

Principes de mesure

Les capteurs les plus courants utilisent :

- L'**effet Hall** pour les champs magnétiques statiques ou de basses fréquences (jusque vers 10 kHz). Les sondes à effet Hall, peu sensibles, servent surtout à étalonner des électroaimants destinés à la recherche, où la densité de flux magnétique est intense (de l'ordre du tesla).
- Une **bobine** pour mesurer un champ magnétique variable. Ce dernier y induit une force électromotrice proportionnelle à sa dérivée.
- Un **condensateur** pour mesurer les champs électriques. Un champ variable induit une charge variable sur un condensateur et, à ses bornes, une tension variable qui peut être amplifiée. Dans le cas des champs électriques statiques, c'est la capacité du condensateur qui est variable (*moulin à champ*).

D'autres principes fondés sur des couplages électro-optiques ou magnéto-optiques sont parfois utilisés pour la mesure des champs.

Mesure des champs électriques

L'effet Kerr électro-optique

Un champ électrique, appliqué sur un matériau transparent y induit une biréfringence : l'indice de réfraction est différent selon que la lumière qui traverse le matériau est polarisée parallèlement ou perpendiculairement au champ électrique appliqué. La différence Δn des indices de réfraction est proportionnelle au carré de l'amplitude du champ électrique E :

$$\Delta n = K \lambda_0 E^2 \quad [-]$$

avec : K constante de Kerr
 λ_0 longueur d'onde de la lumière dans le vide

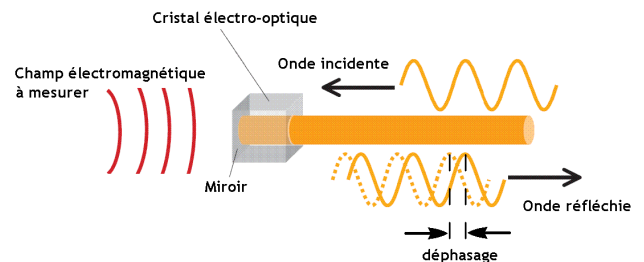
En général, cet effet est très faible ; dans l'eau, par exemple, la constante de Kerr vaut $0,33 \text{ pm/V}^2$. Les seuls matériaux connus pour présenter une constante de Kerr relativement élevée sont le nitrotoluène ($\text{C}_7\text{H}_7\text{NO}_2$) et le surtout nitrobenzène ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$) qui est un liquide toxique et explosif. Pour ce dernier, on a $K = 15,4 \text{ pm/V}^2$.

Le mécanisme physique qui détermine l'effet Kerr électro-optique présente une constante de temps très courte de sorte que la bande passante d'un capteur de champ électrique fonctionnant sur ce principe peut aller jusqu'à 100 GHz.

L'effet Pockels

Comme dans l'effet Kerr électro-optique, un champ électrique appliqué sur un matériau transparent y induit une biréfringence ; mais la différence Δn des indices de réfraction y est simplement proportionnelle à l'amplitude du champ électrique. Cet effet se manifeste dans certains cristaux, comme le niobiate de lithium (LiNbO_3) et l'arséniure de gallium (GaAs). Relativement peu sensible, il est utilisé pour mesurer des champs statiques intenses à proximité d'une surface chargée.

Plus récemment, l'effet Pockels a été mis à profit pour développer un capteur de champ électrique hyperfréquence et millimétrique :



[NTT Technical Review vol.7 n°3, mars 2009](#)

Mesure des champs magnétiques

L'effet Faraday

Déjà mentionné pour la mesure des courants (voir *Chapitre 6 – Mesure en haute tension*, slide 20), cet effet consiste en une rotation du plan de polarisation d'une onde lumineuse polarisée linéairement, lors de son passage à travers un cristal transparent soumis à un champ magnétique. L'angle de rotation β est proportionnel à l'amplitude du champ magnétique H et à la longueur de matière traversée d :

$$\beta = v d H \quad [\text{rad}]$$

avec : v constante de Verdet

À première vue, on pourrait penser que le matériau concerné **devient optiquement actif** (capable de faire tourner le plan de polarisation de la lumière) sous l'effet d'un champ magnétique. Il y a pourtant une différence de taille entre un tel matériau et de l'eau sucrée, par exemple, qui est aussi connue pour être optiquement active :

- dans un matériau tel que de l'eau sucrée, le sens de rotation du plan de polarisation dépend du sens de propagation. En conséquence, pour un rayon qui traverserait l'eau dans un sens, puis reviendrait en sens inverse après réflexion par un miroir, le plan de polarisation retrouverait son orientation d'origine (rotation totale = 0).
- à l'inverse, dans le matériau magnéto-optique, le sens de rotation du plan de polarisation est indépendant du sens de propagation. Pour un rayon lumineux polarisé, traversant le matériau dans un sens, puis dans l'autre sens après réflexion, l'angle de rotation total vaudrait $2 \cdot \beta$.

La constante de Verdet est – en première approximation – inversement proportionnelle au carré de la longueur d'onde λ de la lumière :

$$v \propto \frac{1}{\lambda^2} \quad [\text{rad} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$$

Cette constante prend des valeurs relativement importantes dans certains verres comportant des traces de terres rares, tel le praséodyme (*verre flint*), soit de l'ordre de $50 \text{ rad} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

Cependant, des valeurs beaucoup plus élevées, de l'ordre de $40'000 \text{ rad}\cdot\text{T}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$, obtenues dans des sels d'euprium (EuS) ont permis d'utiliser de tels matériaux en couches minces, pour la mesure de flux d'induction magnétique, avec une résolution d'environ 10 mT en lumière visible.

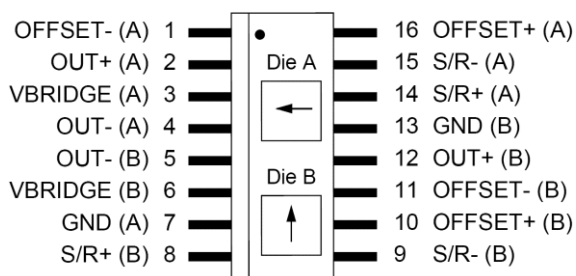
L'effet Kerr magnéto-optique

L'effet Kerr magnéto-optique se manifeste également par une rotation du plan de polarisation d'un rayon lumineux polarisé linéairement, mais il concerne une **onde réfléchie** par une surface métallique ferromagnétique, en présence d'un champ magnétique statique (et non une **onde transmise** à travers la matière active, comme dans le cas de l'effet Faraday). Ainsi, un effet significatif peut être obtenu sur des alliages de fer ou de cobalt, avec une résolution de l'ordre du microtesla.

Complément facultatif : un [document de Hind Instruments](#).

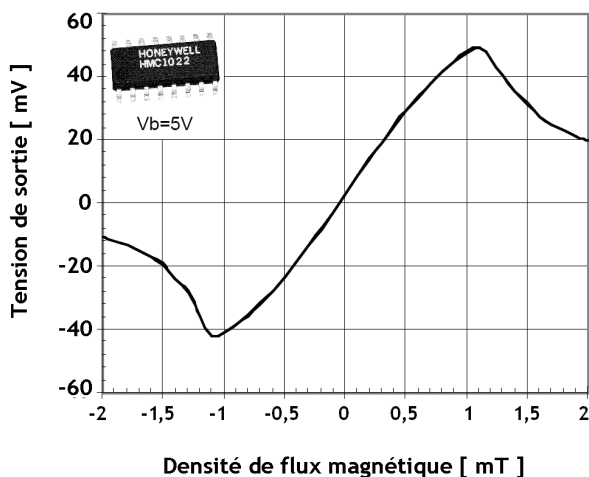
La magnétorésistance

La résistivité électrique de certains matériaux varie en fonction d'un champ magnétique appliqué. C'est le cas par exemple du permalloy (alliage de 20% de fer et 80% de nickel), qui a été utilisé pour développer des capteurs permettant de mesurer simultanément deux composantes de champ magnétique et présentant une bonne linéarité jusqu'à 1mT.



Capteur de champ magnétique biaxial intégré

Honeywell – [Data sheet](#)

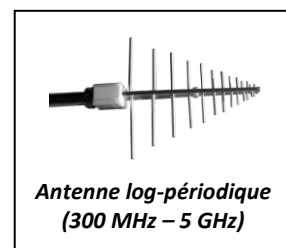
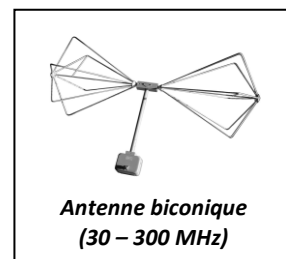


Pour plus de détails sur les phénomènes optiques permettant de mesurer des champs électriques et magnétiques :

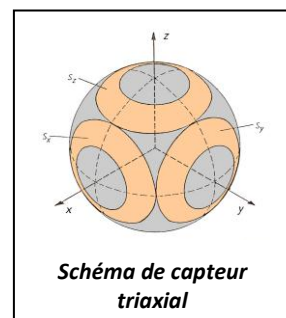
Complément facultatif : [Traité d'électricité vol. XVII, Pierre-André PARATTE, Philippe ROBERT Systèmes de mesure, chapitre 7 – Capteurs optiques passifs.](#)

Antennes et capteurs

Dans certains cas, il est important de connaître l'intensité d'un champ électromagnétique de manière précise, indépendamment de sa direction et de son état de polarisation. En **champ lointain** – c'est-à-dire pratiquement : en haute fréquence – ce problème peut être résolu à l'aide d'une antenne électrique (biconique, log-périodique, etc.), en cherchant empiriquement l'orientation de l'antenne (direction et polarisation) qui donne la valeur la plus intense. Étant donné la valeur mesurée du champ électrique E , on en déduit le champ magnétique H par la relation : $E/H = Z_0$ (impédance du vide = 377Ω). En pratique, cette méthode ne fonctionne que si le champ est sinusoïdal et émis avec une intensité constante, dans un plan de polarisation constant. Par ailleurs, elle pose de sérieux problèmes pour certains types de modulation (UMTS, par exemple).



Certains fabricants ont tenté de développer des capteurs triaxiaux. Si ceux-ci existent bel et bien pour les basses fréquences, le problème s'est révélé quasi insoluble pour les hautes fréquences, de sorte qu'aucun d'entre eux n'a finalement pu être commercialisé.



Sonde bolométrique

Une autre solution consiste à utiliser une **sonde bolométrique**. Dans ce type de sonde, le champ est absorbé par un matériau dans lequel son énergie est transformée en chaleur. Il ne reste plus alors qu'à mesurer la température pour en déduire le champ, sachant que la puissance par unité de surface W_s est donnée par : $W_s = |\mathbf{E} \times \mathbf{H}| = H^2 \cdot Z_0 = E^2 / Z_0$. Ce système est utilisé, avec une très bonne précision, dans le domaine hyperfréquence et infrarouge.

Champ proche

En **champ proche** – c'est-à-dire pratiquement : en basse et moyenne fréquence – la situation est plus compliquée : les champs électrique et magnétique ne sont pas couplés et doivent donc être mesurés séparément. En outre, pour la mesure des champs sous une ligne à haute tension triphasée par exemple, les problèmes suivants se posent :

- Le champ est polarisé elliptiquement. Il n'y a donc pas de direction de polarisation dans lequel l'intensité du champ est constamment maximale, puisque cette direction tourne (champ tournant). La solution habituelle consiste à utiliser trois capteurs orthogonaux, mesurant simultanément les trois composantes du champ.

- Les capteurs de champ magnétique peuvent être perturbés par le champ électrique (et vice versa, dans un moindre mesure). Une géométrie appropriée, combinée avec des écrans électromagnétiques, doit donc garantir l'immunité du capteur d'un champ, vis-à-vis de l'autre champ, quelles qu'en soient les intensités respectives. De toute manière, l'erreur due aux interférences des champs devra être précisée par le fabricant.

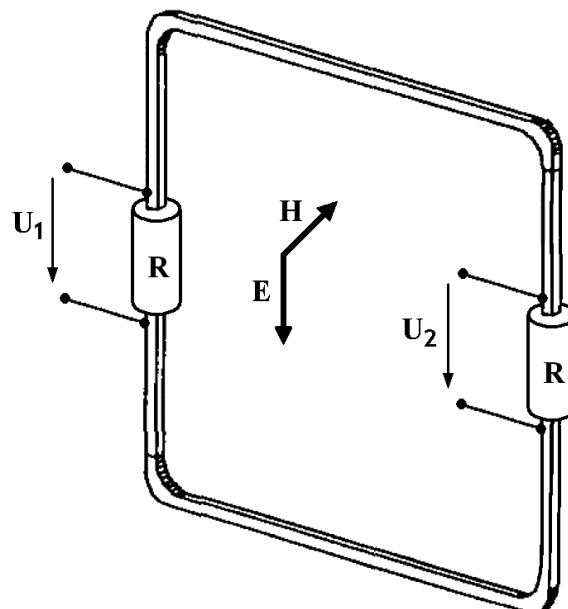
Selon la norme CEI 61786, à 50 Hz, une densité de flux magnétique allant jusqu'à 1 mT ne doit pas provoquer une erreur supérieure à : 1 V/m+1% de la valeur mesurée, sur la mesure du champ électrique. Inversement, un champ électrique allant jusqu'à 20 kV/m ne doit pas provoquer une erreur supérieure à 20 nT+1% de la valeur mesurée, sur la mesure de la densité de flux magnétique.

Une solution originale a été proposée pour mesurer simultanément les composantes électrique et magnétique d'un champ proche, à l'aide d'une boucle dans laquelle sont introduites deux résistances.

Les intensités des champs sont alors données par les relations suivantes (les facteurs de proportionnalité dépendant de la géométrie et de la valeur des résistances) :

$$E \propto U_1 + U_2 \quad [\text{V/m}]$$

$$H \propto \frac{U_1^2 + U_2^2}{U_1 + U_2} \quad [\text{A/m}]$$



Mesure simultanée des champs électrique et magnétique par une boucle résistive

F. Gassmann, J. Furrer, *An isotropic broadband electric and magnetic field sensor for radiation hazard measurements*, IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility (1993) pp. 105-109.