

Année : 2020-2021

Correcteurs : Nicolas Perez et Léo Mangeolle

Contenu de ce rapport : Quelques remarques sur les questions qu'on s'est posées pendant et après la leçon, et des questions évoquées lors de la préparation aux oraux de l'an dernier aussi.

A priori Cu a 11 électrons de valence, et on rencontre des ions Cu^{2+} aussi, alors pourquoi on considère que chaque atome de cuivre fournit 1 électron de valence ?

Quand on a l'ion Cu^{2+} en solution aqueuse, les deux électrons ne sont pas partis dans la nature, ils ont été happés par une orbitale atomique/moléculaire qui les intéressait plus (genre SO_4^{2-} ?), ce qui représentait pour les deux molécules un abaissement de l'énergie. Alors que dans un solide, si un électron décide de quitter son orbitale atomique, il se retrouve dans le continuum d'électrons de conduction, ce qui lui impose, à cause de l'exclusion de Pauli, d'avoir une très grande énergie cinétique ; donc c'est un coût assez prohibitif et seul l'électron $4s^1$ y trouve son compte (j'imagine).

Pour savoir que c'est bien 1 électron par atome, on dispose de techniques expérimentales pour mesurer le nombre d'électrons de conduction qu'il y a dans le morceau de métal - typiquement la résistance de Hall donne un accès immédiat à la densité (cf formule 1.21 p16 du Ashcroft-Mermin) - et on peut voir (tableau 1.4 p17) que pour Cu il y a bien 1 électron par atome.

Notez que pour mesurer la densité n d'électrons (ou de trous), une technique très efficace est de mesurer la résistivité de Hall ρ_H qui se trouve ne pas dépendre du temps τ . Si on mesure du même coup la conductivité de Hall σ_H qui dépend à la fois de τ et de n , ça donne accès à τ . Vous noterez que de ce que je viens d'écrire, il se déduit que $\rho_H \neq \sigma_H^{-1}$: pourquoi ?

Au passage, en mesurant τ par cette méthode, et le libre parcours moyen par d'autres méthodes (cf le BUP) on peut constater "de visu" que le modèle de Drude fait une erreur d'un facteur 100 sur la vitesse typique des électrons. Pour la dépendance en température de τ , voir Ashcroft-Mermin, chapitre 26.

Est-ce qu'on peut envisager de parler de la dépendance de la conductivité en fonction de la fréquence ? Ce serait franchement plus

approprié pour une leçon du genre "OEM dans les milieux conducteurs". Ici le titre insiste sur "mécanismes", pas vraiment sur "qu'est-ce qu'il se passe si j'ajoute une dépendance temporelle à un mécanisme déjà connu ?". Après on peut faire des tas de choses avec la conductivité complexe, en lien avec la théorie de la réponse linéaire etc, mais c'est de même assez éloigné du sujet.

Quels ordg peut-on faire pour tester les limites du modèle de bandes ? Le modèle des bandes fait l'hypothèse que le potentiel du réseau est petit par rapport à l'énergie cinétique des électrons ; on peut donc comparer l'énergie de Fermi à l'interaction coulombienne typique électron-ion, en prenant une distance entre les deux de l'ordre de l'angström.

Aussi, le modèle de Sommerfeld et le modèle de bandes font l'hypothèse d'un gaz d'électrons sans interactions. Or clairement l'interaction électron-électron est du même ordre de grandeur que l'interaction électron-ion, donc il n'est pas du tout évident qu'on puisse se dispenser d'en tenir compte. Par ailleurs, pour montrer qu'au moins les interactions électron-électron sont négligeables par rapport à l'énergie cinétique, on fait le rapport rapport énergie cinétique sur énergie potentielle ; l'énergie cinétique est en k^2 donc proportionnelle à $1/r_s^2$ (avec r_s la distance typique entre électrons), et l'énergie coulombienne en $1/r_s$, donc on constate avec étonnement que pour un gaz d'électrons, la limite des faibles interactions est celle des fortes densités, et les gaz d'électrons dilués sont très loin d'être des gaz parfaits.

Dans les métaux usuels, l'énergie cinétique est juste 3 ou 4 fois plus grande que l'énergie potentielle électron-électron (ou électron-ion), alors imaginez dans des non-métaux ou les semi-conducteurs où la densité n chute.

Une remarque culturelle au passage : c'est bien sûr très frustrant mais autant que vous le sachiez ; conclure la partie sur la théorie des bandes par quelque chose comme "donc voilà, on a tout compris, les isolants ont un gap et les conducteurs n'ont pas de gap" n'est pas très prudent. Il y a beaucoup de raisons qui peuvent conduire un matériau à être isolant ! Il y a tous les cas où c'est la répulsion entre électrons qui intervient (isolants

de Mott - très nombreux), tous les cas où la localisation des électrons vient du désordre (isolants d'Anderson), et surtout tous les cas où la théorie des bandes n'a pas de sens parce qu'il n'y a même pas de cristal (verre, caoutchouc, brique...).

Ça n'a rien à voir mais juste pour info : dans la transition entre Drude et Sommerfeld, pour

justifier la nécessité d'un raisonnement quantique autrement que juste en disant "Drude marche pas", on peut calculer la longueur d'onde de de Broglie thermique et constater que c'est du même ordre que la distance typique électron-électron ; c'est un raisonnement typique qui sert beaucoup dans la LP11 et qu'on trouve par exemple au tout début du DGLR.

Pauline a tenu à préciser qu'elle est toujours à la recherche d'un plan qui sorte du traditionnel plan Drude-Sommerfeld-bandes, qu'il était déjà difficile de faire tenir en 50 minutes. Hélas il semble que cette LP soit particulièrement rigide : se passer de Drude ça pose problème en termes de pédagogie, se passer de Sommerfeld ça transfère juste toutes les notions à introduire dans la partie "théorie des bandes", et la théorie des bandes c'est le seul endroit où on peut parler d'autre chose que de métaux (exigence du jury) mais on n'a pas le temps de le faire bien. Bref. Si vous avez une bonne idée, faites tourner !

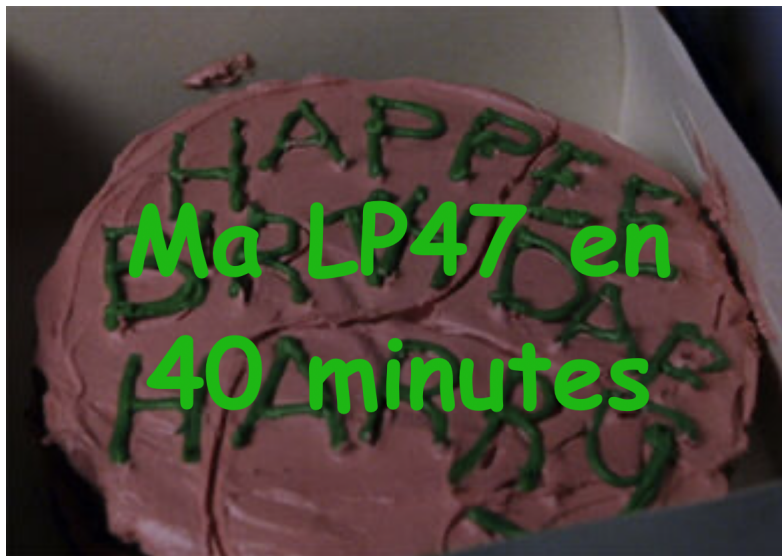


FIGURE 1 – "C'est moi qui l'ai faite ! J'ai dû m'asseoir dessus malheureusement, mais j'espère que ce sera bon quand même."