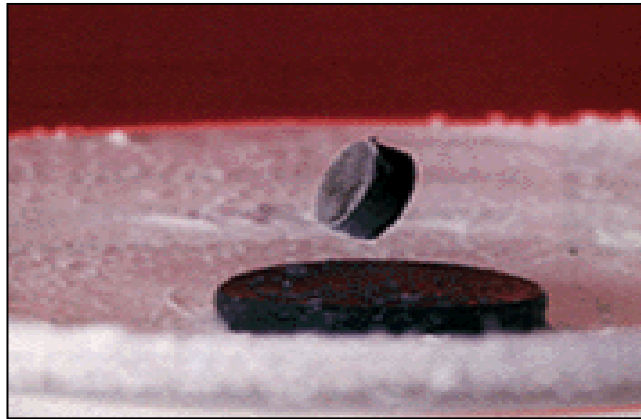


Supraconductivité

Projet expérimental 2020-2021



Lors de ce TP, vous aurez à faire (selon ce qui vous aura été indiqué):

Supra Option 1 : SQUID : lire les parties A, C

ou

Supra Option 2 : Transition Supraconductrice et Lévitación magnétique : lire les parties A, B, D

L'étude de la transition supraconductrice se fait via la mesure de la résistance électrique. Elle permet d'extraire de plusieurs manières la température de transition d'un supraconducteur à haute température critique. L'étude du squid permet d'obtenir les caractéristiques de jonctions Josephson, conduisant en particulier à l'utilisation du squid comme outil pour mesurer l'aimantation. Enfin, l'étude des forces de lévitation permet d'aborder la physique du piégeage et de l'écrantage dans les supraconducteurs.

Conseils pour la rédaction de votre compte-rendu de TP

Règles générales :

- Votre compte rendu (CR) doit être compréhensible indépendamment du photocopié. C'est-à-dire qu'il ne s'agit pas simplement de juxtaposer les réponses aux questions posées dans le photocopié. Le contenu d'un CR doit former un ensemble cohérent.
- Un étudiant de niveau M1 en Physique doit pouvoir faire pour la première fois le TP rien qu'avec votre CR sans avoir le photocopié sous les yeux. Le CR doit donc contenir les éléments nécessaires à la compréhension des expériences réalisées ainsi qu'à l'analyse qui est faite des résultats. Il s'agit d'expliquer à quelqu'un votre démarche expérimentale et votre raisonnement.

Structure :

Le photocopié est là pour vous guider : il vous aide dans la démarche expérimentale et vous suggère les bonnes questions à vous poser. Le CR rend compte d'un travail de synthèse, il faut donc se détacher du photocopié. Le CR s'organise en 3 grandes parties :

- **Une introduction :** Elle présente le contexte général puis elle situe plus précisément le problème. On définit une problématique en posant une ou deux questions générales auxquelles on va essayer de répondre. On annonce ainsi le plan du CR.
- **Parties principales :** Il y a autant de parties que de problèmes abordés. Une partie = une question. Pour chaque partie il faut :
 - ✓ Décrire l'expérience via un schéma, même très simple. Ne pas oublier de faire apparaître les grandeurs mesurées pour fixer les notations.
 - ✓ Expliquer en une ou deux phrases ce que vous mesurez et comment.
 - ✓ Présenter vos mesures sous forme de graphe/tableau
 - ✓ Indiquer comment vous en tirez des conclusions : résultats numériques via formules, analyse de graphes, observations...
 - ✓ Evaluer quelles sont les erreurs commises sur ces mesures et comment elles influencent vos résultats.
 - ✓ Discuter vos résultats : correspondent-ils à ce à quoi vous vous attendiez ? Mettez vos résultats en relation avec des propositions théoriques, des valeurs de références... Soyez précis dans les termes et les comparaisons employées. Quelles hypothèses réalistes pourraient expliquer les éventuels désaccords observés ? Demandez-vous si vos résultats ont un sens et éliminez tout résultat absurde.
 - ✓ Conclure en répondant à la question posée en introduction de la partie.
- **Une conclusion générale :** Il s'agit de résumer les questions posées et les réponses apportées. Il faut faire apparaître les résultats marquants : c'est-à-dire ce qu'il faut retenir du TP. Vous pouvez alors compléter votre CR par des informations qui ne vous ont pas été données et qui vous semblent pertinentes. Dans ce cas ne pas oublier de citer vos sources (internet, livres...). Vous pouvez également formuler d'autres questions qui restent ouvertes et suggérer des moyens d'y répondre.

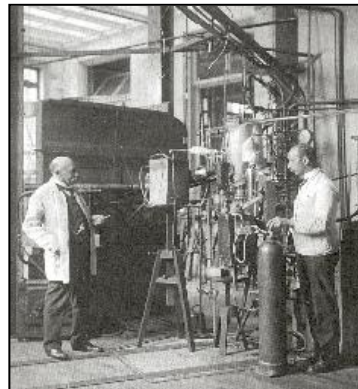
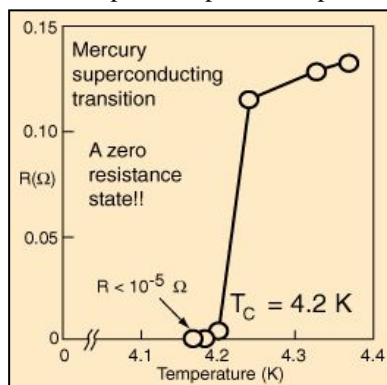
Enfin, dernier conseil, relisez-vous avant de rendre votre CR !!

A. Une introduction à la supraconductivité

Ces très brefs rappels ne sauraient en aucun cas se substituer à une étude complète et rigoureuse du phénomène de la supraconductivité.

1. La découverte de la supraconductivité

Une caractéristique des supraconducteurs (observée pour la première fois en 1911 par Onnes sur un échantillon de mercure) est que leur résistance s'annule en dessous d'une *température critique* T_C . Jusque dans les années 1980, le record de température pour un supraconducteur était de 23 K.

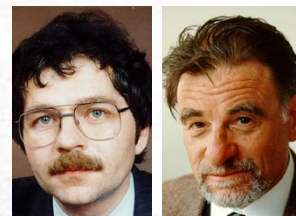


K. Onnes (à droite dans son laboratoire) découvre en 1911 la supraconductivité dans le mercure (à gauche, l'expérience d'origine).

Possible High T_c Superconductivity in the Ba – La – Cu – O System

J.G. Bednorz and K.A. Müller
IBM Zürich Research Laboratory, Rüschlikon, Switzerland

Received April 17, 1986



Metallic, oxygen-deficient compounds in the Ba – La – Cu – O system, with the composition $Ba_xLa_{5-x}Cu_5O_{5(3-y)}$ have been prepared in polycrystalline form. Samples with $x=1$ and 0.75 , $y>0$, annealed below 900°C under reducing conditions, consist of three phases, one of them a perovskite-like mixed-valent copper compound. Upon cooling, the samples show a linear decrease in resistivity, then an approximately logarithmic increase, interpreted as a beginning of localization. Finally an abrupt decrease by up to three orders of magnitude occurs, reminiscent of the onset of percolative superconductivity. The highest onset temperature is observed in the 30 K range. It is markedly reduced by high current densities. Thus, it results partially from the percolative nature, but possibly also from 2D superconducting fluctuations of double perovskite layers of one of the phases present.

Bednorz et Muller découvrent en 1986 de nouveaux supraconducteurs, dont la résistance s'annule à des T_c élevées (un extrait du premier article qui leur vaut le Prix Nobel en 1987)

En 1986, un nouveau supraconducteur, une céramique, a été découvert par J.G. Bednorz et K.A. Muller avec une température critique de l'ordre de 35 K. Dès les mois qui suivirent cette découverte, de nombreux autres matériaux analogues ont été découverts, dont les températures critiques peuvent aller jusqu'à 150 K. Ces matériaux, dits *supraconducteurs à haute température critique* ont l'énorme avantage d'avoir une température de transition pouvant être accessible avec de l'azote liquide (77.3 K à pression atmosphérique), et non plus uniquement avec de l'hélium liquide (4.2 K). De plus, ils remettent en cause notre compréhension de la supraconductivité qu'on pensait acquise jusque-là.

2. Effet Meissner

Une autre propriété importante des supraconducteurs (découverte par Meissner et Ochsenfeld en 1933) est que, dans l'état supraconducteur, un matériau placé dans un champ magnétique extérieur exclu toutes les lignes de champ (voir figure de gauche ci-dessous), si le champ extérieur est inférieur à un *champ critique*. Il devient alors un corps diamagnétique parfait. Une des conséquences frappantes de cet effet est la lévitation d'un aimant sur un supraconducteur (voir photo sur la première page du polycopié).

Par ailleurs, pour une grande partie des supraconducteurs, il existe une zone de champ intermédiaire où le champ pénètre sous forme de colonnes de flux (appelées *vortex*). C'est le cas pour les supraconducteurs à haute température critique étudiés au cours de ce TP.

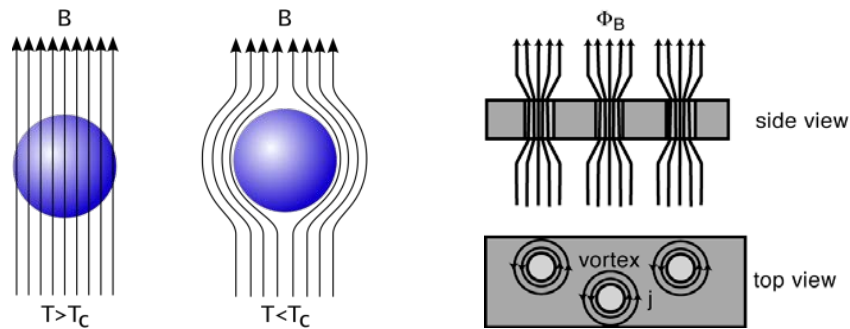
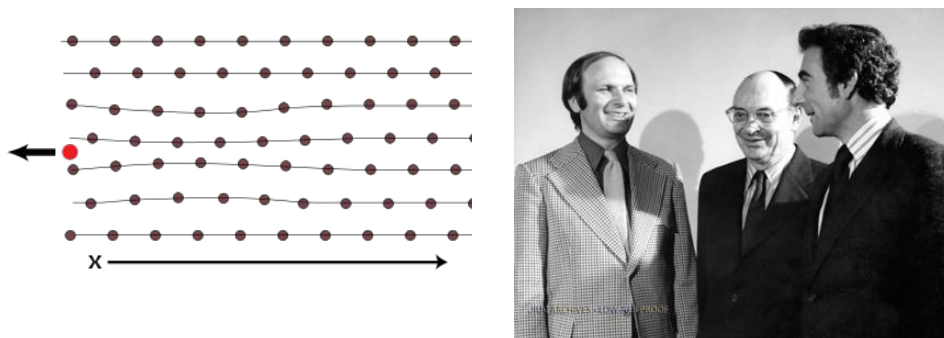


Figure de gauche : Représentation schématique d'une bille supraconductrice et ses lignes de champ l'entourant dans le cas non supra vs supraconducteur. Figure de droite : Dans certain supraconducteur dit de type II, le champ pénètre au sein du matériau sous formes de colonnes de flux entourées par un courant circulant (vortex).

3. La théorie BCS et ses limites

La théorie BCS (du nom de ses auteurs Bardeen, Cooper et Schrieffer qui l'ont établie en 1957) donne un cadre théorique à la supraconductivité. Elle peut qualitativement se résumer ainsi :

- Une interaction entre les électrons et les vibrations du réseau (les *phonons*) engendre une attraction effective entre les électrons. Si la température est suffisamment basse, cette attraction sera dominante et les électrons vont s'assembler en *paires de Cooper*.
- Dans l'état supraconducteur, la fonction d'onde de toutes les paires de Cooper a la même phase et peut être décrite par une unique fonction d'onde. Ce qui serait impossible pour des électrons de spin demi-entier obéissant à la statistique de Fermi-Dirac devient possible pour des paires d'électrons de spin entier obéissant à la statistique de Bose-Einstein. Les valeurs de la fonction d'onde à deux endroits quelconques d'un supraconducteur sont reliées par un simple changement de phase, l'amplitude restant constante. Le supraconducteur se comporte donc comme un objet quantique macroscopique.



A gauche : Dans un métal, les électrons chargés négativement exercent une attraction sur les ions positifs qui se trouvent dans leur voisinage. En raison de l'inertie de ces ions, il en résulte un excès de charges positives à l'endroit où cet électron est passé. Un second électron sentira donc une force attractive résultant de cet excès de charges positives. A droite : John Bardeen, Leon Cooper et Robert Schrieffer

Cette théorie BCS ne semble cependant pas expliquer la supraconductivité à haute température critique, où ce ne sont plus les vibrations de réseau qui sont responsables de l'existence de paires. Cependant l'existence de ces paires de Cooper et d'une fonction d'onde unique restent vraies et ont été vérifiées expérimentalement. On ne sait pas encore à ce jour ce qui joue le rôle du ciment pour les supraconducteurs à haute température critique. De même qu'il existe un champ critique pour l'effet Meissner, il existe un *courant critique*, c'est à dire un courant maximum au-delà duquel une résistance apparaît à nouveau dans le supraconducteur.

4. Les boucles supraconductrices

En 1950, il a été prédit théoriquement qu'un circuit supraconducteur fermé ne peut contenir qu'un nombre entier d'unités de flux magnétique Φ_0 (quantum de flux). Ceci peut s'expliquer qualitativement de la manière suivante : le changement de phase doit être 2π entre un point d'un anneau supraconducteur et ce même point obtenu en faisant un tour complet de l'anneau (voir figure de gauche ci-dessous). Selon la théorie de l'électromagnétisme, on modifie la phase de la fonction d'onde en appliquant un champ magnétique à un supraconducteur. Comme le changement de la phase en faisant un tour complet de l'anneau doit être 2π , le champ magnétique, et donc le flux traversant l'anneau ne peuvent prendre que des valeurs discrètes (voir figure du centre ci-dessous). Ce quantum de flux vaut:

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e}$$

L'expérience a confirmé ceci en 1961 (voir figure de droite ci-dessous). La supraconductivité est un des rares phénomènes physiques permettant d'observer la quantification d'un système macroscopique.

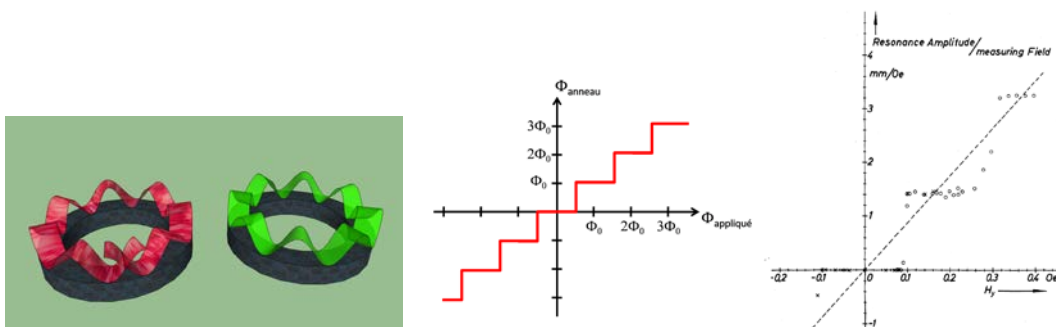


Figure de gauche : Représentation schématique d'un anneau supraconducteur. La variation de la phase du condensat le long de l'anneau est représentée par une oscillation de couleur. L'image de gauche est interdite, car la phase n'est pas continue (problème de raccord après un tour d'anneau). L'image de droite correspond à une situation qui est autorisée. Source : F. Bouquet et J. Bobroff- Figure centrale : Quantification du flux dans l'anneau en fonction du flux appliqué. Figure de droite : Résultat de la mesure historique de 1961 (Doll et Nöbauer PRL 7, 2 (1961))

Une autre propriété importante des boucles supraconductrice est qu'elles conservent indéfiniment le courant qui y circule. Considérons l'expérience suivante : on refroidit un anneau supraconducteur dans un champ magnétique correspondant à un flux Φ_0 à travers l'anneau. Selon la loi de l'induction de Faraday, un courant apparaît dans l'anneau supraconducteur à l'instant où l'on supprime le champ magnétique extérieur. Ce courant induit tente de s'opposer à la variation du champ magnétique en générant un champ qui va compenser le champ externe qu'on a supprimé. Dans un matériau ordinaire, ce courant décroît rapidement. Dans le supraconducteur, si le courant diminue très légèrement, le flux traversant l'anneau sera légèrement inférieur à Φ_0 , ce qui est impossible par quantification du flux. L'état supraconducteur étant composé d'un grand nombre de paires de Cooper occupant le même état quantique, il faudrait pour que le courant décroisse que tous les électrons passent en même temps dans un autre état quantique. Cet événement, extrêmement improbable, ne se produit jamais. En pratique, le courant induit dans la boucle supraconductrice ne disparaîtra jamais (tant que l'anneau restera supraconducteur). Cette dernière propriété permet de construire des aimants supraconducteurs permanents qui ne sont alimentés en courant qu'au début de leur vie, puis se maintiennent sans alimentation éternellement. Cet effet est notamment utilisé dans les appareils d'imagerie radio-médicale (IRM).

B. Etude de la transition supraconductrice

1. Cryogénie

La façon traditionnelle de produire des basses températures est d'utiliser des liquides cryogéniques (azote liquide jusqu'à 77.3 K, et hélium liquide en dessous). Ces liquides ont l'inconvénient de ne pas être facile à manipuler. On utilise ici une méthode basée sur un réfrigérateur en circuit fermé. Le principe est simple : on comprime de l'hélium gazeux qui est ensuite détendu dans une tête froide pour produire des basses températures (cycle de Gifford-Mc Mahon). On peut ainsi produire des températures de l'ordre de 10 K pour des têtes froides à deux étages de compression, et de l'ordre de 30 K pour les têtes à un seul étage.

La tête froide utilisée (Leybold RGS 20) est connectée à un compresseur à hélium par des tubes flexibles. La pression d'opération est typiquement 16 bar. Dans la tête froide, une synchronisation ouvre et ferme la vanne qui régule le débit de gaz dans le cylindre (cf. figure 8). L'échantillon à refroidir est monté sur une plaque en cuivre au-dessus du cylindre d'expansion de la tête froide, dans un cryostat. L'ensemble du cryostat est pompé en vide primaire, pour assurer une bonne isolation thermique entre l'échantillon et l'extérieur. Un passage verre-métal permet de sortir de l'enceinte les signaux électriques.

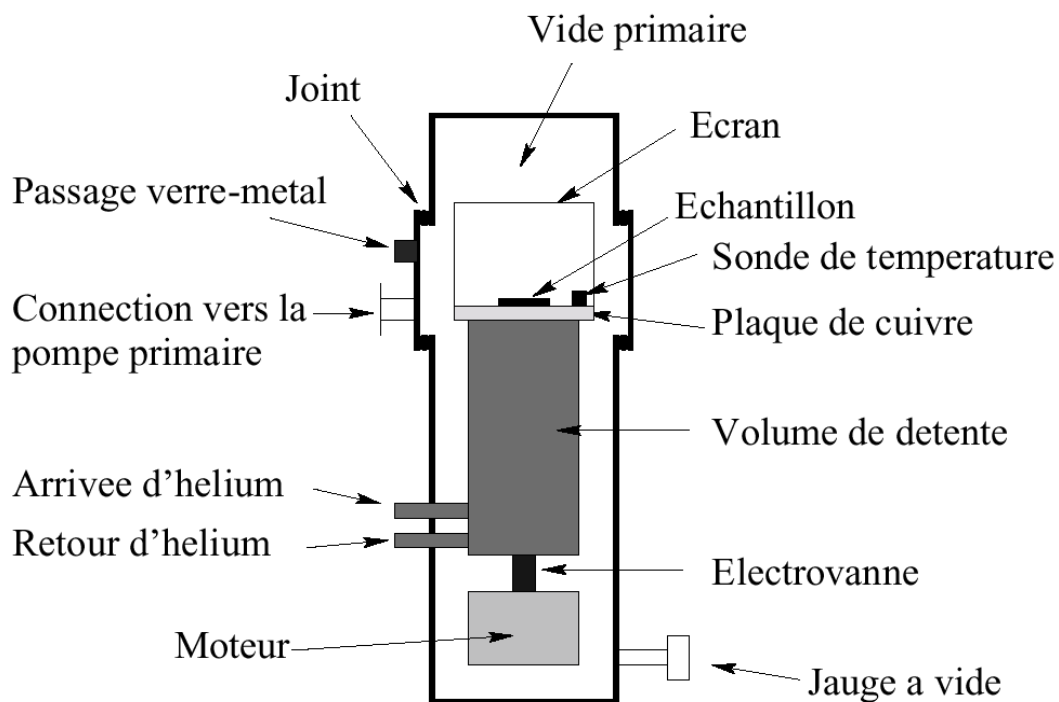


Figure 8. Schéma de la tête froide à un étage RGS20

Le compresseur à hélium et la pompe primaire sont communs aux deux têtes froides de la salle (cf. figure 9). Le compresseur nécessite un refroidissement permanent à l'eau pour pouvoir fonctionner. Un boîtier de commande électrique permet de démarrer ou d'arrêter individuellement les deux têtes froides. **Consulter la notice en salle pour l'opération de l'appareillage.**

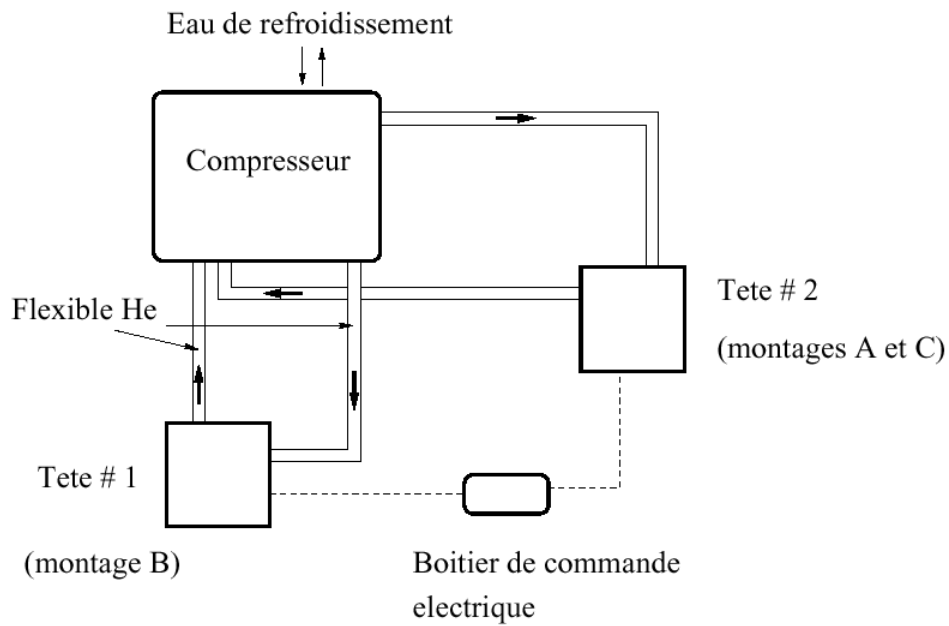


Figure 9. Schéma de l'appareillage commun aux deux têtes froides

2. Principe de la mesure

Les échantillons d' $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ sont des barreaux rectangulaires de dimensions variables. Quatre fils sont collés à l'aide d'une résine époxy conductrice comme indiqué sur la figure 10. Les contacts extérieurs servent au passage du courant, tandis que les contacts intérieurs servent à mesurer la chute de potentiel dans l'échantillon par l'intermédiaire de deux fils de même nature. En utilisant cette méthode (dite *méthode à 4 points*), on élimine le problème de la chute de potentiel dans les fils qui portent le courant, ainsi qu'aux interfaces entre l' YBaCuO et les fils. Le schéma de câblage de l'échantillon utilisé se trouve dans la documentation en salle.

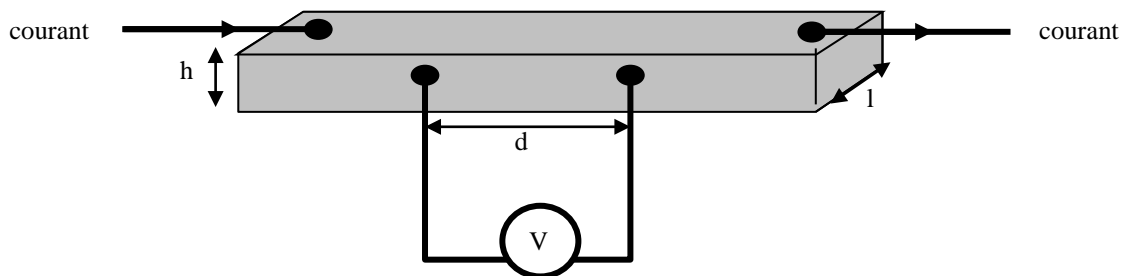


Figure 10. L'échantillon supraconducteur et ses électrodes

Une sonde de température à résistance de platine est installée pour chaque montage sur la plaque porte-échantillon, à quelques centimètres de l'échantillon d' YBaCuO .

3. Le travail à effectuer

Mesures :

- **programme de mesure** : Familiarisez-vous et préparez le programme de mesure qui vous permettra d'une part de mesurer la température, d'autre part la résistance du supraconducteur.
- **mesure de la température** : on utilise une résistance platine dont la valeur est calibrée en fonction de la température. On mesure cette résistance par une technique 4 points, en utilisant pour source de courant une alimentation 1 mA elle-même alimentée par une tension 5 V prise sur le porte module. Vérifier que vous mesurez bien la température ambiante avant de refroidir. Vous pourrez également vérifier votre thermométrie à basse température en utilisant une autre résistance platine (que l'enseignant vous fournira) et en la plongeant dans de l'azote liquide.
- **mesure de résistance** : mesurez à température ambiante la résistance du barreau d'YBaCuO et décidez ainsi des gains et gammes à choisir pour la mesure.
- **Mesure de la caractéristique tension-courant** : Mesurez la tension V aux bornes du barreau en fonction du courant injecté I . Tracez cette caractéristique $V(I)$ et vérifiez la loi d'Ohm. Observez-vous des écarts à cette loi? Comment l'expliquez-vous et comment cela altérera les mesures à venir?
- **mesure finale** : mesurez $R(T)$ en refroidissant puis en réchauffant, pour différents courants $I = 20\text{mA}, 50\text{mA}, 100\text{mA}, 200\text{mA}$ et 400mA .

Analyse (à faire pendant la séance avec Igor):

- **loi d'Ohm à température ordinaire** : A partir de la loi d'Ohm mesurée, en déduire la résistivité ρ , et comparez à ce que vous mesureriez dans un métal typique comme du cuivre. Commentez.
- **transition supraconductrice** : déterminez la température critique T_c en choisissant différentes méthodes graphiques (tangentes, points d'inflexion, dérivées...). Pour chaque méthode, déterminez T_c et la barre d'erreur associée à cette détermination graphique. La valeur obtenue vous semble-t-elle raisonnable? Analysez, comparez, et commentez vos mesures dans les différents cas (descentes, montées, différents courants...).

Attention : Vous devrez réaliser des courbes où sont superposées 1- les courbes du refroidissement (et réchauffement) aux différents courants, 2- les courbes de refroidissement et réchauffement à courant fixé. Par ailleurs, les courbes représentant T_c en fonction du courant appliqué à la fois pour le refroidissement et le réchauffement sont nécessaires pour chaque méthode.

N.B. 1 : Pour la méthode des tangentes, le tracé des droites à l'œil ne suffit pas. Utilisez les équations de droites $y=ax+b$, $y'=ax+c$ et $y''=ax+(b+c)/2$.

N.B.2 : Pour la méthode des dérivées, il sera intéressant soit de lisser les données avant de dériver automatiquement avec Kaleidagraph soit d'effectuer une dérivée « manuelle » en allant chercher des points éloignés par rapport à l'abscisse de la dérivée. On rappelle ici que la dérivée numérique autour du i ème point est $R'[i] = \frac{R(i+a)-R(i)}{T(i+a)-T(i)}$. Si $a=1$, on effectue une dérivée très locale qui correspondra à du bruit. Si $a=10$ au contraire, on s'affranchit du bruit rapide et obtient une dérivée du signal variant plus lentement. En pratique, testez différentes valeurs de a .

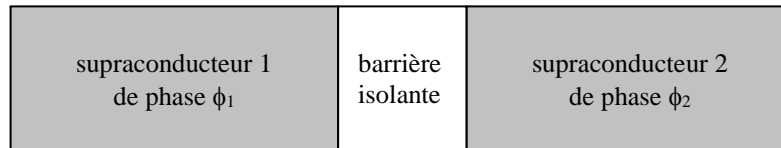
- **résistivité pour $T > T_c$ (état normal)** : Analysez le type de loi que suit la variation en température $\rho(T)$ et comparez au comportement attendu dans un métal usuel. Pour cela il faudra déterminer l'exposant critique α dans l'expression $\rho(T) = a T^\alpha + b$. a , b et α étant des constantes à déterminer.
- **résistivité pour $T < T_c$ (état supraconducteur)** : Que mesurez-vous ? Qu'attendrait-on théoriquement? Commentez. Comment amélioreriez-vous le dispositif actuel? Cela correspond-t'il aux remarques faites lors des mesures de loi d'Ohms précédentes?

C. Etude d'un SQUID

Le fonctionnement d'un SQUID repose à la fois sur l'utilisation de jonctions Josephson et la quantification du flux dans un anneau supraconducteur.

1. Principe de fonctionnement d'un SQUID

Dans un matériau ordinaire, les phases en deux points différents ne sont pas corrélées. Dans un supraconducteur, au contraire, les phases en deux points distincts sont reliées entre elles. Brian D. Josephson a prédit en 1962 que si deux supraconducteurs étaient suffisamment proches l'un de l'autre, les phases en deux points de ces supraconducteurs devaient également être reliées. En d'autres termes, ces deux supraconducteurs vont agir comme s'ils ne faisaient qu'un. Un courant, dû au passage de paires de Cooper par effet tunnel dans la jonction, peut ainsi se propager sans résistance entre les deux zones supraconductrices. Ces courants sont appelés des *courants Josephson* et un système composé de deux régions supraconductrices ayant cette propriété est appelé *jonction Josephson*. Une jonction Josephson (cf figure 1) peut donc être représentée comme deux supraconducteurs faiblement couplés à travers une barrière isolante de faible épaisseur (de 10 à 30 Å). Le faible couplage fait qu'il existe une faible probabilité de passage des paires d'un côté à l'autre de la barrière par effet tunnel.



De manière rigoureuse, les *courants Josephson* sont l'expression de l'*effet Josephson continu* qui se caractérise par la première relation Josephson :

$$I = I_C \sin(\phi_2 - \phi_1) = I_C \sin(\Delta\phi)$$

Il existe une seconde propriété de ces jonctions qui fait que ces courants peuvent osciller à haute fréquence dans le cadre d'une polarisation en tension V , c'est l'*effet Josephson alternatif* émergeant de la seconde relation Josephson :

$$d\Delta\phi/dt = 2eV/\hbar$$

Une jonction Josephson a généralement un courant critique bien plus faible que celui des deux régions supraconductrices qu'elle connecte. C'est la raison pour laquelle ces jonctions sont souvent appelées « *weak-link junctions* ».

Un SQUID est la réunion de deux effets : quantification du flux dans un anneau supraconducteur et jonction Josephson. On peut l'obtenir par exemple avec le circuit suivant : une boucle supraconductrice et deux jonctions supra-isolant-supra. Cet ensemble (cf figure 2) est appelé *squid dc* (les squids commerciaux sont souvent obtenus avec une seule jonction et s'appellent *squid rf* car on les couple avec des circuits radiofréquences). Le squid permet notamment de mesurer les champs et flux magnétiques avec une précision typique meilleure que 10^{-11} Gauss/cm² : dans un squid de $20 \times 2 \mu\text{m}^2$, on peut ainsi détecter des champs jusqu'à $2 \cdot 10^{-5}$ Gauss (le champ terrestre étant de l'ordre du Gauss). On utilise des squids pour mesurer des aimantations dans les laboratoires, mais aussi pour de l'imagerie magnétique de l'activité électrique/magnétique du cerveau.

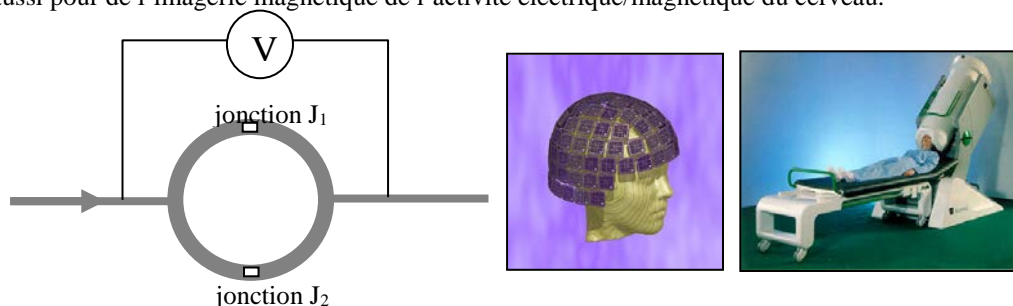


Figure 2. Schéma de principe d'un squid dc constitué de deux jonctions Josephson J_1 et J_2 , et utilisation d'un squid pour de l'imagerie magnétique de l'activité cérébrale.

Effet Josephson continu sans champ magnétique extérieur

La caractéristique courant-tension d'une jonction Josephson de courant critique I_C a la forme décrite sur la figure 3. On applique un courant constant I_{pol} . En l'absence de flux magnétique extérieur, tant que $I_{pol}/2 < I_C$, le courant circule dans les 2 jonctions sans résistance (d'où son nom de *supercourant*), et la tension est donc nulle.

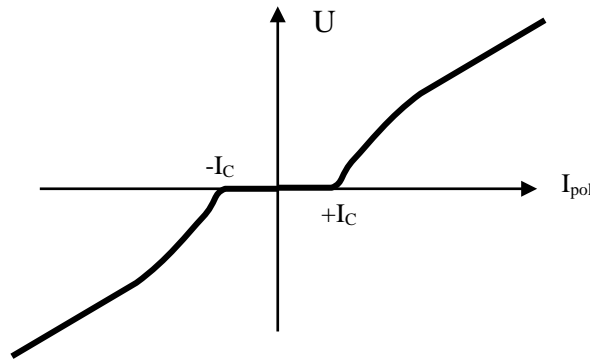


Figure 3. Caractéristique courant-tension typique pour une seule jonction Josephson

Avec champ magnétique extérieur

Appliquons maintenant au squid un flux extérieur depuis $\Phi_{ext} = 0$ jusqu'à $\Phi_{ext} = \Phi_0$ en le couplant par induction avec une bobine. Que se passe-t-il ?

- Pour $\phi_{ext} < \phi_0$, le flux ne peut passer : à cause de la quantification du flux dans la boucle, il ne peut passer qu'un multiple entier de Φ_0 . D'où il apparaît dans la boucle un courant d'écrantage I_s qui s'oppose à Φ_{ext} (cf figure 4) pour maintenir le flux dans la boucle nul. Dans ce cas, le courant critique effectif de la jonction du bas est réduit de I_s puisque cette jonction voit le courant $I_{pol}/2 + I_s$. Donc le courant critique I_c associé au squid est de même réduit de I_s .
 - Dès que Φ_{ext} devient supérieur à $\Phi_0/2$, par exemple $\Phi_0/2 + \varepsilon$, la boucle squid n'a plus intérêt à opposer un courant I_s à ce flux mais plutôt à laisser passer un Φ_0 et à induire un courant de sens opposé au cas précédent, pour compenser cette fois $\Phi_0/2 - \varepsilon$ (cf figure 5). Dans ce cas, le courant critique est réduit dans la boucle du haut.
1. Quand Φ_{ext} vaut finalement Φ_0 , le squid laisse passer le quantum de flux, et son courant critique est alors maximum.

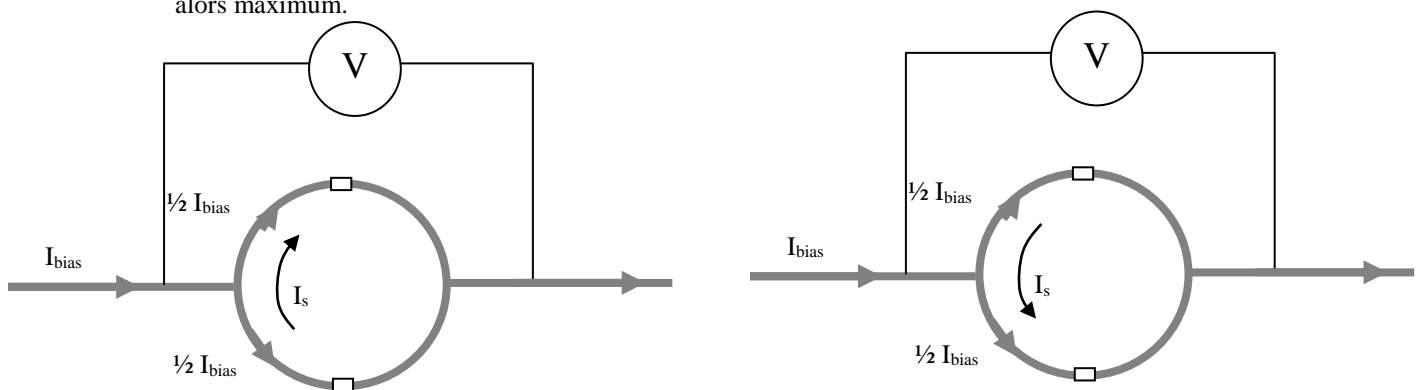


Figure 4. Squid dc en présence d'un champ flux externe $0 < \Phi_{ext} < \Phi_0/2$ (à gauche) et pour $\Phi_{ext} \approx \Phi_0/2 + \varepsilon$ (à droite). I_{bias} est le courant délivré dans le squid, et I_s le supercourant induit dans la boucle.

Finalement, on voit qu'en appliquant progressivement un flux extérieur, le courant induit par le squid pour compenser augmente de 0 à une valeur I_{max} à $\Phi_{ext} = \Phi_0/2 - \varepsilon$, puis s'inverse et augmente de $-I_{max}$ à $\Phi_{ext} = \Phi_0/2 + \varepsilon$ jusqu'à 0 à $\Phi_{ext} = \Phi_0$, et ainsi de suite. Autrement dit, I_s , et donc le courant critique I_c , sont des fonctions périodiques de Φ_0 .

Si on veut mesurer cet effet, on peut mesurer la tension du squid en appliquant un courant constant I_{pol} juste supérieur à I_c puis on applique progressivement un flux extérieur. La caractéristique $V = f(I)$ des jonctions est représentée sur la figure 3. On voit que pour $\Phi = n\Phi_0$, c'est à dire pour un courant I_c maximum, la tension mesurée pour le courant I_{pol} choisi au début sera faible. Au contraire, pour $\Phi = n\Phi_0 + \Phi_0/2$, la tension pour ce même courant I_{pol} sera élevée. Plus généralement, cette tension variera périodiquement avec le flux entre ces deux valeurs extrêmes, la période étant Φ_0 . Autrement dit, le comportement typique du squid peut être mesuré en montrant que $V(\Phi_{ext})$ est périodique de période Φ_0 . On peut ainsi en comptant le nombre de Φ_0 trouver le flux induit à Φ_0 près, et même bien mieux.

Noter que l'on choisit $I_{pol} > I_c$ ce qui ne signifie pas que la boucle n'est plus supraconductrice, seules les jonctions sont en mode résistif, mais le supra lui même a un courant critique bien plus grand que celui de la jonction.

A noter également que la forme périodique de $V(\Phi_{ext})$ vient directement de l'interférence entre la fonction d'onde passant par les deux chemins, de façon analogue aux fentes d'Young en optique. Cela vient de la phase unique pour tout le supra, c'est à dire, comme pour un laser, de la cohérence de la fonction d'onde pour tout le supra. Le squid est donc une manifestation d'un phénomène purement quantique à une échelle quasi macroscopique.

Remarque : L'apparition du courant d'écran diminue la valeur du courant critique effectif du squid. Il faut donc veiller à ne pas trop polariser le squid.

2. Cryogénie et montage expérimental

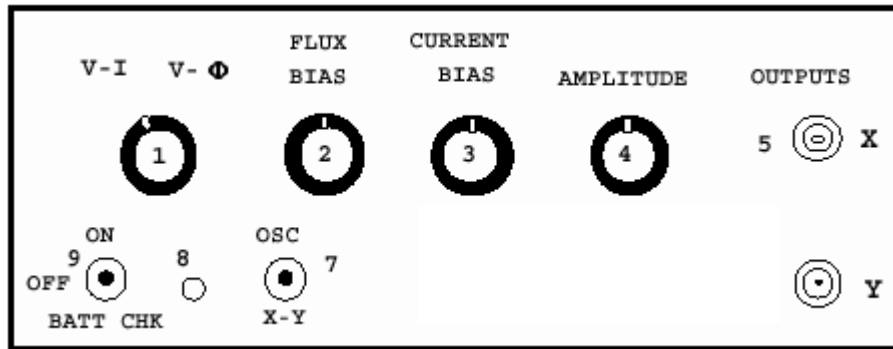
On plonge directement le squid dans un bain d'azote liquide pour le refroidir. On peut refroidir encore plus le bain d'azote en pompant sur l'air au dessus du liquide. Une sonde de température (utilisant un montage 4 points) est fixée sur la plaquette supportant le squid.

Il est impératif de demander l'autorisation à l'enseignant avant toute manipulation impliquant l'azote liquide.

De plus, lors du refroidissement, il faut veiller à ce que le squid ne piège pas de flux lors de son passage à l'état supraconducteur. L'idéal pour cela serait de couper toutes les sources de rayonnement au moment de l'introduction du squid dans l'azote liquide (notamment tous les pc de la salle). Cette idée risque de ne pas être très populaire auprès des autres binômes.. Empiriquement, on a donc découvert que la meilleure solution consistait à introduire le squid dans l'azote liquide dans une autre pièce du bâtiment, et de le ramener ensuite dans la salle.

Demandez plus de détails à l'enseignant. Ne prenez pas d'initiative à ce sujet !

Le boîtier de commande du squid permet de délivrer soit un courant variable en entrée du squid, soit un flux variable (via une bobine d'or autour du squid). Son fonctionnement est très simple et la mesure par oscillo ou par carte d'acquisition des voies X et Y permettent de remonter aux caractéristiques V-I et V- Φ :



panneau avant du boîtier de commande

- 1 : choix entre un mode V-I où on fait varier la tension V aux bornes du squid ou un mode V- Φ où on fait varier le flux dans le squid.
- 2 : réglage du milieu de la rampe de flux (en mode V- Φ)
- 3 : réglage du milieu de la rampe de tension (en mode V-I)
- 4 : réglage de l'amplitude de la rampe de tension ou de flux selon le mode choisi
- 5 : sortie d'une tension proportionnelle à I ou Φ selon le mode choisi
- 6 : sortie d'une tension proportionnelle à V aux bornes du squid
- 7 : choix de la vitesse de la rampe (OSC : très rapide, XY : très lent)
- 8 et 9 : vérifier avec BATT CHK que le boîtier est alimenté (la diode rouge s'allume).

Penser à le fermer dès qu'on ne l'utilise pas si il est sur piles et pas sur secteur.

La tension aux bornes du squid et le courant circulant dans le squid ou dans la bobine inductrice sont amplifiés et transformés en tension par l'électronique contenue dans le boîtier. Les facteurs de conversion sont :

$$\text{axe des tensions : } U_{\text{lue}} = U_{\text{réel}} * 10^4$$

$$\text{axe des courants : } U_{\text{lu}} \text{ (en Volts)} = I_{\text{réel}} \text{ (en Ampères)} * 10^4$$

3. Nature du travail à effectuer

• Caractéristique V(I) :

- A température ambiante, mesurez la caractéristique V-I du squid. A quelle résistance cela correspond-il ? A quelle résistivité cela correspond-il, sachant que le squid est une boucle carrée de côté extérieur 90 μm et de côté intérieur 50 μm et d'épaisseur approximative de l'ordre de 0.1 à 1 μm ? Comment cela se compare-t-il à votre mesure de résistivité de YBaCuO dans l'autre partie du TP à température ambiante ?
- A froid : mesurez le courant critique I_c et la résistance dans la région $I > I_c$ et $I < -I_c$ sur la courbe I-V. Commentez ? Pourquoi la valeur de la résistance est-elle si faible même au-delà du courant critique ?
- Mesurez qualitativement l'évolution en température de ces quantités (on laissera réchauffer l'azote, ou on le réchauffera de façon forcée en y plongeant des corps chauds, puis une fois à 77 K, on pourra essayer de soulever le squid dans les vapeurs d'azote au-dessus du liquide pour chauffer plus encore. Quelles lois suivent ces quantités ? Le comprend-on ? Comparer éventuellement à la mesure R(T) de l'autre partie du TP.
- En restant dans le mode V-I, faites varier le flux dans le SQUID. Observez comment la caractéristique courant tension est affectée par le flux magnétique. Dans quelle gamme de courant attendez-vous une variation de la tension en fonction du flux appliqué. Tracer la courbe V(Φ) attendue pour $I_b=0$, $I_b \sim I_c$, et $I_b \gg I_c$.

- **Caractéristique $V(\Phi)$:**

- Repartir d'une bonne caractéristique $V(I)$ à froid. Brancher tous les fils du thermomètre à une seule masse pour empêcher qu'il fasse antenne et ne parasite la mesure. Vérifier votre prédiction théorique et mesurer $V(\Phi)$ pour différents courants I_{bias} . Reporter l'évolution de l'amplitude de la courbe $V(\Phi)$ et de sa période en fonction de I_{bias} et justifier le comportement observé.
- Convertir le courant mesuré en abscisse dans le mode $V-\Phi$ en flux en sachant que c'est le courant envoyé dans la bobine en or placée autour du squid, dont la mutuelle inductance avec le squid est de l'ordre de $M=20\text{pH}$.
- La période attendue correspond au quantum de flux $\Phi_0=h/2e$. Mesurez et comparez à la valeur théorique.

- **Le squid comme magnétomètre :**

On utilise entre autres les squids comme magnétomètres, c'est à dire pour mesurer finement l'aimantation de différents matériaux. Le principe de la mesure est le suivant : pour mesurer l'aimantation d'un corps quelconque, il suffit de mesurer le flux qu'il induit dans une bobine de détection. En effet, l'échantillon peut être assimilé lui-même à une bobine parcourue par un courant, et par mutuelle inductance, il va induire un flux proportionnel à sa propre aimantation dans la bobine de mesure. On se sert du squid justement comme de bobine de mesure, car il est extrêmement sensible au flux magnétique. Autrement dit, en faisant passer l'échantillon aimanté à mesurer le long du squid, on mesurera son effet sur le flux passant dans le squid par mutuelle inductance.

On se propose ici de mesurer le flux induit par le champ terrestre dans le squid, et donc de remonter ainsi à la valeur du champ terrestre. Ensuite vous mesurerez la décroissance en fonction de la distance du champ magnétique créé par un aimant.

- **Champ magnétique terrestre :**

Observation qualitative : avec le squid en mode $V-\Phi$, demandez à l'enseignant d'ôter à froid le blindage qui protège le squid du champ extérieur. Puis observez l'effet du champ terrestre en le faisant varier au niveau du squid (en jouant sur l'orientation du squid par rapport au champ terrestre).

Observation quantitative : déduire de l'effet observé ci-dessus le champ terrestre. Est-ce une valeur raisonnable ? Comparez avec la valeur théorique sur Orsay.

- **Champ magnétique créé par un aimant :**

Observation qualitative : avec le squid en mode $V-\Phi$, déterminez l'axe principal du SQUID (en jouant sur l'orientation de l'aimant par rapport au SQUID) et rapprochez/éloignez un aimant le long de cet axe en observant l'effet sur la caractéristique $V-\Phi$.

Observation quantitative : déduire de l'effet observé ci-dessus le champ magnétique créé par l'aimant à une distance donnée du SQUID. Est-ce une valeur raisonnable? Mesurez ensuite la décroissance du champ magnétique en fonction de la distance à l'aimant. Comprenez-vous cette loi de décroissance?

Quelques conseils à propos de ce TP :

- si vous sortez le squid de l'azote pour le réchauffer ou changer l'azote, il faut qu'il soit complètement réchauffé avant de le refroidir à nouveau (souffler dessus avec de l'air comprimé une dizaine de minutes, et éventuellement aussi à l'air chaud).
- Quand vous branchez le boîtier de commande sur le squid une fois qu'il est refroidi, soyez en mode $V-I$.
- Penser à ne pas laisser la masse flottante pour les mesures ou pour le thermomètre de platine (même si vous ne le mesurez pas, sans quoi il jouera le rôle d'antenne parasite).

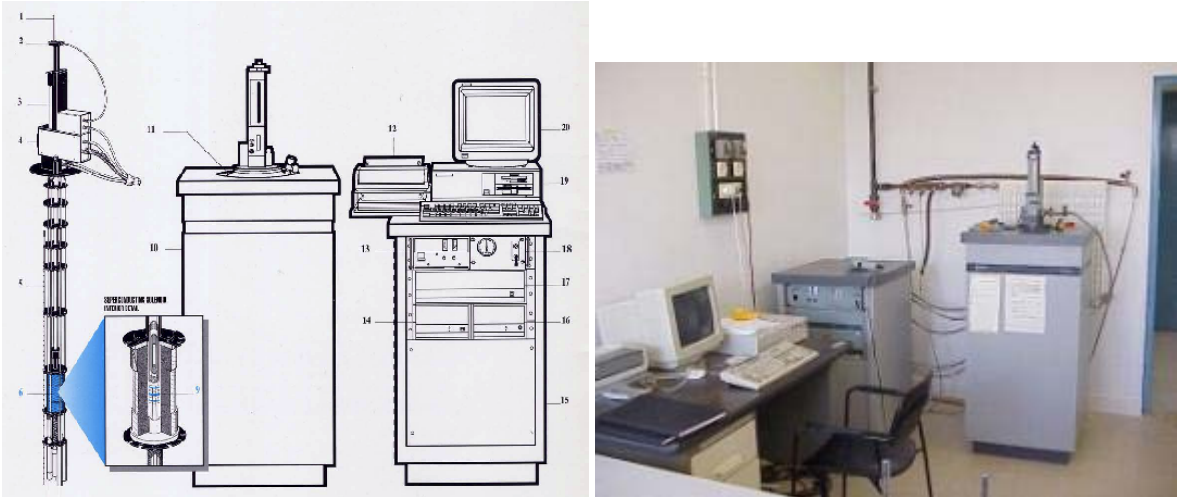


Figure 5. Un squid commercial pour mesurer les aimantations

D. Etude de la force de lévitation

Lorsqu'on place un aimant au dessus d'un supraconducteur, celui-ci peut léviter dans certaines conditions. On observe de plus qu'il est en général stable. Cette lévitation et la stabilité mettent en jeux des forces que l'on se propose de mesurer et de comprendre dans ce TP.

1. La force de lévitation et le piégeage

La lévitation d'un aimant au dessus d'un supraconducteur vient en premier lieu de l'effet Meissner : en présence d'un champ magnétique, il apparaît des boucles de supercourants à la surface du supraconducteur qui induisent un champ magnétique qui s'oppose à celui de l'aimant pour que le champ final au sein du supraconducteur soit nul. Ces boucles correspondent à une sorte d'aimantation interne dans le supraconducteur qu'on note M_{supra} . On a donc :

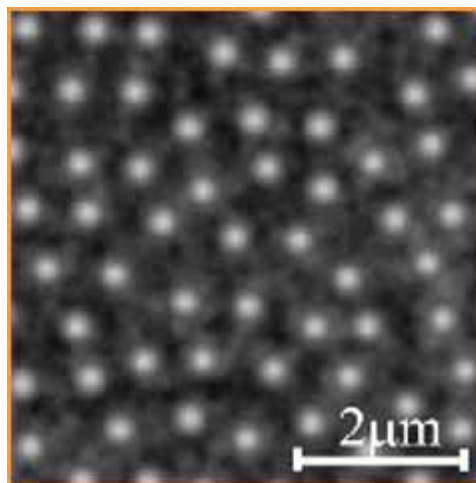
$$M_{\text{supra}} = -H_{\text{aimant}}$$

Cette aimantation du supraconducteur induit une force sur l'aimant qui s'écrit :

$$F_z = \mu_0 M_{\text{supra}} \frac{\partial H_{\text{aimant}}}{\partial z} V$$

où V est le volume de l'échantillon supraconducteur, M_{supra} son aimantation (pas celle de l'aimant), et H le champ créé par l'aimant dans l'axe vertical z . Cette force peut être suffisante pour compenser la gravité et faire donc flotter l'aimant.

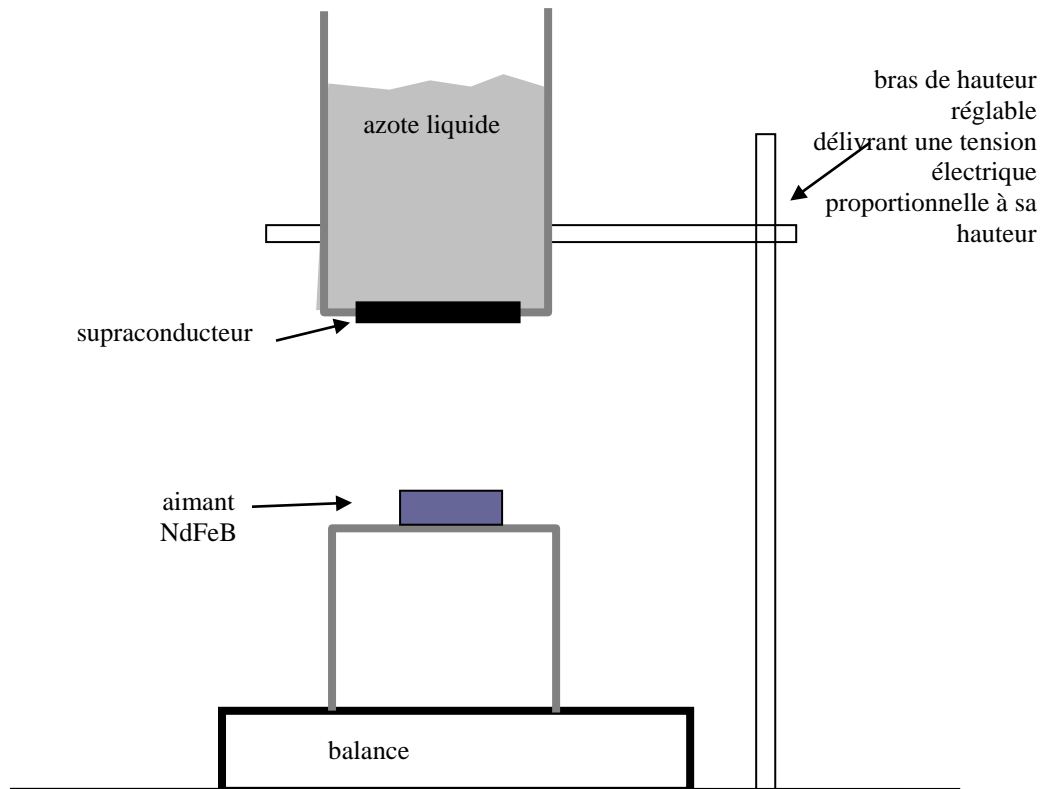
Dans les supraconducteurs de type II, comme celui utilisé dans ce TP, il apparaît une complication : au delà d'un champ critique H_{C1} de l'ordre de la centaine de Gauss, l'échantillon n'est plus parfaitement diamagnétique et laisse pénétrer en son sein le champ magnétique sous forme de colonnes, appelées "vortex", portant chacune un flux $\Phi_0 = h/2e$ et autour de laquelle se développent également des supercourants. Lorsqu'on applique le champ magnétique, tant que $H < H_{C1}$, il y aura l'effet Meissner traditionnel. Quand $H > H_{C1}$, des vortex se mettent à apparaître dans l'échantillon. Cependant, à cause du désordre possible dans le matériau et de ses caractéristiques, les vortex ont plus ou moins de difficulté à pénétrer ou ressortir. On appelle force de piégeage la force qui retient les vortex (une fois entrés) ou s'oppose à leur entrée.



réseau de vortex dans du Nb

2. Montage expérimental

Le montage est représenté sur la figure ci-contre :



Le supraconducteur est refroidi par de l'azote liquide. L'aimant est placé au-dessus d'une balance. La force exercée par le supraconducteur sur l'aimant est donc mesurée via le poids exercé sur la balance.

L'azote : Il est impératif de demander l'autorisation à l'enseignant avant toute manipulation impliquant l'azote liquide. Ne prenez pas d'initiative à ce sujet !

La balance : ne jamais approcher d'aimant trop près du plateau de la balance. Choisir la balance adaptée à votre mesure (deux balances disponibles). On vous fournit l'interface de dialogue avec labview.

Les pastilles : vous disposerez de pastilles de différents types ("faible", "modéré", "fort") toutes faites d' $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ mais de caractéristiques cristallographiques différentes. **Toujours sécher une pastille après refroidissement pour éviter qu'elle se givre ou soit humide. Ne jamais refroidir une pastille humide ou givrée.**

3. Nature du travail à effectuer

- **Lévitatie qualitative** : réaliser avec l'aide de l'enseignant des expériences de lévitation sur les deux pastilles, "faible" et "forte". Essayer de tester les forces en jeu qualitativement.
- **Utiliser le programme** pour mesurer le poids exercé sur la balance en fonction de la hauteur du supraconducteur (lu grâce à une tension continue liée au déplacement du bras réglable). Dans ce programme, on doit pouvoir suivre en direct les variations de hauteur et de poids et choisir par action sur un bouton quand on souhaite sauver un point de mesure dans un fichier.
- **Mesure de l'effet de l'aimant (calibration)** : Mesurer le champ magnétique (en réalité "l'induction" en Gauss ou en Tesla) créé par l'aimant en fonction de la hauteur au-dessus de l'aimant grâce à une sonde Hall. En déduire un ajustement phénoménologique permettant de déterminer le champ magnétique si on connaît l'altitude. Introduire dans votre programme cette conversion hauteur-champ magnétique.
- **Pastille "faible" refroidie sous champ** : rendre la pastille supraconductrice lorsqu'elle est proche de l'aimant donc sous champ magnétique. Mesurer la force fonction du champ magnétique, son signe, son amplitude, sa variation, et si il s'agit d'une expérience réversible. Mesurer à l'aide du gaussmètre (loin de l'aimant) s'il y a eu piégeage de vortex.
- **Pastille "faible" refroidie hors champ** : faire de même, mais après un refroidissement hors du champ magnétique. Comparer.
- **Pastille "forte"** : procéder de même (refroidissement sous champ puis hors champ). Comparer avec la pastille faible.

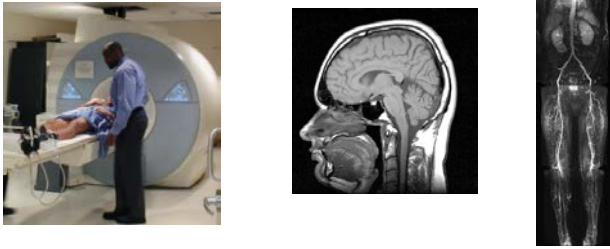
E. Bibliographie

Cette bibliographie n'est qu'indicative. De nombreux ouvrages existent à la bibliothèque universitaire sur les supraconducteurs.

- X. Grison, T. Kontos, M. Aprili, J. Lesueur, "*De l'ordre dans les supraconducteurs* », La Recherche, Janvier 2001, pp.44
- N. Bontemps, R. Combescot et P. Monod, "*Les supraconducteurs à haute température*", La Recherche, Février 1992, 180-187.
- B. Petley, "*Les SQUID*", La Recherche, Mai 1982, 604-613.
- R. Simon, "*High-T_c thin films and electronic devices*", Physics Today, Juin 1991, 64-70.
- M. Tinkham, "*Introduction to superconductivity*", Ed. Krieger, McGraw Hill (1975), chapitre 6
- C. Kittel, Physique de l'état solide, Dunod
- La guerre du froid : une histoire de la supraconductivité, Jean Matricon, Ed. du Seuil, 1994
- Histoire et légendes de la supraconduction, Ortoli S., Klein J., Ed. Calmann-Lévy (1989)
- Koelle et al., "*Review of Modern Physics*", Vol.71, pp.631 (1999) : article récent avec bonne introduction sur les squids dc et rf, ainsi qu'une revue sur les squids à haute température critique

Quelques applications des supraconducteurs

Les champs magnétiques pour l'imagerie médicale (IRM)



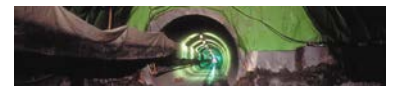
Les champs magnétiques intenses pour la recherche fondamentale



Une bobine supra

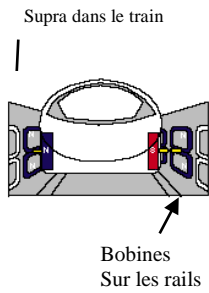


Une bobine hybride de 45 Tesla (Talahassee)



Le CERN et des aimants supraconducteurs l'équipant

Des trains qui lèvent



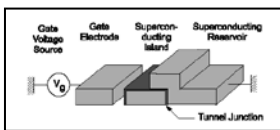
Le MAGLEV au Japon

Un transport d'énergie très économique

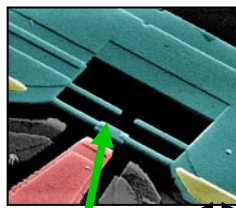


Pirelli : lignes de transmission de l'électricité
Cables de 100 mètre pour délivrer 100 millions de Watt

Ordinateurs quantiques: le qBit supra



Principe : tunneling des paires d'électrons
Contrôle du qbit par pulses microondes



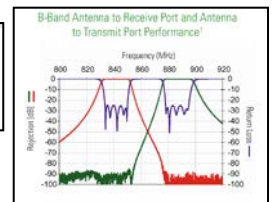
Île supra

1 μm

D'excellents filtres en électronique pour les téléphones portables



Products



SQUID

Pour mesurer les champs magnétiques

