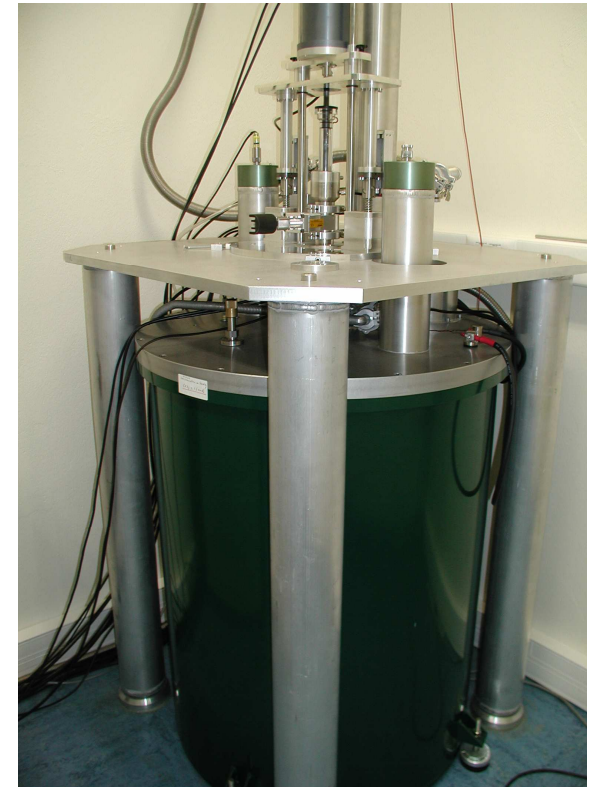


P.Bonville, SPEC, 13/03/2007

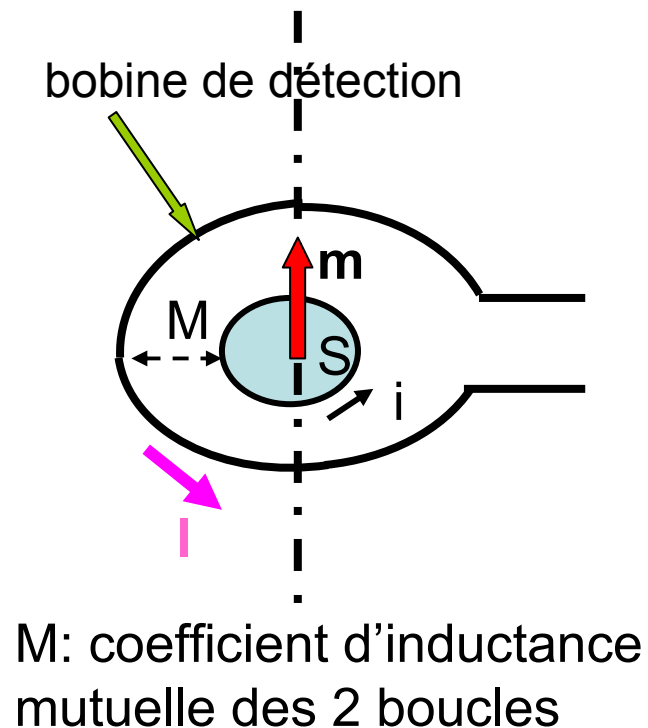
Quelques vues du magnétomètre VSM de Cryogenic... (SPEC-Saclay et LSCE-Gif)

Crédit photographique: NGR



Méthodes de flux pour mesurer un moment magnétique

échantillon avec moment magnétique $\mathbf{m} \cong$ boucle de courant: $\mathbf{m} = S \mathbf{i} \mathbf{n}$



Quel est le flux Φ_d du champ dipolaire créé par \mathbf{m} à travers la bobine de détection?

Méthode de l'inductance mutuelle:

$$\Phi_d = M i = M/S \mathbf{m}$$

Calcul du facteur géométrique M/S:

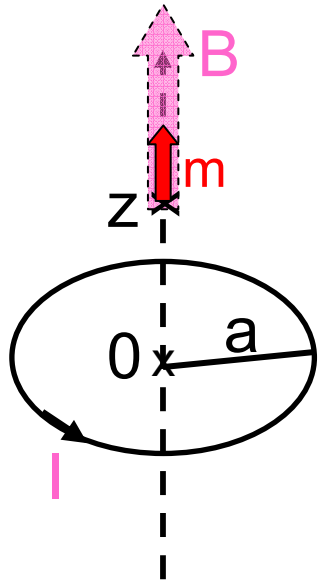
courant fictif I dans la bobine de détection

\Rightarrow flux $\Phi_i = M.I = B.S$ dans la boucle i , B étant le champ magnétique créé par I au centre de la boucle i

$\Rightarrow M/S = B/I$, et $\Phi_d = B/I \mathbf{m}$

B/I calculable par la loi de Biot et Savart ...

Loi de Biot et Savart: champ créé à une cote z au-dessus du plan de la spire

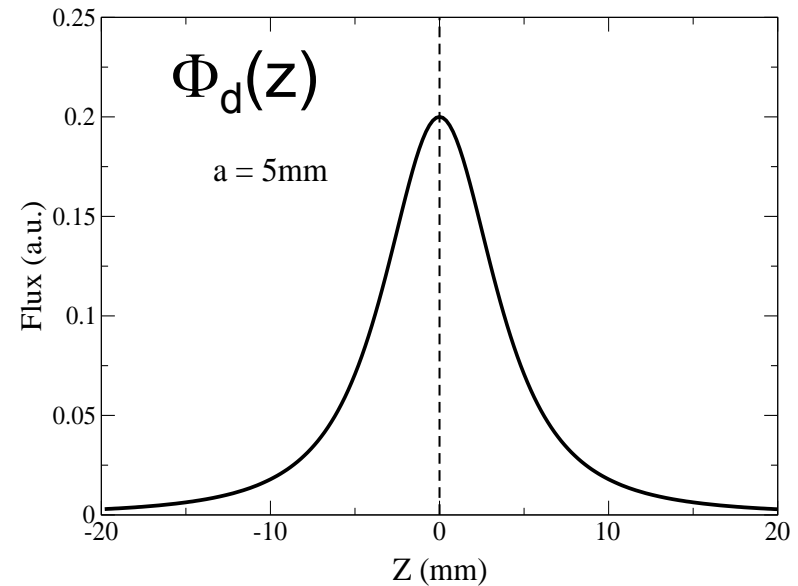


$$B(z) = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{a^2}{(a^2 + z^2)^{3/2}}$$

flux mesuré dans la bobine de détection en fonction de la position z de l'échantillon de moment m (supposé ponctuel):

$$\Phi_d(z) = \frac{B(z)}{I} m = \underbrace{\frac{\mu_0}{2} \frac{a^2}{(a^2 + z^2)^{3/2}}}_{G(z)} m$$

convention:
 $\Phi > 0$ si



Les différentes méthodes de flux

$$\Phi(z) = G(z) m$$

- soit on mesure directement le flux \rightarrow SQUID
- soit on utilise la loi de Lenz, et on mesure $V = - d\Phi/dt$;
pour cela, il faut faire varier soit **z**, soit **m** avec le temps t

mode VSM

(Vibrating Sample Magnetometer):

l'échantillon magnétique vibre $\rightarrow z(t)$
dans un champ magnétique
statique B qui induit **m**

$$V = - \frac{dG}{dz} m \frac{dz}{dt}$$

mode χ_{ac}

(susceptibilité alternative):

l'échantillon est immobile
et soumis à un champ magnétique
fluctuant **b(t)** qui induit **m(t)**

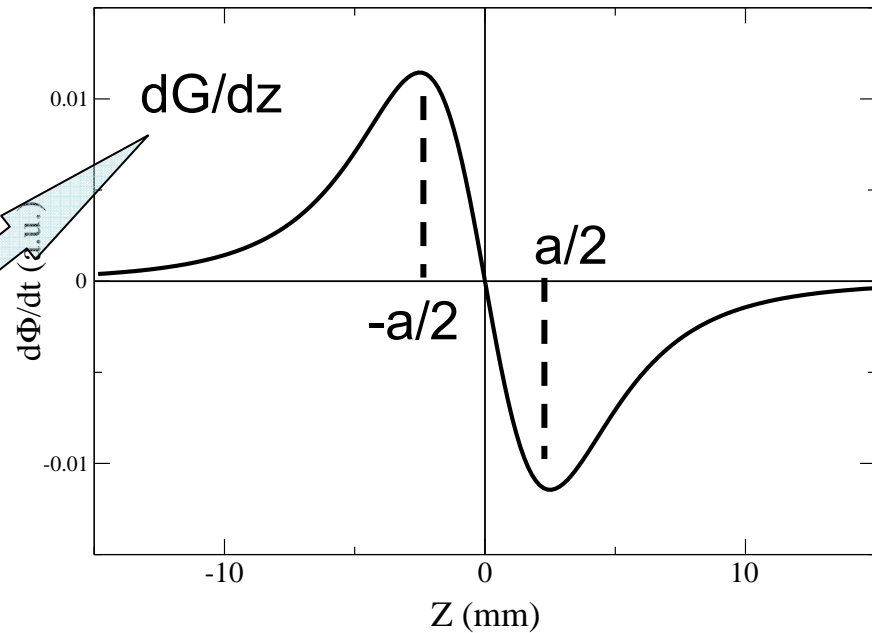
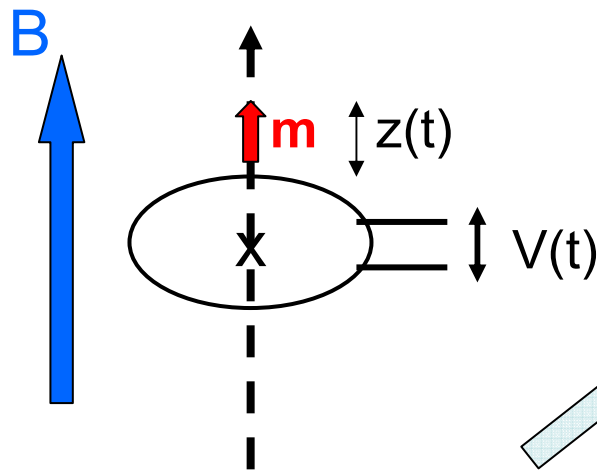
$$V = - G \frac{dm}{dt}$$

Principe du « Vibrating Sample Magnetometer »

$$V = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{dG}{dz} m \frac{dz}{dt}$$

avec une spire: l'échantillon m vibre autour d'une position d'équilibre Z .

$$z(t) = Z + z_0 e^{j\omega t} \Rightarrow \frac{dz}{dt} = j\omega z_0 e^{j\omega t}$$



$$\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{3\mu_0 a^2}{2} \frac{z}{(a^2 + z^2)^{5/2}} m \frac{dz}{dt}$$

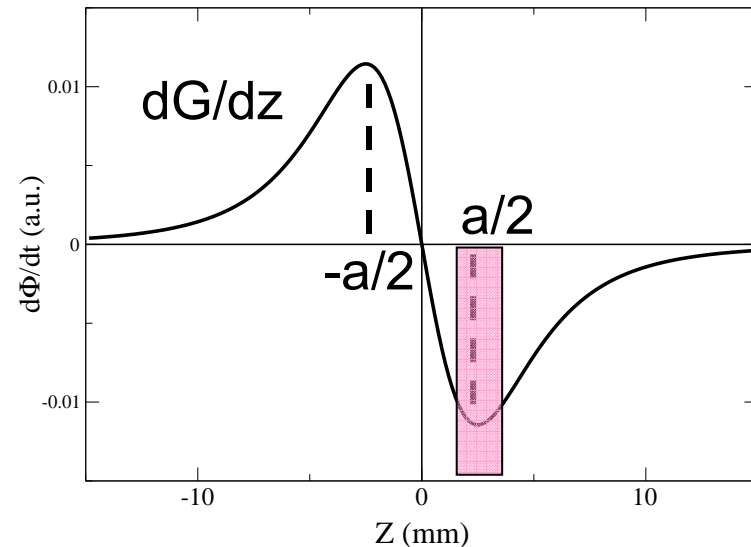
$$V(t) = -j\omega z_0 e^{j\omega t} \frac{dG(z)}{dz} m$$

Configuration « une spire » utilisable?

- $$V = -j \omega z_0 e^{j\omega t} \frac{dG(z)}{dz} m$$

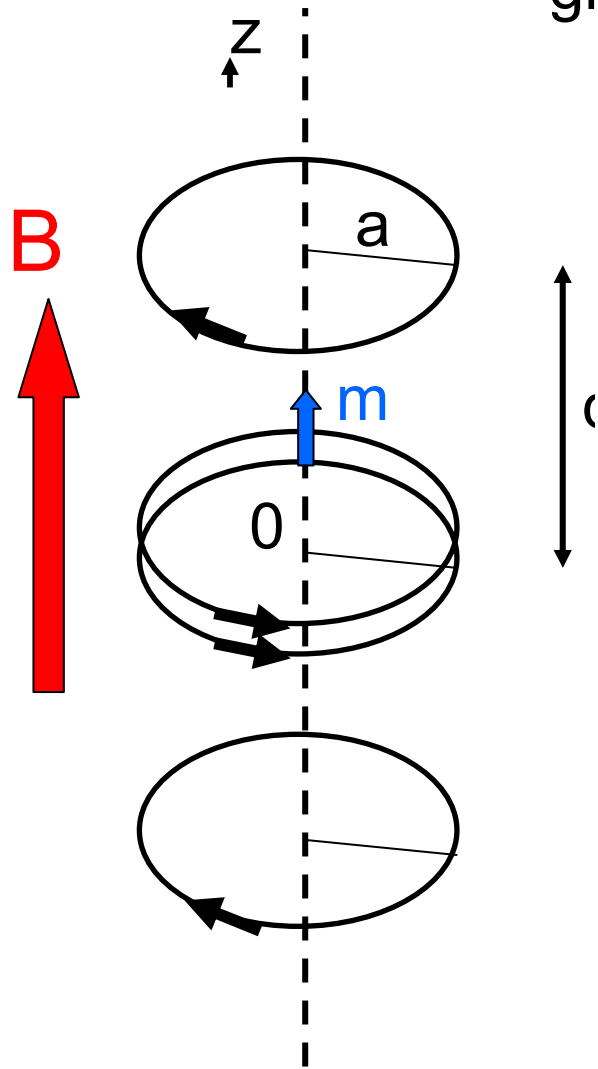
meilleure sensibilité au maximum de dG/dz , pour $z = a/2$ par exemple

- mais:
 - maximum trop « pointu »
⇒ le centrage doit être précis
 - une dérive lente du champ appliqué n'est pas annulée
- on utilise en fait des configurations multispires:
 - « gradiomètre du 1^{er} ordre »
à 2 spires (VSM)
 - « gradiomètre du 2^e ordre »
à 4 spires (SQUID)



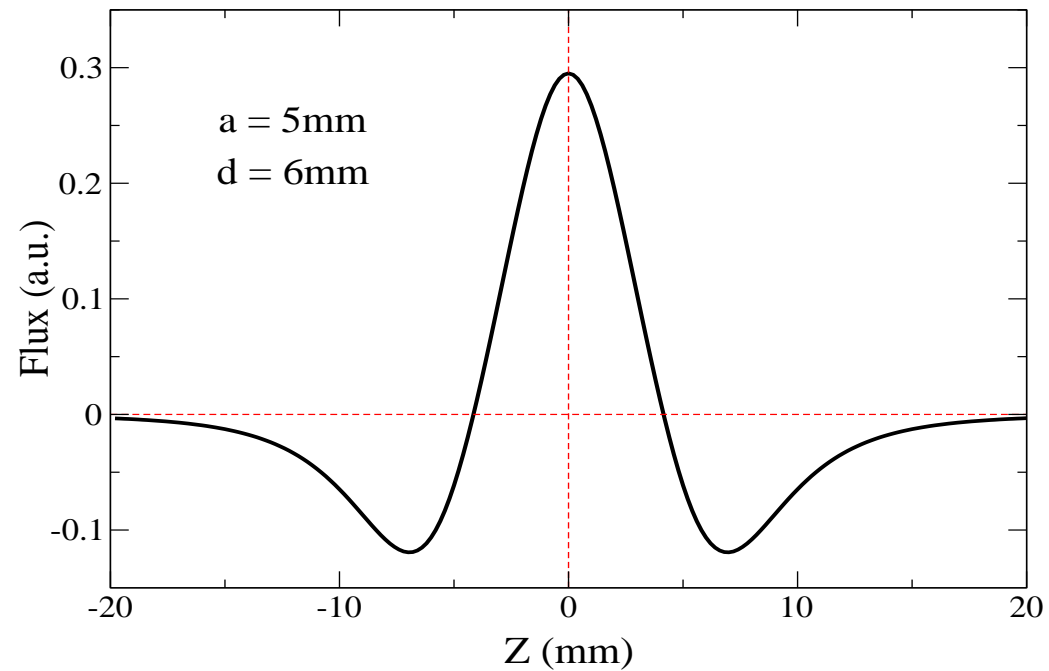
$$\frac{dG(z)}{dz} = -\frac{3\mu_0 a^2}{2} \frac{z}{[a^2 + z^2]^{5/2}}$$

Mesure directe du flux avec un SQUID: gradiomètre du 2^e ordre



$$\Phi_2(z) = -\Phi(z-d) + 2\Phi(z) - \Phi(z+d)$$

« profil d'arrachement » lorsque m est

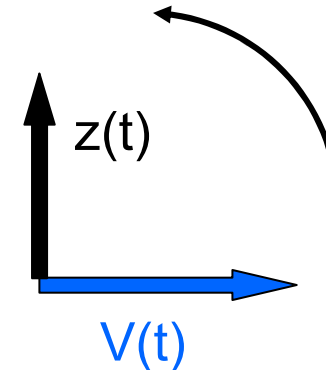


Remarques générales sur les méthodes vibratoires utilisant la loi de Lenz

- $V(t) = -j \omega z_0 e^{j\omega t} \frac{dG}{dz} m$

$V(t)$ est en quadrature p.r. à $z(t)$

si $dG/dz > 0$, quadrature retard ($\Delta\varphi = -\pi/2$)



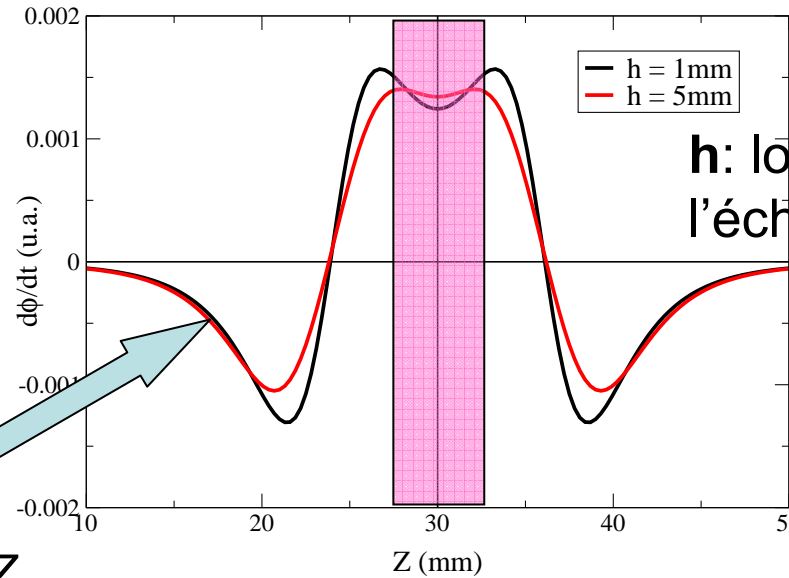
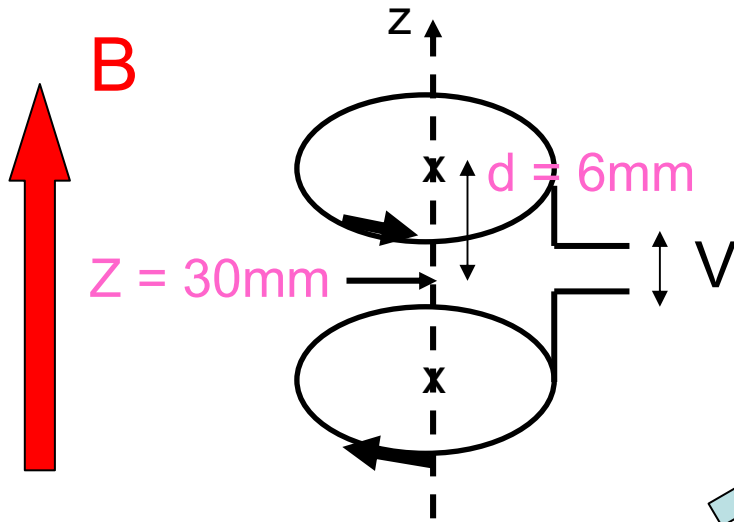
- $z(t) = Z + z_0 \sin\omega t$
 \Rightarrow en fait: $dG(z, t)/dz \rightarrow \frac{dG(z, t)}{dz} = -\frac{3\mu_0 a^2}{2} \frac{z(t)}{[a^2 + z(t)^2]^{5/2}}$

donc: lorsque l'échantillon vibre,

présence d'harmoniques dans $V(t)$ (faibles si $z_0 \ll Z$)

- pour ces expériences, il faut 2 « moteurs » distincts:
 l'un pour déplacer l'échantillon suivant OZ, l'autre pour le faire vibrer.
- le signal de mesure $V(t)$ est envoyé dans un ampli. de type « Lock-in »

Gradiomètre du 1er ordre: VSM « Cryogenic »



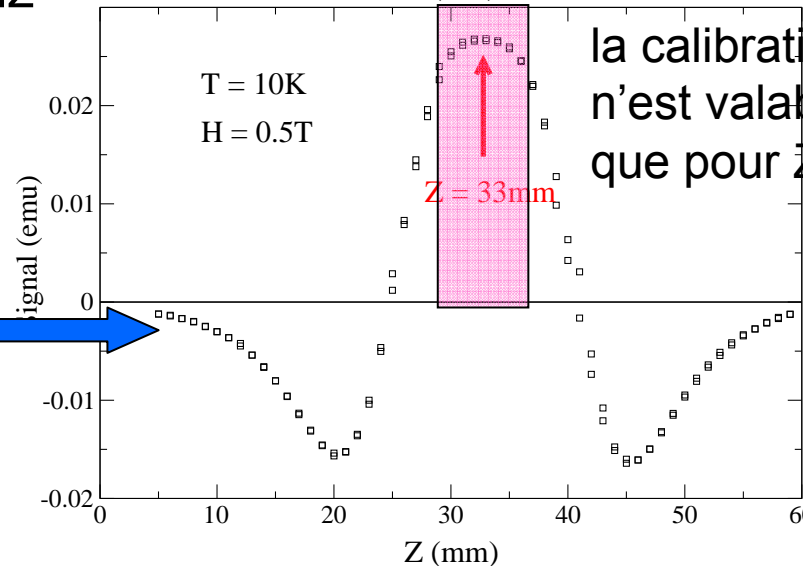
h: longueur de l'échantillon

$$dG/dz = d\{\Phi[z-(Z+d)] - \Phi[z-(Z-d)]\}/dz$$

Meilleure sensibilité
entre les 2 spires

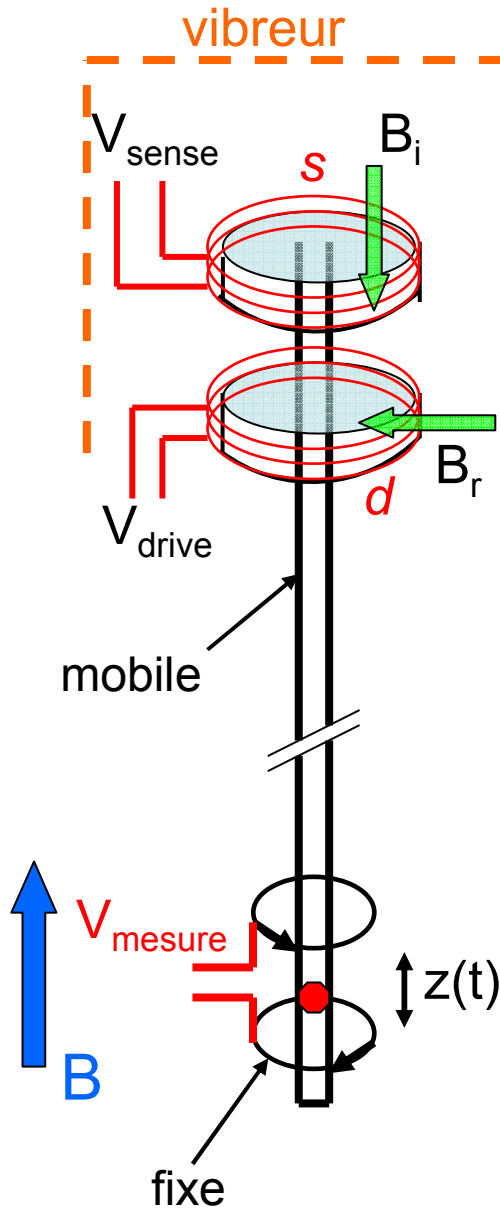
courbe de centrage mesurée
en mode «step», avec $h = 6\text{mm}$:
les 2 moteurs sont en marche

$$f = \omega/2\pi = 20 \text{ Hz}$$



la calibration $V \rightarrow \text{emu}$
n'est valable
que pour $Z \approx 33\text{mm}$

Fonctionnement en mode VSM (B statique)



- **tension motrice**

$$V_{drive}(t) = V_0 e^{j\omega t} \equiv \text{référence pour l'ampli Lock-in}$$

- **courant moteur:**

$$i_{drive}(t) = i_0 e^{j(\omega t - \varphi)}, \quad \text{tg} \varphi = L\omega/R$$

- **force motrice:** $F = B_r L_t i_{drive}$,

L_t longueur totale des spires d

- **mouvement:** $M \frac{d^2 z}{dt^2} = B_r L_t i_{drive}$

$$= -M\omega^2 z, \quad M \text{ masse totale}$$

$$\Rightarrow z(t) = \frac{B_r L_t}{(M\omega^2)} e^{j(\omega t - \varphi + \pi)},$$

en opposition de phase avec i_{drive}

- **tension lecture** $V_{sense} = -d\Phi/dt$,

Φ flux de B_i à travers les spires s

$$\Phi = \text{cste} + B_i S n z(t)$$

$$\Rightarrow d\Phi/dt = B_i S n z_0 \omega e^{j(\omega t - \varphi + \pi + \pi/2)}$$

$$V_{sense} = V_1 e^{j(\omega t - \varphi + \pi/2)},$$

en quadrature avance p.r. i_{drive}

- $V_{mesure} = \omega \frac{dG}{dz} m z(t) e^{-j\pi/2}$

en phase avec V_{sense}

\Rightarrow **phase de V_{sense}
verrouillage pour
ampli Lock-in**

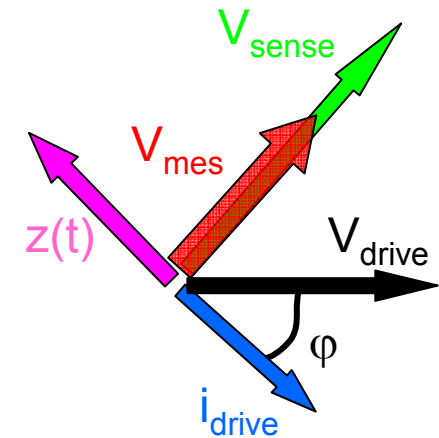
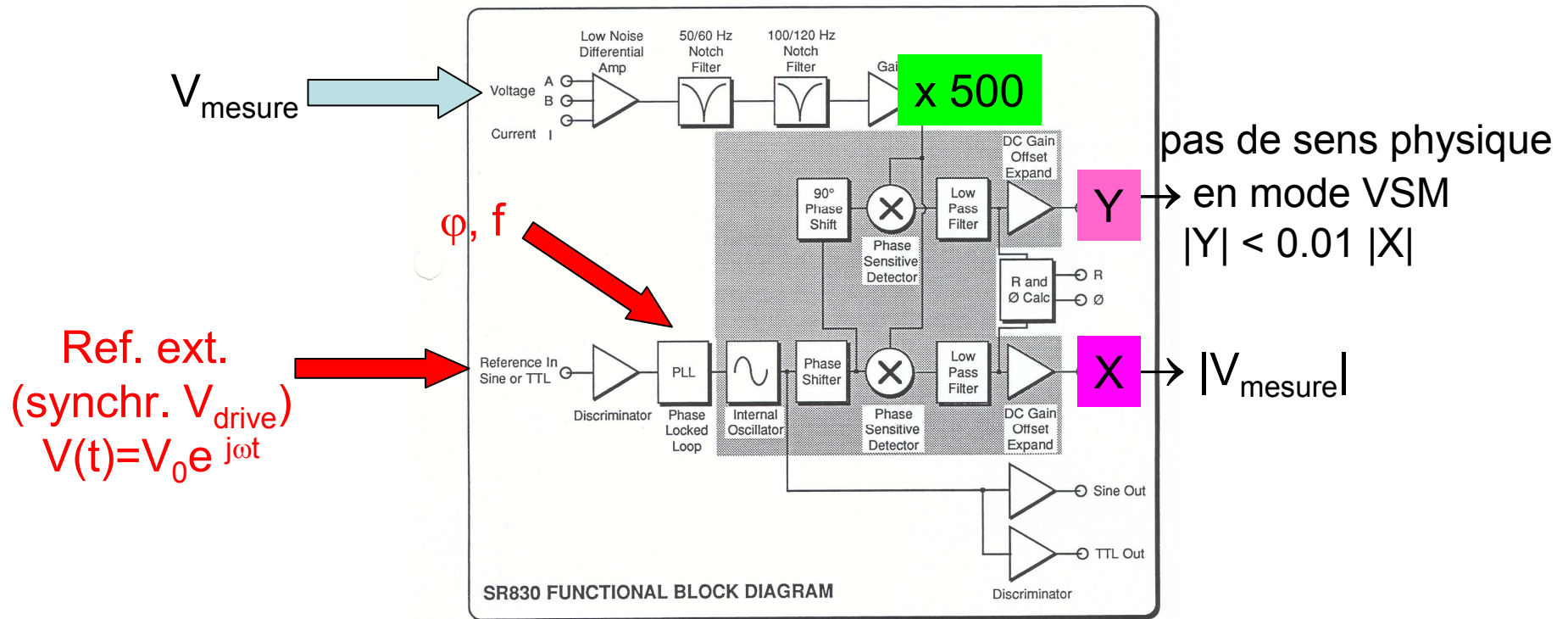


diagramme de Fresnel

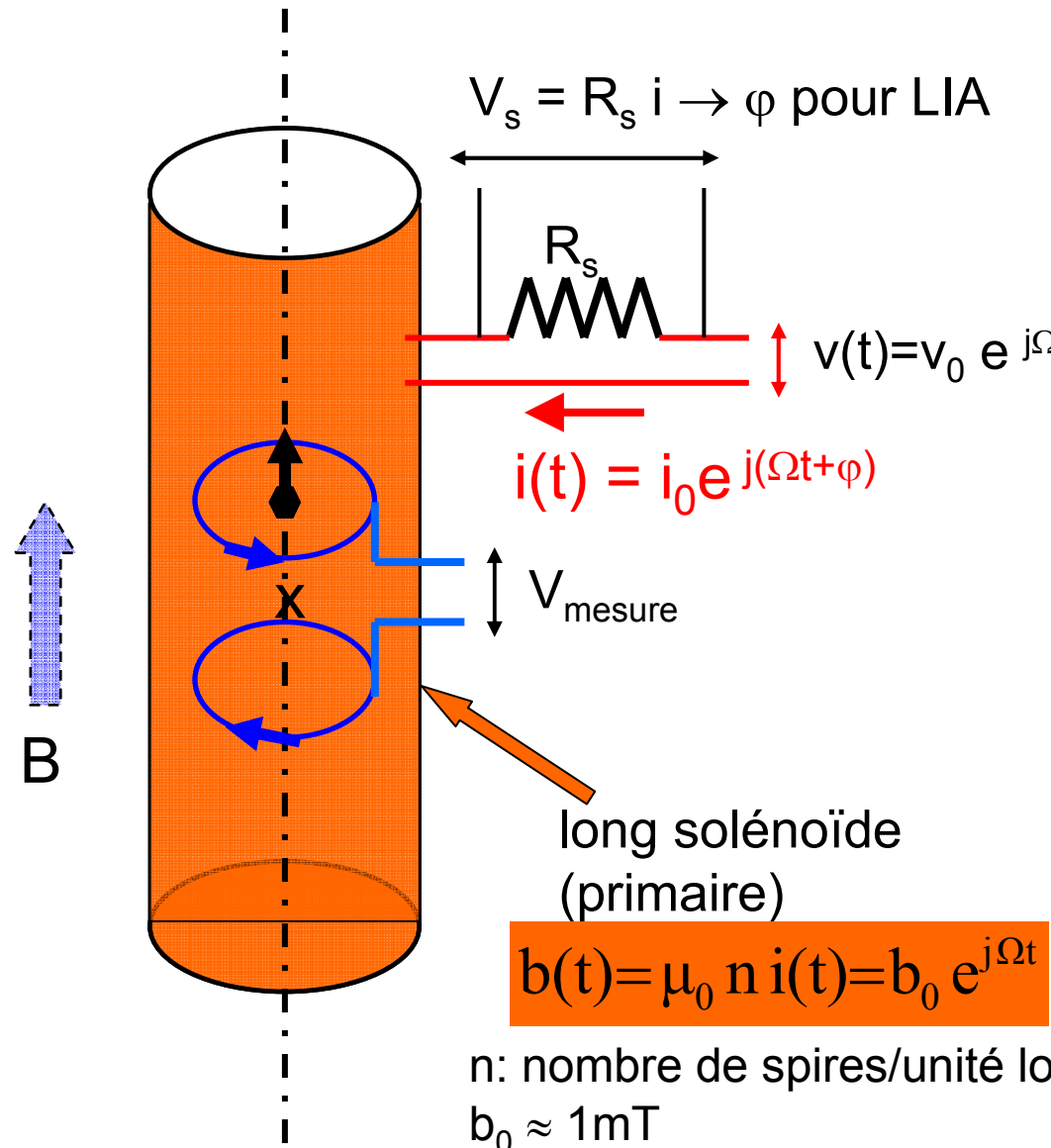
L'amplificateur Lock-in (LIA)

ou ampli à verrouillage de phase et/ou de fréquence

- Inputs : 1) $V_{\text{mesure}}(t)$, sensibilité jusqu'à $0.1\text{nV} \rightarrow 10^{-4}$ emu
2) **signal de référence (synchrone avec V_{drive} , par software)**
3) **phase φ de V_{sense} (par software)**
fréquence f de vibration (par software)
- Outputs: en X, $|V_{\text{mes.}}|$ de fréquence $f = \omega/2\pi = 20\text{Hz}$



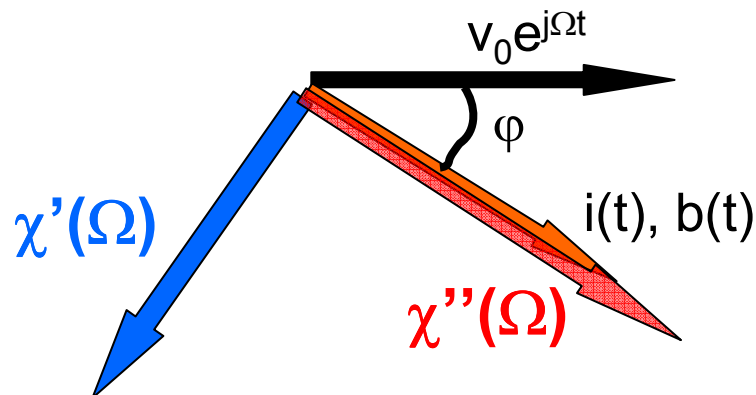
Fonctionnement en mode susceptibilité alternative χ_{ac}



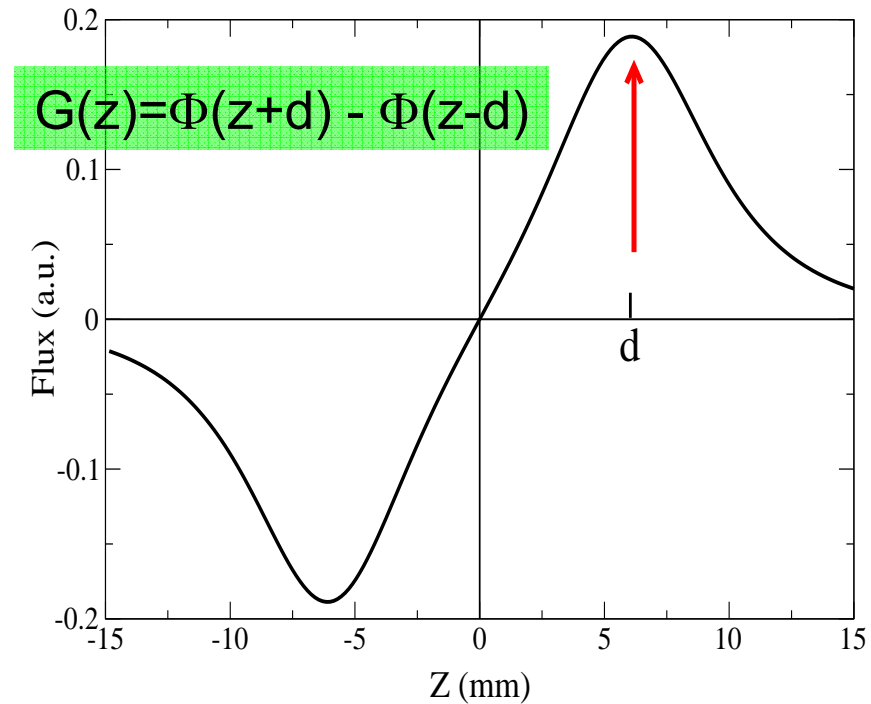
- échantillon immobile
- champ B statique optionnel
- champ $b(t)$ alternatif créé dans le grand solénoïde par $v(t)$ envoyé par software, référence pour le Lock-in
 $\Rightarrow m(t) = \chi b(t)$
- $V_{\text{mesure}} = -d\Phi/dt = -G(z) dm/dt$
- la phase de verrouillage pour le Lock-in est celle de $b(t)$ ou $i(t)$, mesurée avec $V_s(t)$

Diagramme de Fresnel en mode χ_{ac}

- $V_{mes}(t) = -G(z) dm/dt$
- meilleure sensibilité:
 $z = d$ (centre d'une spire)
- $m(t) = \chi(\Omega) b(t)$
 $\chi = \chi' + j\chi''$: susc. complexe
- $V_{mes}(t) = -j\Omega b_0 G(z) (\chi' + j\chi'') e^{j(\Omega t - \varphi)}$
 $= \Omega b_0 G(z) (\chi' + j\chi'') e^{j(\Omega t + 3\pi/2 - \varphi)}$



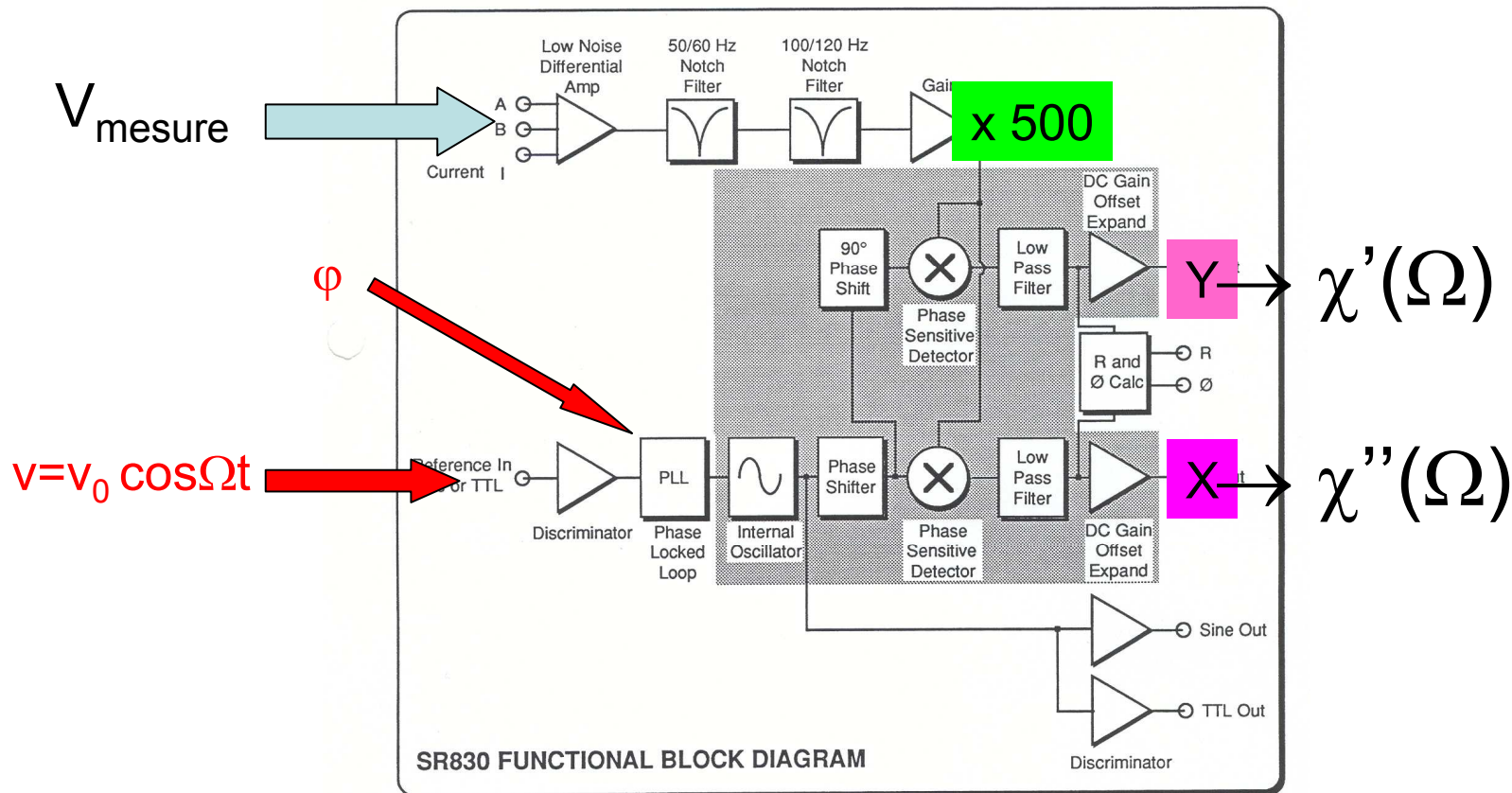
La composante de V_{mes} en phase
(resp. à 90°) avec $b(t)$ donne χ'' (resp. χ')



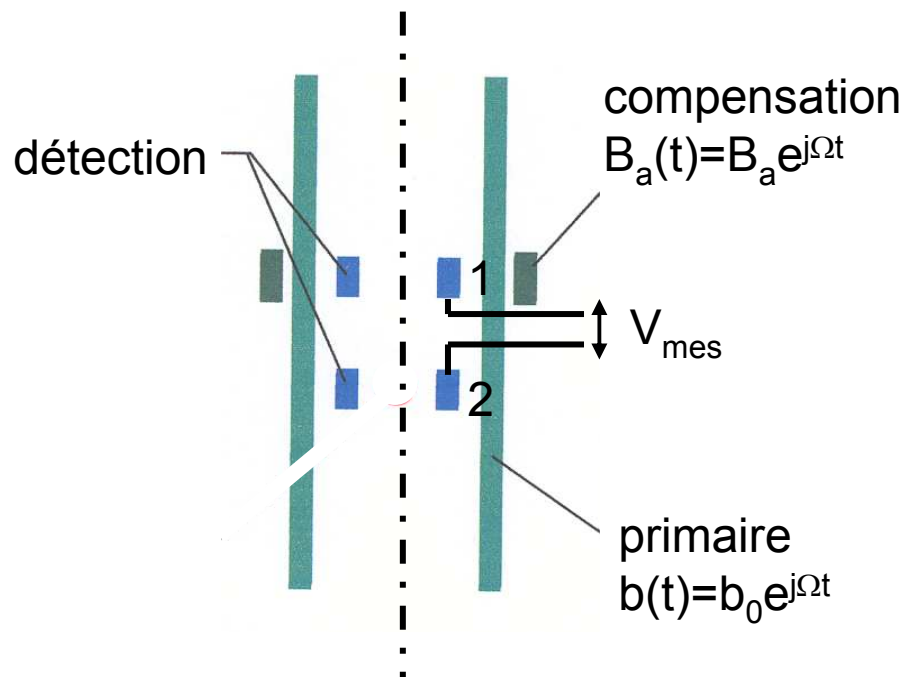
$\text{Re}(V_{mes}) = \Omega b_0 G(d)$
 $\times [\chi'' \cos(\Omega t - \varphi) + \chi' \sin(\Omega t - \varphi)]$:
mélange de composantes \rightarrow LIA

Ampli Lock-in en mode « Ref. externe »

- Inputs: 1) $V_{\text{mesure}}(t)$
2) phase φ de V_s (par software)
3) tension à fréq. $F = \Omega/2\pi$ (de qq Hz à 10^4 Hz, par software)
- Outputs: en X: $\chi''(\Omega)$ et en Y: $\chi'(\Omega)$



Compensation en mode χ_{ac}



à vide: $\Phi_1 \neq \Phi_2$
(p.ex. $S_2 = S_1 + \Delta S$):
 $\Phi_d(t) = b_0 \Delta S e^{j\Omega t}$

⇒ bobine de compensation
au niveau de la boucle 1

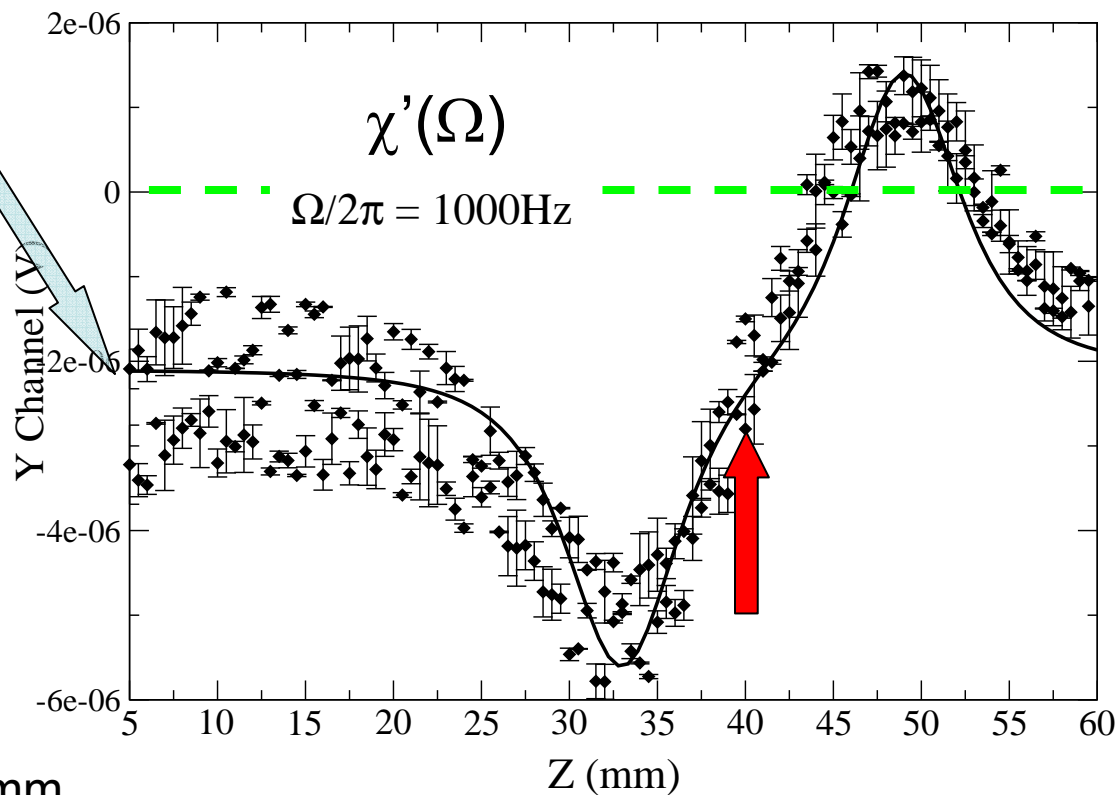
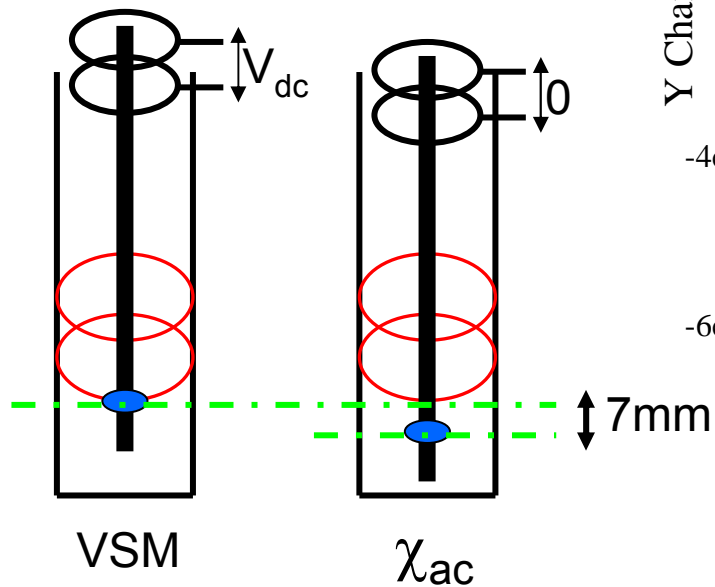
en l'absence d'échantillon,
on ajuste $B_a \rightarrow V_{mes} = 0$
 $B_a = \Delta S / S b_0$

La compensation est nécessaire pour ne pas avoir de signal de fond continu superposé à celui de l'échantillon (en général faible)

Courbe de centrage à 1000Hz en mode χ_{ac} (essais)

échelle

- 1) présence d'un décalage du signal p.r. à 0: **mauvaise compensation**
- 2) centre décalé (de 33mm à 40mm): **normal**



Procédure pour la mesure

- 1) faire une courbe de centrage pour chaque type d'échantillon
- 2) placer le système à la position Z de sensibilité optimale
- 3) en mode χ_{ac} , compensation du signal à vide des 2 bobines
- 4) faire varier le champ magnétique (0 à 14T)
la température (1.8 à 320K)
la fréquence (en mode χ_{ac}) (qqHz à 10kHz)

