

CHAMPS MAGNETIQUES ET SECURITE DU TRAVAIL

P. Blanc, CEA, DRFMC, 38054-Grenoble (oct. 96)

L'étude ci-dessous a pour but de faire le point sur les risques engendrés pour les travailleurs par les différents champs magnétiques, uniformes, non uniformes, statiques ou variables dans le temps. Elle sera divisée en six sections :

- effets des champs magnétiques statiques uniformes,
- effets du gradient d'un champ magnétique statique,
- effets des champs magnétiques lentement variables,
- effets des champs de haute fréquence,
- protections techniques (5e section) et signalisation (6e).

Ces effets ne concernent que les incidences possibles des champs sur la santé des travailleurs ou sur leurs capacités physiques. L'article réunit et synthétise des informations collectées ici où là sans prétendre à l'exhaustivité. Le terme *champ magnétique* sera utilisé à la place de celui, plus rigoureux, d'*induction magnétique*, parce que la plupart des documents de type sécurité l'utilisent avec ce sens. Les unités employées seront soit le Tesla (T), soit le gauss (10^{-4} T).

1 - Effets des champs magnétiques statiques uniformes

a - sur les travailleurs

On peut dire, à notre avis, qu'on n'a pas observé sur l'être humain d'effet pernicieux provoqué de manière indiscutable par des champs magnétiques uniformes continus (ou statiques) de valeur modérée.

On sait cependant que les champs extrêmement intenses provoquent la désagrégation des conducteurs à partir de 100 teslas ($B_m=100$ T) ou un mégagauss (1 MG). Il est donc probable qu'un champ de cet ordre serait mortel, mais on n'en a sans doute pas produit dans d'assez grands volumes ou avec des durées suffisantes pour vérifier cette hypothèse sur des êtres vivants⁽¹⁾.

Dans plusieurs laboratoires, on étudie expérimentalement les effets du champ magnétique sur la matière biologique. Le lecteur intéressé pourra par exemple consulter le compte-rendu d'une conférence sur le sujet tenue aux Houches en 1986⁽²⁾. On pourra y noter l'effet des champs forts (~ 1 T, ceux présents dans les tomographes à RMN) sur la température de la peau chez l'être humain, sur la modification de sa circulation sanguine, sur sa perception des couleurs, ... On a étudié également des effets moins superficiels, comme l'orientation des globules rouges humains dans les champs forts (8T)⁽³⁾. Ces études ne sont pas suffisamment avancées pour qu'on puisse en tirer des conclusions sur les risques de lésions chez l'homme dues à une exposition à des champs forts.

Il n'existe pas en France de réglementation concernant l'exposition des travailleurs aux champs magnétiques ; cependant, il paraît sage de respecter la **prénorme européenne** ENV 50166-1⁽⁴⁾ qui préconise les limites suivantes :

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">- exposition globale et quotidienne : 200 mT (2 kG)- exposition globale temporaire : 2 T (20 kG)- exposition temporaire et localisée aux extrémités : 5 T (50 kG) |
|---|

On entend par "extrémités" les membres et spécialement les pieds et les mains. On remarquera que ces valeurs sont élevées. Il n'a pas été possible d'en trouver la justification. Peut-être provient-elle de la nécessité de conserver un rapport suffisant (20) avec la valeur de désagrégation B_m ? Noter que des tomographes RMN à plus de 25 T sont en projet (NHMFL⁽¹¹⁾, USA) et un aimant de 100 T à vocation scientifique en Europe (projet Euromagtech de la CEE) .

Les porteurs de prothèses ferromagnétiques seront incommodés bien au-dessous de telles valeurs et une limitation bien plus stricte devrait leur être appliquée (quelques fois l'intensité du champ terrestre, environ 1 mT, prescription d'autant plus facile à respecter que les prothèses ferromagnétiques sont devenues très rares). Le cas des porteurs de stimulateurs cardiaques sera étudié dans la section 1c.

1 - On doit noter que la production des champs très intenses ou même le maintien des champs intenses est toujours lié à la mise en œuvre d'énergies importantes, qui, si elles sont mal maîtrisées, peuvent devenir très dangereuses en elles-mêmes (voir §1d, note 6).

2 - Biophysical effects of steady magnetic fields, proceedings of the workshop, Les Houches, 26 fev-5 mars 1986, éd. Springer-Verlag.

3 - Magnetic orientation of red blood cell membranes, Takao Suda & Shoogo Ueno, IEEE trans. on magn. fields, 30, 6, nov.94, 4713.

4 - Cf. par exemple la brochure INRS ED785.

b - sur le public

Bien que cela puisse paraître surprenant par rapport à d'autres normes (par exemple celles sur les rayonnements ionisants ou non-ionisants ...), la prénorme ci-dessus ne prévoit pas des limites plus restrictives pour le public, i.e. pour le personnel autre que celui affecté à des postes de travail exigeant l'emploi de champs magnétiques.

c - sur les porteurs de stimulateurs cardiaques (*pacemakers*)

On admet que les porteurs de stimulateurs cardiaques doivent se tenir éloignés des champs intenses. La raison n'en est cependant pas très simple.

Il est peu probable que les champs magnétiques puissent agir directement sur les circuits électroniques du stimulateur – en tout cas pas sur ceux à base de silicium – ni même sur leur conductibilité.

Les stimulateurs comportent des boucles de conducteurs électriques, soit en sortie, soit en entrée. Des forces électromotrices (f.é.m.) pourraient être induites dans ces boucles lorsqu'elles sont traversées par un champ variable, par exemple si le porteur pivote dans un champ constant. Mais ces f.é.m. restent très faibles ; ainsi un circuit de surface 10 cm^2 pivotant en un quart de seconde dans un champ de 0,1 tesla développe une f.é.m. de $25 \mu\text{V}$. De plus la variation sinusoïdale de cette tension est sans analogie avec celle des signaux cardiaques (pics de fréquence voisine de 70 c/min). Cet effet, théoriquement possible, n'est pas mentionné dans les documents consultés.

Les stimulateurs cardiaques sont de divers types. Ceux de la **première génération** étaient de type *autonome* (ils sont souvent abusivement appelés *asynchrones*) : ils envoyaient au cœur des impulsions à fréquence constante. Ce type d'appareil n'est probablement pas du tout sensible au champ magnétique.

Les stimulateurs de **seconde génération** règlent la fréquence de leurs impulsions sur des données physiologiques, dont la plus importante est la fréquence naturelle des stimuli cardiaques (quand ils existent) ; d'autres informations peuvent être prélevées par l'appareil, comme la pression sanguine, la température ... afin d'adapter la fréquence cardiaque à l'effort fourni par le porteur. Ce sont des stimulateurs *asservis* (*synchrones* dans le langage médical). Ces appareils complexes possèdent la possibilité de fonctionner également en régime autonome. On bascule dans ce régime en plaçant le stimulateur dans un champ magnétique qui agit sur un relais interne magnéto-sensible (lames flexibles). Les fabricants prévoient qu'un champ de 10 à 14 mT selon les auteurs (120-140 G) doit suffire pour passer dans ce régime ; mais cette valeur n'est pas normalisée et, surtout, il n'a pas été défini une valeur maximum sûre permettant de repasser en mode autonome. Donc, avec de tels stimulateurs, un champ magnétique d'un ou de quelques milliteslas peut soumettre le cœur du porteur à des stimulations de fréquence fixe. Or il semble admis que le passage dans ce régime ne devrait s'opérer qu'en présence du médecin traitant.

Cette action ne serait encore pas trop grave, si on n'avait adjoint aux stimulateurs de la **génération actuelle** une autre possibilité, celle de les *reprogrammer* depuis l'extérieur. Un message codé (une suite de bits) porté par une onde radio est capable de modifier tous les paramètres du cycle cardiaque artificiel (fréquence, retards sur les stimuli naturels, rapport cyclique, temps de latence, ...). Or, là aussi, pour modifier le stimulateur, il faut *ouvrir une porte d'accès* au circuit de programmation ; ceci est encore fait par l'application d'un champ magnétique : il s'agit d'ailleurs du même, puisque, pendant la reprogrammation, le cœur fonctionnera en régime autonome. Les appareils reprogrammables sont donc particulièrement vulnérables à la conjugaison champ HF (ou électromagnétique) et champ magnétique statique, puisque l'un ouvre la porte à l'autre et que cet autre peut reprogrammer ou déprogrammer le stimulateur ⁽⁵⁾.

C'est donc surtout cet effet qui oblige les porteurs de stimulateurs à ne pas s'exposer à des champs magnétiques moyennement intenses. On admet que la valeur maximale tolérable est de l'ordre de 1 mT (10 G), soit parce qu'elle est environ 10 fois plus faible que le *champ de basculement*, soit parce qu'elle correspond à peu près à 20 fois celle du champ magnétique terrestre (~ 0,5 gauss en France).

d - sur l'outillage

Les champs magnétiques, même uniformes, peuvent provoquer la rotation de pièces ferromagnétiques, donc de certains outils (si le champ n'est pas uniforme, les effets sont encore plus violents, cf. § 2c). Ces outils devront donc être proscrits dans un travail sous champ magnétique, car les forces engendrées sont suffisamment importantes pour provoquer le lâcher des outils, des accélérations importantes et donc de graves blessures. Les auteurs cités conseillent de se méfier de ces effets à partir de 3 mT (30 G) ⁽⁶⁾ (1 mT pour le NHMFL).

Pour mémoire, certains appareils de mesure de type mécanique (*galvanomètres*, horloges ou *montres* ...), comportent des pièces fabriquées dans des matériaux spéciaux très souvent magnétiques, comme l'*invar* ; ces appareils sont alors

5 - Cf. la publication *Stimulateurs cardiaques* de l'INRS, réf. ND 2014-162-96. Des informations complémentaires ont été obtenues par Internet auprès de la firme Medtronic (Minneapolis, USA). On peut également se référer à la norme européenne NF-EN-50061 de juillet 88 (*sécurité des stimulateurs implantables*), mais elle ne mentionne rien pour l'instant sur l'action des champs magnétiques.

6 - Tout système producteur de champ magnétique est un réservoir d'énergie magnétique souvent très importante. Celle-ci peut parfois être brutalement libérée à la suite de la modification physique d'une condition d'équilibre comme la température (si bobines supraconductrices) ou le déplacement d'une pièce ferromagnétique. La libération de cette énergie peut alors devenir brutale ou même explosive.

sensibles aux champs magnétiques, qui, à faible intensité, faussent leur mesure et, à forte intensité, les magnétisent suffisamment pour qu'ils deviennent inutilisables (exemple : le ressort spiral régulateur des montres). De même, les *tubes électroniques* encore utilisés (écrans cathodiques des téléviseurs ou d'informatique, tubes à rayons X) sont perturbés, voire endommagés ou même détruits (cas des tubes X) par ces champs. Les *cartes magnétiques* (mais pas celles à puce), quant à elles, sont endommagées à partir d'environ 0,1 T (le NHMFL demande de ne pas les exposer à des champs de plus de 0,01 T).

2 - Effets des gradients de champ magnétique

a - sur le personnel

Aucun effet spécial dû aux gradients n'est mentionné dans les documents relatifs à la sécurité des travailleurs. Cependant de nombreuses études scientifiques témoignent d'un effet non négligeable des gradients, même très faibles, sur des animaux. C'est la sensibilité à ce gradient qui serait responsable du sens de l'orientation chez les oiseaux et les insectes, particulièrement chez les abeilles. Là aussi, travaux et conférences attestent de la vitalité des recherches sur le sujet ⁽⁷⁾.

Le Professeur Y. Rocard a montré qu'une fraction importante de la population humaine (50% environ) était sensible à des gradients de champs magnétiques, même faibles, mais latéraux ⁽⁸⁾ et que cette sensibilité rendait compte du *don de sourcellerie*, aptitude à découvrir des sources ou des objets enterrés ou cachés. Des valeurs de quelques gammas par mètre ⁽⁹⁾ sont détectables par les sourciers les plus *doués*. Or, Y. Rocard a constaté l'absence de cette sensibilité chez les personnes – souvent des scientifiques – exposées longtemps à des champs forts. Ce sens nouveau n'a peut-être pas encore été beaucoup exploité chez l'homme, mais il pourrait le devenir. Le souci de sa préservation constitue une raison supplémentaire pour ne pas exposer inutilement des humains à des champs intenses pendant de longues durées.

b - sur les stimulateurs cardiaques

Aucune information n'a été trouvée concernant les effets des gradients magnétiques sur les stimulateurs cardiaques.

c - sur l'outillage

Avec les outils ferromagnétiques, les effets des gradients sont encore plus violents que ceux des champs uniformes (champs d'ailleurs très rares en pratique car ils sont presque toujours accompagnés d'un gradient). Les outils se dirigent vers les zones à champ fort ; ils sont *attirés* par les pôles des aimants. La violence des forces occasionne fréquemment des destructions et des blessures graves aux mains, aux bras, à la tête ... Aussi l'emploi d'outils en matériau non amagnétique doit être totalement prohibé dans un champ magnétique.

3 - Effets des champs magnétiques lentement variables (TBF)

Lorsque le champ magnétique est variable dans le temps, il induit dans l'espace environnant un champ électrique ; la combinaison de ces deux champs constitue le champ électromagnétique, caractérisé en particulier par son aptitude à se propager en véhiculant de l'énergie. Cependant, les effets de ce type de champ seront très différents selon qu'on est placé à faible distance (r) du générateur (*champ proche*, les effets décroissant en $1/r^2$) ou loin de celui-ci (*champ lointain*, les effets décroissant en $1/r$), la distance critique étant de l'ordre de quelques longueurs d'onde (λ).

Lorsque la fréquence F de variation du champ est faible, λ est très grand ; dans les laboratoires, les effets électromagnétiques seront alors faibles devant ceux du champ magnétique pur.

Les effets sur le vivant des champs TBF (très basse fréquence, ELF en anglais) sont mal connus et, semble-t-il, peu importants, sauf pour les fréquences de résonance. Il semble qu'on devrait se méfier :

- de toutes les très basses fréquences en ce qui concerne outillage et matériel, lesquels peuvent être soumis à des forces en résonance avec leurs fréquences propres. Des accélérations importantes peuvent en découler et donc des ruptures ;
- des fréquences dans la gamme 50-90 Hz, voisines de celle de l'influx nerveux humain. Des champs, même faibles, peuvent alors provoquer la *tétanie*, contraction involontaire et imparable des muscles, y compris du muscle cardiaque.

Mentionnons qu'il existe des appareils *médicaux* produisant des champs magnétiques périodiques (fréquence 20 Hz ou plus, moins de 4 mT) dans un but **thérapeutique** ⁽¹⁰⁾, par exemple pour stimuler la réparation d'os fracturés ou de cartilages. Le mécanisme n'est pas clair ; l'action biologique serait due au champ électrique induit in situ par le champ magnétique externe (donc *non invasif*) et il provoquerait des déplacements d'ions à travers les tissus spongieux. Des appareils de ce type ont pourtant été agréés par la très sévère *Fund and Drug Administration*. Plus nombreux encore seraient les appareils acceptés en Europe (en Allemagne ?) pour la réparation de lésions diverses (nerfs, tissus mous).

7 - Cf. : Orientation & navigation, birds, humans and other animals, conference of the royal institute of navigation, Oxford, april 1993.

8 - Voir les ouvrages d'Yves Rocard : le signal du sourcier, Dunod, 1962 ; la science & les sourciers, Dunod, 1991.

9 - 1 gamma vaut 10^{-5} gauss ou un nanotesla.

10 - C. Polk, in The electrical engineering handbook, Richard C. Dorf, CRC Press (1993), p. 2329.

La prénorme ENV 50166-1, déjà citée, prévoit des limites d'exposition professionnelle (8h/jour) assez complexes :

fréquence (Hz)	exposition globale	extrémités
0,1-0,23	1,4 T	3,5 T
0,23-0,36	$(0,32/F)$ T	id
0,36-1	id	$(1,25/F)$ T
1-4	$(0,32/F^2)$ T	id
4-1500	$(80/F)$ mT	id
1500-10000	0,053 mT	0,83 mT

Il n'est pas tenu compte d'une résonnance possible avec l'influx nerveux, les textes mentionnant expressément les valeurs 1,6 et 25 mT comme limites à 50 Hz respectivement pour le corps entier et les extrémités (ces limites ne semblent pas tenir compte des effets thérapeutiques cités dans le paragraphe précédent).

En ce qui concerne les porteurs de prothèses *passives*, aucune contre-indication n'est mentionnée. Cependant, nous pensons qu'il serait sage de se méfier des courants induits dans les prothèses métalliques (même dentaires). Pour les porteurs de *stimulateurs*, l'ACGIH⁽¹¹⁾ conseille de ne pas les exposer à plus de 0,12 mT à 50 Hz, ni de les soumettre aux champs TBF produits par les *portiques de détection* d'armes ou ceux de type anti-*vol* du commerce.

Il existe des règles de même type pour les **champs électriques** (mêmes références). Par exemple, pour un champ statique, la limite d'exposition professionnelle quotidienne est de 14 kV/m et même de 42 kV/m pendant une durée limitée à 2,7 h. Il n'est nul besoin de dire que la plupart des personnes seront incommodées bien au-dessous de telles limites. Pour le champ électrique TBF, la limite est de 30 kV/m jusqu'à 50 Hz (sous une ligne à haute tension, le champ est de 5 à 10 kV/m), puis décroît comme $(1500/F)$ kV/m avec la fréquence F (en Hz) jusqu'à 1500 Hz pour se stabiliser à 1 kV/m aux fréquences supérieures. Il n'est pas fait état de possibilité de résonnance et, en particulier, du risque de *tétanie*. Il est seulement conseillé de ne pas soumettre les porteurs de *stimulateurs* à plus de 1 kV/m.

4 - Effets des champs électromagnétiques HF

a - aspects physiques

Lorsque la fréquence est très élevée, l'interaction entre les champs et la matière est en général décrite dans l'approximation dite du *champ lointain* (la distance est supérieure à la longueur d'onde). Le rapport entre les intensités des champs électrique et magnétique est alors constant et égal à l'impédance du milieu – s'il s'agit du champ magnétique au sens propre – ou à la vitesse c de la lumière, s'il s'agit de l'induction magnétique, que nous avons appelée *champ* jusqu'ici. On remarquera que les limites précédentes fournissent à 10 kHz des valeurs de 1 kV/m et 0,053 mT, dont le rapport est 2.10^7 environ et non c , égal à 3.10^8 m/s (la valeur du champ magnétique limite serait donc trop élevée).

Dans cette situation, le champ – ou *l'onde* – électromagnétique transporte de l'énergie qui peut être déposée sur la peau ou dans des tissus profonds, selon son facteur spectral d'absorption. Les fréquences de vibration des électrons dans les tissus régissent toute cette interaction ; parmi les fréquences les plus dangereuses se trouvent celles de vibration des molécules d'eau vers 2450 MHz. L'absorption est alors très forte ; c'est elle qui permet la cuisson des aliments dans les *four micro-onde*.

Notre civilisation nous fait baigner dans une véritable pollution de champs électromagnétiques : à ceux dus au rayonnement de nos installations électriques, s'ajoutent ceux des émetteurs de radiodiffusion, maintenant très répandus avec les *radios libres*, ceux de télévision, y compris par satellites et maintenant ceux de la *téléphonie cellulaire* (téléphones portatifs). Bien sûr, on doit mentionner également les rayonnements électromagnétiques venus de l'espace, balayant la Terre depuis toujours, mais ils sont d'énergie insignifiante par rapports aux champs domestico-industriels.

b - projet de réglementation

Face à ce déferlement de champs électromagnétiques, une réglementation s'imposait. Elle s'est élaborée dans une concertation internationale, suscitée d'ailleurs par des organismes similaires – parfois même identiques – à ceux qui ont élaboré les normes de protection contre les rayonnements nucléaires ou "ionisants". C'est l'INIRC⁽¹¹⁾, émanation de l'IRPA et sous l'égide de l'OMS, qui s'est chargée d'établir des projets de règlement, appelés *avis* ou **recommandations**. La France (comme d'ailleurs la plupart des pays) n'a pas encore transformé ces recommandations en règlement, mais il serait peu judicieux de les ignorer ou de ne pas les respecter.

11 - INIRC : international non-ionising radiation committee ; IRPA : international radiation protection association ; OMS : organisation mondiale de la santé ; ACGIH : american conference of governmental industrial hygienists. NHMFL : national high magnetic field laboratory, Tallahassee, Floride, USA, référence Internet : www.magnet.fsu.edu/overview/nhmfl_tallahassee.html.

Cette commission a adopté une limite, appelée SAR (*specific absorption rate*), égale à ⁽¹²⁾ :

- 0,4 w/kg en moyenne sur le corps entier et sur 6 minutes ;
- 20 w/kg pour les extrémités (coudes, poignets, pieds, chevilles) ;
- 10 w/kg localement sur toute autre partie du corps.

Ces limites sont applicables :

- dans la configuration du *champ lointain* (pour le *champ proche*, voir la section 3) ;
- pour un travailleur au régime de 8h/jour.

Pour le public, les mêmes normes s'appliquent. Mais, comme on estime qu'il peut être soumis à un champ nocif 24 heures par jour, les valeurs limites ci-dessus sont divisées par 5. On trouvera dans la documentation citée ⁽¹²⁾ les valeurs exactes des champs correspondant à cette SAR en fonction de la fréquence.

L'IRPA en déduit la puissance du rayonnement maximum auquel peut être exposé le corps humain en fonction de la fréquence F :

Gamme de fréquences	10-400 MHz	0,4-2 GHz	2-300 GHz
Limite (w/m ²)	10	$F/0,04$ (F en GHz)	50

En particulier, les fours à micro-onde (comme tous les émetteurs à 2,45 GHz) ne doivent pas rayonner hors de leur enceinte plus que la densité ci-après (des appareils de mesure peu onéreux permettent de vérifier ces valeurs) :



densité de puissance maximum : 5 mw/cm² (à 2450 MHz)

c - stimulateurs cardiaques

Le texte précité ne mentionne pas de précautions spéciales à prendre avec les stimulateurs cardiaques. On rappellera cependant que la combinaison d'un champ magnétique statique supérieur à une centaine de gauss (10 mT) et d'un champ de radiofréquence est capable de modifier la programmation de ces appareils et donc de les mettre hors service.

5 - Protections techniques

Il est théoriquement possible d'interdire la pénétration de ces champs dans une portion de l'espace en entourant d'un *blindage* ou d'un *écran* soit l'espace à préserver soit l'appareil générateur. Cet écran **sépare** les régions avec et sans champ.

Dans le cas du champ électrique, statique ou variable, le blindage est assuré par une paroi conductrice (donc métallique) reliée à la terre. Pour que la protection soit parfaite, le volume à protéger (ou le volume producteur) doit être complètement entouré : on réalise alors une *cage de Faraday*. Sinon, la protection n'est que partielle. La paroi peut être constituée d'un grillage métallique : le champ la traversera un peu et sera significatif sur une distance de 4 à 5 fois la dimension des "trous" du grillage, ce qui est rarement gênant et permet d'utiliser des écrans beaucoup plus légers et moins chers que ceux constitués par des plaques de métal plein.

La protection contre les champs HF est assurée de la même manière, à trois remarques près : primo, puisque leur énergie se propage en ligne droite, si on est loin de l'émetteur, il n'est pas besoin d'*entourer* par un blindage la région à protéger : il suffit qu'aucun de ses points ne puisse "voir" l'émetteur en vision directe ; on augmentera cependant de quelques λ les dimensions de la surface ainsi définie. Deuzio, si on emploie un grillage, sa maille doit être inférieure à $\lambda/2$. Tertio, on devra se souvenir qu'aux hautes fréquences le métal n'est conducteur que sur une faible profondeur, égale à 8 à 10 fois une valeur caractéristique, la *profondeur de peau* δ . Pour les bons conducteurs (Al, Cu, Au, Ag), δ est égale à environ 0,3 mm pour $f=1$ MHz et 6 μ pour 2450 MHz. Si la région ainsi définie n'est pas bonne conductrice, elle absorbe l'onde et s'échauffe ; pour qu'elle n'absorbe pas, il faut que cette surface soit polie et protégée de l'oxydation ; dans les cas extrêmes, on peut être amené à recouvrir l'écran d'une pellicule d'or, lui-même protégé par du rhodium.

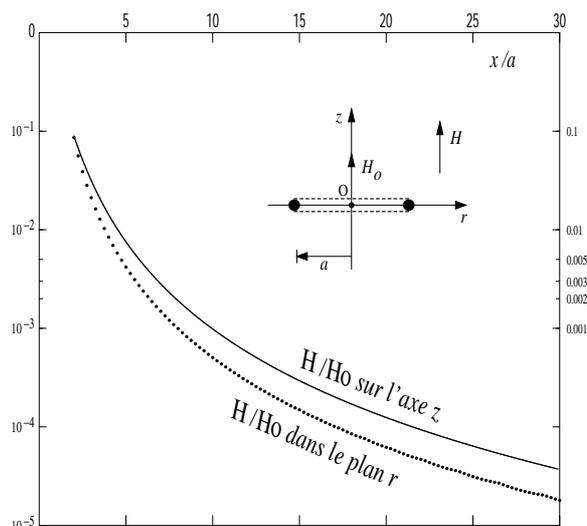
Quant au champ magnétique, on peut s'en protéger en le canalisant avec un matériau ferromagnétique, le moins cher étant le fer. L'atténuation magnétique apportée par des blindages est fonction de leur disposition et de leur épaisseur. En pratique, à moins de vouloir isoler un très petit volume, il faut disposer de grosses quantités de fer dont le prix et celui de ses fixations (ce fer est soumis à de violentes forces) comptent lourdement dans le bilan financier.

La présence de ces écrans perturbe en général le champ dans l'appareil producteur. L'écran électrostatique à la terre impose une équipotentielle modifiant la répartition du champ côté générateur. En haute fréquence, l'onde arrêtée par l'écran est ou bien absorbée (et l'écran s'échauffe) ou bien réfléchi et dirigée dans une autre direction : s'il est placé à faible distance, l'écran peut perturber et même endommager l'émetteur. Ces perturbations sont encore bien plus flagrantes dans le cas de grosses pièces de fer disposées dans un champ magnétique.

¹² - Guidelines on limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields in the frequency range from 100 kHz to 300 GHz, Health Physics, vol 54, n°1, pp. 115-123, janv. 88.

Pour toutes ces raisons, l'emploi de blindages pour diminuer l'intensité d'un champ ne peut être envisagé, sauf exception, qu'au stade de la conception de l'appareil producteur. Dans le cas du champ magnétique, ceci n'est guère possible que si le champ de la source peut être *canalisé* par du fer et seulement pour des champs inférieurs au champ de saturation de ce matériau. Donc, au-delà d'environ un demi-tesla, on n'utilise généralement plus de fer, dont le prix paraît injustifié eu égard aux nuisances connues du champ magnétique.

Sans fer, le champ (de fuite) peut s'étendre sur de grandes distances. On va se donner un moyen de l'estimer. Si le champ est produit par une spire, le champ de fuite peut être évalué à l'aide des courbes ci-contre. Celle en trait plein donne le rapport H_z/H_0 sur l'axe à la distance z du centre O de la spire (rayon a), en fonction de z/a , H_0 étant égal au champ maximum (en O). La courbe en pointillé donne la valeur du rapport H_r/H_0 dans le plan de la spire à la "distance" r/a du centre. On notera que le champ sur l'axe H_z est, à distance égale, environ le double du champ H_r dans le plan Or (en O , sur l'axe et dans le plan radial, le vecteur champ est parallèle à l'axe). Pour une bobine réelle, on peut adopter les mêmes courbes avec un rayon a proche de son rayon maximum (car les effets sont proportionnels à a^3).



6 - Signalisation

Il apparaît nécessaire de signaler au personnel par des moyens appropriés les zones où règnent de tels champs :

- champ magnétique statique : le symbole ou **pictogramme** est un aimant en fer à cheval dans un triangle (dessin en noir sur jaune, figure de gauche, mais sans texte) ;
- champ électromagnétique : le symbole est celui de droite ci-dessous, balise rayonnante, également en noir sur jaune dans un triangle isocèle. Des enceintes ou des blindages devraient toujours abaisser le champ dans la zone accessible à la valeur préconisée par l'INIRC, mais il devrait être nécessaire, surtout à l'intention du personnel technique, d'indiquer la puissance et la fréquence du générateur, le symbole officiel étant beaucoup trop général ;
- il existe également un pictogramme signifiant *zone interdite aux porteurs de stimulateurs cardiaques*. Son dessin est celui du centre (noir et rouge sur fond blanc). Normalement, ces trois pictogrammes ne comportent aucun texte.



On comprendra que, vu la complexité du problème (en particulier à cause de la non-uniformité des champs magnétiques et la diversité des situations personnelles), l'information donnée par ces pictogrammes soit tout à fait insuffisante. Il nous paraît nécessaire de les **renseigner**, en situant le risque annoncé par rapport aux valeurs jugées dangereuses.

Une fois mis en place les écrans ou blindages techniquement acceptables, la **prévention** contre les risques de ces champs devrait être complétée par les précautions suivantes :

- 1 - La signalisation des champs est conforme aux pictogrammes officiels et, de plus, elle est renseignée ;
- 2 - Les limites semi-officielles étant élevées par rapport aux champs rencontrés dans nos installations, peu de mesures d'interdiction sont à prendre à l'égard des travailleurs non appareillés (sauf en ce qui concerne l'outillage) ;
- 3 - On devrait *matérialiser* la zone (peinture, chaîne plastique) où le champ dépasse une valeur critique (1, 3, 100 mT ?) ;
- 4 - Les porteurs de stimulateurs doivent connaître la signification des pictogrammes et savoir, grâce à leur médecin traitant, à partir de quel champ ils courent un risque ; sinon, ils adopteront la valeur de 1 millitesla ;
- 5 - L'ingénieur de sécurité devra signaler le risque magnétique au service médical dans la fiche de nuisances et éventuellement, si en retour il connaît l'existence d'une prothèse, surtout cardiaque, s'entretenir de ce problème avec le porteur. En ce qui concerne les *visiteurs appareillés*, des consignes précises et détaillées devraient, au moment où ils pénètrent dans l'établissement, les informer sur les risques encourus.