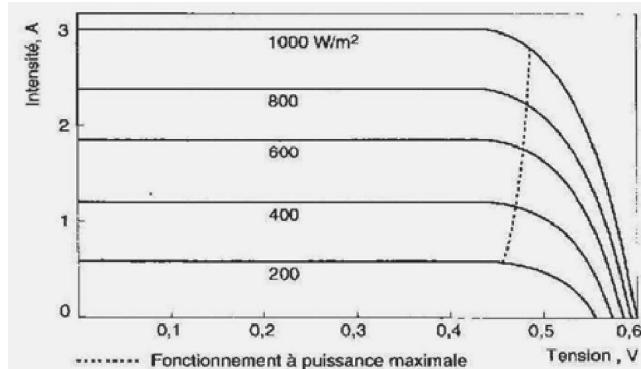


FIGURE 5 – Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

Q29) Pour les caractéristiques de la figure 5, préciser sur le symbole normalisé de la cellule (diode à jonction) les conventions d'orientation de l'intensité et de la tension.

Q30) Pour une puissance surfacique reçue du soleil de 1000 W.m^{-2} , déterminer à partir de la figure 5 :

- la tension à vide U_0 , tension aux bornes de la cellule en circuit ouvert ;
- l'intensité I_{cc} du courant électrique qui traverse la cellule lorsqu'elle est en court-circuit.

Q31) Recevant une puissance surfacique de 1000 W.m^{-2} , la cellule alimente une résistance de valeur R . Déterminer R pour que la puissance électrique fournie à la résistance soit maximale.

Les cellules sont assemblées pour donner des panneaux photovoltaïques.



FIGURE 6 – Installation photovoltaïque dans une exploitation agricole (<http://www.photowatt.com>)