

LP03

Remi de Guiran - Alexandre Pricoupenko

Niveau : L3

Commentaires du jury

- **2017** : Cette leçon ne concerne pas que la conduction dans les métaux
- **2014** : Dans la présentation du modèle de Drude, les candidats doivent être attentifs à discuter des hypothèses du modèle, en particulier celle des électrons indépendants. Le jury se permet par ailleurs de rappeler aux candidats que les solides ne sont pas tous métalliques. Jusqu'en 2013 le titre était : Mécanismes de la conduction électrique. Loi d'Ohm. Effet Hall. Applications.
- **2009-2010** : Il est important de bien distinguer les grandeurs microscopiques et les grandeurs moyennes
- **2008** : La conduction électrique dans les semi-conducteurs est en général présentée de manière très approximative
- **2001** : Si l'on utilise le modèle de Drude, on s'efforcera d'en préciser les limites. Une approche probabiliste peut être envisagée. La théorie quantique de la conduction peut être évoquée.
- **Rmq Tristan** : Le plan est vraiment toujours le même. Ça repose sur l'évolution historique des différents modèles, qui collent de plus en plus à l'expérience. L'an dernier un gadjo avait mis des diapos avec les bilans theorie vs exp en ajoutant chaque modèle au fur et à mesure de la leçon askip les correcteurs ont trouvé ça shiny je pense qu'il faut le faire

Prérequis

- Loi de l'électrocinétique
- Mécanique quantique ondulatoire et opératoire, et perturbative
- Thermodynamique statistique (équipartition)
- Fermi-Dirac

Expériences

- ☕ Mesure par effet Hall de la concentration en porteurs d'un échantillon de Germanium dopé

Table des matières

1	Le modèle de Drude	3
1.1	Principe et hypothèses	3
1.2	Calculs Partie à zapper dans la présentation (agreg docteur)	4
1.3	Ordre de grandeur de la conductivité du cuivre à $300K$	5
1.4	Limite du modèle, discussions	6

2	Gaz d'électrons libres de Fermi, modèle de Sommerfeld	7
2.1	Motivations et hypothèses	7
2.2	Vitesse des électrons	8
2.3	Etat fondamental à N électrons	9
2.4	Mécanisme de la conduction	9
3	Électrons dans un potentiel périodique, modèle des bandes	12
3.1	Détermination expérimentale de la concentration en porteurs dans un semi conducteur	12
3.2	Obtention des bandes	12
3.3	Conséquences sur la conduction : mécanisme de la conduction(ou de la non-conduction) . . .	14

Introduction

SLIDE : rappels

Introduction : rappels

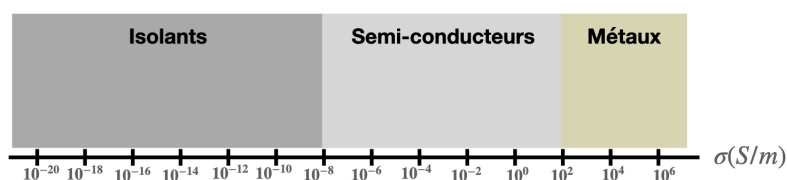
- * L'application d'un champ électrique sur un matériau peut engendrer un déplacement de charges électriques
- * Déplacement caractérisé localement par un bilan mésoscopique (volume V) : $\vec{j} = 1/V \sum_i q_i \vec{v}_i$
- * La réponse du matériau à un champ $\vec{E}$ est caractérisé par la conductivité $\vec{\sigma}$ telle que $\vec{j} = \vec{\sigma} \vec{E}$
 - * $\vec{\sigma}$ est un tenseur d'ordre 2 (matrice 3x3)
 - * $\rightarrow$ si isotropie de la réponse du matériaux : $\vec{\sigma} = \sigma \vec{I}_d$ (on se restreindra à cette hypothèse dans la leçon) ce qui permet d'écrire $\vec{j} = \sigma \vec{E}$

2

FIGURE 1 – Mate moi ce schéma frerot

SLIDE : échelle de conductivités

Introduction : valeurs de conductivités



3

FIGURE 2 – Mate moi ce schéma frerot

But

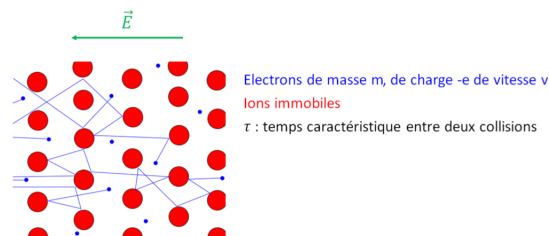
Il apparaît donc qu'une description convenable de la conduction électrique dans les solides doit pouvoir rendre compte de l'étendue de cette échelle. Le but de cette leçon est de présenter différentes descriptions de la conduction électrique dans les solides, en allant de la moins complexe à la plus complexe

1 Le modèle de Drude

1.1 Principe et hypothèses

SLIDE : principe

I. Modèle de Drude (1900) : principe



* On considère un gaz d'électrons, soumis à un champ électrique

4

FIGURE 3 – Mate moi ce schéma frerot

SLIDE : hypothèses

I. Modèle de Drude (1900) : hypothèses

- * Électrons collisionnent uniquement avec les atomes
- * Collisions instantanées : $\vec{v}_{in} \rightarrow \vec{v}_{out}$ En dehors des collisions, les électrons ne sont soumis qu'à $\vec{E}$
- * Taux de probabilité de collision : $1/\tau$ où (τ temps moyen entre 2 collisions, ne dépend que de T)
- * Equilibre thermodynamique réalisé :
 - * T uniforme $\rightarrow \tau$ uniforme
 - * $\vec{v}_{out}$ de direction aléatoire et de norme moyenne liée à T

5

FIGURE 4 – Mate moi ce schéma frerot

1.2 Calculs Partie à zapper dans la présentation (agreg docteur)

Lien proba de collision/temps moyen de collision :

- On a N_0 électrons. A $t_0 = 0$ (origine du temps quelconque), aucun n'a encore subit de collision ?
- Comme sur dt on a $dN(t) = N(t)dt/\tau$ électrons on subit une collision. Le nombre d'électrons qui n'ont pas subit de collision à l'instant t depuis t_0 vérifie : $\frac{dN}{dt}(t) = -\frac{N(t)}{\tau}$ et donc :

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$$

Donc à l'instant t , la proba pendant dt que les électrons qui n'ont pas encore collisionné subissent une collision vaut $\left| \frac{dN}{N_0}(t) \right| = \frac{dt}{\tau} e^{-t/\tau}$.

Donc depuis t_0 , le temps moyen de libre parcours (avant la première collision) vérifie (par IPP) :

$$\int_0^\infty t e^{-t/\tau} dt / \tau = \tau \int_0^\infty \frac{t}{\tau} e^{-t/\tau} \frac{dt}{\tau} = \tau \int_0^\infty u e^{-u} du = \tau$$

Donc τ correspond au temps moyen entre 2 collisions.

Equation différentielle stochastique pour 1 électron :

- Pour 1 électron, pendant dt , 2 possibilités :
- Sans collision $\vec{p}(t+dt) = \vec{p}(t) + \overrightarrow{f_{ext}}dt$ proba d'occurrence $1 - dt/\tau$
- Avec collision à t : $\vec{p}(t+dt) = \overrightarrow{\eta_{out}}(t) + \overrightarrow{f_{ext}}dt$ proba d'occurrence dt/τ

Donc le bilan tenant compte des proba donne $\vec{p}(t+dt) = (1 - dt/\tau) (\vec{p}(t) + \overrightarrow{f_{ext}}dt) + dt/\tau (\overrightarrow{\eta_{out}}(t) + \overrightarrow{f_{ext}}dt)$ et en ne tenant compte que des termes d'ordre 1 ou plus petit on trouve :

$$\boxed{\frac{d\vec{p}}{dt} = -\frac{\vec{p}}{\tau} + \overrightarrow{f_{ext}} + \frac{\overrightarrow{\eta_{out}}}{\tau}}$$

- On retrouve bien ce qui avait été modélisé vos précédentes années par une force de friction en $-\frac{\vec{p}}{\tau}$. **Cette approche plus "fine" permet de saisir plus en profondeur l'origine de ce terme.**
- Mais que dire du terme de collision $\frac{\overrightarrow{\eta_{out}}}{\tau}$? L'hypothèse étant que "la vitesse de sortie suit une statistique isotrope et sa norme moyenne est liée à T ", on a donc si on fait une moyenne sur un grand nombre d'électrons $\langle \overrightarrow{\eta_{out}} \rangle = \vec{0}$

Moyenne d'ensemble sur tous les électrons :

- On a :
- $\langle \frac{d\vec{p}}{dt} \rangle = -\frac{\langle \vec{p} \rangle}{\tau} + \langle \overrightarrow{f_{ext}} \rangle + \frac{\langle \overrightarrow{\eta_{out}} \rangle}{\tau}$
- $\langle \overrightarrow{\eta_{out}} \rangle = \vec{0}$
- $\overrightarrow{j} = -ne \langle \vec{v} \rangle = -\frac{ne}{m} \langle \vec{p} \rangle$

- Et on suppose

- une force d'origine électrique $\overrightarrow{f_{ext}} = -e\overrightarrow{E_{ext}}$
- $\overrightarrow{E_{ext}}$ uniforme et indépendant du temps

- On déduit :

$$\frac{d\vec{j}}{dt} + \frac{\vec{j}}{\tau} = \frac{ne^2}{m} \vec{E}_{ext}$$

- En supposant le régime permanent atteint pour $\vec{j}$, on trouve : $\vec{j} = \frac{\tau ne^2}{m} \vec{E}_{ext}$

Message clé

Dans le modèle de Drude on trouve

$$\vec{j} = \frac{\tau ne^2}{m} \vec{E}_{ext}$$

soit

$$\sigma = \frac{\tau ne^2}{m}$$

On peut aussi définir une mobilité μ telle que $\langle \vec{v} \rangle = \mu \vec{E}_{ext}$ qui traduit l'aptitude des électrons à se déplacer sous l'effet d'un champ électrique :

$$\mu = -\frac{\tau e}{m}$$

Outre la densité de porteurs de charge, ce temps τ apparaît comme un terme fondamental pour décrire l'aptitude d'un matériau à conduire le courant électrique dans le cadre du modèle de Drude

1.3 Ordre de grandeur de la conductivité du cuivre à 300K

Ici le but est d'évaluer cette conductivité dans le cadre du modèle de Drude en "connaissance de cause", c'est à dire qu'on sait beaucoup plus de chose sur le cuivre aujourd'hui qu'en 1900.

Grandeurs d'intérêt :

Avec $\sigma = \frac{\tau ne^2}{m}$ on cherche :

- les valeurs de la densité d'électrons libres n_{Cu} . On sait compte tenu de la structure cristalline du cuivre et du fait qu'un seul électron par atome peut conduire l'électricité : $n_{Cu} \sim 10^{29} m^{-3}$
- et le temps τ_{Cu}^{Drude}

Estimation de τ_{Cu}^{Drude} :

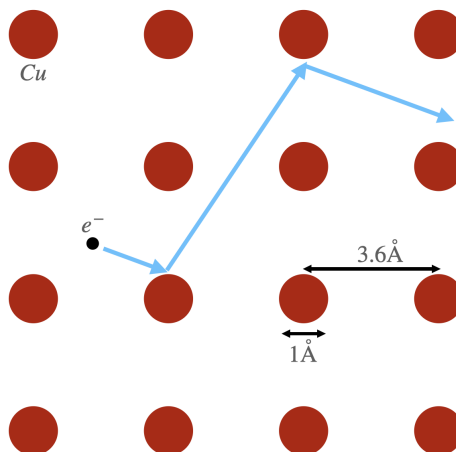


FIGURE 5 – Électron libre dans le cuivre selon le modèle de Drude

En remarquant que $\tau = l_{pm}/v_0$ où

- l_{pm} est le libre parcours moyen des électrons. Compte tenu de la structure cristalline du cuivre on estime $l_{pm}^{Cu} \sim 10\text{\AA}$ **ce qui est déjà optimiste !**
- v_0 la vitesse d'agitation moyenne des électrons (**pas la vitesse $\langle \vec{v} \rangle$ de transport du courant !!**). En considérant que la distribution en vitesse des électrons suit une statistique de Maxwell-Boltzmann $v_0 = \sqrt{\frac{3k_b T}{m}}$ on trouve à $300K$: $v_0 \sim 10^5 m.s^{-1}$

On trouve donc :

$$\tau_{Cu}^{Drude}(300K) \sim 10^{-14} s$$

Ce qui donne

$$\sigma_{Cu}^{Drude}(300K) \sim \frac{10^{29} (1.6 \times 10^{-19})^2 10^{-14}}{10^{-30}} = 3 \times 10^7 S/m \quad \text{avec } \sigma_{Cu}^{exp}(300K) \simeq 6.2 \times 10^7 S/m$$

Pas mal du tout !!

Dépendance de σ^{Drude} avec T

Avec $\tau = \frac{l_{pm}}{v_0}$, le l_{pm} étant considéré indépendant de T et v_0 suivant la statistique de Maxwell-Boltzmann ($v_0 \propto \sqrt{T}$), on trouve :

$$\sigma = \tau \frac{me^2}{m} \propto \frac{1}{\sqrt{T}}$$

1.4 Limite du modèle, discussions

Expérience déterminant le l_{pm}

SLIDE : extrait BUP

I. Modèle de Drude (1900) : détermination $l_{pm}(Cu)$

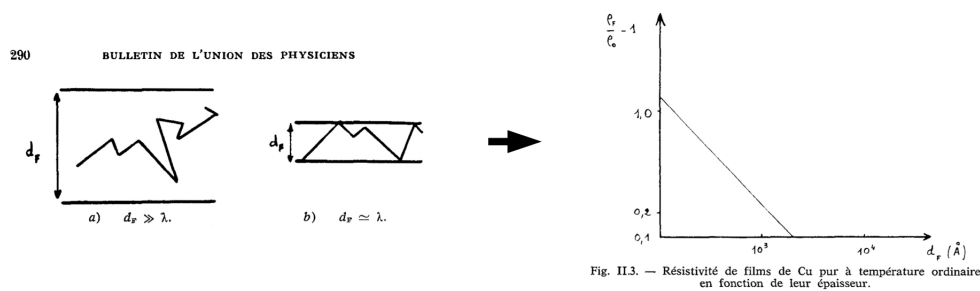


FIGURE 6 – Mate moi ce schéma frérot

Ce type d'expérience permet de trouver $l_{pm} \sim 100\text{\AA}$!! Il semble impossible de justifier un tel libre parcours moyen en considérant les électrons comme des particules évoluant au gré des collisions avec les ions comme on l'a supposé. **Cela semble incompatible avec le modèle de Drude.**

Conséquence sur v_0 : Avec $\tau \sim 10^{-14} s$: $v_0 = \frac{l_{pm}}{\tau} \sim 10^6 m/s$. C'est énorme!! beaucoup plus grand que la vitesse moyenne d'agitation thermique pour la statistique de M.B.

Dépendance en température :

- Drude : $\sigma \propto 1/\sqrt{T}$
- Expérience : $\sigma \propto 1/T$ aux température usuelles

Bilan du modèle de Drude :

Succès	Échecs
- Bon ordre de grandeur pour la conductivité de certain métaux donc de τ	- Libre parcours moyen minoré d'un ordre de grandeur
	- Vitesse d'agitation incompatible avec Maxwell-Boltzmann
	- Dépendance en température
	- Ne rend pas compte qu'il existe des isolants et des conducteurs

Message clé

Le modèle de Drude fournit une expression simple de la conductivité, et fonctionne pour certains métaux à température ambiante. Mais on a réalisé que ça a fonctionné "par chance" car certains points posent problème. On va chercher à aller plus loin en prenant en compte le caractère quantique des électrons

2 Gaz d'électrons libres de Fermi, modèle de Sommerfeld

En 1926, Fermi et Dirac introduisent la statistique de Fermi-Dirac qui régit le comportement des fermions comme les électrons. En 1927, Sommerfeld applique cette statistique aux électrons responsables de la conduction électrique dans les métaux.

2.1 Motivations et hypothèses

Motivations

- On garde l'expression de la conductivité électrique du modèle de Drude qui a tout de même permis d'aboutir au bon ordre de grandeur de la conductivité pour le cuivre à température ambiante.
- En appliquant Maxwell-Boltzmann, on a réalisé une hypothèse forte. En effet les densités ($n_{Cu} \sim 10^{29} m^{-3}$) et celle d'un gaz parfait dans les conditions usuelles ($n_{GP} \sim 10^{25} m^{-3}$) diffèrent de 4 ordres de grandeurs. **On cherche donc à traiter quantiquement les électrons.** (*Rmq : Et nous allons voir que cette nouvelle hypothèse a un impact très important*)

But

Il est important de clarifier le but de cette partie : puisque σ garde la même forme, on cherche à mieux "maîtriser" le terme τ . On cherche donc une nouvelle expression de la vitesse des électrons, en cohérence avec les valeurs de τ et l_{pm} imposées par l'expérience.

Hypothèses : pas d'interactions électrons-électrons et électrons-ions donc le seul potentiel intervenant dans la résolution du problème est un potentiel extérieur $\rightarrow$ on considère les électrons confinés dans un cube de longueur L (petit schéma qui va bien avec le repère $(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$)

2.2 Vitesse des électrons

Schrodinger stationnaire : puisqu'on étudie maintenant l'électron confiné dans un cube de métal de volume V en tant que particule quantique, on décrit son état par la fonction d'onde ψ solution de l'équation de Schrödinger stationnaire avec potentiel nul. $\psi(\vec{r}, t)$ est donc de la forme $\psi(\vec{r}, t) = \phi(\vec{r})e^{-iEt/\hbar}$

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\phi(\vec{r}) = -\frac{\hbar^2}{2m}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\phi(\vec{r}) = E\phi(\vec{r}) \quad (1)$$

La solution de cette équation s'écrit :

$$\phi_{\vec{k}}(\vec{r}) = \frac{1}{\sqrt{V}}e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}} \quad \text{d'énergie } E(\vec{k}) = \frac{\hbar^2 \vec{k}^2}{2m}$$

où $\vec{k}$ est le vecteur d'onde et le coefficient en $1/\sqrt{V}$ apparaît pour normaliser la fonction d'onde

Important

Il est important de remarquer que $\psi_{\vec{k}}(\vec{r}, t)$ est un vecteur propre de l'opérateur impulsion $\vec{p} = -i\hbar\vec{\nabla}$ associé à la valeur propre $\hbar\vec{k}$, car

$$-i\hbar\vec{\nabla}e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}} = \hbar\vec{k}e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}}$$

Or, si une particule est dans un état propre d'un opérateur donné, la valeur définie de l'observable associée à l'opérateur est alors la valeur propre associée à cet état propre.

Dans notre cas, on peut donc associer à l'électron décrit par la fonction d'onde

$\psi_{\vec{k}}(\vec{r}, t)$ une impulsion

$$\vec{p} = \hbar\vec{k} \quad \text{et donc une énergie } E(\vec{k}) = \frac{\vec{p}^2}{2m}$$

Conditions aux limites - quantification des états accessibles : en prenant des conditions aux limites périodiques dans la volume $V = L^3$, conditions appelées *conditions de Born-Von Karman*, on obtient

$$\begin{cases} \phi_{\vec{k}}(x+L, y, z) = \phi_{\vec{k}}(x, y, z) \\ \phi_{\vec{k}}(x, y+L, z) = \phi_{\vec{k}}(x, y, z) \\ \phi_{\vec{k}}(x, y, z+L) = \phi_{\vec{k}}(x, y, z) \end{cases} \quad (2)$$

Ces conditions imposent d'avoir $e^{ik_x L} = e^{ik_y L} = e^{ik_z L} = 1$ et donc de quantifier le vecteur d'onde :

$$k_i = \frac{2\pi}{L}a_i \quad \text{avec } i \in \{x, y, z\} \text{ et } a_i \in \mathbb{Z}$$

L'espace des k est donc constitué d'un réseau cubique de côté $\frac{2\pi}{L}$, donc chaque point occupe un espace $\frac{(2\pi)^3}{L^3} = \frac{(2\pi)^3}{V}$. Cet espace des k a ainsi une densité uniforme $\frac{V}{(2\pi)^3}$

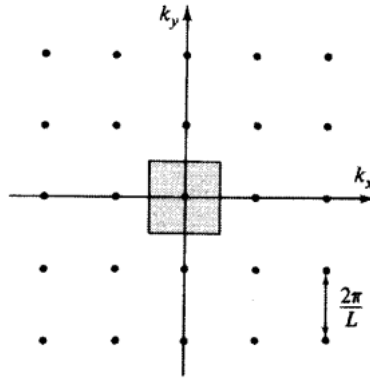


FIGURE 7 – Espace des phase 2D

L'espace des $\vec{k}$ accessibles est donc un réseau cubique de coté $\frac{2\pi}{L}$. On peut associer à chaque état un volume occupé qui vaut donc $\Omega = \left(\frac{2\pi}{L}\right)^3 = \frac{(2\pi)^3}{V}$

2.3 Etat fondamental à N électrons

Hypothèse : on se place à $T = 0$ (on verra que cette hypothèse ne change pas drastiquement les choses même aux températures usuelles)

Méthode :

- Principe de Pauli : 1 e^- par état accessible, pour $\vec{k}$ accessible donné, 2 spins possibles donc 2 e^- au max pour $\vec{k}$ donné
- Principe d'Aufbau : remplissage par énergie croissante

Conséquences : *Petit dessin qui va bien ?* Pour des échantillons macroscopiques, N très grand ! Avec $E \propto k^2$ on aboutit à une distribution sphérique de k_f appelée **sphère de Fermi**. Elle vérifie $\frac{4}{3}\pi k_f^3 \times \frac{2}{\Omega} = N$ et donc :

$$n = \frac{N}{V} = \frac{k_f^3}{3\pi^2} \quad \text{ouf! } k_f \text{ est bien une propriété du matériau! (} n \text{ intensif)}$$

2.4 Mécanisme de la conduction

Raisonnement : on fait un raisonnement semi-classique. Chaque état accessible est état propre de l'opérateur impulsion $\rightarrow$ à chaque état est associé une vitesse $\vec{v}$. **Le modèle de Drude** : implique un $\langle \vec{v} \rangle$ additionnel à chaque électron qu'on note $\delta \vec{v}$ et donc :

$$\delta \vec{v} = -\frac{e\tau}{m} \vec{E}_{ext} \quad \text{et donc} \quad \delta \vec{k} = \frac{\delta \vec{p}}{\hbar} = -\frac{e\tau}{\hbar} \vec{E}_{ext}$$

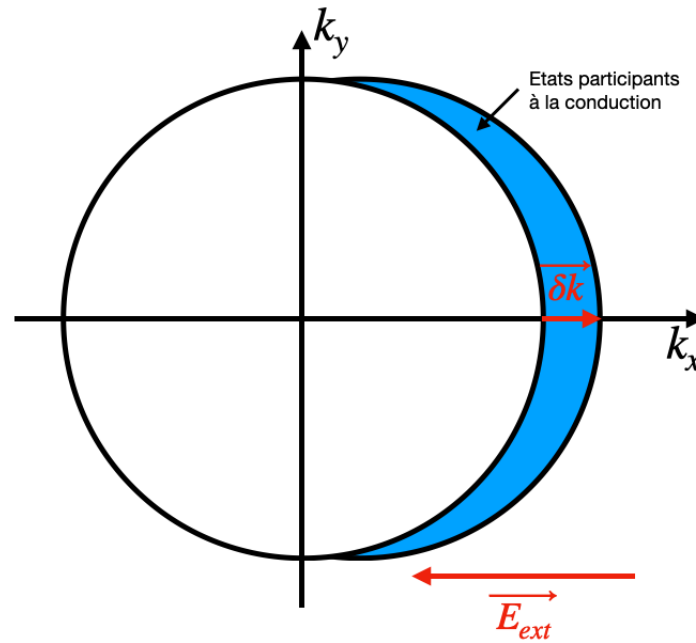


FIGURE 8 – Conduction réalisée par les électrons en bord de la sphère de Fermi

Message clé

On voit bien que seuls les états en bord de sphère participent à la conduction

Conséquences, ordres de grandeur :

- Drude donnait pour le cuivre $\tau \sim 10^{-14} \text{ s}$
- Avec $n_{Cu} \sim 10^{29} \text{ m}^{-3}$

Seuls les électrons en bord de sphère contribuent à la conduction, donc on prend pour vitesse d'agitation $v_0 = v_f = \frac{\hbar k_f}{m} \sim 10^6$. On retrouve la vitesse d'agitation qu'imposait le modèle de Drude en considérant $\tau \sim 10^{-14}$ et $l_{pm} \sim 10^2 \text{ Å}$!! Donc le l_{pm} trouvé expérimentalement est désormais compatible avec la vitesse d'agitation des électrons!

Important

Ici on a raisonné en supposant $T = 0K$ ce qui grandement simplifié les calculs. Mais ça ne change pas les ordres de grandeurs car la distribution de Fermi-Dirac ne change pas suffisamment entre $0K$ et $300K$ pour changer significativement les ordres de grandeurs (à garder pour les question : *pour que ça change significativement, il faudrait avoir une température pour laquelle $k_b T \simeq E_f$ qui est bien plus grande que $300K$ pour les métaux*). On peut donc considérer σ indépendant de T

Message clé

La prise en compte du caractère quantique des électrons (via Fermi-Dirac) permet d'expliquer les valeurs aberrantes trouvées dans la partie 1.

	Drude	Sommerfeld
Conductivité électrique	$\sigma = \frac{ne^2\ell}{m_e v_*}$ $v_* = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}}$ $\sigma \propto \frac{1}{\sqrt{T}}$	$\sigma = \frac{ne^2\ell}{m_e v_F}$ $v_F = \frac{\hbar k_F}{m}$ $\sigma \text{ indépendante de } T$

Donc on a pu expliquer certaines incohérences du modèle classique mais on trouve toujours des incohérences avec l'expérience :

- une conductivité indépendante de T dans le modèle de Sommerfeld ! Encore pire que la dépendance en $\sqrt{T}$ du modèle classique !
- on arrive toujours pas à justifier l'étendue de l'échelle de conductivité selon les matériaux

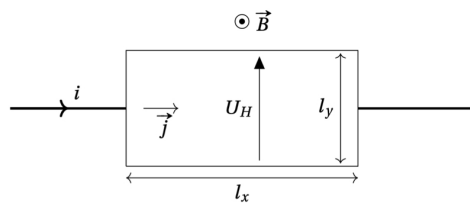
Une hypothèse très forte réalisée est qu'on a négligé les interactions entre constituants du matériau (**électrons libres**). La partie suivante consiste à prendre en compte l'interaction des électrons avec les ions *ie* avec le réseau

3 Électrons dans un potentiel périodique, modèle des bandes

3.1 Détermination expérimentale de la concentration en porteurs dans un semi conducteur

SLIDE : Principe (*Poly TP Electromag, mesure champs mag*)

II. Effet Hall : mesure d'une concentration en porteur



$$E_H = \frac{iB}{nql_y l_z}$$

$$U_H = \int_0^{l_y} E_H dy = \frac{iB}{nql_z} = R_H \frac{iB}{l_z}$$

7

FIGURE 9 – Principe Effet hall

L'utilité de la sonde à effet Hall est inversée. Plutôt que d'utiliser une concentration en porteurs bien connue pour mesurer un champ magnétique, on fait l'inverse ici -, on utilise une champ B connu pour aboutir à une concentration en porteurs.

Ici on voit que la concentration en porteurs est des ordres de grandeurs en dessous de celle du cuivre? Comment est ce possible? En supposant 1 électron libre par atome, impossible d'arriver à une concentration en porteur de cet ordre de grandeur.

De plus, on voit clairement l'intérêt d'avoir une concentration en porteurs plus faible. Puisque la sensibilité pour mesurer le champ magnétique (utilité "normale" d'une sonde à effet hall) est bien meilleure!

3.2 Obtention des bandes

Les calculs précédents ont utilisé l'hypothèse que les niveaux d'énergie étaient répartis de manière continue. C'est vrai dans le cas des électrons libres, mais si les électrons interagissent avec un réseau périodique il apparaît des zones d'énergies permises et interdites appelées bandes. Pour simplifier, on va se placer dans le cas d'un réseau en 1 dimension donné par une chaîne atomique périodique de pas a .

Le théorème de Bloch dit que dans un potentiel périodique, une particule peut être décrite par une onde de vecteur d'onde k et que la périodicité du réseau se retrouve dans l'espace réciproque $\rightarrow$ périodicité en $\frac{2\pi}{a}$

Cela implique déjà un changement important dans la distribution des états :

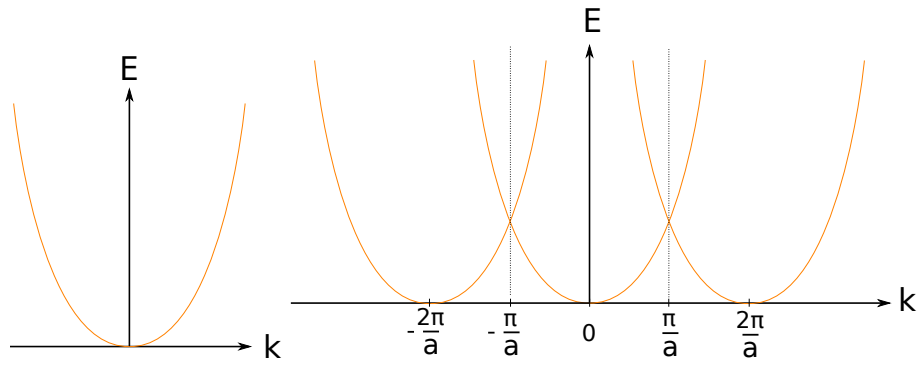
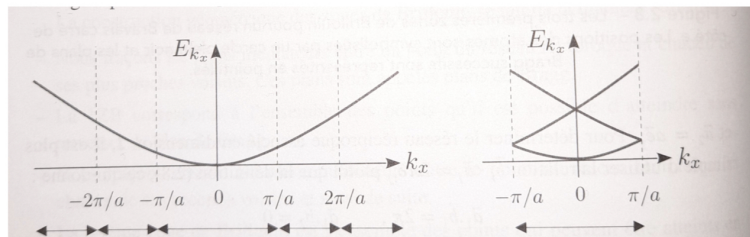


FIGURE 10 – Energie accessibles des électrons dans le cas **libre** (à gauche) et dans le cas d'électrons **dans un potentiel périodique** à droite

De plus la périodicité de l'espace réciproque permet de se restreindre à l'intervalle $[-\frac{\pi}{a}; \frac{\pi}{a}]$ (ie 1ere ZDB) ce qui donne :

SLIDE : Bandes sur 1ereZDB

I. Influence du potentiel cristallin



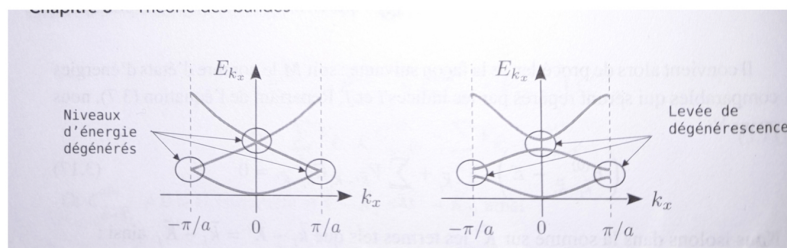
8

FIGURE 11 – Crédit livre Adeline Crépieux

Influence du potentiel cristallin

On constate qu'au bord de la zone de Brillouin, les énergies sont dégénérées. Les électrons interagissent donc entre eux (en termes d'ondes il y a interférence) ce qui entraîne une levée de dégénérescence :

I. Influence du potentiel cristallin

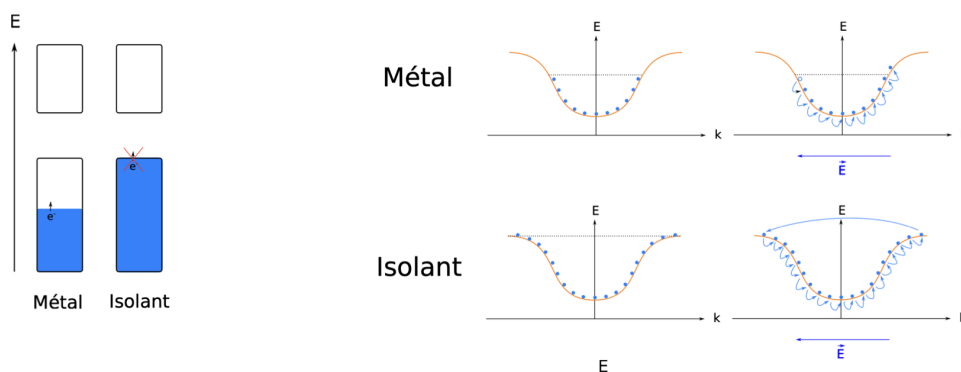


9

FIGURE 12 – Crédit livre Adeline Crépieux

3.3 Conséquences sur la conduction : mécanisme de la conduction(ou de la non-conduction)

I. Influence du potentiel cristallin : mécanisme de la conduction (ou la non...)



10

FIGURE 13

Conclusion

Résumé, insister sur le fait qu'on est obligé de passer en quantique et de prendre en compte le potentiel du réseau cristallin pour expliquer la conduction électrique, et surtout **expliquer pourquoi des matériaux conduisent et d'autres isolent**.

Ouverture sur les semiconducteurs, à "mi chemin" entre isolant et conducteur qui ont permis de devenir les humains que nous sommes.

Message clé

le message est

Compléments

Questions

- **Définition du Siemens en USI** Utiliser la relation $j = \sigma E$ et $F = qE$. $\text{kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3 \text{A}^{-2}$
- **Quel objet mathématique est la conductivité ?** Un tenseur. A prendre en compte pour l'effet Hall.
- **Redistribution des vitesses. C'est une hypothèse ou un résultat ?** C'est une hypothèse. **C'est toujours vrai ?** Non. En mécanique du point, quand on envoie 2 objets l'un sur l'autre, certaines directions de sortie sont plus probables. Là, il faut comparer les masses et vitesses de l'électron et des atomes. Pour avoir un modèle pertinent, il faudrait passer par la méca Q.
- **Dans la formule de σ , quels sont les paramètres universels et les paramètres modèle-dépendant ?** e est universel. Les autres sont modèle-dépendant. En particulier, m est une masse effective qui dépend du modèle avec lequel on décrit l'électron.
- **Définition de la résistivité.** Inverse de la conductivité (au sens matriciel quand on travaille avec des tenseurs).
- **Pour passer au modèle de Sommerfeld, on considère que le hamiltonien est juste $\frac{p^2}{2m}$. C'est juste ça ?** On peut avoir un potentiel, si c'est un potentiel extérieur et pas un potentiel qui dépend des interactions entre électrons.
- **Quelles auraient été les conditions aux bords pour un potentiel infini ?** ϕ et $\nabla\phi$ nuls au bord. Pour retrouver les états, on peut considérer des solutions en superposition de 2 ondes. Ça fait qu'on a 2x moins de solution. Avoir l'image d'une onde stationnaire.
- **Est-ce que l'hypothèse de température nulle pour la mer de Fermi est si aberrante ?** Comparer énergie d'agitation thermique et énergie de Fermi. Ça devient significatif à partir de la température de Fermi, de l'ordre de 1000K.
- **Comment faire le calcul à température non nulle ?** Avec un développement limité, ou avec la répartition de Fermi-Dirac.
- **Dessiner les graphes des fonctions de répartition de Boltzmann, Fermi-Dirac et Bose-Einstein.**
- **Refaire le lien entre vitesse et vecteur d'onde.**
- **Comment on détermine une vitesse dans le modèle de bandes ?** Parler de vitesses de groupe et de phase.
- **Dans le schéma de la sphère de Fermi translatée, qu'est-ce qu'on qualifie de trou et d'électron ?** Un croissant de lune d'électrons et un de trous.
- **Comment mesurer les densités d'électron et de trou ? Comment différencier les deux ?** Par effet Hall : ils prennent des directions différentes.
- **Prérequis. Qu'est-ce qui est demandé en MQ ?** Résolution de Schrödinger dans des cas simples. Manquerait le théorème de Bloch et la théorie des perturbations.

- **Qu'est-ce que le germanium ?** Semi-conducteur **Qu'est-ce ?** Matériau avec des bandes de conduction et de valence séparées mais proches, de sorte qu'on puisse avoir de la conduction en ajoutant peu d'énergie.
- **Qu'est-ce que le dopage ?**
- **Comment on dope un matériau expérimentalement ?** (cas de dopage N et P)
- **Facteur τ pour ralentir les électrons. Sans ça, est-ce que les électrons pourraient accélérer indéfiniment ?** Effets relativistes : on est limité à c . **C'est mesurable expérimentalement ?** Oui, avec des expériences de déviation d'électrons dans un champ B. La déviation dépend de la vitesse. c.f. expérience de Bertozzi.
- **Comment faire une exp semi-classique dans un matériau avec des bandes ?** Evaluer la masse effective en connaissant la structure de bandes.
- **Comment mesurer la valeur de k_F pour un matériau donné ?** En envoyant de la lumière sur un matériau, on excite le plus facilement des électrons au bord de la sphère de Bloch. On excite un électron qui passe de l'autre côté de la sphère et qui fait donc un saut de $+k_F$ à $-k_F$.
- **Grandeur maximale pour le libre parcours moyen ?** Peut s'approcher de l'infini. Exemple des supraconducteurs.
- **Prenons un conducteur, un supraconducteur et un isolant. On leur envoie un Dirac de champ électrique. Que se passe-t-il ?** Conducteur : excitation d'un coup puis relaxation exponentielle. Isolant : pas d'excitation, pas de courant (bon, dans un isolant idéal. En vrai, un ion c'est pas une sphère toute dure toute fixe). Supra : impulsion acquérie et gardée.
- **Effet Hall présenté = semi-classique. A quoi ça sert dans la vie quotidienne ?** L'effet Hall quantique permet de définir le kg.

Commentaires

- Bon plan axé sur la conduction électrique. Par contre la leçon est vraiment longue. Il faudra faire sauter des trucs. Tableau bien tenu, bon usage du diapo. C'est bien d'avoir mis des ordres de grandeur.
- Bizarre de ne pas avoir eu une expérience qui fonctionne.