

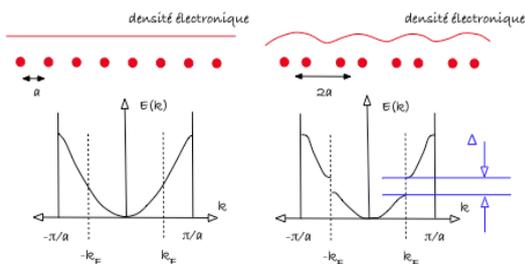
# TP Physique du solide, Master 1-Physique

Institut Néel, Polygone Scientifique - Grenoble (E214)

## 1. Transition électronique dans les systèmes de basse dimensionalité.

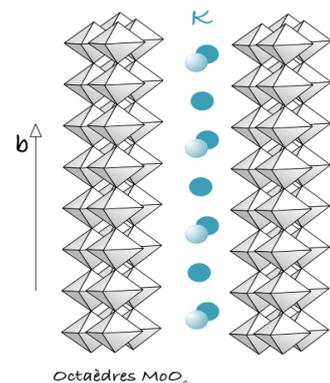
### A. Transition métal-isolant dans un composé quasi-unidimensionnel

Peierls a montré dès 1954 qu'un système unidimensionnel monovalent pouvait être instable vis à vis d'une déformation du réseau atomique où les atomes se rapprochent pour former des paires. Cette déformation s'accompagne de l'ouverture d'un gap dans la structure électronique (voir figure ci-dessous), *expliquez pourquoi le coût énergétique lié à la déformation du réseau est compensé par un gain en énergie électronique. A quelle condition, l'ouverture de ce gap s'accompagne-t-elle d'une transition métal-isolant ?*



La densité électronique n'étant plus uniforme, on parle de la création d'une « onde de densité de charges » (ODC). Il a néanmoins fallu attendre près de 20 ans avant que ne soit trouvée une preuve expérimentale de cette transition (dans un composé organique) car la transition métal-

isolant n'apparaît que dans les systèmes 1D, *pourquoi ?* Le but de la 1<sup>ère</sup> partie de ce TP est de mettre en évidence cette transition dans un échantillon de « bronze bleu » de Molybdène  $K_{0.3}MoO_3$ . La structure cristalllographique de ce composé est représentée sur la figure ci-contre. La conduction électronique se fait le long des octaèdres de  $MoO_6$ , *justifiez pourquoi ce composé peut effectivement être assimilé à un système 1D*. Afin de mesurer la résistance électrique, deux contacts de courant ont été réalisés sur les bords de l'échantillon, 2 autres contacts serviront à mesurer la différence de potentiel correspondante. L'échantillon est monté sur un support couplé à une résistance « témoin » qui servira de thermomètre et à un enroulement chauffant. Pour mesurer la résistance en fonction de la température, l'ensemble sera plongé dans un bain d'azote liquide. Le programme d'acquisition *RESISTIVITE-TP* vous permet de mesurer la résistance en fonction de la température<sup>1</sup> et d'effectuer des caractéristiques  $V(I)$ .



<sup>1</sup> Placez la canne porte - échantillon au-dessus du réservoir d'azote en position haute et plongez très progressivement la canne dans le réservoir.

Ce TP se veut être le plus proche possible d'une expérience réelle en physique, c'est pourquoi les conditions expérimentales ne vous sont **pas** données; **il vous appartient donc de les déterminer**, tout comme tout chercheur souhaitant mesurer un nouvel échantillon dont il ne connaît pas les propriétés : quel courant faut-il utiliser pour les mesures de  $R(T)$  ?, dans quelle gamme de courant doit-on réaliser les caractéristiques  $V(I)$  ?, quelles sont les contraintes liées à une mesure de la dépendance en température d'une grandeur physique (ici la résistance) ?... Après avoir définies vos conditions expérimentales effectuez la **mesure de  $R(T)$** . Repérez la valeur de la température ( $T_p$ ) correspondant à la transition métal - isolant. *Estimez un ordre de grandeur du gap  $\Delta$* . Afin d'affiner cette valeur, on suppose que pour  $T < T_p$  la conduction se fait par activation thermique ( $\sigma \sim \exp(-\Delta/kT)$ ), *déterminer la valeur correspondante du gap  $\Delta$* . Stabilisez la température en dessous de  $T_p$  (typiquement vers 70K) et faites une **caractéristique  $V(I)$** <sup>2</sup>. *Le courant utilisé pendant la mesure de  $R(T)$  était-il bien adapté, si non refaites la mesure pendant le réchauffement de la canne.*

En passant la transition (à  $T_p$ ) les électrons « se condensent » dans l'ODC (ouverture du gap). Pour  $T$  non nulle, certains électrons peuvent néanmoins franchir le gap, on est alors en présence de 2 « types » d'électrons : (i) les électrons condensés dans l'ODC (sous le gap) et (ii) les électrons ayant franchi le gap par activation thermique. *Pour les faibles valeurs de  $I$ , la courbe  $V-I$  est linéaire, à quel type d'électron ((i) ou (ii)) doit-on cette réponse ?* Retranchez cette droite initiale de la courbe totale afin de n'avoir que la réponse du second type. *Expliquez pourquoi la courbe  $V-I$  est équivalente à une courbe Force – Vitesse. Montrez qu'il existe une force critique ( $F_c$ ) en dessous de laquelle  $v=0$ , à quoi est-elle due ?*

En 1954, Fröhlich avait proposé un modèle de supraconductivité basé sur le glissement des ODC, *comment peut-on comprendre ce scénario ?* Ce modèle s'est avéré inexact et Bardeen, Cooper et Schrieffer montrèrent trois ans plus tard que la supraconductivité pouvait en fait être due à un couplage entre électrons médié par les phonons.

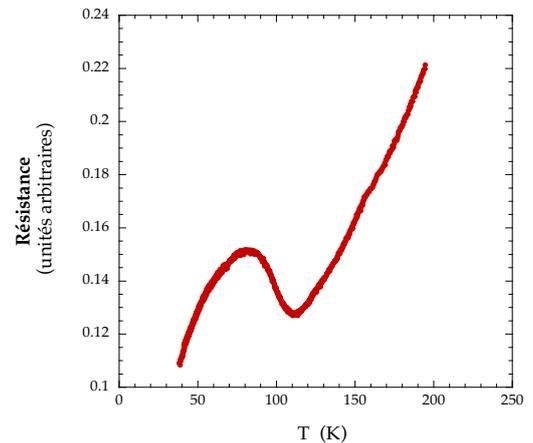
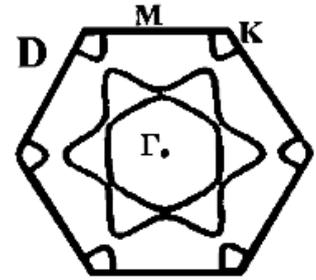
**Toujours dans l'idée de rester le plus proche possible des conditions réelles de la recherche, la suite du TP vous appartient ! C'est donc à vous de définir quelle(s) expérience(s) vous souhaitez réaliser pour mieux caractériser/comprendre les effets vus jusqu'à présent.**

---

<sup>2</sup> Sans dépasser 100mA. Si aucune non linéarité n'apparaît discutez de la procédure à suivre avec l'enseignant.

## B. Cas du composé quasi-bidimensionnel ( $K_{0.9}Mo_6O_{17}$ )

Il s'agit également d'un oxyde de Molybdène dopé au K mais de composition légèrement différente de celle du « bronze bleu » ( $K_{0.9}Mo_6O_{17}$ ). Contrairement au bronze bleu, le bronze violet n'est pas un composé 1D mais présente une structure en feuillets quasi 2D. La surface de Fermi est représentée sur la figure ci-dessus. De combien de bandes cette surface de Fermi est-elle constituée ? Expliquez brièvement pourquoi ces surfaces de Fermi ne sont-elles pas circulaires ? Pourquoi dans ce cas l'ouverture du gap (liée à la déformation structurale) ne peut-elle être que partielle. Cette surface de Fermi présente néanmoins une particularité appelée « unidimensionalité cachée », expliquez l'origine de cette dénomination.

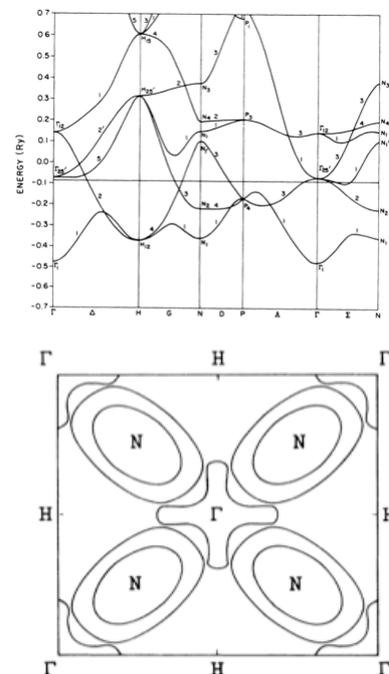


Si on effectue une mesure tout à fait similaire à celle que vous avez effectuée sur le bronze bleu, on obtient le résultat ci-contre. En quoi est-il différent de celui que vous avez observé, comment peut-on comprendre cette différence ?

## 2. Supraconductivité

Certains matériaux (appelés supraconducteurs) présentent l'étonnante propriété d'avoir une résistance électrique **parfaitement nulle** en dessous d'une température critique  $T_c$ . Ces matériaux ont par ailleurs une seconde propriété tout aussi remarquable : celle de pouvoir d'expulser totalement (sous certaines conditions) l'induction magnétique,  $B=0$ .

On se propose d'étudier ici la distribution du champ magnétique dans le **Niobium**, dont la structure de bandes est représentée ci-contre. Que peut-on en conclure quant aux propriétés électroniques de cet élément ? A quelle partie de la Surface de Fermi (voir figure ci-contre) est associée la bande #2 ?, quelle est la nature des porteurs de cette bande ?



Un morceau de Nb a été placé sur une « croix de Hall ». En présence d'un courant  $I$ , la tension  $V$  mesurée sur la croix est alors proportionnelle à l'induction magnétique  $B_s$  à la surface de la sonde (perpendiculaire à la croix) :  $R_H = V/I = R_0(T) + k B_s$ . Néanmoins, le champ  $B_s$

n'est pas le champ  $B$  présent dans l'échantillon et on supposera ici que  $B_s = \alpha B + (1-\alpha)\mu_0 H$ . Discutez cette approximation et *déterminez le protocole expérimental qui vous permettra de déterminer les valeurs de  $R_0(T)$ ,  $k$  et  $\alpha$  afin de déterminer la courbe  $B(T)$  à partir des mesures de  $R_H$* . On admettra ici que  $B=0$  en dessous de 5K et que le matériau est non magnétique ( $B=\mu_0 H$ ) dans l'état normal ( $T > T_c$ ).

Le programme « *SUPRA-TP* » vous permet de contrôler à la fois  $T^3$  et  $H$ . Tout comme pour l'expérience précédente, les conditions expérimentales ne vous sont volontairement **pas** données. Il vous appartient donc de les déterminer (vitesse de rampe, valeur du courant dans la sonde,...). On souhaite pour commencer déterminer l'évolution de  $B(T)$  dans l'échantillon (on se limitera ici à des champs  $H$  inférieurs à 30G). Attention pour des raisons que l'on explicitera plus tard il est essentiel d'effectuer le premier refroidissement en champ nul ( $H=0$ ), avant d'appliquer le champ à basse température puis on mesure  **$B(T)$  en température croissante, puis décroissante**. A basse température, montez le champ jusqu'à 1000G et revenez à votre champ de départ, *conclusion*.

Dans les supraconducteurs dits de type II, le champ  $B$  pénètre sous la forme de tubes de champ appelés **vortex**. Ces vortex entrent et sortent par les parois latérales mais sont susceptibles de se piéger sur les défauts du matériau. Attention, la valeur mesurée de  $B$  est une **moyenne** sur la surface de la sonde et le champ  $B(x,H)$  est en fait alors distribué de façon très inhomogène. Les équations de Maxwell doivent néanmoins toujours être vérifiées et en tout point de l'échantillon, notamment  $rot B = \mu_0 J$  et le courant (induit par la distribution de  $B(x,H)$ ) ne peut jamais dépasser une valeur critique  $J_c$ . *Tracez (schématiquement) la distribution  $B(x,H)$  dans l'échantillon pour des valeurs croissantes et décroissantes de  $H$ . Comment peut-on alors comprendre les mesures effectuées ci-dessus ? Comment faudrait-il procéder pour étudier l'évolution du (ou des) champ(s) critique(s) de ce composé ?*

**Comme précédemment, la suite du TP est « libre », c'est à vous d'imaginer les mesures complémentaires que vous souhaitez réaliser pour mieux comprendre la distribution du champ magnétique dans le supraconducteur et/ou d'en déterminer les paramètres physiques fondamentaux<sup>4</sup>.**

---

<sup>3</sup> Les paramètres typiques du régulateur P,I,D sont P,I,D =20,5,0 ; « heater range » =1 (ou 2)

<sup>4</sup> Attention : si vous souhaitez effectuer des mesures de  $B(H)$ , il est important de bien déterminer la vitesse de la rampe (discutez-en le cas échéant avec l'encadrant mais ne dépasser pas 0.1A/s) La bobine qui permet de générer  $H$  est elle-même supraconductrice et constitue donc une inductance (L) parfaite, mais, pour des raisons de sécurité, une résistance R a été placée en parallèle de cette inductance. Les valeurs affichées du champ  $H$  ont néanmoins été calculées à partir du courant généré par l'alimentation et non pas du courant traversant la bobine.