

→ *Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) (1,2)*

(1) *Secrétaire Scientifique de l'ICNIRP : Rüdiger Matthes, Bundesamt für Strahlenschutz, Institut für Strahlenhygiene, Ingolstädter Landstrasse 1, D-85764 Oberschleissheim, Allemagne.*

(2) *Pendant la préparation de ce guide, la composition de la Commission était la suivante : M.H. Repacholi, Président (Australie) ; M. Grandolfo, Vice-président (Italie) ; H. Jammet, Président émérite (France) ; U. Bergqvist (Suède) ; J.H. Bernhardt (Allemagne) ; B.F.M. Bosnjakovic (Pays-Bas) ; J.P. Césarini (France) ; L.A. Court (France) ; B. Knave (Suède) ; A.F. McKinlay (Royaume-Uni) ; M.G. Shandala (Russie) ; D.H. Sliney (États-Unis) ; J.A.J. Stolwijk (États-Unis) ; M. A. Stuchly (Canada) ; M.L. Swicord (États-Unis) ; L.D. Szabo (Hongrie) ; T.S. Tenforde (Secrétaire Scientifique de l'ICNIRP jusqu'à mai 1993) (États-Unis) ; A.S. Duchêne (France).*

GUIDELINES ON LIMITS OF EXPOSURE TO MAGNETIC STATIC FIELDS (*)

The International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association (formerly IRPA/INIRC, now ICNIRP - International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection), in cooperation with the Environmental Health Division of the World Health Organization (WHO), developed a health criteria document on magnetic fields within the Environmental Health Criteria Programme (UNEP/WHO/IRPA 1987). This document contains a review of biological effects reported from exposure to static magnetic fields. These guidelines apply to occupational and general public exposure to static magnetic fields. The guidelines do not apply to deliberate exposure of patients undergoing medical diagnosis or treatment.

Contents: preface; scope and purpose; quantities and units; sources and levels; rationale for exposure limits; exposure limits; measurement.

(*) French translation of an article previously published in *Health Physics*, 1994, 66, 1, pp. 100-106.

- non-ionizing radiation
- static magnetic field
- exposure limit ● guidelines

Guide pour l'établissement de limites d'exposition aux champs magnétiques statiques (*)

Le Comité international sur les rayonnements non ionisants de l'Association internationale de radioprotection (IRPA/INIRC, puis ICNIRP : Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants), en collaboration avec la division chargée de la santé environnementale à l'Organisation Mondiale pour la Santé, a rédigé un document définissant les critères sanitaires concernant les champs magnétiques pour le Programme de critères de santé environnementale entrant dans le cadre du Programme pour l'environnement des Nations Unies. Ce document passe en revue les effets biologiques rapportés à la suite d'expositions à des champs magnétiques statiques.

Les présentes recommandations concernent l'exposition professionnelle et publique aux champs magnétiques statiques. Elles ne s'appliquent pas à l'exposition délibérée de patients au cours de procédures de diagnostic ou de traitement médical.

Au sommaire de ce guide : présentation générale, domaine d'application ; grandeurs et unités ; sources et niveaux ; justification des limites d'exposition ; limites d'exposition ; méthodes de mesure.

- rayonnement non ionisant ● champ magnétique statique ● limite d'exposition
- guide

Avant-propos

Le développement de nouvelles technologies mettant en œuvre des champs magnétiques statiques a accru ces dernières années la probabilité d'exposition des personnes à ces champs et soulevé la question de leurs effets potentiels sur la santé. Dans plusieurs pays, les gouvernements ou les autorités responsables ont fixé des limites d'exposition concernant généralement des usages particuliers, notamment l'imagerie par résonance magnétique (IRM) et les accélérateurs de particules pour la physique des hautes énergies. Dans la mesure où les applications des champs magnétiques dans l'industrie et la médecine sont probablement appelées à se multiplier, accroissant ainsi la probabilité d'exposition professionnelle et générale, et compte tenu du nombre croissant de porteurs d'implants en matériaux ferromagnétiques ou d'appareils

électroniques susceptibles d'être affectés par ces champs, une réglementation internationale s'impose.

Le Comité international sur les rayonnements non ionisants de l'Association internationale de radioprotection (IRPA/INIRC), en collaboration avec la division chargée de la santé environnementale à l'Organisation mondiale pour la santé (OMS), a rédigé un document définissant les critères sanitaires concernant les champs magnétiques pour le Programme de critères de santé environnementale, entrant dans le cadre du Programme d'Environnement des Nations Unies (UNEM/WHO/IRPA, 1987). Ce document passe en revue les effets biologiques rapportés à la suite d'expositions à des

(*) Ce document est la traduction d'un article paru dans la revue *Health Physics*, 1994, 66, 1, pp.100-106 et reproduit ici avec l'aimable autorisation de la *Health Physics Society* ; il a été relu, pour la traduction française, par Mmes Herrault et Ganem (INRS) et M. de Sèze (INERIS).

champs magnétique statiques. Associé à des publications plus récentes, il constitue la base scientifique qui motive les présentes lignes directrices.

À l'occasion du 8^e Congrès international de l'Association internationale de radio-protection (Montréal, 18-22 mai 1992), l'IRPA a mis en place une nouvelle organisation scientifique indépendante, la Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP), qui prend la suite de l'IRPA/INIRC. Cette Commission a pour rôle d'étudier les risques potentiellement liés aux différentes formes de rayonnements non ionisants et d'étudier tous les aspects de la protection contre ces rayonnements.

Un premier projet de recommandations a été rédigé par l'IRPA/INIRC et distribué pour commentaires par le directeur exécutif de l'IRPA au comité exécutif et aux sociétés associées le 20 décembre 1991. Les commentaires reçus ont été discutés à l'occasion de la réunion suivante de l'IRPA/INIRC, qui a eu lieu à Vancouver du 7 au 10 mai 1992. Le texte a ensuite été révisé et largement modifié. Les recommandations ont été approuvées lors de la réunion de l'ICNIRP de Neuherberg, en Allemagne, du 7 au 12 mai 1993.

Les Sociétés associées de l'IRPA et plusieurs institutions compétentes et experts ont apporté leurs commentaires au cours de l'élaboration de ce document. Qu'ils soient remerciés de leur collaboration.

Champ d'application et objet

Les présentes recommandations concernent l'exposition professionnelle et publique aux champs magnétiques statiques. Elles ne s'appliquent pas à l'exposition délibérée de patients au cours de procédures de diagnostic ou de traitement médical. À cet égard, le lecteur se reportera au document de l'IRPA/INIRC sur la protection des patients pendant les examens par résonance magnétique (IRPA/INIRC, 1991b).

TABLEAU I
GRANDEURS DES CHAMPS MAGNÉTIQUES STATIQUES ET UNITÉS SI CORRESPONDANTES
- STATIC MAGNETIC FIELD QUANTITIES AND CORRESPONDING SI UNITS

Grandeur	Symbole	Unité ou valeur
Courant	I	ampère (A)
Densité de courant	J	ampère par mètre carré (A.m ⁻²)
Intensité de champ magnétique	H	ampère par mètre (A.m ⁻¹)
Flux magnétique	Φ	weber (Wb) = volt.s = tesla.m ²
Densité de flux magnétique	B	tesla (T) = Wb.m ⁻²
Perméabilité	μ	henry par mètre (H.m ⁻¹)
Perméabilité de l'espace libre	μ ₀	μ ₀ = 4 π x 10 ⁻⁷ H.m ⁻¹

Quantités et unités

À la différence des champs électriques, qui sont liés à la présence d'une charge électrique, les champs magnétiques résultent du mouvement des charges électriques (courant électrique). Ils peuvent exercer une force physique sur les charges électriques, mais uniquement lorsque celles-ci sont en mouvement. Un champ magnétique peut être représenté comme un vecteur et peut se définir de deux manières : soit par la densité du flux magnétique B, soit par l'intensité du champ magnétique H. B et H sont exprimés respectivement en teslas (T) et en ampères par mètre (A.m⁻¹). Dans le vide et dans l'air, B et H sont associés par l'expression :

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (1)$$

La constante de proportionnalité μ₀ de l'équation (1) est appelée perméabilité de l'espace libre (ou d'un quelconque matériau non magnétique). Sa valeur est de : 4 π . 10⁻⁷ et s'exprime en henrys par mètre (H.m⁻¹). Pour décrire un champ magnétique dans l'air ou dans les matériaux non magnétiques (y compris biologiques) selon une approximation adéquate, il suffit donc de préciser soit B, soit H.

Le présent document indique les limites d'exposition en termes de densité du flux magnétique (B).

La grandeur de la force F agissant sur une charge électrique q se déplaçant à une vitesse v perpendiculairement à un flux magnétique de densité B est indiquée par l'expression :

$$F = q \cdot v \cdot B \quad (2)$$

La direction de la force (la force de Lorentz) est déterminée à partir du produit vectoriel de la charge, de la vitesse et de la densité du flux magnétique ; elle est donc toujours perpendiculaire à la direction du flux électrique. De ce fait, une interaction entre un champ magnétique et une charge électrique entraîne un changement de direction du flux de la charge, mais jamais un changement de sa vitesse. Les champs magnétiques n'ont donc pas d'action, mais ils peuvent faciliter la transformation d'une forme d'énergie en une autre.

Il est admis que la densité de flux magnétique est la quantité la plus adéquate pour décrire les effets des champs magnétiques. Le flux magnétique sur une surface donnée est le produit de la surface et de la composante de la densité de flux magnétique normale à sa surface. L'unité de flux magnétique (Φ) est le weber (Wb), qui est égal à 1 T.m².

Le *tableau I* récapitule les grandeurs et les unités utilisées pour la mesure des champs magnétiques.

Les unités SI sont acceptées au niveau international pour exprimer des quantités dans les textes scientifiques (Williamson et coll., 1981). Malheureusement, les chercheurs dans le domaine du magnétisme ont tardé à adopter ce système. Nous présentons donc, dans le *tableau II*, les facteurs permettant une conversion en unités SI de l'ancien système centimètre-gramme-seconde.

Pour un inventaire et une discussion plus complets des concepts, grandeurs,

unités et termes employés en matière de protection contre les rayonnements non ionisants, on se reportera à la publication pertinente de l'IRPA/INIRC (IRPA/INIRC, 1991c).

Sources et niveaux

Le champ magnétique statique naturel de la Terre est d'environ 50 μT . Selon l'emplacement géographique, il varie entre 30 et 70 μT environ. Il est plutôt rare que l'on soit exposé à des champs magnétiques statiques intenses (Grandolfo et Vecchia, 1985 ; Krause, 1986 ; Stuchly, 1986). En dessous des lignes de transport de courant continu (DC) à haute tension (HVDC), le flux est de l'ordre de 20 μT , mais il en existe actuellement peu dans le monde. Dans le futur, l'augmentation de l'exposition à des densités de flux importantes pourrait venir des nouveaux moyens de transport : ainsi, les trains de voyageurs rapides fonctionnant par lévitation magnétique peuvent produire, dans certaines configurations, des densités de flux magnétique de l'ordre de 10 à 100 mT (Chadwick et Lowes, 1992 ; Nagakawa, 1992).

Pour la population générale, les plus fortes expositions sont liées aux examens par résonance magnétique, qu'il s'agisse d'imagerie (IRM) ou de spectroscopie (SRM). Dans l'IRM, la densité de flux magnétique est de l'ordre de 0,15 à 2 T et la durée d'exposition est généralement inférieure à une demi-heure. Des champs magnétiques plus forts sont envisagés pour les SRM et dans d'autres applications encore à l'étude. L'exposition peut également résulter d'autres gestes médicaux,

par exemple pour le maintien en place de certaines prothèses (au niveau dentaire, cervical ou crânien par exemple) ou pour les colostomies. Dans ce cas, toutefois, les champs restent localisés.

Outre les opérateurs des systèmes de résonance magnétique, quelques autres professions sont exposées à des champs magnétiques intenses. On en rencontre dans les technologies des hautes énergies, par exemple dans les réacteurs thermonucléaires, les systèmes magnétohydrodynamiques, les générateurs à supraconduction et les installations de production et de distribution de courant continu. Les laboratoires de recherche utilisant des chambres à bulles, des accélérateurs de particules, des spectromètres à supraconduction ou des séparateurs isotopiques présentent également de fortes densités de champ au voisinage de ces appareils. Des champs magnétiques intenses peuvent également se présenter dans les activités faisant intervenir des processus d'électrolyse, par exemple la production d'aluminium, ainsi que dans la production d'aimants et de matériaux magnétiques.

Justification des limites d'exposition

Mécanismes d'interaction

Les trois mécanismes bien établis par lesquels les champs magnétiques statiques agissent sur la matière vivante sont l'induction magnétique et les interactions magnétomécaniques et électroniques (Tenforde, 1985 ; Bernhardt, 1986a ; UNEP/WHO/IRPA, 1987).

Induction magnétique

Ce mécanisme résulte de deux types d'interaction :

Interactions électrodynamiques avec des électrolytes en mouvement

Les champs statiques exercent des forces de Lorentz sur les porteurs de charge ioniques en mouvement, et produisent ainsi des champs et des courants électriques induits. Cette interaction est à la base des potentiels induits par les champs magnétiques dans le sang circulant, qui ont été étudiés avec des champs à fréquence extrêmement basse statiques et alternatifs.

Courants de Faraday

Les champs magnétiques alternatifs induisent des courants dans les tissus vivants, conformément à la loi de Faraday pour l'induction. Ce mécanisme peut agir aussi dans le cas des champs statiques, lorsque le sujet se déplace dans le champ.

Effets magnétomécaniques

Un champ magnétique statique peut exercer deux types d'effets mécaniques sur les objets biologiques :

Orientation magnétique

Dans un champ statique uniforme, les molécules diamagnétiques et paramagnétiques sont soumises à un couple qui tend à les orienter selon une configuration minimisant leur énergie libre au sein du champ. Cet effet est bien étudié pour les assemblages de macromolécules diamagnétiques ayant une sensibilité magnétique différente sur les principaux axes de symétrie. Cette catégorie de macromolécules comprend les photopigments de la membrane extérieure des bâtonnets rétiens et les hématies falciformes à l'état désoxygéné. Le risque particulier couru par les sujets atteints d'anémie falciforme (thalassémie) doit donc être pris en compte, étant donné l'incidence relativement élevée de cette affection (Wintrobe, 1981).

Translation magnétomécanique

Les champs magnétiques statiques exercent sur les matériaux paramagnétiques et ferromagnétiques une force nette qui tend à provoquer un mouvement de translation. Dans la mesure où la plupart des organismes vivants contiennent peu de matériaux magnétiques, l'effet sur les fonctions biologiques est négligeable. Pourtant, des champs aussi faibles que le champ géomagnétique suffisent à exercer une force sensible sur les particules de

TABLEAU II

FACTEURS DE CONVERSION DES UNITÉS (a)
- CONVERSION FACTORS FOR UNITS (a)

De : à :	T	G	γ	A.m ⁻¹	Oe
T	1	10 ⁴	10 ⁹	7,96 x 10 ⁵	10 ⁴
G	10 ⁻⁴	1	10 ⁵	79,6	1
γ	10 ⁻⁹	10 ⁻⁵	1	7,96 x 10 ⁻⁴	10 ⁻⁵
A.m ⁻¹	1,257 x 10 ⁻⁶	1,257 x 10 ⁻²	1,257 x 10 ³	1	1,257 x 10 ⁻²
Oe	10 ⁻⁴	1	10 ⁵	79,6	1

(a) Symboles : T = tesla (1 T = 1 Wb m⁻²), G = gauss, γ = gamma, A = ampère, m = mètre, Oe = oersted.

magnétite d'origine biologique présentes chez certaines espèces vivantes (Kirschvink et coll., 1985).

Interactions électroniques

Certaines réactions chimiques font intervenir les états intermédiaires des électrons des radicaux. Or, l'interaction Zeeman dans un champ magnétique statique de faible intensité produit un effet sur les états de spin des électrons. Il est cependant probable que la durée de vie des états intermédiaires des électrons dans la matière biologique est suffisamment brève pour que l'action des champs magnétiques ne produise qu'un effet réduit, voire négligeable, sur le rendement des réactions chimiques.

Études biologiques

Plusieurs organismes inférieurs et certains mammifères aquatiques possèdent des récepteurs spéciaux sensibles aux champs magnétiques statiques de faible intensité, par exemple au champ géomagnétique (Grandolfo et coll., 1985 ; Bernhardt, 1986b ; UNEP/WHO/IRPA, 1987 ; Saunders, 1989).

Plusieurs études *in vitro* ont par ailleurs mis en évidence une modification de l'orientation magnétique dans des assemblages de macromolécules tels que la membrane externe des bâtonnets rétinien, les fibres musculaires, les systèmes photosynthétiques, la membrane pourpre des bactéries halophiles et différents cristaux liquides et gels de synthèse. Certaines réactions chimiques faisant intervenir un état intermédiaire des électrons de radicaux pourraient également être sensibles aux champs magnétiques statiques d'intensité moyenne (10 mT par exemple) (Schulten, 1982 ; UNEP/WHO/IRPA, 1987).

Des études sur les souris n'ont mis en évidence aucune anomalie fœtale à la suite de l'exposition à des champs magnétiques jusqu'à 1 T (Mahlum et coll., 1979 ; Sikov et coll., 1979 ; Konermann et Mönig, 1986).

Les données expérimentales actuelles sur l'animal indiquent que les champs magnétiques statiques jusqu'à 2 teslas ne produisent aucun effet significatif sur les nombreux paramètres de développement, de comportement et physiologiques évalués (Tenforde, 1985 ; Miller, 1987 ; UNEP/WHO/IRPA 1987 ; Kowalczyk et coll., 1991).

Selon la théorie, les effets magnétohydrodynamiques pourraient ralentir la circulation sanguine dans les champs magnétiques intenses et provoquer une augmentation de la pression sanguine (élévation de la tension artérielle) (Tenforde et coll., 1983). On estime que cet effet pourrait provoquer une diminution du débit sanguin de quelques points de pourcentage au maximum à 5 teslas, mais il n'a pas été observé à 1,5 T chez l'homme (Shellock et Crues, 1987), ni à 4,7 T dans un mannequin (Budinger, 1992).

Études chez l'homme

Quelques études portant sur des ouvriers travaillant dans la production d'aiguilles permanentes ont mis en évidence différents symptômes subjectifs et anomalies fonctionnelles : irritabilité, fatigue, céphalées, perte d'appétit, bradycardie, tachycardie, hypotension, altérations de l'électroencéphalogramme, démangeaisons, sensations de brûlure ou hypoesthésie (Vyalov, 1967, 1974 ; Roshchin, 1985 ; Paltsev, 1989 ; Syromyatnikov et al, 1989). L'absence d'analyse statistique ou d'évaluation des effets de facteurs de risques physiques ou chimiques dans l'environnement de travail réduit toutefois la valeur de ces rapports et rend leur évaluation difficile. Bien que ces études ne soient pas concluantes, elles suggèrent que les effets à long terme, si tant est qu'il y en ait, sont très subtils puisqu'aucun effet cumulé important n'a été signalé.

Des effets sensoriels ont été rapportés en relation avec les mouvements dans un champ magnétique de 4 T : vertiges, nausées, goût métallique, phosphènes magnétiques lors des mouvements des yeux ou de la tête (Schenck et coll., 1992).

Deux études épidémiologiques portant sur l'état de santé général d'ouvriers exposés de façon chronique à des champs magnétiques statiques n'ont révélé aucun effet significatif sur la santé.

Marsh et coll. (1982) ont étudié les paramètres de santé de 320 ouvriers dans des usines utilisant des cellules d'électrolyse de grandes dimensions pour des opérations de séparation chimique, avec un champ statique dans l'environnement de travail de 7,6 mT en moyenne et 14,6 mT au maximum. De légères modifications de la formule leucocytaire (dans les limites de la norme) ont été relevées dans le groupe exposé par rapport aux 186 témoins. Aucune des modifications transitoires de la

tension artérielle ou de la formule sanguine observées n'a été considérée comme le signe d'un effet nocif significatif de l'exposition aux champs magnétiques.

Budinger et coll. (1984) ont étudié la prévalence des maladies chez 792 salariés des U.S. National Laboratories exposés pendant leur travail à des champs magnétiques statiques. Un groupe témoin a été constitué de 792 salariés non exposés présentant les mêmes paramètres d'âge, de race et de situation socio-économique. L'exposition aux champs magnétiques variait de 0,5 mT pendant de longues durées à 2 T pendant plusieurs heures. Aucune différence statistiquement significative n'a été relevée dans la prévalence de 19 catégories de maladies entre le groupe exposé et le groupe témoin. Aucune différence de prévalence n'a été observée non plus entre un sous-groupe de 198 sujets exposés à 0,3 T ou plus pendant une durée égale ou supérieure à 1 heure et le reste du groupe exposé ou les témoins correspondants.

Rockette et Arena (1983) ont signalé un taux de mortalité par leucémie élevé chez les ouvriers des fonderies d'aluminium. Bien que cette étude épidémiologique rapporte un risque de cancer accru chez les sujets intervenant directement dans la production d'aluminium, activité liée à une exposition à des champs magnétiques statiques importants, rien n'indique aujourd'hui clairement quels facteurs présents dans cet environnement de travail sont responsables de l'effet carcinogène observé. Le processus de réduction de l'aluminium produit du goudron de houille, des fractions volatiles de poix, des vapeurs de fluorures, des oxydes de soufre et du dioxyde de carbone. La présence de particules d'hydrocarbures et peut-être d'autres polluants doit être prise en compte dès lors que l'on cherche à corréler l'exposition aux champs magnétiques et l'augmentation du risque de cancer chez les ouvriers de l'aluminium.

Dans une étude plus récente réalisée par Mur et coll. (1987) sur les ouvriers des fonderies d'aluminium françaises, la mortalité par cancer et la mortalité toutes causes confondues n'étaient pas significativement différentes de celles de la population générale de sexe masculin en France.

Barregård et coll. (1985) ont étudié une cohorte d'ouvriers d'une usine de chlore et de soude dans laquelle les courants continus sous 100 kA, employés pour la production électrolytique de chlore, pro-

duisaient des densités de flux magnétique statique aux postes de travail comprises entre 4 et 29 mT. Aucune différence significative n'a été relevée entre l'incidence constatée et théorique des cancers chez ces ouvriers, avec un recul de 25 ans.

Observations sur l'exposition de la population générale

Il convient de distinguer les limites d'exposition professionnelles et celles concernant la population générale. En effet, la population exposée dans le cadre professionnel se compose de sujets adultes, exposés dans des conditions contrôlées et qui doivent être sensibilisés aux risques potentiels et formés aux précautions adéquates. L'exposition professionnelle est limitée à la durée de la journée de travail et aux années de vie active. Pour sa part, la population générale se compose de sujets de tous âges, dont l'état de santé est variable. Elle peut inclure des individus ou des groupes particulièrement sensibles. Il est fréquent que le public ne soit pas informé de l'exposition ou qu'il ne veuille pas accepter les risques (si faibles soient-ils) associés à celle-ci. Enfin, la population générale peut être exposée jusqu'à 24 heures par jour pendant toute la vie.

Détermination des limites d'exposition

En l'état actuel des connaissances scientifiques, il ne semble pas que l'exposition transitoire à des flux magnétiques statiques, jusqu'à une densité de 2 teslas, produise des effets nocifs sur les principaux paramètres de développement, de comportement et physiologiques des organismes supérieurs.

L'analyse des mécanismes d'interaction établis suggère que l'exposition prolongée à des flux magnétiques de l'ordre de 200 mT ne devrait avoir aucune conséquence pour la santé.

Les mouvements d'un sujet dans un champ de 200 mT créent un courant induit d'une densité comprise entre 10 et 100 mA.m⁻² (dans l'hypothèse d'une boucle de tissu conductrice d'un rayon de 30 cm et d'une conductivité tissulaire de 0,2 S.m⁻¹). On estime que ces densités de courant sont sans conséquences sur le fonctionnement du système nerveux central si la fréquence du champ est inférieure à 10 Hz. Ceci concorde donc avec la restriction de base fixée par l'IRPA/INIRC pour l'exposition à des champs magné-

tiques de 50/60 Hz, à savoir 10 mA.m⁻², et avec la réponse en fréquence supposée de ces effets en dessous de 10 Hz (IRPA/INIRC, 1990a).

Il est possible de calculer les champs électriques et les densités de courant qui seraient induits dans l'aorte et les autres troncs vasculaires du corps humain sous l'action d'un champ de 200 mT. La grandeur maximale du champ électrique induit dans un vaisseau sanguin est égale à nB lorsque la vitesse de circulation du sang, v , est perpendiculaire à la densité de flux magnétique B . En supposant un débit cardiaque de 5100 cm³.min⁻¹ et un diamètre aortique de 1,6 cm, la vitesse moyenne du sang dans l'aorte est de 42 cm.s⁻¹ chez l'adulte. Compte tenu de cette valeur, un champ orthogonal de 200 mT induirait un champ électrique de 84 mV.m⁻¹ au maximum dans la lumière vasculaire. La densité de courant induite dans l'aorte peut être calculée par le produit de la conductivité électrique du sang et du champ électrique induit. Si l'on considère que la conductivité du sang humain est de 0,52 S.m⁻¹ (Tenforde et coll., 1983), la densité maximale du courant induit serait de 44 mA.m⁻² dans un champ de 200 mT. Cette valeur est inférieure à la densité de courant induit à partir de laquelle on peut s'attendre à des effets hémodynamiques ou cardiovasculaires nocifs (Tenforde et coll., 1985).

Il est donc recommandé de fixer la limite d'exposition professionnelle à une moyenne pondérée dans le temps de 200 mT sur la journée de travail, avec un plafond à 2 T. Dans la mesure où les membres ne contiennent pas de gros troncs vasculaires ni d'organes sensibles, une limite de 5 T peut être admise.

La limitation à 200 mT est conservatrice, compte tenu du manque de connaissances sur les effets de l'exposition à long terme. Pour les raisons que nous venons d'exposer, la limite d'exposition de la population générale intègre un facteur de sécurité supplémentaire d'une valeur 5, ce qui établit la limite d'exposition continue à 40 mT.

Perturbation des appareils médicaux implantés

Irnich et Batz (1989) ont étudié les perturbations magnétostatiques de plus de 1200 stimulateurs cardiaques de 18 marques. Ils ont constaté que 87 % des stimulateurs implantés étaient influencés (ramenés à une fréquence de stimulation

fixe) par un flux magnétique de 2 mT, 19,6 % l'étaient à moins de 1 mT et 1,7 % à moins de 0,5 mT, le seuil d'interférence se situant à 0,31 mT. Barbaro et coll. (1991) ont également décrit des résultats similaires.

Compte tenu du risque potentiel lié aux interférences entre les champs magnétiques et les appareils électroniques, on peut recommander que les endroits où la densité de flux magnétique dépasse 0,5 mT soient indiqués par une signalisation appropriée. Il importe d'empêcher les porteurs de stimulateurs cardiaques de pénétrer dans les zones où le champ magnétique serait suffisamment intense pour exposer la plus grande partie du tronc de ces sujets à une densité de flux magnétique supérieure à 0,5 mT.

Il est difficile de donner des recommandations précises sur l'effet des champs magnétiques sur les appareils ou matériaux ferromagnétiques implantés. Les déplacements ou descellements susceptibles de résulter de l'action des champs magnétiques dépendent de plusieurs facteurs, dont l'intensité et le gradient du champ, le degré de ferromagnétisme de l'implant, sa taille, son orientation par rapport au champ (Shellock, 1989 ; Shellock et Curtis, 1991). En fonction de ces facteurs, certains matériaux ferromagnétiques peuvent être influencés par des champs statiques de quelques milliteslas à peine.

Compte tenu du risque potentiel lié au déplacement ou au descellement d'implants ou de matériaux ferromagnétiques (notamment si l'implant se trouve dans une zone potentiellement critique du corps, par exemple près d'une structure nerveuse ou vasculaire importante ou d'un organe vital, ou encore près de l'œil) et du danger que peut créer le déplacement d'objets métalliques dans le champ, on recommandera que les zones où la densité de flux magnétique dépasse 3 mT soient signalées de manière appropriée.

Limites d'exposition

Limites d'exposition professionnelle

L'exposition du corps entier pendant une journée de travail doit être limitée à une densité de flux magnétique moyenne pondérée dans le temps de 200 mT au

maximum. Le maximum d'exposition du corps entier doit être fixé à 2 T. Lorsque l'exposition concerne uniquement les membres, une exposition maximale de 5 T peut être admise.

Population générale

L'exposition continue de la population générale ne doit pas dépasser une densité de flux magnétique de 40 mT.

L'accès occasionnel à des installations dans lesquelles la densité de flux magnétique dépasse 40 mT peut être autorisé, dans des conditions contrôlées et sans dépasser la limite d'exposition professionnelle correspondante.

Observations complémentaires

Les limites définies par le [tableau III](#) peuvent être insuffisantes pour assurer la protection des porteurs de stimulateurs cardiaques, d'implants ferromagnétiques et d'appareils électroniques implantés.

Il y a généralement peu de risques qu'un stimulateur cardiaque soit affecté à une densité de champ inférieure à 0,5 mT. Les porteurs de stimulateurs et de défibrillateurs implantés doivent donc éviter les sites où la densité de flux magnétique dépasse cette valeur. Il existe en outre de nombreux autres appareils électroniques de soutien à différentes fonctions, parfois vitales (prothèses auditives électroniques de l'oreille interne, pompes à insuline, prothèses actives guidées [main, bras ou jambe] et appareils de stimulation musculaire [pour le contrôle du sphincter vésical par exemple]), qui peuvent être affectés par des champs statiques de quelques milliteslas à peine, en particulier lorsque le sujet qui les porte se déplace dans le champ.

Les porteurs d'implants ferromagnétiques doivent demander l'avis de leur médecin. Il n'est pas absolument certain, en particulier, que les clips à anévrismes soient amagnétiques. Il importe donc, dans ces conditions, d'éviter l'exposition aux champs magnétiques de plus de quelques milliteslas, en raison des risques de déformation ou de désinsertion de l'implant.

Les limites recommandées pour l'exposition professionnelle et celle de la population générale sont résumées dans le tableau III.

Mesure

La méthode la plus couramment employée d'évaluation des champs magnétiques utilise une sonde Hall (UNEP/WHO/IRPA, 1987). L'effet Hall peut être expliqué comme le résultat de l'action exercée sur les porteurs de charge par le champ magnétique qui les repousse latéralement en bande. Des charges électriques apparaissent ainsi sur les bords du circuit, ce qui crée un champ électrique Hall transversal. Plusieurs facteurs limitent la précision que l'on peut obtenir, notamment le coefficient thermique de la tension Hall.

Les fluxmètres et les galvanomètres balistiques mesurent directement les variations du flux magnétique à l'aide d'une bobine de recherche, et produisent ainsi une moyenne de la valeur du champ sur le volume de la bobine. Les mesures sont effectuées en déplaçant la bobine dans le champ statique. La géométrie de la bobine est généralement choisie selon la mesure à effectuer (Henrichsen, 1984).

Les méthodes de mesure des champs magnétiques montrent qu'en choisissant la bonne méthode, on peut mesurer les champs avec une précision satisfaisante dans la plupart des situations normales. Les méthodes décrites ici permettent d'obtenir à la fois des mesures par points et des valeurs spatiales intégrées des champs magnétiques statiques.

Les limites d'exposition ont été définies pour un champ homogène. Dans les champs hétérogènes, la densité de flux magnétique moyenne doit être mesurée sur une surface de 100 cm².

Remerciements

Les auteurs remercient l'IRPA, l'Organisation Mondiale de la Santé, le Programme pour l'Environnement des Nations Unies, le Bureau International du Travail et la Commission des Communautés Européennes pour le soutien apporté à l'IRPA/INIRC et à l'ICNIRP.

TABLEAU III

LIMITES D'EXPOSITION AUX CHAMPS MAGNÉTIQUES STATIQUES (a,b,c,d)

- LIMITS OF EXPOSURE TO STATIC MAGNETIC FIELDS

Caractéristiques de l'exposition	Densité de flux magnétique
Exposition professionnelle :	
Journée de travail (moyenne pondérée dans le temps)	200 mT
Plafond	2 T
Extrémités	5 T
Population générale :	
Exposition continue	40 mT

(^a) Attention : ces limites ne suffisent pas nécessairement pour assurer la protection des porteurs de stimulateurs cardiaques et autres appareils électroniques implantés ou des porteurs d'implants ferromagnétiques. La majorité des stimulateurs cardiaques ne risque pas d'être perturbée en dessous de 0,5 mT. Certains implants ferromagnétiques ou appareils électriques (autres que les stimulateurs cardiaques) peuvent être affectés par des champs de quelques milliteslas.

(^b) Si la densité de flux magnétique dépasse 3 mT, il convient de prendre des précautions pour éviter le risque créé par la mise en mouvement des objets métalliques.

(^c) Les montres analogiques, les cartes de crédit, les bandes magnétiques, les disquettes et autres peuvent être détériorés à partir de 1 mT. Il n'en résulte toutefois aucun problème pour la santé humaine.

(^d) Population générale : l'accès occasionnel de la population générale à des installations dans lesquelles la densité de flux magnétique dépasse 40 mT peut être autorisé, dans des conditions contrôlées et sans dépasser la limite d'exposition professionnelle correspondante.

BIBLIOGRAPHIE

- BARBARO V., BARTOLINI P., TARRICONE L.** - Evaluation of static magnetic field levels interfering with pacemakers. *Physica Medica*, 1991, 7, pp. 73-76.
- BARREGÅRD L., JARVHOLM B., UNGETHUM E.** - Cancer among workers exposed to strong static magnetic fields. *The Lancet*, 1985, 2, p. 892.
- BERNHARDT J.H.** - Assessment of experimentally observed bioeffects in view of their clinical relevance and the exposure at work places. In : Bernhardt J.H. (éd.). *Biological effects of static and extremely low frequency magnetic fields*. Munich, MMV Medizin Verlag, 1986a, pp. 157-168.
- BERNHARDT J.H. (éd.)** - Biological effects of static and extremely low frequency magnetic fields. Munich, MMV Medizin Verlag, 1986b.
- BUDINGER T.F.** - Emerging nuclear magnetic resonance technologies : Health and safety. In : MAGIN R.L., LIBURDY R.P., PERSSON B. (éds) - *Biological effects and safety aspects of nuclear magnetic resonance imaging and spectroscopy*. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1992, 649, pp. 1-18.
- BUDINGER T.F., BRISTOL K.S., YEN C.K., WONG P.** - Biological effects of static magnetic fields. In : *Proceedings of the 3rd Annual Meeting of the Society of Magnetic Resonance in Medicine*. Berkeley, CA, Society of Magnetic Resonance in Medicine, 1984, pp. 113-114.
- CHADWICK P.J., LOWES F.I.** - Magnetic fields from transport systems in the U.K. In : *Abstract W-7, 1st World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine*, Lake Buena Vista, FL, 1992, p. 67.
- GRANDOLFO M., VECCHIA P.** - Natural and man-made environmental exposures to static and ELF electromagnetic fields. In : GRANDOLFO M., MICHAELSON S.M., RINDI A. (éds) - *Biological effects and dosimetry of static and ELF electromagnetic fields*. New York and London, Plenum Press, 1985, pp. 49-70.
- GRANDOLFO M., MICHAELSON S.M., RINDI A. (ÉDS.)** - Biological effects and dosimetry of static and ELF electromagnetic fields. New York | Londres, Plenum Press, 1985.
- HENRICHSEN K.N.** - Large scale magnetic field measurement and mapping. In : 8th International Conference on Magnetic Technology. *Journal of Physics*, 1984, 45, pp. 937-942.
- International Radiation Protection Association / International Non-Ionizing Radiation Committee (IRPA/INIRC)** - Review of concepts, quantities, units and terminology for non-ionizing radiation protection. In : DUCHÉNE A.S., LAKEY J.R.A., REPACHOLI M.H. (éds) - *IRPA guidelines on protection against non-ionizing radiation*. New York, Pergamon Press, 1991c, pp. 8-41.
- International Radiation Protection Association / International Non-Ionizing Radiation Committee (IRPA/INIRC)** - Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields. In : DUCHÉNE A.S., LAKEY J.R.A., REPACHOLI M.H. (éds) - *IRPA guidelines on protection against non-ionizing radiation*. New York, Pergamon Press, 1991a, pp. 83-94.
- International Radiation Protection Association / International Non-Ionizing Radiation Committee (IRPA/INIRC)** - Protection of the patient undergoing a magnetic resonance examination. *Health Physics*, 1991b, 61, pp. 923-928.
- IRNICH W., BATZ L.** - Assessment of threshold levels for static magnetic fields affecting implanted pacemakers. Berlin, Federal Office of Health, Report No Fo1-1040-523 El15, 1989 (en Allemand).
- KIRSCHVINK J.L., JONES D.S., MACFADDEN B.J. (éds.)** - Magnetite biomineralization and magnetoreception in organs : A new biomagnetism. New York | Londres, Plenum Press, 1985.
- KONERMAN G., MÖNIG H.** - Studies on the influence of static magnetic fields on prenatal development of mice. *Radiologie*, 1986, 26, pp. 490-497 (en Allemand).
- KOWALCZUK C.I., SIENKIEWICZ Z.J., SAUNDERS R.D.** - Biological effects of exposure to non-ionising electromagnetic fields and radiation. In : *I-Static electric and magnetic fields*. Chilton, UK, National Radiological Protection Board, NRPB-R238, 1991.
- KRAUSE N.** - Exposure of people to static and time variable magnetic fields in technology, medicine, research, and public life : Dosimetric aspects. In : BERNHARDT J.H. (éd.) - *Biological effects of static and extremely low frequency magnetic fields*. Munich, MMV Medizin Verlag, 1986, pp. 57-71.
- MAHLUM D.D., SIKOV M.R., DECKER J.R.** - Dominant lethal studies in mice exposed to direct-current magnetic fields. In : PHILLIPS R.D., GILLIS M.F., KAUNE W.T., MAHLUM D.D. (éds) - *Biological effects of extremely low frequency electromagnetic fields*. *Proceedings of the 18th Hanford Life Sciences Symposium*. Springfield, VA, National Technical Information Service, 1979, pp. 4-84.
- MARSH J.L., AMSTRONG T.J., JACOBSON A.P., SMITH R.G.** - Health effects of occupational exposure to steady magnetic fields. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1982, 43, pp. 387-394.
- MILLER G.** - Exposure guidelines for magnetic fields. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1987, 48, pp. 957-968.
- MUR J.M., MOULIN J.J., MEYER-BISCH C., MASSIN N., COULON J.P., LOULERGUE J.** - Mortality of aluminium reduction plant workers in France. *International Journal of Epidemiology*, 1987, 16, pp. 256-264.
- NAKAGAWA M.** - EMF issues with maglev in Japan. In : *Abstract W-5, 1st World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine*, Lake Buena Vista, FL, 1992, p. 66.
- PALTSEV Y. P.** - Biological effect and hygienic regulation of SMF as a factor of the environment and industrial zone. *Hygiene and Sanitation*, 1989, 10, pp. 55-59 (en Russe).
- ROCKETTE H.E., ARENA V.C.** - Mortality studies of aluminium reduction plant workers : Potroom and carbon department. *Journal of Occupational Medicine*, 1983, 25, pp. 549-557.
- ROSHCHIN V.A.** - Assessment of the local effect of magnetic field on the human organism in the laboratory conditions. *Journal of Occupational Hygiene and Health*, 1985, 7, pp. 33-36 (en Russe).
- SAUNDERS R.D.** - Biological effects of magnetic fields. *Journal of Radiological Protection*, 1989, 9, pp. 53-54.
- SCHENCK J.F., DUMOULIN C.L., REDINGTON R.W., KRESSEL H.Y., ELLIOTT R.T., MCDUGALL I.L.** - Human exposure to 4.0-Tesla magnetic fields in a whole-body scanner. *Medical Physics*, 1992, 19, pp. 1089-1098.
- SCHULTEN K.** - Magnetic field effects in chemistry and biology. *Advances in Solid State Physics*, 1982, 22, pp. 61-83.
- SHELLOCK F.G.** - Biological effects and safety aspect of magnetic resonance imaging. *Magnetic Resonance Quarterly*, 1989, 5, pp. 243-261.
- SHELLOCK F.G., CURTIS J.S.** - MR imaging and bio-medical implants, materials, and devices : An updated review. *Radiology*, 1991, 180, pp. 541-550.
- SHELLOCK F.G., CRUES J. V.** - Temperature, heart rate, and blood pressure changes associated with clinical MR imaging at 1.5 T. *Radiology*, 1987, 163, pp. 259-262.
- SIKOV M.R., MAHLUM D.D., MONTGOMERY L.D., DECKER J.R.** - Development of mice after intrauterine exposure to direct-current magnetic fields. In : PHILLIPS R.D., GILLIS M.F., KAUNE W.T., MAHLUM D.D. (éds) - *Biological effects of extremely low frequency electromagnetic fields*. *Proceedings of the 18th Hanford Life Sciences Symposium*. Springfield, VA, National Technical Information Service, 1979, pp. 462-473.
- STUCHLY M.A.** - Human exposure to static and time-varying magnetic fields. *Health Physics*, 1986, 51, pp. 215-225.
- SYROMYATNIKOV Y.P., ROSHCIN V.A., SURKOVA T.P.** - Several biological effects of SMF of various strength. *Journal of Occupational Hygiene and Health*, 1989, 10, pp. 16-19 (en Russe).
- TENFORDE T.S.** - Biological effects of stationary magnetic fields. In : GRANDOLFO M., MICHAELSON S.M., RINDI A. (éds) - *Biological effects and dosimetry of static and ELF electromagnetic fields*. New York | Londres, Plenum Press, 1985, pp. 93-128.
- TENFORDE T.S., GAFFEY C.T., RAYBOUM M.S.** - Influence of stationary magnetic fields on ionic conduction processes in biological systems. In : DVORAK T. (éd.) - *Proceedings of the 6th Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, 1985, pp. 205-210.
- TENFORDE T.S., GAFFEY C.T., MOYER B.R., BUDINGER T.F.** - Cardiovascular alterations in Macaca monkeys exposed to stationary magnetic fields : Experimental observations and theoretical analysis. *Bioelectromagnetics*, 1983, 4, pp. 1-9.
- United Nations Environment Programme, World Health Organization, International Radiation Protection Association (UNEP/WHO/IRPA)** - Environmental Health Criteria 69. Magnetic fields. Genève, OMS (World Health Organization), 1987.
- VYALOV A.M.** - Magnetic fields as an environmental factor. *Vestnik*, 1967, 8, pp. 52-58.
- VYALOV A.M.** - Clinico-hygienic and experimental data on the effects of magnetic fields under industrial conditions. In : KHOLODOV Y.A. (éd.) - *Influence of magnetic fields on biological objects*. Springfield, VA, National Technical Information Service, 1974, Report no. JPRS 63038, pp. 163-174.
- WILLIAMSON S.J., KAUFMAN L.** - Biomagnetism. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1981, 22, pp. 29-202.
- WINTROBE M.M.** - Clinical hematology. Philadelphia, PA, Lea & Febiger, 1981.