

1 Les cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques convertissent l'énergie lumineuse du Soleil en énergie électrique. Comment fonctionnent-elles ?

Document 1 – Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique d'épaisseur comprise entre 0,2 et 0,3 mm, et de 10 cm de côté environ. Elle est composée de cinq couches différentes : une couche antireflet, deux couches conductrices (cathode en forme de grille et anode compacte) et **deux couches de silicium dopé**.

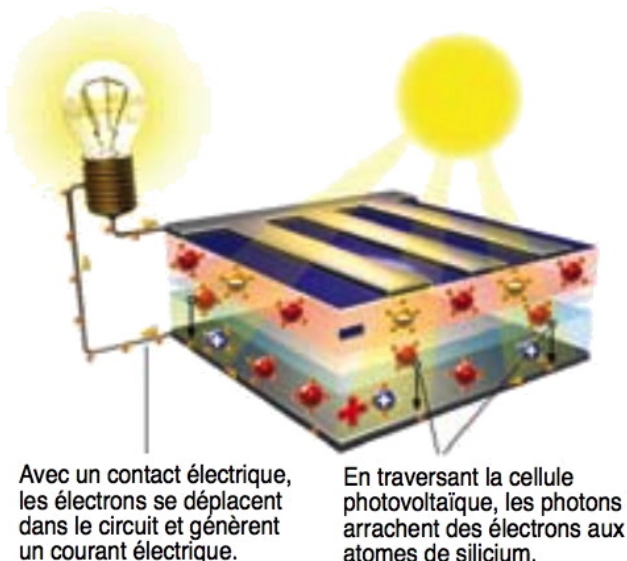
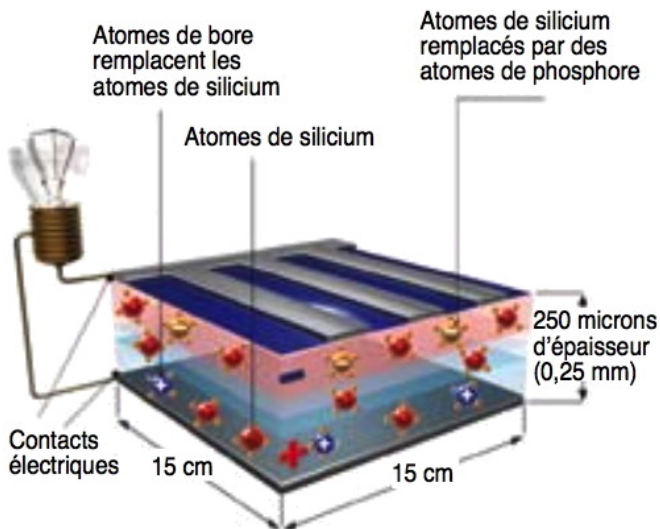


FIG. 1 – Principe du fonctionnement.

Un atome de silicium compte 4 électrons périphériques. La couche de silicium supérieure, dite couche n, exposée au Soleil, est dopée avec des atomes de phosphore possédant 5 électrons périphériques, soit un de plus que les atomes de silicium.

La couche de silicium inférieure, dite couche p, est dopée avec des atomes de bore ayant 3 électrons périphériques, soit un de moins que les atomes de silicium (présence d'un trou). La couche n est donc excédentaire en électrons et la couche p est déficitaire.

Lorsque les deux couches sont mises en contact, les électrons en excès de la couche n diffusent dans la couche p. Ainsi, la couche n se charge positivement, tandis que la couche p se charge négativement. Un équilibre se crée et un **champ électrique interne** apparaît. En revanche, une telle jonction pn ne permet pas d'obtenir du courant : lampe éteinte.

Document 2 – Le rôle du Soleil

Les **photons** du Soleil qui pénètrent dans la cellule photovoltaïque peuvent **arracher des électrons** aux atomes de silicium présents dans les couches n et p.

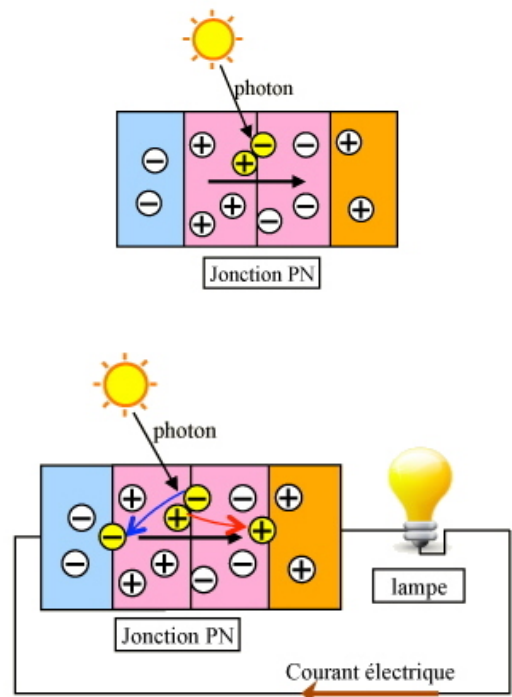


FIG. 2 – Principe de fonctionnement.

Le champ électrique interne à la cellule entraîne les électrons libérés vers la cathode \ominus , où ils empruntent un circuit extérieur, générant ainsi un courant électrique qui alimente, par exemple, une ampoule électrique. Les électrons rejoignent ensuite l'anode \oplus , où ils se recombinaient avec des trous.

Plus le nombre de photons absorbés est important, plus le nombre d'électrons libérés, et donc le courant généré, est important. Les cellules sont regroupées en modules formant des panneaux solaires. Aujourd'hui, les rendements énergétiques moyens des panneaux solaires sont de l'ordre de 15%.

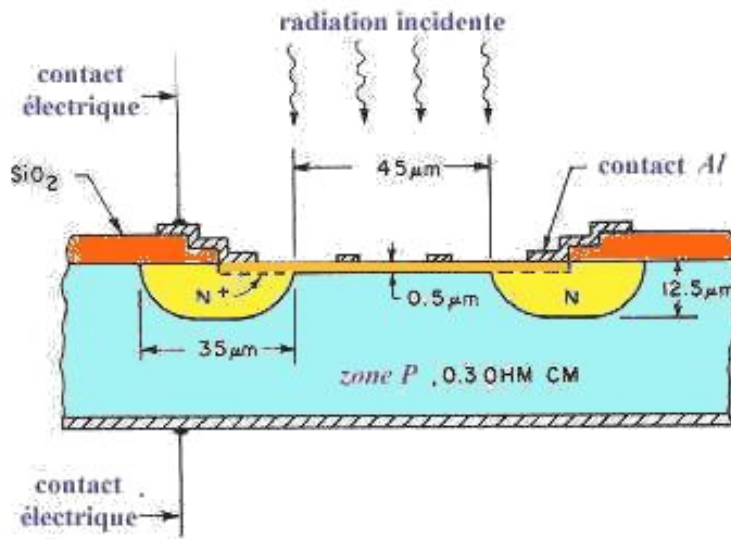


FIG. 3 – Schéma à l'échelle d'une cellule photovoltaïque.

a. Pourquoi la cathode est-elle une grille et non une plaque comme l'anode ?

b. Soit $h \cdot \nu$ l'énergie transportée par un photon et \mathcal{E}_g le *gap* de la bande interdite du silicium. Quelle inégalité doit exister entre \mathcal{E}_g et $h \cdot \nu$ pour qu'un photon arrache un électron à un atome de silicium ?

c. Quel est le rôle du champ électrique interne dans la cellule photovoltaïque ?

d. De quel(s) paramètre(s) peut dépendre l'intensité du courant électrique débité par la cellule photovoltaïque ?

e. La tension aux bornes d'une cellule photovoltaïque dépend peu de l'éclairement : elle vaut 0,56 V. L'intensité du courant débité, pour une surface exposée perpendiculairement à la direction de lumière solaire, vaut environ $200 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$.

Calculer la puissance électrique, \mathcal{P}_E , fournie par la cellule photovoltaïque, en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$.

f. La puissance maximale du rayonnement solaire vaut $\mathcal{P}_S = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Calculer le rendement de la cellule et l'exprimer en pourcentage. Comparer la valeur trouvée à celle donnée dans le texte.

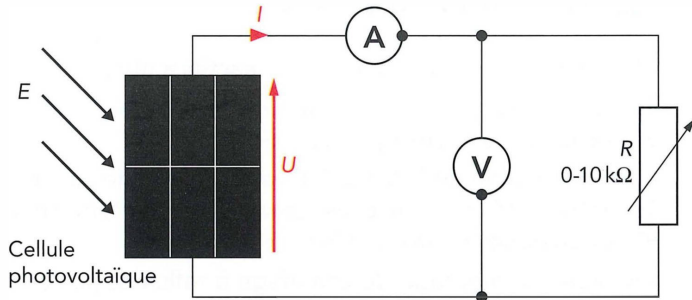
g. Commenter la valeur du rendement énergétique moyen des panneaux solaires.

2 Caractéristique et rendement d'une cellule photovoltaïque

Lorsqu'elle est éclairée par de la lumière, une cellule photovoltaïque **génère un courant électrique** et **une tension électrique apparaît entre ses bornes**.

Quelle est la caractéristique d'une cellule photovoltaïque ?
Comment fonctionne-t-elle ?

2.1 Caractéristique



- Réaliser le montage ci-contre. La résistance variable est constituée de trois boîtes à décade $\times 10 \Omega$, $\times 100 \Omega$ et $\times 1000 \Omega$ en série.
- On note E l'éclairement de la lampe, mesuré en lux par un luxmètre, ou en watt par mètre-carré ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) au pyranomètre. Orienter la lampe pour que l'éclairement soit maximal sans brûler la cellule ! Relever la valeur de E de l'éclairement au luxmètre et ne plus déplacer ni la lampe ni la cellule.

h. Sur votre compte-rendu : valeur de l'éclairement E , en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

- Mesurer la taille de la cellule photovoltaïque et en déduire sa surface S (attention, bien mesurer la taille de la surface réellement active de la cellule !).

i. Sur votre compte-rendu : surface S calculée, convertie en m^2 .

- Compléter le tableau de mesures proposé, en faisant varier la résistance R des boîtes à décade.

Notez bien que :

- La valeur maximale I_{cc} est obtenue pour le court-circuit, c'est-à-dire $R = 0 \Omega$.

Le courant maximal peut atteindre 300 mA pour certaines cellules, il faut adapter le calibre de l'ampèremètre en conséquence avant toute mesure, sous peine de « griller » le fusible de l'ampèremètre !

- La valeur nulle $I = 0 \text{ mA}$ est obtenue en retirant la résistance R , la tension U_{co} de la cellule étant alors maximale.

La tension maximale peut atteindre 2 V pour certaines cellules, il faut adapter le calibre de l'ampèremètre en conséquence.

Conseil : procédez par valeur d'intensité décroissante, en augmentant progressivement la valeur de la résistance R de zéro jusqu'à 11 k Ω . À aucun moment, l'intensité dans la boîte à décade $\times 1000 \Omega$ ne doit dépasser son intensité maximale admissible de 25 mA (j'ai vérifié toutes les cellules, aucune ne « monte » aussi haut normalement !).

- Une fois le tableau complété, recopier sur votre compte-rendu les valeurs de l'intensité en court-circuit I_{cc} et de la tension à vide U_{co} .

j. Sur votre compte-rendu : valeurs de I_{cc} en mA et de U_{co} en V.

- Changer alors l'éclairement et relever une nouvelle tripléte de valeurs.

k. Sur votre compte-rendu : nouvelles valeurs de E , I_{cc} et U_{co} .

l. Sur papier millimétré, tracer la caractéristique courant-tension $I = f(U)$. Commenter.

R (Ω)											
I (mA)											
U (V)	0,0										
\mathcal{P} (mW)	0,0										

R (k Ω)											
I (mA)											
U (V)											
\mathcal{P} (mW)											

R (k Ω)											∞
I (mA)											0,0
U (V)											
\mathcal{P} (mW)											0,0

m. Une cellule photoélectrique est-elle un récepteur ou un générateur ? Justifier avec la caractéristique précédente.

n. Que constate-t-on quand on modifie l'éclairement ?

2.2 Rendement

o. Pour chaque couple de valeur, calculer la puissance électrique fournie par la cellule, en watt (W) :

$$\mathcal{P} = U \cdot I$$

Compléter ainsi la troisième ligne du tableau.

p. Tracer la caractéristique puissance-tension $\mathcal{P} = g(U)$.

q. Sur la courbe précédente, déterminer graphiquement la puissance maximale délivrée par la cellule, notée \mathcal{P}_m , en watt (W).

Le rendement η (lettre grecque « éta ») d'une cellule photovoltaïque est le quotient de la puissance électrique maximale \mathcal{P}_m générée par la cellule par la puissance lumineuse \mathcal{P}_{lum} reçue :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_m}{\mathcal{P}_{lum}}$$

La puissance lumineuse reçue s'exprime par $\mathcal{P}_{lum} = E \cdot S$ où E est l'éclairement, exprimé en $W \cdot m^{-2}$, et S la surface de la cellule, exprimée en m^2 .

On admet que, pour la lumière émise par la lampe, 100 lx correspond à $1 W \cdot m^{-2}$.

r. Exprimer le rendement η en fonction des données \mathcal{P}_m , E et S . Application numérique. Commenter.

3 La supraconductivité

À des températures très basses, certains métaux et alliages **conduisent l'électricité avec une résistance nulle**. Le courant peut parcourir ces supraconducteurs pendant des milliards d'années sans perdre la moindre énergie! Le couplage des électrons et leur mouvement commun, dépourvus des habituelles collisions qui sont la cause de la résistance électrique, font qu'ils approchent un état de mouvement perpétuel.

Document 1 : historique

Lorsque le mercure est refroidi à une température de quelques degrés au-dessus du zéro absolu, il **conduit l'électricité sans la moindre résistance**. C'est ce que découvrit en 1911 le physicien néerlandais Heike ONNES en plongeant du mercure dans de l'hélium liquide à 4,2 kelvins (soit 4,2 degrés au-dessus du zéro absolu).

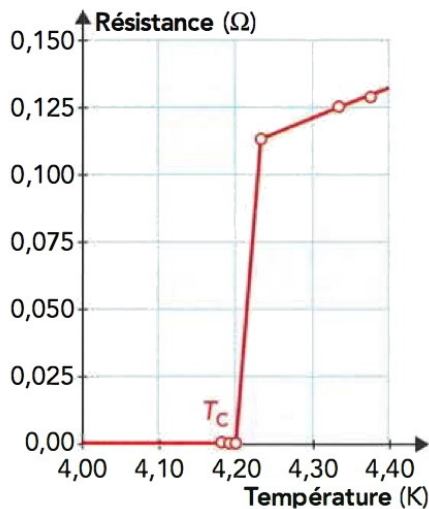


FIG. 4 – Variation de la résistance du mercure (Hg) à très basse température.

Exhibant une résistance nulle, ce morceau de mercure fut le premier matériau **supraconducteur** de l'histoire. Peu après, un comportement similaire fut observé dans d'autres métaux refroidis, dont le plomb et des composés comme le nitrure de niobium. Toute résistance disparaissait **en dessous d'une température critique** dont la valeur dépendait du matériau.

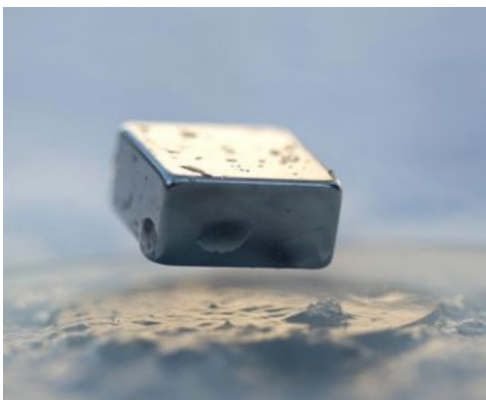


FIG. 5 – Lévitation d'un supraconducteur ou effet Meissner. Cet effet résulte de l'expulsion des champs magnétiques par un matériau supraconducteur.

Mouvement perpétuel Une des conséquences de la résistance nulle est qu'un **courant électrique peut parcourir un matériau supraconducteur pour toujours** ; dans les laboratoires, certains courants circulent depuis des années et les physiciens estiment que ces courants pourraient circuler pendant des milliards d'années sans perdre d'énergie. Nous sommes là au point le plus proche du mouvement perpétuel jamais atteint par les scientifiques.

Pensée de groupe Les physiciens se demandèrent comment une *transition* d'une telle importance pouvait se produire à basse température. L'existence de températures critiques suggérait une **transition de phase**, et les physiciens se penchèrent donc sur le comportement quantique des électrons dans un métal. La **mécanique quantique** donnait quelques pistes, et diverses idées furent avancées dans les années 1950. En 1957, les physiciens américains John BARDEEN, Leon COOPER et John SCHRIEFFER proposèrent une explication complète convaincante de la supraconductivité dans les métaux et les alliages simples, théorie appelée aujourd'hui BCS. L'idée était que la supraconductivité apparaissait du fait du comportement étrange qu'adoptent les électrons lorsqu'ils sont appariés.

Les paires d'électrons, appelés *paires de Cooper*, interagissent avec le réseau des atomes métalliques via des oscillations qui les lient. Un métal est un réseau de noyaux chargés positivement dans lequel une « mer » d'électrons flotte librement. Lorsque le métal est très froid, et le réseau immobile, le passage d'un électron chargé négativement exerce une légère force d'attraction sur les nœuds positifs du réseau et les décale, comme une ondelette. Un autre électron passant à proximité peut être attiré par cette région légèrement plus dense en charges positives et les deux électrons deviennent couplés. Le second suit le premier. Ceci se produit pour un grand nombre d'électrons dans le métal et de nombreuses paires d'électrons se lient et forment un motif d'onde en mouvement.

Un électron seul doit obéir au *principe d'exclusion de Pauli*, qui interdit à des particules d'occuper un même état quantique. Ainsi, lorsqu'un grand nombre d'électrons se trouvent en un même point, ils doivent avoir des énergies différentes — c'est ce qui se produit habituellement dans un atome ou dans un métal. Mais lorsque des électrons sont *appariés* et se comportent comme une seule particule, ils ne suivent plus cette règle. Les paires d'électrons peuvent avoir la même énergie, ce qui a pour

conséquence que l'ensemble des paires d'électrons possède une énergie globale légèrement inférieure à celle qu'auraient des *électrons libres* dans le même métal. Et c'est cette différence d'énergie qui induit la *transition de phase* que l'on observe à basse température dans les propriétés du métal.

Lorsque l'*énergie thermique* du réseau est inférieure à cette différence d'énergie, on observe un flux continu de paires d'électrons couplées aux vibrations du réseau, caractéristique de la supraconductivité. Les oscillations du réseau alimentant les mouvements sur de grandes distances, la résistance au passage du courant est nulle - toutes les paires d'électrons se déplacent les unes par rapport aux autres. **Évitant les collisions avec le réseau d'atomes**, les paires d'électrons se conduisent comme un superfluide **s'écoulant sans rencontrer d'obstacle**. À des températures plus élevées, les paires de Cooper se rompent et perdent leurs propriétés. Les électrons peuvent percuter les ions du réseau, qui sont maintenant plus chauds et qui vibrent individuellement, ce qui entraîne l'apparition d'une résistance électrique. La transition entre les deux états se produit lorsque les électrons passent d'un flux coordonné à des mouvements désordonnés, et vice versa.

Des supraconducteurs chauds La technologie des supraconducteurs décolla dans les années 1980. En 1986, des chercheurs suisses découvrirent un nouveau type de matériaux céramiques qui devenaient supraconducteurs à des températures relativement *chaudes* — les « supraconducteurs à haute température ». Leur premier alliage, constitué de lanthane, de baryum, de cuivre et d'oxygène (ce que l'on appelle les oxydes de cuivre ou cuprates), exhibait une transition de phase vers la supraconductivité à 30 kelvins (c'est encore très froid, mais toujours plus chaud que tout ce qui avait trouvé jusqu'alors!). Un an plus tard, d'autres chercheurs concevaient un matériau qui devenait supraconducteur à 90 kelvins, une **température supérieure à celle de l'azote liquide**, très utilisé dans les laboratoires comme liquide réfrigérant (donc facile à se procurer dans le cadre d'un laboratoire). Avec des céramiques à base de pérovskite et des cuprates mercureux (enrichi au thallium), on arrive aujourd'hui à fabriquer des matériaux supraconducteurs ayant des températures critiques de 140 kelvins ou même plus à haute pression.

Ces céramiques étaient censées être *isolantes* (dans le sens qu'elles ne sont pas censées conduire le courant électrique), ce fut donc totalement inattendu, et les physiciens sont toujours en quête d'une nouvelle théorie permettant d'expliquer la supraconductivité à haute température. Le développement de ces matériaux constitue aujourd'hui un domaine de la physique en évolution rapide, susceptible de révolutionner l'électronique et donc le fonctionnement des ordinateurs (entre autres appareils électroniques très utiles!).

Les applications Quelles sont les applications des supraconducteurs ?

Ils permettent de fabriquer des électroaimants très puissants, comme ceux que l'on utilise dans les scanners IRM des hôpitaux ou dans les accélérateurs de particules, comme celui du CERN (avec la découverte du boson de Brout-Englert-Higgs).

On pourra peut-être un jour les utiliser dans des transformateurs à haut rendement ou des trains à lévitation magnétique.

Mais à cause des basses températures encore requises aujourd'hui pour leur fonctionnement, leurs applications demeurent limitées. D'où la quête de supraconducteurs à haute température, qui auraient, eux, des applications spectaculaires.

Document 2 : les superfluides

Les **superfluides** sont des **fluides de viscosité nulle**, qui peuvent de ce fait s'écouler dans un tube éternellement sans frottement. La superfluidité est connue depuis les années 1930. Un exemple est l'hélium-4 super-refroidi (masse atomique 4, fait de deux protons, deux neutrons et deux électrons). Les atomes d'hélium-4 sont des bosons, constitués de paires de fermions, l'état de la matière ainsi formé est un condensat de Bose-Einstein.



FIG. 6 – Fontaine d'hélium superfluide.

Les superfluides se comportent de manière très étrange lorsqu'on les place dans un contenant ; ils peuvent monter le long des parois du contenant, en une couche de l'épaisseur d'un atome ! On peut créer une fontaine en insérant un tube capillaire chauffé, car le superfluide ne peut soutenir un gradient de température (sa conductivité thermique est infinie) et la chaleur entraîne immédiatement un changement de pression. Si l'on fait tourner sur lui-même un seau contenant un superfluide, quelque chose d'étrange se produit : dénué de viscosité, le fluide ne se met d'abord pas en rotation, mais, si l'on tourne plus vite, au-delà d'un certain point critique, le superfluide commence soudain à tourner, à des vitesses bien définies — car sa vitesse de rotation est quantifiée.

Document 3 : les condensats de Bose-Einstein

À des températures très basses, des groupes de bosons peuvent se comporter de manière très étrange. Près du zéro absolu, de nombreux bosons peuvent occuper le même état quantique, rendant le comportement quantique visible à des échelles bien plus grandes. D'abord prédits par Albert EINSTEIN en 1925, se basant sur les idées du physicien indien Satyendranath BOSE, les condensats de Bose-Einstein ne furent pas observés avant 1995. Eric CORNELL et Carl WIEMAN de l'université du Colorado et, un peu plus tard, Wolfgang KETTERLE du MIT, observèrent ce comportement dans un gaz d'atomes de rubidium refroidis à 170 milliardièmes de kelvin. Dans un condensat, tous les atomes ont la même vitesse, brouillée uniquement par le principe d'incertitude de Heisenberg. Les condensats se comportent comme des superfluides. Les bosons peuvent partager des états quantiques identiques. EINSTEIN imagina que le fait de refroidir des bosons en dessous d'une température critique très basse les ferait tomber (se condenser) dans l'état quantique de plus basse énergie, ce qui produirait un nouvel état de la matière. Les condensats sont fragiles, et il est encore trop tôt pour des applications pratiques, mais ils ont beaucoup à nous apprendre sur la mécanique quantique.

Un *lecteur attentif* (es-tu là ?) à la lecture de ces documents aura compris que les électrons libres dans un réseau conducteur sont des fermions, occupant chacun un état quantique, et que les paires de Cooper dont il est question dans l'explication (un peu sibylline il est vrai) de la supraconductivité sont des bosons dans le fameux état de condensation de Bose-Einstein, et qui se déplacent donc comme un superfluide dans le réseau conducteur. Plus de frottement, plus de résistance électrique ! Ainsi, supraconductivité et superfluidité sont deux applications d'une même théorie physique.

Questions

s. Comment justifier que la résistance des métaux augmente lorsque la température croît ?

t. Exprimer, en degré Celsius, la valeur de la température critique T_C du mercure.

u. Comment, au début du XX^e siècle, KAMERLINGH ONNES a-t-il pu atteindre une température aussi basse pour refroidir le mercure ?

v. Comment varie la résistance du mercure avec la température pour $T > T_C$ et pour $T < T_C$?

w. Aujourd'hui, les appareils de RMN et d'IRM (ainsi qu'un train japonais à grande vitesse) utilisent la supraconductivité. Expliquer pourquoi.

Correction

s. La résistance électrique d'un matériau est liée aux chocs que les électrons subissent lors de leurs déplacements dans les matériaux conducteurs. Lorsque la température croît, la vitesse des électrons augmente. Le nombre de chocs des électrons par unité de temps augmente, ce qui accroît la résistance électrique du matériau.

t. Sur le graphe, on lit $T_C = 4,20$ K, donc en degrés Celsius :

$$\theta_C = T_C - 273,15 = -268,95 \text{ }^\circ\text{C}$$

u. Au début du xxe siècle, H. Kamerlingh Onnes a pu atteindre une température de 0,9 K, soit $-272,15^\circ\text{C}$, en liquéfiant de l'hélium, en juillet 1908.

v. Pour $T > T_C$, la résistance du mercure augmente avec la température. Pour $T < T_C$, la résistance du mercure est nulle, il est alors supraconducteur.

w. Les appareils de RMN et d'IRM ont besoin de très forts champs magnétiques pour fonctionner. En faisant circuler un courant intense dans une bobine supraconductrice, on peut générer de tels champs magnétiques. Le train japonais utilise l'effet Meissner afin de léviter au-dessus d'un rail de circulation et ainsi se déplacer à grande vitesse sans frottement sur le rail.