



HAL
open science

Réalisation d'un magnétomètre et d'un mesureur de gradient de champ magnétique

Maurice Spighel

► **To cite this version:**

Maurice Spighel. Réalisation d'un magnétomètre et d'un mesureur de gradient de champ magnétique. *J. Phys. Phys. Appl.*, 1957, 18 (S7), pp.108-111. 10.1051/jphysap:01957001807010800 . jpa-00212682

HAL Id: jpa-00212682

<https://hal.science/jpa-00212682>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

RÉALISATION D'UN MAGNÉTOMÈTRE ET D'UN MESUREUR DE GRADIENT DE CHAMP MAGNÉTIQUE

Par MAURICE SPIGHEL,

Laboratoire de Synthèse Atomique à Ivry.

I. Principe de l'appareil. — A)

a) Une bobine est animée d'un mouvement rotatif, oscillant sinusoidalement dans le temps, autour d'un axe confondu avec un diamètre de la spire centrale : il est induit aux bornes de la bobine une tension proportionnelle à la grandeur de la composante du champ magnétique, perpendiculaire à l'axe et parallèle au plan moyen dans le temps de la spire centrale. Si e est cette tension, H cette compo-

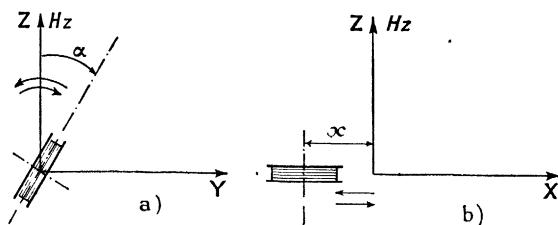


FIG. 1.

sante, S la surface totale des spires de la bobine, ν la fréquence, α_0 l'angle petit de la demi-oscillation (fig. 1 a) :

$$e = 10^{-8} \cdot H \cdot S \cdot \alpha_0 \cdot 2\pi \nu \cos(2\pi \nu t) \\ \text{si } \alpha = \alpha_0 \sin(2\pi \nu t). \quad (1)$$

b) Cette formule néglige les harmoniques : cela est justifié par la méthode de mesure portant uniquement sur la fréquence ν . Cette formule n'est valable qu'en supposant le champ identique dans tout le volume de la bobine.

B)

a) Le mouvement linéaire et alternatif d'une bobine dont chaque spire glisse sur son propre plan, induit aux bornes de la bobine une tension proportionnelle à la grandeur du gradient de la composante du champ magnétique perpendiculaire au plan de glissement, gradient pris dans la direction du mouvement (fig. 1 b)

$$e = 10^{-8} \cdot S \cdot (\partial H / \partial x_0) \cdot x_0 \cdot 2\pi \nu \cos(2\pi \nu t) \\ \text{si } x = x_0 \sin(2\pi \nu t) \quad (2)$$

x_0 est la grandeur du demi déplacement.

b) Les mêmes remarques qu'en A) b) sont valables.

II. Avantage de ce procédé. — A)

Par rapport à une bobine tournante, nous évitons l'opération de collectage avec l'imprécision, la limite de sensibilité, les ennuis d'usure et d'encrassement des balais et collecteurs qu'elle comporte, le bruit de fond inévitable, surtout si l'on travaille avec de petites bobines donnant une tension de quelques microvolts.

B) Ce procédé permet la détermination de la direction du champ par une recherche de maximum.

C) Dans la mesure du champ avec des bobines de dimensions finies, grâce aux caractéristiques des bobines, il est possible d'annuler l'influence des dérivées du champ jusqu'à $\partial^3 H / \partial x^3$ inclus et de négliger les dérivées d'ordre supérieur. On se rapproche des conditions idéales de mesure du champ en un point.

D) Le fait de mesurer H et $\partial H / \partial x$ permet d'établir la topographie du champ avec plus de précision que si l'on ne mesurait que H . La mesure directe de $\partial H / \partial x$, utile en optique électronique évite la différenciation approximative de la fonction expérimentale $H(x)$.

E) Dans un champ trouvé homogène à la précision de mesure de H , seule la mesure directe de $\partial H / \partial x$ permet de trouver le degré d'inhomogénéité.

Remarque. — Le mouvement oscillant et alternatif introduit des vibrations dans l'appareil et dans la sonde. Seul le soin apporté à la réalisation mécanique de l'appareil permet de réduire ces vibrations en bout de sonde à moins de 5/100 mm. Les vibrations propres de la verge tenant la bobine, induites par le mouvement alternatif, ne seraient surtout gênantes que si elles se produisaient à la fréquence ν .

III. Méthode de mesure. —

On utilise une méthode de zéro : l'indicateur de zéro est un galvanomètre à résonance très sélectif, environ 1/400. La tension alternative de référence aux bornes d'une résistance est fournie par le courant débité par une tension continue à travers un condensateur vibrant mù par l'appareil. La tension alternative est de fréquence et de phase identiques au signal de

mesure : elle est proportionnelle à la tension continue et à la fréquence de vibration. La mesure aura les caractéristiques suivantes :

A) Être indépendante de la fréquence. Les magnétomètres réalisés au C. E. A. ou chez Philips demandaient un amplificateur correcteur de fréquence.

B) La sensibilité de l'appareil ne sera pas limitée par le bruit de fond des résistances ou de l'amplificateur. Par suite du rôle de filtre de notre détecteur de zéro, le rapport signal sur bruit sera excellent. L'utilisation d'un résonateur mécanique, le galvanomètre à résonance, permet une sélectivité qu'aucun dispositif électronique ne peut atteindre à ces fréquences. De plus, il n'y a aucun risque d'induction de secteur.

C) La sensibilité étant augmentée, nous pouvons utiliser des bobines plus petites ; en effet, les méthodes de mesure employées dans les appareils similaires avaient une sensibilité limitée par le bruit de fond de l'appareillage.

D) Cette méthode d'opposition permet de ne pas tenir compte des résistances, self et mutuelle induction des bobines.

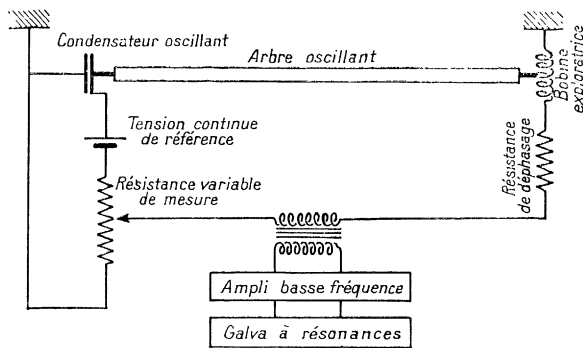


FIG. 2.

E) Comme l'indique la figure schématisant la mesure, la grandeur du champ magnétique mesuré est proportionnelle à la résistance qui rendra l'élongation du galvanomètre à résonance minimum.

Remarque. — La stabilité de l'amplificateur n'a aucune importance.

IV. Condensateur vibrant. — C'est un condensateur plan à air, composé de plusieurs lames ; chaque lame est constituée par 4 secteurs.

Comme l'angle de vibration est petit :

$$c = c_0 \alpha + c_1 \quad \text{d'où} \quad c = c_0 \alpha_0 \sin(2\pi \nu t)$$

en négligeant les harmoniques. Le circuit de référence est constitué par la mise en série d'une source de tension fixe V , du condensateur vibrant et d'une

résistance R . La tension aux bornes de cette résistance est :

$$e = R V c_0 \alpha_0 2\pi \nu \cos(2\pi \nu t). \quad (3)$$

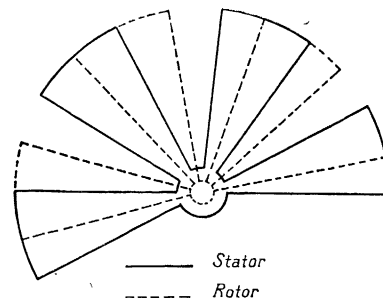


FIG. 3.

Cette forme de condensateur permet d'obtenir un rapport $c_{0\alpha}/c_1$ très grand entre la partie variable et la partie fixe de la capacité. La résistance R est beaucoup plus petite que l'impédance de la capacité vibrante ce qui n'introduit pas de déphasage entre les deux signaux à comparer.

V. Dimension finie des bobines. — Soit r le rayon de la gorge intérieure, R le rayon extérieur, L la demi-longueur de la bobine, n le nombre de spires par unité de longueur.

A) CAS DE LA MESURE DU CHAMP. — Prenons l'axe des z dans le plan moyen de la spire centrale ; H_z est le champ au centre de la bobine, la tension e dans celle-ci est, en négligeant les harmoniques :

$$\begin{aligned} e &= 10^{-8} \cdot \alpha_0 \cdot \left(2\pi \cdot n^2 \cdot L \cdot \frac{R^3 - r^3}{3} \right) \cdot 2\pi \nu \cos(2\pi \nu t) \\ &= Hz \left(1 - \frac{\alpha_0^2}{12} \right) + \alpha_0^2 \left(\frac{L^2}{3} - \frac{3}{20} \cdot \frac{R^5 - r^5}{R^3 - r^3} \right) \\ &\quad \cdot \left(\frac{\partial^2 Hz}{\partial z^2} \cdot \frac{1}{2} - \frac{\partial^2 Hz}{\partial y^2} \cdot \frac{1}{12} \right) + \alpha_0^4 \dots \quad (4) \end{aligned}$$

En réalisant la condition :

$$L^2 = (9/20) \cdot (R^5 - r^5) / (R^3 - r^3) \quad (5)$$

qui se réduit, si $r \ll R$ à $L = 0,67 R$, e sera proportionnel à Hz au centre de la bobine, même si la bobine a des dimensions finies, au 4^e ordre près. Il est légitime de négliger les dérivées à partir de l'ordre 4 car elles sont affectées du coefficient α_0^4 , $\alpha_0 = 1/10$ dans notre cas.

B) CAS DE LA MESURE DE GRADIENT DE CHAMP. — Avec des bobines satisfaisant à la condition (5), nous obtenons la valeur :

$$\begin{aligned} e &= 10^{-8} \cdot \alpha_0 \cdot \left(2\pi \cdot n^2 \cdot L \cdot \frac{R^3 - r^3}{3} \right) \cdot 2\pi \nu \cos(2\pi \nu t) \\ &= \left(\frac{\partial Hz}{\partial x} \right)_0 + \left(\frac{r_0^2}{2} + \frac{3}{10} \cdot \frac{R^5 - r^5}{R^3 - r^3} \right) \cdot \left(\frac{\partial^3 Hz}{\partial x^3} \right)_0 + \dots \quad (6) \end{aligned}$$

Il est impossible dans ce cas de mesurer seul $\partial H_z / \partial x$: on a intérêt à prendre des bobines petites, une amplitude de mouvement petite, $x_0^2/2$ et $(3/10) \cdot (R^5 - r^5/R^3 - r^3)$ du même ordre de grandeur.

Remarque. — Le calcul donnant les expressions (4) et (6) ne fait intervenir aucune propriété de symétrie du champ magnétique.

VI. Autres montages possibles. — A) MESURE DU GRADIENT DANS UN CHAMP AXIAL. — Dans le cas du mouvement linéaire, au lieu de monter la bobine de telle façon que le plan des spires soit parallèle à l'axe du mouvement, on peut monter la bobine perpendiculairement à cet axe. On mesure alors le

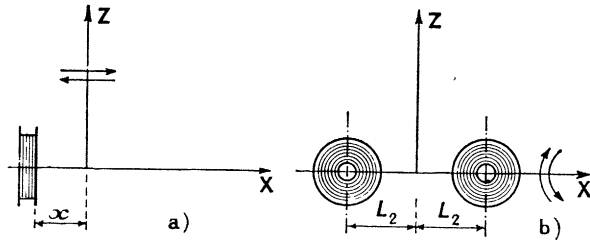


FIG. 4.

gradient de la composante du champ parallèle à l'axe du mouvement, gradient pris dans cette direction (fig. 4 a).

$$e = 10^{-8} \cdot S \cdot (\partial H_x / \partial x) \cdot x_0 \cdot 2\pi \nu \cos 2(\pi \nu t). \quad (7)$$

En satisfaisant à la condition :

$$x_0^2 + 2L^2/3 = (3/10) \cdot (R^5 - r^5/R^3 - r^3) \quad (8)$$

on annule l'influence des dimensions des bobines par l'introduction dans (7) des dérivées successives $\partial^n H_z / \partial x^n$ à partir de l'ordre 5.

Ce montage peut être utilisé dans le cas d'un champ à symétrie axiale donné par des bobines, c'est-à-dire dans le cas des spectrographes β à lentilles.

B) AUTRE DISPOSITIF POSSIBLE POUR LA MESURE DU GRADIENT DU CHAMP. — Au lieu de monter une bobine comme dans I A) a), on peut monter 2 bobines identiques à la distance l , oscillant autour du même axe confondu avec un diamètre de leurs spires centrales (fig. 4 b). La tension e aux bornes des 2 bobines montées en opposition sera, en prenant l'origine sur l'axe des x à égale distance des centres des 2 bobines :

$$e = 10^{-8} \cdot \alpha_0 \cdot S \cdot 2\pi \nu \cos (2\pi \nu t) \cdot l \cdot \left(1 - \frac{\alpha_0^2}{12} \right) \left[\left(\frac{\partial H_z}{\partial x} \right)_0 + \frac{l^2}{24} \frac{\partial^3 H_z}{\partial x^3} + \dots \right] \quad (9)$$

avec des bobines satisfaisant à la relation [5]. On peut ainsi mesurer le même gradient de la même

composante du champ que dans le montage I B) a). Il est difficile de réaliser 2 bobines identiques : l'identité des surfaces totales S des 2 bobines est vérifiée dans un champ magnétique homogène à la précision désirée. Les 2 bobines ayant chacune $2R = 2$ mm et étant accolées, $l/2$ sera égal à 1 mm. On mesure alors le gradient du champ en un point avec une erreur relative égale à

$$(1/600) (\partial^3 H_z / \partial x^3) [1 / (\partial H_z / \partial x)]$$

Ce dispositif est en fait plus pratique que le dispositif I B) car il permet, par une simple commutation, soit utilisant une seule des bobines, soit les mettant en série, de mesurer le champ et le gradient en 2 points distants de 1 mm. Quand on ne se sert que d'une bobine, si on appelle C la capacité entre les 2 bobines, la bobine non utilisée induit alors dans la première une tension telle que

$$\frac{e \text{ induit capacitivement}}{e \text{ à mesurer}} \leq 2\pi \nu Cr$$

si r est la résistance d'une bobine.

VII. Réalisation pratique. — Un moteur asynchrone synchronisé de 30 watts tournant à 25 tours/sec, entraîne un système bielle manivelle avec une réduction de $4/7$.

$$\nu = 14,283 \quad \alpha_0 = 1/10 \quad x_0 = 5 \text{ mm.}$$

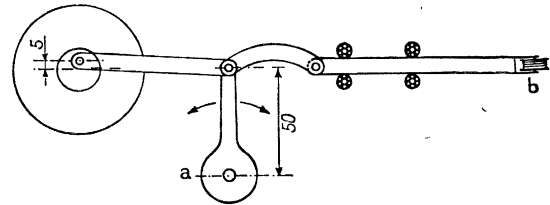


FIG. 5.

Tous les axes tournants ou oscillants sont montés sur roulements ; le glissement est déterminé par 8 roulements. Les bobines sont portées en bout d'une verge 30 cm de longueur hors de l'appareil. Les carters de protection des bobines et verges font 12 mm de diamètre. Les vibrations parasites des bobines, déterminées stroboscopiquement au microscope sont inférieures à $5/100$ mm. Les bobines ont comme dimensions :

$$2R = 2 \text{ mm} \quad 2r = 1 \text{ mm} \quad 2L = 1,4 \text{ mm}$$

pour la mesure du gradient de champ :

$$2R = 4 \text{ mm} \quad 2r = 2 \text{ mm} \quad 2L = 2,8 \text{ mm}$$

Le bobinage est réalisé avec du fil de $2/100$ à $4/100$ mm.

Le condensateur à un $c_{0\alpha}$ de 45 pF et $c_0\alpha/c_1 \neq 1$; avec 180 volts continus et une résistance

de 100 kilo-ohms, la tension alternative de référence est de 0,1 volt.

A l'appareil est adjoint un générateur de 10 impulsions par tour qui permet de contrôler la vitesse avec une échelle de comptage ; la vitesse est stable à 1/1 000 près pour des variations de secteur de 10 %. Si la bobine oscillante a un décentrement u , on introduit dans la formule (1) au lieu de H_z , $H_z + u \partial H_z / \partial z$. Comme u est plus petits que 5/100 mm, l'erreur relative est

$$\leq (1/5\ 000) \cdot (1/H_z) \cdot (\partial H_z / \partial z).$$

VIII. Résultats des mesures. — La précision et la fidélité obtenues dans la mesure de H est de 1/300 d'une centaine de gauss à 10 000 gauss. La précision et la fidélité obtenues dans la mesure du gradient de champ est de 1/50 pour les gradients très forts de l'ordre de 4 000 gauss/cm, et de 1/300 pour les gradients de 500 gauss/cm. On peut mesurer des gradients de 2 gauss/cm à la précision de 1/100. La cartographie d'un champ magnétique peut donc être obtenue avec grande précision. Dans les régions de l'entrefer elle permet de con-

naître le faible degré d'inhomogénéité. Dans les régions hors de l'entrefer elle permet de connaître la valeur exacte du champ de fuite.

D'après les résultats obtenus, la fidélité et la précision pourraient être améliorées en réduisant l'amplitude du mouvement alternatif linéaire à $x_0 = 1$ mm ou 2 mm, au lieu de $x_0 = 5$ mm, et en ramenant les dimensions de la bobine du gradient de champ à $2R = 2,5$ mm au lieu de $2R = 4$ mm ; un meilleur équilibrage dynamique du système bielle-manivelle améliorerait aussi les résultats.

L'appareil a été présenté, dans les conditions actuelles, au Salon de la Physique 1956.

Je tiens à remercier M. le Pr Joliot et M. Suzor, Directeur et Sous-Directeur du Laboratoire pour m'avoir permis de réaliser cet appareil. Je tiens à remercier particulièrement M. Lanfrey, chef de l'atelier du laboratoire, pour l'étude et la réalisation de la partie mécanique de l'appareil ainsi que M. R. Mérinis, électronicien, pour l'étude de la partie électrique de l'appareil.

Manuscrit reçu le 15 avril 1957.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>[1] CORK (J. M.), SHREFFLER (R. G.) et SHULL (F. B.), <i>Rev. Sc. Instr.</i>, 1947, 18, 315.</p> <p>[2] CHAPIN (P. M.), <i>Rev. Sc. Instr.</i>, 1949, 20, 945.</p> <p>[3] LANGER (L. M.) et SCOTT (F. R.), <i>Rev. Sc. Instr.</i>, 1950, 21, 522.</p> <p>[4] LAMB (W. E., Jr) et RETHERFORD (R. D.), <i>Phys. Rev.</i>, 1951, 81, 222.</p> <p>[5] JÜRGENS (B. F.), <i>Revue Technique Philips</i>, tome 14, n° 11.</p> <p>[6] TAIEB (J.), Note C. E. A., n° 28, 1953.</p> | <p>[7] CALDEWURT (U. J.) et ADLER (S. E.), <i>Rev. Sc. Instr.</i>, 1954, 25.</p> <p>[8] GAUTHIER (P.), <i>J. Physique Rad.</i>, 1954, 684, 15.</p> <p>[9] FRAZER (J. F.), <i>Rev. Sc. Instr.</i>, 1955, 26, 475.</p> <p>[10] SYMONDS (J. L.), <i>Rep. Progr. Phys.</i>, 1955, 18, 83.</p> <p>[11] GAUTHIER (P.), <i>C. R. Acad. Sc.</i>, 1956, 13, 242, 1707.</p> <p>[12] Appareil commercial A. E. G., Messwesen.</p> <p>[10] et [11] donnent les formules de mesure de champ en un point avec une bobine de dimensions finies.</p> <p>[10] fait une revue générale des méthodes de mesure de champ magnétique.</p> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|