Retournement de l'aimantation des nanoaimants

Edgar Bonet

28 octobre 1999

Théorie du retournement uniforme

- Théorie quasi-statique
  - Aimantation uniforme ?
  - Retournement uniforme
  - Modèle de Stoner-Wohlfarth
  - Anisotropie arbitraire
  - Bifurcations
- Théorie dynamique
  - Modèle de Néel-Brown
  - Reformulation de Kurkijärvi

Théorie quasi-statique

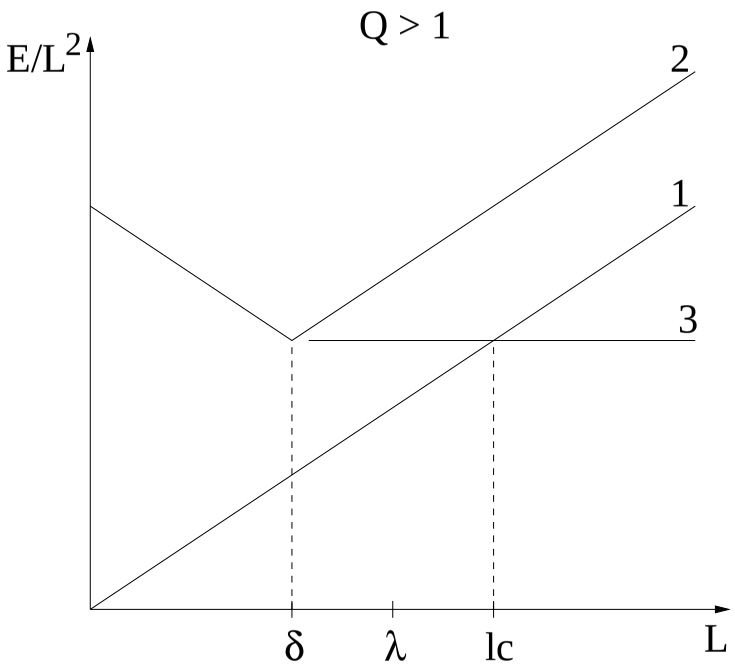
- monocristal
- particule isolée
- limite $T \to 0$
- non quantique

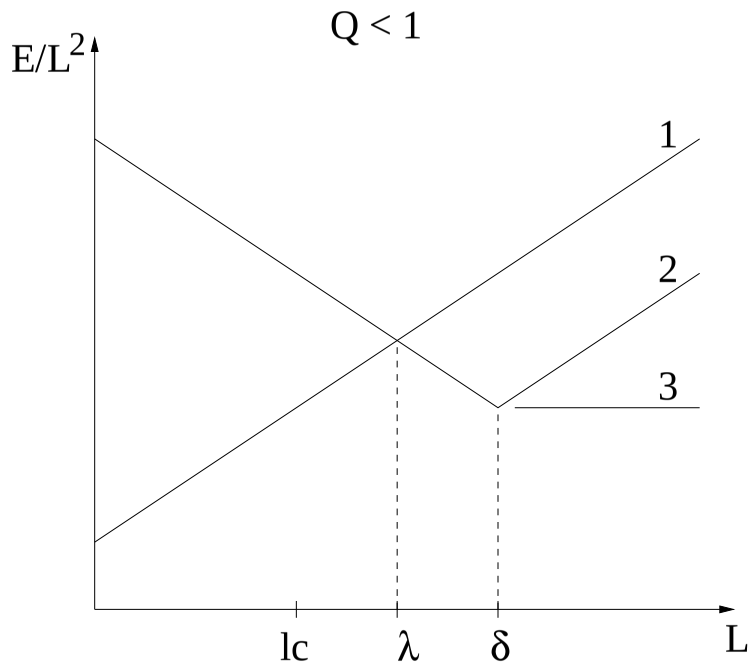
$\rightsquigarrow$ système dans un minimum de potentiel

Variations lentes du champ appliqué $\rightsquigarrow$ évolution quasi-statique.

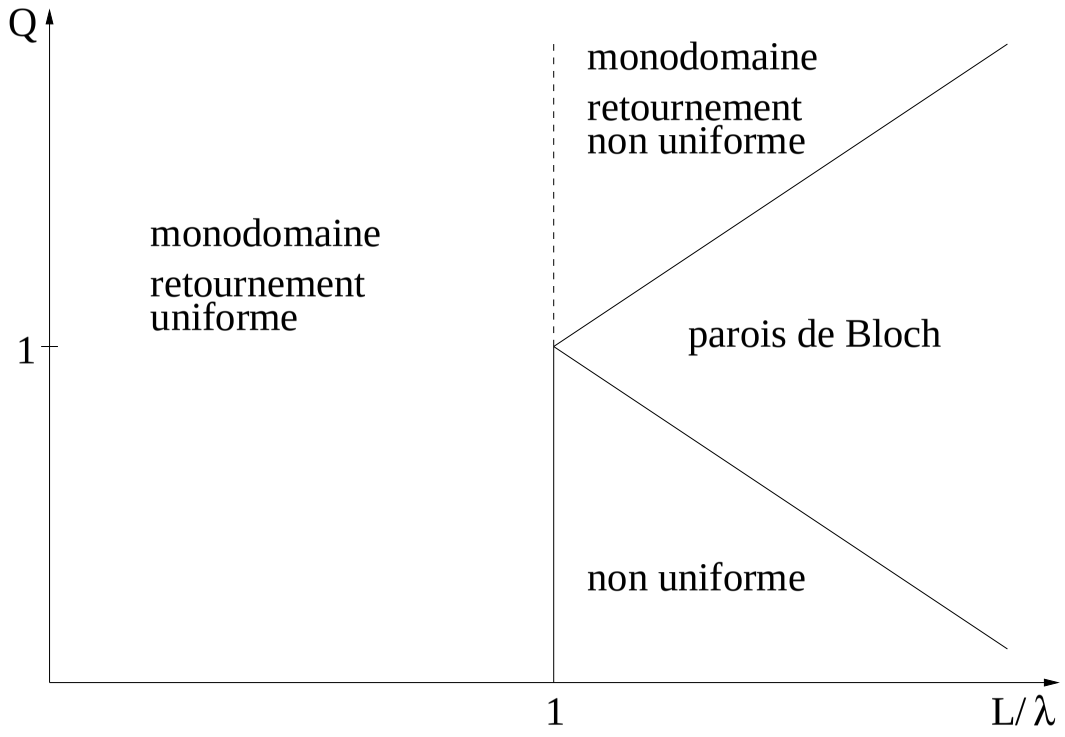
Aimantation uniforme ?

- aimantation uniforme $E_1 \sim \mu_0 M_s^2 L^3$
- aimantation non homogène $E_2 \sim JL + KL^3$
- paroi de domaine $E_3 \sim \sqrt{JK} L^2$ pour $L > \delta = \sqrt{J/K}$





Aimantation uniforme ?



$$Q = \frac{K}{\mu_0 M_s^2} = \left(\frac{\lambda}{\delta}\right)^2 = \left(\frac{l_c}{\lambda}\right)^2 .$$

Retournement uniforme

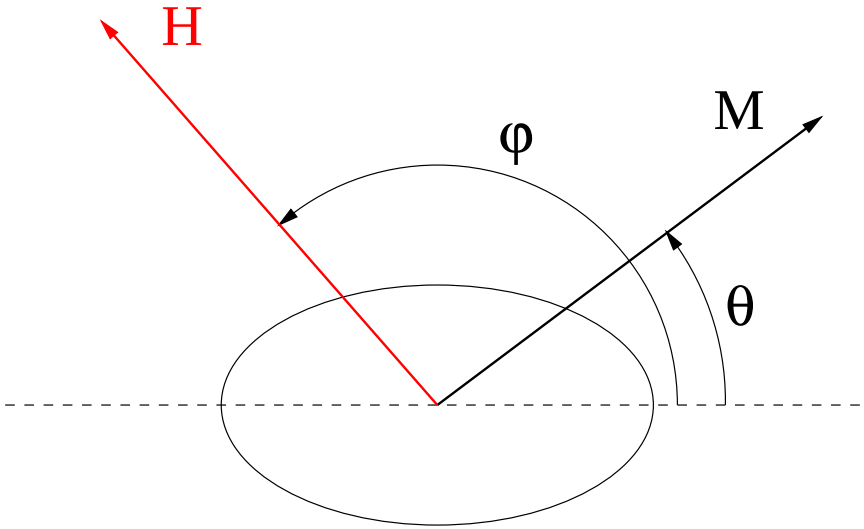
Minimisation de

$$V(\mathbf{r}) = V_0(\mathbf{r}) - \mu_0 v \mathbf{H} \cdot \mathbf{M}$$

ou encore

$$V = V_0 - \mathbf{r} \cdot \mathbf{h}$$

où $\mathbf{h} = \mu_0 v M_s \mathbf{H}$



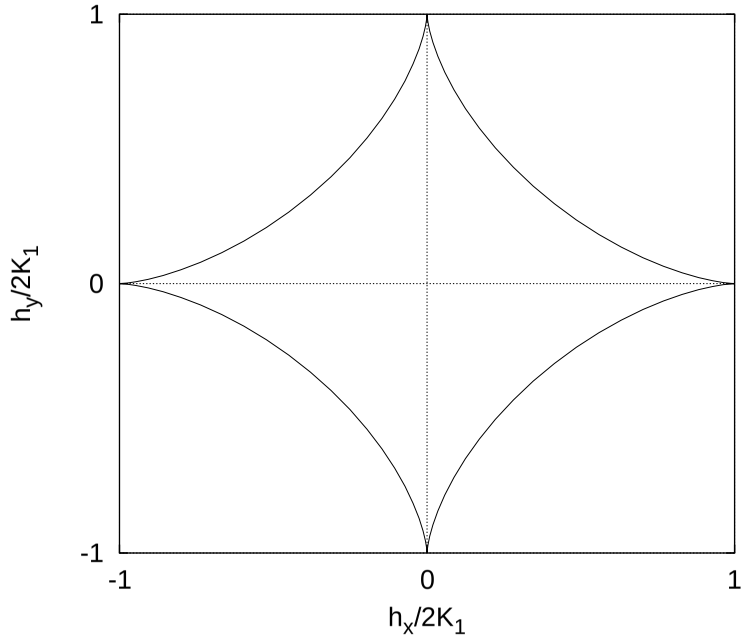
Modèle de Stoner-Wohlfarth

Potentiel :

$$V = K_1 \sin^2\theta - \mathbf{r}\cdot\mathbf{h}$$
$$= K_1 \sin^2\theta - h\cos(\theta - \varphi)$$

Champs de retournement :

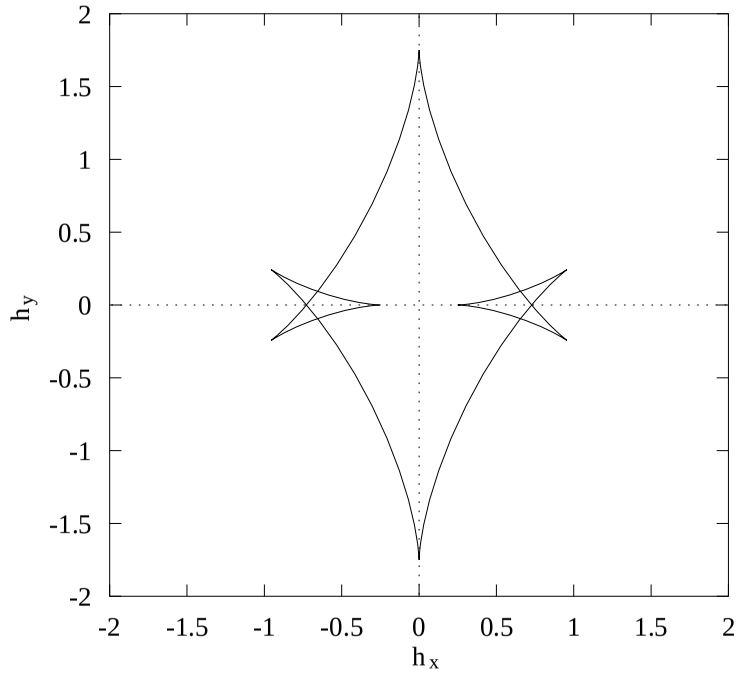
$$\frac{h}{2K_1} = \frac{1}{(\sin^{2/3}\varphi + \cos^{2/3}\varphi)^{3/2}}.$$



Anisotropie arbitraire

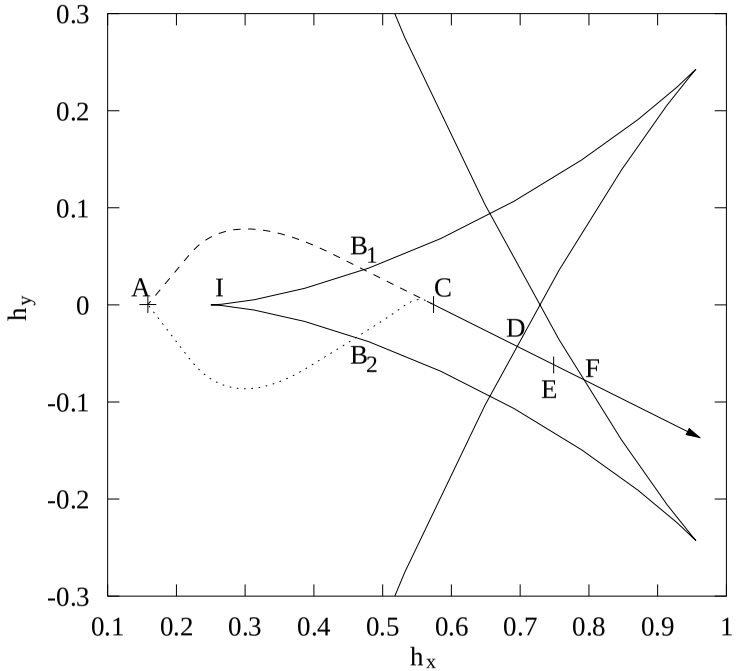
Par exemple

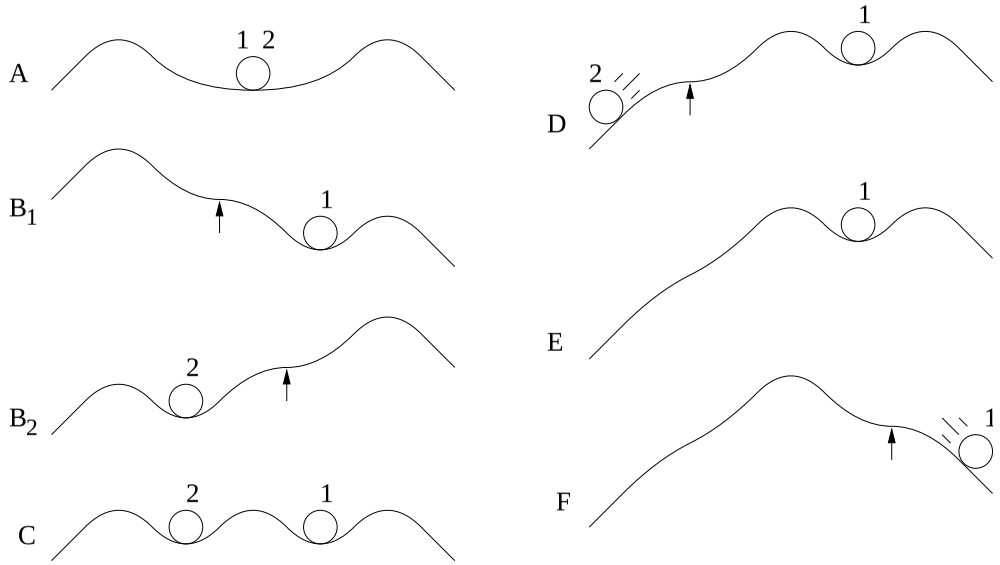
$$V_0 = -\cos^2\theta - \frac{3}{4}\cos^4\theta.$$



$\rightsquigarrow$ plusieurs champs de retournement pour une direction donnée.

Bifurcations



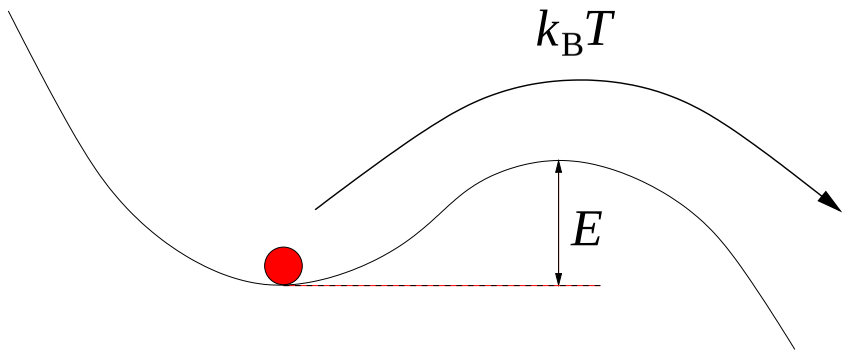


Le champ de retournement dépend du chemin suivi !

Théorie dynamique

$T \neq 0$

- barrière d'énergie de quelques $k_B T$ franchissable
- retournement stochastique



Modèle de Néel-Brown

Probabilité de non retournement

$$P(t) = e^{-t/\tau}.$$

τ suit une loi d'Arrhénius

$$\tau = \tau_0 e^{E/k_B T}$$

τ_0 dépend des détails de la dynamique.

Modèle de Néel-Brown

Dynamique donnée par l'équation de Gilbert

$$\dot{\mathbf{r}} = \frac{\mu_0\gamma}{1+\alpha^2}\mathbf{r}\times\mathbf{H}_{ef} + \frac{\alpha\mu_0\gamma}{1+\alpha^2}(\mathbf{r}\times\mathbf{H}_{ef})\times\mathbf{r},$$

Amortissement moyen et fort :

$$\frac{1}{\tau_0} = \frac{\gamma}{4\pi v M_s}\frac{\alpha}{1+\alpha^2}\frac{\sqrt{c_1^{(1)}c_2^{(1)}}}{\sqrt{-c_1^{(0)}c_2^{(0)}}} \times\left(-c_1^{(0)} - c_2^{(0)} + \sqrt{\left(c_2^{(0)} - c_1^{(0)}\right)^2 - 4\alpha^{-2}c_1^{(0)}c_2^{(0)}}\right).$$

Amortissement faible :

$$\frac{1}{\tau_0} = \frac{\alpha\gamma}{2\pi v M_s}\frac{E}{k_B T}\sqrt{c_1^{(1)}c_2^{(1)}},$$

où $c_i^{(j)}$ sont les courbures du potentiel.

Reformulation de Kurkijärvi

Champ balayé à vitesse $v = -\frac{\mathrm{d}(\delta H)}{\mathrm{d}t}$.
La hauteur de barrière varie comme

$$E = E_0(\delta H)^{3/2}.$$

Probabilité de retournement maximale quand

$$\frac{\mathrm{d}^2 P}{\mathrm{d}t^2} = \frac{P}{\tau^2}\left(1 + \frac{\mathrm{d}\tau}{\mathrm{d}t}\right) = 0,$$

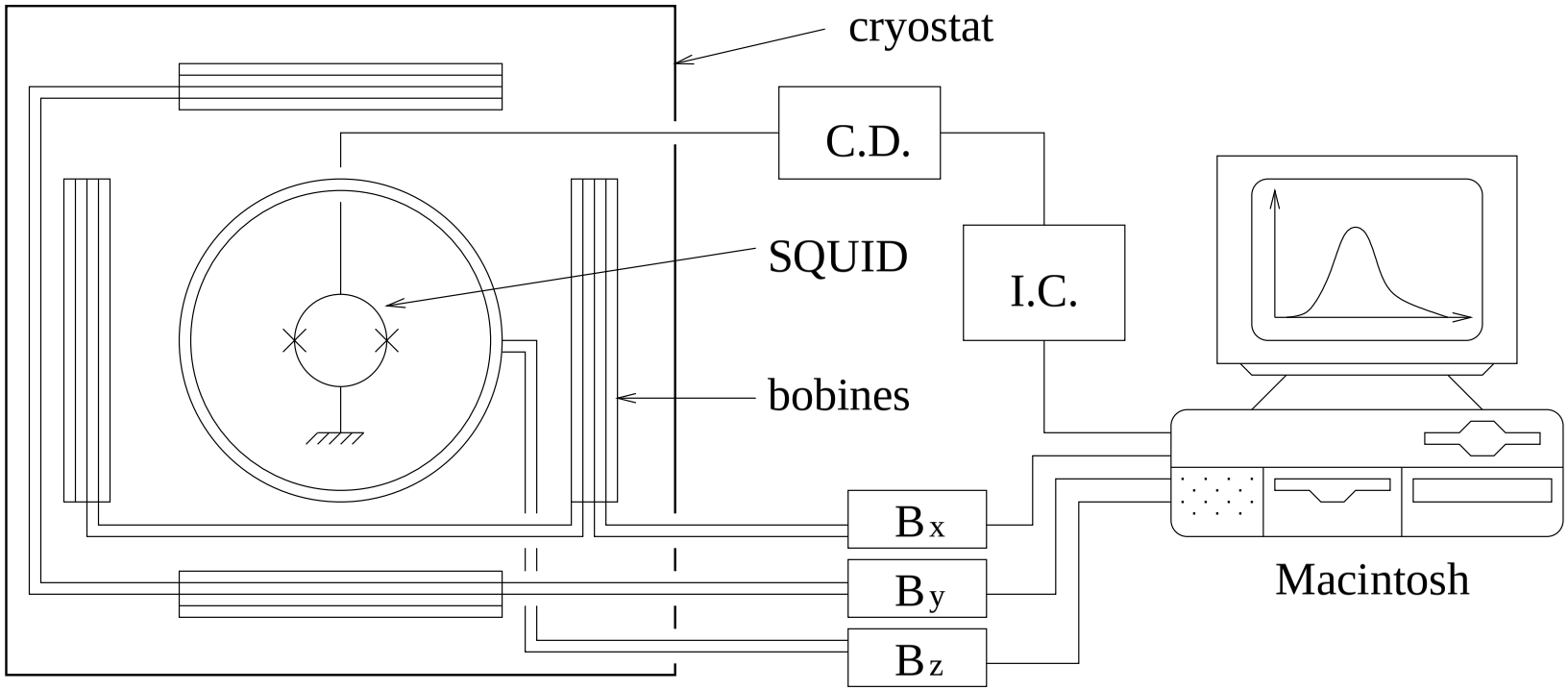
soit pour le champ

$$(\delta H)^{3/2} = \frac{k_B T}{E_0} \ln \frac{2k_B T}{3E_0\sqrt{\delta H} v \tau_0}.$$

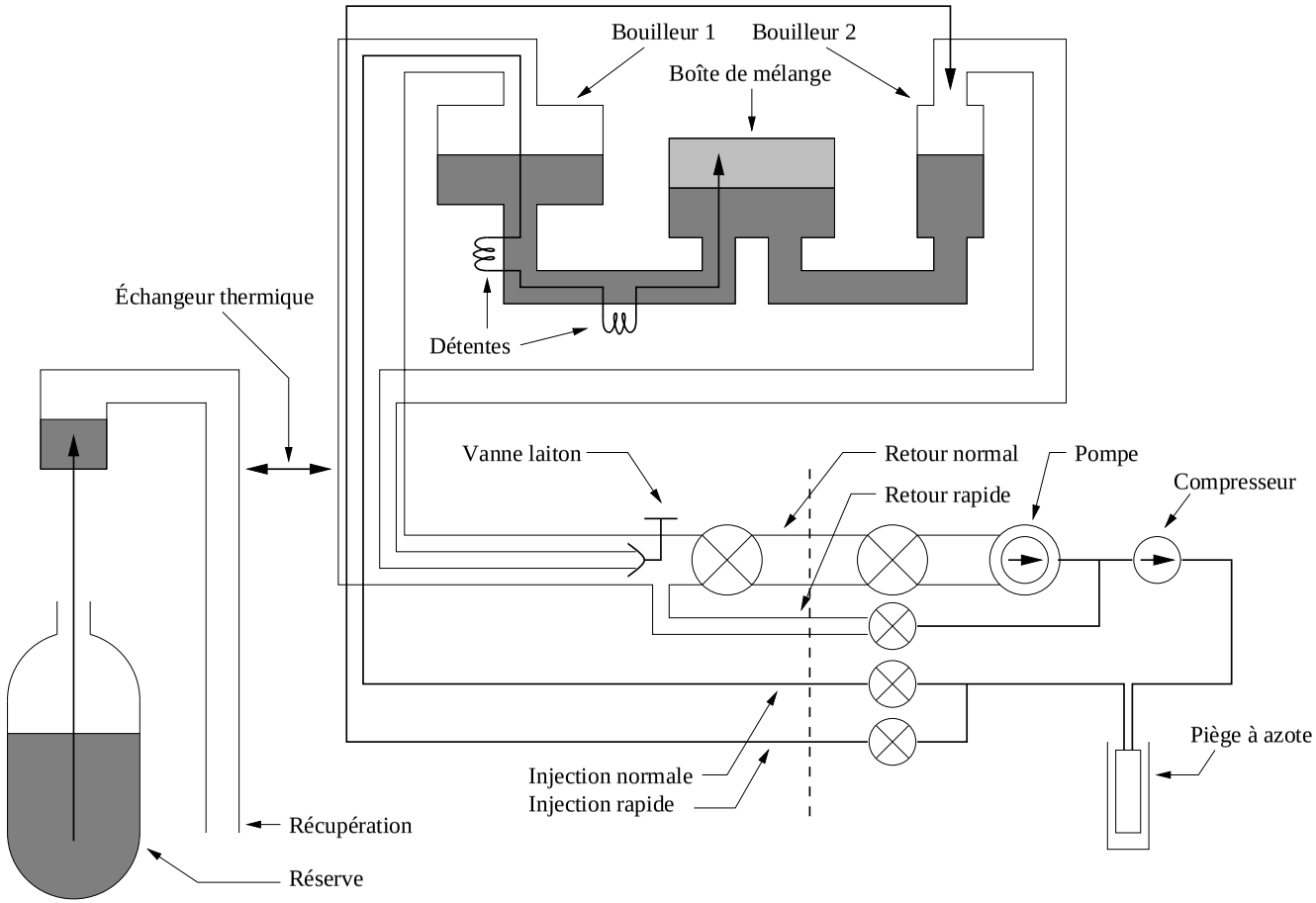
Techniques expérimentales

- Schéma général de l'expérience
- Chaîne de mesure
- Micro-SQUID
  - Caractéristique du SQUID
- Commande du champ
- Cycle d'hystérésis
- Mode froid
- Mode aveugle

Schéma général de l'expérience



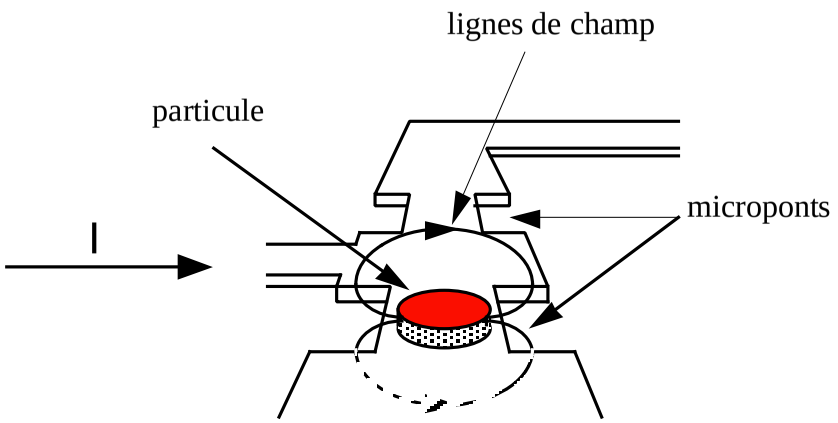
Cryogénie

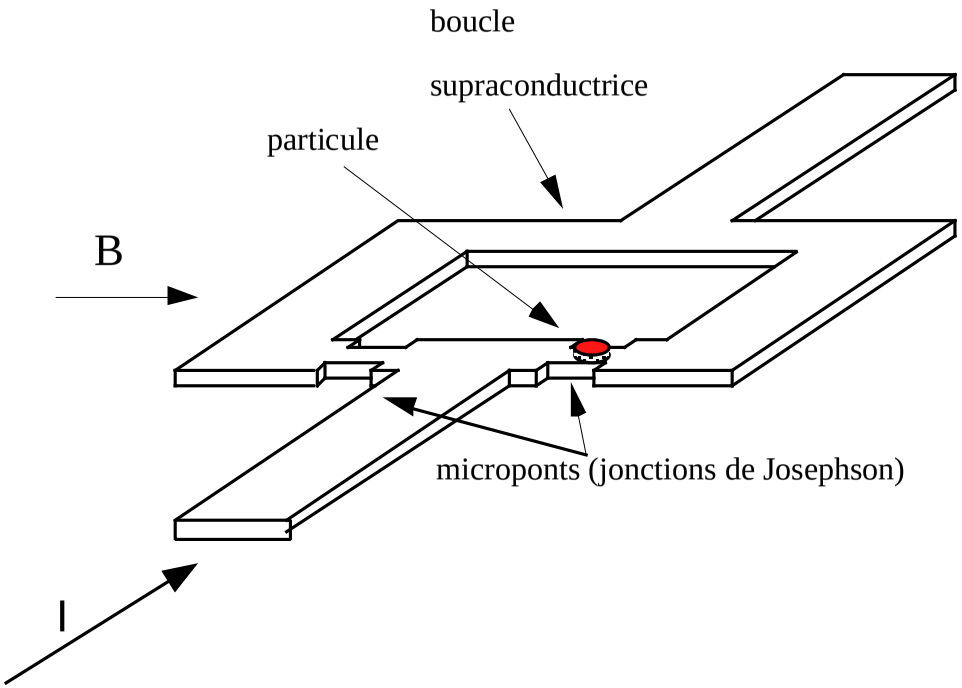

Bouilleur 1
Bouilleur 2
Boîte de mélange
Échangeur thermique
Détentes
Vanne laiton
Retour normal
Retour rapide
Pompe
Compresseur
Piège à azote
Injection normale
Injection rapide
Récupération
Réserve

Chaîne de mesure

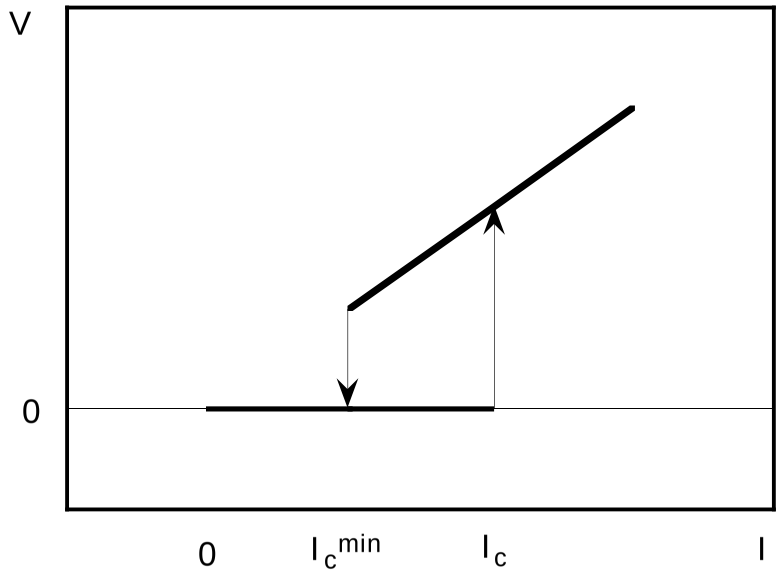
- micro-SQUID
- circuit de détection (analogique)
- interface de contrôle (numérique)
- carte d'acquisition
- logiciel

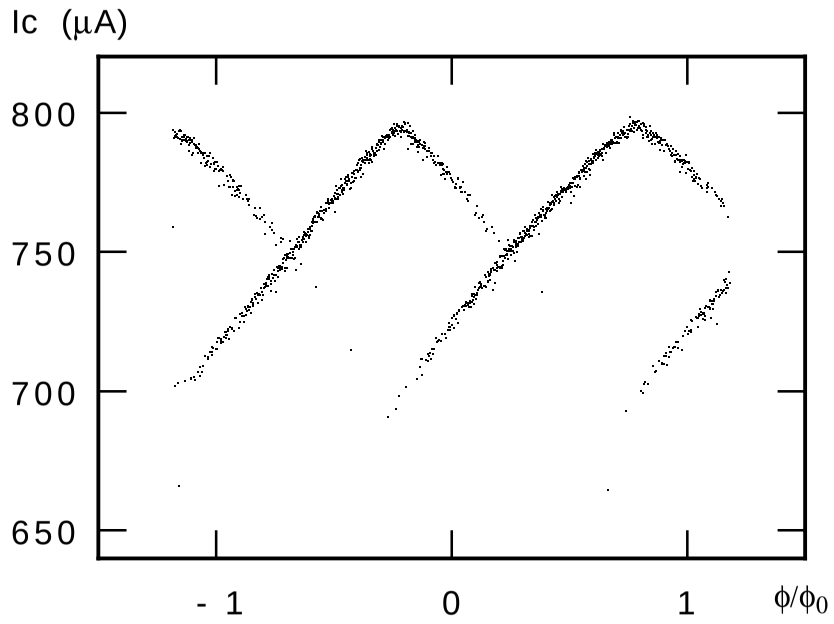
Micro-SQUID


lignes de champ
particule
microponts
I


boucle
supraconductrice
particule
B
microponts (jonctions de Josephson)
I

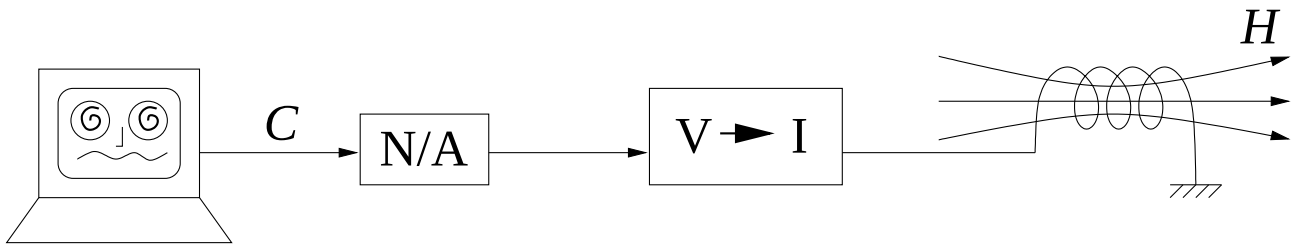
Caractéristique du SQUID





Commande du champ

Système de commande



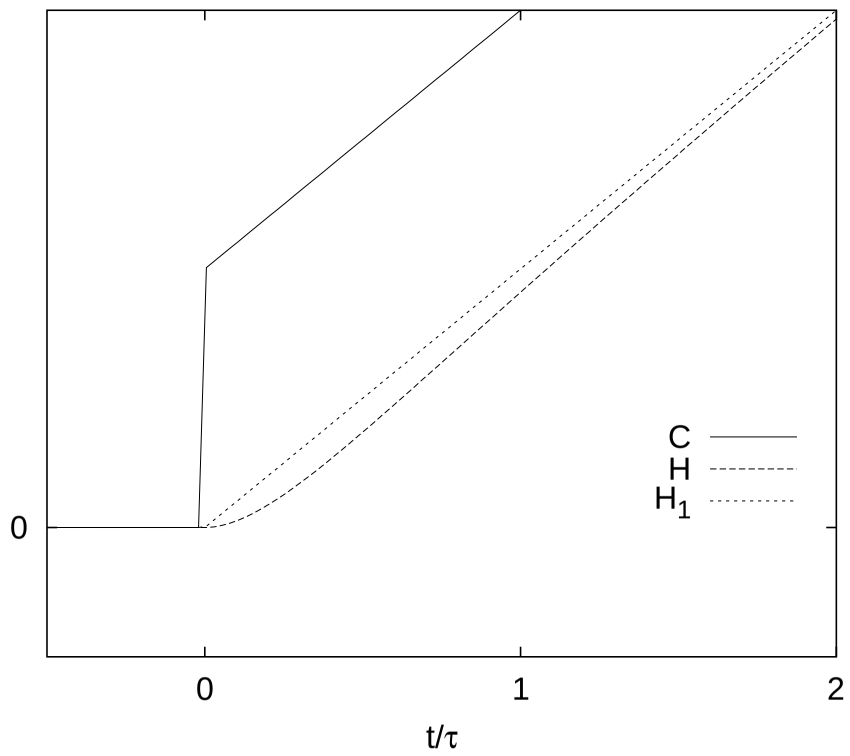
Avec retard du champ H sur la consigne C :

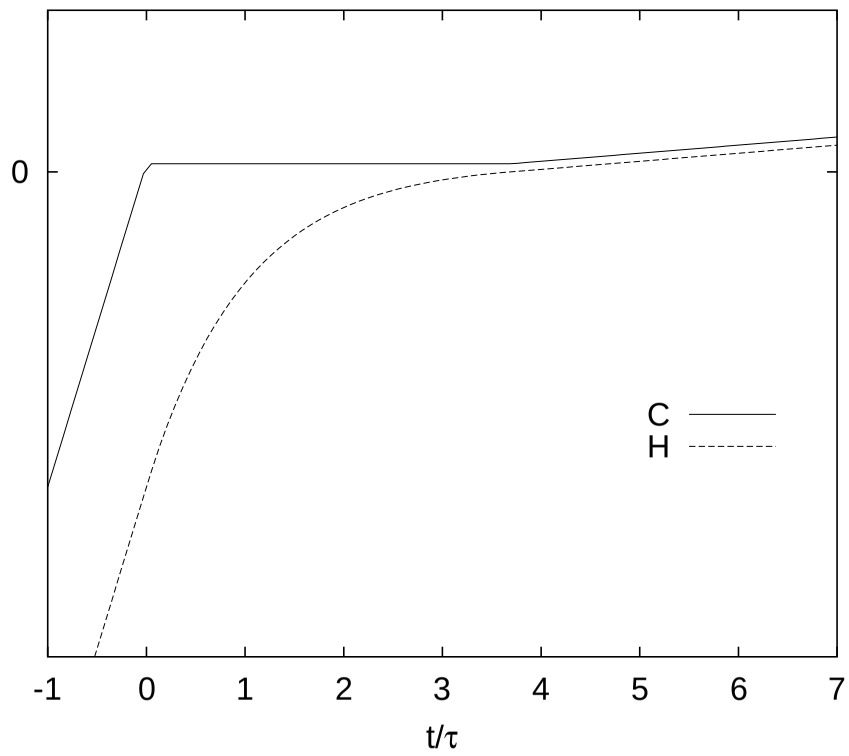
$$C = H + \tau \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(H + \tau' \frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}\right),$$

où $\tau \approx 10$ ms et $\tau' \ll \tau$.

Commande du champ

Il faut tenir compte du temps de réponse pour élaborer la consigne C.

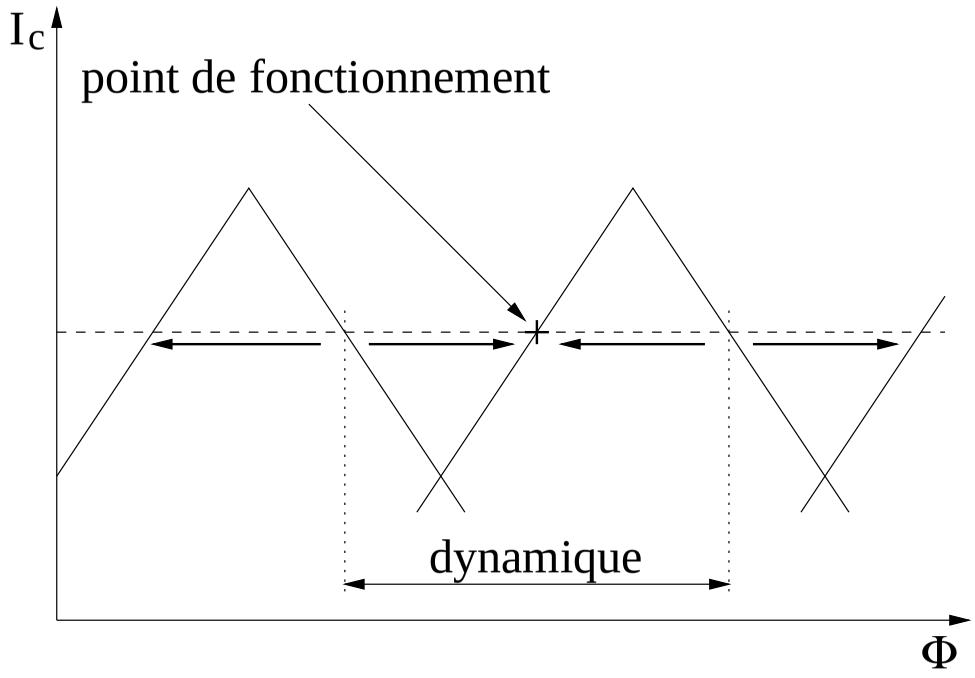




Cycle d'hystérésis

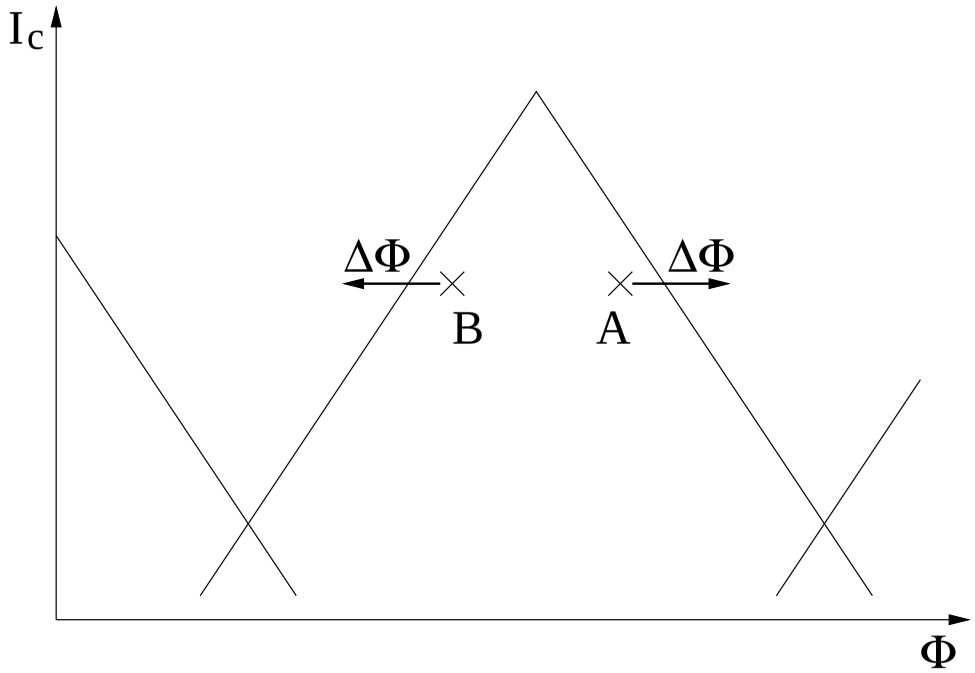
- choix d'un point de fonctionnement dans la caractéristique du SQUID
- rétroaction pour compenser le flux dû à la particule

$\rightsquigarrow$ le flux de rétroaction donne le signal magnétique



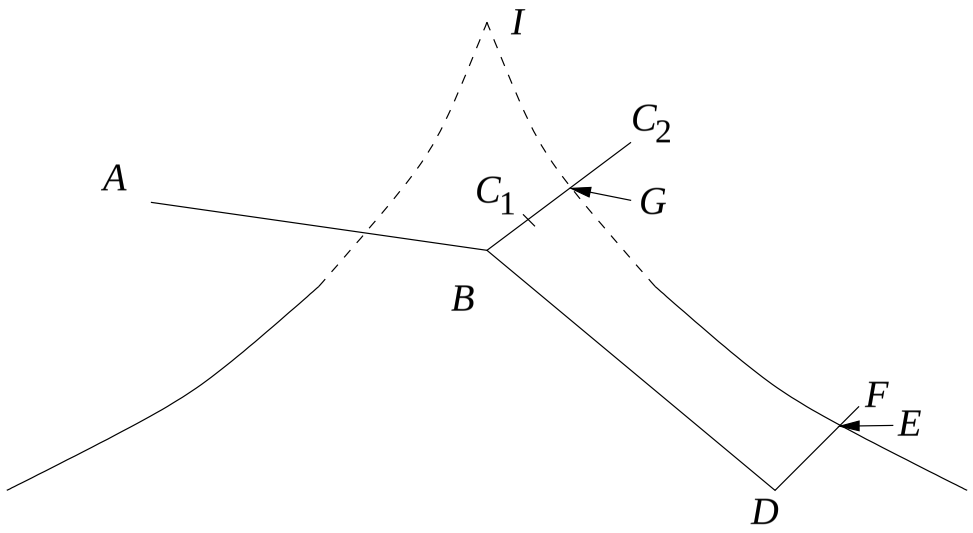
Mode froid

SQUID polarisé à I constant.
Retournement de l'aimantation
$\rightsquigarrow$ transition du SQUID.



Mode aveugle

A : saturer l'aimantation
C_i : éventuellement la retourner
E : tester avec le SQUID



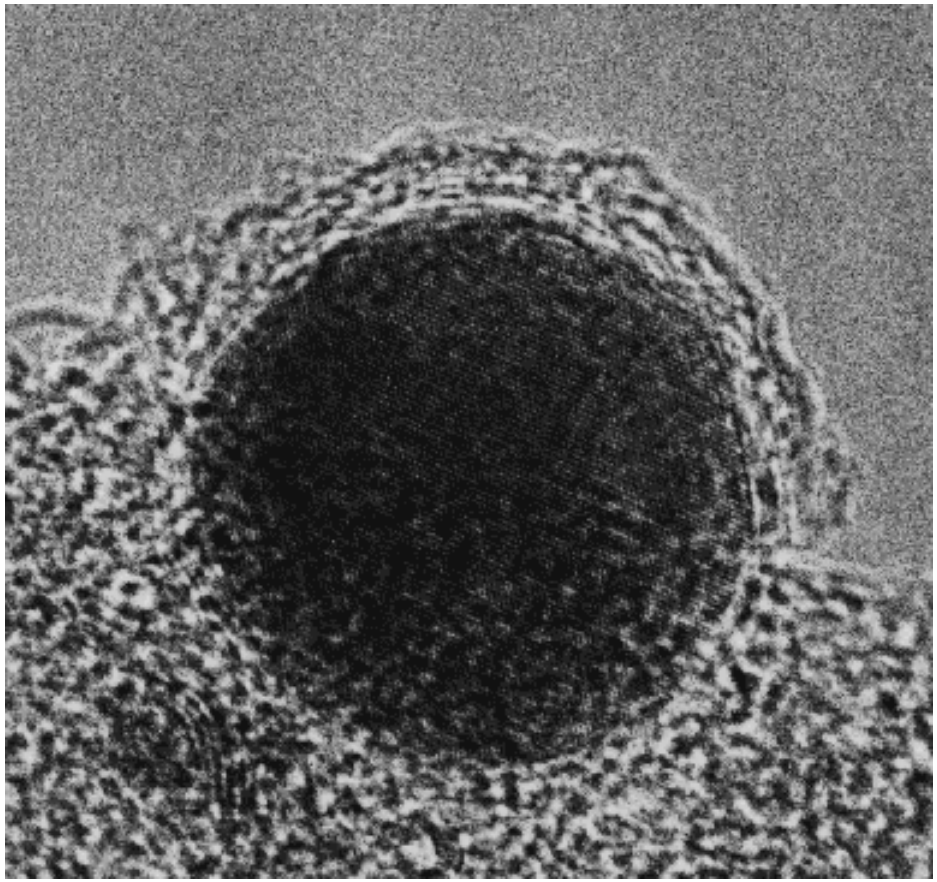
$\rightsquigarrow$ utilisable en trois dimensions.

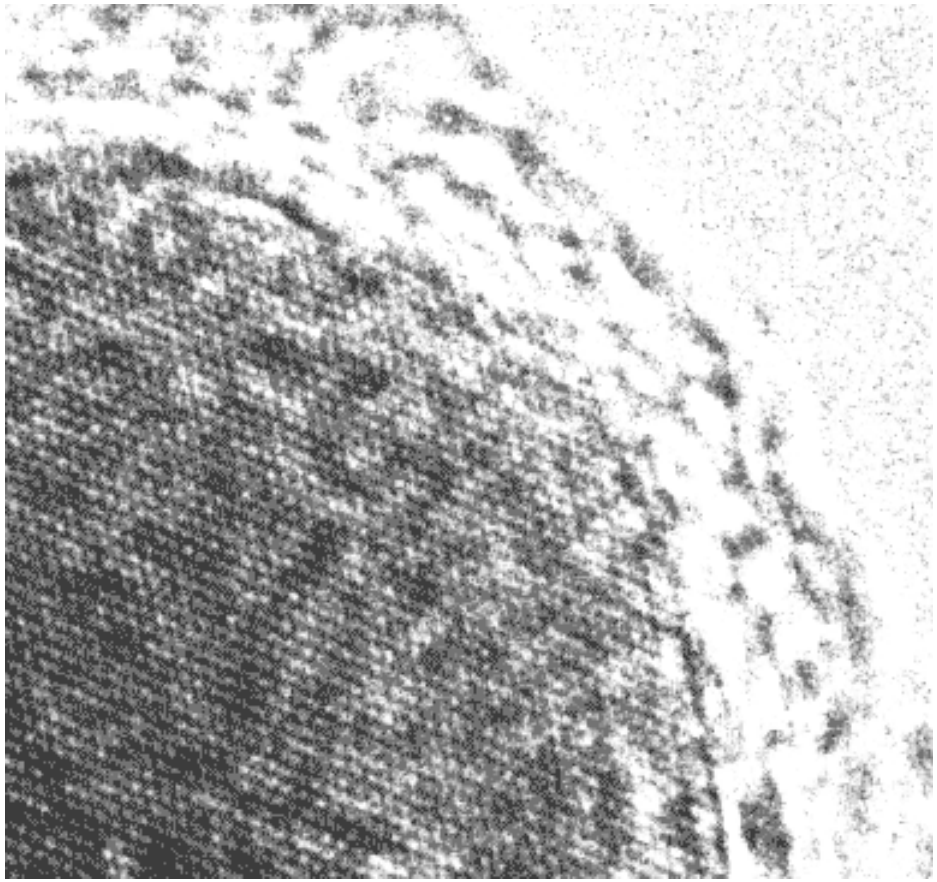
Résultats

- Particules
- Dépôt sur le SQUID
- Cycle d'hystérésis
- Courbe critique
- Particule de fer-cuivre
- Cobalt en 3D
- Ferrite de Baryum
- Mesures dynamiques
- Discussion

Particules

Ex : particule de Co enrobée de C.

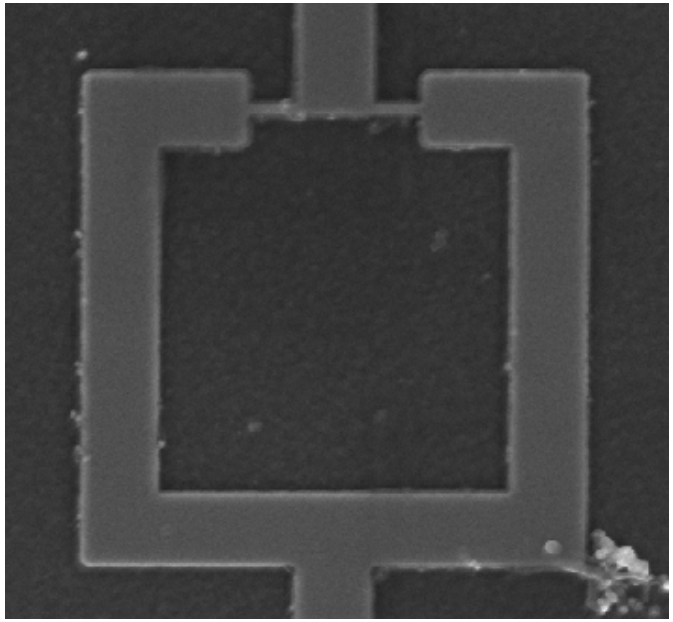


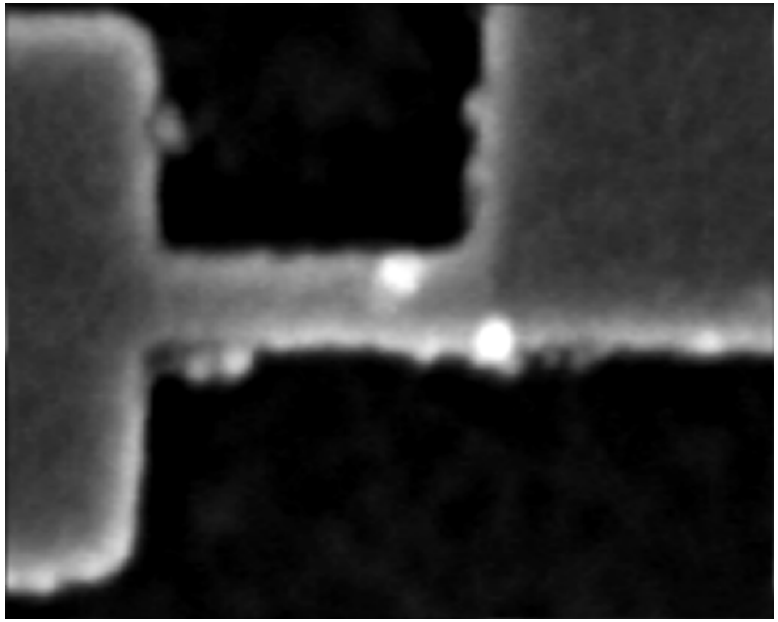


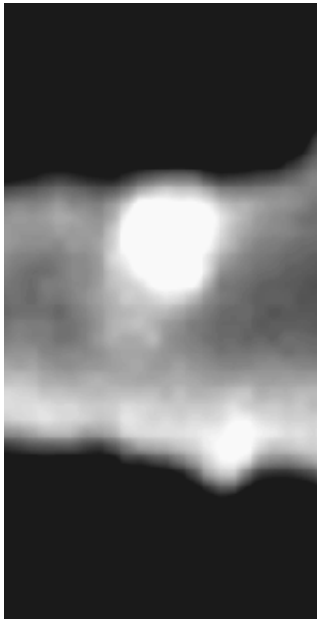
Dépôt sur le SQUID

Dépôt aléatoire

$\rightsquigarrow$ seules les particules sur le micro-pont sont détectées.



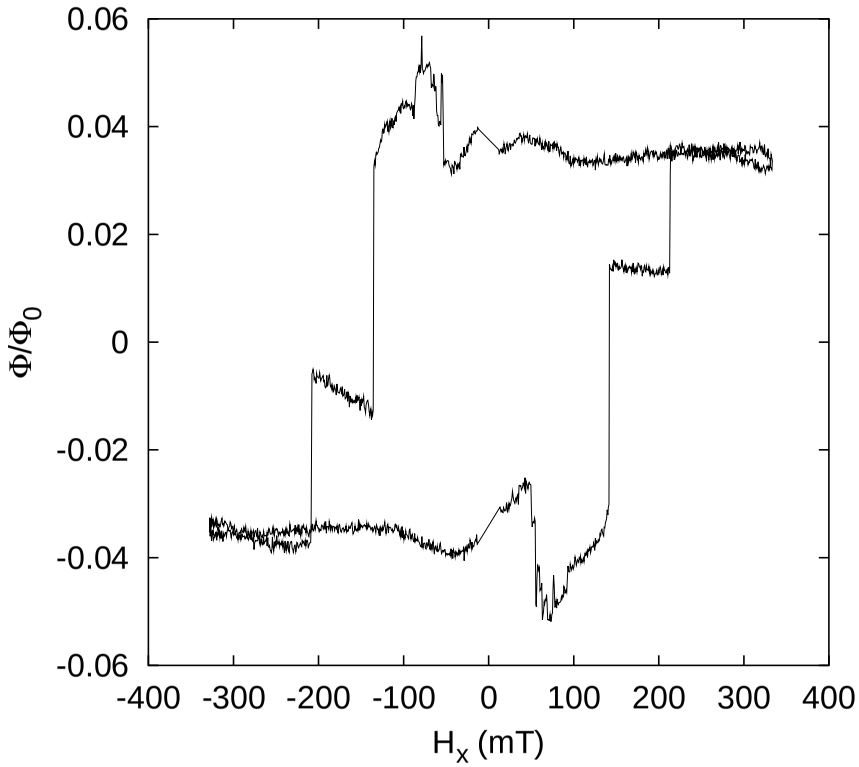




Cycle d'hystérésis

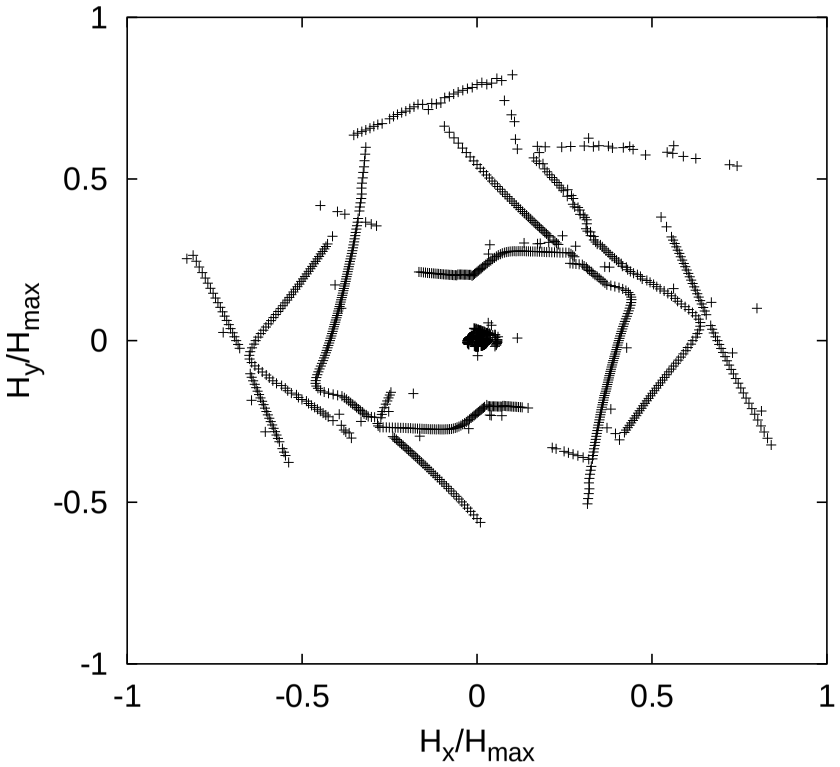
Deux sauts d'aimantation

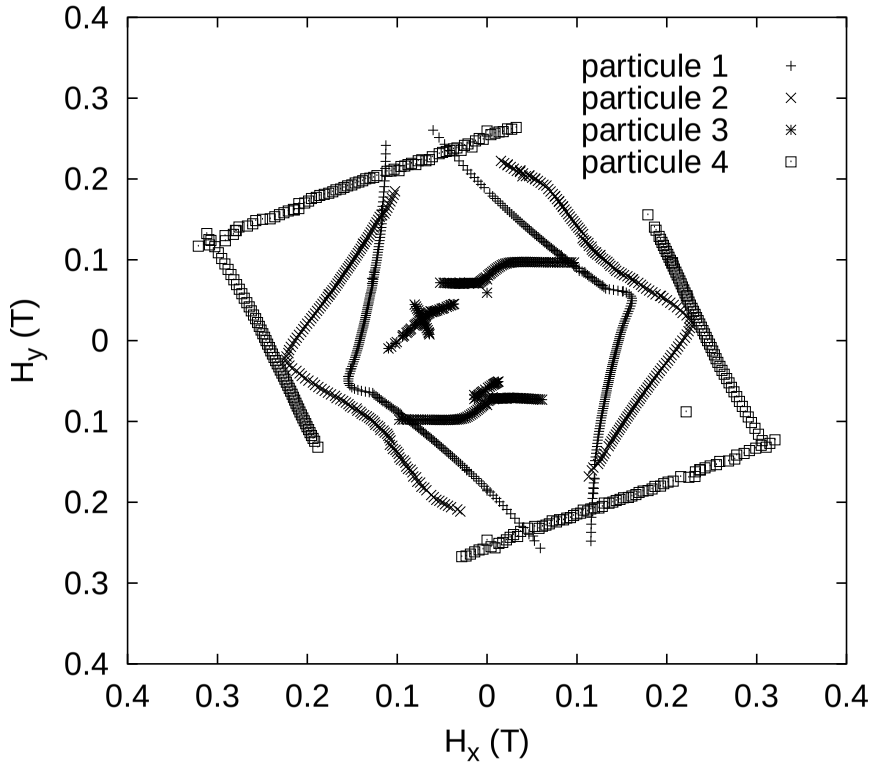
$\rightsquigarrow$ deux particules mesurées



Courbe critique

- Plusieurs particules mesurées simultanément en mode froid
- nécéssité de trier les points

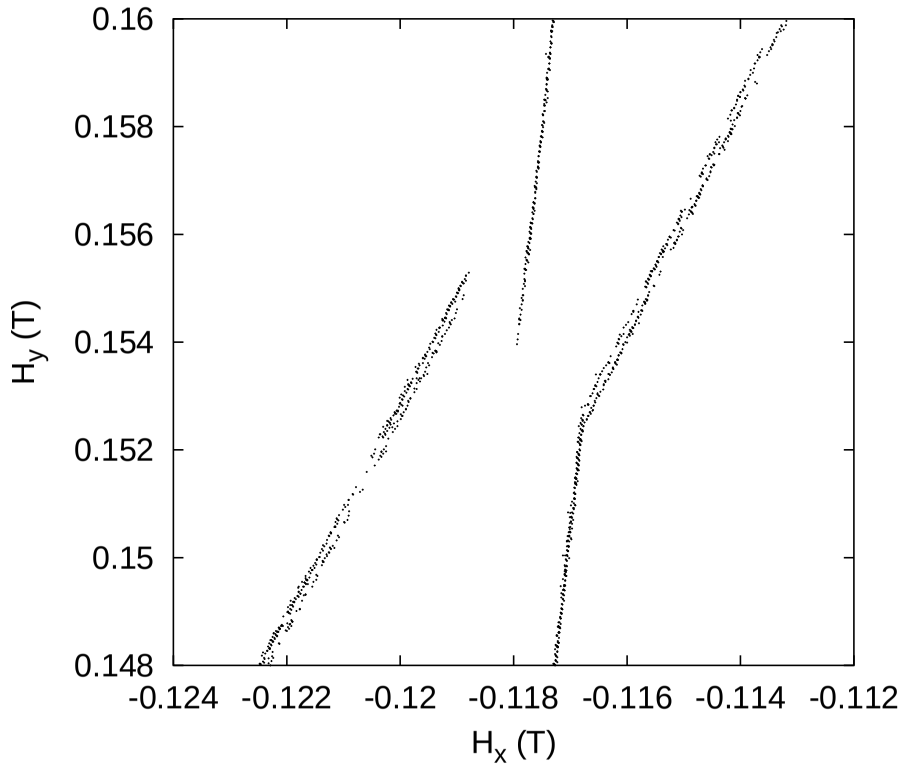




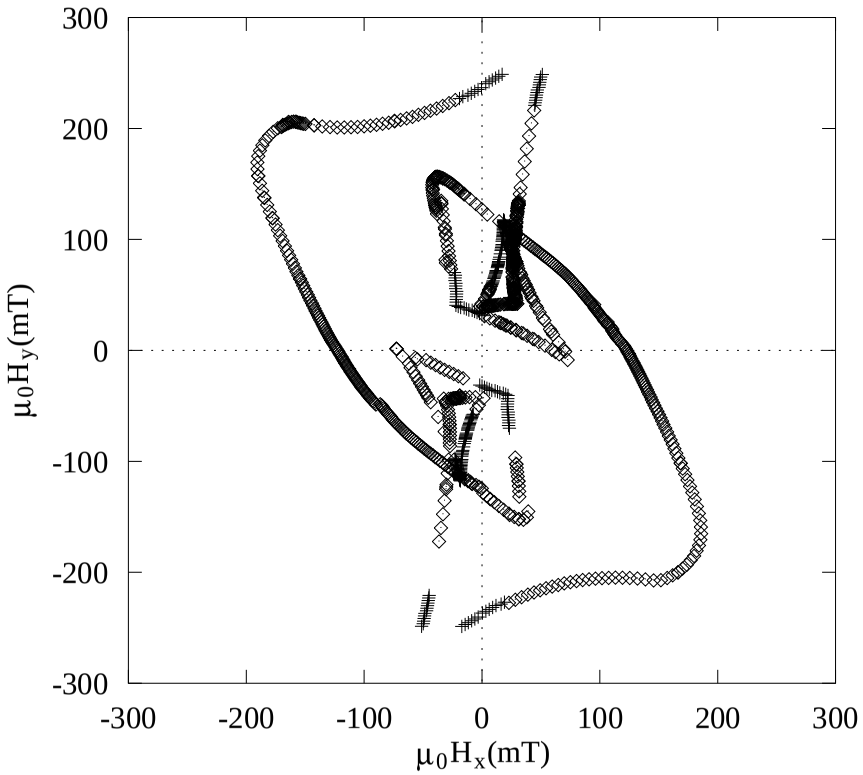
Intersection d'astroïdes

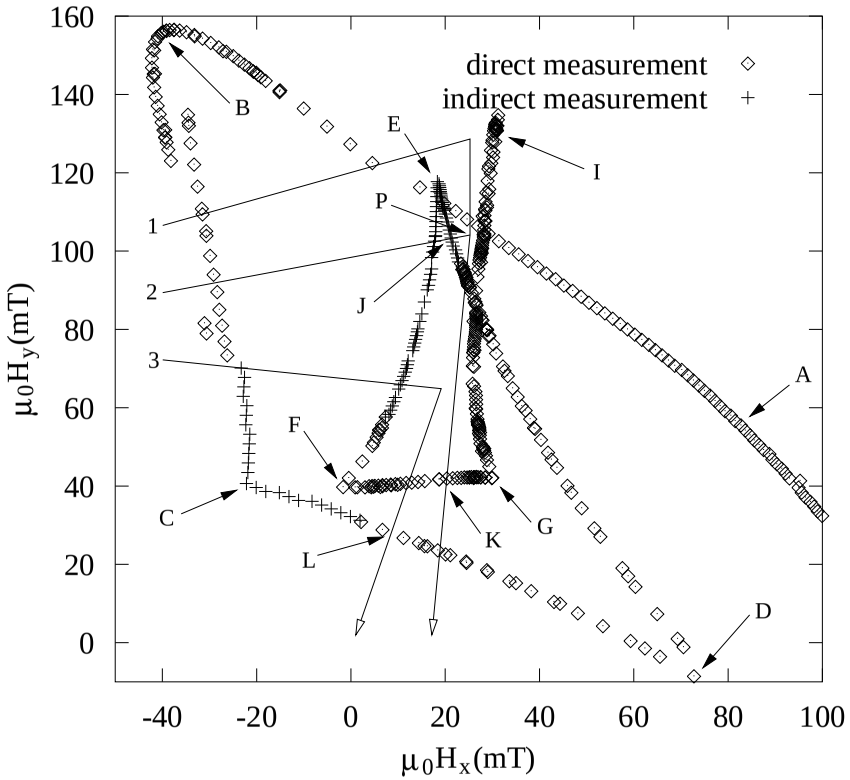
Le champ de retournement de chaque particule dépend de l'état de l'autre

$\rightsquigarrow$ estimation de l'intéraction entre particules



Particule de fer-cuivre

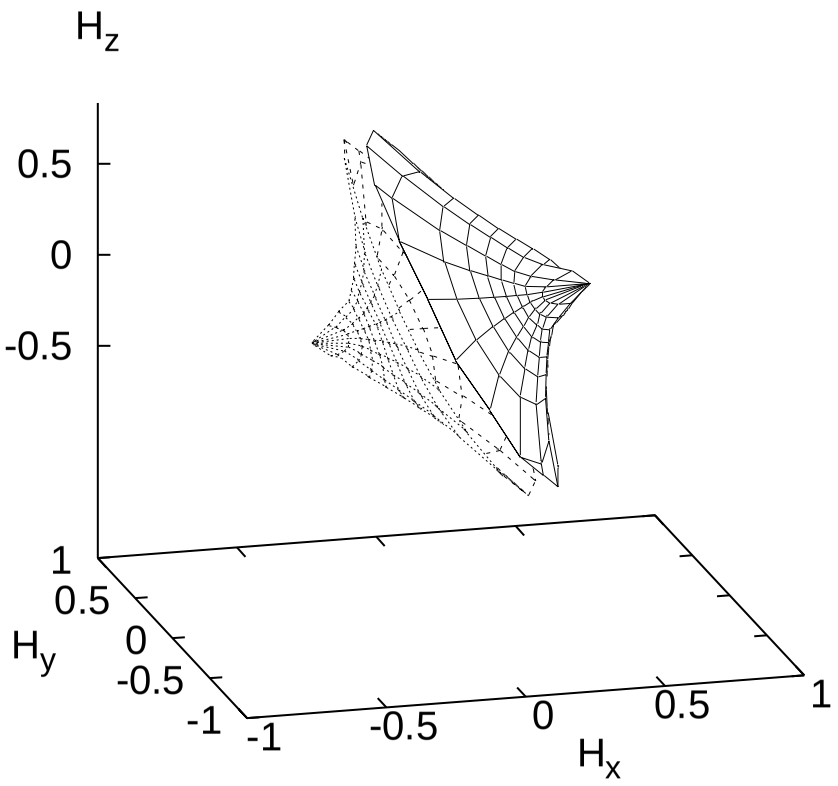




⇝ Nécessité de choisir les chemins du champ pour mesurer toute la courbe.

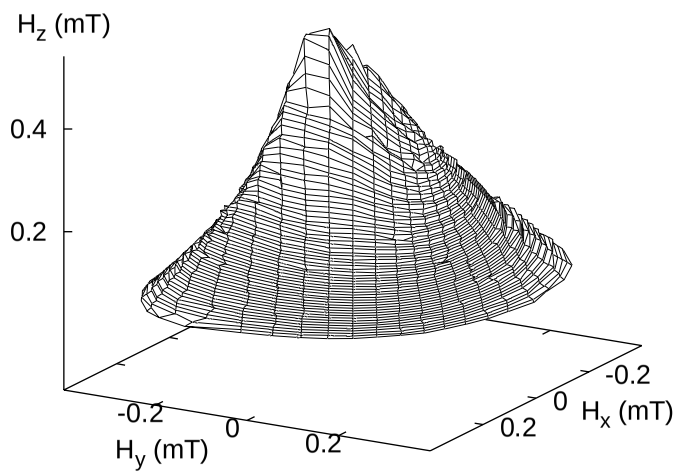
Cobalt en 3D

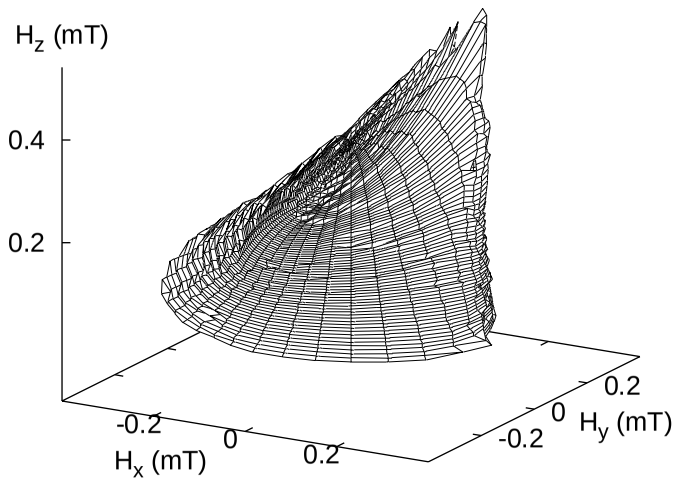
Particule du siècle :



Cobalt en 3D

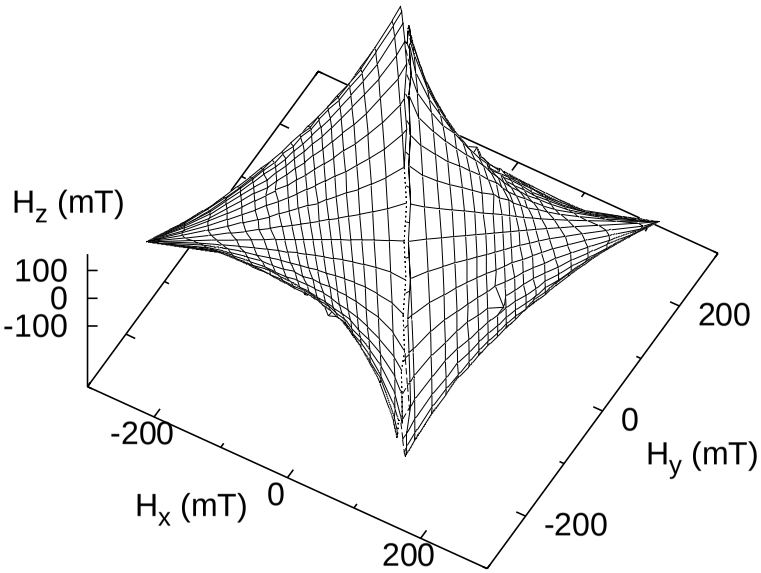
Taillefer :

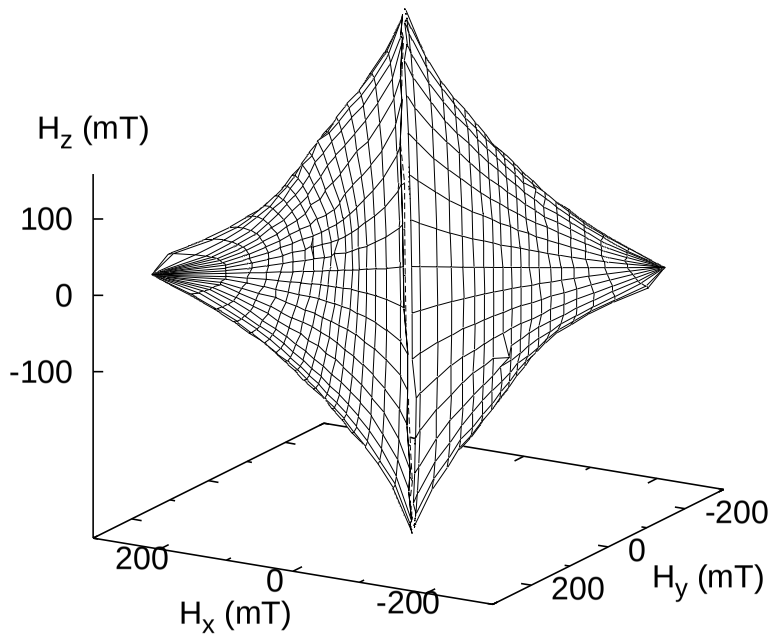




Ferrite de Baryum

$BaFe_{12-2x}Co_xTi_xO_{19}$ avec $x = 0,8$



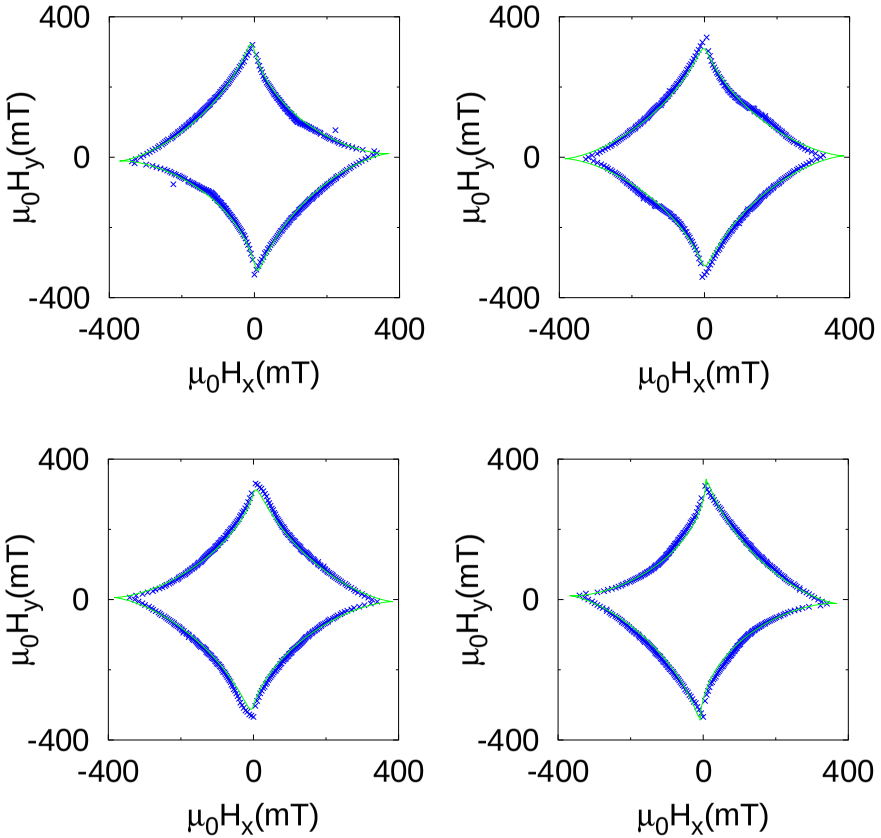


Ferrite de Baryum

Anisotropie ajustée :

$$\frac{2V_0(\mathbf{r})}{vM_s} = -Ar_z^2 + Br_y^2 + C(r_{x'}^2 + r_{y'}^2)^2 + D(r_{x'}^2 + r_{y'}^2)^3.$$

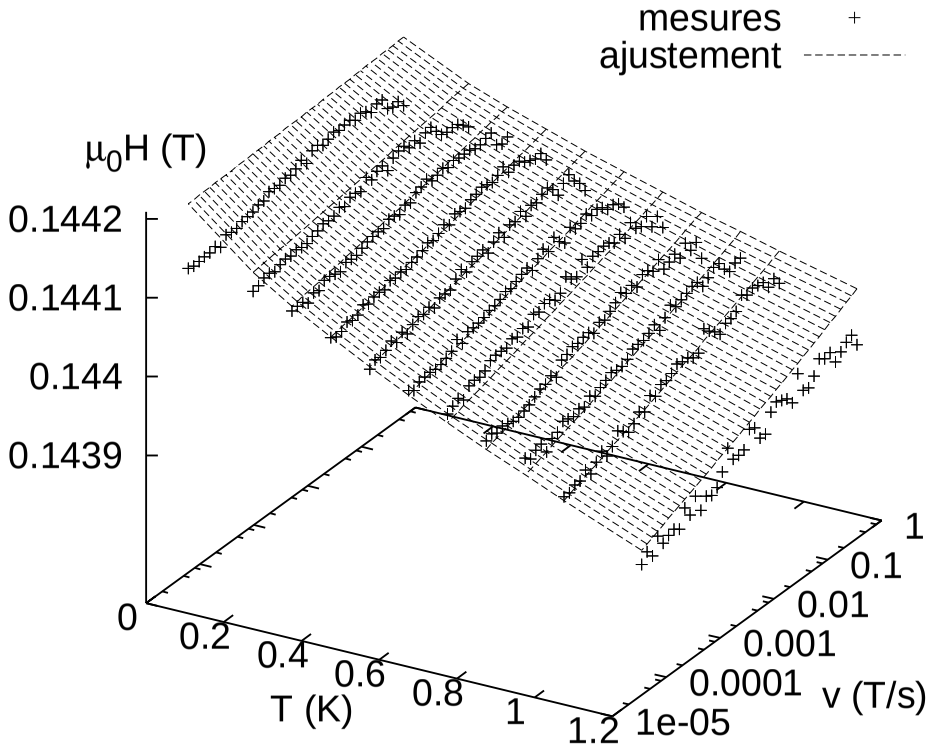
constante	valeur (mT)
A	347,2
B	3,5
C	29,5
D	-7,0



Mesures dynamiques

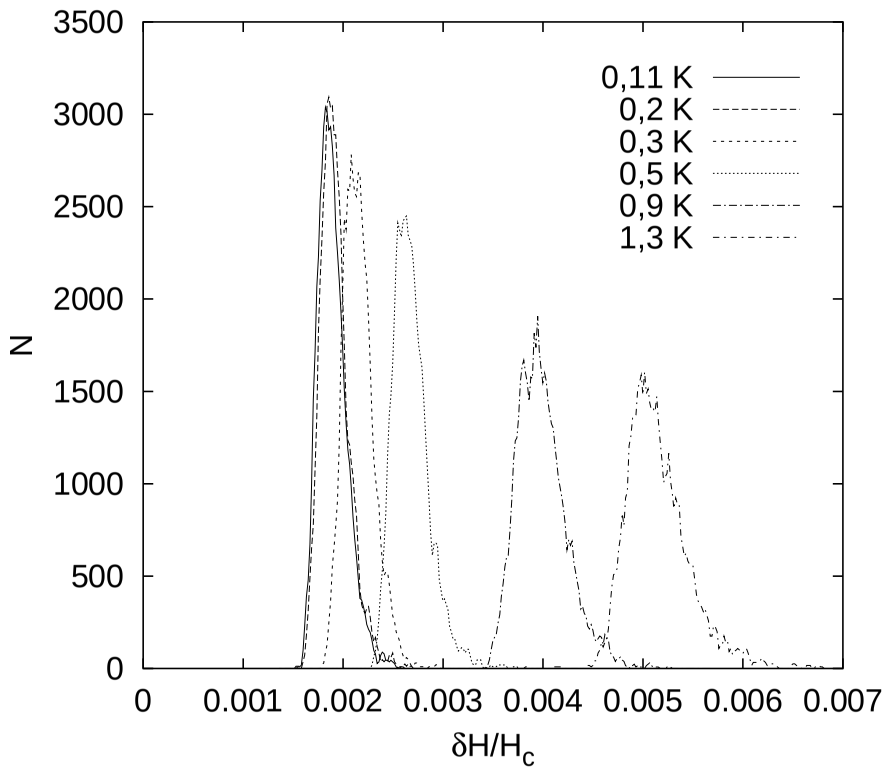
- Rampe de champ
- V et T variables

$\rightsquigarrow$ ajustement de E_0 et τ_0



Mesures dynamiques

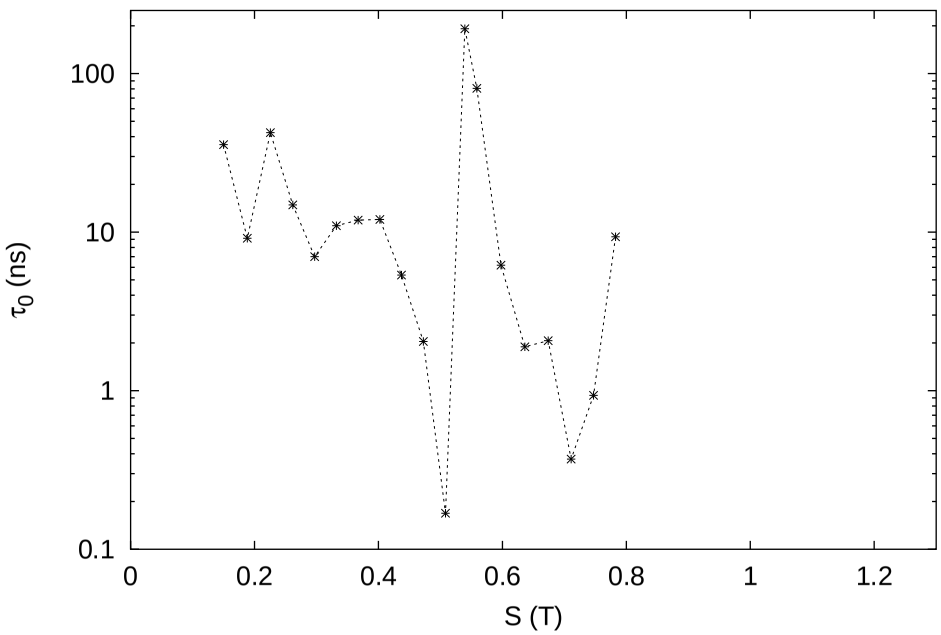
Forte variation de l'histogramme en fonction de T

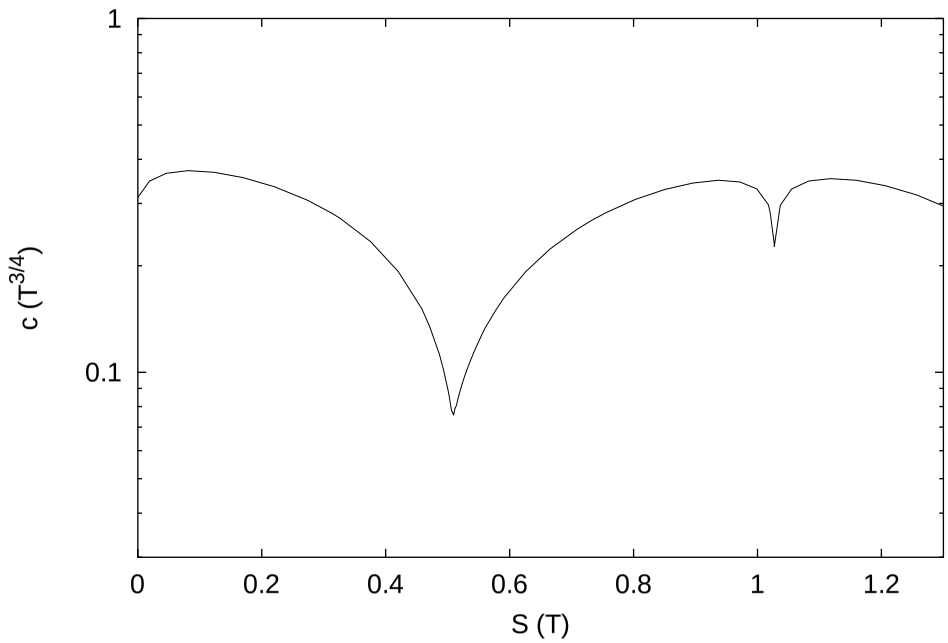


Le long de l'astroïde

Les courbures $c_i^{(j)}$ dépendent du point de la surface critique

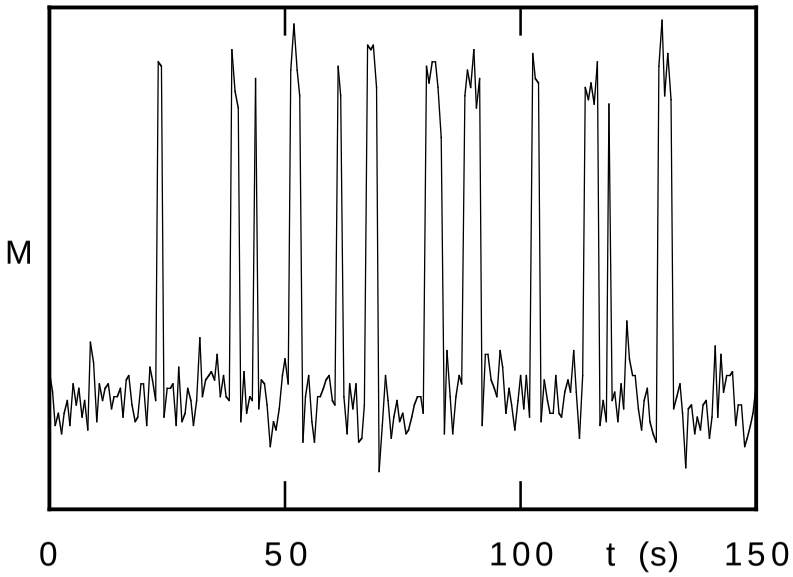
$\rightsquigarrow$ τ_0 aussi.

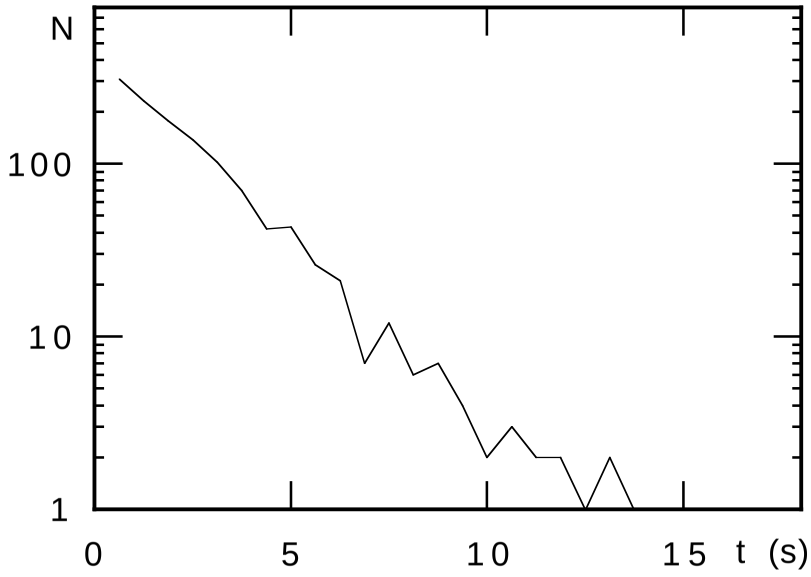




Bruit télégraphique

Près d'un point supercritique
transitions spontanées entre les deux sous-puits



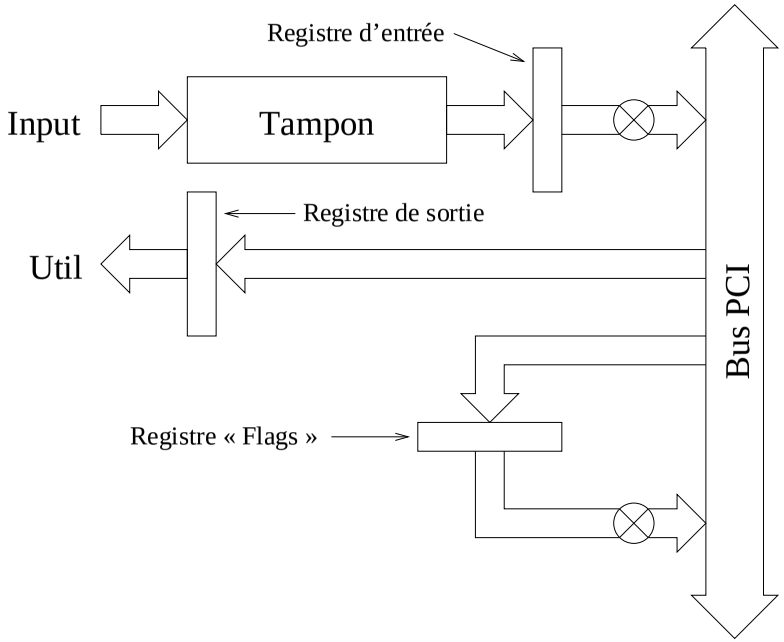
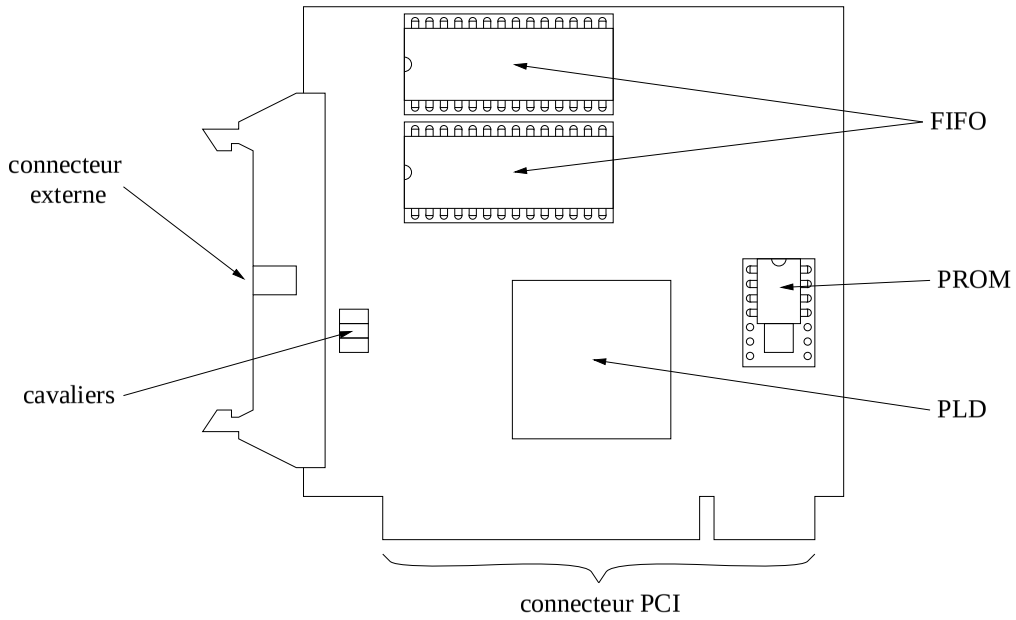


Discussion

- Interactions avec le milieu
  - ▷ courant dans le SQUID $\rightarrow$ décalage des astroïdes
  - ▷ anisotropie de surface $\rightarrow$ surtout à l'ordre deux ?
- Hypothèse de l'aimantation uniforme
  - ▷ jamais complètement uniforme
  - ▷ probablement inutile pour que la théorie s'applique
- Spins nucléaires et dissipation
  - ▷ fluctuations rapides traitées par Fokker-Planck
  - ▷ fluctuations lentes $\rightarrow$ barrière effective

Conclusion

- Retournement uniforme : modèle riche et bien adapté
  - ▷ prédictions surprenantes vérifiées
- Néel-Brown et Kurkijärvi : bonne description de l'activation thermique
  - ▷ écarts seulement à très basse température
- Technique du micro-SQUID : souple et puissante
  - ▷ très petits systèmes et en 3D.
- Le futur : encore plus petit !
  - ▷ agrégats de $\approx$ 3 nm dans le micro-pont

Carte d'acquisition

18 bits en entrée, 9 en sortie, débit → 1 MHz