

# LP47 : Mécanismes de la conduction électrique dans les solides

**Armel JOUAN, Géraud DUPUY**

## Leçons annexes :

- Mécanismes de la conduction électrique. Loi d'Ohm. Effet Hall. Applications.

Niveau : L3

## Prérequis

- Mécanique quantique (orbitales moléculaires, niveaux d'énergie, principe de Pauli)
- Force de Lorentz

## 1 Modèle de Drude

### 1.1 Hypothèses du modèle

- Détailler les hypothèses historiques du modèle :
  - Théorie cinétique des gaz sur les électrons de valence
  - Négliger les interactions à distance entre les électrons et avec les ions (respectivement électrons indépendants et libres)
  - N'interagit que par des chocs des électrons sur les ions. Probabilité de choc durant  $dt$ :  $dP = \frac{dt}{\tau}$ . En résulte une force de frottement fluide en  $\vec{f} = -\frac{m\vec{v}}{\tau}$  (donner ODG pour  $\tau$ )
- Voir les remarques de [1] sur la validité du modèle p.11-12

### 1.2 Loi d'ohm

- Faire le PFD en régime variable
- En déduire la loi d'Ohm locale

- Montrer que dans le cas BF (donner OdG des fréquences, qui est toujours vérifié en élec) On retrouve une conductivité réelle : pas de déphasage. Cohérent avec l'élec.
- Potentiellement, selon le titre, peut être intéressant de faire un décrochage sur l'effet de peau, donc expliquer que le courant est en surface, et donc qu'on va créer des fils très fins car on se fiche du coeur du fil qui ne contribue pas à la conduction.

**Transition :** Appliquons désormais ce modèle à l'interprétation d'un autre phénomène, l'effet Hall.

### 1.3 Effet Hall [1] p.13-18, [2], [6]

- Schéma de l'expérience de Hall et paramétrisation (champ B et pas H comme dans [1])
- Rajouter la force de Lorentz au PFD, obtenir les équations couplées en régime permanent
- Imposer la nullité du champ transverse  $j_y = 0$ , en déduire :

$$j_x = \sigma_0 E_{0x}$$

$$E_y = - \left( \frac{\omega_c \tau}{\sigma_0} \right) j_x = - \left( \frac{B}{ne} \right) j_x$$

- La deuxième équation constitue l'effet Hall (tension transverse proportionnelle à B)
- Définir alors :
  - la constante de Hall  $R_H = \frac{E_y}{j_x B_0} = -\frac{1}{ne}$
  - la résistivité (loi d'Ohm)  $\rho = \frac{E_{0x}}{j_x} = \frac{1}{\sigma_0}$
- Comparer avec les résultats expérimentaux ([1] p.17) : marche bien pour les alcalins, moins bien pour les métaux nobles, et pas du tout pour le reste des éléments.

**Transition :** Le modèle de Drude, bien que très simple, donne des résultats qui permettent relativement bien d'expliquer **certaines** observations expérimentales. Il présente néanmoins certaines limites, qu'il convient d'exposer.

## 1.4 Limites du modèle

- Revenons sur le modèle du gaz parfait d'électrons
- Si la température  $T$  augmente, alors on s'attend à ce qu'il y ait plus de collisions, alors on devrait avoir diminution du temps de collisions.
- De fait, on devrait avoir une baisse de la conductivité, et donc une hausse de la résistance qui est proportionnelle à  $\frac{1}{\tau}$
- Pourtant, on peut remarquer que pour certains matériaux, on a une baisse de la résistance, ce qui est contraire aux prédictions qu'on peut faire à partir du modèle de Drude
- Par ailleurs, on peut se rendre compte qu'on a du mal à expliquer avec ce modèle pourquoi on a des isolants et pas juste des conducteurs
- Possiblement faire la manip avec un montage quatre fils, une thermistance, une bobine immergeable pour un montage 4 fils, et un bain thermostaté. Montrer que immergé ou non immergé on a des évolutions différentes
- Tout ça s'explique car la modélisation par des chocs est plutôt fausse.
- Calcul de la longueur de De Broglie thermique. Ordre de grandeur à 300 K.
- On a  $n\lambda_{th}^3$  de l'ordre de  $4 \cdot 10^4$ , on doit donc prendre en compte des interactions quantiques

**Transition : intéressons-nous à un modèle moins simpliste que le modèle de Drude qui permet d'expliquer de manière plus poussée les mécanismes de la conduction dans les solides.**

## 2 Théorie des bandes

### 2.1 Approche simplifiée [5]

- Faire une approche où on juxtapose de l'ordre de  $10^{23}$  orbitales atomiques (CLOA)
- Cela va créer des orbitales multiples et très proches
- On va donc avoir des bandes continues séparées par des gaps interdits.

## 2.2 Remplissage des bandes [2], [5]

- On se place d'abord à une température de 0 K, on affinera plus tard
- On applique le principe d'exclusion de Pauli et on remplit par énergie croissante.
- On définit l'énergie de Fermi et le vecteur d'onde de Fermi
- Définir bande de valence et bande de conduction
- Expliciter les cas conducteur et isolant
- Expliciter différents exemples: Sodium, Magnesium, Diamant
- Avec la température, certains électrons sautent de niveau
- Si le gap est suffisamment petit ( $\sim 1$  eV), des électrons peuvent passer de la bande de conduction à celle de valence, et alors la conduction augmente avec la température : ce sont les semi-conducteurs.
- OdG bien entendu.
- Si il reste du temps parler de dopage. Globalement le message pour dépasser l'incohérence sur la température, c'est qu'on a aussi une dépendance en température des porteurs de charges

## Conclusion

Ouverture vers les applications des semi-conducteurs [2], ou bien vers la supra-conductivité.

# Bibliographie

[1] **Ashcroft et Mermin, Physique des solides :**

- Chap 1 : modèle de Drüde, effet Hall
- Chap 2 : théorie de Sommerfeld des métaux et statistique de Fermi-Dirac
- Chap 3 : limites du modèle d'électrons libres
- Chap 8, 9, 10, 11 : pour se refaire une culture sur la théorie des bandes

[2] **Ngô, Ngô, Physique des semi-conducteurs, Dunod**

- Chap 4 : début du chapitre pour éléments de théorie des bandes (Bloch modèles des liaisons faibles/fortes), fin du chapitre pour distinguo métaux/semi-métaux/semi-conducteurs/isolants
- Chap 5 : phonons
- Chap 6 : semi-conducteurs : trou, gap (direct/indirect), dopage, masse effective, intrinsèque/extrinsèque
- Chap 7 : dynamique des électrons et effet Hall
- chap 8, 9, 10: applications : jonctions, diode, transistor ...

[3] **Pérez, Electromagnétisme**

[4] **Tout-en-un PC-PC\*, Sanz**

[5] Cours de chimie de spé : approche de la théorie des bandes par la méthode CLOA

[6] Epreuve C 2008 sur le magnétisme :

- Énoncé :  
[http://b.louchart.free.fr/Documents/CE/01/Agregation/Agreg\\_ext\\_Physique\\_2008\\_C\\_Enonce.pdf](http://b.louchart.free.fr/Documents/CE/01/Agregation/Agreg_ext_Physique_2008_C_Enonce.pdf)
- Corrigé :  
<http://agregation-physique.org/iamges/annales/2008/cpp08.pdf>

## Manipulations, ressources

- (1) Effet Hall d'un semi-conducteur dans un électroaimant (cf MP16 et MP18)
- (2) Evolution de la conductivité de différents matériaux : bobine et thermistance CTN (cf MP05 et MP34) dans le bain thermostaté avec le montage 4 fils.