

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Mécanismes de la conduction électrique dans les solides</b>	<b>2</b>
I	Approche microscopique classique . . . . .	3
I.1	Modèle de Drude (1902) 10min max . . . . .	3
I.2	Mise en défaut pratique du modèle de Drude . . . . .	4
II	Modèle quantique des électrons libres . . . . .	4
II.1	Modèle des électrons libres . . . . .	4
III	Théorie des bandes . . . . .	5
III.1	Electrons dans un potentiel périodique . . . . .	5
III.2	Bandes d'énergie . . . . .	5
III.3	Remplissage des bandes . . . . .	5
III.4	Conductivité dans un semi-conducteur . . . . .	5
IV	Conclusion . . . . .	5

# Leçon 1

## Mécanismes de la conduction électrique dans les solides

### Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Physique des Solides (Chap 1 à 3)	N. Ashcroft et D. Mermin	EDP Sciences (2002)	2-86883-577-5
Slides de cours	Gwendal Fève		Site Montrouge
Physique des Solides	C. Kittel	Dunod	
Site ferrarithmetic pour télécharger BUP 550	A. Guinier, E. Guyon, J. Matricon, C. Taupin	BUP	

### Commentaires des années précédentes :

- **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.

### Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon :

Prérequis :

- loi d'Ohm, mécanique newtonienne,

- statistique de Maxwell-Boltzmann, modèle du gaz parfait,
- statistique de Fermi-Dirac
- 

## Introduction

On connaît et on utilise trivialement l'électricité, ça fait partie de la culture générale scientifique de savoir qu'il existe des matériaux conducteurs et des matériaux isolants (c'est même quelque chose qu'on voit au collège avec des expériences permettant d'allumer une ampoule avec du caoutchouc, du bois, du cuivre, ...). On va voir dans cette leçon que cette notion naturelle n'est en réalité explicable que par la mécanique quantique et que les modèles classiques échouent à rendre compte expérimentalement ce qui se passe.

## I Approche microscopique classique

### I.1 Modèle de Drude (1902) 10min max

Contexte historique : découverte de l'électron par Thomson (1899), avant expérience de Rutherford.

Cristal métallique : [grosses sphères chargées + avec des électrons de cœur] = ions métalliques + électrons de valence pour assurer électricité.

Remarque :  $n_{gaz} = 10^{25} \text{m}^{-3}$  tandis que  $n_{e^-} = 10^{29} \text{m}^{-3}$ , cf p4 Ashcroft.

Hypothèses :

- pas d'interaction entre les électrons et les ions, et entre les électrons et les électrons : "électrons libres",
- collisions et changement de vitesse instantanées entre les électrons de cœur et les électrons de valence,
- électrons de valence (conduction) se déplacent en ligne droite jusqu'à collision avec proba  $1/\tau$ .  $\tau$  est le temps de collision ou libre parcourt moyen, temps moyen de propagation entre deux chocs,
- chaos moléculaire, la distribution des vitesses suit une loi de Maxwell-Boltzmann comme le gaz classique, la direction des électrons est aléatoire. L'équilibre thermodynamique local des électrons avec leur entourage par le biais des collisions (seul mécanisme restant) :

Ce modèle décrit relativement bien la conductivité dans un métal. Dédurre équation du mouvement +

## I.2 Mise en défaut pratique du modèle de Drude

Bien fait dans le BUP.

Voici ce que Drude prévoit en supposant que la vitesse des électrons obéit à la statistique de Boltzmann :

- dans un modèle de gaz parfait, la vitesse moyenne des électrons est :  $v^* = \sqrt{\frac{3k_B T}{m_e}} = \frac{l}{\tau}$  (utiliser le théorème d'équipartition.
- comme  $\tau = \frac{\sigma m_e}{N_e e^2}$  avec le modèle de Drude, on obtient  $\sigma \propto \frac{1}{\sqrt{T}}$

Manip quantitative : mesure 4 points d'un morceau de cuivre à différentes températures. Montrer (si possible) que la résistivité est linéaire en température.

- en utilisant  $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}k_B T$ , on trouve  $v = 10^5 \text{m/s}$  alors que  $v_F = 10^6 \text{m/s}$  et indépendante de T,
- quid des matériaux isolants ? semi-conducteurs ?
- effet Hall classique dans l'aluminium (p18 Ashcroft) montre que n dépend fortement de B appliqué, ce qui est inenvisageable dans le modèle de Drude + constante de Hall parfois positive

Conclusion : il faut passer à un autre modèle plus poussé : un modèle quantique.

## II Modèle quantique des électrons libres

Electrons obéissent à la statistique de Fermi-Dirac et non à la statistique de Maxwell-Boltzmann.

### II.1 Modèle des électrons libres

Cf Kittel chap 8 ou Ashcroft chap 2 et 13. Modèle de Sommerfeld. Faire les calculs Justifier qu'on peut se placer à  $T=0\text{K}$ .

## III Théorie des bandes

### III.1 Electrons dans un potentiel périodique

Modèle : électrons en interaction avec le potentiel périodique du réseau cristallins. Cf Kittel (chap 7) + TD 1 Physique des Solides : mettre en prérequis pour les calculs.

### III.2 Bandes d'énergie

Slide : schéma bande avec isolant+ tableau périodique

### III.3 Remplissage des bandes

Distinguer métaux, semi-conducteurs et isolant. Prévoir lesquels seront métalliques avec le demi-remplissage, lesquels seront isolants. Montrer que ça ne marche pas toujours.

### III.4 Conductivité dans un semi-conducteur

Densité d'état varie en  $\exp(-\Delta/k_B T)$  donc  $\sigma$  aussi.

Mesure de la conductivité dans un semi-conducteur dopé pour déterminer le [gap](#), cf TP semiconducteurs. Durée 30min environ,  $\Delta_{exp} = 0.6\text{eV}$  alors que  $\Delta_{th} = 0.7\text{eV}$ . Interprétation : matériel vieux, gap a pu changer. Matériau pas pur.

## IV Conclusion

Ouverture sur l'ingénierie des semi-conducteurs : micro-électronique, jonctions pn, transistors. Prix Nobel 2014 pour l'invention de la diode bleue (en 1992).

Ouverture sur la supraconductivité (slide supra mercure).

Ouverture possible sur la conduction thermique, loi de Wiedemann-Franz.