

Leçon de Physique n°23
Mécanismes de la conduction électrique dans les solides

Niveau : PC

Programme :

Notions et contenus PC

Capacités exigibles PC

1.3 Conduction électrique dans un conducteur ohmique

Loi d'Ohm locale dans un métal fixe, l'action de l'agitation thermique et des défauts du réseau fixe étant décrite par une force phénoménologique de la forme $-mv/\tau$
 Conductivité électrique.
 Résistance d'une portion de conducteur filiforme.

Déduire du modèle un ordre de grandeur de τ et en déduire un critère de validité du modèle en régime variable.
 Déduire du modèle un ordre de grandeur de v et en déduire un critère pour savoir s'il convient de prendre en compte un éventuel champ magnétique.

Approche descriptive de l'effet Hall.

Interpréter qualitativement l'effet Hall dans une géométrie rectangulaire.

Effet thermique du courant électrique : loi de Joule locale.

Exprimer la puissance volumique dissipée par effet Joule dans un conducteur ohmique.

Livres : Perez Electromagnétisme, Ashcroft Physique des solides, DGLR, Tout-en-un PC DUNOD

Pré-requis : électromagnétisme, mécanique,

Intro : faire un mélange entre intro du *Tout-en-un* (ch. 16 conductivité électrique ...), du *Ashcroft* (chapitre 1) et du *Perez* (ch. 7 conductivité électrique).

Rappeler ce que sont ρ et \mathbf{j} , l'équation de conservation de la masse : $\partial\rho/\partial t + \text{div}\mathbf{j} = 0$ et la loi d'Ohm pour un milieu conducteur homogène isotrope : $\mathbf{j} = \gamma\mathbf{E}$ avec γ la conductivité du milieu. Donner ODG du *Perez*

I – Modèle de Drude

Trois ans après la découverte de l'électron par Thomson en 1897, Drude a construit sa théorie de la conductivité électrique (et thermique).

1) Hypothèses du modèle Ashcroft

Théorie de Drude : par application de la théorie cinétique des gaz à un métal, vu comme un gaz d'électrons (cf. Figure *Ashcroft*).

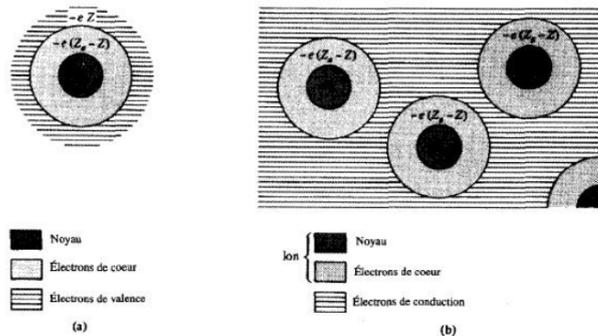


FIG. 1.1 – (a) Représentation schématique d'un atome isolé (l'échelle n'est pas réelle). (b) Dans un métal, le noyau et le cœur ionique maintiennent la configuration de l'atome libre, mais les électrons de valence quittent l'atome pour former un gaz d'électrons.

Théorie cinétique : modèles de gaz=sphères solides et identiques qui se déplacent en ligne droite jusqu'à ce qu'elles entrent en collision les unes avec les autres (ou avec les parois du récipient qui les contient mais cette possibilité est en général ignorée dans l'étude des métaux).

=> Nous allons supposer que lorsque les atomes d'un élément métallique se rassemblent pour former un métal, les électrons de valence se détachent et se déplacent librement dans le métal pendant que les ions métalliques restent intacts et jouent le rôle des particules immobiles de charges positive

Hypothèses du modèle de Drude pour les métaux :

- entre 2 collisions, on néglige l'interaction d'un électron donné avec les autres électrons (approximation des électrons indépendants) et les ions (approximation des électrons libres) => les électrons se déplacent selon un MRU en l'absence de tout champ électromagnétique externe (Remarque : en présence de champs extérieurs, le mouvement de chaque électron est déterminé par le PFD en tenant compte de ces champs mais en négligeant toujours les autres champs provenant des interactions mutuelles entre électrons et entre électrons et ions)

- les collisions sont des événements instantanés qui changent de manière abrupte la vitesse d'un électron (Drude les attribuait aux rebonds des électrons sur les coeurs impénétrables des ions. Même si ce mécanisme est loin de refléter la réalité, on peut supposer qu'il existe d'un certain mécanisme de diffusion sans vraiment en préciser la nature).

- probabilité de subir une collision (et donc un changement abrupt de sa vitesse) pendant un intervalle de temps infinitésimal dt est dt/τ , τ connu sous différentes dénominations : temps de relaxation, temps de collision ou encore temps de libre parcours moyen supposé indépendant de la position et de la vitesse de l'électron ($\tau \approx 10^{-14}$ - 10^{-15} s ce qui correspond à un libre parcours moyen de 1 à 10 Å)

=> un électron pris au hasard à un instant donné v_a , en moyenne, se déplace pendant un temps τ avant sa prochaine collision.

- les électrons établissent un équilibre thermique avec leur entourage uniquement par le biais des collisions : la vitesse immédiatement après chaque collision est indépendante de sa vitesse immédiatement avant la collision, mais dépend de la température dominante au lieu où la collision s'est produite et sa direction est aléatoire : plus la température de la région où se déroule la collision est grande, plus la vitesse de l'électron émergent est importante.

2) Loi d'Ohm Perez

En l'absence de gradient de température ou de potentiel électrique, les vitesses des N électrons contenus dans tout élément de volume macroscopique sont dirigés au hasard et le vecteur vitesse moyen \mathbf{v} est nul.

Sous l'action d'un champ électrique \mathbf{E} , l'isotropie de la distribution des vitesses est rompue et une vitesse de dérive $\mathbf{v} \neq \mathbf{0}$ apparaît : c'est la conduction électrique.

ODG Perez

Sous l'effet du seul champ E supposé constant, un électron acquiert une accélération constante : $d\mathbf{v}/dt = -e\mathbf{E}/m$

Rôle du milieu peut être modélisé en introduisant une force de frottement visqueux (qui traduit l'effet de l'agitation thermique et des défauts du réseau cristallin).

A développer cf. Perez p. 109-100 : *interprétation phénoménologique* (prendre directement $q = -e$, tracer le graphique de $v(t)$)

=> $\mathbf{v} = \mu\mathbf{E}$ avec $\mu = -e\tau/m$

courant volumique : $\mathbf{J}(M) = -n_v e \mathbf{v}(M) = -n_v e \mu \mathbf{E}(M) = \gamma \mathbf{E}(M) \Rightarrow \gamma = n_v e^2 \tau / m$: loi d'Ohm locale

Ainsi la loi d'Ohm peut être interprétée par la limitation de la vitesse de dérive des électrons, limitation due aux interactions avec le milieu.

=> ODG de τ *Tout-en-un* + d'autres valeurs de γ (échelle des conductivités pour les isolants, semi-conducteurs, bons conducteurs)

(Remarque : interprétation collisionnelle *Perez p.111*)

3) Loi d'Ohm en régime variable *Tout-en-un*

Que devient l'étude précédente si le champ électrique dépend du temps ?

=> loi d'Ohm valable pour des champs électriques de fréquence inférieure à 1THz

=> on peut négliger la composante magnétique de la force de Lorentz devant la composante électrique si $vB \ll E$ (or $E/v \approx 250$ teslas ! Il est donc légitime de ne pas tenir compte d'un éventuel champ magnétique)

4) Résistance électrique *Tout-en-un*

II – Effet Hall

1) Etude du phénomène *Tout-en-un*

Régime transitoire

Régime permanent

2) Tension de Hall *Tout-en-un*

3) Application à la mesure du champ magnétique *Tout-en-un*

Manip Quaranta IV p.139 nouvelle édition