Détection de rayonnement à très

basses Température

4ème Ecole d'Automne D'Aussois : Balaruc les Bains 14- 20 Novembre 1999

Amplificateur à SQUID

Dominique Mailly

D. MAILLY
L2M - CNRS
BAGNEUX

SQUID

(I) SUPRACONDUCTEUR

ETAT FONDAMENTAL : CONDENSAT DE PAIRES D'ELECTRONS

ETAT MACROSCOPIQUE COHÉRENT

$$\Psi(r,t) = \rho(r,t)\, e^{i\varphi}$$

ρ : densité de paire

φ : phase

A l'équilibre ($J=0$) et sans champ magnétique

φ = cte dans tout le supra

Quantification du fluxoïde.

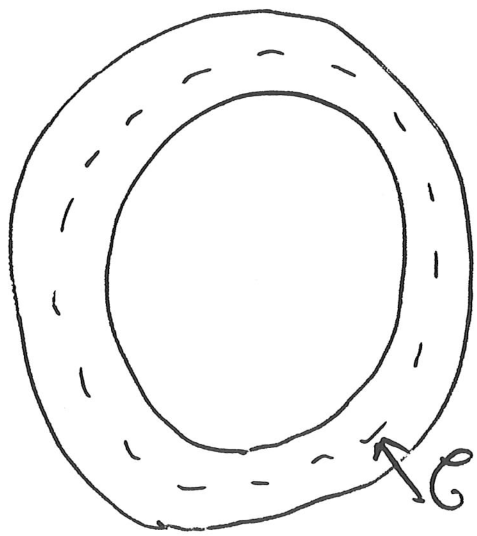
$$\vec{\nabla}\varphi \equiv \text{action}$$

$$\vec{\nabla}\varphi = \frac{1}{\hbar}\vec{p} = \frac{1}{\hbar}(\vec{p} + 2e\vec{A})$$

$\vec{p} = m\vec{v}$ $\qquad$ $\vec{j} = 2e\rho\vec{v}$

$$\vec{\nabla}\varphi = \frac{1}{\hbar}\left(\frac{m}{2e\rho}\vec{j} + 2e\vec{A}\right)$$

Cas d'un anneau



Cohérence de phas

$$\oint \vec{\nabla}\varphi\cdot d\vec{l} = 2n\pi$$

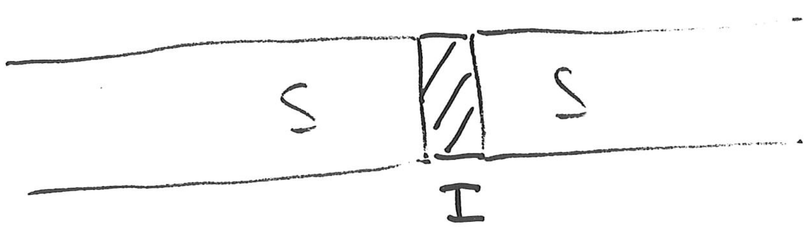
$$\oint \underbrace{\frac{1}{\hbar}\left(\frac{m}{2e\rho}\vec{j} + 2e\vec{A}\right)\cdot d\vec{l}}_{\text{fluxoïde}} = 2$$

Sur $\mathcal{C}$ $j = 0$ (les coura ne circulent que en surface)

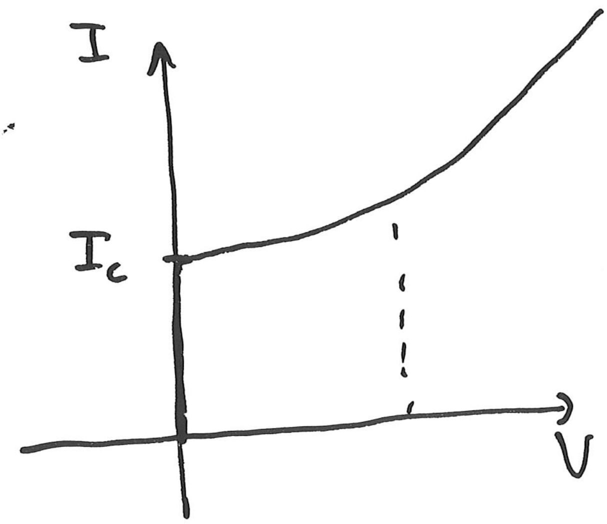
$\oint A\cdot dl = \phi$ $\qquad$ $\phi = n\phi_0$ $\qquad$ $\phi_0 = \frac{h}{2e}$

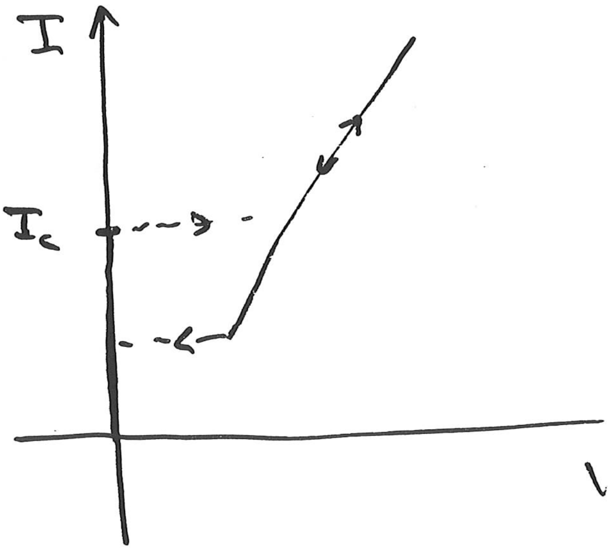
$$\phi_0 = 4.07\ 10^{-15}\ \text{Wb}$$

Jonction Josephson.



Isolant suffisamment mince pour les paires puissent passer par effet tunnel

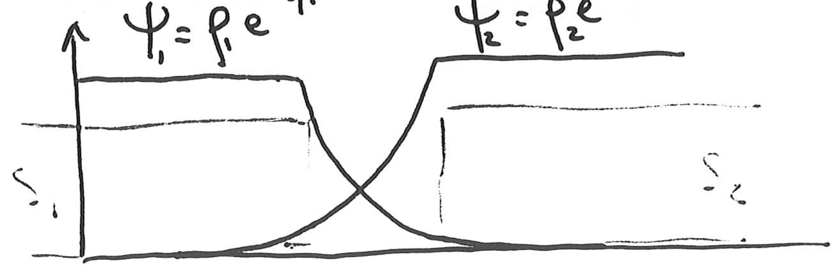




Jusqu'à un courant I_c la jonction se comporte comme un supra ($V=0$). Elle transite ensuite vers un état normal.

I_c est caractéristique de la transparence de la jonction

Equation de Josephson



① $V = 0$ $\quad I = I_c \sin(\varphi_2 - \varphi_1) = I_c \sin\theta$

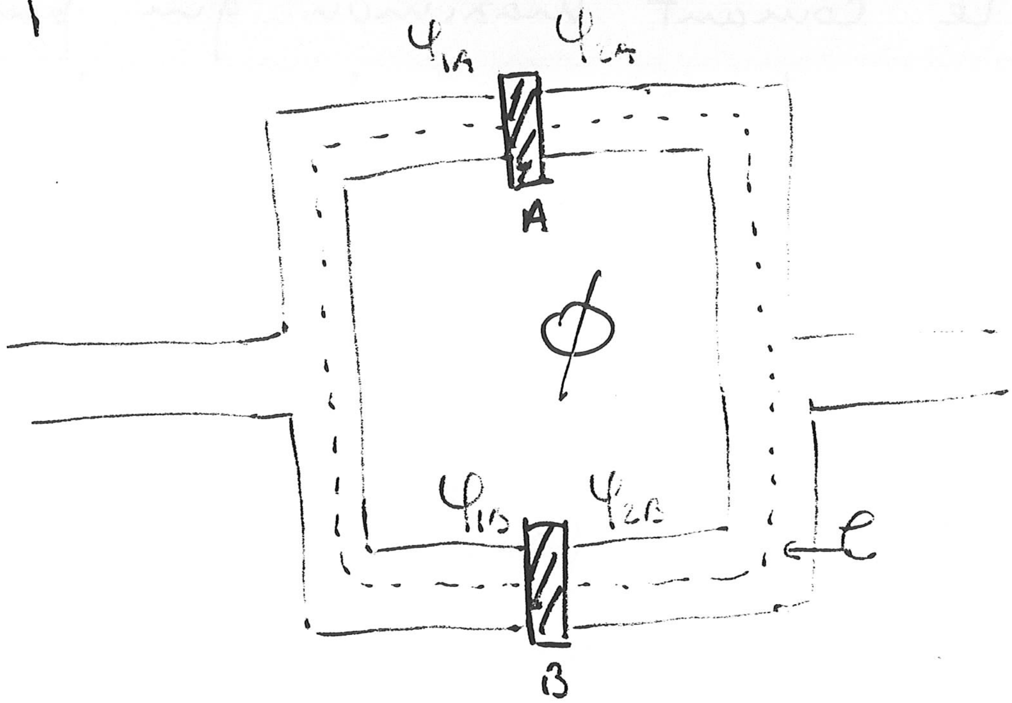
② $V \neq 0$ Un courant alternatif de fréquence $\frac{2eV}{h}$ circule

$$V = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\theta}{dt}$$

fréquence Josephson : 484 MHz/μV

→ application hyperfréquence des jonctions Josephson (Détecteurs millimétriques)

Interféromètre



A l'intérieur du supra $j = 0$

$$\vec{\nabla}\varphi = \frac{2eA}{\hbar}$$

le long de l'anneau $\mathcal{C}$

$$(\varphi_{2A} - \varphi_{1A}) + (\varphi_{1B} - \varphi_{2B}) = \frac{2e}{\hbar}\int A \cdot dl = \frac{2\pi\phi}{\phi_0}$$

Josephson $\rightarrow$ $I = I_A + I_B$

$$I = I_c \sin(\varphi_{2A} - \varphi_{1A}) + I_c \sin(\varphi_{2B}$$

$$I = I_c \cos\delta \cos\left(\frac{2\pi\phi}{\phi_0}\right)$$

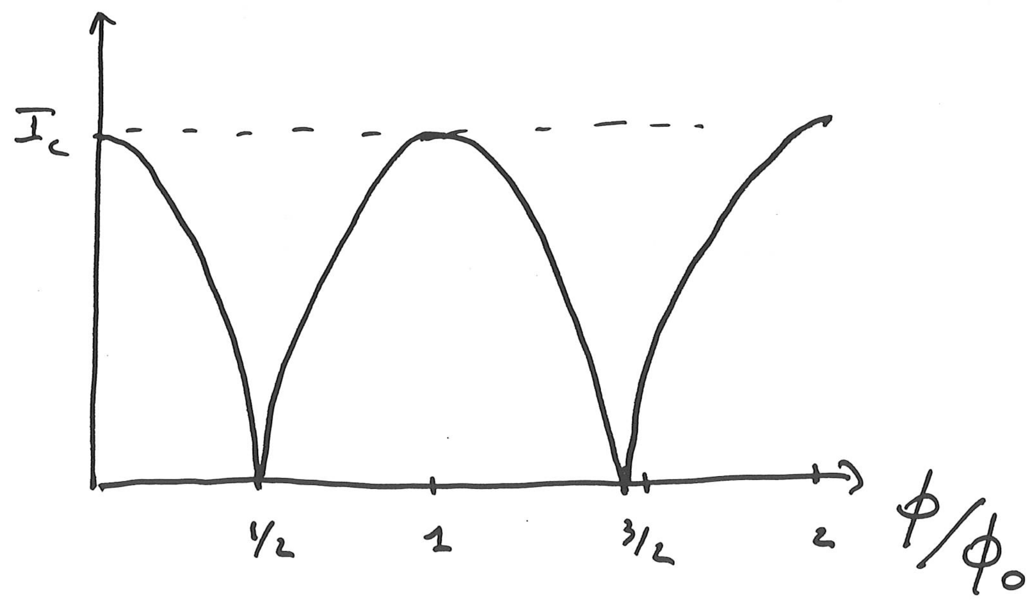
- On néglige l'inductance de la boucle

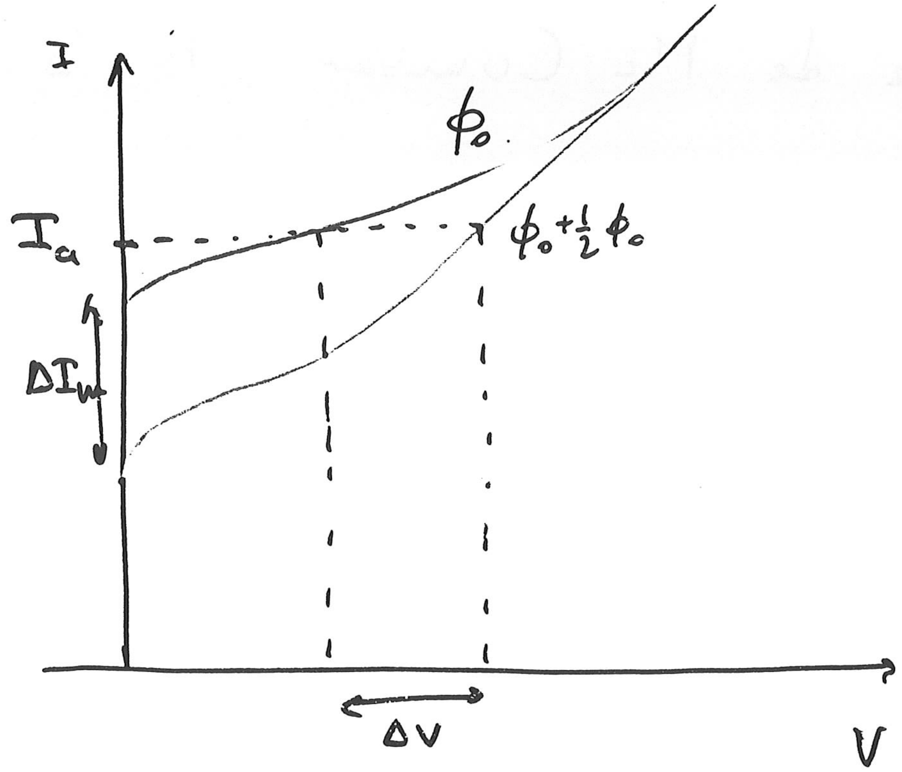
$$\phi = \phi_e + \cancel{LI}$$

- δ paramètre qui dépend des différences de phase le courant maximum qui peut circuler sans tension aux bornes du circuit.

$$I_0 = I_c \left| \cos\left(\frac{2\pi \phi}{\phi_0}\right) \right|$$

C'est une fonction périodique du flux qui traverse l'anneau.

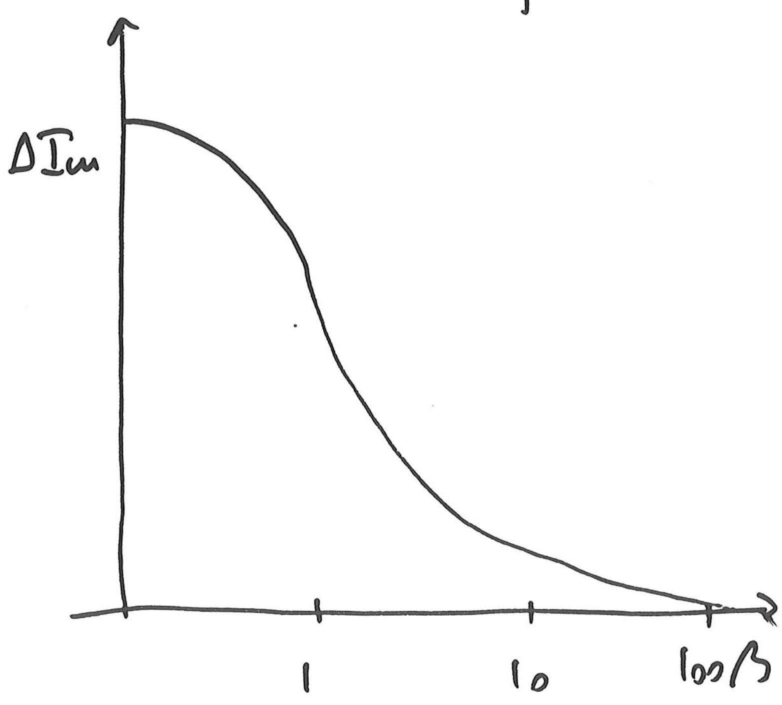




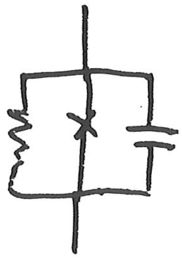
Si on ne néglige plus l'inductance du SQUID → solution numérique

$$\beta = \frac{2\pi L I_c}{\phi_0} \sim 1$$

pour une modulation optimal



Modèle de Mc Cumber RSJ



$$I = \frac{V}{R} + C\frac{dV}{dt} + I_c \sin\theta$$

$$I = \frac{\hbar}{2eR}\frac{d\theta}{dt} + \frac{C\hbar}{2e}\frac{d^2\theta}{dt^2} + I_c \sin\theta$$

Temps caractéristique du circuit $\tau_1 = RC$

Temps Josephson : $\tau_2 = \frac{\hbar}{2eRI_c}$

$\tau_1 > \tau_2$ → hystérétique.

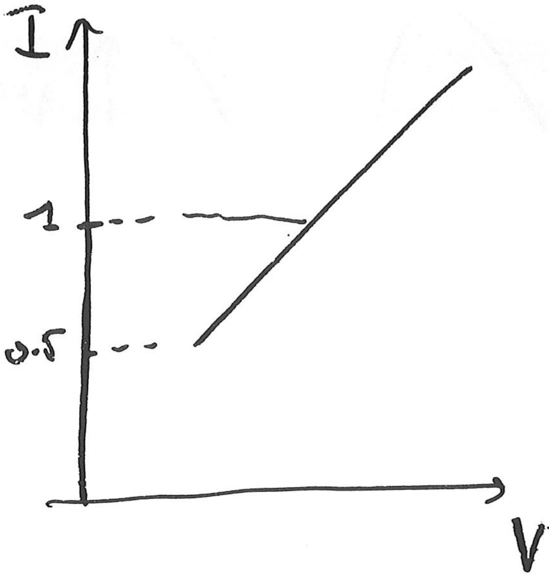
Plusieurs oscillations Josephson avec τ_1.

$$\langle I_{josephson} \rangle = \langle I_c \sin\theta \rangle = 0$$

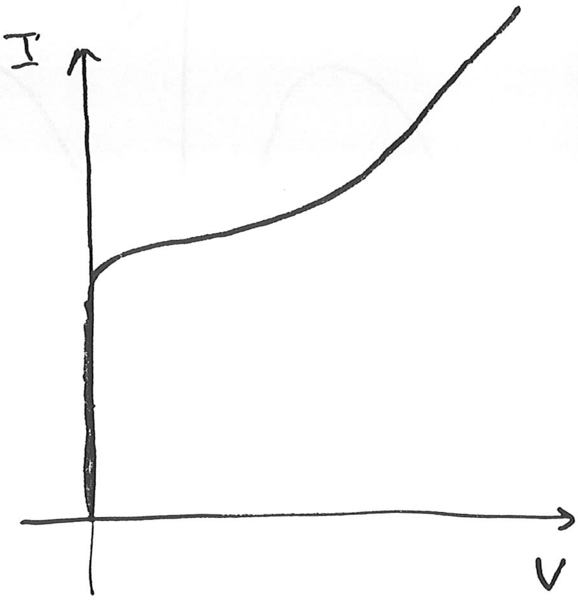
$$C\frac{dV}{dt} = 0 \qquad I = V/R$$

$\tau_1 < \tau_2$ Pas d'hystérésis

$$\beta_c = \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{2\pi R I_c}{\Phi_0}$$ coef Mc Cumber

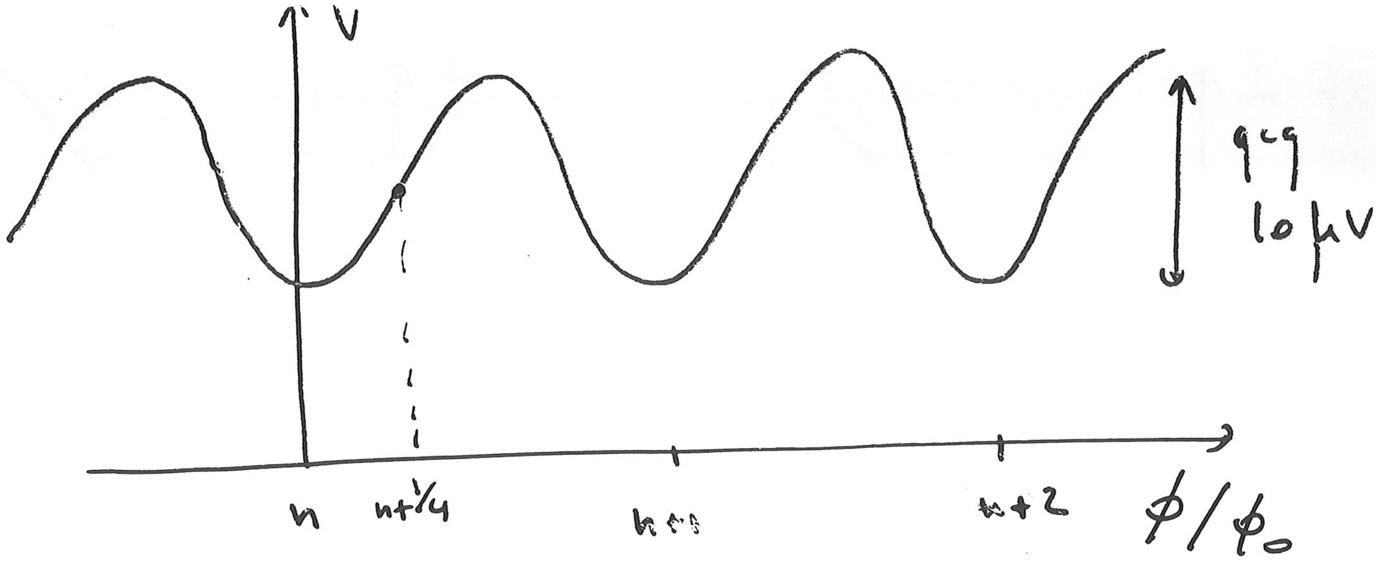


$\beta = 6$



$\beta = 0.3$

Pour éviter l'hystérésis on shunte les jonctions avec une resistance de façon $\beta_c \simeq 1$



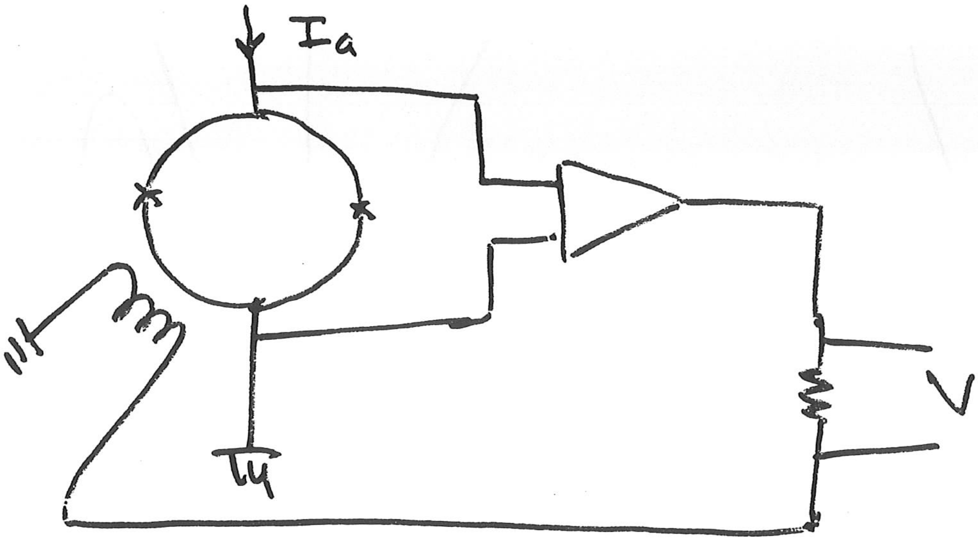
SQUID ≡ convertisseur flux → tension

qcq 10 μV → facile à amplifier avec des FET

maximum de sensibilité : $\phi = (2n+1)\frac{\phi_0}{4}$

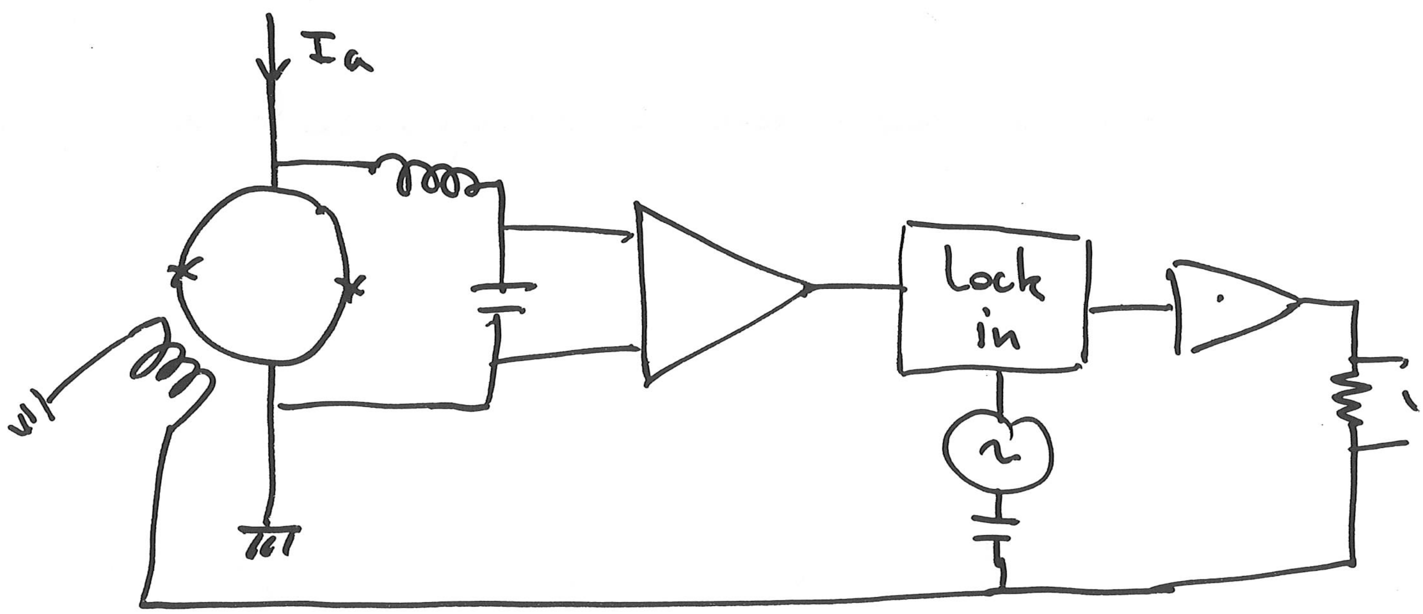
→ polarise en flux le SQUID avec une bobine couplée au SQUID

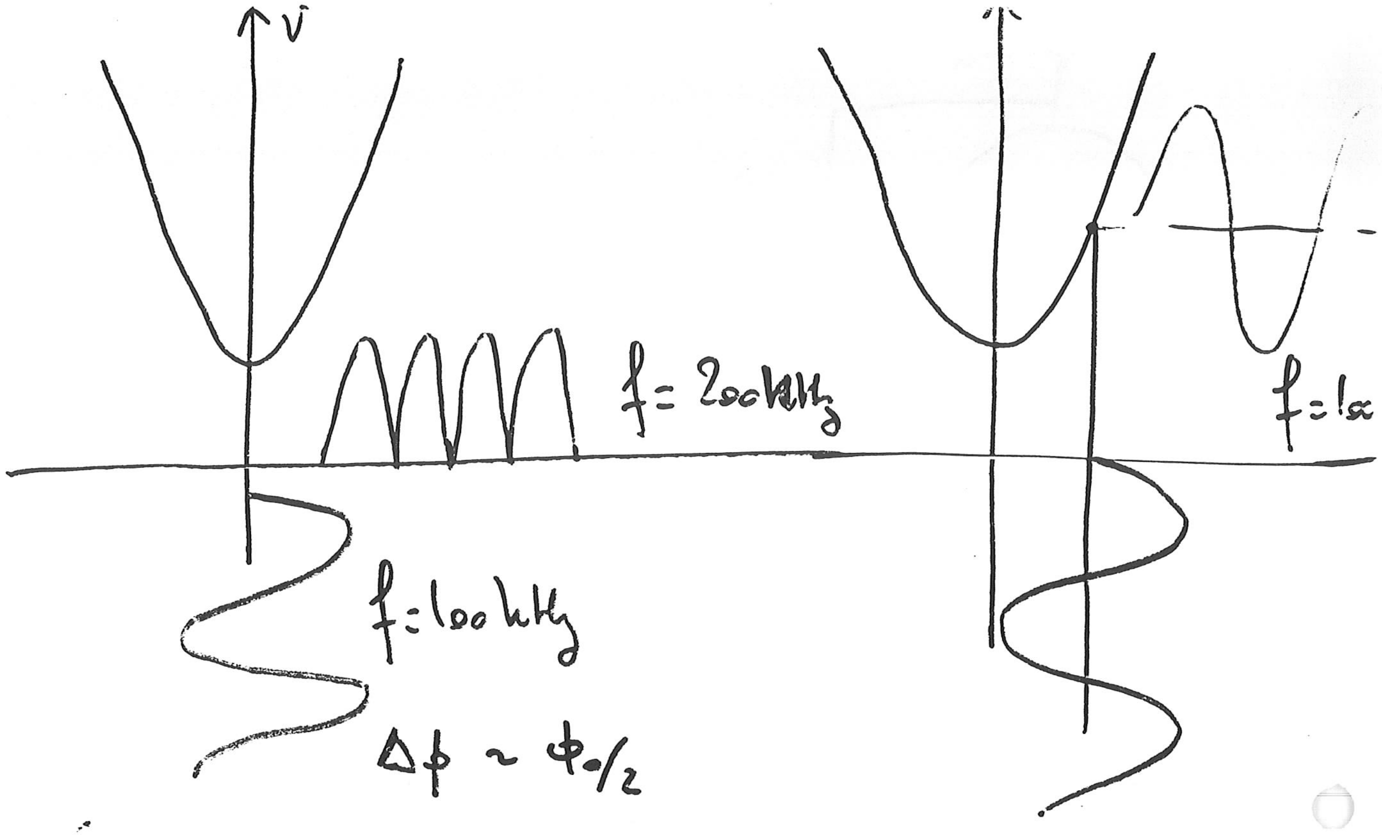
→ Pour augmenter la dynamique on utilise le flux comme détecteur de zéro dans une boucle de contre-réaction de flux.



= mesure les variations de flux dans la boucle du SQU

Pour éviter les problèmes de dérive on module le flux ($f \sim 100$ kHz) élimine le bruit $1/f$.





La composante à f = 100 kHz n'apparaît que si $\phi \neq n\phi_0$. Sa phase dépend du signe du changement de flux

$$\phi = n\phi_0 \qquad V_{lockin} = 0$$

$$\phi = (n+\delta)\phi_0 \qquad V_{lockin} > 0$$

$$\phi = (n-\delta)\phi_0 \qquad V_{lockin} < 0$$

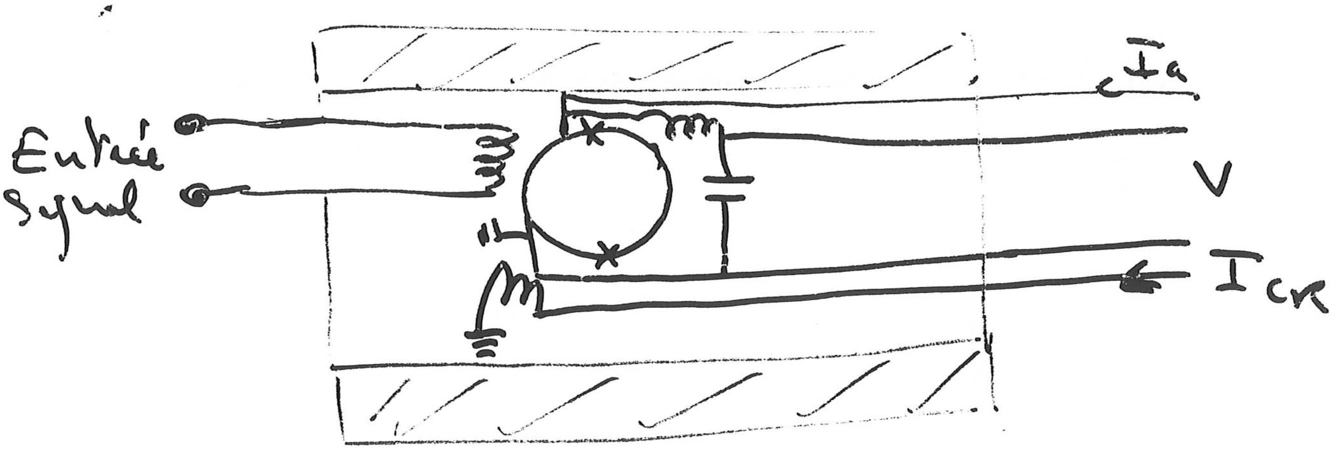
le courant fourni par l'ampli de sortie produit un flux qui annule $\delta\phi_0$.

$V \equiv$ proportionnel à $\delta\phi_0$

Comme le SQUID est très sensible au flux

→ enfermé dans un blindage supraconducteur

→ autre bobine pour amener le flux



SQUID ≡ convertisseur courant tension

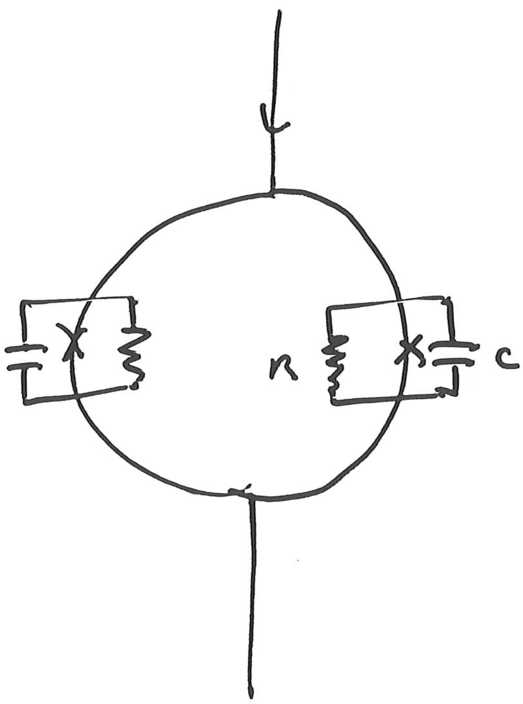
Résolution

$\delta\phi$: plus petite variation de flux que le SQUID peut mesurer dans une bande de 1 Hz

Résolution énergie

$$\mathcal{E} = \frac{\delta\phi^2}{2L}$$

Calcul numerique avec le modele RSJ.



Typiquement.

$$\begin{cases} I_0 = 1\,\mu A \\ R = 10\,\Omega \\ C = 0.5\,pf \\ L = 1\,nH \end{cases}$$

$$R \leq \sqrt{\frac{\phi_0}{2\pi I_0 C}}$$

pas d'hystérésis

Résolution énergétique

$$\varepsilon = \frac{\delta\phi^2}{L} \sim \frac{8kTL}{R}$$

$$R = \sqrt{\frac{\Phi_0}{2\pi I_0 C}}$$

$$\boxed{\varepsilon = 8kT\,(\pi LC)^{1/2}}$$

Réduire le bruit

Réduire C $\longrightarrow$ diminuer la surface de jonction

Réduire L $\longrightarrow$ diminuer la taille de la boucle.

Pb. $2\pi L I_0 \sim \phi_0$

si $L \searrow$ $I_0 \nearrow$

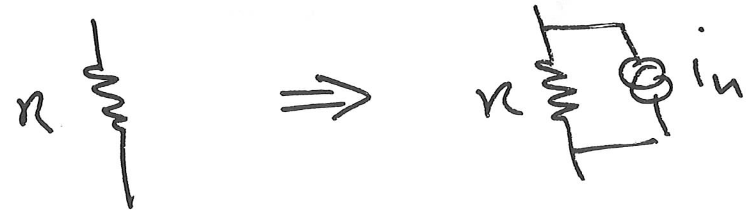
or si $C \searrow$ $I_0 \searrow$

Avec les paramètres précédent

à $T = 4K$ $\quad S_\phi^{2} = 2\,10^{-6}\,\phi_0/\sqrt{Hz}$

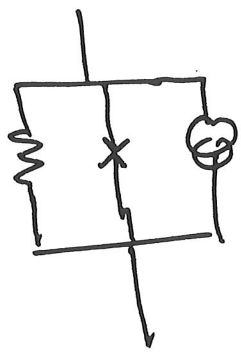
$$\varepsilon \simeq 100\,h$$

Bruit thermique.



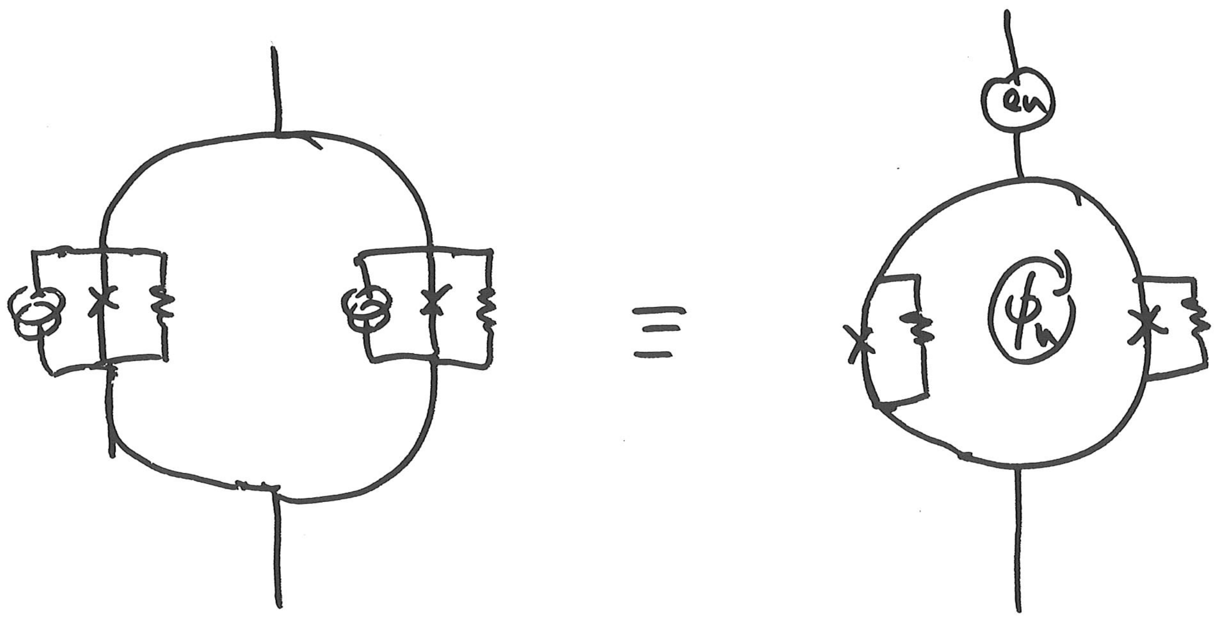
$$S_i^2 = \frac{4kT}{R}$$

on néglige souvent C.



$$\frac{d\theta}{dt} + \sin\theta = i + i_n$$

On montre



$$\boxed{\begin{array}{l} S_V = 16kTR \\ S_\phi = 16kT\dfrac{L^2}{R} \end{array}}$$

Exemple Ketchen et al

$L = 11\ pH$ $\quad 10\ \mu m^2$ Jonction $n = 2$

$T = 1.8\ K$ $\quad \mathcal{E} \simeq 5\hbar$

Bruit ultime $T = 0$

fluctuation de point zéro dans les shunts.

$\Longleftrightarrow$ bruit de grenaille

$$S = 2eI_0$$

on remplace $kT \leftrightarrow 2eRI_0$

$$\mathcal{E} = 8eI_0R\frac{L}{R}$$

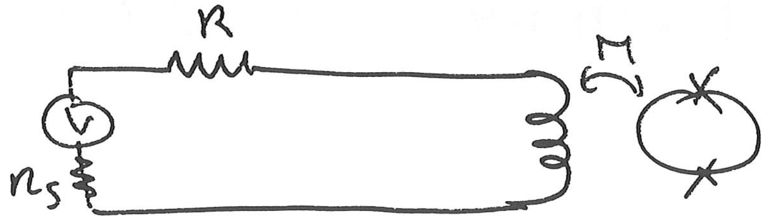
$$\mathcal{E} \simeq 4\hbar \quad (\mathcal{E} = \hbar)$$

un SQUID est donc très proche de la limite quantique

Bruit $1/f$: typiquement

$10^{-5}\ \Phi_0/\sqrt{Hz}$ à $f = 1\ Hz$

Application mesure électrique



$$\delta\phi = \frac{M\,\delta V}{R_S + R}$$

$\delta\phi = 5\,10^{-6}\,\phi_0$ $\qquad M = 5\,nH$

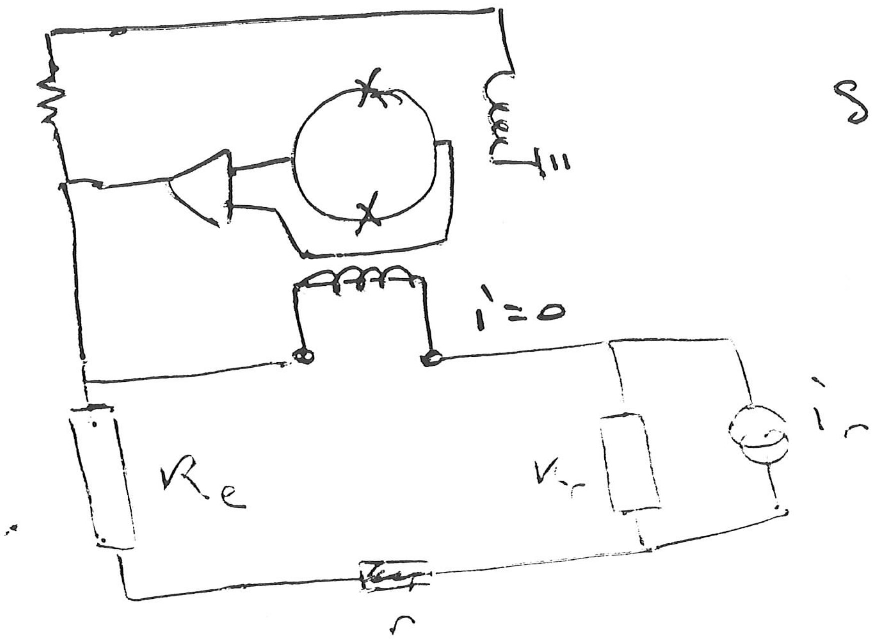
$R_S \ll R$ source de tension $\delta V = 10^{-1}\,V$

mais le bruit thermique dans R est très supérieur

En ampèremètre :

$$\boxed{\delta i = \frac{\delta\phi}{M} = 4\ pA/\sqrt{Hz}}$$

Mesure de résistance en pont.



SQUID en galvanomètre

le signal de rétroaction assure l'équilibrage du pont $i = 0$

SQUID Quantum Design

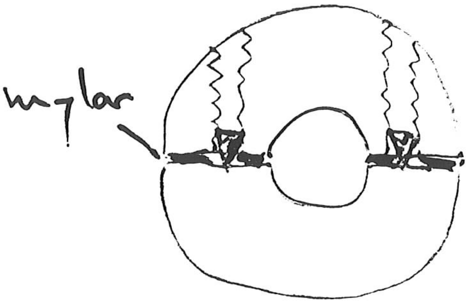
$$\delta\phi = 6\ 10^{-6}\ \phi_0/\sqrt{Hz} \leftrightarrow 5\,pA/\sqrt{Hz}$$

$$5\,pA/\sqrt{Hz} \longleftrightarrow 9.3\ \Omega \text{ à } T = 4K$$

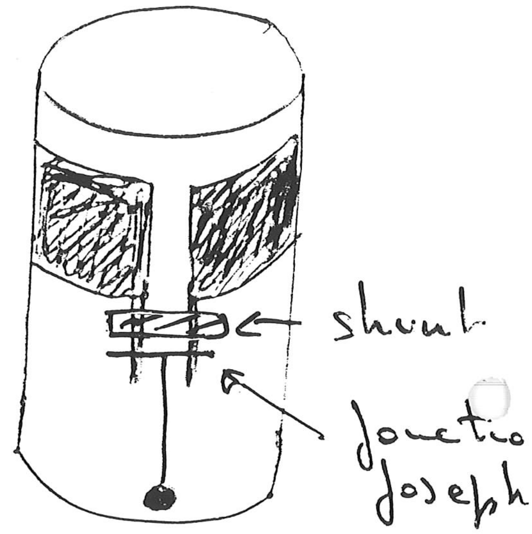
Si R_{Total} pont $< 9.3\ \Omega$ le bruit thermique du pont domine le bruit du SQUID

Réalisation pratique (RF SQUID)
non discutés ici

Premier SQUID sur des tubes



Jonction à vis
(peu fiable)



Facile à coupler avec une inductance mais L très grande C très grand mauvaise performance.

⇓

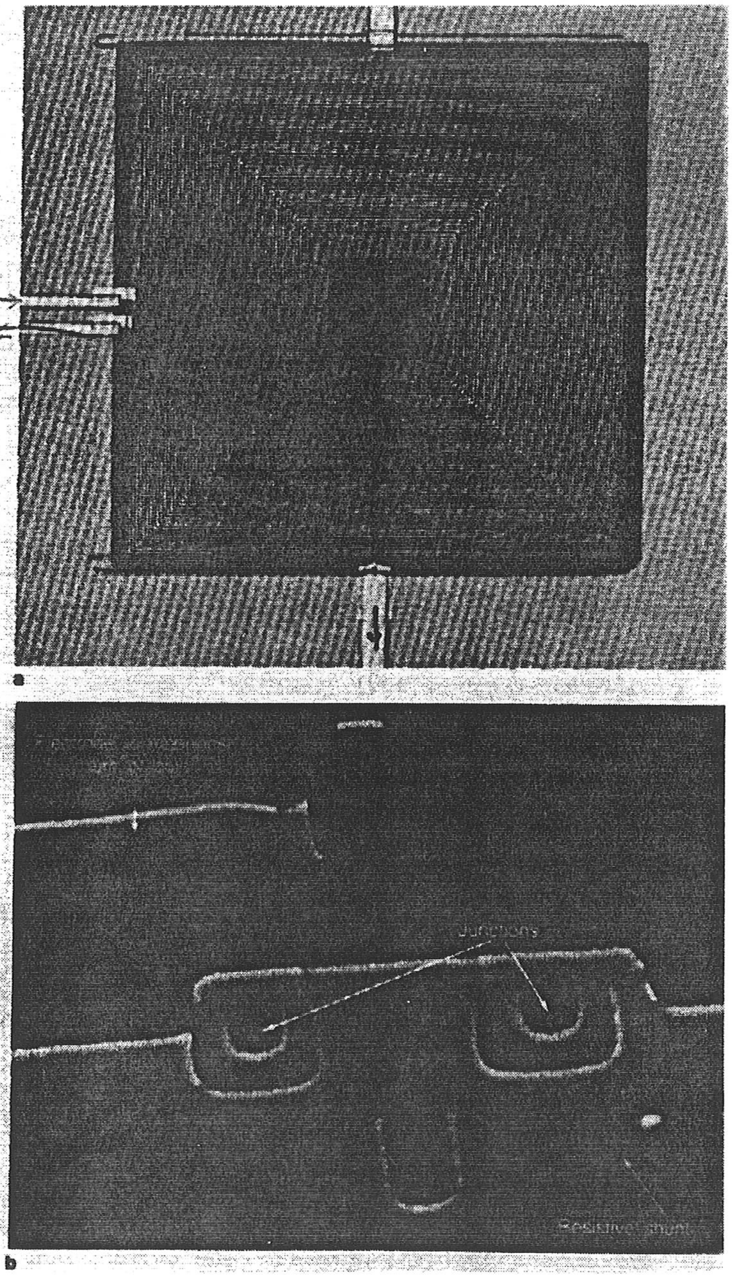
TECHNOLOGIE PLANAIRE

SQUID Berkeley.

↓I,V

bobine d'entrée
50 tours.

900 µm



2.5 µm

$$\delta\Phi = 3\,10^{-6}\ \Phi_0/\sqrt{Hz}$$

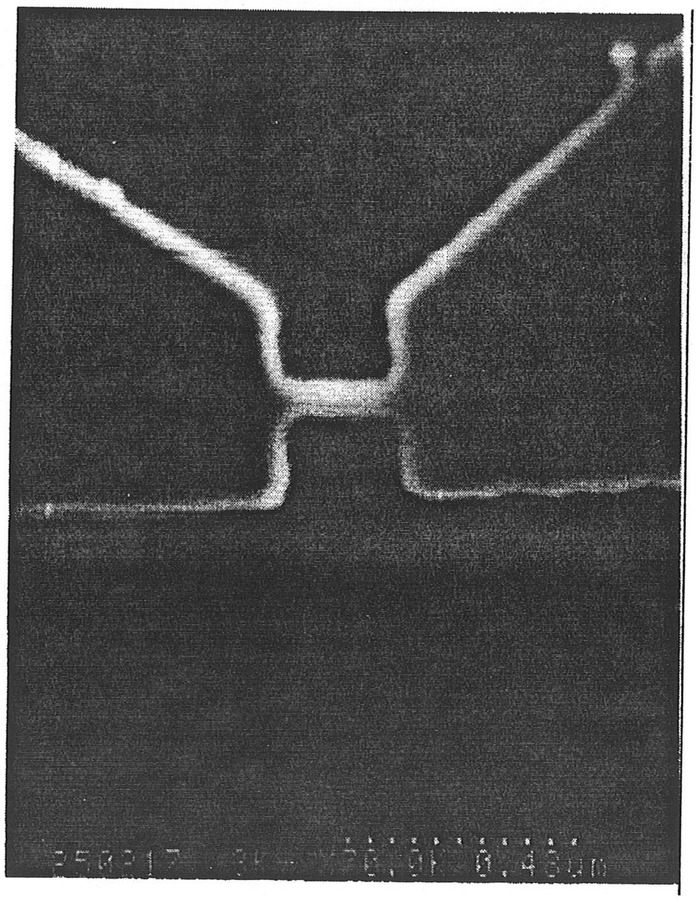
$$\varepsilon \simeq 99\ 100\ h$$

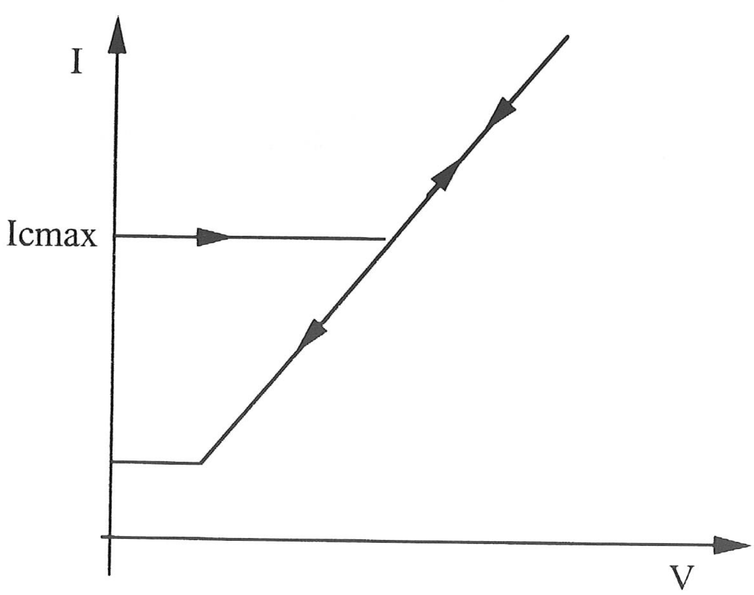
FABRICATION DE MICROSQUID

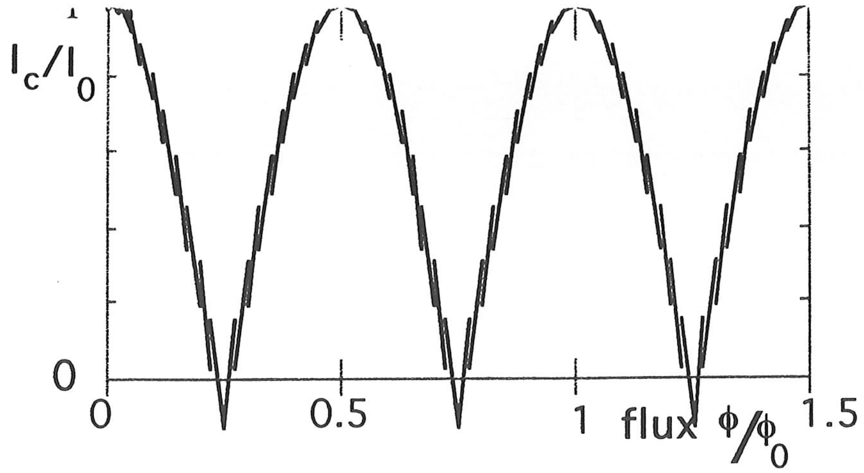
Jonction Josephson micropont

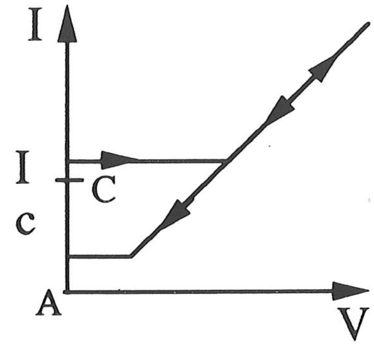
Facilité de la fabrication - une seule étape technologique (pas de recuit, d'oxydation, ...)

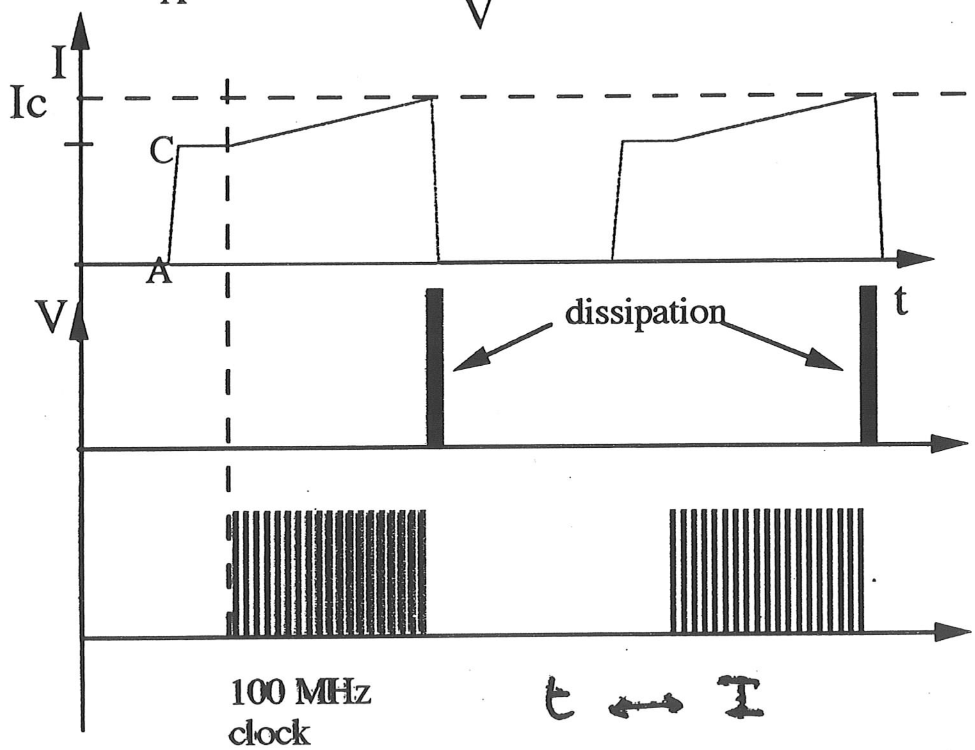
Compatible avec la réduction de la taille du SQUID











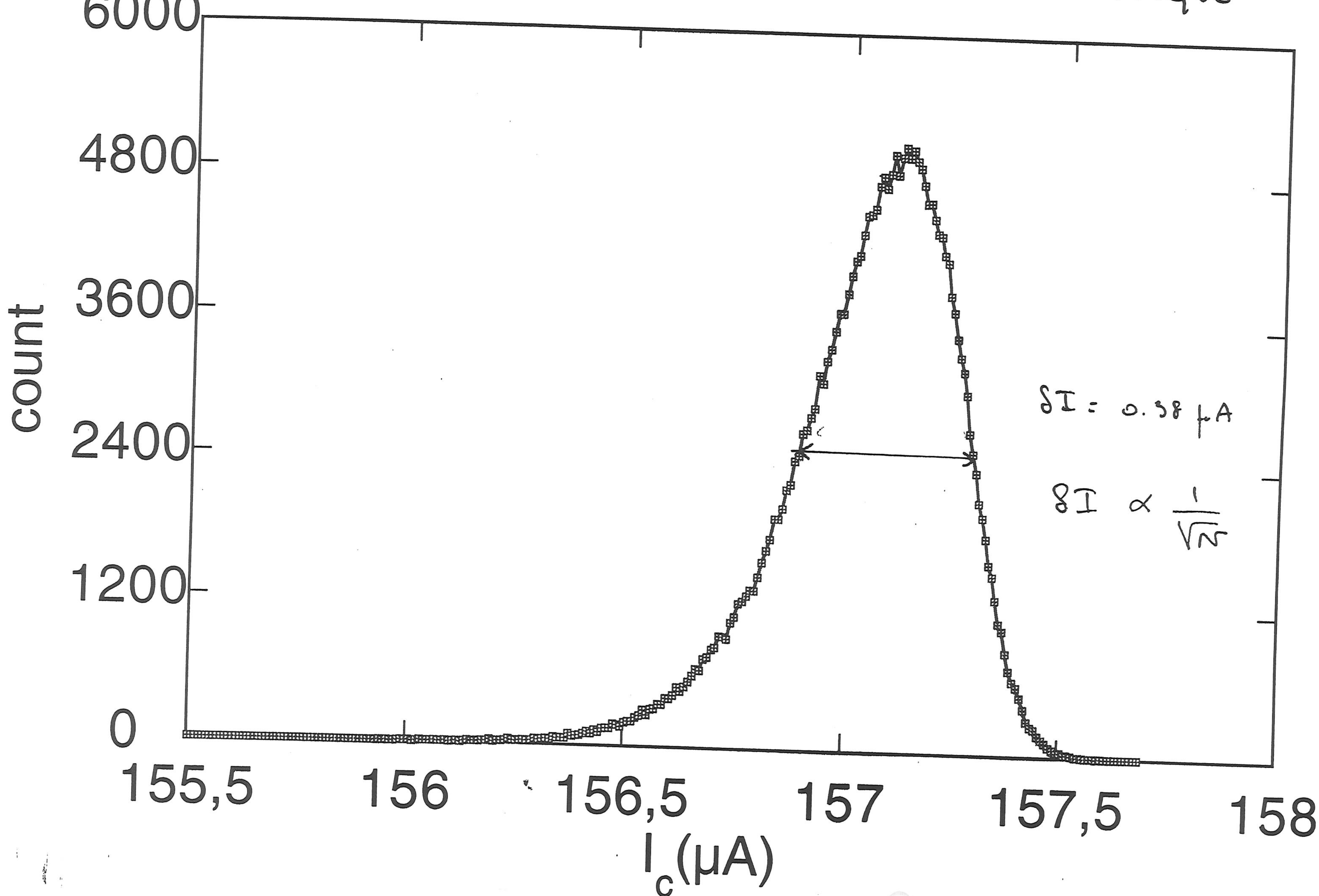
cycle de mesure: 100μs

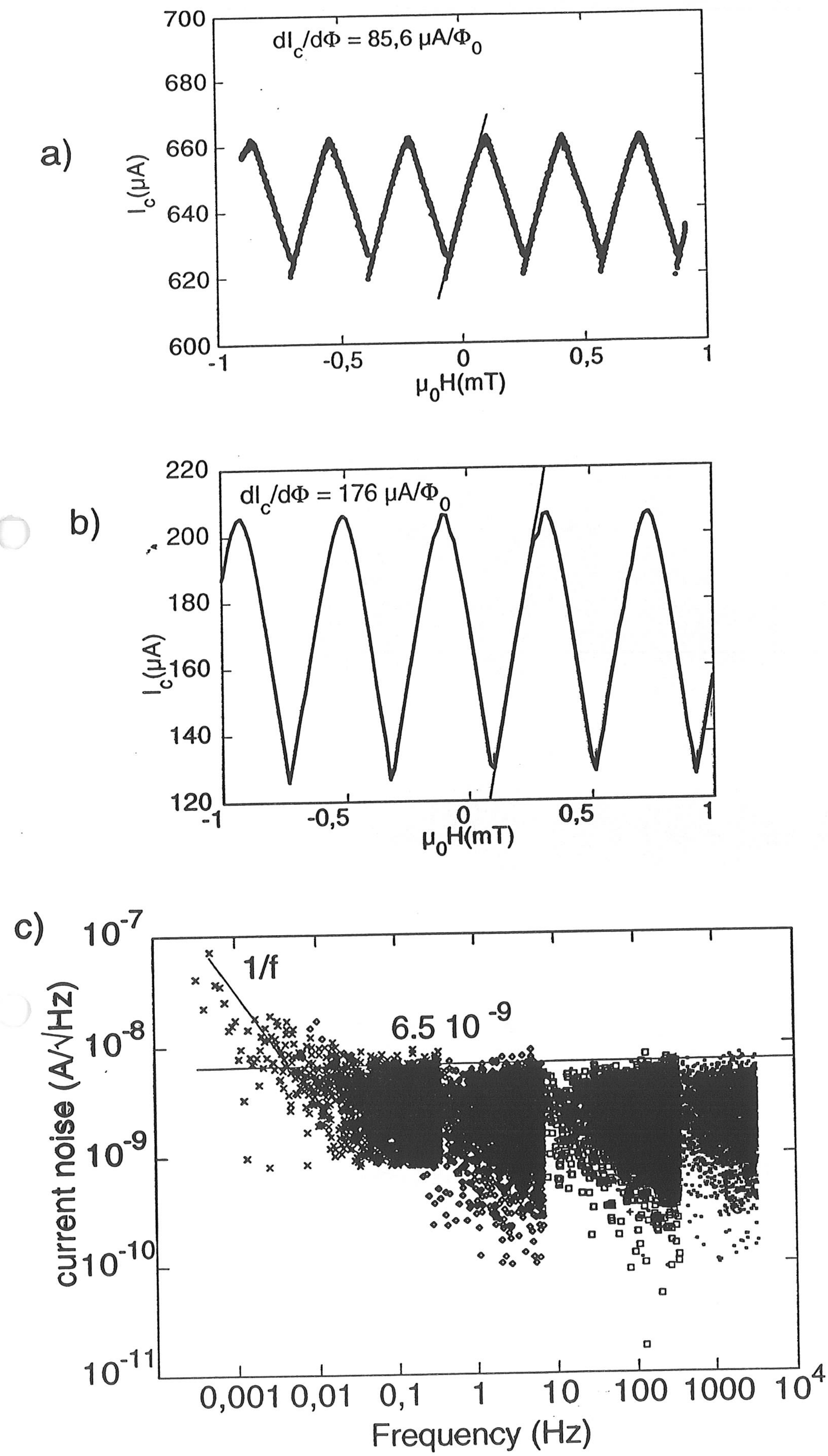
temps de repos (refroidissement): 1μs

$\boxed{10^{-5}\ \phi_0/(\text{Hz})^{1/2}}$

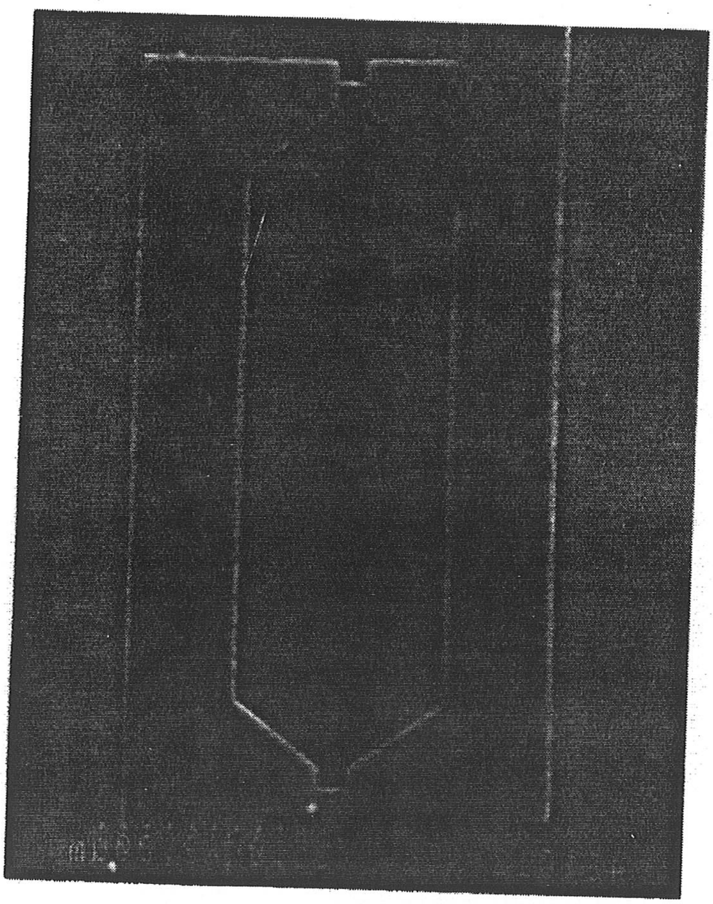
fréquence de mesure : 10kHz

HISTOGRAMME DU COURANT CRITIQUE





$3\ 10^{-5}\ \Phi_0/\sqrt{Hz}$



EXEMPLE DE REALISATION

Sensibilité limite des μSQUID

à 10 kHz $\qquad \delta\phi \simeq 2\ 10^{-5}\ \phi_0/\sqrt{Hz}$

Dans un SQUID shunté la tension aux bornes est alternative à la fréquence Josephson typiquement 10 GHz
$\rightarrow$ moyenne pour les SQUID shunté

Limite quantique $\varepsilon = h$

$$\varepsilon = \frac{\delta\phi^2}{2L} \qquad \text{ici} \quad L \simeq 1\,pH$$

$$\delta\phi = 10^{-8}\ \phi_0$$

mesuré à 10 kHz

$$\delta\phi = 10^{-8}\ \frac{\sqrt{10\,kHz}}{\sqrt{10\,GHz}} = 10^{-5}\ \phi$$

$$\boxed{\text{les μSQUID sont donc proche de la limite quantique}}$$

APPLICATIONS

?

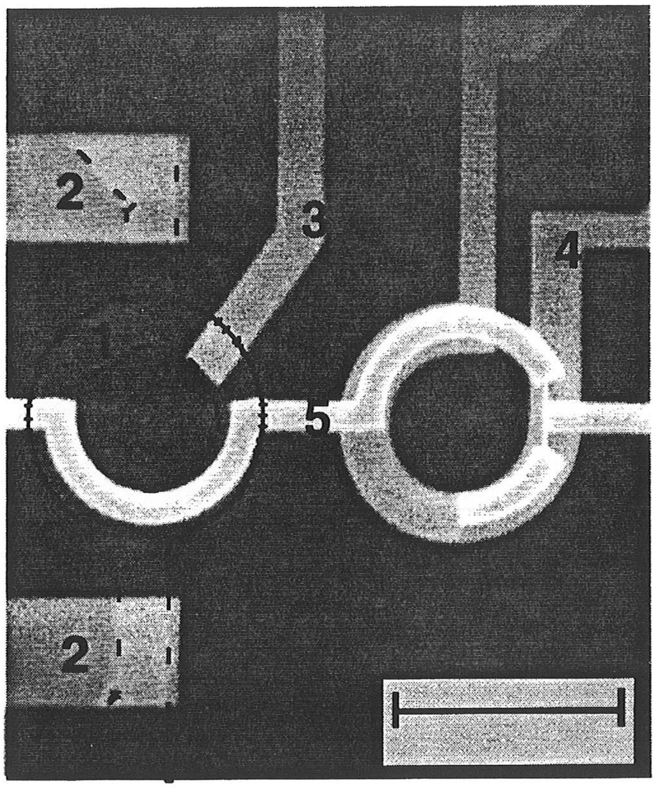


Figure C3: L'anneau gravé (1) est souligné par des traits pointillés pour plus de clareté. 2 et 3 sont des grilles qui permettent soit d'isoler l'anneau de ces plots de contacts (grille 2) soit de couper l'anneau pour supprimer tout effet d'interférence (grille). La bobine (4) permet de calibrer le SQUID. Sur cette photo seule la première partie du SQUID est présente (5). A droite, placées sur la bobine de calibration, on distingue les deux jonctions Josephson micropont.

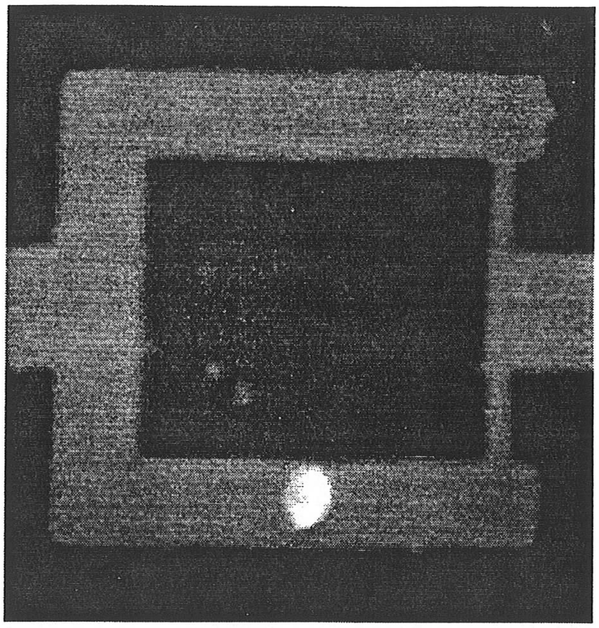
MESURE DE COURANTS PERMANENTS DANS UNE BOUCLE

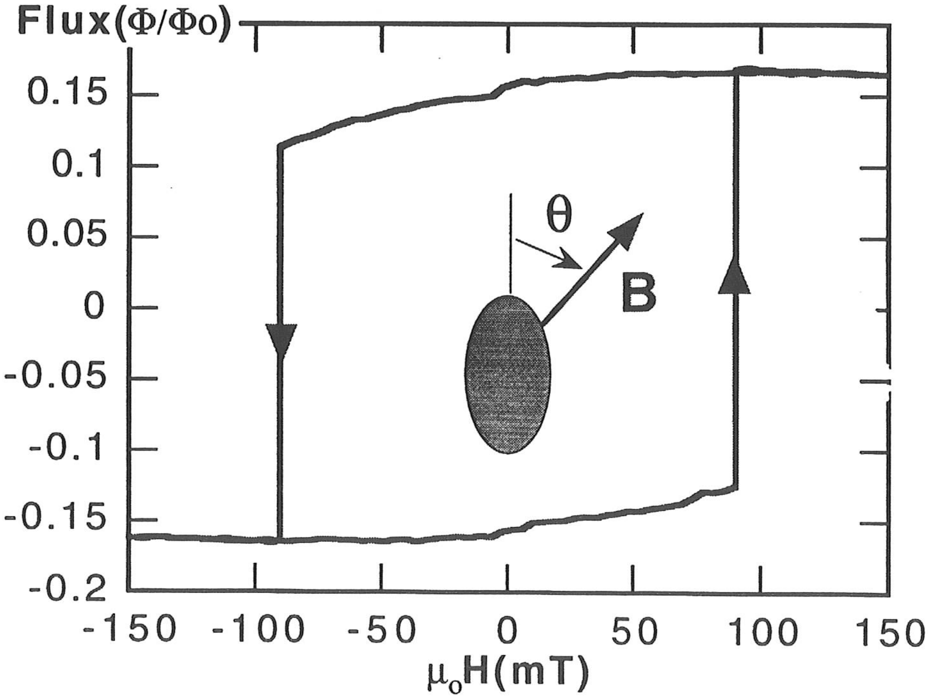
MESURE DE PARTICULE MAGNETIQUE

Hysteresis studies

angular dependence of the switching field H_{sw}

Co particle : 70 nm x 50 nm x 25nm

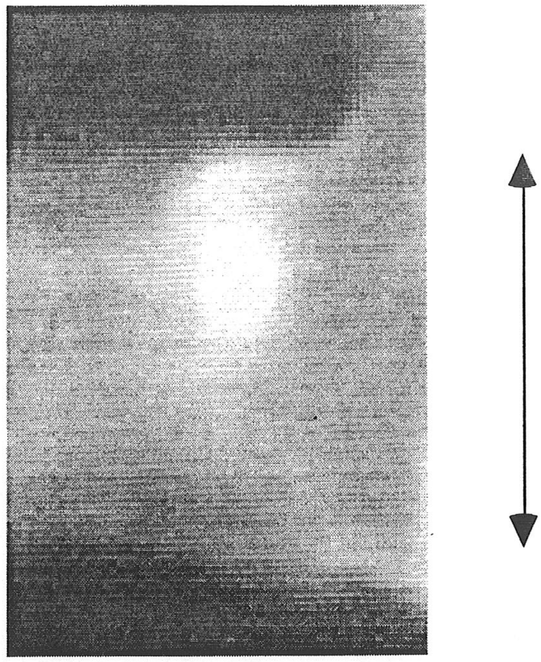


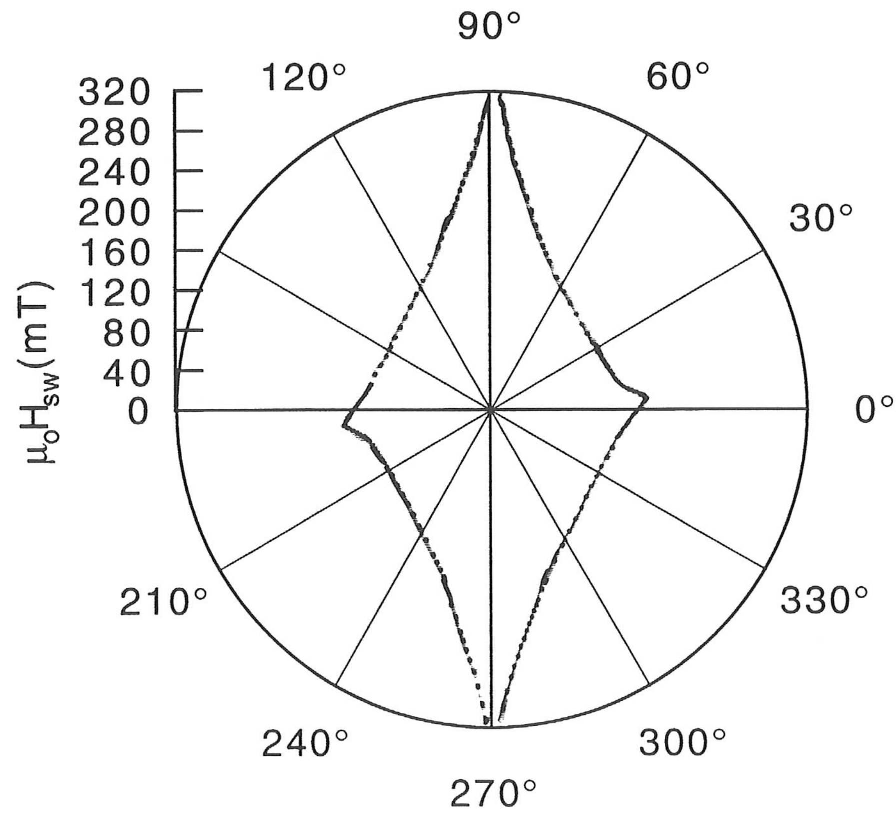


W. WERNDORFER - LLN
CRTBT

Co nanoparticles (fcc)

particle size
≈ 20 nm

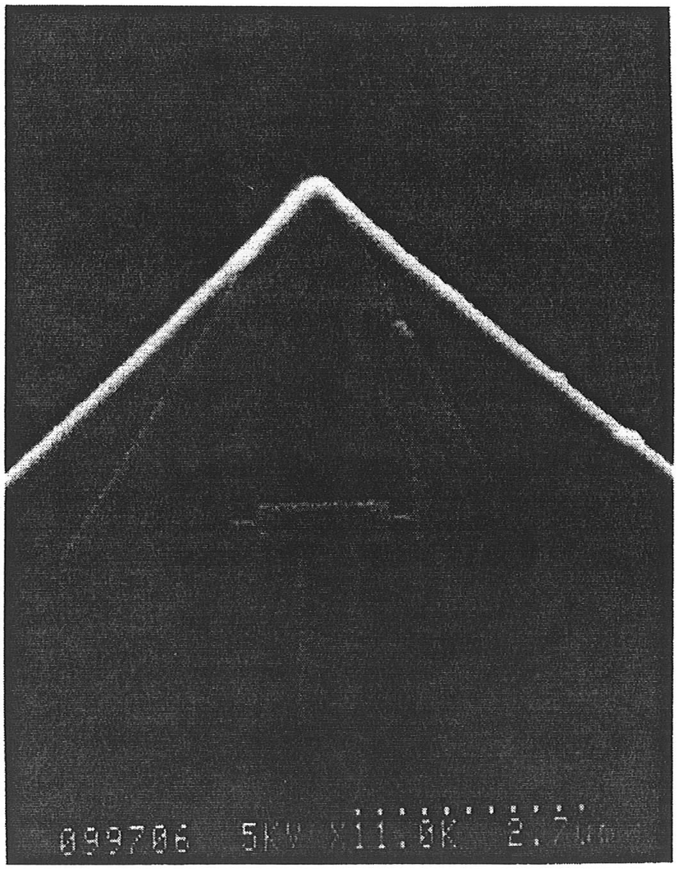




Uniform rotation with the second anisotropy constant

Ching-Ray Chang, J. Appl. Phys. 69, 2431 (1991)

MICRO SQUID PLACÉ AU BOUT D'UNE POINTE AFM



coll. K. Hasselbach, A. Benoit
CRTBT