



# Projet Expérimental

## Transport Électronique

Travail présenté dans le cadre du cours LU3PY124 : Physique expérimentale et numérique

Travail réalisé par Arthur ANTOINE, Antonin CARBIENER et Lucas BOISTAY

Avril 2023

# Table des matières

	3.2	Mesure de l'Allen-Bradley . . . . .	9
	3.3	Expérimentation . . . . .	11
<b>I</b>		<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>1</b>		<b>Méthodes de mesure</b>	<b>3</b>
1.1		Mesure de la résistance . . . . .	3
1.2		Mesure de la température : thermocouple . . . . .	4
1.3		Mesure de I(V) et V(I) . . . . .	4
<b>II</b>		<b>Étude du cuivre</b>	<b>5</b>
<b>1</b>		<b>Géométrie du fil</b>	<b>5</b>
1.1		Longueur du fil . . . . .	5
1.2		Diamètre du fil . . . . .	6
<b>2</b>		<b>Résistivité en fonction de l'intensité</b>	<b>6</b>
2.1		Considérations théoriques . . . . .	6
<b>3</b>		<b>Résistivité en fonction de la température</b>	<b>6</b>
3.1		Considérations théoriques . . . . .	6
3.2		Données expérimentales . . . . .	7
<b>III</b>		<b>Les semi-conducteurs</b>	<b>7</b>
<b>1</b>		<b>Résistivité en fonction de l'intensité</b>	<b>7</b>
1.1		Considérations théoriques . . . . .	7
1.2		Expérimentation . . . . .	8
<b>2</b>		<b>Résistivité en fonction de la température</b>	<b>8</b>
2.1		Considérations théoriques . . . . .	8
2.2		Experimentation . . . . .	8
<b>IV</b>		<b>Le supraconducteur</b>	<b>8</b>
<b>1</b>		<b>Introduction de l'expérience</b>	<b>8</b>
<b>2</b>		<b>Résistivité en fonction de l'intensité</b>	<b>9</b>
2.1		Considérations théoriques . . . . .	9
2.2		Experimentation . . . . .	9
<b>3</b>		<b>Résistivité en fonction de la température</b>	<b>9</b>
3.1		Considérations théoriques . . . . .	9
<b>V</b>		<b>Annexe</b>	<b>11</b>
<b>1</b>		<b>Incertitudes</b>	<b>12</b>
1.1		Incertitude d'un produit/quotient .	12
1.2		Incertitude d'une régression linéaire	12
<b>VI</b>		<b>Catalogue</b>	<b>13</b>
<b>1</b>		<b>Maths</b>	<b>13</b>
1.1		Matrices . . . . .	13
1.2		Représentations . . . . .	13
1.3		Analyse . . . . .	13
1.4		Symboles courants . . . . .	14
<b>2</b>		<b>Ajouts visuels</b>	<b>14</b>
2.1		Boite . . . . .	14
<b>3</b>			<b>14</b>
<b>VII</b>		<b>Sources</b>	<b>15</b>

## Première partie

# Introduction

## 1 Méthodes de mesure

### 1.1 Mesure de la résistance

À notre connaissance, il existe deux méthodes pour mesurer la résistance d'un matériau. La première, appelé 2 points, consiste à placer les deux bornes d'un ohmmètre sur les deux bornes de l'objet que l'on cherche à mesurer, c'est-à-dire en parallèle. C'est la méthode la plus connue et la plus pratique. Mais c'est aussi la moins précise. La résistance affichée prend en compte la résistance des fils de cuivre, de la résistance due à la transition entre les câbles et autres résistances extérieurs.

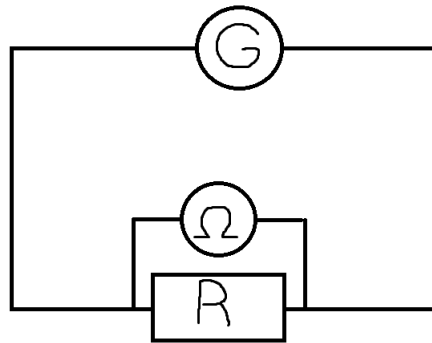


FIGURE 1 – Schéma d'une prise 2 points d'une résistance

La deuxième méthode s'appelle la méthode 4 points. La différence vient de la position des deux bornes de l'ohmmètre. Ces deux dernières sont posées sur la résistance même et non pas sur les bornes de celle-ci. Ce branchement spécifique nous permet de nous affranchir de ces résistances parasites et d'augmenter la précision de la mesure. Bien entendu, une telle précision n'est utile que pour des résistances très faibles comme observables sur un supraconducteur mais nous allons tout de même utiliser la méthode 4 points dans tout le reste de nos expériences.

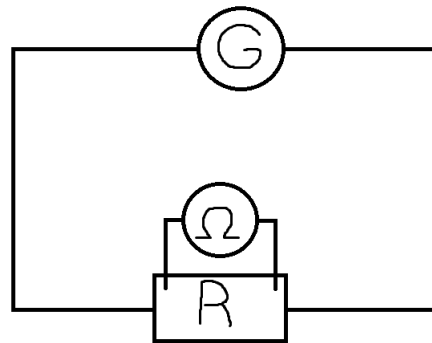


FIGURE 2 – Schéma d'une prise 4 points d'une résistance

## 1.2 Mesure de la température : thermocouple

Sachant qu'il y a constamment des transferts thermiques entre le thermostat qu'est l'air de la salle de manip et le matériau chauffé, l'erreur sur la mesure de température par le thermocouple est probablement d'autant plus grande que la température mesurée est différente de la température ambiante. La température est donc probablement systématiquement sous-estimée. Ainsi, il faudra prendre la précaution de bien coller le thermocouple au matériau dont on veut mesurer la température et pas un autre élément du système à proximité, notamment lors des mesures sur des petites surfaces comme la Allen-Bradley.

De manière plus globale, la notice du thermocouple affiche une erreur de :

+/- 1° de -50° à 0°

+/-0,5% +1° de 0°-1000°

Par ailleurs, nous avons mesuré de la glace en fusion à 2.5° et de l'eau en ébullition à 99,6°, on prendra donc une erreur de :

+ 2,5° de -50° à 0°

+/-0,5% de 0°-1000°

## 1.3 Mesure de $I(V)$ et $V(I)$

Notre générateur permettait de faire des mesures en générateur de courant mais pas en générateur de tension. Nous obtenons donc des courbes  $V(I)$ . Or, inverser ces courbes pour obtenir un  $I(V)$  est possible seulement si les matériaux suivent la loi d'ohm. Dans les autres cas (si la résistance n'est pas une constante aux paramètres standards de pression et température) on ne peut pas inverser trivialement.

## Deuxième partie

# Étude d'un conducteur : le cuivre

Lors de cette partie, nous allons étudier la résistance d'un fil de cuivre et comment celle-ci évolue en fonction de la longueur, de la section ou finalement de la température.

Nous verrons que nous pouvons déterminer une valeur de la résistivité, qui nous permet de nous abstenir de la géométrie du conducteur.

## 1 Étude de la géométrie du fil de cuivre

### 1.1 Longueur du fil

Tout d'abord, nous nous attardons sur la résistance en fonction de la longueur du fil de cuivre. En modifiant la longueur du fil lors de notre mesure en 4 points, nous remarquons bien une différence de résistance.

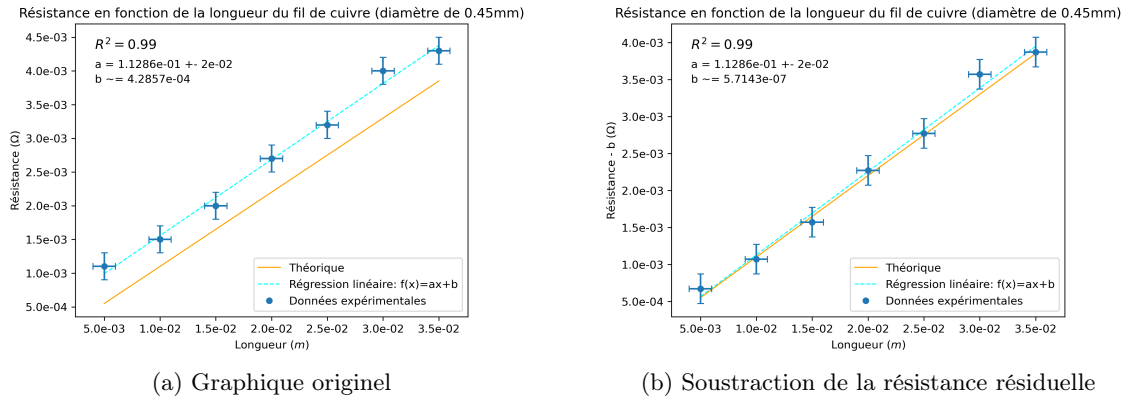


FIGURE 3 – Graphiques permettant d'obtenir la résistivité du cuivre

Sur ces graphiques, on affiche aussi la courbe théorique qui nous est donné par la valeur de la résistivité trouvée dans l'article [2].

On remarque bien une linéarité entre la longueur  $L$  et la résistance  $R$ . En effet, on a la formule :

$$R = \rho \frac{L}{S} = \rho \frac{4L}{\pi D^2} \quad (1)$$

avec  $S$  la section du cuivre,  $\rho$  la résistivité et  $D$  le diamètre du fil.

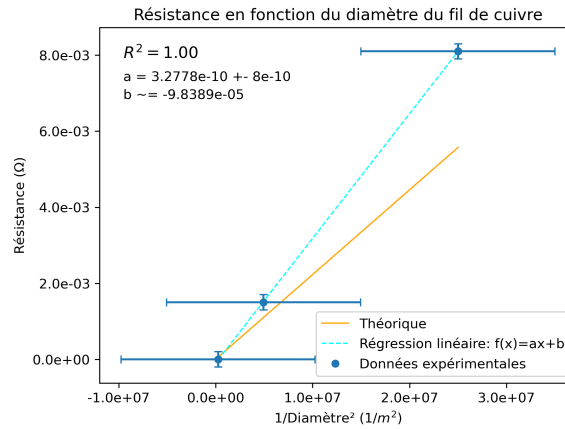
La résistance en fonction de la longueur devrait être affine, cependant, nous obtenons ici une petite différence. On peut supposer qu'une très faible résistance en série est mesurée, car même avec la mesure 4 points, notre mesure n'est pas parfaite. On retire alors cette mesure de nos valeurs.

À l'aide d'une régression linéaire, on obtient alors la pente de notre fonction affine, ce qui nous permet d'obtenir  $\rho$  avec l'équation 1. Nous utilisons la méthode 1.2 pour déterminer l'incertitude

sur la pente de notre régression linéaire et nous obtenons  $\rho = (1,8 \pm 0,3)10^{-8} \Omega \cdot m$  ce qui est très proche de la valeur théorique<sup>1</sup>.

## 1.2 Diamètre du fil

Nous pouvons ensuite tracer la résistance en fonction du diamètre (en réalité en fonction de l'inverse au carré du diamètre) pour déterminer la résistivité.



Mais ici l'incertitude devient bien trop grande et notre manque de matériel (uniquement trois fils de diamètres différents) nous donne une valeur de la résistivité de  $\rho = (2 \pm 6)10^{-8} \Omega \cdot m$ . On obtient le bon ordre de grandeur mais aucune finesse dans le résultat.

## 2 Résistivité en fonction de l'intensité

### 2.1 Considérations théoriques

Ils existent 2 types de conducteurs<sup>2</sup>. Le cuivre fait partie de la catégorie la plus commune pour lesquels les variations de la résistivité en fonction de l'intensité sont décrites par la loi d'ohm. Cette loi est en fait le régime permanent d'une application de la loi de newton lorsqu'il y a des forces de frottement. Ces forces de frottement modélisent la résistance. Lorsque la résistance est nulle, cette approximation en régime permanent n'est plus exacte, nous y reviendrons lors de l'étude du supraconducteur.

## 3 Résistivité en fonction de la température

Lors de la section 1.1, nous avons considéré que la température n'avait pas d'influence sur la résistance et donc, sur la résistivité. Mais l'intuition physique de la température nous fait questionner ce choix, nous avons donc mesuré la résistance en fonction de la température.

### 3.1 Considérations théoriques

Avec la hausse de l'agitation thermique, un modèle simple prédit que les électrons qui transportent la charge électrique ont tendance à se heurter davantage avec les ions positifs dans la structure

1. Voir article [2], à température ambiante.

2. Certains matériaux dits conducteurs sont en fait des semi-conducteurs dont la température seuil est inférieure à la température ambiante (comme le graphène dont le gap est de 0,001 eV)

cristalline du conducteur. Il y a alors une diminution du temps caractéristique entre deux collisions pour un électron, ce qui augmente la résistivité du matériau. **Nous nous attendons donc à une hausse de la résistivité avec la température pour un conducteur.** C'est-à-dire<sup>3</sup> :

$$R = R_0(1 + \alpha T) \quad (2)$$

### 3.2 Données expérimentales

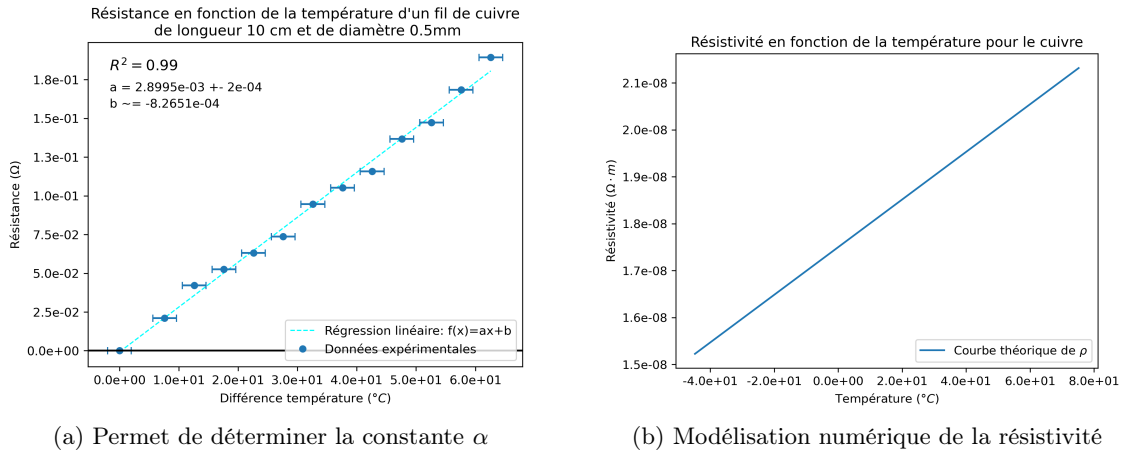


FIGURE 4

Le graphique (a)<sup>4</sup> nous permet de vérifier l'équation 2. On peut dès lors déterminer la constante  $\alpha = (2,9 \pm 0,2)10^{-3} K^{-1}$  et donc déterminer la courbe (b) de la résistivité en fonction de la température en utilisant notre  $\rho$  trouvé précédemment.

## Troisième partie

# Les semi-conducteurs

## 1 Résistivité en fonction de l'intensité

### 1.1 Considérations théoriques

La résistivité d'un silicium naturel non dopé est comprise entre  $2,310^5$  et  $6,410^4$  ohm.cm. **Le silicium de notre expérience a une résistivité de 0,1-1 ohm.cm. Nous en concluons qu'il a été dopé.** Néanmoins, ce n'est pas une diode classique car il ne couple pas une partie N et une partie P.

Une diode classique a deux propriétés notables liées au transport électronique :

- **Polarité** (ou non symétrie) : le courant ne passe dans le matériau que si la différence de potentiel suit un sens, si elle suit l'autre sens le courant ne passe pas. Cette propriété est liée au couplage d'un dopage N et d'un dopage P ce qui n'est pas le cas de notre matériau.

3. Formule trouvée en suivant la vidéo du site [1]

4. Ici, nous avons divisé  $R$  par  $R_0$  (la valeur de la résistance au  $\Delta T = 0$ ) puis retiré 1, nous obtenons alors bien une fonction affine comme donné par l'équation 2.

- **Non-linéarité** : Le matériau possède deux régimes de fonctionnement : bloqué et passant. Ces régimes de fonctionnement ne sont pas contrôlables directement, mais dépendent de la tension aux bornes de la diode et de l'intensité du courant. C'est ce deuxième phénomène, lié à la théorie des bandes, que nous allons analyser.

## 1.2 Expérimentation

# 2 Résistivité en fonction de la température

## 2.1 Considérations théoriques

## 2.2 Expérimentation

## Quatrième partie

# Le supraconducteur

## 1 Introduction de l'expérience

Finalement, nous allons étudier la résistivité d'un supraconducteur, plus précisément de l'Ibaco.

La particularité d'un supraconducteur, la raison pour laquelle nous l'étudions ici, est qu'à très basse température, proche du zéro absolu, sa résistance est nulle. Nous allons donc plonger un supraconducteur dans de l'azote liquide qui a une température d'ébullition de 77.36 K, température inférieure à la température critique de notre Ibaco pour faire la transition supra.

Nous avons à notre disposition un montage rudimentaire où un supraconducteur est attaché à une longue tige par laquelle nous faisons passer nos câbles qui ensuite rejoignent nos machines. Sur cette tige se trouve aussi une résistance Allen-Bradley qui a la particularité d'avoir une résistance logarithmique en fonction de la température. Nous allons utiliser cette résistance pour déterminer la température du montage, et ainsi du supraconducteur, durant la descente dans la cuve d'azote liquide afin d'avoir à la fin un graphique de la résistance en fonction de la température du supraconducteur.

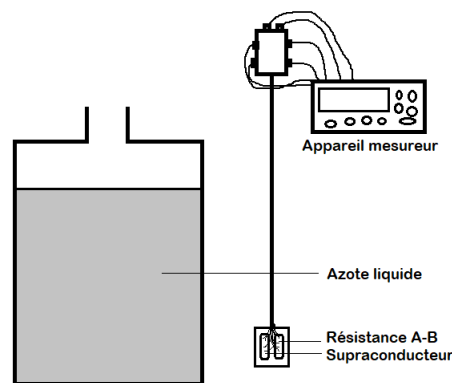


FIGURE 5 – Esquisse du montage du supraconducteur



## 2 Résistivité en fonction de l'intensité

### 2.1 Considérations théoriques

Lors de la transition supra, le supraconducteur a une résistance strictement égale à 0. Ainsi, comme énoncé précédemment, la loi d'ohm ne peut plus fonctionner, l'intensité est donc linéairement proportionnelle à la tension.

$$I \propto U$$

Comportements aux limites : A température ambiante, la plupart des supraconducteurs, ainsi que notre Ibaco, se comporte comme des conducteurs, ils suivent la loi d'ohm. De même, à température critique, il existe un courant critique maximal à partir duquel le supraconducteur se comporte de nouveau comme un conducteur.

### 2.2 Experimentation

On injecte 100 mA dans le supra, c'est le minimum du générateur et de toute façon avec un courant supérieur la résistance serait trop faible pour être mesurée.

Pour  $V(I)$ , les valeurs fluctuent et mettent du temps à se stabiliser. C'est surprenant car le régime permanent devrait être atteint en quelques fractions de secondes. Nous avons néanmoins une explication possible à ce phénomène. Le choix d'un générateur de courant ou de tension doit être fait en fonction du matériau utilisé, pour certains matériaux un choix donnera une réponse en sortie (tension ou courant) plus stable. Cependant, comme vu en introduction nous sommes contraints de choisir un générateur de tension.

## 3 Résistivité en fonction de la température

### 3.1 Considérations théoriques

Il existe deux types de matériaux supraconducteurs. Les premiers découverts réalisent leur transition à 20 K. Les seconds, dont l'Ibaco que nous étudions fait partie, font leur transition à une température plus élevée, supérieur à celle de l'azote liquide, ce qui est bien plus pratique pour nous.

### 3.2 Mesure de l'Allen-Bradley

Tout d'abord, afin d'avoir un graphique de la résistivité en fonction de la température, il nous faut connaître la température de l'Ibaco. Or un simple thermomètre au mercure ne peut réalistement pas mesurer une température avoisinant les 100 K. Nous devons donc mesurer la résistance en fonction de la température de l'Allen-Bradley à des températures acceptables, proches des conditions normales pour en déduire une fonction. Grâce à cette dernière, nous pourrions connaître la température de l'Ibaco dans la cuve d'Azote liquide.

Pour y parvenir, nous avons suivi les méthodes décrites dans l'article [3]. En effet, il nous est donné deux formules :

$$T = \frac{A \ln R}{(\ln R - B)^2} \quad (3)$$

$$\frac{1}{T} = Ax^{-1} + B + Cx + Dx^2 + Ex^3 \text{ avec } x = \ln R \quad (4)$$

Nous remarquons que la première fonction ne prend que deux paramètres, tandis que la seconde en prend 5, et cette dernière est bien plus précise. Nous voulions donc faire remarquer les différences entre ces deux équations.

Pour ce faire, nous avons pensé à faire descendre la Allen-Bradley à la température de l'azote liquide, puis de la remonter rapidement et la poser sur la table. Nous mesurons ensuite le temps à l'aide d'un chronomètre et parallèlement, la résistance de la AB. En effet, une formule plutôt simple existe dans le cas où un matériau est laissé à l'air libre, c'est-à-dire dans un thermostat :

$$T(t) = T_{ext} + (T_0 - T_{ext}) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (5)$$

avec  $T_{ext}$  la température du thermostat et  $T_0$  la température à  $t = 0$ .

Il nous suffit alors de déterminer  $\tau$  pour savoir à tout moment la température de notre AB. Nous pouvons le déterminer en utilisant un thermocouple et en le plaçant sur la Allen-Bradley pour des températures avoisinant les  $-10^\circ\text{C}$ . Ensuite, en prenant la résistance simultanément, on peut par méthode des moindres carrés déterminer l'équation 3.

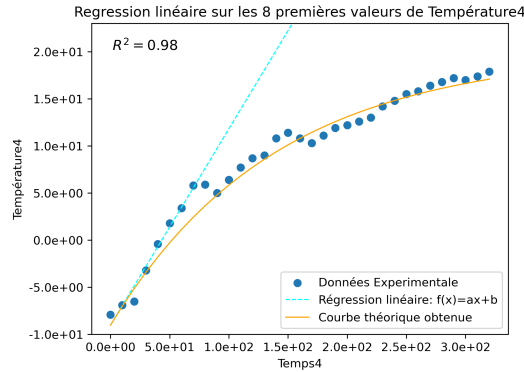


FIGURE 6

On remarque que nous pouvons déterminer  $\tau$ <sup>5</sup>. Nous trouvons alors  $\tau = (139,28 \pm 30) \text{ s}$ <sup>6</sup>.

Cependant, nous n'avons finalement pas eu le temps de faire une mesure de la AB de  $77,36\text{K}$  à  $291\text{K}$ . Nous avons juste pu faire cette mesure d'environ  $265\text{K}$  à  $291\text{K}$ . Même si notre "méthode du  $\tau$ " n'a pas pu être utilisé, nous voulions en parler ici car nous étions confiants de son potentiel.

Pour résoudre l'équation 4, nous prenons les deux couples de valeurs de la résistance connus, c'est-à-dire :  $(T = 291,05\text{K} \ R = 164,8\Omega)$  et  $(T = 77,36\text{K} \ R = 207\Omega)$ . Nous pouvons de même essayer de résoudre l'équation 3 avec les données récupérées pour déterminer  $\tau$ . Nous obtenons :

Nous pouvons remarquer que notre résolution de l'équation 3 n'est pas du tout optimale. Nous pouvons supposer que cela est dû à notre faible intervalle de données. Les valeurs n'étant réparties qu'entre  $-10$  et  $20^\circ\text{C}$ , nous ne pouvons pas utiliser cette équation.

Pour la deuxième, cependant, nous obtenons un résultat beaucoup plus cohérent, même si celui-ci n'est sûrement pas le plus précis. Nous pouvons enfin déterminer la température en fonction de la

5. Pour déterminer  $\tau$ , on fait une régression linéaire sur les premières valeurs de nos données. Celle-ci nous donne la tangente à l'origine, qui croise l'axe  $y = T_{ext}$  en  $x = \tau$ .

6. Nous n'avons pas pu déterminer la valeur théorique de l'incertitude puisque nous avons utilisé une méthode propre à nous, cependant, nous avons noté une valeur qui nous paraît cohérente vu les différents essais.

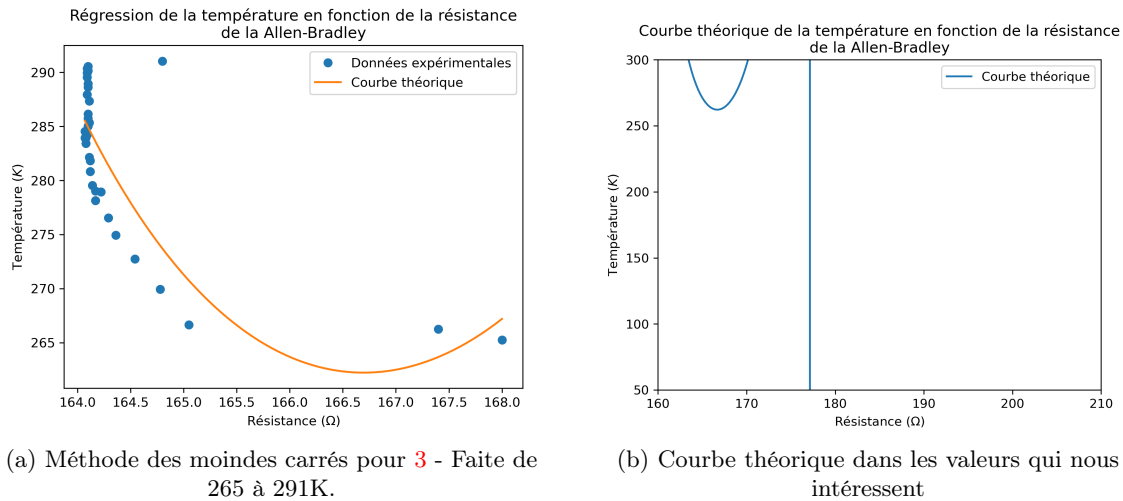


FIGURE 7

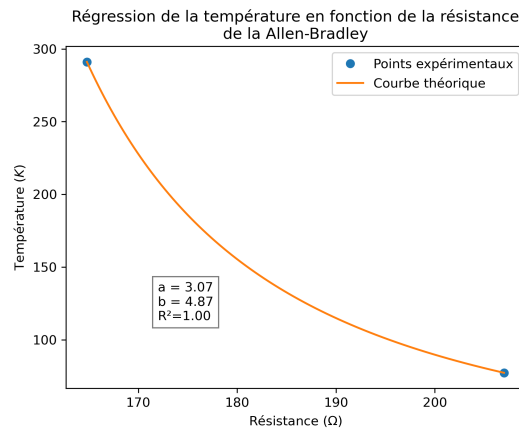


FIGURE 8 – Méthode des moindres carrés pour 4 - Faite sur les deux couples de données.

résistance de notre Allen-Bradley.

### 3.3 Expérimentation

Il y a un gradient de température de celle ambiante à celle de l'azote liquide entre le haut de la bombonne et la surface du liquide. C'est ce gradient qui va nous permettre de voir l'évolution de la résistivité du supraconducteur avec la température. Nous allons descendre par pallier, en effet, il faut attendre la thermolyse avant de prendre la mesure des deux résistances car les matériaux ont des conductivités thermiques différentes, donc des temps de thermolyse différents et donc des températures différentes en dehors de l'équilibre. Nous allons réitérer l'expérience lors de la remontée et comparer les deux graphiques.

## Cinquième partie

## Annexe



Cette partie ne doit pas rester ici, elle doit être retirée ou mise à la fin pour servir d'annexe

## 1 Incertitudes

## 1.1 Incertitude d'un produit/quotient

Soit une fonction  $f$  qui représente un quotient entre plusieurs variables  $x, y, z, ..$  et une constante  $k$  tel que :

$$f(x, y, z, ..) = k \cdot x^a y^b z^c \dots$$

Pour calculer l'incertitude, on utilise la formule simplifiée de propagation des incertitudes qui est donnée par :

$$\Delta f(x, y, z, ...) = f(x, y, z, ...) \cdot k \cdot \sqrt{\left(\frac{a\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{b\Delta y}{y}\right)^2 + \left(\frac{c\Delta z}{z}\right)^2} \quad (6)$$

Où  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  et  $\Delta z$  sont les incertitudes absolues de X, Y et Z, respectivement.

## 1.2 Incertitude d'une régression linéaire

N'ayant pas pu trouver de formule générale pour calculer l'incertitude d'une régression linéaire, nous avons mis au point notre propre formule.

Dans l'approximation où l'incertitude sur les mesures est constante, on considère cette situation :

Sur ce graphe, on obtient deux points avec leurs incertitudes en x et y. La pente de régression linéaire est alors trivialement  $a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ .

On peut alors imaginer la pente maximum  $a_{max}$  possible vu les incertitudes qui serait :

$$a_{max} = \frac{(y_2 + \Delta y) - (y_1 - \Delta y)}{(x_2 - \Delta x) - (x_1 + \Delta x)}$$

De même, on obtiendrait :

$$a_{min} = \frac{(y_2 - \Delta y) - (y_1 + \Delta y)}{(x_2 + \Delta x) - (x_1 - \Delta x)}$$

On obtient alors

$$\Delta a = \frac{a_{max} - a_{min}}{2} \quad (7)$$

avec  $\Delta a$  notre incertitude sur la pente de régression linéaire.

## Sixième partie

# Catalogue



Cette partie ne doit pas rester ici, elle doit être retirée ou mise à la fin pour servir d'annexe

## 1 Maths

### 1.1 Matrices

$$\begin{matrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{matrix}$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$$

### 1.2 Représentations

$$\vec{v} = \langle v_1, v_2, v_3 \rangle$$

$$\left\{ \frac{1}{2} \right\}$$

$$\left[ \frac{1}{2} \right]$$

$$\left( \frac{1}{2} \right)$$

$$\left| \frac{1}{2} \right|$$

$$\langle \Psi | \Psi \rangle = |\Psi|^2$$

### 1.3 Analyse

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x)$$

$$\sum_{i=1}^n a_i$$

$$\int_a^b f(x)dx$$
$$\frac{d}{dx}f(x)$$
$$\frac{\partial}{\partial x}f(x,y)$$

1.4 Symboles courants

$$A \cup B, A \cap B, A \subseteq B, A \in B, A^c$$
$$\infty, \forall, \exists, \emptyset$$
$$\mathbb{N}, \mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$$
$$=, \neq, <, >, \leq, \geq, \approx$$
$$\wedge, \vee, \neg, \implies, \iff$$
$$\Gamma(x), \zeta(x), \operatorname{erf}(x)$$
$$\begin{cases} x + y = 2 \\ 2x - y = 1 \end{cases}$$

2 Ajouts visuels

2.1 Boite



## Septième partie

# Sources

## Références

- [1] Évolution de la température d'un système au contact d'un thermostat, 2020. <https://www.lumni.fr/video/evolution-de-la-temperature-d-un-systeme-au-contact-d-un-thermostat> - Consulté le 14 avril 2023.
- [2] R. A. Matula. Electrical resistivity of copper, gold, palladium, and silver. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, page 1161, 1979. [Lien](#).
- [3] H. Weinstock and J. M. Parpia. Temperature, its measurement and control in science and industry. *Illinois Institute of Technology*, page 788, 1972. [Lien](#).