

# Les effets biologiques des champs magnétiques : le point de vue de l'électricien

Autor(en): **Gary, Claude**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **81 (1990)**

Heft 23

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-903189>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Les effets biologiques des champs magnétiques

## Le point de vue de l'électricien

Claude Gary

**Dans cet article, on rappelle d'abord les méthodes de calcul des champs magnétiques au voisinage des lignes aériennes, et on donne des exemples de valeurs numériques. Ensuite, on analyse les interactions entre champs magnétiques et organismes vivants, du strict point de vue de l'électricien. Trois types d'interactions sont recensées et analysées: les courants de Foucault induits par les champs magnétiques variables, les actions directes possibles des champs magnétiques sur les substances magnétiques contenues dans certains tissus vivants et les forces de Laplace sur les ions en mouvement.**

**Der vorliegende Aufsatz geht vorerst auf die Methoden zur Berechnung magnetischer Felder in der Nähe von Freileitungen ein und nennt typische Werte für die in diesem Bereich auftretenden Felder. Anschließend werden aus elektrotechnischer Sicht die möglichen Einwirkungen magnetischer Felder auf Lebewesen diskutiert. Zur Sprache kommen dabei die durch variable Magnetfelder induzierten Wirbelströme, die Kraftwirkung magnetischer Felder auf die in gewissen lebenden Geweben vorhandenen magnetischen Substanzen und die Kraftwirkung magnetischer Felder auf sich bewegende Ionen.**

### Adresse de l'auteur

Claude Gary, Conseiller Scientifique Honoraire de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, F-92141 Clamart/France

Après que biologistes et médecins se soient préoccupés pendant plus de deux décennies d'effets possibles des champs électriques sur la santé de l'homme, et plus généralement de leur influence éventuelle sur les organismes vivants, on assiste actuellement à la publication de nombreux travaux, où les mêmes questions sont posées à propos des champs magnétiques. Il est donc essentiel que soit examinée la question de la physique des interactions entre champ magnétique et organismes vivants, vue par l'électricien. Cette nécessité apparaît, ne serait-ce que pour fournir au biologiste des indications sur la nature et les ordres de grandeur des phénomènes électromagnétiques qui s'y développent, et de ce fait lui apporter une aide indispensable dans l'interprétation des effets observés.

Cet article se propose d'apporter ces informations en ce qui concerne les champs magnétiques, et constitue ainsi le complément symétrique à l'article «Effets biologiques des champs électriques – Que peut dire l'électricien à ce sujet?» paru dans le numéro spécial de juillet 1976 de la Revue Générale de l'Electricité [1]. Nous précisons que nous ne nous intéressons ici qu'aux champs magnétiques à très basse fréquence (fréquence industrielle et harmoniques), engendrés par les systèmes de transport et de distribution d'électricité.

Avant d'aborder les diverses hypothèses d'interaction avec les organismes vivants, nous rappellerons la formulation analytique du champ magnétique dans le cas des lignes aériennes et des câbles, et nous donnerons quelques valeurs de champs magnétiques calculés ou mesurés au voisinage d'ouvrages électriques. Nous donnerons aussi quelques informations sur les champs régnant en milieu domestique, puisqu'il semble que ceux-ci sont également mis en cause par certains biologistes et épidémiologistes.

## Les champs magnétiques engendrés par les lignes aériennes

### Formulation générale

En raison de la nature quasi statique des champs électromagnétiques aux fréquences industrielles, le champ magnétique d'une ligne est engendré uniquement par les courants qui y circulent. On peut donc utiliser, de la façon la plus générale, la loi d'Ampère:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu I$$

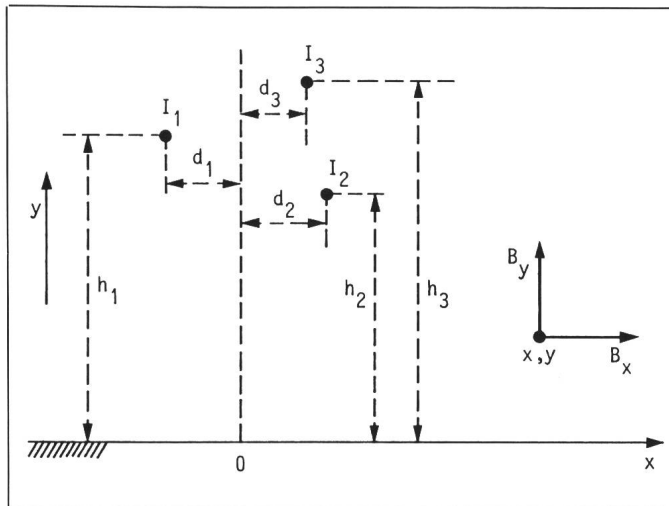
Dans la mesure où les conducteurs des lignes peuvent être assimilés à des conducteurs rectilignes, la loi d'Ampère donne directement:

$$B = \mu I / 2 \pi r$$

où  $B$ , champ d'induction magnétique, est représenté par un vecteur porté par la tangente au cercle de rayon  $r$  centré sur l'axe du conducteur. Comme d'autre part les milieux environnant les lignes sont pratiquement amagnétiques, on pose  $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Vs/Am, perméabilité du vide. En présence de plusieurs conducteurs, comme c'est le cas des lignes triphasées ou polyphasées, le champ total s'obtient évidemment par superposition des champs partiels, en tenant compte de leurs phases respectives.

Le calcul rigoureux des champs d'une ligne au-dessus d'un sol plan doit faire intervenir les images des conducteurs dans le sol. La théorie classique en tient compte en utilisant les séries  $P + jQ$  de Carson et Pollaczek, mais nous avons montré [2] que les résultats étaient les mêmes si on remplaçait la surface du sol par un plan fictif situé à la profondeur de pénétration, et si on considérait les images par rapport à ce plan.

Aux très basses fréquences, et pour les conductivités usuelles des sols, la



$I_i$  courant de la phase  $i$   
 $d_i, h_i$  coordonnées des conducteurs

**Figure 1**  
**Calcul du champ magnétique d'une ligne triphasée**

plan fictif. Il fournit les composantes horizontale  $B_x$  et verticale  $B_y$  du champ en tout point  $x, y$  de l'espace, ainsi que les amplitudes du grand axe et du petit axe de l'ellipse décrite par le vecteur champ.

**Quelques valeurs de champ magnétique au voisinage de lignes à très haute tension**

La figure 2 indique quelques valeurs du champ magnétique engendré par des lignes en nappe horizontale à 1 circuit triphasé. La figure 3 donne le profil transversal du champ sous une ligne à deux circuits triphasés. On peut voir que l'intensité sous une ligne du champ dépend aussi, dans ce cas, de la disposition relative des indices de phase  $R, S, T$ .

profondeur de pénétration  $p$ , dont le module est donné par:

$$p = 1 / \sqrt{\mu \sigma \omega}$$

est de plusieurs centaines de mètres; par exemple de 360 mètres pour  $\omega = 100\pi$  rad/s et  $\sigma = 0,02$  S/m. Dans ces conditions, il est légitime de négliger le champ dû aux courants-images, sauf lors du calcul de champs lointains, c'est-à-dire à plus de 100 mètres d'une ligne.

Lorsqu'on néglige les images, les deux composantes, horizontale et verticale, du champ magnétique dû à une ligne polyphasée à  $n$  conducteurs s'écrivent (voir figure 1):

$$B_x = - \frac{\mu_0}{2 \pi} \sum_1^n I_i \frac{y - h_i}{(y - h_i)^2 + (x - d_i)^2}$$

$$B_y = \frac{\mu_0}{2 \pi} \sum_1^n I_i \frac{x - d_i}{(y - h_i)^2 + (x - d_i)^2}$$

Pour un système triphasé équilibré, on pose:

$$I_1 = I$$

$$I_2 = I \left[ -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right]$$

$$I_3 = I \left[ -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right]$$

Quant au champ homopolaire, il s'obtient en posant  $I_1 = I_2 = I_3 = I_0$ , courant homopolaire de la ligne.

*Remarque 1:* le champ engendré par un système triphasé est généralement un champ elliptique. Les amplitudes respectives du grand axe et du petit axe de l'ellipse se rapprochent d'autant

plus l'une de l'autre, le champ devenant alors circulaire, que le point de l'espace considéré se rapproche du centre de gravité des conducteurs. Inversement, quand on s'éloigne des nappes de conducteurs, le champ tend vers un champ à polarisation fixe. – En annexe, on trouvera la formulation complète nécessaire au calcul des champs magnétiques des lignes.

*Remarque 2:* Dans le système d'unités international (SI), le champ d'induction magnétique (ou pour abrégé champ magnétique) s'exprime en Tesla (T). On utilise souvent le sous-multiple microtesla:  $1 \mu T = 10^{-6}$  T. Par rapport à l'ancienne unité, le gauss (G), on a:  $1 G = 10^{-4} T = 100 \mu T$  et  $1 mG = 0,1 \mu T$ .

*Remarque 3:* Electricité de France dispose d'un code de calcul, le programme *Analog*, qui permet entre autres <sup>1</sup> de calculer les champs électriques et magnétiques des lignes. Le programme est très général, et tient compte des images des conducteurs par la méthode du

<sup>1</sup> Analog calcule également les champs perturbateurs à haute fréquence dus à l'effet couronne, les pertes couronnes et le bruit acoustique des lignes.

*Remarque:* Il existe un cas où le champ électrique et le champ magnétique sont liés entre eux: c'est le cas d'une ligne sans pertes sur un sol de conductivité infinie, fermée à son extrémité réceptrice sur son impédance caractéristique. Les lignes de force du champ électrique et du champ magnétique forment alors deux systèmes orthogonaux entre eux, et entre tout point de l'espace existe la relation:

$$B = E/c \text{ avec } c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Dans le cas des lignes réelles, où nous avons négligé l'image des conducteurs pour le calcul du champ magnétique, on a sensiblement, au niveau du sol:

$$B = (E/2c) \cdot (I/I_c)$$

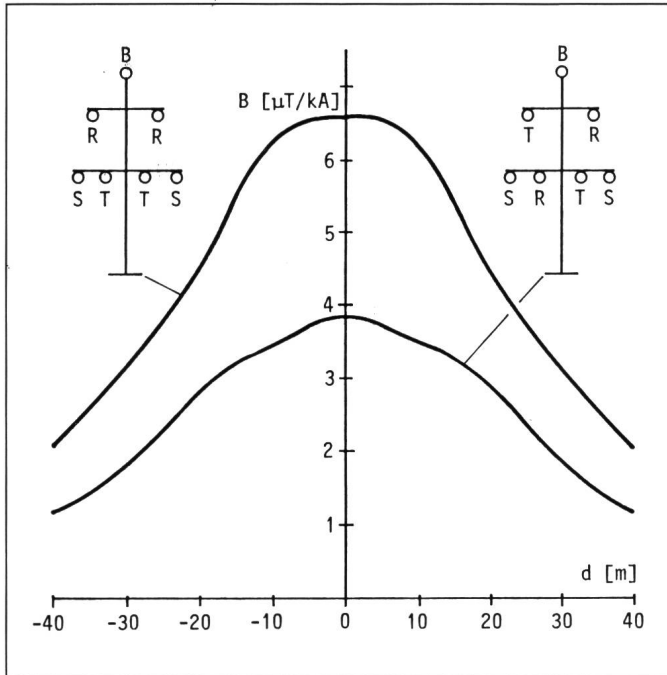
où  $I$  est le courant triphasé circulant effectivement dans les conducteurs et  $I_c$  le courant du régime caractéristique. Cette relation permet d'estimer rapidement la valeur du champ magnétique d'une ligne, dans la mesure où son champ électrique est déjà connu.

**Champ magnétique des lignes HT, MT et BT**

A l'aide du programme Analog le champ magnétique a été calculé pour

Tension [kV]	Distance entre phases [m]	Hauteur des conducteurs [m]	Courant [kA]	Champ magnétique au niveau du sol [ $\mu T$ ]		
				Sous l'axe	maximal	à 30 m de l'axe
225	6	11	0,4	2,0	4,3	0,65
400	10	13	1,0	6,6	12,0	4,0
750	15	15	1,5	12,0	15,0	10,0

**Figure 2** Champ magnétique engendré par des lignes en nappe horizontale à 1 circuit triphasé



**Figure 3**  
Influence de l'indice horaire des phases sur la densité de flux magnétique de lignes de transport.

*d* distance à l'axe de la ligne  
*B* champ magnétique au niveau du sol pour le cas maximum (courbe supérieure) et le cas minimum (courbe inférieure) de champ magnétique

une ligne à 90 kV en triangle, ainsi que pour une ligne à 20 kV en nappe-voûte. On rappelle dans la figure 4 les intensités de champs des plus caractéristiques, au niveau du sol, rapportées à un courant triphasé de 100 A. Les champs sont exprimés en μT.

Du fait de la géométrie des lignes HT et MT, où la distance entre phases est petite par rapport à leur hauteur au-dessus du sol, et du fait du déphasage entre les courants, la composition des champs est assez complexe à analyser. Selon la distance aux conducteurs, c'est tantôt la composante horizontale  $B_x$  qui domine, tantôt la composante verticale  $B_y$ . Ainsi, pour la ligne à 90 kV,  $B_x$  est prédominant de 0 à 5 m de l'axe, puis  $B_y$  de 5 m à 20 m, et à nouveau  $B_x$  aux distances supérieures. Pour la ligne à 20 kV, où l'espacement entre conducteurs est encore plus faible, le champ est essentiellement vertical ( $B_y$ ) sous l'axe de la ligne, tend vers un champ horizontal ( $B_x$ ) entre 5 et 15 m, pour redevenir vertical ( $B_y$ ) au delà. On ne voit donc pas de règle bien claire se dessiner, et si

des calculs précis sont nécessaires, ils doivent être faites au cas par cas.

Si on prend pour exemple encore le cas d'une ligne BT, dont la configuration serait soit en nappe horizontale (cas imaginé pour les besoins du calcul) soit en nappe verticale, selon la figure 5, cas *a* et *b* respectivement, il est facile pour ces configurations simples de calculer le champ au sol sous les conducteurs. On trouve les expressions suivantes:

$$\text{cas } a \quad B_x = (\mu_0 I / 2\pi) (d^2 / h^3)$$

$$B_y = (\mu_0 I / 2\pi) (\sqrt{3}d / h^2)$$

$$\text{cas } b \quad B_x = (\mu_0 I / 2\pi) (\sqrt{3}d / h^2)$$

$$B_y = 0$$

où *I* indique le courant par phase de ces lignes triphasées. Dans le cas *a*, alors que l'on s'attend à une composante horizontale  $B_x$  dominante, c'est paradoxalement la composante  $B_y$  qui est la plus importante. Son intensité est la même que celle de la composante  $B_x$  du cas *b*. A titre d'application numé-

rique, le champ sous une ligne BT du type *a* ou *b*, pour  $d = 0,7$  m et  $h = 7$  m, est de  $5 \mu\text{T}$  (0,05 G) par kiloampère.

**Champ homopolaire:** Dans certains pays, le retour des courants homopolaires se fait par la terre. De même lorsque le neutre est mis à la terre en plusieurs points, une fraction du courant homopolaire peut s'écouler par le sol. Ces courants engendrent évidemment un champ, que l'on peut évaluer à  $0,3 \mu\text{T}$  (3 mG) par ampère sous la ligne, et à  $0,15 \mu\text{T}$  (1,5 mG) par ampère à 10 mètres de la ligne. Aussi, un courant homopolaire de 50 A peut engendrer dans une habitation bordée par une ligne BT un champ de l'ordre de  $10 \mu\text{T}$  (0,1 G).

### Champ magnétique en milieu domestique

Les champs magnétiques engendrés par les installations domestiques s'étendent dans une très large gamme de valeurs. Ils dépendent du type de câblage (monofilaire pour un va-et-vient, bifilaire ou triphasé pour une alimentation normale), de la puissance des appareils alimentés. De plus, certains appareils électroménagers créent un champ relativement intense à leur voisinage immédiat, notamment lorsqu'ils possèdent un noyau magnétique (transformateur, moteur).

Dans des logements éloignés des lignes de transport ou de distribution, la gamme des champs ambiants s'étend, selon des mesures faites à l'étranger, de  $1\gamma$  ( $10^{-9}\text{T}$  ou  $10^{-5}\text{G}$ ) à  $0,4 \mu\text{T}$  (4 mG), avec une moyenne de  $15\gamma$  (0,15 mG). Ces intensités sont essentiellement variables en fonction de l'équipement et de l'heure dans la journée, dépendant de l'activité des occupants du logement. On donne ci-dessous quelques exemples de champs magnétiques, mesurés à une distance de 30 cm d'appareils électroménagers dont le rayonnement est le plus intense [3]:

Four à microondes	40... 90 mG
Aspirateur	20... 200 mG
Sèche cheveux	1... 100 mG
Scie	10... 300 mG
Chauffage par le sol	10... 50 mG

### Les interactions avec les organismes vivants

Sans préjuger en aucune façon de la plausibilité d'effets biologiques des champs magnétiques, l'électricien peut examiner les processus physiques pouvant éventuellement être mis en cause.

	<i>B/I</i> [ $\mu\text{T}/100\text{A}$ ]		
	Sous l'axe	Maximum	à 20 m de l'axe
Ligne de 90 kV	1	1,2	0,16
Ligne de 20 kV	1	1	0,1

**Figure 4** Champ magnétique *B* de lignes HT et MT au niveau du sol

*I* courant par phase d'une ligne triphasée

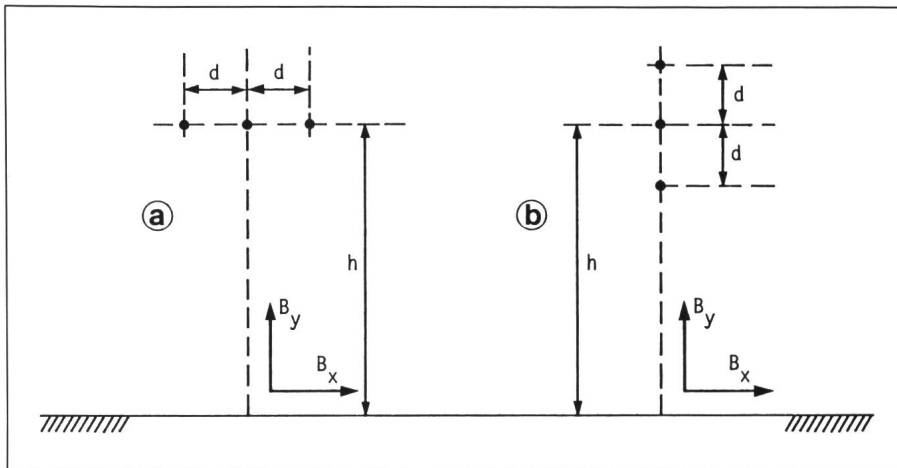


Figure 5 Calcul du champ magnétique d'une ligne BT

- a configuration en nappe horizontale
- b configuration en nappe verticale
- d, h coordonnées des conducteurs

Il en recense essentiellement trois:

- l'induction de courants dans la masse d'un corps vivant,
- l'action directe d'un champ magnétique sur des substances magnétiques contenues dans certains tissus,
- les forces de Laplace appliquées à des ions en mouvement.

*Remarque:* Certains travaux sur des cellules suggèrent que des champs magnétiques à très basse fréquence, même à de très faibles intensités, pourraient affecter certains processus au niveau cellulaire. On a cité la modification de la production de calcium, l'accélération de la sécrétion d'une enzyme particulière, l'ornithine décarboxylase, mais il s'agit là de recherches sur des tissus in vitro, qu'il n'est actuellement pas question d'interpréter en termes de physio-pathologie. De telles considérations débordent par ailleurs du domaine d'investigation de l'électricien.

**Induction de courants dans la masse d'un corps vivant**

Il s'agit de véritables courants de Foucault développés par un champ variable dans la masse d'un corps vivant; à notre connaissance, aucune carte des densités de courant n'a encore été établie, ni pour l'homme, ni pour les animaux de laboratoire. En toute rigueur, le calcul doit partir de l'équation de Maxwell:

$$\text{rot } \mathbf{E} = - \mu \frac{d\mathbf{H}}{dt}$$

qui donne la relation locale entre champ magnétique et champ électrique induit. Cette équation doit être in-

tégrée à tout le volume de l'organisme vivant considéré. Par application du théorème de Stokes, qui s'écrit:

$$\int_S \text{rot } \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

on obtient l'équation intégrale:

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_S \mu \frac{d\mathbf{H}}{dt} \cdot d\mathbf{s}$$

On peut alors se faire une idée simplifiée des densités de courants induits en se représentant un contour C, pris dans la masse des tissus, et en calculant le champ électrique le long de ce contour; en admettant que ce contour fictif soit circulaire, de rayon r, plongé dans un milieu infini isotrope, l'équation intégrale ci-dessus s'écrit:

$$2 \pi r E = \pi r^2 \frac{dB}{dt}$$

d'où:

$$E = \frac{r}{2} \frac{dB}{dt}$$

Enfin, la densité de courant induite dans un milieu de conductivité  $\sigma$  sera donnée par:

$$J = \frac{\sigma r}{2} \frac{dB}{dt}$$

Cette évaluation simple suppose que le champ magnétique dû aux courants induits est négligeable devant le champ appliqué de l'extérieur, hypothèse tout à fait justifiée pour les conductivités usuelles des tissus vivants. Lorsque le champ appliqué est sinusoïdal, l'expression ci-dessus prend la forme:

$$J = \frac{\sigma r}{2} \cdot \omega B$$

*Application numérique dans le cas de champs sinusoïdaux:* Supposons un homme debout, plongé dans un champ magnétique orienté horizontalement, et imaginons deux contours fictifs circulaires, placés verticalement, l'un dans la tête, de rayon  $r_1 = 0,1$  m, et l'autre dans le thorax, de rayon  $r_2 = 0,25$  m. Supposons de plus que le champ soit dû à une ligne à 400 kV, donc sinusoïdal, et d'intensité  $B = 10 \mu\text{T}$ , correspondant sensiblement au champ maximal que l'on relève sous les lignes à 400 kV, au niveau du sol. Nous trouvons:

$$E_1 (\text{niveau de la tête}) = 0,16 \text{ mV/m}$$

$$E_2 (\text{niveau du thorax}) = 0,4 \text{ mV/m}$$

Quant à la densité de courant qui en résulte, elle va dépendre de la conductivité  $\sigma$  que l'on se donnera pour caractériser les tissus vivants. Si l'on assimile un corps vivant à un simple réservoir de sérum physiologique, on retiendra  $\sigma = 1 \text{ S/m}$ . Mais certains auteurs, prenant en compte la teneur des tissus en graisses et autres substances, retiennent  $\sigma = 0,1 \text{ S/m}$ . Il en résultera les densités de courant:

	$\sigma = 1 \text{ S/m}$	$\sigma = 0,1 \text{ S/m}$
$J_1$ (tête)	$160 \mu\text{A/m}^2$	$16 \mu\text{A/m}^2$
$J_2$ (thorax)	$400 \mu\text{A/m}^2$	$40 \mu\text{A/m}^2$

*Comparaison avec les courants induits par le champ électrique:* Reprenons le cas d'un homme debout sous une ligne à 400 kV: là où le champ magnétique est de l'ordre de  $10 \mu\text{T}$ , le champ électrique est de l'ordre de  $5 \text{ kV/m}$ . Dans ces conditions, les courants induits par le champ électrique sont globalement orientés dans le sens vertical; sans reprendre les calculs publiés ailleurs, indiquons que leur densité est de quelque  $250 \mu\text{A/m}^2$  au niveau de la tête et de quelque  $300 \mu\text{A/m}^2$  au niveau du thorax.

Ainsi, dans le cas particulier traité ici, on constate que - si on retient une conductivité des tissus de  $1 \text{ S/m}$  pour les courants dus au champ magnétique - champ électrique et champ magnétique induisent des courants qui sont sensiblement du même ordre. De plus, on montre qu'ils sont en phase (puisque respectivement proportionnels à  $j\omega\mathbf{E}$  et à  $j\omega\mathbf{B}$ ), de sorte que lorsque l'exposition aux champs des deux natures est simultanée, la composition des densités de courant locales est simplement la composition de leurs vecteurs spatiaux.



Cependant, il existe deux différences très importantes entre les courants induits par les champs électriques et les courants induits par les champs magnétiques. Dans le cas du champ électrique, les densités locales de courant ne dépendent ni de la conductivité des tissus, ni de la taille des corps considérés, dans la mesure où deux corps se déduisent l'un de l'autre par homothétie (exemples: adulte et enfant, ou approximativement lapin et souris...). En revanche, dans le cas du champ magnétique, les densités de courant locales dépendent à la fois de la conductivité et de la taille, comme le montre clairement l'expression

$$J = \frac{\sigma r}{2} \frac{dB}{dt}$$

établie précédemment. Cette propriété doit être prise en compte lorsque l'on expérimente les effets du champ magnétique sur des animaux de laboratoire, de petite taille par rapport à l'homme!

#### Exposition à des champs magnétiques pulsés:

Certaines expérimentations menées à l'étranger, qui exposaient des œufs de poules en incubation à des champs magnétiques pulsés, auraient mis en évidence un taux anormal de tératogénèse chez les embryons. Les champs utilisés avaient des amplitudes de l'ordre du  $\mu\text{T}$ , avec des fronts de montée de 1...2  $\mu\text{s}$ . Par contre, les expérimentations menées à la demande d'EDF au laboratoire de biologie animale de Clermont-Ferrand, également sur des œufs en incubation de poules (et de cailles) mais exposés à des champs sinusoïdaux, n'ont mis aucune sorte d'effet en évidence; l'intensité du champ  $B$  est ici de 3...5 gauss (300...500  $\mu\text{T}$ ). Comparons alors les vitesses de variation  $dB/dt$  dans les deux cas:

$$\text{Champ pulsé} \quad \frac{dB}{dt} \cong \frac{1\mu\text{T}}{1\mu\text{s}} = 1 \text{ T/s}$$

$$\text{Champ alternatif} \quad \frac{dB}{dt} = \omega \sqrt{2} B \\ \cong 0,2 \text{ T/s}$$

En conséquence, les champs pulsés produisent des courants qui, bien que très brefs, ont des amplitudes cinq fois supérieures à celles des champs sinusoïdaux de l'expérience EDF; cet écart apparaît comme un paramètre important de comparaison entre les deux expérimentations, qui portent toutes deux sur la même espèce d'organisme vivant.

#### Action directe d'un champ magnétique sur des substances magnétiques

Dans la matière vivante, toutes les molécules organiques sont diamagnétiques, certaines molécules ( $\text{O}_2$ ) sont paramagnétiques et certaines microstructures présentent des propriétés magnétiques (noyau de l'hémoglobine notamment). Placés dans un champ magnétique, ces molécules ou ces microstructures seront donc soumises à des forces qui vont s'appliquer sur les tissus dans l'environnement immédiat de la structure, et il n'est pas inconcevable que ces pressions mécaniques, surtout si elles sont alternées, puissent entraîner des effets biologiques. Nous allons citer trois exemples où les forces magnétiques semblent être en cause dans les milieux vivants.

#### Les animaux – le sens de l'orientation:

Le sens de l'orientation des oiseaux migrateurs est resté longtemps une énigme. Pour l'expliquer, on a invoqué le guidage par la position du soleil, mais aussi l'influence du champ magnétique terrestre. Or, des recherches récentes ont mis en évidence l'existence de cristaux de magnétite dans la tête des pigeons voyageurs, découverte qui donne à penser que le champ magnétique terrestre joue un rôle important dans le système de navigation de ces oiseaux. Une série d'expériences réalisées avec beaucoup de minutie a permis de confirmer partiellement ces vues, bien que pour l'instant, le mécanisme de perception des variations de magnétisation des cristaux de magnétite par l'animal reste entièrement inconnu. Ces cristaux ont également été trouvés dans l'abdomen des abeilles qui pourraient donc elles aussi, retrouver le chemin de leurs ruches par l'intermédiaire du champ magnétique terrestre. On peut alors imaginer qu'au voisinage immédiat des lignes électriques, le sens de l'orientation de ces animaux puisse être perturbé, encore que cette perturbation n'ait pas jusqu'à présent été démontrée.

#### Les êtres humains – la baguette du sourcier:

Le Professeur Yves Rocard a tenté de montrer, il y a une trentaine d'années, alors qu'il était Directeur du Laboratoire de Physique de l'Ecole Normale Supérieure, que la baguette du sourcier à la recherche d'eau répondait en fait à un mouvement involontaire de la main. Ce mouvement serait consécutif à un influx nerveux qui résulterait lui-même de faibles variations du champ magnétique terrestre. Ces faibles

variations peuvent être dues à un courant d'eau «filtrante», c'est-à-dire une eau qui ne contient que des ions d'un signe donné, les ions de signe contraire étant retenus par les sols traversés par le courant. Or, un flux de charges électriques crée un champ magnétique. Les hypothèses, les calculs et les nombreuses expériences effectuées par le Professeur Rocard pour étayer sa théorie sont consignés dans son ouvrage «Le signal du sourcier».

*Les bactéries magnéto-tactiles:* Certaines bactéries marines, dites magnéto-tactiles, possèdent des alignements de cristaux  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  qui leur permettent de repérer leur trajectoire par rapport à la direction du champ magnétique terrestre.

Ce que nous avons voulu montrer par ces trois exemples est qu'il est tout à fait plausible que le champ magnétique ait un effet sur les organismes vivants élaborés. Mais si effet il y a, il est perçu, consciemment ou non, comme une «information», et ne saurait être considéré comme de nature pathologique, du moins aux faibles intensités de champs magnétiques mis en jeu dans ces phénomènes. Il est par contre concevable – nous ne disons pas «prouvé» – que des champs alternatifs ou pulsés puissent produire des couples de rotation indésirables.

#### Les forces de Laplace

Rappelons qu'une particule chargée  $q$ , animée d'une vitesse  $\mathbf{v}$ , placée dans un champ  $\mathbf{B}$ , est soumise à une force  $\mathbf{F}$  perpendiculaire à  $\mathbf{v}$ :

$$\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Cette force, qui a pour effet de courber la trajectoire de toute particule chargée en mouvement, pourra se manifester dans les milieux biologiques aqueux, par exemple sur les ions solubles participant au flux sanguin ou au flux trans-membranaire induit lors du passage de l'influx nerveux.

Certains auteurs ont ainsi décrit d'importantes modifications de la vitesse de conduction nerveuse, ainsi que des anomalies de l'électro-cardiogramme. Mais ces recherches sont motivées par l'emploi en médecine de champs très intenses de l'ordre du Tesla ou plus, que l'on utilise maintenant en diagnostic RMN (Résonance Magnétique Nucléaire). Mais même dans ces cas de très forts champs, les effets ne sont pas nécessairement patholo-

giques. La formule de Laplace peut s'écrire:

$$F/q = \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

le produit vectoriel apparaissant alors comme créant un champ électrique

$$E = F/q.$$

Traisons l'exemple du flux sanguin dans la crosse aortique à la sortie du cœur. Au moment de la contraction ventriculaire, le débit sanguin atteint 5 l/min, ce qui correspond, dans un vaisseau de 3 cm de diamètre, à une vitesse de 1 m/s. A cet instant, le champ électrique équivalent à la force de Laplace, pour un organisme plongé dans un champ magnétique de 1 T, est de 1 V/m, soit une différence de potentiel de 30 mV sur le diamètre de l'aorte. Cette tension est largement suffisante pour perturber l'ECG, et il est d'ailleurs vérifié que l'anomalie de l'ECG disparaît dès la fin de l'exposition au champ magnétique.

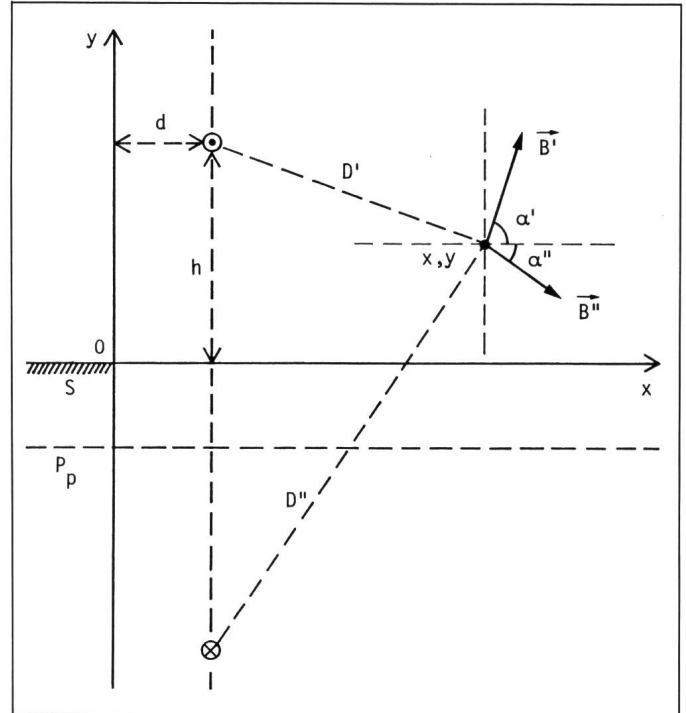
Mais revenons aux champs sinusoïdaux engendrés par les ouvrages électriques. Le même exemple du flux sanguin au moment de la contraction ventriculaire, mais cette fois-ci soumis au champ magnétique de 10  $\mu$ T d'une ligne à 400 kV, conduit à un champ électrique équivalent de 10  $\mu$ V/m, avec une différence de potentiel «aux bornes» de l'aorte de 0,3  $\mu$ V. Ces champs et tensions sont à comparer aux champs transmembranaires et potentiels biologiques naturels, qui sont respectivement de l'ordre de 10<sup>7</sup> V/m et 70 mV. Ce ne saurait donc être que la nature alternative des champs magnétiques industriels qui pourrait faire problème.

## Annexe

Un calcul plus complet du champ magnétique créé par les courants  $i_i$  des  $n$  conducteurs 1...i...n, selon la figure 6, est obtenu par les expressions suivantes:

$$B_x = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_1^n i_i \left[ \frac{-(y-h_i)}{(y-h_i)^2 + (x-d_i)^2} + \frac{y+h_i+2p}{(y+h_i+2p)^2 + (x-d_i)^2} \right]$$

**Figure 6**  
Calcul du champ magnétique d'une ligne



- ⊙ ⊗ conducteur  $i$  avec indication du sens de son courant  $i_i$
- S surface du sol
- $P_p$  plan fictif à la profondeur  $p$

$$B_y = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_1^n i_i \left[ \frac{(x-d_i)}{(y-h_i)^2 + (x-d_i)^2} - \frac{(x-d_i)}{(y+h_i+2p)^2 + (x-d_i)^2} \right]$$

Dans ces formules, les composantes du champ magnétique sont données par

$$B_x' = B' \cos \alpha'$$

$$B_x'' = B'' \cos \alpha''$$

$$B_y' = B' \sin \alpha'$$

$$B_y'' = B'' \cos \alpha''$$

$$B_x = B_x' + B_x''$$

$$B_y = B_y' + B_y''$$

et la profondeur de pénétration  $p$  par

$$p = 1 / \sqrt{\mu \sigma \omega}$$

Avec  $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Vs/Am et

$$\omega = 2\pi f$$

la profondeur de pénétration  $p$  se calcule comme suit

$$p = 356 / \sqrt{\sigma f (Vs/Am)}$$

## Literatur

- [1] Recherches sur les effets biologiques des champs électriques et magnétiques. Revue Gén. Electr. 85(1976), numéro spécial, juillet, p. 1...101.
- [2] G. Gary: Nouvelle méthode de calcul des inductances propres et mutuelles des lignes en présence du sol. CIGRE-Symposium: Courants de forte intensité dans les réseaux dans des conditions normales, d'urgence et en présence de défauts; Bruxelles, 3...5 juin 1985; Rapport 402-05.
- [3] Epidemiological studies relating human health to electric and magnetic fields: criteria for evaluation. IERE-Paper (International Electricity Research Exchange). Paris, UNIPEDE, June 1988.
- [4] J. Cabanes: Les effets biologiques des champs magnétiques; le point de vue du médecin. Bull. ASE/UCS 81(1990)23, p. 23...25.
- [5] C. Gary: Les effets biologiques des champs magnétiques; le problème des limites. Bull. ASE/UCS 81(1990)23, p. 27.

**Note:** Le présent article reprend et approfondit les thèses que l'auteur exposait au séminaire ETG/DE-LRE du 31 janvier 1990 à l'EPF de Lausanne.