

LP46 : Mécanismes de la conduction électrique dans les solides

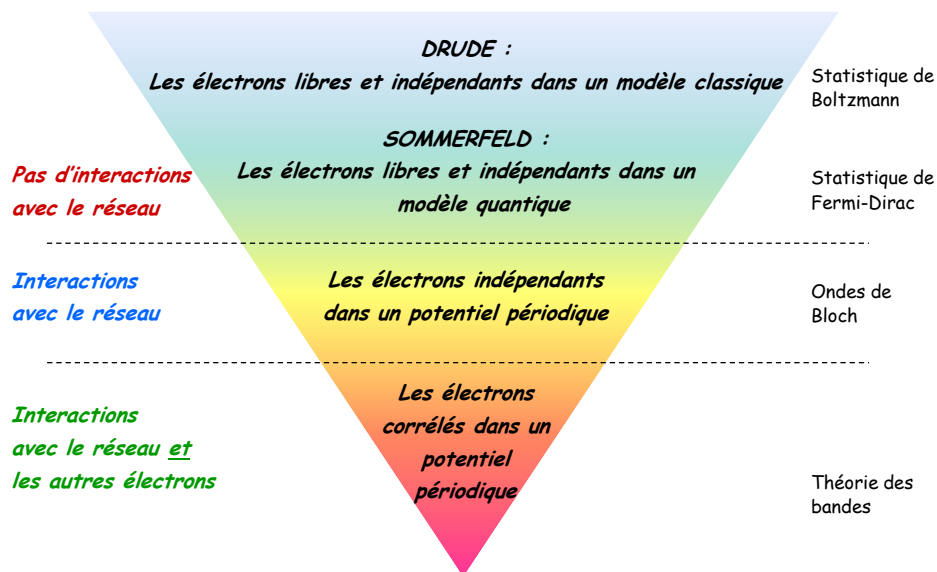
BL
IRAP
(Dated: 10 juin 2015)

Commentaires sur la leçon de Alice Ambaud du 8 juin 2015.

Impression générale

- Timing OK, tu as encore un peu de temps : 47'50.
- Introduit des σ au fur et à mesure que tu introduis des grandeurs (par exemple n_e , τ , le libre parcours moyen etc...).
- Situe mieux la leçon au début en disant explicitement que tu vas traiter le cas statique (les ondes ont été vues, ici les grandeurs considérées seront celles à fréquence nulle $\omega = 0$). Par ailleurs, tu peux dire que cette leçon arrive après le cours de MQ, et donc après la leçon sur les puits, car dans cette leçon les aspects quantiques vont se révéler important pour avoir une description plus en adéquation avec les observations (ex de l'évolution de la résistivité avec la température, de l'énergie importante des électrons, présence d'une structure de bande etc...).
- La partie quantique est trop qualitative, je propose de traiter, sur transparent pour ne pas perdre de temps, le cas du modèle de Sommerfeld (puits quantique 1D infini + stat de Fermi-Dirac à température nulle pour simplifier, les corrections thermiques sont négligeables car $k_B T \ll E_F$ à température ambiante).

Les différents modèles



Réseau des Electroniciens Délégation Aquitaine-Limousin - 28 Juin 2011

3

Extraits de rapport de jury

2014 : Certains candidats utilisent un modèle faisant intervenir une charge électrique variable, ce qui ne semble pas très réaliste. Cette leçon ne doit pas être exclusivement technique et doit être l'occasion de discussions physiques poussées.

I. MODÈLE PHÉNOMÉNOLOGIQUE DE DRUDE

- Il faut que tu donne la date historique et le contexte : cf Ashcroft : suite à la découverte des électrons par Thomson en 1897, Drude essaie de décrire la conduction électrique (et **thermique**) par application de la théorie cinétique à un gaz d'électrons.
- À noter, cette partie ne doit traiter que des conducteurs, et pas encore des semi-conducteurs, qui seront vu plus tard lorsque les bandes seront abordées.

A. Hypothèses

- Soit précise sur les hypothèses : tu as parlé de collisions électrons/ions négligeables. Ce qu'il faut dire, c'est que dans ce modèle les électrons sont libres, c'est-à-dire qu'ils ne voient pas le potentiel Coulombien de la structure ionique (approximation d'électrons libres). Plus tard dans la leçon tu lèveras cette approximation, ce qui fera apparaître le phénomène de bandes. Dans le modèle de Drude, les électrons vont quand même rentrer en collisions, mais avec d'une part des impuretés, défauts, ligne de fractures du réseau, et d'autre part les phonons (c'est-à-dire les excitations collectives d'oscillation du réseau cristallin).
- Tu as dit que les électrons ont un mouvement rectiligne uniforme entre les collisions. En fait ils sont accélérés par le champ électrique qui est à l'origine du courant, donc ne dis pas encore cela à ce niveau là. Dans l'approche statistique que tu développes plus tard, tu définiras une vitesse de dérive moyenne, qui elle est constante.
- Donne l'odg de la densité d'électrons, et commente son chiffre par rapport à un gaz habituel (1000 fois plus grande ! Du coup c'est très audacieux de faire l'hypothèse d'électrons indépendants). Prépare la réponse à la question : pourquoi le modèle d'électrons indépendant marche aussi bien ? Cf les deux niveaux de réponse dans Ashcroft : i)
- Donne tout de suite l'odg expérimental de τ et du libre parcours moyen. Et commente ! Le libre parcours moyen est beaucoup plus grand que celui auquel on s'attendrait si les collisions avaient lieu avec les ions du réseau.
- Lorsque tu mentionnes l'équilibre thermodynamique local, précise tout de suite la valeur de la vitesse quadratique moyenne acquise par les électrons après un choc, à savoir

$$v_{th} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m_e}} \simeq 3 \times 10^5 \text{ m.s}^{-1}$$

Précise également que là il s'agit de l'effet Joule : l'énergie dissipée est celle qui est accumulée entre deux collisions par l'accélération des électrons dans le champ électrique (cf démo juste après).

B. Equation du mouvement

- Spécifie tout de suite que \vec{f} est la force de Lorentz, écris-là, et dis tout de suite que tu négligeras pour le moment l'effet du champ magnétique, ce qui est justifié si $v \ll c$ (et qu'il n'y a pas de sources extérieures de champ magnétique).
- Ne pas se placer en notation complexe, mais s'intéresser directement au régime permanent, en négligeant le transitoire. Tirer de cette deuxième loi de Newton l'expression de la vitesse de dérive. Faire l'odg de cette vitesse et comparer à l'agitation thermique : la dérive (vitesse moyenne) est lente comparée à la vitesse instantanée.
- Pour faire simple, tu peux écrire

$$m \frac{d\langle \vec{v} \rangle}{dt} = -e \vec{E} - \frac{m \langle \vec{v} \rangle}{\tau} \Rightarrow \vec{v} = -\frac{e\tau}{m} \vec{E}$$

en régime permanent. De là tu peux introduire la notation de la mobilité μ .

- Caser le raisonnement énergétique sur l'effet Joule.

$$\delta W = \frac{1}{2}m(\vec{v} + \delta\vec{v})^2 - \frac{1}{2}m\vec{v}^2 \Rightarrow \langle \delta W \rangle = \frac{1}{2}m\langle \delta\vec{v}^2 \rangle = \frac{1}{2}m\left\langle \left(\frac{-e\vec{E}t}{m} \right)^2 \right\rangle = \frac{e^2 E^2}{m} \underbrace{\langle t^2 \rangle}_{=2\tau^2}$$

car $\langle \vec{v} \cdot \delta\vec{v} \rangle = 0$. La puissance volumique est ensuite obtenue en multipliant par $\frac{n}{\tau}$, c'est-à-dire le nombre d'électron subissant une collision par unité de temps et de volume. Ainsi,

$$\mathcal{P} = \frac{ne^2\tau}{m} E^2 = \vec{j} \cdot \vec{E}$$

C. Conductivité et loi d'Ohm

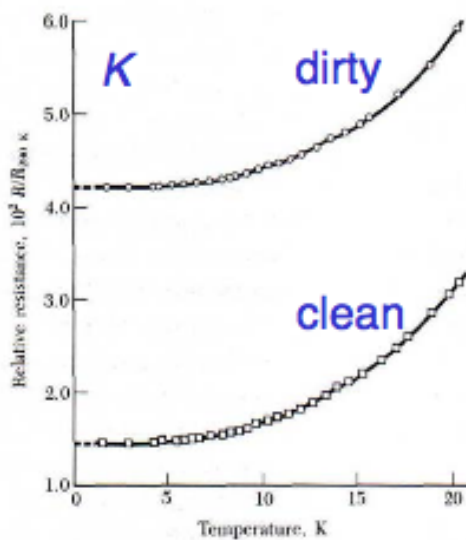
- Attention au signe – qu'il te manquait. Attention à garder la même notation pour la conductivité sur toute la leçon.
- La relation entre la conductivité et la mobilité n'apporte rien, à enlever.
- Donne un ordg de la conductivité à ce moment là. Et lorsque tu donne un ordg, ne donne qu'un seul chiffre significatif.
- Introduis également la résistivité $\rho = 1/\gamma$.

D. Comportement des solides

- Je propose de supprimer cette partie.

E. Limites de la loi d'Ohm

- Il faut renommer en Limites du modèle de Drude et y mettre ce que tu avais prévu en partie 2.1. En effet, si tu veux parler de la limite de la loi d'Ohm, il faut parler d'effets non linéaire, ce qui sort du cadre de la leçon.
- En ce qui concerne les limites, il faut dire que les ordg de la vitesse (ie l'énergie des électrons) n'est pas correcte car les vitesses des électrons sont de l'ordre de 10^7 m.s⁻¹.
- Par ailleurs, le modèle de Drude prévoit une évolution de la résistivité avec la température qui est en $T^{1/2}$. En effet, $\rho \propto \frac{1}{\tau}$ et $\tau = \ell/v_{th} \propto T^{-1/2}$ [1]. Or, expérimentalement la résistivité est constante à basse température, puis augmente linéairement avec la température (cf figure).



II. STRUCTURE DE BANDE

- Moi je ferais une partie sur le modèle de Sommerfeld. Cela permet d'introduire la statistique de Fermi-Dirac (la tracer à température nulle et quand la température est non nulle). Traiter le cas de la température nulle, en faisant remarquer que $k_B T$ est petit devant l'énergie de Fermi. Expliquer qualitativement pourquoi le gaz d'électrons quantique a une énergie plus grande que l'énergie thermique : c'est à cause du principe de Pauli ! Il faut conclure cette partie en disant que ce modèle résoud les limites exposées précédemment sur le modèle de Drude (vitesse, libre parcours moyen, dépendance en température). Il introduit la notion de niveau de Fermi, il montre que seul un faible nombre d'électrons participe à la conduction (ceux dont l'énergie est proche de l'énergie de Fermi, qui voient des états accessibles, cela fait en gros 2% à température ambiante). Cependant, il fait les mêmes prédictions que le modèle de Drude en ce qui concerne la loi d'Ohm (et le temps de relaxation est le même que celui de Drude).
- Je ferais ensuite une autre partie sur la théorie des bandes. Là l'idée est de lever l'hypothèse d'électron libre. Il faut rester qualitatif sur cette partie, montrer les courbes de croisement de niveaux pour justifier que des bandes vont apparaître dans une structure périodique, si on tient compte de l'interaction des électrons avec les ions (via le potentiel Coulombien). Dans cette partie, tu mettras tes dessin avec les bandes de valence et conduction et la position du niveau de fermi, avec une barre qui représente l'énergie d'agitation thermique $k_B T$.
- Je ne passerais pas trop de temps sur les différents dopage (et même je l'enlèverais).

III. AUTRES TYPES DE CONDUCTION

- Titre à changer, il s'agit des applications de la conduction.
- Il faut traiter la supra à un niveau élémentaire, tu as passé trop de temps sur la température critique. Tu peux mentionner le modèle de London, car ils ont les outils pour le comprendre à l'aide des équation de Maxwell.

[1] En fait, τ vérifie la règle de Matthiessenns s'il y a plusieurs sources de relaxation (τ_d pour la diffusion sur les défauts, τ_{ph} pour la diffusion sur les phonons, qui dépend de la température car plus c'est chaud, plus il y a de phonons excité).

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_d} + \frac{1}{\tau_{ph}(T)}$$