

SESSION 2024

---

**AGRÉGATION  
CONCOURS INTERNE  
ET CAER**

**Section : PHYSIQUE CHIMIE**

**COMPOSITION SUR LA PHYSIQUE  
ET LE TRAITEMENT AUTOMATISÉ DE L'INFORMATION**

Durée : 5 heures

---

*Calculatrice électronique autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.*

*L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.*

*Il appartient au candidat de vérifier qu'il a reçu un sujet complet et correspondant à l'épreuve à laquelle il se présente.*

*Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.*

**NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier. Le fait de rendre une copie blanche est éliminatoire**

**Tournez la page S.V.P.**

## INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie.

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

► **Concours interne de l'Agrégation de l'enseignement public :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAI	1500C	101	0385

► **Concours interne du CAER / Agrégation de l'enseignement privé :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAH	1500C	101	0385





# Propriétés physiques et applications opto-électroniques des semi-conducteurs

Le XX<sup>e</sup> siècle a vu l'essor du domaine de l'électronique, fondé sur le développement des matériaux semi-conducteurs qui possèdent des propriétés physiques leur permettant d'intervenir dans divers composants électroniques (diodes de redressement, transistors, diodes électroluminescentes par exemple) ou dispositifs (cellules solaires, lasers, détecteurs...). Grâce à cette large palette d'applications, les semi-conducteurs sont devenus incontournables pour la vie quotidienne.

Après une courte introduction (partie I) sur le modèle du gaz parfait, les propriétés fondamentales des semi-conducteurs intrinsèques sont explorées dans la partie II de la composition : nombre de porteurs de charge électrique participant à la conduction électrique et propriétés de transport, étude de l'évolution de ces propriétés en fonction de la température. La partie III est dédiée au dopage des semi-conducteurs en présentant comment la quantité de porteurs de charge électrique peut être contrôlée par l'ajout d'impuretés appropriées et comment les propriétés de transport d'un semi-conducteur dopé sont modifiées par l'application d'un champ magnétique. Chacune des parties II et III se termine par l'étude de capteurs communément utilisés en séances de travaux pratiques de physique-chimie : thermistance et sonde à effet Hall.

La partie IV se focalise sur le principe de fonctionnement de la jonction PN, qui est une brique de base des composants électroniques. Tout d'abord, les propriétés d'une jonction PN à l'équilibre sont caractérisées. Puis la jonction PN est mise hors équilibre par l'application d'une différence de potentiel extérieure (jonction PN polarisée) et son comportement en régime stationnaire est étudié (loi de Shockley).

Enfin, la jonction PN est utilisée dans des composants opto-électroniques : photodiode et cellule solaire. Le comportement de la jonction PN sous rayonnement lumineux est d'abord analysé. Il s'agit ensuite de rechercher les branchements adéquats de cette jonction PN dans un circuit électrique, en fonction de l'utilisation envisagée, en effectuant une estimation des performances obtenues.

Des questions pédagogiques sont insérées dans le corps du sujet. Elles sont signalées par l'indication **QP** et représentent environ vingt pour cent du total des points attribués.

<b>Contenu du sujet</b>	<b>Page</b>
<b>I Introduction : le modèle du gaz parfait en classe de terminale de la voie générale, enseignement de spécialité physique-chimie . . . . .</b>	<b>4</b>
<b>II Semi-conducteur intrinsèque . . . . .</b>	<b>4</b>
II.1 Nombre de porteurs de charge électrique . . . . .	6
II.2 Propriétés de transport . . . . .	6
II.3 Capteurs de température . . . . .	7
II.4 Étude d'un capteur électrique résistif en classe de seconde des voies générale et technologique.	7
<b>III Semi-conducteur dopé . . . . .</b>	<b>9</b>
III.1 Nombre de porteurs de charge électrique dans un semi-conducteur dopé N . . . . .	10
III.2 Propriétés de transport d'un semi-conducteur dopé N en présence d'un champ magnétique : effet Hall . . . . .	11
III.3 Étude du champ magnétique en classe de terminale STL-SPCL . . . . .	12
<b>IV Jonction PN et ses applications en opto-électronique . . . . .</b>	<b>14</b>
IV.1 Jonction PN . . . . .	14
IV.2 Quelques applications en opto-électronique . . . . .	17
Annexe 1 . . . . .	20
Annexe 2 . . . . .	21
Annexe 3 . . . . .	24
Annexe 4 . . . . .	25

## Données numériques

Constante des gaz parfaits	:	$R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
Constante de Boltzmann	:	$k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
Valeur absolue de la charge de l'électron	:	$e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$
Masse de l'électron dans le vide	:	$m_0 = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Constante d'Avogadro	:	$N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Constante de Planck	:	$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Constante de Planck réduite	:	$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,06 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Célérité de la lumière dans le vide	:	$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Permittivité diélectrique du vide	:	$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$
Perméabilité magnétique du vide	:	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$

## Caractéristiques des semi-conducteurs au silicium et au germanium

	silicium	germanium
$E_{\text{gap}}(T_{\text{amb}})$	1,12 eV	0,67 eV
$n_i(T_{\text{amb}})$	$3,2 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$	
$m_e$	$1,13 m_0$	$0,55 m_0$
$m_t$	$0,55 m_0$	$0,29 m_0$
$N_e(T_{\text{amb}})$	$3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$10^{19} \text{ cm}^{-3}$
$N_t(T_{\text{amb}})$	$10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
$\mu_e(T_{\text{amb}})$	$1350 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$3600 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
$\mu_t(T_{\text{amb}})$	$480 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$1800 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
$\epsilon_r$	11,7	16

## Consignes particulières

### Dans tout le problème :

- on considère que  $T_{\text{amb}} = 293 \text{ K}$ , soit  $k_B T_{\text{amb}} = 25 \text{ meV}$ ;
- toutes les valeurs d'énergie demandées doivent être exprimées en eV et ses multiples.

Certaines questions sont repérées par une barre noire dans la marge gauche. Leur résolution demande une prise d'initiative de la part du candidat ou de la candidate. L'évaluation des réponses par le jury porte tout particulièrement sur l'analyse physique des situations étudiées, l'intelligibilité et la clarté de la rédaction et la mise en place d'une démarche raisonnée de résolution.

## I Introduction : le modèle du gaz parfait en classe de terminale de la voie générale, enseignement de spécialité physique-chimie

Un professeur souhaite illustrer les limites du modèle du gaz parfait à l'aide de la situation présentée dans l'encadré qui suit. L'annexe 1 rappelle l'extrait de programme correspondant.

Un ballon aux parois souples contient une masse  $m_a = 1,3\text{g}$  d'air occupant un volume  $V_a = 1,0\text{L}$  à la pression atmosphérique  $P_a = 1,0 \times 10^5\text{Pa}$ . Il est attaché à un bathyscaphe (un sous-marin conçu pour se déplacer principalement verticalement) initialement à la surface de l'eau. Le sous-marin plonge vers la fosse des Mariannes située à une profondeur de plus de 10 000 m où la pression est environ mille fois plus grande qu'à la surface de l'eau.

L'air est assimilé à un gaz parfait et l'eau à un fluide incompressible. Dans une première approximation, la température de l'océan est supposée constante tout au long de la descente. On imagine qu'une fois arrivé à cette profondeur, le ballon se perce. L'air remonte-t-il à la surface?

*Données :*

Masse volumique de l'eau	: $\rho_{\text{eau}} = 1,0\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$
Masse molaire de l'air	: $M_{\text{air}} = 29\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$
Constante des gaz parfaits	: $R = 8,31\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

**Q1. Énoncer** la loi des gaz parfaits, en explicitant les grandeurs physiques mobilisées.

**Q2. Calculer** la valeur de la température  $T_a$  de l'air, assimilé à un gaz parfait, dans l'état défini par  $m_a = 1,3\text{g}$ ,  $V_a = 1,0\text{L}$  et  $P_a = 1,0 \times 10^5\text{Pa}$ .

**Q3. Justifier** que la quantité  $\left(\frac{k_B T_a}{P_a}\right)^{1/3}$  a la dimension d'une longueur. **Justifier**, avec l'aide de la loi des gaz parfaits, que cette longueur caractéristique peut être interprétée comme étant la distance moyenne entre les molécules constitutives du gaz.

**Q4. Calculer** la valeur de la longueur caractéristique  $\left(\frac{k_B T_a}{P_a}\right)^{1/3}$  et **comparer** l'ordre de grandeur obtenu à la portée typique des interactions entre molécules.

**QP5.** Un premier élève s'interroge sur la valeur de la masse molaire de l'air. **Rédiger** en quelques mots une explication à lui fournir.

**QP6.** Un second élève propose la réponse suivante à la situation exposée : « si le ballon se perce, les bulles d'air ne devraient pas remonter vers la surface ».

**Commenter** cette réponse et **préciser** comment elle permet de questionner les élèves sur la validité du modèle du gaz parfait dans de telles conditions.

## II Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur intrinsèque est un cristal parfait sans défaut d'empilement ni impureté. Il est un isolant à température nulle. À température non nulle, il présente des propriétés de conduction, avec une conductivité électrique qui se situe entre celle des métaux et celle des isolants. Sa conductivité électrique augmente quand la température augmente. Des exemples très connus et utilisés dans l'industrie sont les semi-conducteurs au silicium et au germanium.

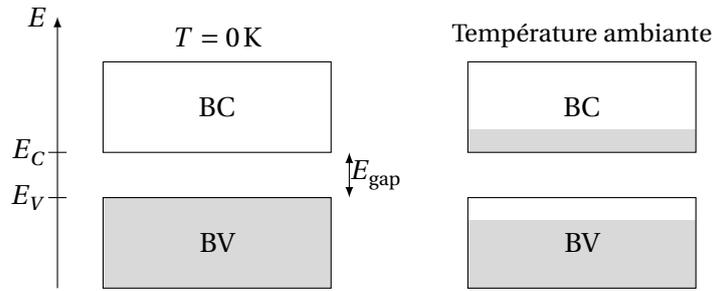


FIGURE 1 – structure énergétique d'un semi-conducteur à température nulle (à gauche) et à température ambiante (à droite). Les états énergétiques occupés par les électrons sont figurés en gris sur la figure, les états inoccupés par les électrons sont en blanc.

On admet que le peuplement des niveaux énergétiques électroniques dans un semi-conducteur intrinsèque obéit aux règles suivantes (figure 1) :

- les électrons peuvent occuper
  - une bande de basse énergie, appelée bande de valence (désignée par le label BV sur la figure 1), limitée supérieurement par l'énergie  $E_V$  ;
  - une bande de haute énergie, appelée bande de conduction (désignée par le label BC sur la figure 1), limitée inférieurement par l'énergie  $E_C$ .

Ces deux bandes sont séparées par une bande interdite, appelée « gap », de largeur  $E_{\text{gap}} = E_C - E_V$ .

- À température  $T = 0\text{K}$ , et en l'absence de toute excitation, tous les états énergétiques de la bande de valence sont occupés par des électrons. On dit que la bande de valence est pleine (elle apparaît complètement grisée sur le diagramme à gauche de la figure 1) ; aucun état énergétique de la bande de conduction n'est occupé par des électrons. On dit que la bande de conduction est vide. Le matériau est un isolant électrique.
- À température non nulle, un certain nombre d'électrons déserte les états de la partie supérieure de la bande de valence pour occuper des états de la partie inférieure de la bande de conduction (voir partie droite de la figure 1 où la partie inférieure de la bande de conduction est grisée). La conduction électrique est alors assurée par :
  - les électrons de charge électrique  $-e$  de la bande de conduction, de masse  $m_e$ .
  - les trous qui sont les vacances électroniques de la bande de valence (zone supérieure blanche de la bande de valence sur la partie droite de la figure 1), laissées par les électrons qui ont été promus dans la bande de conduction. Ces trous sont traités comme des particules de charge électrique  $+e$  et de masse  $m_t$ .
- Le nombre d'électrons dans la bande de conduction par unité de volume est noté  $n$  ; le nombre de trous dans la bande de valence par unité de volume est noté  $p$ . À la température  $T$ , ils sont donnés par les relations qui suivent :

$$n(T) = N_e(T) \exp\left(-\frac{E_C - E_F(T)}{k_B T}\right), \quad (1)$$

$$p(T) = N_t(T) \exp\left(-\frac{E_F(T) - E_V}{k_B T}\right). \quad (2)$$

Le paramètre  $E_F(T)$  est un paramètre de normalisation, appelé *potentiel chimique*, qui dépend de la température  $T$  et qui permet d'assurer la conservation du nombre total d'électrons. Il vérifie ici :

$$E_V \leq E_F(T) \leq E_C.$$

On donne également :

$$N_e(T) = \frac{1}{4} \left( \frac{2m_e k_B T}{\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \quad \text{et} \quad N_t(T) = \frac{1}{4} \left( \frac{2m_t k_B T}{\pi \hbar^2} \right)^{3/2}. \quad (3)$$

Tournez la page S.V.P.

## II.1 Nombre de porteurs de charge électrique

**Q7.** Vérifier l'homogénéité des relations (3).

**Q8.** Exprimer le produit  $n(T)p(T)$  en fonction de  $N_e(T)$ ,  $N_t(T)$ ,  $E_{\text{gap}}$  et  $k_B T$ .

**Q9.** Justifier que, dans un semi-conducteur intrinsèque,  $n(T) = p(T)$ , puis **montrer** que :

$$n(T) = p(T) = n_i(T), \quad (4)$$

avec

$$n_i(T) = \sqrt{N_e(T)N_t(T)} \exp\left(-\frac{E_{\text{gap}}}{2k_B T}\right). \quad (5)$$

**Q10.** En utilisant les valeurs données pour  $N_e(T_{\text{amb}})$ ,  $N_t(T_{\text{amb}})$  et  $E_{\text{gap}}$  dans le tableau des caractéristiques du silicium et du germanium, **vérifier** la valeur de  $n_i(T_{\text{amb}})$  à la température ambiante  $T_{\text{amb}} = 293 \text{ K}$  pour le silicium et **calculer**  $n_i(T_{\text{amb}})$  pour le germanium.

**Q11.** Déterminer le nombre par unité de volume de particules d'un gaz parfait, noté  $n_{CP}$ , à température  $T_{\text{amb}} = 293 \text{ K}$  et pression  $P = 1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$  et **comparer** aux valeurs  $n_i(T_{\text{amb}})$  estimées à la question précédente. **Conclure** quant à l'hypothèse consistant à négliger les interactions entre les porteurs de charge électrique.

**Q12.** On appelle  $E_{Fi}(T)$  le potentiel chimique à la température  $T$  du semi-conducteur intrinsèque. **Exprimer** l'énergie  $E_{Fi}(T)$  en fonction de  $N_e(T)$ ,  $N_t(T)$ ,  $E_V$ ,  $E_C$  et  $k_B T$ , puis en fonction de  $E_V$ ,  $E_C$ ,  $k_B T$  et  $\ln\left(\frac{m_t}{m_e}\right)$ .

**Q13.** Montrer que  $E_{Fi}(T = 0 \text{ K}) = (E_C + E_V)/2$ , c'est-à-dire que  $E_{Fi}(T = 0 \text{ K})$  se situe au milieu du gap à  $T = 0 \text{ K}$ .

**Q14.** Montrer que, dans le silicium et le germanium,  $E_{Fi}(T_{\text{amb}})$  reste « proche » de  $E_{Fi}(T = 0 \text{ K})$  à  $k_B T_{\text{amb}}$  près. En comparant les ordres de grandeur de  $k_B T_{\text{amb}}$  et  $E_{\text{gap}}/2$ , **conclure** qu'à température ambiante, on peut considérer que  $E_{Fi}(T_{\text{amb}})$  reste au milieu du gap.

## II.2 Propriétés de transport

On soumet le semi-conducteur intrinsèque à un champ électrique  $\vec{E}^{\text{ext}}$  stationnaire, orienté selon un axe ( $Ox$ ). On considère qu'un électron (respectivement un trou) subit une force de frottement, due à l'interaction de cet électron (respectivement de ce trou) avec les atomes du réseau cristallin, de la forme :

$$\vec{F}_{e,t}^{\text{fritt}} = -\frac{m_{e,t} \vec{v}_{e,t}}{\tau_{e,t}}, \quad (6)$$

où  $\vec{v}_{e,t}$  est la vitesse de l'électron (respectivement du trou) et où  $\tau_e$  et  $\tau_t$  sont des paramètres phénoménologiques qui ont l'unité d'un temps (la seconde) et dépendent de la température.

**Q15.** Appliquer la seconde loi de Newton à un électron soumis à  $\vec{E}^{\text{ext}}$  dans le référentiel du solide semi-conducteur. On néglige l'action de la pesanteur.

**Q16.** Montrer qu'en régime permanent,  $\vec{v}_e = -\mu_e \vec{E}^{\text{ext}}$  où  $\mu_e = \frac{e\tau_e}{m_e}$  est la mobilité des électrons.

La mobilité des électrons dépend de la température. Dans un réseau cristallin, elle varie typiquement en  $T^{-3/2}$  pour  $T > 100 \text{ K}$ . On introduit le vecteur densité de courant électrique  $\vec{j}$  dû à des porteurs de charge électrique dont le nombre par unité de volume est noté  $n$ , la vitesse  $\vec{v}$  et la charge électrique  $q$  :  $\vec{j} = nq\vec{v}$ .

**Q17.** Donner l'unité dans le système international de  $\|\vec{j}\|$ .

**Q18.** Exprimer les deux vecteurs densités de courant électrique dus, d'une part, aux électrons et, d'autre part, aux trous, en faisant intervenir leurs charges électriques, leurs vitesses et leurs nombres par unité de volume respectifs.

**Q19.** En déduire l'expression de la conductivité électrique  $\sigma_i(T)$  du semi-conducteur intrinsèque en fonction de  $n_i(T)$ ,  $e$ ,  $\mu_e(T)$  et  $\mu_t(T)$ .

**Q20.** Donner un ordre de grandeur de  $\sigma_i$  en  $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  à température ambiante pour le silicium. Comparer à la conductivité électrique du cuivre à température ambiante :  $\sigma_{Cu} = 59,6 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ .

## II.3 Capteurs de température

Comme la conductivité électrique, et donc la résistivité électrique d'un semi-conducteur intrinsèque, dépend de la température, on peut utiliser celui-ci comme capteur de température : c'est le principe d'une thermistance. La sonde de température Pt100 est un type de capteur de température différent puisqu'il fait intervenir un métal, le platine.

La figure 2 montre la variation en température d'une thermistance et de la sonde de platine Pt100. L'objectif de la partie II.3 est de comparer ces deux sortes de capteurs de température.

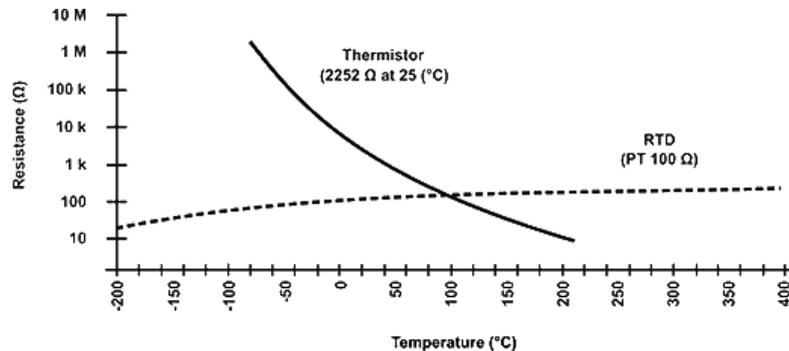


FIGURE 2 – Résistance en fonction de la température d'une thermistance (*thermistor* sur le graphe) et d'une sonde de platine Pt100 (*RTD* sur le graphe). Source : <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/pedagogiques/5014/5014-s2-cours-types-de-capteurs-de-temperature.pdf>

### Thermistance

**Q21. Montrer** que la résistivité électrique de la thermistance évolue en fonction de  $T$  sous la forme  $\exp(\alpha/T)$ . **Exprimer**  $\alpha$  en fonction de  $E_{\text{gap}}$  et  $k_B$ .

### Sonde de température Pt100

**Q22. Donner** une estimation (valeur numérique) du nombre  $n_M$  d'électrons de conduction par unité de volume (en  $\text{cm}^{-3}$ ) dans un métal tel que le platine à température ambiante.

**Q23. Exprimer** la conductivité électrique  $\sigma_M(T)$  du métal en fonction de  $n_M$ ,  $e$  et  $\mu_e(T)$ .

**Q24. Sachant** que  $n_M$  est indépendant de la température, **interpréter** l'évolution de la résistance d'une sonde de platine en fonction de la température.

### Comparaison thermistance/sonde Pt100

**Q25. Comparer** les caractéristiques des deux capteurs de température que sont la thermistance et la sonde de platine : sensibilité, gamme de températures mesurées.

## II.4 Étude d'un capteur électrique résistif en classe de seconde des voies générale et technologique.

Un enseignant propose à ses élèves l'activité fournie en annexe 2 afin d'étudier un exemple de capteur électrique résistif, une thermistance. L'extrait du programme correspondant est fourni au début de l'activité.

**QP26. Expliciter** l'intérêt pédagogique de l'introduction de cette activité et **préciser** ses limites.

**QP27. Critiquer** le protocole expérimental proposé dans la partie A de l'activité. **Proposer** une amélioration possible.

**QP28.** Le professeur décide d'évaluer la courbe d'étalonnage et son utilisation lors de l'appel prévu à la fin de la partie A. **Donner** au moins quatre exemples d'indicateurs sur lesquels il pourrait s'appuyer afin d'explicitier son évaluation.

**QP29.** Un élève réalise le schéma électrique représenté ci-dessous (figure 3) pour le montage donné dans la partie B de l'activité. **Identifier** au moins une difficulté possible rencontrée par l'élève, suggérée par ce schéma et y **apporter** une remédiation possible.

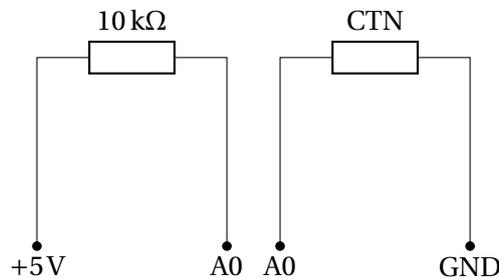


FIGURE 3 – Copie d'un schéma électrique proposé par un élève.

**Q30. Rédiger** une question que le professeur pourrait poser afin d'explicitier la ligne 16 du croquis utilisé dans la partie B et retranscrit ci-après.

```

1 #define pinLDR A0 // déclaration de la thermistance CTN sur la broche A0
2 float Tension_Mesuree = 0 ; // définit et initialise les variables
   Tension_Mesuree et résistance r
3 float r = 10000 ;
4
5 void setup() {
6   Serial.begin(9600);
7 }
8 void loop() {
9   int valeur = analogRead(pinLDR); // mesure la valeur numérique de la broche
   A0
10  Serial.print("valeur lue sur la broche : "); // affiche le texte entre " "
11  Serial.println(valeur); // affiche la valeur numérique lue sur la broche A0
12  Tension_Mesuree =      ; // [À COMPLÉTER] convertit la valeur de la
   Tension_Mesuree relevée en volt
13  Serial.print("Valeur de la Tension_Mesuree : "); // affiche le texte entre "
   "
14  Serial.print(Tension_Mesuree); // affiche la valeur de la Tension_Mesuree
   relevée en volt
15  Serial.println("V");
16  float R = (Tension_Mesuree*r)/(5-Tension_Mesuree); // calcule la valeur de
   la résistance R de la thermistance
17  Serial.print("Valeur de la résistance : ");
18  Serial.print(R); affiche la valeur de la résistance
19  Serial.println(" Ohms");
20  delay(2000); // temporisation de 2 secondes pour avoir le temps de lire le
   moniteur série
21 }

```

**QP31.** Dans la partie C de l'activité, il est indiqué d'utiliser une résistance de protection de 220 Ω en série avec la DEL afin de limiter l'intensité du courant électrique la parcourant. **Citer** une conception initiale susceptible

d'être retrouvée chez des élèves de seconde des voies générale et technologique concernant le concept d'intensité du courant électrique traversant un résistor. **Décrire** en quelques lignes une expérience à proposer pour faire émerger cette conception et y apporter une réponse.

### III Semi-conducteur dopé

La présence d'impuretés dans un semi-conducteur modifie de façon très sensible le nombre d'électrons par unité de volume dans la bande de conduction et le nombre de trous par unité de volume dans la bande de valence. Un point crucial pour l'industrie des semi-conducteurs est de contrôler le nombre d'impuretés par unité de volume : c'est le principe du dopage. Le dopage permet d'ajuster aux besoins les propriétés électriques du semi-conducteur. Il s'effectue par diffusion d'atomes étrangers dans un monocristal de semi-conducteur : ces atomes étrangers viennent en substitution des atomes constituant le semi-conducteur, le semi-conducteur est alors dit dopé.

Le silicium est tétravalent, c'est-à-dire que chaque atome de silicium engage ses 4 électrons externes dans des liaisons covalentes avec ses 4 plus proches voisins. La substitution d'un des atomes de silicium par un atome pentavalent (comme le phosphore par exemple) ou trivalent (comme le bore par exemple) aura pour effet de rendre aisément disponible pour la conduction, un électron (dopage N) ou un trou (dopage P) respectivement. L'atome pentavalent est appelé un donneur, l'atome trivalent est appelé un accepteur. On note  $N_D$  le nombre de donneurs par unité de volume, et  $N_A$  le nombre d'accepteurs par unité de volume.

Un raisonnement identique peut être mené dans le cas d'un semi-conducteur au germanium puisque les atomes de germanium sont aussi tétravalents.

Pour que le réseau cristallin soit le moins perturbé par l'ajout de ces impuretés, leurs nombres doivent rester très petits devant le nombre d'atomes qui constituent le semi-conducteur : pas plus d'une impureté pour environ  $10^6$  atomes de semi-conducteurs. Dans ce cas, la modification du diagramme d'énergie se résume à l'introduction de niveaux d'énergie supplémentaires  $E_D$  ou  $E_A$  dans la bande interdite (voir figure 4). On note  $E_D$  le niveau donneur dans le cas du semi-conducteur dopé N et  $E_A$  le niveau accepteur dans le cas du semi-conducteur dopé P.

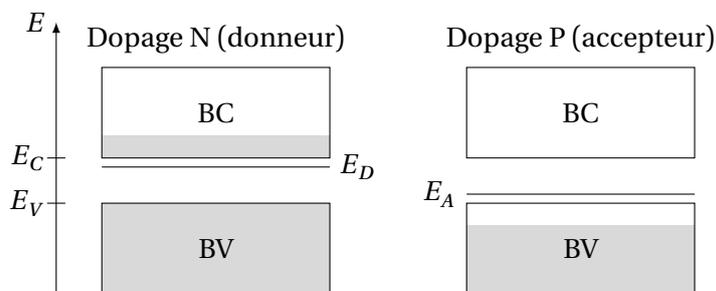
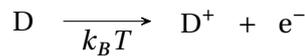


FIGURE 4 – Niveaux d'énergie d'un semi-conducteur dopé à température ambiante. BC désigne la bande de conduction et BV la bande de valence.

La modification du nombre d'électrons (respectivement de trous) par unité de volume dans la bande de conduction (respectivement dans la bande de valence) par le dopage est fondée sur le processus d'ionisation des impuretés dopantes par l'énergie thermique  $k_B T$ .

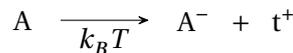
- **Dopage N :** à température nulle, le 5<sup>e</sup> électron du donneur D, non engagé dans une liaison covalente, occupe l'état d'énergie  $E_D$ . À température ambiante, l'énergie thermique  $k_B T$  permet d'ioniser le donneur, c'est-à-dire d'exciter cet électron du niveau donneur  $E_D$  vers la bande de conduction. On dit alors que le donneur D a donné un électron à la bande de conduction : sous l'effet d'un champ électrique, cet électron est capable de participer à la conduction électrique. L'électron s'éloigne par conséquent du donneur D qui, ayant perdu un électron, devient l'ion  $D^+$  chargé positivement. Le processus d'ionisation du donneur D peut se résumer par l'équation :



Dans un semi-conducteur dopé N, il existe donc 3 entités chargées : les électrons, dont on note  $n$  le nombre par unité de volume, chargés négativement, les trous, dont le nombre par unité de volume est noté  $p$ , et les donneurs ionisés dont le nombre par unité de volume est noté  $N_{D^+}$ , chargés positivement. L'équation de neutralité électrique s'écrit :

$$n = p + N_{D^+}.$$

- **Dopage P** : à température nulle, il manque un électron à l'accepteur A pour assurer 4 liaisons covalentes avec les atomes de silicium plus proches voisins. À température ambiante, l'énergie thermique  $k_B T$  permet d'ioniser l'accepteur, c'est-à-dire d'exciter un électron de valence vers le niveau  $E_A$ . On dit que l'accepteur a créé un trou dans la bande de valence. L'accepteur A ayant accepté un électron supplémentaire, il est alors devenu un ion chargé négativement. Le processus d'ionisation de l'accepteur peut se résumer par l'équation :



Dans un semi-conducteur dopé P, il existe donc 3 entités chargées : les électrons, dont le nombre par unité de volume est noté  $n$ , les accepteurs ionisés, dont le nombre par unité de volume est noté  $N_{A^-}$ , chargés négativement, et les trous, dont le nombre par unité de volume est noté  $p$ , chargés positivement. L'équation de neutralité électrique s'écrit alors :

$$p = n + N_{A^-}.$$

**La partie III porte sur les propriétés électriques d'un semi-conducteur dopé N à température ambiante  $T_{amb}$ .** On suppose que le nombre de donneurs par unité de volume est  $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , valeur grande devant le nombre d'électrons par unité de volume dans la bande de conduction du semi-conducteur intrinsèque à  $T_{amb}$ , mais suffisamment faible pour que la nature du semi-conducteur ne soit pas altérée et que les relations (1), (2), (3) et (5) données dans la partie II soient toujours valables.

### III.1 Nombre de porteurs de charge électrique dans un semi-conducteur dopé N

On donne l'ordre de grandeur suivant :  $E_C - E_D = 0,01 \text{ eV}$ .

**Q32. Évaluer** la température à partir de laquelle on peut estimer que les donneurs sont ionisés.

À température ambiante, on estime que tous les donneurs sont ionisés, c'est-à-dire que  $N_{D^+} = N_D$ .

**Q33. Expliquer** pourquoi on peut considérer que le nombre d'électrons par unité de volume dans la bande de conduction est  $n = N_D$ .

**Q34. Établir** que le nombre de trous par unité de volume dans la bande de valence est :

$$p = \frac{n_i^2}{N_D}, \quad (7)$$

où  $n_i$  est la grandeur définie par la relation (5) (partie II). **Calculer** la valeur de  $p$  dans le cas du silicium.

**Q35. Établir** que le potentiel chimique du semi-conducteur dopé N est donné par la relation :

$$E_F = E_C - k_B T \ln\left(\frac{N_e(T)}{N_D}\right), \quad (8)$$

**Calculer** la valeur de  $E_C - E_F$  à température ambiante.

On rappelle qu'à température ambiante, le potentiel chimique d'un semi-conducteur intrinsèque  $E_{Fi}$  se situe au milieu du gap (voir question **Q14** de la partie II).

**Q36. Calculer** la valeur de la différence d'énergie  $E_C - E_{Fi}$ .

**Q37. Positionner** sur un axe les énergies  $E_V$ ,  $E_C$ ,  $E_F$  et  $E_{Fi}$  en fonction de leurs valeurs relatives et **reporter** sur ce diagramme les valeurs des différences  $E_C - E_V$ ,  $E_C - E_F$  et  $E_C - E_{Fi}$  (la réalisation d'un graphe à l'échelle n'est pas attendue).

### III.2 Propriétés de transport d'un semi-conducteur dopé N en présence d'un champ magnétique : effet Hall

La partie III.1 montre que les propriétés de conduction électrique d'un semi-conducteur dopé N sont dominées par les électrons seuls. On soumet maintenant ce semi-conducteur à un champ électrique  $\vec{E}^{\text{ext}}$  uniforme et stationnaire, et à un champ magnétique  $\vec{B}$  uniforme et stationnaire.

La seconde loi de Newton appliquée à l'électron soumis à l'action des champs électrique et magnétique s'écrit comme suit dans le référentiel du solide semi-conducteur :

$$m_e \frac{d\vec{v}_e}{dt} = -\frac{m_e}{\tau_e} \vec{v}_e - e \left( \vec{E}^{\text{ext}} + \vec{v}_e \wedge \vec{B} \right). \quad (9)$$

La force de frottement  $-\frac{m_e}{\tau_e} \vec{v}_e$  modélise les interactions de l'électron considéré avec les atomes du réseau cristallin.

**Q38.** Dans l'équation (9), **identifier** et **nommer** la composante magnétique de la force d'interaction entre l'électron et les champs électrique et magnétique.

On note  $\vec{j}_e$  le vecteur densité de courant électrique.

**Q39.** En régime permanent, et en supposant que tous les électrons qui participent à la conduction ont la même vitesse, **établir** que :

$$\vec{E}^{\text{ext}} = \rho_e \vec{j}_e + \frac{1}{ne} \vec{j}_e \wedge \vec{B}. \quad (10)$$

La grandeur  $\rho_e = \frac{1}{\sigma_e} = \frac{1}{ne\mu_e} = \frac{m_e}{ne^2\tau_e}$  est la résistivité électrique.

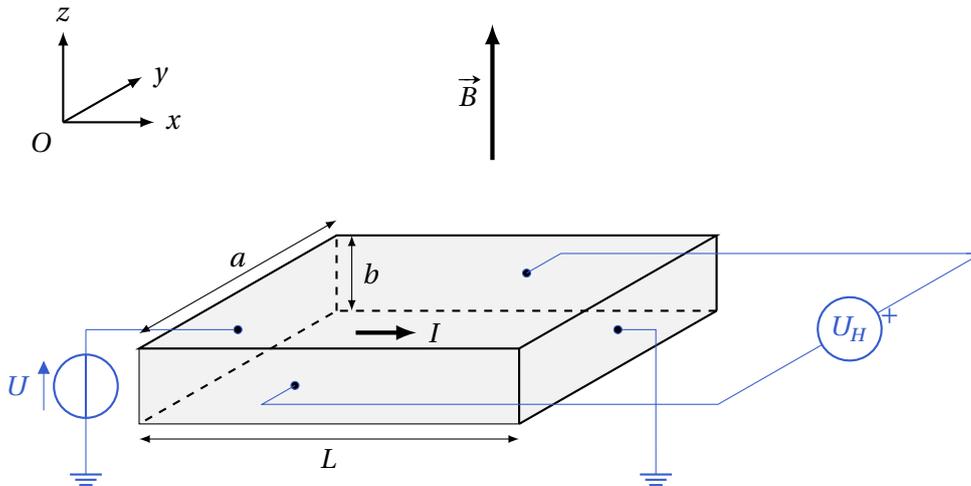


FIGURE 5 – Géométrie de Hall.

On considère que l'échantillon de semi-conducteur dopé N possède une géométrie particulière, appelée géométrie de Hall (voir figure 5). Dans cette géométrie, l'échantillon de semi-conducteur prend la forme d'un barreau rectangulaire allongé et mince, de longueur  $L$ , de largeur  $a$  et de hauteur  $b$ , avec  $b < a \ll L$ . Un champ magnétique stationnaire, uniforme, orienté selon  $(Oz)$ , est appliqué à l'échantillon semi-conducteur. La géométrie du barreau est telle qu'on impose au vecteur densité de courant électrique  $\vec{j}_e$  d'être orienté selon l'axe longitudinal  $(Ox)$  du barreau, c'est-à-dire que l'on impose  $j_{ey} = j_{ez} = 0$ . On considère que le vecteur densité de courant électrique  $\vec{j}_e$  est uniforme dans le barreau. On appelle  $I$  l'intensité du courant électrique longitudinal qui traverse le barreau. Une différence de potentiel  $U$  est appliquée entre les deux faces du barreau orthogonales à l'axe  $(Ox)$  et de section  $ab$  (voir figure 5).

**Q40.** **Montrer** qu'en présence du champ magnétique  $\vec{B}$ , il apparaît un champ électrique transverse, orienté selon  $(Oy)$ , que l'on note  $\vec{E}_H$ . Donner l'expression du vecteur  $\vec{E}_H$  en fonction de  $B = \|\vec{B}\|$ ,  $j_e = \|\vec{j}_e\|$ ,  $n$ ,  $e$  et du vecteur unitaire  $\vec{e}_y$ .

**Q41.** Exprimer  $I$  en fonction de  $j_e$ ,  $a$  et  $b$ .

**Q42.** Montrer qu'il apparaît une différence de potentiel  $U_H$  entre les deux faces du barreau orthogonale à l'axe ( $Oy$ ). Exprimer  $U_H$  sous la forme :

$$U_H = R_H \frac{IB}{b},$$

où  $R_H$  est appelé coefficient de Hall. Donner l'expression de  $R_H$  en fonction de  $n$  et  $e$ .

L'effet Hall est une caractérisation communément utilisée pour mesurer le nombre de porteurs de charge électrique dans un échantillon de semi-conducteur dopé. La figure 6 montre une mesure expérimentale effectuée dans un barreau de germanium dopé N. Les dimensions de ce barreau sont :  $L = 20$  cm,  $a = 1$  cm et  $b = 1$  mm.

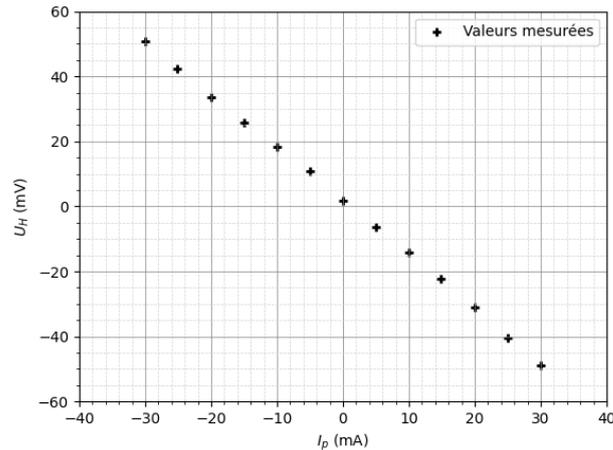


FIGURE 6 – Mesure de la tension de Hall en fonction de l'intensité circulant dans le barreau semi-conducteur, pour  $B = 250$  mT et  $T = 300$  K. Source : <https://www.techno-sciences.fr/wp-content/uploads/2019/12/p2530102e.pdf>

**Q43.** À partir des mesures de la figure 6, obtenues pour  $B = 250$  mT, et en faisant l'hypothèse que tous les donneurs sont ionisés à la température considérée, estimer le nombre moyen de donneurs par unité de volume  $N_D$  dans le barreau semi-conducteur dopé N.

**Q44.** L'effet Hall est également à la base du fonctionnement des sondes à effet Hall qui permettent de mesurer l'intensité d'un champ magnétique. Expliquer pourquoi on utilise un matériau semi-conducteur, et non un métal pour réaliser une sonde à effet Hall.

### III.3 Étude du champ magnétique en classe de terminale STL-SPCL

Pour débiter une séquence sur le contrôle des systèmes et le principe de fonctionnement des moteurs pas à pas, un enseignant propose une première activité expérimentale sur les propriétés du champ magnétique. L'annexe 3 reproduit un extrait du programme correspondant.

**QP45.** Proposer et décrire en quelques lignes (au besoin à l'aide de schémas) une expérience de cours illustrant simplement le caractère vectoriel du champ magnétique.

Lors de cette activité, l'enseignant souhaite tester la relation de proportionnalité entre l'intensité du champ magnétique  $B$  à l'intérieur d'un solénoïde sur son axe et l'intensité  $I$  du courant électrique le parcourant :  $B = aI$ . Pour cela, il utilise un dispositif commercial constitué d'un solénoïde de 988 spires par mètre, de son alimentation électrique, d'un ampèremètre et d'un teslamètre disposant d'une sonde à effet Hall pour la mesure de l'intensité du champ magnétique.

Le constructeur annonce une valeur de référence  $a_{\text{ref}} = 1,241 \times 10^{-3}$  SI pour le coefficient de proportionnalité. Le tableau qui suit fournit les valeurs expérimentales obtenues par les élèves :

$I$ (A)	0,00	0,30	0,50	0,80	1,00	1,20	1,50	1,80	2,00
$B$ (mT)	0,00	0,39	0,64	1,03	1,26	1,51	1,86	2,28	2,52

Pour conclure sur la compatibilité du modèle, un premier groupe d'élèves propose le traitement suivant qui provient d'une régression linéaire effectuée à l'aide d'un logiciel.

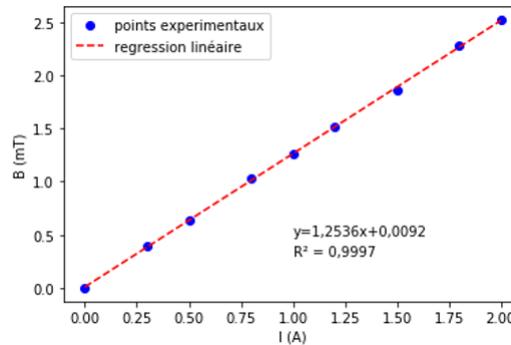


FIGURE 7 – Évaluation de l'intensité  $B$  du champ magnétique à l'intérieur du solénoïde, sur son axe, en fonction de l'intensité  $I$  (régression linéaire).

Un deuxième groupe d'élèves propose plutôt de calculer les différents rapports  $a = B/I$  et de procéder à une évaluation statistique sur l'incertitude-type de la moyenne des rapports.

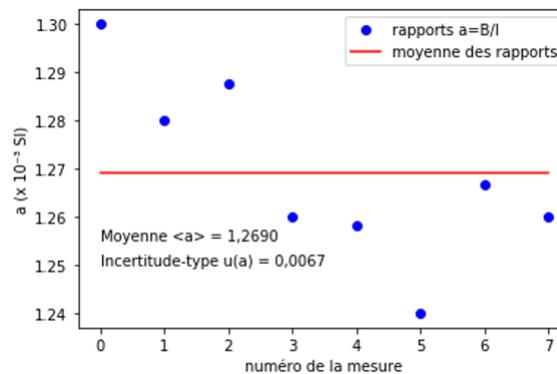


FIGURE 8 – Rapports  $B/I$  et moyenne des rapports.

Les élèves écrivent alors le résultat issu de leur traitement statistique comme suit :

$$a = (1,2690 \pm 0,0067) \times 10^{-3} \text{ SI},$$

où ce qui succède au symbole  $\pm$  est l'incertitude-type.

**QP46. Discuter** la pertinence de l'utilisation du calcul du coefficient de détermination  $R^2$  (figure 7) pour conclure quant à la compatibilité du modèle pour le premier groupe d'élèves. **Citer** un avantage de la seconde représentation par rapport à la première.

Pour conclure quant à la compatibilité du modèle, les élèves du deuxième groupe calculent l'écart relatif  $e$  suivant :

$$e = \frac{|a - a_{\text{ref}}|}{a_{\text{ref}}} = 0,022 \text{ soit } 2,2\%.$$

**QP47. Rectifier** cette réponse à l'aune des attendus du programme de spécialité STL-SPCL qui figure en annexe 4.

Pour obtenir une valeur de l'intensité du champ magnétique nécessaire à un examen d'IRM, un élève s'interroge sur la valeur de l'intensité du courant électrique qui doit parcourir le solénoïde.

**QP48. Proposer** une réponse à apporter à cet élève et **indiquer** quelle est la solution utilisée pour obtenir l'intensité souhaitée du champ magnétique.

## IV Jonction PN et ses applications en opto-électronique

Pour cette partie, il est conseillé de lire l'introduction de la partie III qui explique le principe du dopage N et du dopage P d'un semi-conducteur.

### IV.1 Jonction PN

Une jonction PN est réalisée en dopant différemment deux domaines contigus d'un barreau de semi-conducteur. La figure 9 représente le cas où le dopage P est situé du côté gauche et le dopage N du côté droit. Pour cet exemple, on considère le problème unidimensionnel selon l'axe  $(Ox)$  et la section de la jonction dans le plan  $(Oy, Oz)$  est notée  $S$ . Entre ces deux domaines, il existe une zone d'interface appelée zone de charge d'espace. Dans un semi-conducteur intrinsèque,  $n_i$  représente le nombre d'électrons par unité de volume dans la bande de conduction et le nombre de trous par unité de volume dans la bande de valence. On note  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$  la permittivité diélectrique statique du semi-conducteur.

Pour le dopage P de la zone à gauche, on introduit un nombre  $N_A$  d'accepteurs par unité de volume; pour le dopage N de la zone à droite, on introduit un nombre  $N_D$  de donneurs par unité de volume. Les zones du barreau dopées P et N possèdent chacune les caractéristiques suivantes à température ambiante :

#### Zone dopée P :

Nombre d'accepteurs par unité de volume :  $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

Nombre d'électrons par unité de volume :  $n_p = \frac{n_i^2}{N_A} \ll N_A$

Nombre de trous par unité de volume :  $p_p = N_A$  (on considère que les accepteurs sont tous ionisés)

Étant donnés les ordres de grandeur de  $n_p$  et  $p_p$ , on dit que, dans la zone P, les trous sont les porteurs de charge électrique majoritaires, les électrons sont les porteurs de charge électrique minoritaires.

#### Zone dopée N :

Nombre de donneurs par unité de volume :  $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

Nombre d'électrons par unité de volume :  $n_N = N_D$  (on considère que les donneurs sont tous ionisés)

Nombre de trous par unité de volume :  $p_N = \frac{n_i^2}{N_D} \ll N_D$

Étant donnés les ordres de grandeur de  $n_N$  et  $p_N$ , on dit que, dans la zone N, les électrons sont les porteurs de charge électrique majoritaires, les trous sont les porteurs de charge électrique minoritaires.

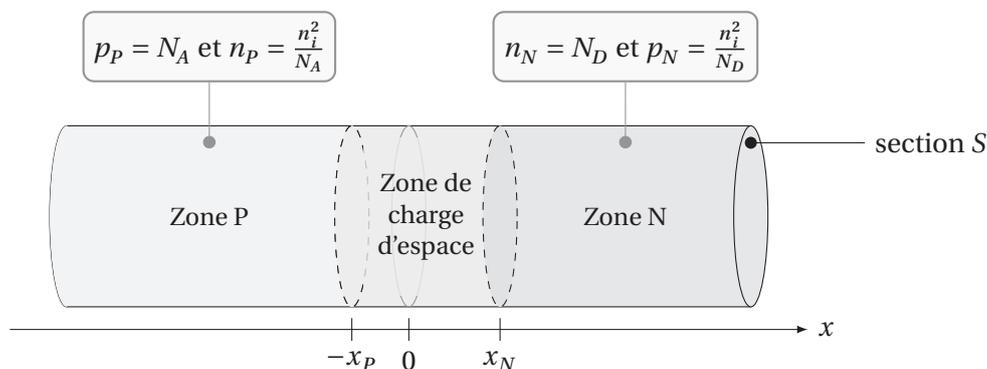


FIGURE 9 – Schéma d'une jonction PN.

### IV.1.1 Jonction PN à l'équilibre

Dans cette partie, la jonction est considérée à l'équilibre, c'est-à-dire qu'aucun courant ne traverse la jonction, aucun champ électrique extérieur  $\vec{E}^{\text{ext}}$  n'est appliqué.

On étudie la zone de charge d'espace, interface entre la zone N et la zone P. Pour cela, on imagine que la zone dopée P et la zone dopée N, initialement électriquement neutres en tout point, sont mises en contact en  $x = 0$ . Les nombres de porteurs de charge électrique (électrons ou trous) par unité de volume étant différents de part et d'autre du plan situé en  $x = 0$ , il apparaît un courant de diffusion des électrons de la zone N (où ils sont majoritaires) vers la zone P (où ils sont minoritaires), et un courant de diffusion des trous de la zone P (où ils sont majoritaires) vers la zone N (où ils sont minoritaires).

La diffusion des électrons et des trous laisse apparaître les charges électriques fixes portées par les impuretés ionisées :

- de  $x = -x_p$  à  $x = 0$  (du côté de la zone dopée P) apparaissent des charges électriques fixes négatives dont le nombre par unité de volume est  $N_A$  ;
- de  $x = 0$  à  $x = x_N$  (du côté de la zone dopée N) apparaissent des charges électriques fixes positives dont le nombre par unité de volume est  $N_D$ .

La zone de charge d'espace s'étend de  $-x_p$  à  $x_N$  (avec  $x_p > 0$  et  $x_N > 0$ ). Sa longueur totale est  $W = x_p + x_N$ . Elle contient des charges électriques fixes, mais elle est dénuée d'électrons et de trous mobiles. Les positions  $x_p$  et  $x_N$  dépendent des nombres de dopants  $N_A$  et  $N_D$  par unité de volume.

La présence des charges électriques fixes dans la zone de charge d'espace est à l'origine d'une différence de potentiel électrique entre les extrémités de la zone de charge d'espace, appelée potentiel de diffusion  $V_D = V_N - V_P$ , avec  $V_N = V(x_N)$  et  $V_P = V(-x_p)$ , où  $V(x)$  désigne le potentiel électrique à l'abscisse  $x$ .

L'objectif de cette partie est de calculer les valeurs de  $V_D$  et  $W$ .

#### Potentiel de diffusion $V_D$

Les démonstrations sont effectuées en ne considérant que les électrons, mais il est possible d'obtenir les mêmes résultats en effectuant les démonstrations avec les trous.

Le profil du nombre d'électrons par unité de volume dans le barreau est noté  $n(x)$  :

$$\begin{aligned} n(x) &= \frac{n_i^2}{N_A} && \text{pour } x \leq -x_p, \\ n(x) &= 0 && \text{pour } -x_p < x < x_N, \\ n(x) &= N_D && \text{pour } x \geq x_N. \end{aligned}$$

Le coefficient de diffusion des électrons est noté  $D_e$ . Il est relié à la mobilité  $\mu_e$  des électrons (voir question 16) par la relation d'Einstein :

$$\mu_e = \frac{eD_e}{k_B T}.$$

Le vecteur densité de courant électrique qui traverse la zone de charge d'espace s'écrit :  $\vec{j}_e^{\text{tot}} = j_e^{\text{tot}}(x) \vec{e}_x$  avec :

$$j_e^{\text{tot}}(x) = -eD_e \left( -\frac{dn(x)}{dx} + \frac{e}{k_B T} n(x) \frac{dV}{dx} \right). \quad (11)$$

**Q49. Montrer** que la densité de courant électrique donnée par l'équation (11) résulte de la somme d'une densité de courant électrique d'origine diffusive  $j_e^d$  et d'une densité de courant électrique due à la conduction  $j_e^c$  (**donner** les expressions des deux densités de courant électrique correspondantes).

On admet qu'à l'équilibre, les courants de diffusion et de conduction se compensent exactement.

**Q50.** En exprimant que  $j_e^{\text{tot}}(x) = 0$ , **écrire** la relation (11) sous la forme suivante :

$$f(n)dn + g dV = 0, \tag{12}$$

où  $f$  est une fonction de  $n(x)$  et  $g$  une constante indépendante de  $n(x)$ .

**Q51. Intégrer** la relation (12) de  $-x_p$  à  $x_N$  pour établir l'expression de  $V_D$  en fonction de  $\frac{k_B T}{e}$ ,  $n_i$ ,  $N_A$  et  $N_D$ .

**Q52. Calculer** la valeur du potentiel de diffusion  $V_D$  à température ambiante dans le cas du silicium, pour lequel  $n_i = 3,2 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$  à 293 K. On rappelle que  $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  et  $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

**Largeur de la zone de charge d'espace**

On peut établir que la largeur  $W$  de zone de charge s'écrit ainsi :

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_D}{e} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}. \tag{13}$$

**Q53. Calculer** la valeur de  $W$  pour le silicium à température ambiante.

**Champ électrique interne régnant dans la zone de charge d'espace**

**Q54. Préciser** le sens du champ électrique  $\vec{E}^{\text{int}}$  qui règne dans la zone de charge d'espace, et **évaluer** l'ordre de grandeur de sa norme.

**Q55. Montrer** que ce champ électrique s'oppose à la diffusion des électrons de la région N vers la région P et **comparer** son ordre de grandeur à des valeurs pertinentes de champ électrique.

**IV.1.2 Jonction PN hors équilibre en régime stationnaire : loi de Shockley**

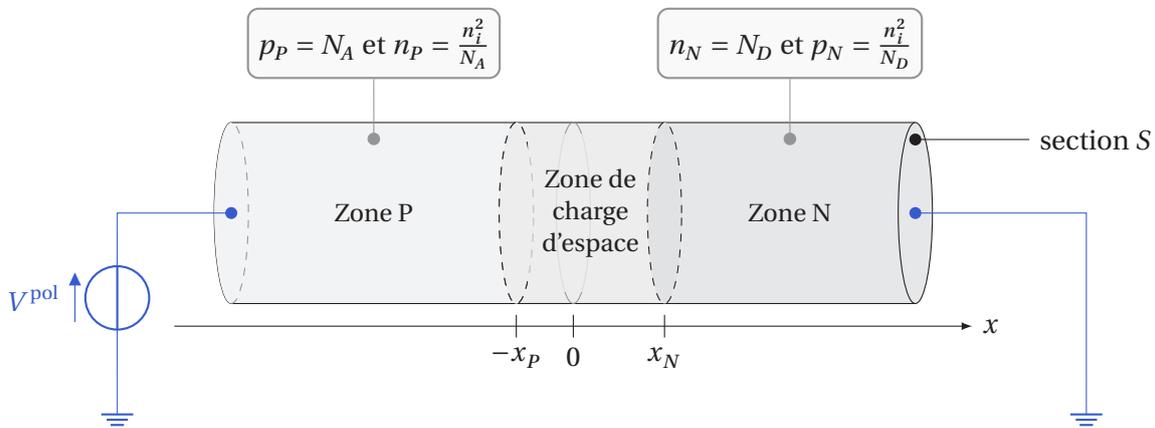


FIGURE 10 – Jonction PN polarisée.

Un générateur impose désormais une différence de potentiel extérieure, dite tension de polarisation  $V^{\text{pol}} < V_D$ . On admet alors que, par rapport à la jonction PN à l'équilibre, la différence de potentiel électrique entre les deux extrémités de la zone de charge d'espace est modifiée comme suit : le potentiel de diffusion  $V_D$  de la jonction PN à l'équilibre doit être remplacé par  $V_D - V^{\text{pol}}$ .

**Q56.** En adaptant la relation (13), **déterminer** comment varie l'intensité  $E^{\text{int}}$  du champ électrique qui règne dans la zone de charge d'espace en fonction de  $V_D - V^{\text{pol}}$ .

La tension de polarisation  $V^{\text{pol}}$  introduit un léger déséquilibre entre courant de diffusion et courant de conduction. On considère les deux cas  $V^{\text{pol}} > 0$  et  $V^{\text{pol}} < 0$ .

**Q57.** Dans chacun de ces deux cas, **déduire** quel phénomène l'emporte, entre les phénomènes de diffusion et de conduction des électrons.

Le déséquilibre entre courants de diffusion et de conduction est à l'origine d'un courant électrique qui traverse la jonction. L'intensité totale du courant électrique par unité de surface (notée  $j$ ) qui traverse la jonction PN polarisée suit la loi de Shockley :

$$j = j_{\text{inv}} \left( \exp \left( \frac{e V^{\text{pol}}}{k_B T} \right) - 1 \right), \quad (14)$$

avec  $j_{\text{inv}}$  de l'ordre de  $10^{-10} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ . On note  $I = jS$  l'intensité du courant électrique qui traverse la jonction PN polarisée (on rappelle que  $S$  désigne la section de la jonction).

**Q58. Tracer** l'allure de la caractéristique courant-tension  $I(V^{\text{pol}})$  de la jonction PN polarisée.

**Q59. Calculer** l'ordre de grandeur de  $j$  pour  $V^{\text{pol}} = 0,5 \text{ V}$ . **Comparer** les ordres de grandeur de  $j_{\text{inv}}$  et  $j(0,5 \text{ V})$ .

Pour  $V^{\text{pol}} > 0$ , la jonction PN fonctionne dans le sens « passant ». Pour  $V^{\text{pol}} < 0$ , la jonction PN fonctionne dans le sens « bloquant ».

**Q60. Justifier** les termes « passant » et « bloquant » au vu des ordres de grandeur trouvés.

## IV.2 Quelques applications en opto-électronique

### IV.2.1 Jonction PN sous éclairage

On éclaire la jonction PN avec une source lumineuse qui émet un rayonnement monochromatique de longueur d'onde dans le vide  $\lambda$  et dont le flux lumineux (en  $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) est noté  $\Phi^\lambda$ . L'énergie transférée par le rayonnement aux électrons du semi-conducteur permet à ceux-ci (sous certaines conditions) d'être excités de la bande de valence vers la bande de conduction : c'est le phénomène d'absorption de la lumière par le semi-conducteur qui est à l'origine de la création de paires électron-trou.

On suppose que la jonction PN reste thermalisée à température ambiante.

**Q61.** Pour le silicium, **déterminer** le domaine de longueurs d'onde (en  $\mu\text{m}$ ) pour lequel un photon est susceptible de créer une paire électron-trou (c'est-à-dire d'exciter un électron de la bande de valence vers la bande de conduction). Pour faciliter les calculs numériques, on donne la relation suivante :

$$(\text{énergie en eV}) = 1240 / (\text{longueur d'onde en nm}).$$

**Q62. Situer** le domaine caractérisé à la question précédente par rapport au domaine visible.

Les électrons de la bande de conduction et les trous de la bande de valence créés par l'absorption du rayonnement participent conjointement à la conduction électrique, créant un courant électrique supplémentaire. Ainsi, en raison de l'absorption du rayonnement, la caractéristique de la jonction  $I(V^{\text{pol}})$  est modifiée comme suit :

$$I = I_{\text{inv}} \left( \exp \left( \frac{e V^{\text{pol}}}{k_B T} \right) - 1 \right) - I_{\text{ph}}^\lambda, \quad (15)$$

où  $I_{\text{ph}}^\lambda$  est le courant inverse dû aux porteurs de charge électrique photogénérés.

On suppose que chaque photon absorbé crée une paire électron-trou et que toutes les paires créées participent à la conduction. Dans ce cas, l'intensité  $I_{\text{ph}}^\lambda$  est proportionnelle au flux lumineux  $\Phi^\lambda$  :

$$I_{\text{ph}}^\lambda = \beta \Phi^\lambda.$$

**Q63. Tracer** sur un même graphe l'allure des caractéristiques courant-tension  $I(V^{\text{pol}})$  pour trois flux lumineux  $\Phi_1^\lambda < \Phi_2^\lambda < \Phi_3^\lambda$  en prenant soin d'associer chaque caractéristique à chacun des trois flux lumineux.

Lorsque l'on branche un voltmètre aux bornes d'une jonction PN éclairée par un rayonnement lumineux, il apparaît une différence de potentiel  $V_{CO}$ .

**Q64. Établir** l'expression de  $V_{CO}$  en fonction de  $k_B T/e$  et du rapport  $I_{\text{ph}}^\lambda/I_{\text{inv}}$ .

**Q65. Donner** le nom de cet effet et **rappeler** le nom du physicien qui l'a découvert.

Lorsque l'on branche un ampèremètre aux bornes d'une jonction PN éclairée par un rayonnement lumineux, on mesure l'intensité de court-circuit  $I_{CC}$ .

**Q66. Montrer** que  $I_{CC}$  varie linéairement en fonction de  $\Phi^\lambda$ .

## IV.2.2 Cellule solaire

On souhaite utiliser la jonction PN comme cellule solaire. Il s'agit d'une situation où, à partir de l'absorption par le semi-conducteur de photons du spectre solaire, la jonction PN fournit une puissance électrique à une installation réceptrice. On se place donc dans la portion de la caractéristique courant-tension  $I(V^{\text{pol}})$  telle que  $I V^{\text{pol}} < 0$ . La jonction PN fournit alors une puissance électrique  $P_{\text{elec}}$  à une installation réceptrice modélisée par une résistance  $R_c$  (voir figure 11).

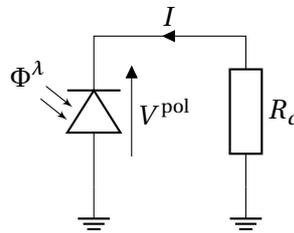


FIGURE 11 – Circuit de branchement de la cellule solaire.

**Q67. Écrire** la loi des mailles pour le circuit représenté sur la figure 11, puis **représenter** sur le même graphe  $I(V^{\text{pol}})$  la caractéristique courant-tension de la jonction PN et la relation entre  $I$  et  $V^{\text{pol}}$  obtenue en écrivant la loi des mailles.

**Q68. Déterminer** comment choisir  $R_c$  pour maximiser la puissance électrique fournie par la cellule solaire à l'installation.

### Rendement d'une cellule solaire au silicium

Le point dans le graphe  $I(V^{\text{pol}})$  qui correspond au maximum de puissance électrique fournie par la cellule solaire a pour coordonnées  $(V_{PM}^{\text{pol}}, I_{PM})$ . Pour une cellule solaire donnée, on définit le facteur de forme  $FF$  comme suit :

$$FF = \frac{V_{PM}^{\text{pol}} I_{PM}}{V_{CO} I_{CC}}$$

Ce rapport, inférieur à 1, permet de prendre en compte la forme particulière de la caractéristique courant-tension de la cellule considérée.

**Q69. À partir des données fournies ci-après, évaluer** le rendement de conversion de puissance lumineuse solaire en puissance électrique d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin.

#### Données :

Les caractéristiques typiques d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin sont :  $V_{CO} = 0,7\text{V}$ ,  $I_{CC}/S = 30\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$  et  $FF = 0,8$ . La figure 12 qui suit représente le spectre solaire.

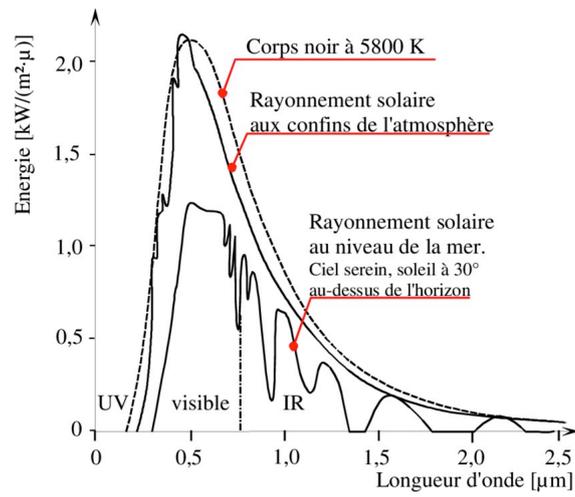


FIGURE 12 – Spectre solaire. Source : Roulet, Claude-Alain. (2023). Thermique du Bâtiment - Tout le confort avec peu d'énergie, Polycopié Section Génie Civil 4ème année.

❖  
❖ FIN DES QUESTIONS ❖  
❖

## Annexe 1

## Extrait du programme de l'enseignement de spécialité physique-chimie en classe de terminale (voie générale)

1. Décrire un système thermodynamique : exemple du modèle du gaz parfait	
Notions et contenus	Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i>
Modèle du gaz parfait. Masse volumique, température thermodynamique, pression. Équation d'état du gaz parfait.	Relier qualitativement les valeurs des grandeurs macroscopiques mesurées aux propriétés du système à l'échelle microscopique. Exploiter l'équation d'état du gaz parfait pour décrire le comportement d'un gaz. Identifier quelques limites du modèle du gaz parfait.

## Annexe 2

### Activité élève. Étude d'un capteur électrique résistif.

#### Extrait du programme de physique-chimie de la classe de seconde

Capteurs électriques	Citer des exemples de capteurs présents dans les objets de la vie quotidienne. <i>Mesurer une grandeur physique à l'aide d'un capteur électrique résistif. Produire et utiliser une courbe d'étalonnage reliant la résistance d'un système avec une grandeur d'intérêt (température, pression, intensité lumineuse, etc.)</i> <i>Utiliser un dispositif avec microcontrôleur et capteur.</i>
----------------------	--

Un bébé prématuré est placé dès sa naissance dans un incubateur (couveuse) pour l'aider à se réchauffer. On doit placer sur son corps un capteur de température appelé thermistance afin de contrôler régulièrement sa température.

Vous êtes en apprentissage à la maternité de l'hôpital, on vous demande de vérifier que la thermistance fournie permet bien de mesurer une température puis de réaliser un détecteur de température qui allumera une LED et déclenchera une alarme dès que la température du bébé dépassera une valeur seuil. La température à la surface de la peau d'un bébé ne doit pas dépasser 38 °C.

À l'aide du matériel à votre disposition et des documents fournis, vous réaliserez donc deux études expérimentales : l'étude de la thermistance puis la réalisation du détecteur.

#### Partie A : la thermistance fournie permet-elle de mesurer une température ?

Avant de construire votre détecteur, vous devez vérifier que la thermistance fournie permet bien de mesurer une température.

1. Relier l'ohmmètre aux bornes de la thermistance.
2. Plonger la thermistance et le thermomètre fourni dans un récipient rempli d'eau à la température ambiante.
3. Faire varier la température de l'eau à l'aide du dispositif chauffant (plaque chauffante).
4. Mesurer la résistance électrique  $R$  de la thermistance pour différentes températures. Ne pas dépasser une température de 50 °C.

Compléter le tableau de mesures :

$T$ (°C)									
$R$ (k $\Omega$ )									

5. Tracer la courbe d'étalonnage reliant la résistance  $R$  à la température  $T$ .
6. Utiliser ce graphique pour mesurer la température de votre peau (prendre la thermistance entre vos doigts).

<b>APPEL N°1</b>	Appeler le professeur pour lui présenter vos résultats
------------------	--

#### Partie B : conception du détecteur de température pour la couveuse de la maternité

Matériel nécessaire :

- 1 carte type Arduino Uno
- 1 résistance de 10 k $\Omega$

- 1 thermistance CTN 10 kΩ

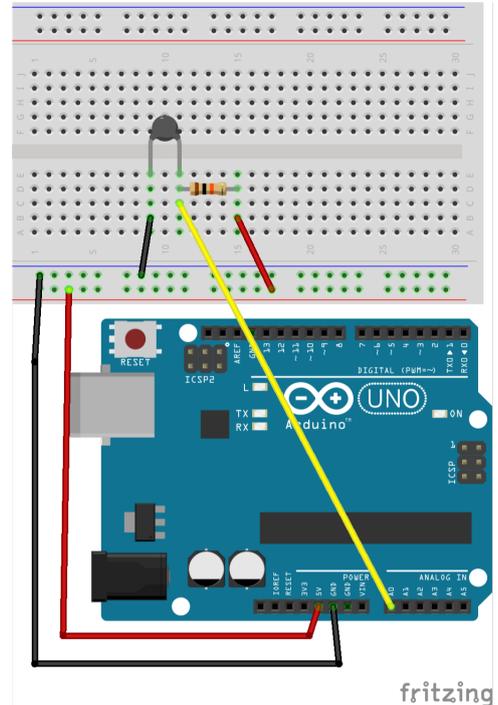
*Branchements :*

Sur la plaquette de câblage, placer le capteur sur la plaque comme indiqué ci-contre. À l'aide des fils de connexion, relier la patte gauche à la masse (GND) et la patte droite à la même colonne que la patte de gauche de la résistance de 10 kΩ. La patte de droite de la résistance est reliée à la broche +5V.

On connecte alors l'entrée analogique A0 à la colonne commune à la résistance de 10 kΩ et à la thermistance.

*Le code :*

Ouvrir le logiciel Arduino et vérifier le choix du port de communication (Outils/Ports). Ouvrir le fichier `temperature_CTN.ino`.



1. Choisir parmi les trois propositions ci-dessous, la ligne de code permettant d'obtenir une tension à partir de la variable « valeur ».

Aide : les entrées analogiques de la carte convertissant la valeur d'entrée (une tension entre 0 et 5V) en valeur numérique sur 10 bits, soient 1024 valeurs possibles allant de 0 à 1023.

- ① `Tension_Mesuree = valeur * (1023/5.0);`
- ② `Tension_Mesuree = valeur * (5.0/1023);`
- ③ `Tension_Mesuree = valeur * (1023*5.0);`

2. Dans le code du croquis, compléter la ligne 12 (ligne où se trouve le commentaire : // À COMPLÉTER) par la proposition choisie ci-dessus.
3. Téléverser le code et le lancer. Vous venez de réaliser un thermomètre numérique. Ne pas oublier de cliquer sur l'icône en haut à droite de l'écran pour visualiser le contenu du moniteur série.



<b>APPEL N°2</b>	Appeler le professeur pour lui présenter vos résultats ou en cas de difficulté
------------------	--

**Partie C : conception d'une alarme**

*Matériel nécessaire :*

**Tournez la page S.V.P.**

- 1 carte type Arduino Uno
- 1 DEL rouge, 1 buzzer
- 1 résistance de 220  $\Omega$  pour limiter le courant circulant dans la DEL
- 1 résistance de 10  $k\Omega$
- 1 thermistance CTN 10  $k\Omega$

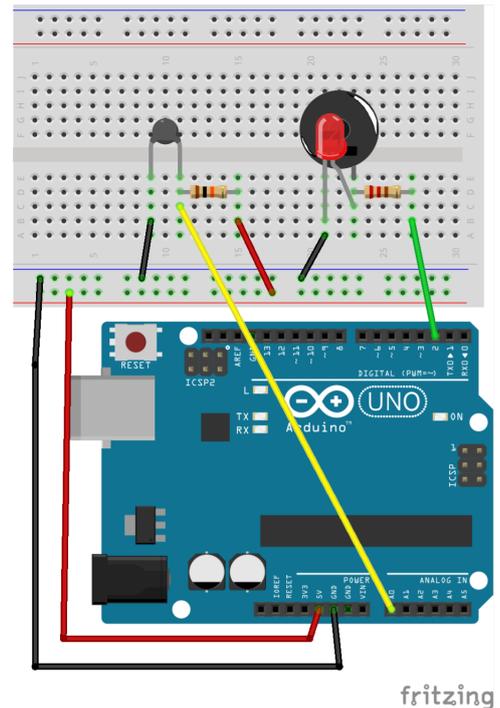
L'objectif de cette dernière partie est d'utiliser ce thermomètre afin de déclencher une alarme lorsque la température dépasse un certain seuil de température.

*Branchements :*

On reprend la base du montage précédent mais on y ajoute une DEL, une résistance de 220  $k\Omega$  et un buzzer. Bien respecter les broches.

*Le code :*

Ouvrir le fichier `alarme_temperature_CTN.ino`. On déclare la DEL sur le broche 2 à l'aide de l'instruction `#define pinLED 2`. Compléter la valeur de la variable nommée `Rlimit` pour que l'alarme se déclenche lorsqu'il y en a besoin. Téléverser le code et le lancer.



**APPEL N°3**

Appeler le professeur pour lui présenter vos résultats ou en cas de difficulté

## Annexe 3

### Extrait du programme de l'enseignement de spécialité STL-SPCL en classe de terminale (voie technologique).

Contrôler une position. Le moteur pas à pas. Champ magnétique.	<ul style="list-style-type: none"><li>- Citer les sources de champ magnétique.</li><li>- Citer quelques ordres de grandeur de la valeur du champ magnétique.</li><li>- Expliquer qualitativement le principe de fonctionnement d'un moteur pas à pas.</li></ul> <p><b>Capacités expérimentales :</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Mettre en évidence l'existence du champ magnétique et déterminer ses caractéristiques (valeur, sens et direction).</li><li>- Modifier un programme pour piloter un moteur pas à pas à l'aide d'un microcontrôleur.</li></ul>
--	---

## Annexe 4

### Extrait du programme de l'enseignement de spécialité STL-SPCL en classe de terminale (voie technologique) sur les mesures et incertitudes.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Dispersion des mesures, incertitude-type sur une série de mesures. Incertitude-type sur une mesure unique.  Sources d'erreurs.	<ul style="list-style-type: none"><li>- Procéder à une évaluation de type A d'une incertitude-type.</li><li>- Procéder à une évaluation de type B d'une incertitude-type pour une source d'erreur en exploitant une relation fournie et/ou les notices constructeurs.</li><li>- Identifier qualitativement les principales sources d'erreurs lors d'une mesure.</li><li>- Comparer le poids des différentes sources d'erreurs à l'aide d'une méthode fournie.</li><li>- Identifier le matériel adapté à la précision attendue.</li><li>- Proposer des améliorations dans un protocole afin de diminuer l'incertitude sur la mesure.</li><li>- Évaluer, à l'aide d'une relation fournie ou d'un logiciel, l'incertitude-type d'une mesure obtenue lors de la réalisation d'un protocole dans lequel interviennent plusieurs sources d'erreurs.</li></ul>
Expression du résultat	<ul style="list-style-type: none"><li>- Exprimer un résultat de mesure avec le nombre de chiffres significatifs adaptés et l'incertitude-type associée.</li></ul>
Valeur de référence	<ul style="list-style-type: none"><li>- Valider un résultat en évaluant la différence entre le résultat d'une mesure et la valeur de référence en fonction de l'incertitude-type.</li></ul>