

I. Partie expérimentale

Sujets élaborés lors de cette expérience:

- Supraconductivité (théorie et phénoménologie)
- High-Temperature-Superconductors (HTSC), notamment YBaCuO
- Effets Josephson (DC et AC)
- Fonctionnement et applications du DC SQUID

Attention:

- Respectez les consignes de sécurité concernant le travail avec l'azote liquide.
- Mr. SQUID est fragile. La tête de mesure ne doit pas subir de flexion ni choc thermique (ne le plongez pas brusquement dans l'azote liquide).
- Certains composants doivent être attachés avec de la bande adhésive sur la tête de mesure. Ne la collez pas sur les lignes conductrices imprimées.

Expérience 1

Familiarisation avec Mr. SQUID

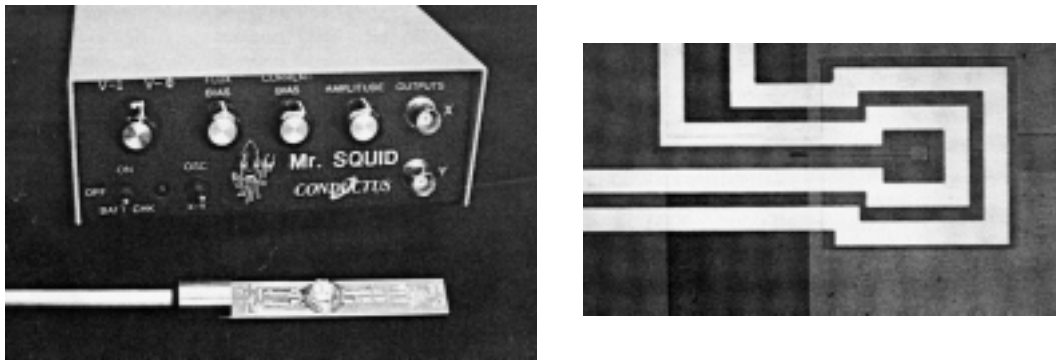


Fig.1: Mr. SQUID et détail de la tête de mesure

- A) - Identifiez les différents composants de Mr. SQUID et de l'expérience en général, vérifiez leur bon fonctionnement, piles etc.(fig. 1 et 2).
- Remplissez le réservoir avec l'azote liquide (LN_2) et branchez Mr. SQUID.
- B) - Testez les différents modes de fonctionnement et visualisez une courbe I/V sur l'oscilloscope.

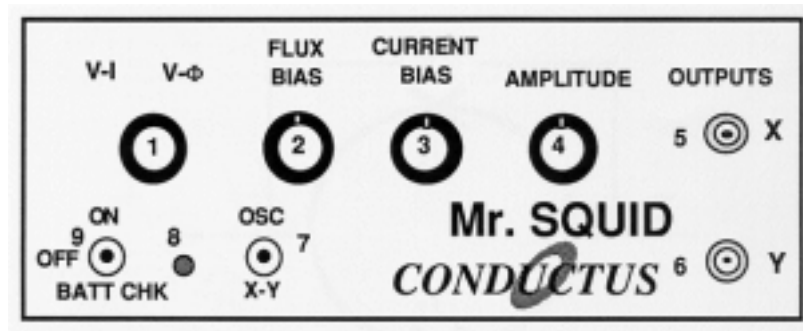


Fig. 2: Boîtier de Mr. SQUID

- Évaluez qualitativement l'influence d'un champ ou du bruit magnétique externe avec et sans écran magnétique (prenez éventuellement qc. photos polaroïdes des courbes).
Est-ce qu'il y a du flux magnétique piégé ?
 - Évaluez qualitativement l'influence du "flux bias" de Mr. SQUID.
 - Maximiser la largeur du plateau sur la courbe I/V. Déterminez le courant critique I_c à 77 K.
 - Déterminez la résistance normale R_n du SQUID à 77 K, sans et avec champ magnétique (essayez de supprimer I_c avec un champ) et à T_{ambiante} .
- C) - Passez en mode V- Φ et visualisez la caractéristique correspondante? Comment pouvez-vous mesurer un champ magnétique avec le SQUID ?
- Évaluez qualitativement l'influence d'un champ magnétique externe et du "flux bias".
 - Est-ce qu'on peut voir une influence du champ magnétique terrestre?
- D) - Évaluer la "profondeur de modulation" ΔV du SQUID par deux méthodes différentes (notice de Mr. SQUID p.24-25):
- à partir de la courbe expérimentale V- Φ
 - à partir des formules

$$\beta_L = (I_c R_n / \Delta V) - 1 \quad \text{et}$$

$$\beta_L = 2I_c L / \Phi_0 \quad \begin{array}{l} L = \text{inductance de l'anneau du SQUID} \\ \Phi_0 = \text{quantum de flux} \end{array}$$

Comparez les résultats, que signifie β_L ?

Questions:

- De quelles parties est composé la tête de mesure du SQUID?
- Expliquez la courbe I/V d'une jonction Josephson. Qu'est-ce que c'est l'effet Josephson DC?
- Pourquoi le SQUID réagit-il au champ magnétique, quelles sont les applications? Évaluez sa sensibilité.
- Comparez, à l'aide de la littérature, un SQUID HTSC avec un SQUID composé de supraconducteurs classiques.

Expérience 2

Observation de la transition supraconductrice résistive d'un film de YBaCuO

Méthode: Enregistrement de la courbe résistance R en fct. de la température T du SQUID

A) Préparation de la mesure de la température à l'aide d'une diode Si (suivre les instructions plus détaillées dans le mode d'emploi de Mr. SQUID, p.67-75).

Matériel nécessaire: diode Si, fils adaptés (longueur ≥ 50 cm, voltmètre, source de courant).

1) Fabrication d'une source de courant constant de $10 \mu\text{A}$ pour alimenter la diode (fig.3 et 4a).

Composants utilisés:
(à titre indicatif)

- diode Zener 4.7 V
- résistance $470 \text{ k}\Omega$
- résistance $1 \text{ k}\Omega$
- C = 100 nf à 100 pf
- OP LM 741 CN
- alimentation pour source de courant (DC power supply)
- alimentation pour OP (HP 30V)

$$I_{\text{source}} = V_{\text{zener}}/R_{\text{current}}$$

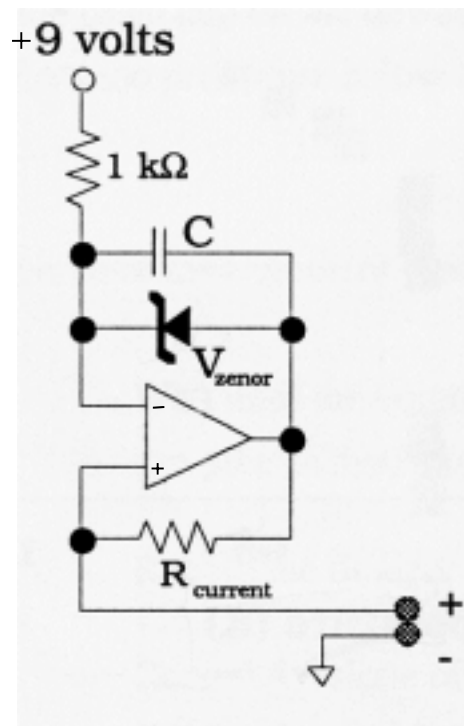


Fig. 3: Schéma de la source de courant constant

2) Calibrage de la diode avec trois points de mesure (LN₂, mélange eau/glace, T_{ambiante}).

- 3) Installation de la diode sur la tête de mesure de Mr. SQUID (fixez la avec une bande adhésive, fig.4b).
- 4) Effectuez un test dans l'azote liquide.

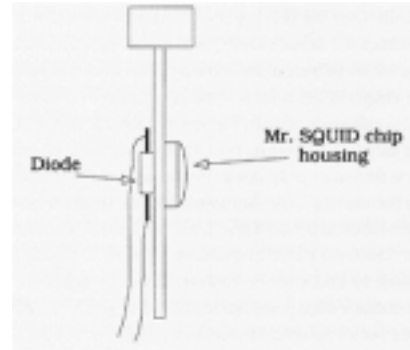
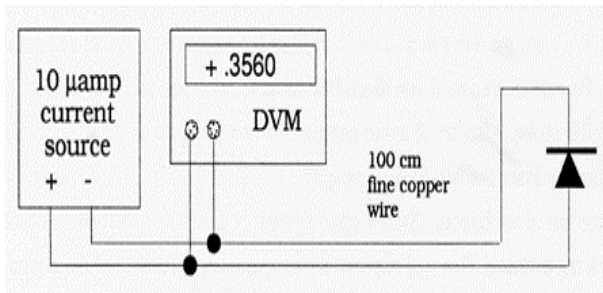


Fig. 4: (a) Schéma pour la mesure de la température, (b) positionnement de la diode

B) Enregistrement de la courbe R(T) de Mr. SQUID

- 1) Installez la tête de mesure au-dessus de la surface de l'azote liquide.
Commencez les mesures par quelques points à $T > 100\text{K}$ (si possible à température ambiante), puis diminuer les intervalles à l'approche de la température de transition. Attendez chaque fois que la température soit stabilisée (quelques minutes). Relevez la tension de la diode (conversion en T) puis la résistance (pente de la courbe I/V autour de 0).
- 2) Lors de la chute de la résistance à la transition supraconductrice, la mesure devient plus délicate. Changez la température très doucement, afin d'obtenir plusieurs points de mesure pendant la transition. Observez quantitativement et qualitativement l'évolution de la température.
- 3) Continuez les mesures jusqu'à ce que la valeur de R ne diminue plus.
- 4) Vérifier que vous avez enregistré suffisamment de points pour bien pouvoir tracer la courbe de transformation dans les différents domaines. Eventuellement enregistrer une courbe en montant la température.
- 5) Analysez et interprétez la courbe de transition. Comparez la avec une courbe d'un supraconducteur classique (voir aussi *Narlikar*, p. 138).

Questions:

- Qu'est-ce que vous avez réellement mesuré? $\rightarrow R_{\text{film}} + R_{\text{jct}}$, estimez les différentes contributions!
- Quelle est l'évolution de R(T) dans un métal conducteur normal, un semiconducteur, un supraconducteur classique et un supraconducteur céramique ?
- Quelle est l'évolution de R(T) d'un "weak link" à $T > T_c$?
- A quoi faut-il faire attention quand on effectue une mesure de T à basse température ?
- Pourquoi une diode Si est un détecteur linéaire de T ?

Expérience 3

Evolution du courant critique en fonction de la température

La mesure du courant critique en proximité de la température critique permet d'obtenir certaines informations sur la microstructure de la jonction Josephson étudiée.

Déroulement de l'expérience:

- A) Remplissez un dewar avec LN2. Branchez la pompe à palette sur l'ouverture du dewar. L'étanchéité se fait à l'aide de la graisse à vide.
- B) Mettez la pompe en marche, vérifiez l'étanchéité et pompez. Idéalement la pression diminue à environ 100 mbar. La température de LN2 diminue en fct. de la pression dans le dewar (indication qualitative à l'aide du thermocouple). Pompez pendant environ 20 minutes (si vous pompez plus longtemps, attention à la solidification de l'azote).
- C) Arrêtez le pompage, plongez le SQUID dans le dewar et déterminez la température avec la diode . Idéalement la température devrait descendre presque jusqu'au point triple de l'azote.
- D) Mesurez le courant critique en fct. de la température. Enregistrez une série de mesures pendant le réchauffement de l'azote liquide à 77 K (temps de réchauffement environ 1 heure). Continuez en sortant le SQUID de l'azote jusqu'à la température de transition.
- E) Évaluez la variation de I_c avec T. Faites une approximation du graphe à l'aide d'une formule du type:

$$I_c \propto (1-T/T_c)^\alpha$$

Comparez le résultat avec la "théorie" et discutez-le. Extrapolez vers $I_c \rightarrow 0$ pour déterminer T_c et comparez avec la valeur obtenue dans l'expérience 2.

Questions:

- Quel courant avez-vous réellement mesuré ?
- Comparez vos résultats avec ceux attendus pour des supraconducteurs classiques.
- Comment varie $I_c(T)$ pour le type de "weak-link" dans ce SQUID ?
- Quelle est la différence entre un supra type I et type II ? De quel type est le YBaCuO ?
- Quels phénomènes limitent le courant critique dans un supra type I ou type II ?

Expérience 4

Mesure inductive de la transition supraconductrice d'un film de YBaCuO

Méthode: Mesure de la "transparence" d'un film HTSC pour un champ magnétique, c'est-à-dire, l'expulsion ou la pénétration progressive du champ en fct. de la température (observation de l'effet Meissner). Détection d'un faible champ magnétique avec le SQUID (pour plus de détails: Documentation Mr. SQUID p. 95 -100).

A) Préparation du dispositif de mesure (si ce n'était pas déjà fait par vos prédécesseurs).

Vous avez besoin des composants suivants:

- une résistance (chip resistor) de 100 Ω
- une petite bobine à fabriquer soit même (faites environ 10 tours bien serrés autour d'un coton tige avec un fil de Cu isolé pour aimants) + une résistance de 1000 Ω en série avec la bobine
- une diode Si calibrée (pour la mesure de température)

Soudez les composants aux fils de connections, arrangez-les selon la fig. 5 a et b sur une feuille d'Al et encapsulez le tout dans l'Araldite. L'ensemble doit tenir sur une surface de 1cm² environ. Veillez que la surface côté Al soit plate et que les composants soient le plus proche que possible de cette surface. Attention aux dimensions de votre montage, tous doit rentrer à l'intérieur de l'écran magnétique. Vérifiez les connections électriques et la diode.

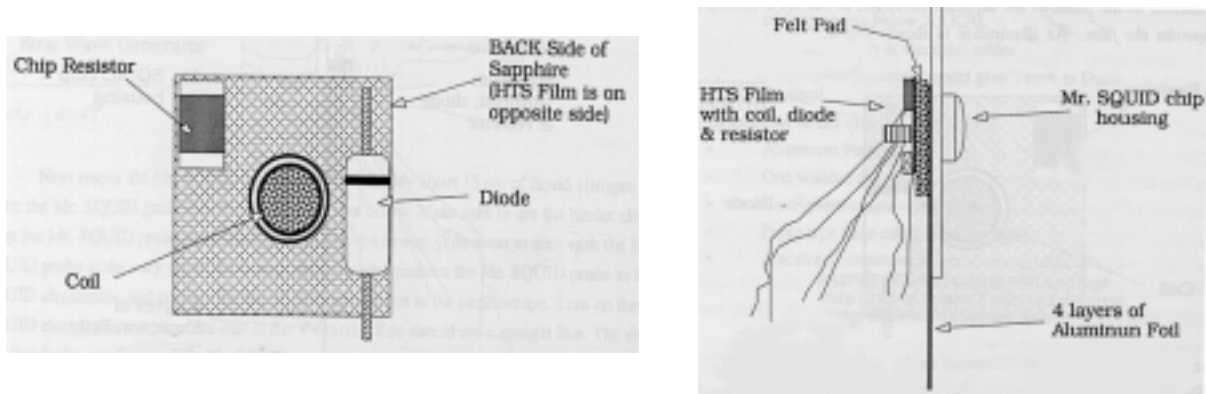


Fig. 5: Arrangement des différents composants: a) vue dessus, b) vue du côté.

B) Choisissez un des films YBaCuO (sur substrat en saphir ou LaAlO₃, dimension environ 1*1cm²). Fabriquez une languette en feuille d'Al qui fait office d'un pont thermique. Installez l'ensemble avec la mousse noire (isolation thermique) et la plaquette céramique blanche selon l'ordre montré sur le schéma de la figure 5b (plaquette céramique entre le film et la mousse). Attention le film YBaCuO et son substrat sont très fragiles. Tournez le côté non-couvert du substrat vers la bobine. Fixez le tout délicatement avec une bande adhésive sur la tête de Mr. SQUID (ne collez en aucun cas la bande directement sur le film HTSC !). Mettez l'écran magnétique.

C) Plongez l'ensemble dans l'azote liquide et branchez l'installation:

- Mr. SQUID et la diode comme d'habitude
- alimentation DC pour la résistance (control en tension)
- source de courant alternative pour la bobine (générateur de signales: 0.5-1 Hz, 20dB, sin)

D) Opérez le SQUID en mode $V-\Phi$, visualisez la courbe $V(\Phi)$ et optimisez la sans alimenter la bobine.

E) Branchez le courant à travers la bobine. La courbe $V(\Phi)$ devrait commencer à osciller faiblement avec la fréquence du courant appliqué. L'amplitude de l'oscillation permet de déterminer le flux traversant le film. Il est détecté par le SQUID. Évaluez ce flux parasite et le champ produit par la bobine.

F) Montez doucement la température du SQUID en le sortant progressivement de l'azote liquide. Si $T_c^{\text{SQUID}} < T_c^{\text{film}}$, essayez de trouver un point de travail proche de la température de transition du SQUID. Si $T_c^{\text{SQUID}} > T_c^{\text{film}}$, essayez de trouver un point de travail proche de la température de transition du film. Optimisez la courbe $V(\Phi)$. Est-ce que l'amplitude de l'oscillation à changer ?

G) Une fois les conditions thermiques stabilisées, commencez à monter doucement le courant de la résistance (ou plutôt la tension aux bornes) pour chauffer le substrat avec le film YBaCuO (attention au sur-chauffage ! Ne dépassez pas 5 V!). Si le montage fonctionne correctement, le SQUID devrait rester à sa température initiale ($T < T_c$) grâce au pont thermique. Observez l'augmentation de la température du film avec la diode. L'oscillation de la courbe $V(\Phi)$ augmente au fur et à mesure que le film approche de la transition vers l'état normal.

H) Enregistrez de cette manière la variation du flux à travers le film en fct. de T.

G) Comparez la courbe de cette transition inductive avec une courbe de transition résistive obtenue au paravent. Discutez le résultat.

I) Répétez éventuellement (si le temps le permet) l'expérience en modifiant l'amplitude du courant dans la bobine. Est-ce que les courbes sont différentes?

Questions:

- Quel effet exploitez-vous lors de cette mesure ?
- Quels types de mesures indiquent la présence de supraconductivité, laquelle est la plus fiable?
- Quelle est la différence entre un conducteur idéal et un supraconducteur ?

Notice TPA: SQUID et Effets Josephson

II. Quelques notions de base de la physique de l'expérience

(à approfondir à l'aide des ouvrages mentionnés dans la bibliographie)

A) Supraconductivité en général

1) Approches théoriques ou phénoménologiques:

- Les équations de London \Rightarrow description du comportement électromagnétique d'un supra.
- Modèle à deux fluides \Rightarrow effet Meissner, profondeur de pénétration λ .
- **Théorie BCS** \Rightarrow théorie microscopique (paires de Cooper, Δ , T_c).
- Théorie phénoménologique de Ginzburg et Landau (GL) \Rightarrow supraconducteurs type II.

2) Quelques formules et phénomènes importants:

- Paires de Cooper:

Dans l'état supraconducteur les électrons individuels se regroupent en paires dans l'espace réciproque. Les électrons couplés ont des impulsions et des spins opposés. Ils sont appelés "paires de Cooper" (CP). Une force attractive faible, transmise par des phonons "virtuels", est à l'origine de cette liaison. La distance moyenne entre deux électrons corrélés est appelée "longueur de cohérence ξ ". Les paires de Cooper sont des "quasi"-bosons qui occupent tous le même état quantique. La supraconductivité est un phénomène quantique macroscopique. Le courant supraconducteur est porté par des CP. Contrairement aux vrais bosons, les paires de Cooper ne peuvent pas être excitées. Par contre, on peut les dissocier en deux électrons individuels en fournissant une énergie 2Δ . 2Δ correspond donc à un "gap" dans le spectre d'excitation d'un supraconducteur.

- Fonction d'onde $\Psi(\mathbf{r})$ de l'état supraconducteur et vitesse \mathbf{v} des CP:

$$\Psi(\mathbf{r}) = n_s(\mathbf{r})^{0.5} e^{i\varphi(\mathbf{r})} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{v} = (\hbar/m)\nabla\varphi$$

où $n_s(\mathbf{r})$ densité des CP, $\varphi(\mathbf{r})$ phase en fct. de \mathbf{r}

La phase φ de la fct. d'onde de l'état supraconducteur est de grande importance pour les phénomènes quantiques macroscopiques associés à la supraconductivité, tels que le courant supra ($I_s \propto \nabla\varphi$), l'expulsion de champ magnétique, la quantification du flux magnétique et les effets Josephson.

- Densité d'états des excitations $N_s(E)$ dans un supraconducteur BCS:

$$N_s(E) = 0 \quad \text{pour } E < \Delta$$

$$N_s(E) = N_n(E_f) E/(E^2 - \Delta^2)^{0.5} \quad \text{pour } E > \Delta$$

$N_n(E_f)$ densité d'états normale à l'énergie de Fermi

- Formule BCS pour T_c :

$$kT_c = 1.13 \hbar\omega_D e^{-1/N(E_f)V}$$

T_c température critique
 $\hbar\omega_D$ énergie de Debye
 V paramètre caractérisant l'interaction électron-phonon

- Energie de gap 2Δ :

$$2\Delta(0) = 3.52 kT_c$$

proche de T_c $\Delta(T)/\Delta(0) = 1.74(1-T/T_c)^{0.5}$

- Formule BCS pour ξ_0 (à $T=0$):

$$\xi_0 = 0.18 \hbar v_f / kT_c \quad v_f \text{ vitesse de Fermi}$$

- Coefficient κ de Ginzburg-Landau:

$$\kappa = \lambda / \xi$$

$\kappa < 0.7 \Rightarrow$ supraconducteur type I

$\kappa > 0.7 \Rightarrow$ supraconducteur type II

κ est le paramètre qui permet de distinguer si il est énergiquement favorable pour le supra de laisser pénétrer un champ magnétique extérieur sous forme de vortex ou non (supra type I ou II).

- Variation du champ magnétique critique avec T :

type I: $H_c(T) = H_c(0) (1-t^2)$ où $t = T/T_c$

type II: $H_{c1} = (H_c/1.4\kappa) \ln \kappa$
 $H_{c2} = 1.4 \kappa H_c$ H_c champ critique thermodynamique

- Variation du courant critique I_c avec T dans un supraconducteur:

type I: $I_c \propto H_c \propto 1-(T/T_c)^2$

type II: $I_c \propto H_{c1}$ (vortex non-accrochés)
 $I_c \propto H_c$ (vortex accrochés)

- Quantification du flux:

Le flux magnétique Φ à travers d'un anneau supraconducteur est quantifié. Φ doit être un multiple du quantum de flux $\Phi_0 = h/2e$. On peut voir ceci comme suit:

Densité de courant \mathbf{J} supra dans un champ avec le potentiel vecteur \mathbf{A}

$$\mathbf{J} = (2e/m) |\Psi|^2 (\hbar \nabla \varphi - 2e\mathbf{A})$$

A l'intérieur d'un supra $\mathbf{J} = 0$ donc $\hbar \nabla \varphi = 2e\mathbf{A}$

En intégrant suivant un chemin fermé c à l'intérieur de l'anneau supra, on obtient:

$$\oint_c \hbar \nabla \varphi \cdot d\mathbf{l} = \int_c 2e\mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} \quad \text{et avec les conditions de bord de } \Psi \quad \int_c \hbar \nabla \varphi \cdot d\mathbf{l} = 2\pi n$$

donc $\Phi = n h/2e$ n est un nombre intégral

Questions:

- Comme explique-t-on la résistivité zéro dans un supraconducteur ?
- Quels matériaux peuvent être supraconducteurs ?
- Quels sont les supraconducteurs les plus importants, quelle est leur température de transition ?
- Quelle est l'ordre de grandeur de ξ et de Δ ?

B) Supraconducteurs à haute température (YBaCuO)

-Températures de transition:

$\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$
38 K

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$
92 K

$\text{Tl}_2\text{Ca}_2\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$
125 K

- Longueur de cohérence: $\xi \approx 5-15 \text{ \AA}$
 - Profondeur de pénétration: $\lambda > 1000 \text{ \AA}$
- \Rightarrow supraconducteur type II ($\kappa \gg 1$)

- Structure cristalline pour différentes compositions: plans Cu-O et chaînes de Cu-O-Cu-O \Rightarrow anisotropie
- La théorie ? $kT_c \approx 2\Delta$ avec $T_c \approx 100 \text{ K} \Rightarrow 2\Delta \approx 30 \text{ meV}$
où est le problème par rapport à la théorie BSC?

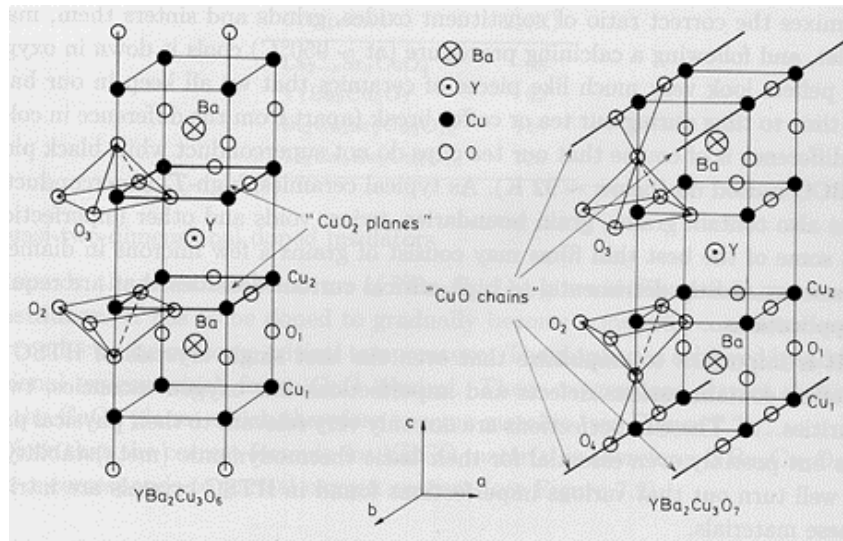


Fig. 6: Structure cristalline de $YBa_2Cu_3O_6$ et de $YBa_2Cu_3O_7$ [Cyrot].

C) Les effets Josephson

Les effets Josephson sont des phénomènes physiques particuliers ayant lieu lorsque deux supraconducteurs sont faiblement couplés (fig. 7). Le passage d'un courant supraconducteur à travers la couche isolante d'une jonction tunnel, par exemple, constitue un effet Josephson. On distingue entre l'effet DC (le passage d'un courant continu avec une valeur critique I_c , tension nulle aux bornes de la jonction) et l'effet AC (passage d'un courant supra alternatif avec une tension V aux bornes). Les effets Josephson sont déterminés par la différence ϕ des phases ϕ_1 et ϕ_2 et par l'énergie de couplage E_J entre les deux supraconducteurs. La nature de la jonction joue également un rôle important. Différents types de ces "weak link" sont (fig. 8): des jonctions SIS et SNS, des pointes fines, des microponts, des joints de grains etc. Il existe des jonctions avec une hystérésis prononcée de la courbe I/V (jct. tunnel) ou sans hystérésis (micropont, voir aussi fig. 9).

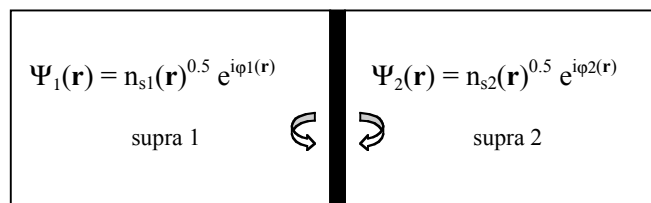


Fig. 7: Représentation schématique d'un "weak link" entre deux supraconducteurs.

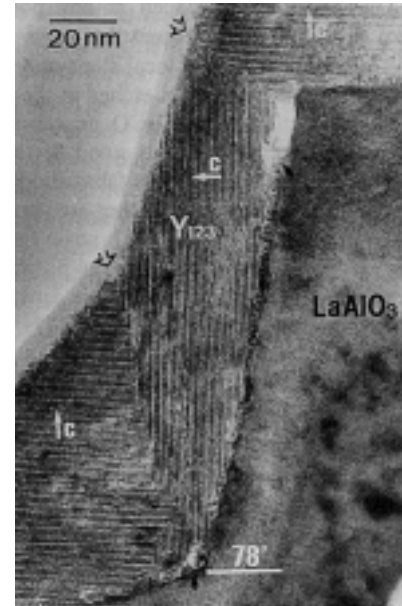
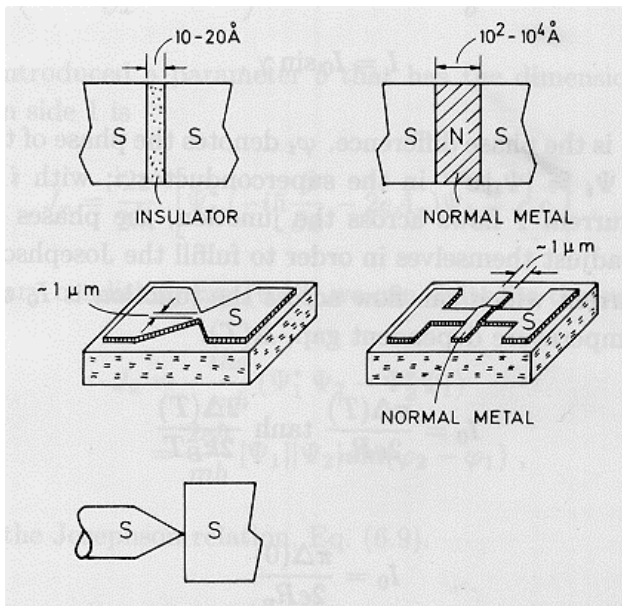


Fig. 8: A gauche: différents types de jonctions Josephson; à droite: jonctions entre joints de grains dans un film YBaCuO (Cyrot, Weinstock).

Effet Josephson DC:	tension aux bornes de la jct.:	$V=0$	\Rightarrow	$\phi = \phi_1 - \phi_2 = \text{const}$
	\Rightarrow courant supra continu	$I=I_c \sin\phi$		
Effet Josephson AC:	tension aux bornes de la jct.:	$V \neq 0 = \text{const}$	\Rightarrow	$\delta\phi/\delta t = 2eV/\hbar$
	\Rightarrow courant supra alternatif	$I=I_c \sin\omega_j t$		où $\omega_j = 2eV/\hbar$ $1\text{mV} \Leftrightarrow 484\text{ GHz}$
Energie de couplage:	$E_J = (\hbar I_c / 2e) \cos\phi$			

Un champ électro-magnétique externe (champ RF) peut interagir avec le courant alternatif supraconducteur dans une jonction Josephson. Des marches équidistantes, dites marches de Shapiro, apparaissent sur la courbe I/V.

- Les jonctions tunnel (SIS) sont les mieux étudiées (pour des raisons historiques et physiques). Le courant supraconducteur critique à travers d'une telle jonction est fonction de T et d'un champ magnétique externe:

$$I_c(T) = \frac{\pi \cdot \Delta(T)}{2eR_n} \cdot \tanh \frac{2\Delta(T)}{2kT} \quad \text{avec} \quad I_c(0) = \frac{\pi \cdot \Delta(0)}{2eR_n} \quad R_n \text{ résistance normale de la jct.}$$

$$I_c(\Phi) = I_c(0) \frac{\sin(\pi \cdot \Phi / \Phi_0)}{\pi \cdot \Phi / \Phi_0} \quad \text{avec} \quad \Phi \text{ flux à travers la jonction elle-même}$$

Φ_0 quantum de flux

- Model RSJ (resistively shunted junction):

Dans ce modèle une jonction Josephson est représentée par une connexion en série d'une résistance normale R_n , d'une capacité C et d'une source de courant supraconducteur (courant Josephson). La relation entre un courant externe I_{DC} et la tension aux bornes de la jct. ou la différence de phase ϕ , respectivement, s'écrit:

$$I_{DC} = \frac{\hbar}{2e} C \frac{d^2\phi}{dt^2} + \frac{\hbar}{2e} \frac{1}{R_n} \frac{d\phi}{dt} + I_c \sin \phi$$

Paramètres caractéristiques:	$V_c = I_c R_n$	tension caractéristique
	$\omega_c = (2e/\hbar)V_c$	fréquence caractéristique
	$\beta_c = \omega_c R_n C$	paramètre de McCumber
	$\beta_c > 1$ hystérésis	
	$\beta_c < 1$ pas de hystérésis	

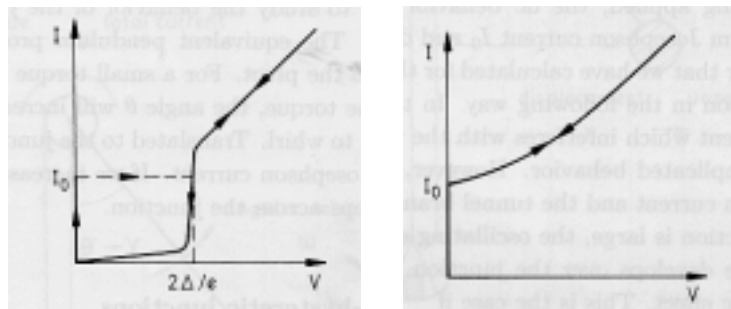


Fig. 9: Jonction Josephson avec et sans hystérésis de la courbe I/V.

$$\tau_s \approx R_n C$$

temps de réponse

- Variation du courant critique avec T proche de T_c (*Narlikar*, p.10-13 et p.131-139, *Barone*, chap.7):

$$\begin{array}{ll} \text{Jonction SIS:} & I_c \propto 1-T/T_c \quad (\text{approximation de la formule pour } I_c \text{ plus haut}) \\ \text{Jonction SNS:} & I_c \propto (1-T/T_c)^2 \end{array}$$

Ces formules sont valables si $\Delta(T)$ correspond à la variation prédite par la théorie BCS.

Dans les HTSC ces formules ne sont pas forcément valables, notamment à proximité de la jonction elle-même où $\Delta(T)$ peut être fortement modifié. L'évaluation de la variation de I_c dans une jonction Josephson HTSC reste donc relativement qualitative, mais il est intéressant de comparer $I_c(T)$ avec des modèles ou résultats existants et d'en tirer des conclusions sur la microstructure de la jonction étudiée.

$$\text{Exemple observé dans une jonction HTSC:} \quad \Delta(T) \propto \Delta_{\text{BCS}}(T)(1-T/T_c)^{0.5}$$

$$\text{Avec cette forme de } \Delta(T), \text{ on obtient pour une jct. SIS:} \quad I_c \propto (1-T/T_c)^2$$

Dans les jonctions "joints de grains" une forme plus générale est souvent observée:

$$I_c \propto (1-T/T_c)^\alpha$$

Des valeurs de α pour différents cas sont données dans *Narlikar* p.139.

D) SQUID (Superconducting Quantum Interference Device)

Lors de cette expérience nous considérons uniquement le SQUID DC (courant continu), contrairement au SQUID RF (fréquence radio). Le schéma d'un SQUID DC est montré à la figure 10a. Il est composé de deux jonctions Josephson reliées en parallèle par une connexion supraconductrice. Les jonctions elles-mêmes sont représentées conformément au modèle RSJ avec un courant critique I_0 . L'ensemble forme un anneau supraconducteur qui est relié à une source de courant continu externe I (tension V aux bornes). Lorsqu'un flux magnétique externe Φ_{ext} traverse cet anneau un courant supraconducteur supplémentaire est induit. Ce courant circule dans l'anneau du SQUID. Son intensité et donc le flux magnétique généré par ce courant est tel que le flux effectif Φ_{eff} à travers le SQUID est quantifié. Comme on peut le voir à la figure 10b, ce courant supplémentaire est à l'origine d'une modification de la caractéristique I/V du SQUID. En effet le courant critique des jonctions Josephson est modulé en fonction du champ magnétique externe. Pour un courant I_B externe (bias current) constant, on observe une modulation de la tension aux bornes du SQUID (voir la courbe $V(\Phi)$ à la fig. 10c). Ce phénomène est exploité pour la détection de très faibles champs magnétiques et de variations de champ. ΔV (peak-to-peak voltage) est la profondeur de modulation. Elle est fonction de I_B et de $I_c R_n$ (voir expérience 1 et 4).

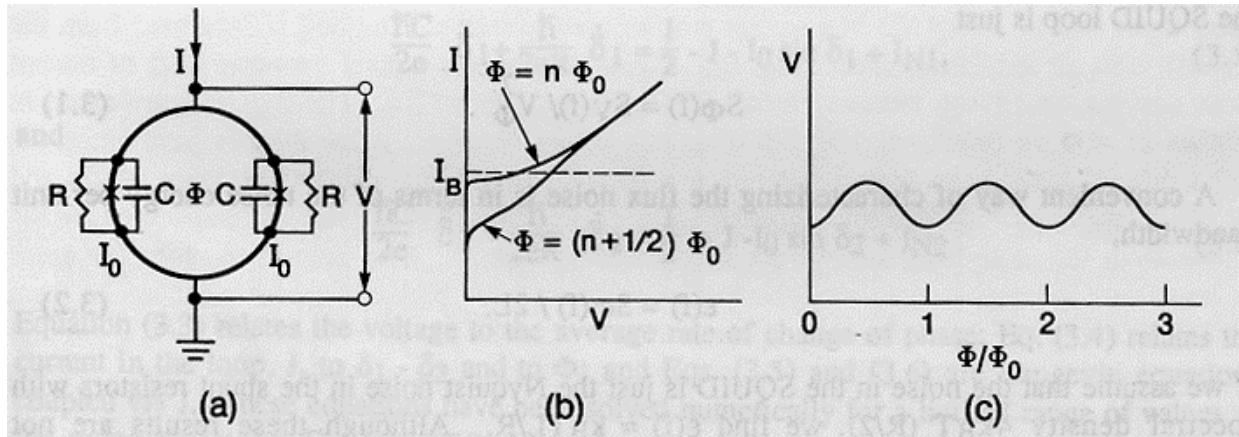


Fig. 10: a) circuit schématique d'un SQUID DC; b) modification de la courbe $I(V)$ en fct. de Φ_{ext} ; c) modulation de la tension aux bornes de la jonction.

- Evaluation de la modulation de la courbe I/V d'un SQUID en fct. d'un flux magnétique Φ_{ext} externe:

Condition imposée par la quantification du flux à travers l'anneau du SQUID composé de deux jct. 1 et 2 (et avec les fct. d'ondes supraconductrices Ψ_1 et Ψ_2):

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi n - 2\pi \Phi_{\text{eff}}/\Phi_0$$

Flux effectif à travers le SQUID: $\Phi_{\text{eff}} = \Phi_{\text{ext}} + LI_s$ L l'inductivité du SQUID

Courant induit I_s (shielding current): $2I_s = I_1 \sin \varphi_1 - I_2 \sin \varphi_2$ I_1 et I_2 courants critiques des jct.

Courant aux bornes du SQUID: $I(\varphi_1, \varphi_2) = I_1 \sin \varphi_1 + I_2 \sin \varphi_2$

Si on considère le cas simplifié où l'inductivité L de l'anneau du SQUID est négligeable:

avec $L \rightarrow 0$ $\Phi_{\text{eff}} \approx \Phi_{\text{ext}}$

on obtient: $I(\varphi_1, \Phi_{\text{ext}}) = I_1 \sin \varphi_1 + I_2 \sin(\varphi_1 - 2\pi \Phi_{\text{ext}}/\Phi_0)$

Après le calcul du maximum de I par rapport à φ_1 , on obtient le courant critique du SQUID:

$$I_c(\Phi_{\text{ext}}) = 2I_1 |\cos \pi \Phi_{\text{ext}}| \quad \text{pour } I_1 = I_2$$

$$I_c(\Phi_{\text{ext}}) = (I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos \pi \Phi_{\text{ext}})^{0.5} \quad \text{pour } I_1 \neq I_2$$

Le courant maximal à travers le SQUID varie donc entre $|I_1 - I_2|$ et $|I_1 + I_2|$.

Le calcul de la profondeur de modulation ΔV d'un SQUID réel (pour $L \neq 0$, I_c courant critique d'une jct.) est plus complexe. On obtient:

$$\Delta V = (2I_c L + \Phi_0) / I_c R_n$$

E) Variation de la résistance avec la température

1) Conducteurs métalliques normaux

$$\rho = A + B \cdot T \quad \text{pour } T \geq 0.2 \theta_d$$

θ_d = température de Debye

$$\rho = C + D \cdot T^5 \quad \text{pour } T \ll 0.2 \theta_d$$

Mots clés: régimes classique et quantique, formule de Grüneisen-Bloch, interactions électron-phonon, diffraction par défauts cristallins

2) Supraconducteurs métalliques

L'interaction des paires de Cooper avec des phonons ou des imperfections du réseau cristallin n'est pas possible (voir théorie BSC). La résistance chute à 0 dans l'état supraconducteur (fig. 11).

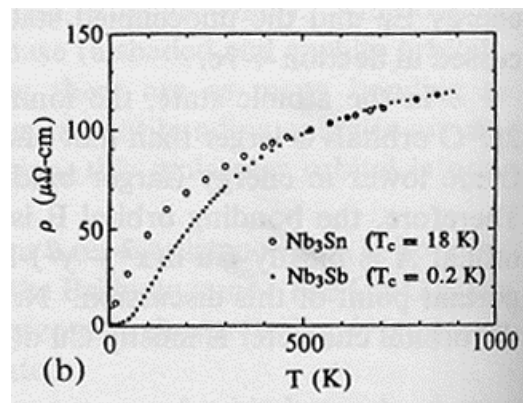
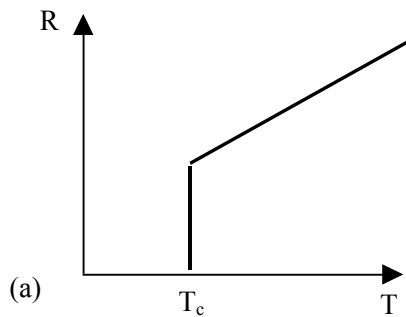
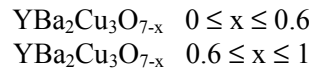


Fig. 11: (a) Courbe R(T) schématique, (b) exemples de courbes réelles pour $T > T_c$ (Burns).

3) Supraconducteurs HTSC (YBaCuO)

- $R(T)$ dépend fortement de la composition de l'échantillon, c'est-à-dire, de la teneur en oxygène (fig. 12).



supraconducteur
isolant

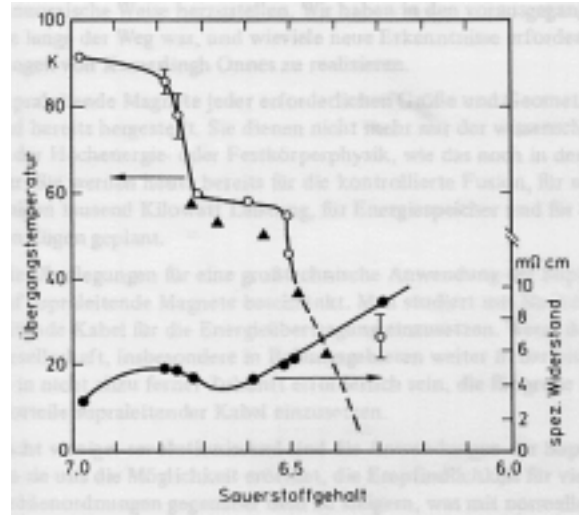
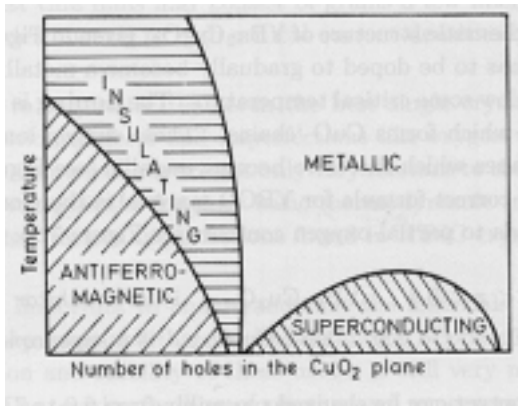


Fig. 12: A gauche: Diagramme de phases; à droite: Propriétés physiques de YBaCuO en fct. de la teneur en oxygène (Cryot, Buckel).

- pour plus de détails sur la transition résistive elle-même dans un HTSC, voir p.e. Narlikar p. 137 ou des publications spécialisées.

- les chaînes Cu-O-Cu-O et les plans Cu-O contribuent différemment à la conductivité électrique (conductivité métallique dans les plans). ρ est fortement anisotrope dans un monocristal de YBaCuO. Pour les cristaux ou des films HTSC orientés, le comportement suivant est souvent observé (fig. 13):

$$\rho_{ab} = A + BT \quad \text{résistivité parallèle aux plans}$$

Cette forme est aussi observée pour $T < 0.2 \theta_d$ et jusqu'à plusieurs centaines de K. Le mécanisme de la conductivité est donc vraisemblablement différent de celui d'un métal classique (conductivité 2-dimensionnelles avec e- et trous).

ρ_c différents comportements possible ($\sim T$ ou effets de localisation)

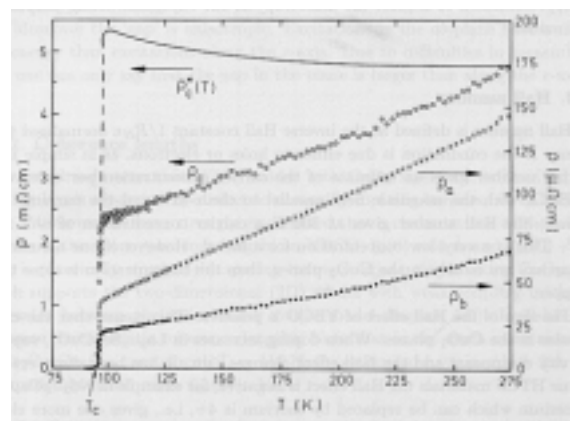


Fig. 13: Anisotropie de la résistivité dans un film YBaCuO (Cryon).

III. Références

Détails pratiques et techniques concernant Mr.SQUID et les expériences:

Mr. SQUID User's Guide, Conductus 1992 (d'autres réf. se trouvent à la page 110 et en annexe notice).

Supraconductivité en général:

"Les Supraconducteurs", J. Baixeras, Editions Eyrolles et CNRS, Paris (1998).

"Introduction to Solid State Physics", C. Kittel, Wiley (1996).

"Supraleitung: Grundlagen und Anwendung", W. Buckel, Physikverlag, Weinheim (1984 ou ed. plus récentes).

HTSC:

"Introduction to Superconductivity and High-Tc Materials", M. Cyrot et D. Pavuna, World Scientific, (1992).

"High-Temperature Superconductivity", G. Burns, Academic Press, San Diego, CA 92101 (1992).

Effets Josephson, SQUID et d'autres dispositifs supraconducteurs:

"Principles of superconductive devices and circuits", T.Van Duzer, C.W.Turner, Arnold, London (1981).

"Physics and Applications of the Josephson Effect", A. Barone, G. Paterno, Wiley-Interscience Publication (1982).

"SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications", ed. H. Weinstock, NATO ASI Series, Series E, vol. 329, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands (1996).

"Studies of High Temperature Superconductors: High Tc SQUIDS and Related Studies", Vol. 12, ed. A. Narlikar, Nova Science Publishers, New York (1994).

Vous pouvez trouver d'autres ouvrages:

- sur www.nebis.ch
- dans les listes de références des livres mentionnés (des publications spécialisées)
- voir aussi la notice de l'expérience des TPA: Supraconducteurs HTc