

# POINT DE REPÈRE

## LIGNES DIRECTRICES RELATIVES AUX LIMITES D'EXPOSITION AUX CHAMPS MAGNÉTIQUES STATIQUES

► Commission internationale  
de protection contre les rayonnements  
non ionisants (ICNIRP)

Cet article est la traduction de *Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields* publié par l'ICNIRP et l'Annexe est une traduction de *Facts sheet on the guidelines on limits of exposure to static magnetic fields* publié dans *Health Physics*.

Tous deux sont reproduits avec l'aimable autorisation de l'ICNIRP.

La traduction française a été réalisée par Martine Bloch, INRS, département Etude, valorisation et assistance documentaires et relue par Jean-Pierre Servent, INRS, département Expertise et conseil technique.

Ce document est une mise à jour de la ND 2184-190-03.

Le développement rapide des technologies industrielles et médicales mettant en œuvre des champs magnétiques statiques a accru ces dernières années l'exposition des personnes à ces champs et donné lieu à un grand nombre d'études relatives à leurs effets potentiels sur la santé. Dans le cadre de la série « Critères d'hygiène de l'environnement », l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a récemment publié une monographie relative aux champs électriques et magnétiques statiques (OMS, 2006). Ce document, qui passe en revue les effets biologiques rapportés à la suite d'expositions à des champs magnétiques statiques, constitue, avec d'autres publications [Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) 2003, McKinlay et al. 2004, et Noble et al. 2005, notamment], la principale source de données scientifiques utilisée pour la rédaction des présentes lignes directrices [qui remplacent celles publiées en 1994 (ICNIRP 1994)].

### DOMAINE D'APPLICATION ET OBJET

Les présentes lignes directrices s'appliquent à l'exposition professionnelle et à l'exposition du public aux champs magnétiques statiques. Elles ne s'appliquent pas à l'exposition délibérée de patients au cours d'actes de diagnostic ou de traitement médical. On se reportera sur ce point au document de l'ICNIRP sur la protection des patients dans le cadre de l'imagerie par résonance magnétique (IRM) (ICNIRP 2004, ICNIRP en préparation).

### GRANDEURS ET UNITÉS

Alors que les champs électriques sont liés à la présence de charges électriques, les champs magnétiques résultent du mouvement physique des charges électriques (courant électrique). Les champs magnétiques peuvent exercer des forces physiques sur les charges électriques, mais uniquement lorsque celles-ci sont en mouvement. Un champ magnétique peut être représenté par un vecteur ; il est défini soit par la densité de flux magnétique  $B$ , exprimée en teslas (T), soit par l'intensité du champ magnétique  $H$ , exprimée en ampères par mètre ( $A.m^{-1}$ ). Dans le vide et, avec

une bonne approximation, dans l'air,  $B$  et  $H$  sont associés par l'expression :

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

La constante  $\mu_0$  de l'équation (1) est appelée perméabilité de l'espace libre. Sa valeur est de  $4 \pi \times 10^{-7}$ , exprimée en henrys par mètre ( $H.m^{-1}$ ). Pour décrire un champ magnétique dans l'air ou dans les matériaux non magnétiques (y compris les matériaux biologiques) avec un degré de précision satisfaisant, il suffit donc de spécifier l'une des deux grandeurs  $B$  et  $H$ .

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 :

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

La direction de cette force (appelée force de Lorentz) est déterminée par le produit vectoriel de la vitesse de la charge et de la densité de flux magnétique ; elle est donc toujours perpendiculaire à la direction du flux de la charge 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 statiques ne transfèrent donc pas d'énergie aux tissus.

Il est admis que la densité de flux magnétique, mesurée en teslas, est la grandeur la plus appropriée pour décrire les effets des champs magnétiques. Le flux magnétique à travers une surface donnée est le produit de l'aire de cette surface et de la composante de la densité de flux magnétique normale à cette surface.

Le [Tableau 1](#) récapitule les grandeurs et les unités utilisées pour la mesure des champs magnétiques.

Il est bien établi que les unités du système international (SI) doivent être utilisées pour exprimer les grandeurs physiques dans les textes scientifiques. Pour un aperçu plus complet des concepts, grandeurs, unités et termes employés en matière de protection contre les rayonnements non ionisants, on se reportera à la publication de l'ICNIRP sur ce thème (ICNIRP 2003).

**TABLEAU 1**

**Grandeurs et unités du système si utilisées pour représenter les champs magnétiques statiques**

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	$\Phi$	weber (Wb ou tesla. $m^2$ )
Densité de flux magnétique	B	tesla (T) Wb. $m^{-2}$
Perméabilité	$\mu$	henry par mètre ( $H.m^{-1}$ )
Perméabilité de l'espace libre	$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7} H.m^{-1}$

### SOURCES D'EXPOSITION

Le champ magnétique statique naturel de la Terre, de l'ordre de  $50 \mu T$ , varie selon les lieux entre  $30$  et  $70 \mu T$  environ. Sous les lignes de transport d'énergie en courant continu à haute tension, on relève des densités de flux magnétique de l'ordre de  $20 \mu T$ . Dans les années à venir, l'augmentation de l'exposition à des densités de flux importantes pourrait venir des technologies mises en œuvre dans le domaine des transports : ainsi, les trains à grande vitesse fonctionnant par sustentation magnétique peuvent produire à proximité du moteur des densités de flux magnétique relativement élevées. Toutefois, qu'il s'agisse de trains à sustentation magnétique ou de trains électriques conventionnels, les champs à l'intérieur des wagons sont relativement faibles ( $< 100 \mu T$ ), mais des champs localisés de l'ordre de plusieurs mT peuvent résulter, au niveau du sol, de la présence d'inducteurs sous le plancher des wagons voyageurs (OMS 2006 ; ICNIRP 2008). Les autres sources de champs magnétiques statiques dans l'environnement domestique ou professionnel sont notamment les petits aimants permanents équipant toutes sortes d'objets (pinces, fermoirs de sacs, boutons, colliers ou bracelets, ceintures, jouets magnétiques, etc.), qui génèrent un champ statique local de  $0,5$  mT.

Dans la population générale, les plus fortes expositions sont liées aux applications médicales de la résonance magnétique, utilisée soit à des fins diagnostiques soit, de plus en plus, pour guider les professionnels lors d'interventions chirurgicales. Basées sur le phénomène de résonance magnétique nucléaire, ces applications comprennent l'IRM (imagerie) et la SRM (spectroscopie). Dans ce cadre, la densité de flux magnétique se situe entre  $0,15$  et  $3$  T et la durée d'exposition est généralement

inférieure à une heure, mais atteint parfois quelques heures (Gowland 2005). Les gestes médicaux sous IRM, permettant un contrôle en temps réel de l'intervention, sont de plus en plus courants. Ces gestes se traduisent par une exposition professionnelle accrue du personnel médical (chirurgiens, radiologues, infirmiers, techniciens), parfois présent plusieurs heures dans le champ magnétique. Le personnel peut également être fortement exposé dans les situations d'urgence où il doit se tenir tout près du patient. A cela s'ajoutent des expositions de courte durée lors du positionnement des patients ou de leur sortie de l'installation de résonance magnétique. Enfin, la fabrication et la maintenance des systèmes de résonance magnétique donnent lieu à des expositions professionnelles à de forts champs magnétiques statiques.

L'IRM fonctionnelle est aujourd'hui largement utilisée dans la recherche universitaire et médicale pour explorer les fonctions du cerveau humain. Des systèmes faisant appel à des champs magnétiques relativement forts, jusqu'à  $10$  T, sont actuellement utilisés par divers organismes de recherche dans le monde ; ils font l'objet d'une procédure spéciale d'autorisation par les autorités. L'exposition peut également résulter d'autres gestes médicaux, tels que l'utilisation d'aimants pour le maintien de prothèses, par exemple, ou la navigation magnétique, application dans laquelle des aimants permanents guident la pointe d'un cathéter cardiaque. Dans ce cas, toutefois, les champs restent localisés.

On rencontre des champs magnétiques intenses dans les technologies de hautes énergies : réacteurs thermonucléaires, systèmes magnétohydrodynamiques ou générateurs à supraconduction, par exemple. Dans les laboratoires

de recherche, on peut observer de fortes densités de champ au voisinage d'appareils tels que les chambres à bulles, les accélérateurs de particules, les spectromètres à supraconduction ou les séparateurs isotopiques. On trouve aussi des champs magnétiques intenses dans les activités faisant intervenir des processus d'électrolyse, comme la production de chlore ou d'aluminium, avec des expositions allant de quelques milliteslas pendant la majeure partie du temps de travail jusqu'à quelques dizaines de milliteslas en exposition de pointe, ainsi que dans la production d'aimants et de matériaux magnétiques.

## LES DONNÉES SCIENTIFIQUES DISPONIBLES

### MECANISMES D'ACTION

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 électro-

#### Induction magnétique

Ce mécanisme résulte de deux types d'interactions :

■ Interactions électrodynamiques avec des électrolytes en mouvement

Les champs statiques exercent des forces de Lorentz sur les porteurs de charge ionique 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 fait l'objet d'études théoriques (Kinouchi et al. 1996). Les auteurs ont émis l'hypothèse que le nœud sino-atrial du cœur, qui contrôle le rythme cardiaque, pourrait être la région la plus sensible au courant. Ils ont calculé que, pour un champ de 5 T, la densité de courant dans cette région est de l'ordre de  $100 \text{ mA}\cdot\text{m}^{-2}$ , soit près de 10 % du courant endogène maximal résultant de l'activité électrique du cœur, et atteint près de 20 % de celle-ci lorsque le champ est de 10 T. Une évaluation précise des effets des champs électriques sur la fonction cardiaque, fondée sur une modélisation informatique

de l'électrophysiologie cardiaque, indique que, s'il est peu probable que des champs jusqu'à 8 T affectent la fréquence et le rythme cardiaque, cela n'est pas nécessairement le cas des champs plus intenses (Holden 2005).

■ Champs et courants électriques induits

Les champs magnétiques alternatifs induisent dans les tissus vivants des courants électriques, selon la loi de Faraday sur l'induction. Ce mécanisme peut intervenir aussi dans le cas des champs statiques, lorsque le sujet se déplace dans le champ. Un déplacement suivant un gradient de champ, en particulier, ou un mouvement de rotation, que ce soit dans un champ uniforme ou dans un gradient de champ, se traduit par un différentiel de l'influence magnétique sur les charges électriques présentes induisant un courant électrique, ce qui n'est pas le cas lors d'un déplacement linéaire du corps dans un champ statique uniforme. En cas de déplacement linéaire dans un gradient de champ, les courants induits et les champs électriques correspondants augmentent avec la vitesse du mouvement et l'amplitude du gradient. Les calculs suggèrent que ces champs électriques induits seraient non négligeables lors d'un déplacement usuel autour d'un champ ou dans un champ  $> 2\text{-}3 \text{ T}$  (Crozier et Liu 2005), et pourraient être à l'origine des nombreux cas de vertige, nausées et magnétophobènes signalés par des patients, des volontaires ou des opérateurs évoluant dans ce type de champ (Schenk et al. 1992 ; Chakeres et de Vocht 2005 ; de Vocht et al. 2006b). La mesure des champs électriques de surface induits in situ par des déplacements types comme la marche ou des mouvements de rotation dans le champ magnétique présent à proximité d'un scanner IRM corps entier de 3 T a donné des valeurs de 0,15, 0,077 et 0,015  $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$  au niveau du haut de l'abdomen, de la tête et à travers la langue respectivement (Glover et Bowtell 2008). Un champ maximal de 0,30  $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$  a été mesuré au niveau de la poitrine. Il faut noter que la vitesse de déplacement n'était pas indiquée dans cette étude. Pour un corps entrant à la vitesse constante de 0,5  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  dans un aimant de 4 T, Crozier et Lim (2005) ont estimé l'intensité maximale du champ électrique induit dans le corps à 2  $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$  environ, ce qui correspond à peu près au seuil de stimulation des nerfs périphériques dans la gamme de fréquences 10 Hz – 1 kHz (ICNIRP 1998). Il faut

toutefois noter que les fréquences liées aux mouvements du corps sont probablement inférieures à 10 Hz, fréquence en-deçà de laquelle une accommodation a pour effet de réduire l'excitabilité électrique du tissu nerveux, du fait d'une lente inactivation des canaux sodium sensibles aux champs électriques (Bezanilla 2000). Les fréquences de translation et de rotation de la tête lors de la marche, par exemple, varient entre 0,4 et 4 Hz (Grossman et al. 1988, Pozzo et al. 1990 ; MacDougall et More 2005).

#### 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 paramagnétiques sont soumises à un couple qui tend à les orienter selon une configuration réduisant leur énergie libre au sein du champ. Cet effet est bien étudié également pour les assemblages de macromolécules diamagnétiques ayant des susceptibilités magnétiques différentes sur leurs principaux axes de symétrie. On considère généralement que ces forces sont trop faibles pour affecter le matériel biologique *in vivo*, compte tenu des très faibles niveaux de susceptibilité magnétique, de l'ordre de  $10^{-5}$  (Schenk 2000). Cependant, l'orientation et la migration de certaines espèces animales feraient appel à des informations directionnelles liées au champ magnétique terrestre (Kirschwink et al. 2001 ; OMS 2006). De plus, il a été établi que les champs magnétiques statiques de forte intensité ( $> 17 \text{ T}$ ) induisent une réorientation de l'appareil mitotique, modifiant, par exemple, l'orientation des plans de clivage chez l'embryon de grenouille durant les trois premières phases de la mitose (Valles et al. 2002).

■ Translation magnétomécanique

Dans les champs magnétiques statiques à gradient, les matériaux diamagnétiques et paramagnétiques subissent une force de translation. La direction de cette force est identique ou opposée à celle du gradient, selon qu'il s'agit, respectivement, de matériaux paramagnétiques ou diamagnétiques. Cette force est proportionnelle au produit de la densité du flux magnétique (B) et de son gradient ( $\text{dB}/\text{dx}$ ). La force exercée sur des objets ferromagnétiques tels que des outils constitués d'un métal à forte suscepti-

bilité magnétique ( $> 1$  pour le fer et certains types d'acier) comporte un danger lié à leur accélération dans des champs magnétiques de fort gradient. Dans le cas des matériaux biologiques, cette force est de même niveau que la force de gravité lorsque  $BdB/dx > 1\ 000\ T^2.m^{-1}$  (OMS 2006). Il a été établi qu'un aimant de 8 T ayant un gradient de  $50\ T.m^{-1}$  peut provoquer la formation d'un creux dans l'eau d'une cuve horizontale disposée transversalement à l'aimant : l'eau est repoussée à l'extrémité de la cuve qui se trouve à l'extérieur de l'aimant (Ueno et Iwasaka 1994). L'effet à 10 T équivaut à un changement de pression de moins de 40 mm de  $H_2O$  entre l'intérieur et l'extérieur de l'aimant, ce qui ne devrait pas suffire à affecter le flux sanguin systémique chez l'homme (Schenk 2005). Cependant, Ichioka et al. (2000) ont observé une réduction du flux sanguin cutané lorsqu'un champ magnétique statique de 8 T était appliqué au corps entier chez le rat ; le produit de la densité de flux magnétique et du gradient de champ variait entre 200 et  $400\ T^2.m^{-1}$  selon l'axe longitudinal du corps du rat.

### Interactions avec le spin des électrons

Certaines réactions métaboliques font intervenir un état intermédiaire comportant une paire de radicaux habituellement à l'état de singlets, le spin de l'un des électrons non appariés étant antiparallèle au spin de l'autre (Schulten 1982 ; McLauchlan et Steiner 1991 ; Grissom 1995 ; Nagakura et al. 1998 ; Hore 2005 ; OMS 2006). Ces paires de radicaux à spins corrélés se recombinaient pour former des produits de réaction ; l'application d'un champ magnétique affecte la vitesse et l'ampleur de la conversion des paires de radicaux à l'état de triplets (spins parallèles), état dans lequel une recombinaison n'est plus possible. Bien que l'expérimentation ait mis en évidence ce type d'effets dans des systèmes biochimiques (Eveson et al. 2000 ; Liu et al. 2005), leur impact biologique demeure inconnu. Selon Ritz et al. (2000), le « mécanisme des paires de radicaux » pourrait être celui qui permet aux animaux, en particulier aux oiseaux, d'utiliser le champ magnétique terrestre comme source d'information pour se diriger lors des migrations, et certaines données expérimentales vont dans ce sens (Ritz et al. 2004).

## ETUDES IN VIVO ET IN VITRO

Une série d'études ont été menées afin de mettre en évidence des réponses biologiques à des champs magnétiques statiques, pour des densités de flux allant de quelques milliteslas à plusieurs teslas. Ces études ont fait l'objet de revues de synthèse par l'ICNIRP (2003), McKinlay et al. (2004), Miyakoshi (2005), Noble et al. (2005) et l'OMS (2006). Leurs principales conclusions sont résumées ci-après.

### ETUDES DE LABORATOIRE SUR DES SYSTÈMES IN VITRO

Différents niveaux de l'organisation biologique à l'échelle cellulaire ont été étudiés, y compris sur des systèmes acellulaires (membranes isolées, enzymes, réactions biochimiques) et divers modèles cellulaires (utilisant soit des bactéries soit des cellules de mammifères). Les critères d'évaluation comprenaient l'orientation de la cellule, la croissance cellulaire, l'activité métabolique de la cellule, la physiologie de la membrane cellulaire et l'expression génique.

Des effets négatifs et positifs ont été rapportés pour tous ces critères. Ces effets, assez divers, ont été observés après exposition à une large gamme de densités de flux magnétique, allant jusqu'à 8 T. Des seuils ont été établis pour certains effets, mais d'autres études faisaient état de réponses non linéaires, sans valeur seuil nette. Cependant, ces réponses ne sont pas clairement établies. L'effet décrit précédemment sur l'appareil mitotique (Valles et al. 2002) correspond à un ensemble de données plus cohérent, et confirme des observations antérieures de la même équipe (Denegre et al. 1998).

En ce qui concerne les effets sur les réactions métaboliques médiées par les radicaux, les résultats des études menées à ce jour indiquent une faible probabilité de survenue d'effets majeurs ayant une incidence physiologique, ou d'effets mutagènes à long terme liés à une modification des concentrations ou des flux de radicaux libres induite par les champs magnétiques (Hore 2005).

Quelques études ont porté sur la génotoxicité (Miyakoshi 2005). Elles

n'ont pas mis en évidence d'effets génotoxiques ou épigénétiques dus à l'exposition aux champs magnétiques statiques jusqu'à 9 T, à l'exception d'une étude sur des souches bactériennes présentant des déficiences de leur système de réparation (Zhang et al. 2003). Les études combinant exposition aux mutagènes et aux champs magnétiques statiques ont montré une modification des effets de certains des mutagènes testés, mais sans qu'il soit possible d'établir un effet champ-dépendant.

Les modèles cellulaires ou acellulaires ne fournissent guère de données concluantes quant à des effets biologiques nocifs d'une exposition à des champs magnétiques de densité de flux allant jusqu'à plusieurs teslas.

### ETUDES DE LABORATOIRE CHEZ L'ANIMAL

Un grand nombre d'études ont porté sur les effets des champs magnétiques statiques chez l'animal (Saunders 2005). Les réponses les plus cohérentes observées dans les études de comportement semblent indiquer que le fait de se déplacer dans des champs de l'ordre de 4 T et plus provoquerait chez des rongeurs de laboratoire des réactions d'aversion et un évitement conditionné (Weiss et al. 1992 ; Nolte et al. 1998 ; Houpt et al. 2003). Ces effets résulteraient d'interactions avec l'appareil vestibulaire (Snyder et al. 2000). Pour des champs de l'ordre de 2 T ou inférieurs à 2 T, cependant, les études de laboratoire fournissent peu d'éléments convaincants quant à d'éventuels effets de l'exposition sur l'apprentissage ou sur les réponses conditionnelles ou non à divers stimuli (Trzeciak et al. 1993). Ces résultats concordent avec ceux d'études expérimentales sur l'excitabilité électrique de tissus nerveux exposés à des champs magnétiques statiques, qui n'ont pas permis d'établir d'effet significatif jusqu'à 2 T (Gaffey et Tenforde 1983 ; Hong et al. 1986).

Un effet bien établi de l'exposition d'animaux à des champs magnétiques statiques supérieurs à 0,1 T environ est l'induction de potentiels dans le flux sanguin au niveau du cœur et des gros vaisseaux du système circulatoire central (Gaffey et Tenforde 1981 ; Tenforde et al. 1983). Ce type d'effet est également bien documenté chez l'homme (voir ci-dessous) mais n'a été associé à aucun effet indésirable dans les études sur des

volontaires. La présence de ces tensions induites a été démontrée par des électrocardiogrammes chez des rongeurs, chiens, babouins et singes lors d'expositions de plusieurs heures pendant plusieurs jours à des champs allant jusqu'à 2 T (Tenforde 2005). Cependant, leur impact sur la santé reste mal connu. Un grand nombre de mesures chez le chien et le singe exposés à des champs de 1,5 T n'ont pas permis de mettre en évidence de modifications du débit sanguin, de la pression sanguine ou de la dynamique cardiovasculaire (Tenforde et al. 1983). Des expositions de plusieurs heures à un champ de 8 T n'avaient pas d'effet sur la fonction cardiovasculaire chez le porc (Kangarlu et al. 1999). Plusieurs autres études sur des rongeurs exposés à des champs allant de quelques milliteslas à 10 T n'ont signalé que des changements mineurs dans des paramètres cardiovasculaires tels que la pression ou le débit sanguins (Ichioka et al. 2000 ; Okano et al. 2005, Okano et Ohkubo 2006). Toutefois, les critères d'évaluation adoptés étaient relativement réactifs, et sensibles à des facteurs de confusion tels que l'anesthésie, et il n'est pas possible de tirer de conclusions définitives de ces études tant que les effets décrits n'auront pas été reproduits de façon indépendante.

Il n'a pas été établi que l'exposition à des champs statiques jusqu'à 1 T ait un effet sur la croissance fœtale ou le développement postnatal chez la souris (Sikov et al. 1979 ; Konermann et Monig 1986). D'autres études font état de l'absence d'effet sur le développement fœtal de la souris après une exposition de courte durée (2-7 j) à des champs de 4,7 T (Okazaki et al. 2001) et 6,3 T (Murakami et al. 1992) au cours de l'organogénèse.

Quelques études ont porté sur les éventuels effets génotoxiques ou cancérigènes des champs magnétiques statiques chez l'animal (Bellossi 1984, 1986 ; Mevissen et al. 1993). A ce jour, aucune étude portant sur l'exposition durant toute la vie n'a été conduite pour évaluer l'induction ou la promotion de cancers par les champs magnétiques statiques. Il n'est pas possible, sur la base de l'expérimentation animale, de formuler de conclusions sur ces critères spécifiques d'évaluation ni, plus généralement, sur les effets sur la santé à long terme.

Diverses autres cibles ont été étudiées, comme les systèmes hématopoïétique et endocrinien ou la biochimie

sanguine, sans qu'il soit possible d'établir de données probantes (OMS 2006).

### ÉTUDES DE LABORATOIRE CHEZ L'HOMME

Depuis la publication des lignes directrices de l'ICNIRP en 1994 (ICNIRP 1994), une série d'études ont porté sur les effets physiologiques et neurocomportementaux chez des sujets immobiles exposés à des champs magnétiques statiques jusqu'à 8 T.

Des études détaillées visant à évaluer divers paramètres physiologiques comme la température corporelle (sublinguale), la fréquence respiratoire, la fréquence du pouls, la pression sanguine et les niveaux d'oxygénation des doigts n'ont révélé aucun effet notable lié à l'exposition à des champs magnétiques jusqu'à 8 T (Chakeres et al. 2003a). Des distorsions de l'électrocardiogramme (ECG) ont été observées ; elles résultaient des différences de potentiel liées aux courants induits autour du cœur (voir plus haut). A 8 T, elles étaient suffisamment élevées pour rendre l'ECG ininterprétable ; cependant, la fréquence cardiaque n'était pas affectée. Le seul paramètre physiologique présentant une modification statistiquement significative était la pression systolique, dont l'augmentation (inférieure à 4 %) se situait dans les limites de l'augmentation attendue, pour la résistance au débit sanguin, en raison des effets magnéto-hydrodynamiques. La modélisation de ce type d'effets ne conduit à prévoir une réduction cliniquement significative du débit sanguin (supérieure à 10 %) qu'à partir de niveaux au-delà de 15 T (Kinouchi et al. 1996). La modification de la pression sanguine enregistrée ne représentait pas une altération cliniquement significative ou symptomatique pour les sujets en bonne santé et se situait dans les limites de la variabilité physiologique normale. Il n'existe pas de données probantes témoignant, chez l'homme, d'effets des champs magnétiques statiques sur des paramètres autres que ceux des fonctions cardiovasculaires. Diverses études réalisées sur des volontaires ont montré que l'exposition à des champs magnétiques statiques jusqu'à 8 T n'induisait pas de modification de la température corporelle (Shellock et Cruess 1987 ; Chakeres et al. 2003a). Ces observations ont été confirmées lors d'une étude récente sur l'IRM, dans laquelle la composante statique du champ magnétique était de 9,4 T (Atkinson et al. 2007), mais la

fréquence cardiaque et la pression systolique n'étaient pas modifiées. Il faut toutefois noter que des gradients de champs magnétiques commutés et des champs radiofréquence (RF) étaient également présents dans cette étude.

De récentes études neurocomportementales chez des sujets immobiles exposés à des champs jusqu'à 8 T n'ont pas montré de modifications significatives d'une série de paramètres tels que la mémoire à court terme, le langage ou le temps de réaction audiomotrice (Kangarlu et al. 1999 ; Chakeres et al. 2003b ; Chakeres et de Vocht 2005).

Des études comportementales menées sur des sujets se tenant à proximité d'appareils de résonance magnétique nucléaire jusqu'à 7 T semblent indiquer qu'une incidence négative transitoire de l'exposition sur la coordination œil-main et la sensibilité aux contrastes visuels pourrait être associée aux mouvements de la tête dans le champ (de Vocht et al. 2003, 2006a, 2007a, 2007b). De Vocht et ses collègues font état d'une baisse des performances dans des tests de suivi oculaire d'une cible et de coordination œil-main conçus pour la mesure du réflexe vestibulo-oculaire, réalisés immédiatement après une série standardisée de mouvements de la tête dans des champs statiques de 0,5 T à 1,6 T générant des changements de champ à une fréquence pouvant atteindre 0,3 T.s<sup>-1</sup> (à 1,6 T). L'ampleur des effets semblait liée aux variations du flux du champ magnétique dans le temps, du fait des mouvements de la tête.

Plusieurs études indiquent que des individus exposés à des champs magnétiques statiques supérieurs à 2-3 T éprouvent des effets sensoriels transitoires liés aux déplacements dans un gradient de champ statique, tels que vertige, nausée, goût métallique dans la bouche et magnétosphènes, lors des mouvements des yeux et de la tête (Schenck et al. 1992 ; de Vocht et al. 2006a, 2006b ; Atkinson et al. 2007). Cependant, l'incidence et la gravité de ces symptômes peuvent être atténuées par une réduction de la vitesse de déplacement dans le gradient de champ magnétique (Chakeres et de Vocht 2005).

Glover et al. (2007) ont étudié plus précisément les fondements théoriques et expérimentaux du vertige induit par les champs magnétiques chez des personnes travaillant dans de forts champs

magnétiques statiques ou à proximité de ces champs. Lorsque les sujets (des volontaires) pénétraient dans l'alésage d'un aimant corps entier de 7 T à une vitesse de  $0,1 \text{ m.s}^{-1}$ , certains avaient une sensation de rotation (sensation de basculement d'avant en arrière). Le sens de cette rotation apparente était inversé lorsque l'orientation du sujet par rapport au champ était inversée (passage de la position sur le dos à la position sur le ventre, par exemple), ce qui évoque l'effet d'un courant induit sur les efférences nerveuses du système vestibulaire. Les mouvements de tête dans le champ homogène (de gradient nul) au centre de l'aimant provoquaient des symptômes de type vertiges modérés à sévères et, chez deux sujets, de fortes nausées persistant jusqu'à 30 minutes.

A la différence des effets induits par les mouvements, le déséquilibre postural était significativement accru chez certains sujets (moins de 50 % d'entre eux) lorsqu'ils se tenaient immobiles à proximité du scanner IRM, dans un champ de 0,8 T environ. Cet effet correspondrait à des différences de susceptibilité magnétique entre les cristaux de calcite comme l'otoconie (otolithe) de l'organe vestibulaire et le fluide environnant (Glover et al. 2007).

Il est clair que la sensibilité à ces effets varie considérablement entre individus. On a estimé que les seuils de vertige chez les personnes sensibles sont de  $1 \text{ T.s}^{-1}$  environ pendant plus d'une seconde, et correspondent à un produit champ-gradient de  $1 \text{ T}^2.\text{m}^{-1}$  pour le déséquilibre postural. Les temps d'intégration élevés nécessaires pour que ces effets deviennent apparents sont la marque d'une réponse en fréquence relativement faible du système vestibulaire aux fréquences comprises entre (0,4-4 Hz).

Une étude sur des ouvriers travaillant dans la fabrication d'installations IRM de 1,0 à 1,5 T (de Vocht et al. 2006b) a porté sur l'incidence des symptômes sensoriels, évaluée par questionnaire à la fin de chaque poste de travail, et la performance dans des tâches cognitives réalisées avant et juste après le poste. Les résultats ont montré que les sujets exposés signalaient plus souvent des vertiges occasionnels, un goût métallique dans la bouche ou des problèmes de concentration que les témoins. En général, ces symptômes étaient plus fréquents chez les salariés qui se déplaçaient rapidement que chez ceux qui se déplaçaient

lentement, en dépit d'une variabilité interindividuelle considérable en ce qui concerne la sensibilité. Cependant, les performances cognitives n'étaient pas significativement diminuées après le poste de travail. Au vu de ces résultats, les effets des champs magnétiques sur les performances cognitives, signalés dans d'autres études, seraient transitoires.

En conclusion, les données actuelles n'indiquent pas d'effets sérieux sur la santé liés à l'exposition aiguë de personnes immobiles à des champs magnétiques statiques jusqu'à 8 T. Il faut toutefois noter que ces expositions peuvent se traduire par des effets sensoriels potentiellement désagréables tels que des vertiges ou une diminution transitoire de la performance dans certaines tâches comportementales, en relation avec les mouvements de la tête ou du corps.

## ETUDES ÉPIDÉMIOLOGIQUES

Les quelques études épidémiologiques disponibles portent généralement sur des ouvriers exposés à des champs magnétiques statiques modérés, jusqu'à quelques dizaines de mT, dans des fonderies d'aluminium, dans l'industrie du chlore et de la soude ou dans le métier de soudeur. Toutefois, ces activités comportent généralement aussi l'exposition à une série de substances potentiellement dangereuses comme le brai de houille ou les hydrocarbures polycycliques aromatiques, qui peuvent constituer des facteurs de confusion. De plus, les champs statiques utilisés dans des processus industriels tels que l'électrolyse sont produits par des systèmes d'alimentation incorporant un redressement et un filtrage de signaux alternatifs. Il subsiste toujours une composante alternative résiduelle, de sorte que des champs d'extrêmement basse fréquence (ELF) sont également présents. L'exposition aux champs magnétiques statiques a été peu ou pas évaluée et dans certaines études, le nombre de participants était très faible. Les paramètres étudiés comprenaient l'incidence du cancer, les modifications hématologiques et leurs effets, les aberrations chromosomiques, les effets sur la reproduction et les troubles musculosquelettiques.

Rockette et Arena (1983) ont comparé la mortalité d'une large cohorte d'ouvriers de l'aluminium à celle de la population masculine des Etats-Unis.

Ils ont signalé une mortalité légèrement accrue par cancers du pancréas, génito-urinaires ou lympho-hématopoïétiques, mais l'accroissement n'était pas statistiquement significatif. Les champs magnétiques statiques n'étaient pas mesurés et leurs effets n'ont pas pu être distingués de ceux des autres facteurs de l'environnement de travail. Spinelli et al. (1991) ont signalé un risque significativement accru de mortalité par tumeur cérébrale [ratio standardisé de mortalité (SMR) 2,2 ; intervalle de confiance à 90 % (CI) : 1,2-3,7] et une mortalité par leucémie accrue de façon non significative (sans élévation de l'incidence), qui ne semblait pas pouvoir être expliquée par l'exposition à des fractions volatiles de brai de houille, sur une cohorte d'ouvriers de l'aluminium (d'autres cancers liés à l'exposition aux fractions volatiles de brai de houille étaient également en augmentation). Les auteurs n'ont pas constaté de risque accru lié à l'exposition cumulative aux champs magnétiques statiques. Deux études norvégiennes portant sur un petit nombre d'ouvriers de l'aluminium ont fait état d'un risque accru de cancer en relation avec les expositions estimées aux champs magnétiques statiques (Rønneberg et Andersen 1995 ; Rønneberg et al. 1999). Dans une étude sur des ouvriers de l'aluminium en France, Mur et al. (1987) ont établi que la mortalité par cancer et la mortalité toutes causes confondues n'étaient pas significativement différentes de celles de l'ensemble de la population masculine en France.

Des études conduites en Suède et en Norvège dans l'industrie du chlore et de la soude (Ellingsen et al. 1993) ont montré des risques accrus de cancer pulmonaire, à la limite de la signification statistique, mais les auteurs n'ont pas tenté d'estimer l'exposition aux champs magnétiques. Les ouvriers étaient également exposés à d'autres agents comme les vapeurs de mercure. Des facteurs de confusion potentiels comme le tabagisme n'ont pas été pris en compte. Bårregard et al. (1985) ont conduit une étude sur une cohorte d'ouvriers dans une usine où les courants continus utilisés pour la production électrolytique de chlore créaient des champs magnétiques statiques de densité de flux comprise entre 4 et 29 mT là où se tenaient les ouvriers. L'incidence de cancers observée chez ces ouvriers avec un recul de 25 ans n'était pas significativement différente des chiffres attendus.

Les rares études sur les effets autres que le cancer sur la santé des ouvriers sont basées sur de très petits groupes et présentent de nombreuses failles méthodologiques. L'une des plus importantes a porté sur la fertilité et l'issue de la grossesse chez 1915 opératrices IRM (Kana et al. 1993), avec des expositions pouvant atteindre 1 T environ. Le risque de fausse-couche était légèrement augmenté (de façon non significative) pour les grossesses se déroulant lors de l'activité IRM, en comparaison avec d'autres activités professionnelles, et nettement plus élevé que chez les femmes au foyer. Des différences mineures ont été observées avec les femmes au foyer (mais non avec les autres activités professionnelles) pour ce qui est des accouchements prématurés et des faibles poids de naissance. L'âge n'était pas pris en compte dans l'analyse. Les opératrices IRM étaient nettement plus âgées que les femmes des autres groupes, et des biais de sélection peuvent avoir entaché cette étude longitudinale.

Dans l'ensemble, les quelques études épidémiologiques disponibles présentent des failles méthodologiques, et laissent une série de problèmes en suspens en ce qui concerne les risques potentiels de cancer ou d'autres effets liés à l'exposition à long terme aux champs magnétiques statiques. Ces études n'indiquent pas d'effets marqués liés à l'exposition à des champs magnétiques statiques de quelques dizaines de mT, pour les différents paramètres étudiés, mais elles n'ont pas été conduites de façon à permettre d'identifier des effets faibles ou modérés. Certaines activités professionnelles (opérateurs IRM, par exemple) s'accompagnant potentiellement d'expositions à des champs magnétiques plus élevés n'ont pas été correctement évaluées.

## LIMITES D'EXPOSITION

Des valeurs différentes sont proposées pour l'exposition professionnelle et l'exposition du public. Il est recommandé d'appliquer les limites d'exposition professionnelle au cas des personnes exposées à des champs magnétiques statiques dans le cadre de leur activité professionnelle habituelle ou des tâches qui leur sont assignées. La notion d'exposition du public s'applique à la population générale.

## EXPOSITIONS PROFESSIONNELLES

### Limites d'exposition

L'exposition professionnelle de la tête et du tronc ne devrait pas dépasser 2 T en valeurs crêtes spatiales de la densité de flux magnétique, sauf dans les cas suivants : pour les applications au cours desquelles des expositions à des niveaux supérieurs à 2 T sont jugées nécessaires, une exposition jusqu'à 8 T peut être autorisée à condition que l'exposition soit contrôlée par la mise en œuvre de méthodes de travail destinées à maîtriser les effets induits par les mouvements. Les effets sensoriels dus aux mouvements dans le champ peuvent être évités si les restrictions de base fixées par les lignes directrices relatives à l'exposition aux très basses fréquences sont respectées. Des expositions jusqu'à 8 T maximum sont acceptables si elles sont limitées aux membres.

### Explication

L'élaboration de lignes directrices relatives aux champs statiques présente deux difficultés majeures. La première consiste à déterminer si et dans quelle mesure il faut admettre, chez certains sujets exposés, la survenue potentielle d'effets sensoriels transitoires sans conséquences graves ou effets à long terme connus. La seconde consiste à déterminer dans quelle mesure des restrictions devraient être prévues pour éviter l'exposition à des niveaux supérieurs à ceux pour lesquels on dispose de données chez l'homme, l'absence de connaissances étant en soi un sujet de préoccupation. Sur le premier point, l'ICNIRP considère que dans certaines circonstances, il est raisonnable que, moyennant une assistance et une formation adaptées, les travailleurs s'exposent de leur plein gré et en connaissance de cause à d'éventuels effets sensoriels transitoires tels que des nausées, dans la mesure où l'on ne pense pas qu'une telle exposition puisse avoir des conséquences graves ou des effets à long terme sur la santé. Sur le second point, l'ICNIRP considère que les expositions admises aux termes des présentes lignes directrices devraient être fondées sur des niveaux pour lesquels on dispose de données substantielles, et ne devraient pas dépasser ces niveaux, en raison de l'absence de données concluantes relatives aux effets sur la santé.

**Nota :** Il est admis qu'à des fins de recherche, on puisse souhaiter étudier les effets de ces niveaux plus élevés ; toutefois, ces expositions à caractère expérimental relèvent des instances institutionnelles compétentes (comités d'éthique).

Depuis la publication des lignes directrices de l'ICNIRP en 1994, plusieurs études ont porté sur l'exposition des personnes à des champs magnétiques statiques jusqu'à 8 T (Kangarlu et al. 1999 ; Chakeres et al. 2003a, 2003b ; Glover et al. 2007). Au-delà de 2 T, des effets transitoires comme des vertiges, nausées et phosphènes ont parfois été observés chez certaines personnes, mais il n'y a pas de données probantes permettant de conclure à des effets irréversibles ou à des conséquences graves pour la santé. La stimulation du système vestibulaire étant optimale à basse fréquence (autour de 1 Hz), lorsque les champs ou courants électriques induits (Stephen et al. 2005) se situent à des niveaux inférieurs aux seuils de stimulation nerveuse (Glover et al. 2007), on considère que la protection contre le vertige et la nausée est de nature à assurer une protection adéquate contre d'autres effets des courants induits au niveau de la tête et du tronc, tels qu'une stimulation du système nerveux périphérique.

Dans les études chez l'animal, des réactions d'aversion pouvant être dues à ce type d'effets ont été observées entre 4 T et 14 T. Cependant, on ne dispose pas, jusqu'à 8 T, de données cliniques concluantes témoignant d'effets cardiovasculaires ou neurologiques cliniquement significatifs, qui constituent la préoccupation majeure incitant à limiter l'exposition aux champs magnétiques statiques. C'est pourquoi la limite d'exposition professionnelle est fixée de façon générale à 2 T sur les lieux de travail, pour prévenir les vertiges, les nausées et d'autres effets sensoriels, alors que pour des applications spécifiques, lorsque cette exposition est contrôlée et que des méthodes de travail adaptées sont mises en œuvre, une exposition jusqu'à 8 T est admise. La survenue de ces effets sensoriels est liée, pour une large part, à des facteurs individuels comme la propension au mal des transports, ou la vitesse de déplacement des personnes dans le champ ; si un individu est sujet à de tels effets, il peut les éviter ou les limiter en adoptant des gestes aussi lents que possible. Il n'est pas préconisé de valeurs

moyennes pondérées dans le temps car, outre l'expérience acquise dans le monde en plus de 20 ans d'utilisation de la résonance magnétique et de diverses autres sources de champs magnétiques statiques, des considérations simples montrent que les effets observés sont probablement des effets aigus.

La survenue d'effets néfastes au niveau des membres du fait d'une exposition à des champs ne dépassant pas 8 T semble improbable, si l'on se fonde sur une modélisation du flux sanguin dans les petits vaisseaux (comparés à ceux de la tête et du tronc) et sur l'expérience acquise avec les sources existantes de champs magnétiques statiques. Il n'existe pas de données probantes pouvant inciter à établir une limite d'exposition plus élevée pour les membres.

## EXPOSITIONS DU PUBLIC

### Limites d'exposition

Dans l'état actuel des connaissances sur les effets directs des champs statiques sur l'homme, l'exposition aiguë du public ne devrait pas dépasser 400 mT (quelle que soit la partie du corps exposée). Cependant, en raison de la possibilité d'effets indirects, l'ICNIRP note que des mesures doivent être mises en œuvre, en pratique, pour prévenir l'exposition accidentelle de porteurs d'implants médicaux électroniques ou d'implants comportant des matériaux ferromagnétiques, ainsi que le risque d'accidents pouvant résulter de la mise en mouvement d'objets ferromagnétiques, ce qui peut conduire à des restrictions bien plus sévères, avec des niveaux de l'ordre de 0,5 mT (CEI 2002). Toutefois, l'établissement de limites d'exposition visant à prévenir ces effets non biologiques n'est pas du ressort de l'ICNIRP.

### Explication

Les présentes lignes directrices de l'ICNIRP sont fondées sur les effets biologiques directs de l'exposition aux champs magnétiques statiques. Toutefois, d'autres dangers pouvant résulter des champs statiques ne sont pas directement biologiques et ne relèvent donc pas des compétences de l'ICNIRP, mais n'en sont pas moins importants pour la protection de la santé (voir le chapitre sur les mesures de protection).

TABLEAU II

### Limites d'exposition<sup>a</sup> aux champs magnétiques statiques

Caractéristiques de l'exposition	Densité de flux magnétique
Exposition professionnelle <sup>b</sup>	
Exposition de la tête et du tronc	2 T
Exposition des membres <sup>c</sup>	8 T
Exposition du public <sup>d</sup>	
Quelle que soit la partie du corps	400 mT

a) L'ICNIRP recommande d'appliquer ces limites, en pratique, aux valeurs crêtes spatiales de la densité de flux magnétique.

b) Pour des applications spécifiques, une exposition jusqu'à 8 T peut être justifiée si l'exposition est contrôlée et si des méthodes de travail appropriées sont mises en œuvre pour maîtriser les effets induits par les mouvements des personnes.

c) On ne dispose pas d'informations suffisantes pour justifier des valeurs limites supérieures à 8 T.

d) En raison d'effets indirects potentiels, l'ICNIRP signale la nécessité de mettre en œuvre des mesures visant à prévenir l'exposition accidentelle des porteurs d'implants électroniques ou contenant des matériaux ferromagnétiques, ainsi que la mise en mouvement d'objets, ce qui pourrait conduire à préconiser des niveaux beaucoup plus bas, de l'ordre de 0,5 mT.

Compte tenu de l'état actuel des connaissances au-delà de 2 T, la limite d'exposition du public (quelle que soit la partie du corps exposée) a été établie en divisant par un facteur 5 la limite établie pour l'exposition professionnelle de la tête et du tronc. Cette marge de sécurité doit permettre de tenir compte de toutes les composantes de la population.

Les limites recommandées pour l'exposition professionnelle et l'exposition du public aux champs magnétiques statiques figurent au [Tableau II](#).

## MESURES DE PROTECTION

L'ICNIRP recommande d'accompagner l'application des présentes lignes directrices par la mise en œuvre de mesures de protection adaptées. Ces mesures doivent être différentes pour les lieux publics, où l'exposition aux champs magnétiques statiques sera dans la plupart des cas très faible et peu fréquente, et pour les lieux de travail où, selon les situations de travail, une exposition régulière à de forts champs statiques est possible.

Les trois principaux sujets de préoccupation sont les suivants : tout d'abord, dans les lieux publics, il importe de protéger les porteurs d'implants médicaux contre les interférences et les forces pouvant s'exercer sur les implants contenant des matériaux ferromagnétiques. En second lieu, dans certaines situations, la mise en mouvement d'objets ferroma-

gnétiques (outils notamment) constitue un risque. Enfin, dans les situations de travail comportant une exposition à des champs extrêmement élevés, il importe de définir un ensemble de procédures de travail visant à réduire à un minimum l'impact de symptômes transitoires comme le vertige ou la nausée.

### EFFETS SUR LES DISPOSITIFS MÉDICAUX IMPLANTABLES

Les autorités chargées de la sécurité doivent veiller à l'application de restrictions visant à protéger les porteurs de dispositifs médicaux ferromagnétiques ou électroniques sensibles aux champs magnétiques. Ces dispositifs sont portés par de nombreuses personnes qui n'en sont pas toujours conscientes (cas des clips chirurgicaux, par exemple).

On a pu observer que des interférences électromagnétiques dues à des champs magnétiques statiques de faible intensité peuvent affecter le fonctionnement des stimulateurs cardiaques, en particulier lorsque ceux-ci comportent des interrupteurs magnétiques, et d'autres types de dispositifs comme les défibrillateurs cardiaques, pompes à hormones (pour l'insuline, par exemple), dispositifs de stimulation neuromusculaire (pour le sphincter de la vessie, par exemple), neurostimulateurs ou dispositifs prothétiques régulés par un système électronique (au niveau des membres, de l'oreille interne, par exemple). En règle générale, le bon fonctionnement de ces dispositifs n'est pas altéré par des champs magnétiques statiques inférieurs à 0,5 mT.



Outre les problèmes pouvant résulter d'interférences électromagnétiques, bon nombre de dispositifs médicaux implantables comportent des éléments ferromagnétiques qui peuvent subir des forces ou des couples dans des champs magnétiques statiques. Ces effets mécaniques peuvent provoquer un déplacement des dispositifs ferromagnétiques implantés, en particulier lorsqu'il s'agit de dispositifs de grande taille (prothèses de hanche, par exemple). Les autres dispositifs ferromagnétiques pouvant être affectés sont, par exemple, les clips utilisés en cas d'anévrisme, les clips et stents chirurgicaux en métal, les prothèses de valve cardiaque et anneaux pour annuloplastie, les implants contraceptifs, les boîtiers des dispositifs électroniques implantés et les implants dentaires métalliques (toutefois, la plupart des implants modernes ne sont pas ferromagnétiques). De nombreuses études ont été menées sur la sécurité en cas d'exposition de ces dispositifs aux champs utilisés en IRM (New et al. 1983 ; Kanal et al. 1990 ; Shellock et Cruess 2004). Aucune des études menées à ce jour n'apporte d'éléments concluants quant au fait que des champs magnétiques statiques de densité inférieure ou égale à 0,5 mT exerceraient des forces ou des couples suffisants sur ces dispositifs pour qu'il en résulte un risque pour la santé.

En conséquence, une signalisation ou un marquage de sécurité est mis en place autour des emplacements où des densités de flux magnétiques supérieures à 0,5 mT sont mises en œuvre, afin de délimiter des zones interdites au public (autour des installations d'IRM, par exemple).

## MISE EN MOUVEMENT D'OBJETS MÉTALLIQUES

Une protection doit être assurée contre les dangers pouvant résulter de la mise en mouvement d'objets métalliques sous l'effet des forces produites par des champs magnétiques. Un tel risque existe dans des champs de quelques milliteslas. La limite de 400 mT recommandée par l'ICNIRP est fondée uniquement sur les effets biologiques directs du champ et se situe bien au-delà du niveau auquel des accidents peuvent survenir du fait des forces mécaniques s'exerçant sur les objets métalliques ; il appartient donc aux autorités compétentes de protéger le public contre ce type de risques mécaniques.

Une limite de 0,5 mT pour la protection des dispositifs médicaux permet d'assurer en même temps la protection contre la mise en mouvement d'objets métalliques soumis à des forces mécaniques en présence de champs magnétiques statiques. L'intensité de la force qui s'exerce sur ces objets est fonction de leur taille et de leur teneur en matériaux ferromagnétiques, mais des champs correspondant à des densités de flux de quelques milliteslas peuvent déplacer des outils et autres objets métalliques courants.

## SYMPTÔMES TRANSITOIRES

Des symptômes d'exposition aigus comme des nausées pourraient affecter les performances de certains professionnels (chirurgiens opérant dans un dispositif IRM ouvert, par exemple) et donc la sécurité des patients. De plus, ces symptômes

aigus pourraient augmenter le risque d'accident pour les opérateurs eux-mêmes. Pour chacun des postes de travail exposés à ce type de problème, il convient de définir des procédures et des méthodes adaptées à la situation de travail et visant à réduire à un minimum toutes les conséquences néfastes de l'exposition.

### Remerciements :

Lors de la préparation du présent document, l'ICNIRP avait pour membres : P. Vecchia, Président, Italie ; M. Hietanen, Vice-Président, Finlande ; A. Ahlbom, Suède ; L.E. Anderson, Etats-Unis (jusqu'en 2006) ; E. Breitbart, Allemagne ; F.R. de Gruijl, Pays-Bas ; J.C. Lin, Etats-Unis ; R. Matthes, Allemagne ; A.P. Peralta, Philippines ; P. Söderberg, Suède ; B.E. Stuck, Etats-Unis ; A.J. Swerdlow, Royaume-Uni ; M. Taki, Japon ; R. Saunders, Royaume-Uni ; B. Veyret, France.

Le premier projet de document a été préparé par les membres suivants : A.J. Swerdlow, Président ; D.W. Chakeres, Etats-Unis ; M. Feychting, Suède ; J. Hennig, Allemagne ; T.S. Tenforde, Etats-Unis ; E. van Rongen, Pays-Bas.

L'ICNIRP remercie tous les chercheurs qui lui ont fait parvenir leurs commentaires dans le cadre du processus de révision externe du présent document.

L'ICNIRP remercie également pour leur soutien l'Association internationale de radioprotection (IRPA), l'Organisation mondiale de la santé, la Commission européenne et le Ministère allemand de l'environnement.

## BIBLIOGRAPHIE

- ATKINSON IC, RENTERIA L, BURD H, PLISKIN NH, THULBORN KR. - Safety of human MRI at static fields above the FDA 8 T guideline: sodium imaging at 9.4 T does not affect vital signs or cognitive ability. *J Magn Reson Imaging* 26:1222-1227; 2007.
- BÅRREGÅRD L, JARVHOLM B, UNGETHUM E. - Cancer among workers exposed to strong static magnetic fields. *Lancet* 2:892; 1985.
- BELLOSSI A. - The effect of a static uniform magnetic field on mice: a study of methylcholanthren carcinogenesis. *Radiat Environ Biophys* 23:107-109; 1984.
- BELLOSSI A. - Effect of static magnetic fields on survival of leukaemia-prone AKR mice. *Radiat Environ Biophys* 25:75-80; 1986.
- BEZANILLA F. - The voltage sensor in voltage-dependent ion channels. *Physiol Rev* 80:555-592; 2000.
- CHAKERES DW, DE VOCHT R. - Static magnetic field effects on human subjects related to magnetic resonance imaging systems. *Prog Biophys Mol Biol* 87:255-265; 2005.
- CHAKERES DW, KANGARLU A, BOUDOULAS H, YOUNG DC. - Effect of static magnetic field exposure of up to 8 tesla on sequential human vital sign measurements. *J Magn Reson Imaging* 18:346-352; 2003a.
- CHAKERES DW, BORNSTEIN R, KANGARLU A. - Randomized comparison of cognitive function in humans at 0 and 8 tesla. *J Magn Reson Imaging* 18:342-345; 2003b.
- CROZIER S, LIU F. - Numerical evaluation of the fields induced by body motion in or near high-field MRI scanners. *Prog Biophys Mol Biol* 87:267-278, 2005.
- DENEGRE JM, VALLES JM JR, LIN K, JORDAN WB, MOWRY KL. - Cleavage planes in frog eggs are altered by strong magnetic fields. *Proc Natl Acad Sci USA* 95:14729-14732; 1998.
- DE VOCHT F, VAN WENDELDE-JOODE B, ENGELS H, KROMHOUT H. - Neurobehavioral effects among subjects exposed to high static and gradient magnetic fields from a 1.5 tesla magnetic resonance imaging system - a case-crossover pilot study. *Magn Reson Med* 50:670-674; 2003.
- DE VOCHT F, STEVENS T, VAN WENDELDE-JOODE B, ENGELS H, KROMHOUT H. - Acute neurobehavioral effects of exposure to static magnetic fields: analysis of exposure-response relations. *J Magn Reson Imaging* 23:291-297; 2006a.
- DE VOCHT F, VAN DROOGE H, ENGELS H, KROMHOUT H. - Exposure, health complaints and cognitive performance among employees of an MRI scanners manufacturing department. *J Magn Reson Imaging* 23:197-204; 2006b.
- DE VOCHT F, STEVENS T, GLOVER P, SUNDERLAND A, GOWLAND P, KROMHOUT H. - Cognitive effects of head-movement in stray fields generated by a 7 tesla whole-body MRI magnet. *Bioelectromagnetics* 28:247-255; 2007a.
- DE VOCHT F, GLOVER P, ENGELS H, KROMHOUT H. - Pooled analyses of effects on visual and visuomotor performance from exposure to magnetic stray fields from MRI scanners: application of the Bayesian framework. *J Magn Reson Imaging* 26:1255-1260; 2007b.
- ELLINGSEN DG, ANDERSEN A, NORDHAGEN HP, EFSKIND J, KJUUS H. - Incidence of cancer and mortality among workers exposed to mercury vapor in the Norwegian chloralkali industry. *Br J Ind Med* 50:875-880; 1993.
- EVESON RW, TIMMEL CR, BROCKLEHURST B, HORE PJ, MCLAUCHLAN KA. - The effects of weak magnetic fields on radical recombination reactions in micelles. *Int J Radiat Biol* 76:1509-1522; 2000.
- GAFFEY CT, TENFORDE TS. - Alterations in the rat electrocardiogram induced by stationary magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 2:357-370; 1981.
- GAFFEY CT, TENFORDE TS. - Frog sciatic nerve bioelectric activity during exposure to stationary magnetic fields. *Radiat Environ Biophys* 22:61-73; 1983.
- GLOVER PM, BOWTELL R. - Measurement of electric fields induced in a human subject due to natural movements in static magnetic fields or exposure to alternating magnetic field gradients. *Phys Med Biol* 53:361-373; 2008.
- GLOVER PM, CAVIN I, QIAN R, BOWTELL R, GOWLAND PA. - Magneticfield- induced vertigo: a theoretical and experimental investigation. *Bioelectromagnetics* 28:349-361; 2007.
- GOWLAND PA. - Present and future magnetic resonance sources of exposure to static fields. *Prog Biophys Mol Biol* 87:175-183; 2005.
- GRISSOM CB. - Magnetic field effects in biology - a survey of possible mechanisms with emphasis on radical-pair recombination. *Chemical Reviews* 95:3-24; 1995.
- GROSSMAN GE, LEIGH RJ, ABEL LA, LANSKA DJ, THURSTON SE. - Frequency and velocity of rotational head perturbations during locomotion. *Exp Brain Res* 70:470-476; 1988.
- HOLDEN AV. - The sensitivity of the heart to static magnetic fields. *Prog Biophys Mol Biol* 87:289-320; 2005.
- HONG CZ, HARMON D, YU J. - Static magnetic field influence on rat tail nerve function. *Arch Phys Med Rehabil* 67:746-749; 1986.
- HORE PJ. - Rapporteur's report: sources and interaction mechanisms. *Prog Biophys Mol Biol* 87:205-212; 2005.
- HOUPTTA, PITTMAN DW, BARRANCO JM, BROOKS EH, SMITH JC. - Behavioural effects of high-strength static magnetic fields on rats. *J Neurosci* 23:1489-1505; 2003.
- ICHIOKA S, MINEGISHI M, IWASAKA M, SHIBATA M, NAKATSUKA T, HARI K, KAMIYA A, UENO S. - High-intensity static magnetic fields modulate skin microcirculation and temperature in vivo. *Bioelectromagnetics* 21:183-188; 2000.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Phys* 66:100-106; 1994.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys* 74:494-522; 1998.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Exposure to static and low frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (0-100 kHz). MATTHES R, MCKINLAY AF, BERNHARDT JH, VECCHIA P, VEYRET B, EDS. OBERSCHLEISSHEIM, Germany: ICNIRP; Publication 13/2003; 2003.

## BIBLIOGRAPHIE

- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Medical magnetic resonance (MR) procedures: protection of patients. *Health Phys* 87:197-216; 2004.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Statement on EMF-emitting new technologies. *Health Phys* 94:376-392; 2008.
- International Electrotechnical Commission. Safety of magnetic resonance equipment for medical diagnosis. Geneva: Switzerland: IEC; IEC 60601-2-33; 2002.
- KANALE, SHELLOCK FG, TALAGALA L. - Safety considerations in MR imaging. *Radiol* 176:593-606; 1990.
- KANAL E, GILLEN J, EVANS JA, SAVITZ DA, SHELLOCK FG. - Survey of reproductive health among female MR workers. *Radiol* 187:395-399; 1993.
- KANGARLU A, BURGESS RE, ZHU H, NAKAYAMA T, HAMLIN RI, ABDULJALH AM, ROBITAILLE PM. - Cognitive, cardiac, and physiological safety studies in ultra-high field magnetic resonance imaging. *Magn Reson Imaging* 17:1407-1416; 1999.
- KINOUCI Y, YAMAGUCHI Y, TENFORDE TS. - Theoretical analysis of magnetic field interactions with aortic blood flow. *Bioelectromagnetics* 17:21-32; 1996.
- KIRSCHVINK JL, WALKER MM, DIEBEL CE. - Magnetite-based magnetoreception. *Curr Opin Neurobiol* 11:462-467; 2001.
- KONERMANN G, MONIG H. - Studies on the influence of static magnetic fields on prenatal development of mice. *Radiologe* 26:490-497; 1986 (in German).
- LIU Y, EDGER, HENBEST K, TIMMEL CR, HORE PJ, GAST P. - Magnetic field effect on singlet oxygen production in a biochemical system. *Chem Commun (Camb)* 2:174-176; 2005.
- MACDOUGALL HG, MOORE ST. - Marching to the beat of the same drummer: the spontaneous tempo of human locomotion. *J Appl Physiol* 99:1164-1173; 2005.
- MCKINLAY AF, ALLEN SG, COX R, DIMBYLOW PJ, MANN SM, MUIRHEAD CR, SAUNDERS RD, SIENKIEWICZ ZJ, STATHER JW, WAINWRIGHT PR. - Review of the scientific evidence for limiting exposure to electromagnetic fields (0-300 GHz). Chilton: National Radiological Protection Board; Docs NRPB, 15(3); 2004.
- MCLAUCHLAN KA, STEINER UE. - The spin-correlated radical pair as a reaction intermediate. *Molecular Phys* 73:241-263; 1991.
- MEVISSSEN M, STAMM A, BUNTENKOTTER S, ZWINGELBERG R, WAHNSCHAFFE U, LOSCHER W. - Effects of magnetic fields on mammary tumor development induced by 7,12-dimethylbenz(a)anthracene in rats. *Bioelectromagnetics* 14:131-143; 1993.
- MIYAKOSHI J. - Effects of static magnetic fields at the cellular level. *Prog Biophys Mol Biol* 87:213-224; 2005.
- MUR JM, MOULIN JJ, MEYER-BISCH C, MASSIN N, COULON JP, LOULERGUE J. - Mortality of aluminum reduction plant workers in France. *Int J Epidemiol* 16:256-264; 1987.
- MURAKAMI J, TORII Y, MASUDA K. - Fetal development of mice following intrauterine exposure to a static magnetic field of 6.3 T. *Magn Reson Imaging* 10:433-437; 1992.
- NAGAKURA S, HAYASHI H, AZUMI T. - Dynamic spin chemistry: magnetic controls and spin dynamics of chemical reactions. Tokyo and New York: Kodansha and John Wiley; 1998.
- NEW PF, ROSEN BR, BRADY TJ, BUONANNO FS, KISTLER JP, BURT CT, HINSHAW WS, NEWHOUSE JH, POHOST GM, TAVERA JM. - Potential hazards and artifacts of ferromagnetic and nonferromagnetic surgical and dental materials and devices in nuclear magnetic resonance imaging. *Radiol* 147:139-148; 1983.
- NOBLED, MCKINLAY A, REPACHOLI M, EDS. - Effects of static magnetic fields relevant to human health. *Prog Biophys Mol Biol* 87:171-372; 2005.
- NOLTE CM, PITTMAN DW, KALEVITCH B, HENDERSON R, SMITH JC. - Magnetic field conditioned taste aversion in rats. *Physiol Behav* 63:683-688; 1998.
- OKANO H, OHKUBO C. - Elevated plasma nitric oxide metabolites in hypertension: synergistic vasodepressor effects of a static magnetic field and nifedipine in spontaneously hypertensive rats. *Clinical Hemorheol Microcirculation* 34:303-308; 2006.
- OKANO H, MASUDA H, OHKUBO C. - Effects of a 25 mT static magnetic field on blood pressure in reserpine-induced hypotensive Wistar-Kyoto rats. *Bioelectromagnetics* 22:408-418; 2005.
- OKAZAKI R, OOTSUYAMAA, UCHIDA S, NORIMURA T. - Effects of a 4.7 T static magnetic field on fetal development in ICR mice. *J Radiat Res (Tokyo)* 42:273-283; 2001.
- POZZO T, BERTHOZ A, LEFORT L. - Head stabilisation during various locomotor tasks in humans. *Exp Brain Res* 82:97-106; 1990.
- RITZ T, ADEM S, SCHULTEN K. - A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds. *Biophys J* 78:707-718; 2000.
- RITZ T, THALAU P, PHILLIPS JB, WILTSCHKO R, WILTSCHKO W. - Resonance effects indicate a radical-pair mechanism for avian magnetic compass. *Nature* 429:177-180; 2004.
- ROCKETTE HE, ARENA VC. - Mortality studies of aluminum reduction plant workers: potroom and carbon department. *J Occup Med* 25:549-557; 1983.
- RØNNEBERG A, ANDERSEN A. - Mortality and cancer morbidity in workers from an aluminum smelter with prebaked carbon anodes. 2. Cancer morbidity. *Occup Environ Med* 52:250-254; 1995.
- RØNNEBERG A, HALDORSEN R, ROMUNDSTAD P, ANDERSEN A. - Occupational exposure and cancer incidence among workers from an aluminum smelter in western Norway. *Scand J Work Environ Health* 25:207-214; 1999.
- SAUNDERS RD. - Static magnetic fields animal studies. *Prog Biophys Mol Biol* 87:225-241; 2005.
- SCHENCK JF. - Safety of strong, static magnetic fields. *J Magn Reson Imaging* 12:2-19; 2000.
- SCHENCK JF. - Physical interactions of static magnetic fields with living tissues. *Prog Biophys Mol Biol* 87:185-204; 2005.
- SCHENCK JF, DUMOULIN CL, REDINGTON RW, KRESSEL HY, ELLIOTT RT, MCDUGALL IL. Human exposure to 4.0-tesla magnetic fields in a whole-body scanner. *Med Phys* 19:1089-1098; 1992.
- SCHULTEN K. - Magnetic field effects in chemistry and biology. *Adv Solid State Phys* 22:61-83; 1982.
- SHELLOCK FG, CRUES JV. - Temperature, heart rate, and blood pressure changes associated with clinical MR imaging at 1.5 T. *Radiol* 163:259-262; 1987.

## BIBLIOGRAPHIE

SHELLOCK RG, CRUES JV. - MR procedures: biologic effects, safety, and patient care. *Radiol* 232:635-652; 2004.

SIKOV MR, MAHLUM DD, MONTGOMERY LD, DECKER JR. - Development of mice after intrauterine exposure to direct-current magnetic fields. In: Phillips, RD, Gillis MF, Kaune WT, Mahlum DD, eds. *Biological effects of extremely low frequency electromagnetic fields*, proceedings of the 18th Hanford Life Sciences Symposium. Springfield, VA: National Technical Information Service; 1979: 462-473. Snyder DJ, Jahng JW, Smith JC, Houpt TA. c-Fos induction in visceral and vestibular nuclei of the rat brain stem by a 9.4 T magnetic field. *NeuroReport* 11:2681-2685; 2000.

SPINELLI JJ, BAND PR, SVIRCHEV LM, GALLAGHER RP. - Mortality and cancer incidence in aluminum reduction plant workers. *J Occup Envir Med* 33:1150-1155; 1991.

STEPHEN T, DEUTSCHLANDER A, NOLTE A, SCHNEIDER E, WIESMANN M, BRANDT T, DIETERICH M. - Functional MRI of galvanic vestibular stimulation with alternating currents at different frequencies. *NeuroImage* 26:721-732; 2005.

TENFORDE TS. - Magnetically induced electric fields and currents in the circulatory system. *Prog Biophys Molec Biol* 87:279-288; 2005.

TENFORDE TS, GAFFEY CT, MOYER BR, BUDINGER TF. - Cardiovascular alterations in Macaca monkeys exposed to stationary magnetic fields: experimental observations and theoretical analysis. *Bioelectromagnetics* 4:1-9; 1983.

TRZECIAK HI, GRZESIK J, BORTEL M, KUSKA R, DUDA D, MICHNIK J, MALECKI A. - Behavioral effects of long-term exposure to magnetic fields in rats. *Bioelectromagnetics* 14:287-297; 1993.

UENO S, IWASAKA M. - Properties of diamagnetic fluid in high gradient fields. *J Appl Phys* 75:7177-7180; 1994.

VALLES JM JR, WASSERMAN SR, SCHWEIDENBACK C, EDWARDSON J, DENEGRE JM, MOWRY KL. - Processes that occur before second cleavage determine third cleavage orientation in *Xenopus*. *Exp Cell Res* 274:112-118; 2002.

WEISS J, HERRICK RC, TABER KH, CONTANT C, PLISHKER GA. - Bioeffects of high magnetic fields: a study using a simple animal model. *Magn Reson Imaging* 10:689-694; 1992. World Health Organization. *Environmental Health Criteria* 232. Static fields. Geneva: World Health Organization; 2006.

ZHANG QM, TOKIWA M, DOI T, NAKAHARA T, CHANG PW, NAKAMURA N, HORI M, MIYAKOSHI J, YONEI S. - Strong static magnetic field and the induction of mutations through elevated production of reactive oxygen species in *Escherichia coli* soxR. *Int J Radiat Biol* 79:281-286; 2003.

## Annexe

### FICHE TECHNIQUE SUR LES LIGNES DIRECTRICES RELATIVES AUX LIMITES D'EXPOSITION AUX CHAMPS MAGNÉTIQUES STATIQUES

publiées dans Health Physics  
96(4):504-514 ; 2009.

Le développement rapide des technologies industrielles et médicales mettant en œuvre des champs magnétiques statiques a accru l'exposition des personnes à ces champs. La Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) a récemment publié des lignes directrices relatives aux limites d'exposition professionnelle et d'exposition du public aux champs magnétiques statiques. La présente fiche technique résume le contenu de ces lignes directrices et les éléments sur lesquels s'est fondée l'ICNIRP pour les rédiger.

Les champs magnétiques exercent une force physique sur les charges électriques, mais uniquement lorsque celles-ci sont en mouvement. La densité de flux magnétique, exprimée en teslas (T), est la grandeur la plus adéquate pour l'évaluation des effets des champs magnétiques. Le champ magnétique statique naturel de la Terre, de l'ordre de 50  $\mu$ T, varie selon les lieux entre 30 et 70  $\mu$ T environ. Sous les lignes de transport d'énergie en courant continu à haute tension, on relève des densités de flux magnétique de l'ordre de 20  $\mu$ T. Les trains à grande vitesse fonctionnant par sustentation magnétique produisent à proximité du moteur des densités de flux magnétique relativement élevées. Les autres sources de champs magnétiques statiques dans l'environnement domestique ou professionnel sont notamment les petits aimants permanents équipant les objets les plus divers (sacs, jouets, etc.), qui génèrent un champ statique local de 0,5 mT. Pour la population générale, les plus fortes expositions sont liées aux applications médicales de la résonance magnétique nucléaire (RMN), utilisée soit à des fins diagnostiques soit, de plus en plus, pour guider l'opérateur lors d'interventions chirurgicales. Dans le cadre de l'IRM (imagerie par résonance magnétique), la densité de flux magnétique est de l'ordre de 0,15 à 3 T. Le personnel intervenant dans la fabrication ou la maintenance

des systèmes IRM est également exposé à des champs élevés. Les gestes médicaux sous IRM, permettant un contrôle en temps réel de l'intervention, se traduisent par une exposition accrue du personnel médical.

L'IRM fonctionnelle, qui fait appel à des champs magnétiques pouvant atteindre 10 T, est largement utilisée dans la recherche universitaire et médicale pour explorer les fonctions du cerveau humain. On rencontre aussi des champs magnétiques intenses dans les technologies des hautes énergies (réacteurs thermonucléaires, générateurs à supraconduction, notamment), les laboratoires de recherche (chambres à bulles, accélérateurs de particules, par exemple) et dans les activités faisant intervenir des processus d'électrolyse, comme la production de chlore ou d'aluminium, avec des pics d'exposition de plusieurs dizaines de mT, ainsi que dans la production d'aimants et de matériaux magnétiques.

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 électro-

De nombreuses études *in vitro* ont été menées sur les effets biologiques potentiels des champs magnétiques statiques. Les paramètres étudiés comprenaient l'orientation de la cellule, la croissance cellulaire, l'activité métabolique de la cellule et l'expression génique. Ces études ne fournissent pas, dans l'ensemble, de données concluantes attestant d'effets nocifs d'une exposition à des champs magnétiques de densité de flux allant jusqu'à plusieurs teslas. Des études de laboratoire chez l'animal mettent en évidence des réactions d'aversion et une réaction conditionnelle d'évitement en présence de champs de l'ordre de 4 T et plus, qui résulteraient de l'action de ces champs sur l'appareil vestibulaire.

Les champs supérieurs à 0,1 T environ génèrent des différences de potentiels à l'origine de courants induits dans et autour du cœur et des gros vaisseaux du système circulatoire central, mais leurs effets sur la santé restent mal connus, et l'on n'a pas observé d'effet neurologique significatif, ni d'effets sur

la fonction cardiovasculaire, le développement fœtal, la carcinogenèse ou d'autres paramètres en cas d'exposition à des champs jusqu'à 8 T.

Les études de laboratoire chez l'homme ne montrent pas d'effet notable sur les paramètres physiologiques en cas d'exposition à des champs jusqu'à 8 T, si ce n'est une faible augmentation de la pression systolique. La modélisation ne conduit à prévoir une réduction cliniquement significative du flux sanguin qu'à partir de niveaux supérieurs à 15 T. Les études ne montrent pas non plus d'effets sur d'autres aspects de la fonction cardiovasculaire ou sur la température corporelle, la mémoire ou le temps de réaction audiomotrice, ou d'effets sérieux sur la santé chez des sujets volontaires exposés à des champs jusqu'à 8 T. Quelques études font état d'effets sur la coordination œil-main et la sensibilité aux contrastes visuels. Des individus exposés à des champs supérieurs à 2-3 T peuvent éprouver des effets sensoriels transitoires tels que des nausées, vertiges, un goût métallique dans la bouche et des magnétophosphènes lors des mouvements des yeux et de la tête ; la sensibilité varie en fonction des individus, et les effets peuvent être réduits à un minimum voire supprimés par une réduction de la vitesse de déplacement dans le champ.

Il existe peu de données épidémiologiques relatives aux effets à long terme sur la santé des personnes exposées aux champs statiques, et il n'en existe aucune sur les groupes à forte exposition potentielle tels que les opérateurs IRM. Les études disponibles, qui portent sur l'exposition à des champs pouvant atteindre plusieurs dizaines de mT dans les fonderies d'aluminium, les usines de chlore et de soude ou chez les soudeurs, présentent des failles méthodologiques, mais n'indiquent pas d'effets notables liés aux niveaux d'exposition cités sur l'incidence des cancers, la reproduction ou les autres paramètres étudiés.

Après examen de l'ensemble de ces données, l'ICNIRP recommande l'application des limites d'exposition suivantes :

### Exposition professionnelle

#### Limites d'exposition :

L'exposition professionnelle de la tête et du tronc ne devrait pas dépasser 2 T en valeur crête spatiale de la densité de flux magnétique. Néanmoins, pour certaines applications, une exposition allant jusqu'à 8 T peut être autorisée à condition que l'exposition soit contrôlée par la mise en œuvre de méthodes de travail destinées à maîtriser les effets induits par les mouvements. Les effets sensoriels dus aux mouvements dans le champ peuvent être évités si les restrictions de base fixées par les lignes directrices relatives à l'exposition aux très basses fréquences sont respectées. Pour les expositions limitées aux membres, des valeurs maximales de 8 T sont acceptables.

### Exposition du public

#### Limites d'exposition :

L'exposition aiguë du public ne devrait pas dépasser 400 mT (quelle que soit la partie du corps considérée), soit cinq fois moins que la limite applicable pour l'exposition professionnelle. Cependant, en raison de la possibilité d'effets indirects, l'ICNIRP note que des mesures pratiques doivent être mises en place afin de prévenir l'exposition accidentelle des porteurs d'implants médicaux électroniques et d'implants ferromagnétiques, et d'empêcher les accidents dus à la mise en mouvement d'objets ferromagnétiques ; ces considérations peuvent conduire à des res-

trictions bien plus sévères, avec des niveaux de l'ordre de 0,5 mT (CEI 2002). Toutefois, l'établissement de limites d'exposition visant à prévenir ces effets non biologiques n'est pas du ressort de l'ICNIRP.

Pour plus d'informations sur la justification de ces limites, on se reportera à la version intégrale des *Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields* (Lignes directrices relatives aux limites d'exposition aux champs magnétiques statiques).

Le tableau ci-dessous récapitule les valeurs limites préconisées<sup>a</sup> :

Caractéristiques de l'exposition	Densité de flux magnétique
Exposition professionnelle <sup>b</sup>	
Exposition de la tête et du tronc	2 T
Exposition des membres	8 T
Exposition du public <sup>c</sup>	
Quelle que soit la partie du corps	400 mT

a) L'ICNIRP recommande d'appliquer ces limites, en pratique, aux valeurs crêtes spatiales de la densité de flux magnétique.

b) Pour des applications spécifiques, une exposition jusqu'à 8 T peut être justifiée si l'exposition est contrôlée et si des méthodes de travail appropriées sont mises en œuvre pour maîtriser les effets induits par les mouvements des personnes.

c) En raison d'effets indirects potentiels, l'ICNIRP signale la nécessité de mettre en œuvre des mesures visant à prévenir l'exposition accidentelle des porteurs d'implants électroniques ou contenant des matériaux ferromagnétiques, ainsi que la mise en mouvement d'objets, ce qui pourrait conduire à préconiser des niveaux beaucoup plus bas, de l'ordre de 0,5 mT.

### Mesures de protection

L'ICNIRP recommande d'accompagner l'application des présentes lignes directrices par la mise en œuvre de mesures de protection appropriées. Ces mesures doivent être différentes pour les lieux publics, où l'exposition aux champs magnétiques statiques sera dans la plupart des cas très faible et peu fréquente, et pour les lieux de travail où, selon les situations de travail, une exposition régulière à de forts champs statiques est possible. Dans le public, il est nécessaire de protéger les porteurs d'implants médicaux électroniques contre les interférences et les forces pouvant s'exercer sur les dispositifs ferromagnétiques. En outre, dans certaines situations spécifiques, la mise en mouvement d'objets ferromagnétiques tels que les outils présente un risque. Dans les situations de travail impliquant une exposition à des champs très élevés, des procédures de travail spécifiques doivent être définies afin de réduire à un minimum l'impact de symptômes transitoires tels que les vertiges et nausées.