

**Mots-clés** : conducteur et semi-conducteur

## I – Conducteur, semi-conducteur et supraconductivité

### Document 1 Un conducteur

En électricité, un conducteur est un matériau qui contient des porteurs de charge électrique pouvant se déplacer facilement. Lorsqu'on lui applique une tension électrique  $U$ , le mouvement des porteurs de charges devient globalement ordonné, ce qui aboutit à la formation d'un courant électrique. Par extension, un conducteur est un composant électrique ou électronique de faible résistance, servant à véhiculer le courant d'un point à un autre.

### Document 2 Caractéristiques d'un semi-conducteur

Les semi-conducteurs sont des matériaux qui possèdent les caractéristiques électriques d'un isolant électrique (matière ne permettant pas le passage du courant), mais chez lesquels la possibilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, bien que faible, reste suffisamment importante pour se produire, ce qui lui donne une fonction intermédiaire entre celle des métaux (bons conducteurs électriques) et celle des isolants.

Parmi les semi-conducteurs les plus utilisés se trouve le silicium disposant de nombreux avantages : en grande quantité sur Terre et possédant de bonnes propriétés.

La théorie des bandes explique leur fonctionnement si particulier. En effet, celle-ci stipule qu'un électron ne peut prendre que des valeurs d'énergies uniquement comprises dans des « bandes » d'énergie (intervalles d'énergie dans un solide).

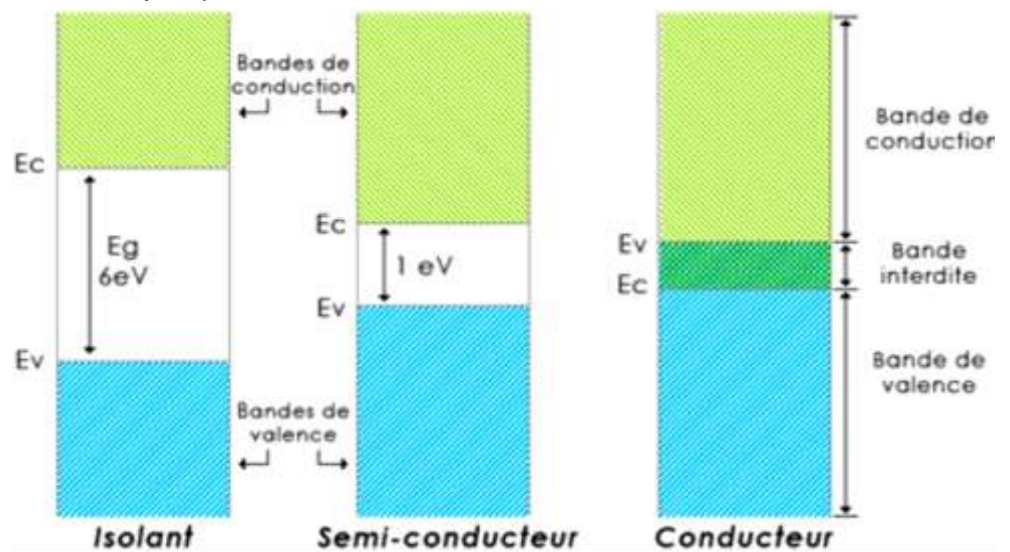
Certaines bandes sont « permises » et d'autres « interdites ». Il existe deux types de bandes permises :

- la « bande de valence » qui implique les électrons engagés dans les liaisons covalentes ;
- la « bande de conduction » qui implique les électrons dans un état excité pouvant se déplacer dans un solide.

Dans les métaux conducteurs, la bande de conduction se superpose à celle de valence. Ainsi, les électrons se déplacent aisément d'une bande à l'autre.

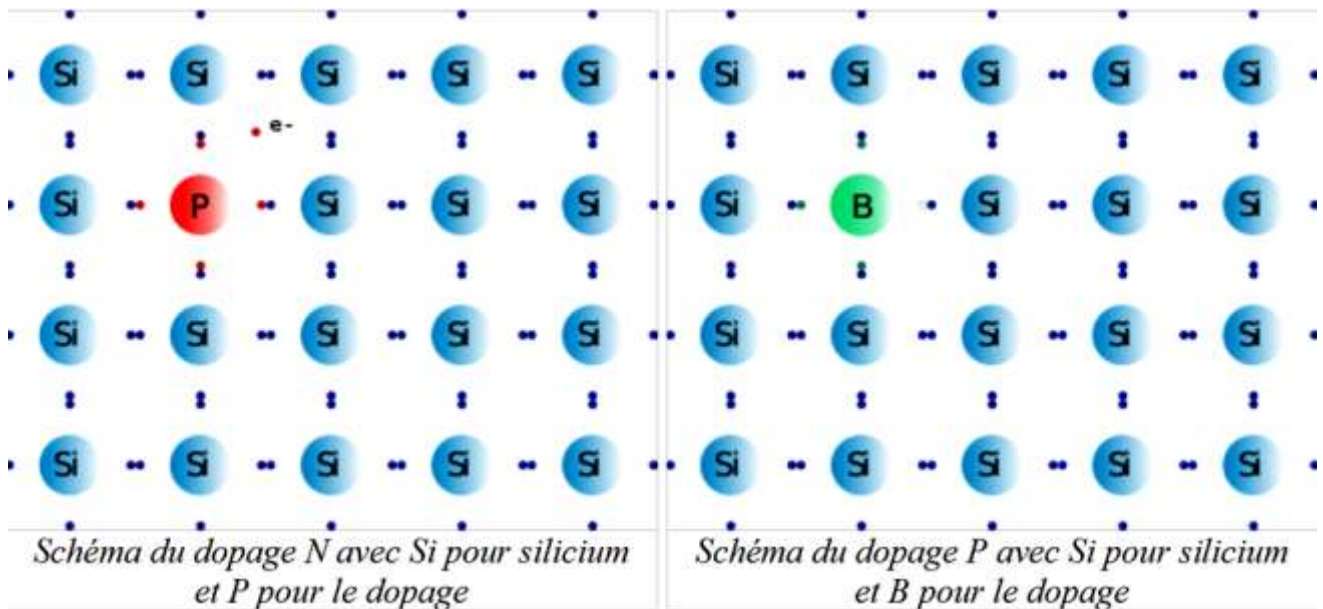
Dans le cas d'un isolant, une bande interdite sépare les deux bandes qui l'entourent par une énergie très élevée et le transfert des électrons devient impossible.

Enfin, dans un semi-conducteur, l'énergie de la bande interdite est suffisamment faible pour permettre ainsi un passage des électrons d'une bande à l'autre si l'énergie qui sépare les deux bandes leur est apportée.



### Document 3 Dopage d'un semi-conducteur

Prenons l'exemple d'un réseau monocristallin de silicium ( $Z = 14$ ). Il appartient à la même colonne que le carbone, possède donc quatre électrons sur sa couche externe et suit la règle de l'octet pour obtenir huit électrons périphériques en se liant avec, par exemple, quatre autres atomes. Ces électrons sont tous engagés dans des liaisons et donc ne paraissent pas libres de se déplacer. Cependant, une augmentation de la température s'accompagne de l'augmentation du nombre d'électrons capables de conduire le courant.



La conductivité électrique (capacité d'un matériau à transférer des charges électriques) du silicium doit donc être dopée pour éviter l'importance du paramètre température. Ainsi, on ajoute des impuretés, c'est-à-dire les atomes d'un autre matériau. Ceux-ci vont se mélanger aux atomes déjà présents et introduire plus d'électrons et de trous, d'où l'existence de deux types de dopages :

- le type N ; il produit un excès d'électrons, entraînant une charge négative ;
- le type P ; il produit un déficit d'électrons (trous), entraînant une charge positive.

Dans le cas du silicium, on ajoute des atomes de phosphore ( $Z = 15$ ) pour le doper N. Sur le schéma ci-dessus, on observe que, sur les cinq électrons de sa couche externe, un reste libre d'où la présence d'électrons en excès. Pour le dopage P, ( $Z = 5$ ) des atomes de bore sont ajoutés et leurs trois électrons sur leur couche externe laissent un trou d'où un déficit d'électrons.

Sous l'action d'une tension, un déplacement d'électrons peut s'effectuer de la couche N vers la couche P.

#### Document 4 Diode et transistor

Une jonction PN constitue une diode.

L'association de deux jonctions PN est utilisée dans les transistors, créant ainsi deux types de transistors dits « bipolaires » puisqu'ils font cohabiter les deux dopages en créant deux jonctions et, ainsi, deux types de transistors : les NPN et les PNP.

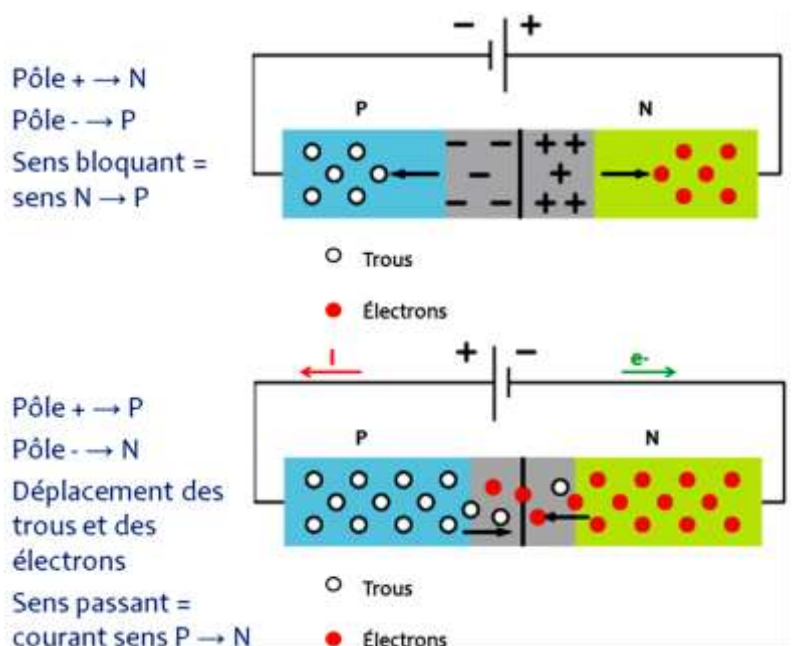
#### Document 5 Jonction PN d'une LED

Une diode est réalisée en amenant en contact un semi-conducteur de type P et un semi-conducteur de type N. Cette jonction aboutit à la formation d'une zone de déplétion (en gris ci-contre) qui se comporte comme un matériau isolant.

Le fonctionnement d'une diode peut se décrire en deux étapes :

**1<sup>ère</sup> étape :** conduction du courant électrique

La zone de déplétion oblige les électrons à posséder une énergie suffisante pour passer du matériau N (-) au matériau P (+) ; l'électron passe alors de la bande de valence à la bande de conduction (voir schéma ci-contre).



Cette énergie est fournie par le générateur électrique et se caractérise par l'existence d'une tension seuil aux bornes de la diode  $U_{\text{seuil}}$ . En dessous de  $U_{\text{seuil}}$  les électrons restent dans la bande de valence et la diode se comporte comme un isolant

**2<sup>ème</sup> étape** : émission de la lumière

Lorsqu'un électron traverse le matériau P, celui-ci possède une grande chance de se recombiner avec un trou : il passe alors de la bande de conduction à la bande de valence. Ce phénomène s'accompagne de la création d'un photon dont l'énergie est égale à  $U_{\text{seuil}} \times e$ .

### Document 6 La supraconductivité

À température ambiante, les atomes vibrent dans la matière autour d'une position d'équilibre. Plus la température est importante, plus la vibration augmente : on parle d'agitation thermique.

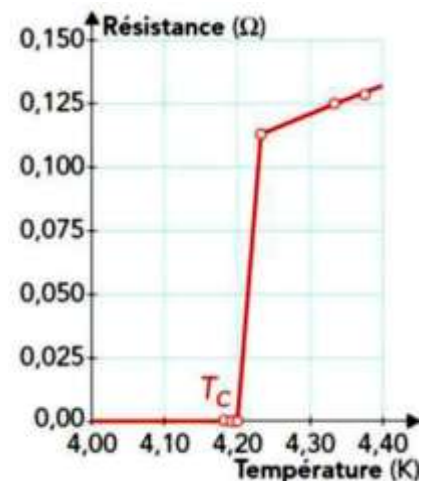
Dans un conducteur, quand les électrons se déplacent, ils subissent de nombreux chocs qui les ralentissent. Plus un matériau s'oppose au passage du courant, plus sa résistance électrique est grande et plus il s'échauffe, c'est l'effet Joule. Cette énergie thermique, si elle n'est pas utile comme dans un grille-pain, est une énergie perdue.

En 1908, Kamerlingh Onnes et son chef mécanicien Flim atteignirent une température supérieure d'un degré seulement au zéro absolu (limite infranchissable au-delà de laquelle tout se fige). Ils ouvraient ainsi la voie à un nouveau domaine de recherche, celui des très basses températures.

Le 8 avril 1911, il mesura donc la résistance électrique du mercure refroidi par de l'hélium liquide. Il venait de faire une des découvertes expérimentales les plus stupéfiantes du XX<sup>ème</sup> siècle : la résistance chutait très brutalement à zéro !

Kamerlingh Onnes venait de mettre en évidence la supraconductivité. Le même jour, il remarquait que l'hélium s'arrêtait de bouillir à deux degrés du zéro absolu, mais ne s'y attardait pas. Sans s'en rendre compte, il venait d'observer le premier la superfluidité de l'hélium !

Adapté d'après le site : <http://www.supraconductivite.fr/fr/index.php?p=recherche-decouvreur-onnes>



Cette absence de résistance électrique chez un supraconducteur présente un immense intérêt au regard des pertes nombreuses par effet Joule.

Les supraconducteurs sont déjà utilisés dans de nombreux domaines : électricité, médical, électronique ou même pour des trains (Japon). Ils sont aussi au cœur des laboratoires, dans les accélérateurs de particules, dans le domaine de l'astrophysique avec les bolomètres, dans des capteurs magnétiques ultrasensibles, les SQUID, ou pour produire des champs magnétiques très intenses.

Cependant, il faut les refroidir à de très basses températures, ce qui limite encore leur utilisation dans notre vie quotidienne.

La réalisation d'électro-aimants supraconducteurs constitue l'application la plus courante. Un aimant crée autour de lui un champ magnétique qui n'agit pas sur les matériaux non magnétiques comme une céramique. Cependant, à basse température, elle devient supraconductrice, repoussant dans le même temps l'aimant qui lévite au-dessus d'elle.



## II - Analyse de documents et synthèse

1. Expliquer la conductivité des métaux grâce à la théorie des bandes.
2. Différencier le comportement des semi-conducteurs et des isolants.
3. Pourquoi le silicium possède-t-il une conductivité quasi nulle ?
4. Sur quel paramètre physique est-il possible de jouer pour augmenter sans dopage la conductivité du silicium ?

5.1 Comment expliquer, d'un point de vue microscopique que, dans un métal, la résistance croît avec la température ?

5.2 Quelle conséquence négative possède cette résistance ?

6.1 Quel est l'intérêt de la supraconductivité ?

6.2 Comment expliquer d'un point de vue microscopique cette supraconductivité ?

6.3 Quelles sont encore ses limites ?

### III – Étude expérimentale d'une diode

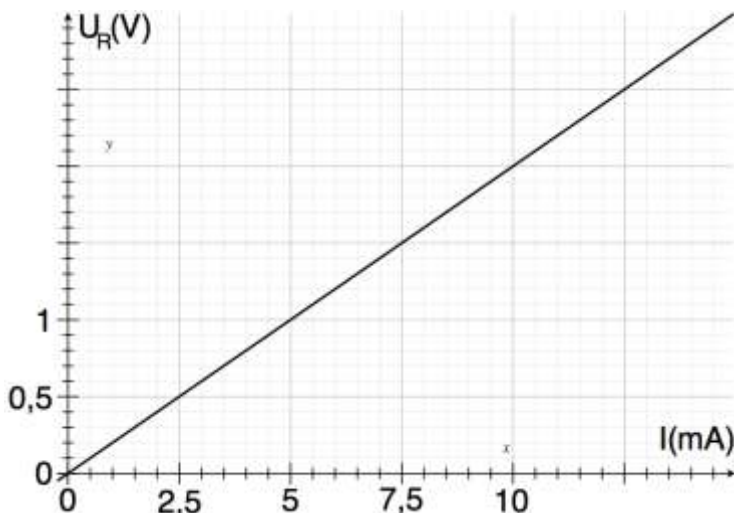
#### Document 1 Matériau semi-conducteur et isolant

En électricité, un conducteur est un matériau qui contient des porteurs de charge électrique pouvant se déplacer facilement.

Lorsqu'on lui applique une tension électrique  $U$ , le mouvement des porteurs de charges s'ordonne globalement et aboutit à la création d'un courant électrique, inversement proportionnel à la résistance du conducteur

Par extension, un conducteur est un composant électrique ou électronique de faible résistance, servant au transport d'un courant d'un point d'un circuit vers un autre.

Dans le cas d'un matériau isolant, l'absence de charge mobile entraîne la non conduction du courant électrique. Sa résistance est donc très grande.



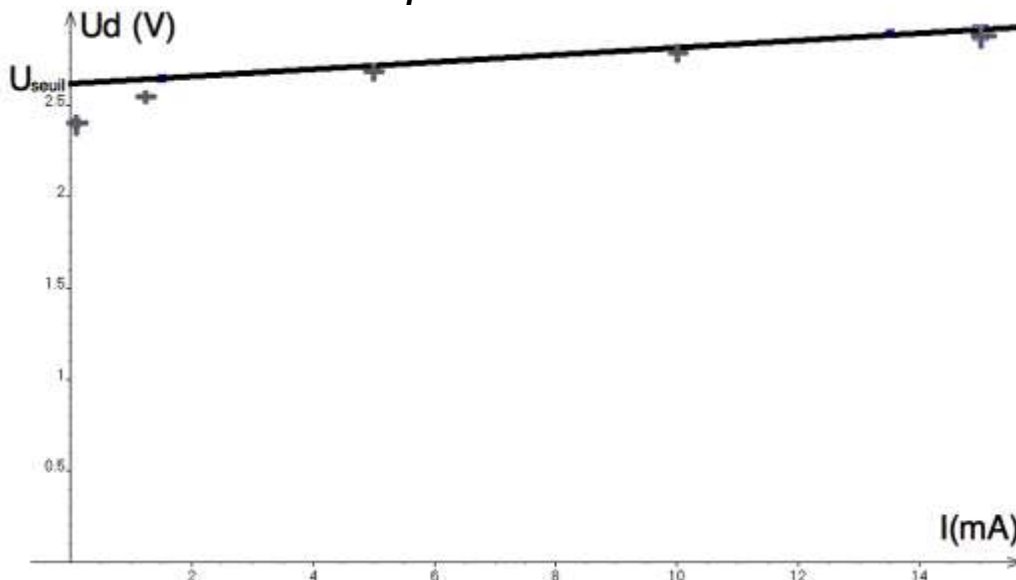
#### Document 2 Caractéristiques de diodes utilisées

Référence	ML50B23H	LTL2R3TGK	LTL2H3VFKNT	LTL2P3SEK
Couleur	bleue	jaune	orange	rouge
Longueur d'onde émise $\lambda$ (nm)	470	570	590	700
$U_{\text{seuil}}$ (V)				

#### Document 3 Données

- La constante de Planck permet de relier l'énergie d'un photon à sa fréquence  $f$  ou à sa longueur d'onde  $\lambda$  :  $E = hc / \lambda$  avec  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- L'énergie électrique d'un électron passant de la zone n à la zone p possède une valeur minimale d'énergie ou énergie de seuil qui vaut  $e \times U_{\text{seuil}}$  avec  $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

#### Document 4 Caractéristique d'une LED



## Manipulation et exploitation

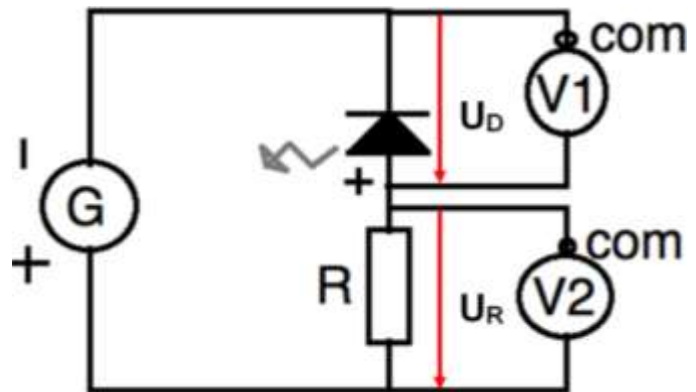
### Matériel à disposition

- quatre DEL (bleue, jaune, orange et verte)
- deux multimètres utilisés comme des voltmètres
- un conducteur ohmique de résistance  $200 \Omega$

- un générateur de tension variable (0 à 5 V)
- fils

### Schéma du montage

- La diode doit être placée dans le sens passant
  - Le premier voltmètre mesure la tension aux bornes de la diode  $U_D$
  - Le second voltmètre mesure la tension aux bornes du conducteur ohmique  $U_R$
- Réaliser le montage. Appeler le professeur pour vérification.



### Mesures

Monter la tension à environ 2,5 V et vérifier que la diode s'allume (sens passant), sinon inverser son branchement. Ensuite, faire varier la tension du générateur pour augmenter la valeur de  $U_R$  par palier de 0,20 V à partir de 0,00 V pour deux couleurs de lumière émise par la diode. Pour chaque valeur de  $U_R$ , relever les valeurs de  $U_D$  et  $U_R$  et les reporter dans le tableau ci-dessous en précisant la couleur de la diode (B, J, O, R)

$U_D$ (V) ( )									
$U_R$ (V)									
$U_D$ (V) ( )									
$U_R$ (V)									

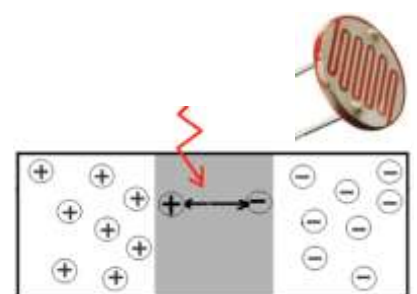
### Exploitation des mesures

- 1) En exploitant le document 1, donner la relation existant entre  $U_R$  et  $I$ .
- 2) Pour chaque diode, entrer sur Regressi les valeurs de  $U_R$  et  $U_D$ . Créer la grandeur  $I$  en utilisant la relation trouvée précédemment. Représenter  $U_D$  en fonction de  $I$ . Modéliser la courbe avec une fonction affine. Ajuster manuellement la courbe en vous inspirant du document 4. Représenter son allure sur la copie.
- 3) Expliquer en quoi l'allure de la courbe obtenue met en évidence les caractères isolant puis conducteur de la diode.
- 4) Compléter la dernière ligne du tableau du document 2 (mise en commun des résultats de deux groupes) en déterminant la valeur de  $U_{\text{seuil}}$  pour chaque diode.
- 5) En exploitant les documents, exprimer la constante de Planck  $h$  en fonction de  $U_{\text{seuil}}$ . Déterminer  $h$  dans les différents cas étudiés. Comparer les valeurs obtenues à la valeur théorique  $6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s.
- 6) Si on appelle  $x = 1 / \lambda$ . Montrer que  $U_{\text{seuil}}$  s'exprime sous la forme  $U_{\text{seuil}} = kx$ . Donner l'expression de  $k$ .
- 7) Dans Regressi, tracer  $U_{\text{seuil}}$  en fonction de  $x$  (grandeur calculée pour créer  $x$ ). Modéliser cette courbe. Représenter l'allure de la courbe sur la copie. En déduire la valeur de la constante de Planck  $h$  (unité : J.s).

## IV – Étude expérimentale d'une photorésistance

### Document 1 Présentation et principe de fonctionnement

Une photorésistance est un composant électronique dont la résistance, dans le cas présent, est modifiée par l'intensité lumineuse qu'elle reçoit. Elle est utilisée dans les capteurs de lumière.



Une photorésistance est composée d'un matériau semi conducteur en contact direct avec la lumière. Les photons de la lumière visible possèdent une énergie suffisante pour créer une paire électron-trou augmentant ainsi le nombre de porteurs de charge électrique.

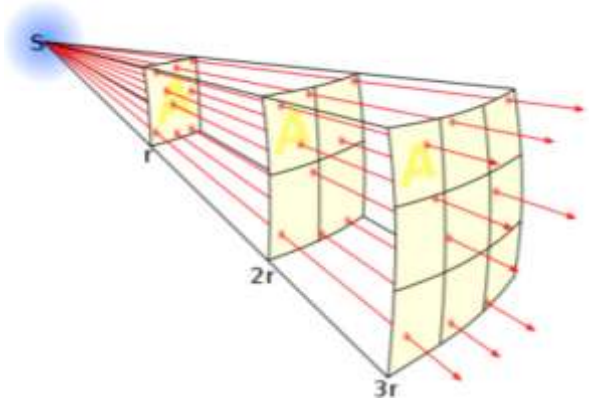
**Document 2 Résistance et conductance**

La conductance d'un matériau est la capacité de celui-ci à laisser passer le courant électrique par opposition à la résistance électrique. La résistance électrique R se mesure à l'aide d'un ohmmètre (symbole  $\Omega$  sur le multimètre). La conductance s'exprime en siemens (S) :  $G = \frac{1}{R}$

La conductance est liée à l'intensité lumineuse par la relation :  $G = k \times I^n$ , avec  $k = \text{constante}$

**Document 3 Absorption de la lumière et intensité lumineuse**

P représente la puissance totale irradiée à partir d'une source (filament d'une lampe). Elle est distribuée sur des surfaces sphériques de plus en plus importantes lorsque la distance s'accroît. Si r est la distance la séparant de la source, la surface sur laquelle se répartit la puissance lumineuse est alors égale à  $4\pi r^2$ . L'intensité lumineuse résultant est donc donnée par la relation :



$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

**Manipulation et exploitation**

**Matériel à disposition**

- une photorésistance
- un banc optique
- multimètre
- fils

**Manipulation**

Fixer la photorésistance contre l'écran pour bien maintenir sa direction perpendiculaire au banc. Brancher le multimètre en ohmmètre aux bornes de la photorésistance Prendre une dizaine de mesure de R pour différentes valeurs de r (avec  $r > 20 \text{ cm}$ )

r (m)										
R( $\Omega$ )										

**Exploitation**

- 1) Comment évoluent R et G en fonction de r ?
- 2) Montrer que G peut s'écrire sous la forme  $G = k' \times x^n$  où  $k'$  est une constante.
- 3) Rentrer les valeurs de R et r dans Regressi. Créer les grandeurs  $G = 1 / R$  et  $x = 1 / r^2$ .
- 4) Représenter l'évolution G en fonction de x, modéliser la courbe et déterminer la valeur de n.

**V – Résolution de problème : le projet AmpaCity**

Le deuxième producteur d'énergie en Allemagne a remis le 20 décembre 2013 à Nexans (société française) son prestigieux prix de l'innovation. Cette distinction couronne le projet révolutionnaire AmpaCity qui porte sur le déploiement en cours, à Essen dans la Ruhr (Allemagne), d'un câble d'énergie supraconducteur destiné à démontrer la capacité des supraconducteurs à transporter l'électricité avec des « pertes » moindres.

**Les documents utiles à la résolution sont à la fin de l'exercice.**

**Questions :**

Estimer la durée qu'un câble traditionnel mettrait pour commencer à fondre s'il était parcouru par un courant électrique de même intensité que celui parcourant le câble supraconducteur.  
Discuter de l'intérêt d'utiliser un composant siège du phénomène de supraconductivité dans le projet AmpaCity.

### Remarques :

L'analyse des données ainsi que la démarche suivie sont évaluées et nécessitent d'être correctement présentées. Des initiatives doivent être prises et les calculs numériques doivent être menés à leur terme avec rigueur.

### Données :

- volume d'un cylindre de longueur  $L$  et de rayon  $r$  :  $V = L \cdot \pi \cdot r^2$  ;
- résistance  $R$  (en  $\Omega$ ) d'un conducteur électrique de résistivité électrique  $\rho$  (en  $\Omega \cdot m$ ), de longueur du conducteur  $L$  (en m) et de section du conducteur  $S$  (en  $m^2$ ) :  $R = \frac{\rho \cdot L}{S}$  ;
- puissance électrique  $P$  (en W) transmise à un dispositif traversé par un courant d'intensité  $I$  (en A) :  $P = U \times I$  où  $U$  (en V) est la tension appliquée aux bornes du dispositif ;
- puissance électrique  $P_J$  (en W) dissipée par un conducteur ohmique de résistance  $R$  (en  $\Omega$ ) parcouru par un courant électrique d'intensité  $I$  (en A) :  $P_J = R \cdot I^2$  ;
- quelques caractéristiques physiques du cuivre :

Résistivité électrique $\rho$	$1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
Masse volumique $\mu$	$8,92 \times 10^3 \text{ kg} \cdot m^{-3}$
Capacité thermique massique $c$	$390 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Température de fusion $T$	1356 K

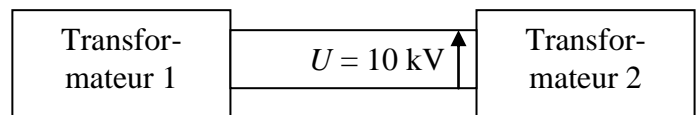
### Document

#### Description du projet AmpaCity

Le câble supraconducteur le plus long du monde a été officiellement intégré, le 30 avril 2014, dans le réseau électrique d'une ville allemande : Essen (Rhénanie du Nord-Westphalie). Le câble, d'une longueur égale à 1 km, relie maintenant deux postes de transformation dans le centre de la ville.

Les câbles utilisés pour AmpaCity, sont conçus pour permettre le transfert d'une puissance de valeur 40 MW sous une tension de valeur 10 000 V. Grâce aux caractéristiques du matériau supraconducteur, une céramique particulière, et à son refroidissement à de très basses températures, le câble est un conducteur électrique idéal. À Essen, le câble remplace une ligne à haute tension traditionnelle utilisant un câble traditionnel de même diamètre !

D'après <http://www.bulletins-electroniques.com>

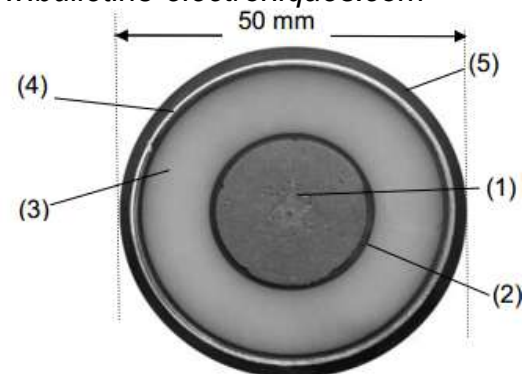


Puissance transférée au transformateur n°2 :  
 $P = 40 \text{ MW}$ .

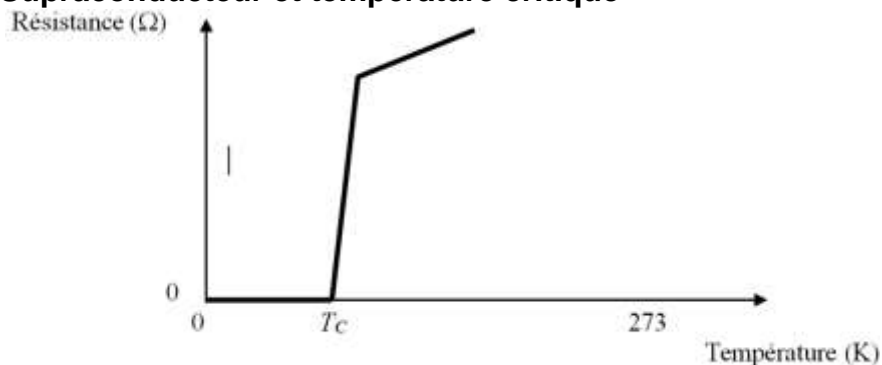
#### Coupe d'un câble électrique haute tension traditionnel

Ressource : Shanghai Yongjin Cable Group Co., Ltd

- (1) : Conducteur en cuivre
- (2) : Couche semi-conductrice
- (3) : Isolant
- (4) : Couche semi-conductrice externe
- (5) : Enveloppe



#### Supraconducteur et température critique



Les matériaux supraconducteurs se définissent, entre autres, par leur température critique  $T_c$  sous laquelle leur comportement vis-à-vis du passage du courant électrique évolue.

$$T(\text{Kelvin}) = \theta (\text{°Celsius}) + 273$$

### Remarques :

L'analyse des données ainsi que la démarche suivie sont évaluées et nécessitent d'être correctement présentées. Des initiatives doivent être prises et les calculs numériques doivent être menés à leur terme avec rigueur.

### Données :

- volume d'un cylindre de longueur  $L$  et de rayon  $r$  :  $V = L \cdot \pi \cdot r^2$  ;
- résistance  $R$  (en  $\Omega$ ) d'un conducteur électrique de résistivité électrique  $\rho$  (en  $\Omega \cdot m$ ), de longueur du conducteur  $L$  (en m) et de section du conducteur  $S$  (en  $m^2$ ) :  $R = \frac{\rho \cdot L}{S}$  ;
- puissance électrique  $P$  (en W) transmise à un dispositif traversé par un courant d'intensité  $I$  (en A) :  $P = U \times I$  où  $U$  (en V) est la tension appliquée aux bornes du dispositif ;
- puissance électrique  $P_J$  (en W) dissipée par un conducteur ohmique de résistance  $R$  (en  $\Omega$ ) parcouru par un courant électrique d'intensité  $I$  (en A) :  $P_J = R \cdot I^2$  ;
- quelques caractéristiques physiques du cuivre :

Résistivité électrique $\rho$	$1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
Masse volumique $\mu$	$8,92 \times 10^3 \text{ kg} \cdot m^{-3}$
Capacité thermique massique $c$	$390 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Température de fusion $T$	1356 K

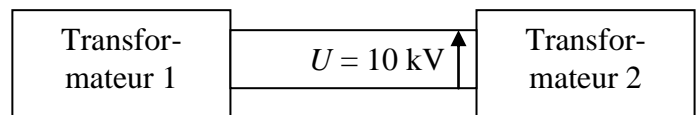
### Document

#### Description du projet AmpaCity

Le câble supraconducteur le plus long du monde a été officiellement intégré, le 30 avril 2014, dans le réseau électrique d'une ville allemande : Essen (Rhénanie du Nord-Westphalie). Le câble, d'une longueur égale à 1 km, relie maintenant deux postes de transformation dans le centre de la ville.

Les câbles utilisés pour AmpaCity, sont conçus pour permettre le transfert d'une puissance de valeur 40 MW sous une tension de valeur 10 000 V. Grâce aux caractéristiques du matériau supraconducteur, une céramique particulière, et à son refroidissement à de très basses températures, le câble est un conducteur électrique idéal. À Essen, le câble remplace une ligne à haute tension traditionnelle utilisant un câble traditionnel de même diamètre !

D'après <http://www.bulletins-electroniques.com>

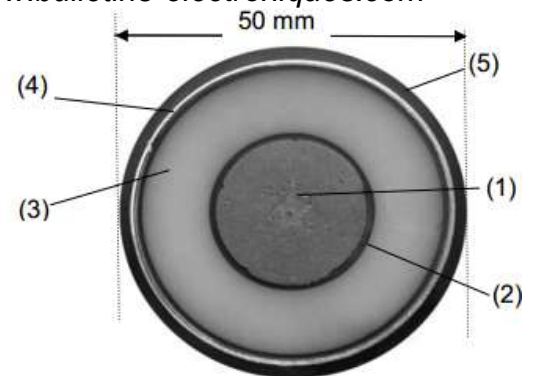


Puissance transférée au transformateur n°2 :  
 $P = 40 \text{ MW}$ .

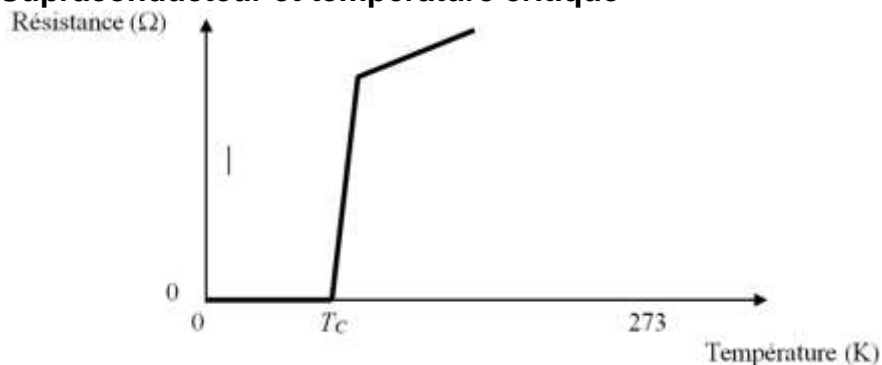
#### Coupe d'un câble électrique haute tension traditionnel

Ressource : Shanghai Yongjin Cable Group Co., Ltd

- (1) : Conducteur en cuivre
- (2) : Couche semi-conductrice
- (3) : Isolant
- (4) : Couche semi-conductrice externe
- (5) : Enveloppe



#### Supraconducteur et température critique



Les matériaux supraconducteurs se définissent, entre autres, par leur température critique  $T_c$  sous laquelle leur comportement vis-à-vis du passage du courant électrique évolue.

$$T(\text{Kelvin}) = \theta (\text{°Celsius}) + 273$$