



Santé et Bien-être social  
Canada

Health and Welfare  
Canada

Code de sécurité 26  
Lignes directrices sur l'exposition aux  
champs électromagnétiques provenant  
d'appareils cliniques à résonance  
magnétique

87-DH-M-127



Canada

**CODE DE SÉCURITÉ – 26**

**LIGNES DIRECTRICES SUR L'EXPOSITION  
AUX CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES  
PROVENANT D'APPAREILS CLINIQUES  
À RÉSONANCE MAGNÉTIQUE**

Direction de l'hygiène du milieu  
Direction générale de la protection de la santé

Publication autorisée par le ministre  
de la Santé nationale et du Bien-être social

87-DHM-127

Also available in English under the title  
*Safety Code 26*  
*Guidelines on Exposure to Electromagnetic*  
*Fields from Magnetic Resonance Clinical Systems*

## PRÉFACE

L'imagerie par résonance magnétique (IRM), ainsi que plus récemment la spectroscopie par résonance magnétique (SRM), ont été largement adoptées et ont reçu de nombreuses applications dans le domaine clinique. Ces dispositifs d'imagerie utilisent trois types de champs, soit le champ magnétique statique, le champ magnétique variable dans le temps et le champ radiofréquence (RF). Étant donné que chacun des champs produits par les appareils IRM ou SRM peut produire, s'il est d'une intensité suffisante, des effets biologiques nuisibles, on s'est interrogé sur la sécurité de l'utilisation de ces appareils. Certains pays, comme les États-Unis, le Royaume-Uni, la République fédérale allemande, ont publié des lignes directrices sur les caractéristiques des appareils, ainsi que sur les degrés d'exposition du patient et de l'opérateur.

Ce document examine brièvement les effets biologiques des différents champs utilisés dans les appareils à résonance magnétique et fournit un guide général sur les niveaux d'exposition du patient et de l'opérateur. Les niveaux cités ne doivent pas être considérés comme des limites strictes dont le dépassement pourrait mener à une situation dangereuse mais plutôt comme des niveaux établis actuellement sous lesquels des dangers potentiels, s'il y a lieu, sont considérés comme minimaux. Des niveaux d'exposition plus élevés peuvent encore être sûrs, dans différentes conditions. Dans le cas des expositions de patients dépassant les limites de sécurité prescrites, il faut évaluer les risques contre les bénéfices.

Ce document a été préparé par le D<sup>r</sup> M.A. Stuchly, et révisé par madame D.A. Benwell, le D<sup>r</sup> S.S. Mohanna et le D<sup>r</sup> M. Smith du Bureau de la radioprotection. De nombreux commentaires précieux ont été apportés par le D<sup>r</sup> M.J. Bronskill, de l'hôpital Princess Margaret de Toronto, Ontario; le D<sup>r</sup> L.D. Brown, du ministère du Travail de la Saskatchewan, Regina, Saskatchewan; monsieur T.E. Dalgleish, du ministère de la Santé de la Nouvelle-Écosse, Halifax, Nouvelle-Écosse; les docteurs D.J. Dorst, R.L. Nicholson et F. Prato, de l'hôpital Saint-Joseph de London, Ontario; monsieur M.B. Phillips, du ministère de la Santé de la Colombie-Britannique, Vancouver, Colombie-Britannique; le D<sup>r</sup> A.M.

Sourkes, de la Fondation du cancer du Manitoba, Winnipeg, Manitoba; le D<sup>r</sup> R.T. Thompson, de l'hôpital Victoria, de London, Ontario, et monsieur J.M. Wetherill, de la Alberta Workers' Health, Safety and Compensation, Edmonton, Alberta.

On peut obtenir une interprétation et des détails supplémentaires sur les recommandations de ce code de sécurité auprès de la Section des rayonnements non ionisants, Bureau de la radioprotection, Direction de l'hygiène du milieu, Direction générale de la protection de la santé, Ottawa, Ontario, K1A 0L2.

## TABLE DES MATIÈRES

	<u>Page</u>
1. INTRODUCTION . . . . .	1
2. NIVEAU D'EXPOSITION POUR LES DISPOSITIFS COURANTS . . . . .	2
3. LIGNES DIRECTRICES DES AUTRES PAYS RELATIVES À L'EXPOSITION . . . . .	4
4. EFFETS SUR LA SANTÉ DES CHAMPS À RM . . . . .	6
4.1 Champ magnétique statique . . . . .	7
4.2 Champ magnétique variable dans le temps . .	9
4.3 Champ radiofréquence . . . . .	10
4.4 Champs à résonance magnétique . . . . .	12
4.5 Stimulateurs cardiaques et implants métalliques . . . . .	13
5. LIGNES DIRECTRICES RELATIVES AUX EXPOSITIONS . . . . .	16
5.1 Patients . . . . .	16
5.2 Opérateurs . . . . .	17
5.3 Considérations spéciales . . . . .	17
RÉFÉRENCES . . . . .	19

## 1. INTRODUCTION

Au cours des dernières années, la résonance magnétique (RM) s'est imposée comme outil de diagnostic dans l'imagerie in vivo par résonance magnétique (IRM) et la spectroscopie par résonance magnétique (SRM). L'imagerie clinique par résonance magnétique comporte d'importants avantages qui ont stimulé un développement rapide de divers systèmes et de leurs applications. On obtient des renseignements sur les propriétés chimiques et structurales du corps humain, et ses pathologies, renseignements qu'il est impossible d'obtenir, dans certains cas, à l'aide d'autres systèmes d'imagerie tels que la tomographie avec ordinateur (TO) ou les ultrasons. D'autres avantages incluent la possibilité d'obtenir des images du corps dans tous les plans de coupe sans perte de la qualité de l'image et la possibilité d'identifier des structures vasculaires sans l'introduction d'un agent de contraste intraveineux<sup>(32)</sup>.

Dans les dispositifs à résonance magnétique, on utilise un champ magnétique de grande puissance, un champ magnétique variable dans le temps et un champ radiofréquence (RF) pour obtenir des images du corps dans des plans déterminés. Les propriétés physiques mises à profit sont le moment magnétique et le spin de noyaux particuliers contenus dans les molécules biologiques. On utilise le plus souvent pour l'imagerie le noyau de l'atome d'hydrogène à un seul proton, mais on est à mettre au point des systèmes d'imagerie qui utilisent d'autres noyaux. Ainsi, la spectrographie par RM in vivo utilise les propriétés des noyaux du phosphore (<sup>31</sup>P), du carbone (<sup>13</sup>C), du sodium (<sup>23</sup>Na) et d'autres éléments.

Comme c'est le cas avec toute nouvelle technologie, même celles qui ont des applications médicales bénéfiques, il est nécessaire d'examiner soigneusement les risques qu'elle représente pour la santé, de mettre au point des mesures de sécurité appropriées et de veiller à leur application. Il faut tenir compte de plusieurs facteurs ayant trait à la sécurité lors de l'utilisation clinique de la résonance-magnétique chez les humains. Dans le présent code de sécurité, nous examinerons brièvement les effets biologiques des champs utilisés par les systèmes de résonance magnétique. Nous donnerons également quelques renseignements sur les lignes directrices relatives à

la résonance magnétique applicables dans d'autres pays. Quelques directives générales traiteront des niveaux d'exposition jugés sûrs à l'heure actuelle pour les patients, les opérateurs et le personnel. Des conseils s'adressent aux porteurs de stimulateur cardiaque et aux porteurs d'implant métallique. Toutefois, nous ne traiterons pas ici des problèmes de sécurité qui ne sont pas liés directement à l'exposition des humains à des champs électromagnétiques; tels que les blessures causées par des objets volants (à cause des forces qui agissent sur les objets ferromagnétiques situés à l'intérieur du champ magnétique statique), les blessures causées par le cryo-refroidissement par aimant et les blessures dues à l'interférence électromagnétique entre les champs à RM et les champs des autres appareils médicaux (les moniteurs d'ECG, par exemple). Une autre publication de Santé et Bien-être social Canada traite de ce sujet<sup>(23)</sup>.

## **2. NIVEAUX D'EXPOSITION POUR LES DISPOSITIFS COURANTS**

Les systèmes d'imagerie du corps humain actuellement sur le marché produisent un champ magnétique à l'intérieur de l'alésage de l'aimant dont l'induction varie de 0,02 T (tesla) à 2 T selon les appareils. Les champs magnétiques sont produits par un aimant permanent, un aimant résistif (seulement dans le cas des champs d'une intensité inférieure à 0,3 T), ou un aimant supraconducteur. À l'extérieur de l'alésage de l'aimant, l'induction magnétique décroît avec la distance de l'aimant.

L'induction magnétique à l'extérieur du système dépend de l'intensité du champ magnétique de l'aimant et de la conception du dispositif (le diamètre de l'alésage, le blindage, etc.). Les mesures prises auprès du FONAR QED-80 (système d'imagerie de 0,04 T) indiquent que l'induction magnétique varie de 0,04 T à l'intérieur du volume d'imagerie, à 0,6 mT à l'extrémité de la table sur laquelle est étendu le patient<sup>(2)</sup>. L'induction magnétique dans la salle de commande était de 0,4 mT<sup>(2)</sup>. D'après une série de mesures prises par le Bureau, l'induction magnétique d'un système d'imagerie par résonance magnétique de 0,15 T (Teslacon Technicare, TM) est de 0,1 T à l'entrée de l'aimant; elle décroît à 15 mT à une distance d'environ un mètre de la surface du boîtier de l'aimant et à moins



de 1 mT à une distance de 3 m. L'induction magnétique d'un système de IRM de 0,5 T (Philips Gyroscan, 515) est d'environ 0,12 T à l'entrée de l'aimant; elle décroît à 30 mT à une distance d'un mètre et à 3 mT à une distance de 3 m de la surface du boîtier de l'aimant. L'induction magnétique d'un système de spectrographie par résonance magnétique de 1,9 T (Oxford Research TMR 32/20) à faible alésage (0,26 m) est de 0,8 T à l'entrée; elle décroît à 12 mT à une distance d'un mètre et à moins de 1 mT à une distance de 3 m.

On superpose les champs magnétiques variables dans le temps et le champ magnétique statique pour obtenir de l'information spatiale dans les appareils d'imagerie et de spectroscopie par résonance magnétique. L'intensité des champs variables dans le temps est faible comparée à celle du champ statique.

Les champs RF sont produits par des bobines de transmission à l'intérieur de l'alésage de l'aimant. Les champs RF sont pulsés et les séquences d'impulsions utilisées varient selon les systèmes. Chaque système permet l'utilisation de diverses séquences d'impulsions. La fréquence des champs RF dépend de l'intensité du champ magnétique statique. Dans les systèmes IRM utilisant des protons, les fréquences varient entre 6,4 MHz pour un système de 0,15 T et 85 MHz environ pour un système de 2 T. Dans la spectroscopie par résonance magnétique, on utilise diverses fréquences. La puissance moyenne d'excitation dans les systèmes à résonance magnétique varie de quelques watts à quelques dizaines de watts (W). La puissance de crête RF des impulsions peut atteindre quelques kilowatts. À l'extérieur du boîtier de l'aimant, les intensités des champs RF sont très faibles. Des mesures effectuées par le Bureau sur les systèmes de 0,15 T, 0,5 T et 1,9 T ont indiqué que l'intensité du champ magnétique était inférieure à 0,05 A/m (soit la sensibilité de l'instrument de sondage utilisé) n'importe où à l'extérieur du boîtier de l'aimant.

Selon les données recueillies, on estime que les opérateurs des appareils cliniques à RM sont susceptibles d'être exposés à des champs magnétiques inférieurs à 2 mT sur de longues périodes. C'est parce que l'opérateur passe beaucoup de temps à une console contenant des tubes à rayons cathodiques qui produisent des images déformées dans des champs magnétiques d'une intensité supérieure à 0,5 mT. Le degré d'exposition réel dépend du champ magnétique et de l'emplacement du système. Pour de courtes périodes, les opérateurs et le personnel peuvent être exposés à des champs d'une intensité beaucoup plus grande au moment où ils placent le patient dans l'appareil d'imagerie. Ainsi, leurs mains et leurs bras peuvent être exposés à l'induction magnétique nominale de l'appareil lorsqu'ils se trouvent à l'intérieur de l'alésage de l'aimant.

### 3. LIGNES DIRECTRICES DES AUTRES PAYS RELATIVES À L'EXPOSITION

Aux États-Unis, la Food and Drug Administration (FDA) du Department of Health and Human Services a publié en 1982 un ouvrage intitulé "Guidelines for evaluating electromagnetic risk for trials of clinical NMR\* systems"<sup>(14)</sup>. Les directives s'adressent aux commanditaires, aux fabricants et chercheurs dans le domaine des appareils cliniques à RM. Elles spécifient à partir de quelle intensité de champ il faut effectuer une évaluation du "risque important". Cependant, l'expression "risque important" ne signifie pas que l'utilisation clinique de l'appareil soit trop dangereuse. Les limites indiquées dans les lignes directrices du FDA sont les suivantes:

- i) champs magnétiques statiques – expositions partielles ou totales du corps à 2 T,
- ii) champs magnétiques variables dans le temps – expositions partielles ou totales du corps à 3T/s, et

---

\*NMR – Nuclear Magnetic Resonance (Résonance magnétique nucléaire)

- iii) champs RF – exposition à des champs RF qui entraîne un taux d'absorption spécifique (TAS) dépassant 0,4 W/kg, la moyenne étant établie sur l'ensemble du corps humain, ou dépassant 2 W/kg, la moyenne étant établie sur un gramme de tissu de nature quelconque.

Au Royaume-Uni, le National Radiological Protection Board a recommandé en 1984 que les conditions suivantes soient respectées lors de l'utilisation de l'équipement clinique d'imagerie par RM<sup>(1)</sup>:

- i) Le champ magnétique statique ne doit pas dépasser 2,5 T pour le corps entier ou une partie importante du corps soumis au processus d'imagerie. Le personnel qui utilise l'équipement ne doit pas être exposé durant de longues périodes à plus de 0,02 T pour le corps entier et à plus de 0,2 T pour les bras et les mains. Pour de courtes périodes inférieures à quinze minutes par heure, ces limites s'élèvent à 0,2 T pour le corps entier et à 2 T pour les bras et les mains.
- ii) Le taux de variation de l'induction magnétique ne doit pas dépasser 20 T/s pour des durées de variation supérieures à 10 ms. Pour des périodes plus courtes, il faut observer la relation  $(dB/dt)^2 t < 4$ , dans laquelle  $(dB/dt)$  est la valeur efficace du taux de variation de l'induction magnétique en teslas par seconde et  $t$  la durée de variation en secondes.
- iii) L'exposition aux champs RF ne doit pas amener une élévation de la température du corps supérieure à 1°C (dans le corps entier et dans un gramme de tissu de nature quelconque). On peut s'en assurer en limitant le taux moyen d'absorption spécifique (TAS) à 0,4 W/kg pour le corps entier et à 4 W/kg pour un gramme de tissu de nature quelconque.

Le document recommande également, par mesure de prudence, de ne pas soumettre les femmes enceintes à une imagerie par RM au cours de leurs trois premiers mois de grossesse. Il faut

également prendre des précautions particulières avec les porteurs de stimulateur cardiaque et les porteurs d'implant métallique de grandes dimensions, bien que l'imagerie soit tout de même possible pour eux.

En République fédérale allemande, le Bureau fédéral de la santé a publié en 1984 l'ouvrage intitulé "Recommandations pour la prévention contre les risques pour la santé causés par les champs magnétiques et les champs de haute fréquence dans la tomographie par RMN in vivo et dans la spectroscopie par RMN"<sup>(22)</sup>. Ces recommandations s'adressent aux médecins utilisateurs de l'équipement. Les limites suivantes sont recommandées (pour le patient):

- i) un champ magnétique statique de 2 T (corps entier ou partiel); il faut éviter d'exposer les porteurs de stimulateur cardiaque à un flux magnétique supérieur à 0,5 mT;
- ii) le champ magnétique variable dans le temps ne doit pas induire une densité de courant supérieure à  $3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  avec des temps de commutation de 10 ms et plus, et supérieure à  $30/\tau \mu\text{A}/\text{cm}^2$  avec des temps de commutation plus courts,  $\tau$  (ms) étant le temps de commutation;
- iii) l'exposition à un champ RF ne doit pas amener un taux d'absorption spécifique (TAS) supérieur à 1 W/kg, la moyenne étant établie sur le corps entier, et supérieur à 5 W/kg, la moyenne étant établie sur un kilogramme de tissu quelconque, à l'exception du tissu oculaire.

#### 4. EFFETS SUR LA SANTÉ DES CHAMPS A RM

Il existe des publications traitant globalement des conséquences pour la santé des champs à RM<sup>(4-7,24,25,30)</sup>. Il existe également des études détaillées sur les effets biologiques des champs magnétiques statique,<sup>(28)</sup> des champs magnétiques variables dans le temps<sup>(29)</sup> et des champs RF<sup>(11)</sup>. C'est pourquoi nous ne donnerons ici qu'un bref exposé des effets biologiques de ces trois types de champs. Peu d'études ont été publiées sur les effets des expositions à la RM (des trois types de champs). Nous vous les présentons ici.

#### 4.1 Champ magnétique statique

Les champs magnétiques statiques agissent sur les systèmes biologiques en exerçant des forces sur les molécules et les cellules ayant une susceptibilité diamagnétique. Ils peuvent également influencer la cinétique des enzymes et exercer une action sur les charges mobiles (y compris les fluides en mouvement). Les molécules et d'autres structures cellulaires telles que les bâtonnets, l'ADN et les drépanocytes sont magnétiquement anisotropes et c'est ce qui explique qu'une force puisse s'exercer sur ceux-ci dans un champ magnétique statique; cette force les oriente dans le sens du champ. Des champs de l'ordre de 0,3 T à 2 T environ ont causé des orientations dans des échantillons étudiés *in vitro*<sup>(4,6,7,30)</sup>. Des champs magnétiques puissants de l'ordre de 20 T ont un effet sur les réactions enzymatiques<sup>(6)</sup>.

Un champ magnétique statique exerce une force sur un charge mobile à l'intérieur du champ. La direction de la force est perpendiculaire à la direction du champ et à la direction du mouvement. Par ce mécanisme, des champs magnétiques peuvent déformer les boucles de courant de la conduction nerveuse (propagation du potentiel d'action) et causer un abaissement du potentiel de conduction ainsi qu'un abaissement de la vitesse de conduction. Ces effets se produisent avec des champs puissants supérieurs à 24 T<sup>(6,30)</sup>.

Un autre type d'interaction porte sur les fluides conducteurs en mouvement comme dans la circulation sanguine et le mouvement périodique de certaines parties du corps, comme le mouvement de la poitrine et les contractions cardiaques. Le mouvement d'un conducteur dans un champ magnétique produit l'induction d'un potentiel aux bornes du conducteur ou, dans le cas du corps humain, à travers un vaisseau sanguin. La tension induite dépend de l'induction magnétique, du diamètre du vaisseau sanguin, du débit sanguin et de l'orientation des vaisseaux sanguins par rapport à la direction du champ. L'électro-encéphalogramme permet de détecter ce potentiel: du point de vue physiologique, il est négligeable jusqu'à ce qu'un seuil pour la dépolarisation des fibres du muscle cardiaque soit atteint. Selon des calculs approximatifs, "dans le pire des cas", un champ de 2,5 T induit un potentiel de courant de l'ordre de 40 mV, ce qui est le seuil de dépolarisation des fibres individuelles du

muscle cardiaque<sup>(24)</sup>. Toutefois, le potentiel calculé se rapporte au plan transversal de l'aorte, et des potentiels beaucoup plus faibles sont induits dans les cellules individuelles<sup>(24)</sup>. Les mesures de potentiel induit par le mouvement dans des plans traversaux (du thorax par exemple) sont très inférieures aux mesures relatives au débit sanguin<sup>(6)</sup>.

Les données scientifiques recueillies traitant des effets biologiques des champs magnétiques statiques sont plutôt limitées et elles ne forment pas un ensemble cohérent<sup>(4-7,24,25,28,30)</sup>. Selon plusieurs études menées avec soin, les principaux processus biologiques suivants ne semblent pas être modifiés par des champs magnétiques statiques inférieurs à 2 T<sup>(30)</sup>: 1) la morphologie et la croissance cellulaire, 2) la structure de l'ADN et l'expressivité, 3) la reproduction et le développement 4) les propriétés bioélectriques des neurones isolés, 5) le comportement animal, 6) la réponse visuelle à la stimulation photique, 7) la dynamique cardio-vasculaire, 8) les indices hématologiques 9) la réponse immune, 10) la régulation physiologique et les rythmes circadiens. Cependant, les données scientifiques recueillies à ce jour ne permettent pas d'évaluer le risque de l'exposition à des champs statiques plus élevés<sup>(30)</sup>.

Les études traitant des effets sur les humains sont rares. Certains résultats indiquent que les expositions du personnel à des champs allant jusqu'à 2 T pendant des périodes de quelques heures ne semblent pas entraîner d'effets négatifs. Des expositions à des champs allant jusqu'à 0,5 T pendant de longues périodes n'ont pas entraîné d'effets nuisibles à la santé. Ce sont les conclusions d'une étude menée auprès du personnel des laboratoires de physique nucléaire<sup>(5,25)</sup>. Dans plusieurs pays, il a été recommandé de limiter à 8 h par jour les expositions à des champs de 0,01 à 0,03 T. Ces recommandations s'adressent au personnel des laboratoires de physique nucléaire<sup>(27)</sup> et peuvent servir de référence aux opérateurs d'appareils à RM. Par contre, les directives permettent une exposition à des champs d'intensité plus élevée pendant de courtes périodes.

## 4.2 Champ magnétique variable dans le temps

Les champs magnétiques variables dans le temps interagissent avec les systèmes biologiques principalement par l'induction de courants électriques internes appelés "courants de Foucault". L'intensité du courant dépend du taux de variation de l'induction magnétique et du rayon de la boucle de courant. Les boucles de courant sont situées dans des plans perpendiculaires à la direction du champ magnétique. On a pu déterminer le seuil des intensités de courant pour des effets biologiques connus,<sup>(5-7,24,25,30)</sup> notamment la fibrillation, l'électrochoc, l'induction de phosphènes visuels et l'initiation d'impulsions dans les cellules nerveuses et musculaires. Les seuils sont liés au taux de variation de l'induction magnétique et à la durée de la période du champ variable dans le temps. Il faut calculer les intensités de courant induites dans le corps humain en se basant sur le pire des cas possibles, c'est-à-dire une intensité avec la boucle de courant la plus grande possible dans des conditions d'exposition en clinique.

Les seuils approximatifs d'intensité de courant pour les tissus vivants sont les suivants<sup>(30)</sup>: 1) 1 A/m<sup>2</sup> pour la fibrillation cardiaque; 2) 10 mA/m<sup>2</sup> pour les effets visuels réversibles (magnétophosphènes); 3) 10 à 100 mA/m<sup>2</sup> dans des expositions chroniques pour des altérations irréversibles de la biochimie et de la physiologie des cellules et des tissus (par exemple, les intensités de courant utilisées dans le traitement des os). Il semble qu'il y ait peu d'effet biologique, sinon aucun, dans le cas d'expositions non chroniques à des champs qui induisent des intensités de courant inférieures à 1 à 10 mA/m<sup>2</sup>, soit la plage des intensités de courant endogènes (EEG, EKG)<sup>(30)</sup>.

L'évaluation des seuils ci-dessus et l'observation des effets biologiques a mené à la conclusion que l'exposition humaine à des champs de 3 T/s comporte peu de danger, sinon aucun, pour la santé<sup>(27)</sup>. Ces seuils ont été adoptés dans le cadre des recommandations aux États-Unis<sup>(14)</sup>. Les recommandations en Grande-Bretagne<sup>(1)</sup> mentionnent un champ de 20 T/s: il a été estimé que ce taux de variation de l'induction magnétique induit une intensité de courant maximale de 0,3 A/m<sup>2</sup> dans une partie quelconque du corps, soit un facteur d'environ 3 sous le seuil pour la fibrillation cardiaque.

Dans les recommandations de la République fédérale allemande,<sup>(22)</sup> il est question d'un seuil de  $30 \text{ mA/m}^2$ , ce qui correspond approximativement à un champ de  $3 \text{ T/s}$ <sup>(30)</sup>. Les seuils plus élevés pour les impulsions de courte durée (inférieures à 10 ms) mentionnés dans les recommandations du Royaume-Uni et de la République fédérale allemande sont basés sur la relation entre la durée de l'impulsion électrique et le temps de réponse du corps humain<sup>(1)</sup>.

Une étude a été menée récemment pour évaluer les effets des champs magnétiques pulsés sur le développement foetal des souris<sup>(17)</sup>. Les expositions variaient entre 3,5 et 12 kT/s, avec des périodes d'impulsions de 0,33 à 0,56 ms. Les expositions étaient de courte durée et ont eu lieu au cours des divers stades de la gestation. Dans certaines expositions, on a observé la stimulation de muscles superficiels du squelette. Aucun effet négatif relatif à la grossesse, aux rejets à la naissance et pendant leur croissance n'a été observé sur les souris exposées, par comparaison avec les souris témoins<sup>(17)</sup>.

#### 4.3 Champ radiofréquence

Les effets nuisibles pour la santé provoqués par l'exposition à des champs radiofréquence (RF) sont liés à des taux élevés de dépôt d'énergie. Étant donné que les interactions des champs RF dépendent de la fréquence du champ, de la nature du champ (électrique, magnétique, champ éloigné, champ proche) et de la forme et des dimensions de l'objet, on s'est servi d'un paramètre appelé taux d'absorption spécifique (TAS) pour quantifier les effets. Le TAS est la mesure de la dose, définie comme étant le taux auquel l'énergie RF est induite dans une unité de masse du corps biologique soumis à l'exposition. L'unité de TAS est le watt par kilogramme (W/kg). Habituellement, la répartition spatiale du TAS est non uniforme dans le corps humain. Dans le cas des systèmes à RM, la répartition spatiale dépend de la configuration des bobines de transmission, de la fréquence, du type de tissu, de la forme et des dimensions de l'objet visualisé.



L'exposition à des champs RF avec un TAS suffisamment élevé amène des élévations de température locales ou globales<sup>(11)</sup>. Un a estimé qu'un TAS moyen pour le corps entier de 1 à 4 W/kg durant de courtes périodes (environ 1 heure) produit des élévations importantes de la température du corps humain (environ 0,5°C avec un TAS égal à 1,4 W/kg) lorsque la température ambiante se situe entre 25°C et 30°C<sup>(11)</sup>. On peut s'attendre à constater des élévations de température du corps entier plus grandes dans le cas des personnes dont la capacité thermorégulatoire est déficiente. De plus, les élévations de température locales peuvent être plus grandes aux endroits où le TAS est élevé<sup>(11)</sup>.

Des études ont été menées sur les effets des champs RF de divers systèmes. Pour plusieurs effets, on a déterminé les seuils des TAS et des durées d'exposition<sup>(11)</sup>. Plusieurs effets s'expliquent par l'élévation de température générale ou localisée tandis que certains effets sont liés à des mécanismes non thermiques. Il existe des études traitant de plusieurs effets relativement importants liés à un TAS moyen du corps entier de 1 à 3 W/kg avec des expositions prolongées. Ces effets comprennent, notamment, des modifications du comportement, l'accélération du cancer chez la souris, la diminution des cellules de Purkinje dans le cerveau des rats, des modifications dans la fonction des glandes endocrines et dans la chimie du sang, ainsi que des changements réversibles dans les systèmes hématologiques et immunologiques<sup>(11)</sup>. On a de plus observé des effets non thermiques tels que les changements dans le métabolisme de l'énergie cellulaire dans le cerveau du rat et des changements dans l'afflux des ions calcium. Ces effets non thermiques sont liés à des champs RF en modulation de fréquence extrêmement basse (soit des fréquences entre 1 et 300 Hz). Des effets nuisibles ont été observés avec des TAS plus élevés entre 4 et 8 W/kg liés à des champs RF. Ces effets nuisibles observés sur les animaux de laboratoire comportent des troubles du comportement, la stérilité temporaire et la bradycardie<sup>(11)</sup>.

Les données sur les effets sur le corps humain sont très limitées et insuffisantes. Elles ne permettent donc pas d'élaborer des recommandations sur les seuils d'exposition ne présentant aucun danger pour la santé.

#### 4.4 Champs à résonance magnétique\*

Quelques études ont été menées sur les cellules et les animaux soumis à des champs à résonance magnétique. Pratiquement aucune expérience n'a été confirmée par des études effectuées dans plus d'un laboratoire. Sur les cellules d'ovaires d'hamsters chinois, on n'a détecté aucun effet mutagénique ou cytotoxique. Ces cellules avaient été exposées à des champs à RM de 0,35 T, 4,6 T/s avec un TAS de crête de 2,9 W/kg à 15 MHz (4 impulsions d'une durée de 5 ms)<sup>(26)</sup>. On n'a observé aucun dommage au niveau des chromosomes dans le cas de cellules en culture exposées pendant 14 heures dans les mêmes conditions<sup>(34)</sup>. Des souris ont été exposées à des champs à RM de 0,7 T avec un TAS estimé à  $\approx 0,087$  W/kg pendant une heure. on n'a trouvé aucune différence entre les souris exposées et les témoins en ce qui a trait aux aberrations dans les chromosomes des cellules de la moelle osseuse<sup>(21)</sup>.

Diverses souches bactériennes ont été exposées à 1 T, 1 T/s et une puissance moyenne de RF de 0,097 W; on n'a observé aucun effet mutagène ou létal<sup>(31)</sup>. On a exposé des lymphocytes humains aux mêmes conditions et on n'a pas observé d'effets indésirables importants sur les chromosomes<sup>(8)</sup>. On a exposé des rats et des cochons d'Inde à des champs de 0,16 T et 2 T/s et on a rapporté une absence d'altérations de la tension artérielle, de la fréquence cardiaque et de l'électrocardiogramme<sup>(33)</sup>.

Par ailleurs, les souris exposées aux champs IRM (dans un système à 0,15 T) pendant la période mi-nocturnale n'ont pas montré les symptômes habituels de l'analgésie provoquée par la morphine; les souris exposées pendant la période idiurne avaient une réponse beaucoup plus faible à l'analgésie induite par la morphine. Ces résultats reflètent le fait qu'il y a des altérations induites par le champ au niveau de la capacité de liaison neuronale ou des changements dans l'activité de la glande pinéale<sup>(19)</sup>.

---

\*Les champs à résonance magnétique sont les trois champs (statique, variable dans le temps et radiofréquence) utilisés dans les appareils à RM.

Les expériences effectuées avec les humains soumis en clinique à des expositions à des champs à RM sont relativement peu nombreuses. En effet, les appareils n'existent pas depuis assez longtemps pour qu'on ait pu effectuer une évaluation médicale à long terme de malades et de volontaires<sup>(5,6,30)</sup>. Un suivi de six mois de 181 malades et de 70 volontaires n'a indiqué aucun changement dans les fonctions cardiaques et neurologiques. Cependant, l'appareil d'imagerie à RM utilisé dans ces études avait un champ statique de 0,04 T seulement. Chez les 118 malades dont la tête a été visualisée par résonance magnétique, on n'a trouvé aucun effet visuel ou effet sur le système nerveux central<sup>(30)</sup>.

#### 4.5 Stimulateurs cardiaques et implants métalliques

Les stimulateurs cardiaques peuvent être influencés par les trois types de champs produits par les appareils cliniques à RM. Le champ magnétique statique exerce une action sur le commutateur à lames des stimulateurs sentinelles programmables et les remet en mode opératoire asynchrone. Le champ statique exerce également une force (un couple) sur les composants ferromagnétiques du stimulateur qui peut entraîner un déplacement de celui-ci. On a examiné six stimulateurs types de fabricants divers en les soumettant à des champs IRM de 0,5 T<sup>(20)</sup>. Selon le type de stimulateur examiné, l'induction minimale du champ magnétique statique qui modifiait la position du Commutateur à lames variait de 1,7 à 4,7 mT. Dans cette étude, les stimulateurs étaient à l'extérieur du corps humain. Le commutateur à lames reprenait sa position initiale dès que le stimulateur n'était plus soumis à l'influence du champ magnétique d'une induction de 1,3 à 3 mT. Les six stimulateurs ont subi l'action de forces et de couples lorsqu'ils étaient placés à l'intérieur de système IRM fonctionnant à une intensité de 0,5 T. Les auteurs considèrent que le couple exercé sur deux stimulateurs suffirait à leur faire subir un déplacement marqué à l'intérieur de la cage thoracique, à moins qu'il n'y ait suffisamment de tissu fibreux<sup>(20)</sup>.

Le champ magnétique variable dans le temps et le champ radiofréquence peuvent interférer avec les circuits du stimulateur. La plupart des stimulateurs ont un système de protection contre l'interférence électromagnétique (tel qu'un boîtier de titane et un

filtre d'entrée passe-bas)<sup>(30)</sup>. Lorsque ce genre d'interférence se produit, le stimulateur revient en mode asynchrone. Ainsi, sur 26 modèles de stimulateurs, 20 ont repris le mode asynchrone ou ont montré des stimulations sporadiques dans des champs magnétiques de 60 Hz entre 0,1 et 0,4 mT (ce qui correspond à 0,04 T/s et 0,15 T/s)<sup>(30)</sup>. De plus, avec une variation de temps de 3 T/s, les stimulateurs unipolaires ont interprété la tension induite comme un signal électrique cardiaque valable<sup>(20)</sup>.

Divers types de stimulateurs ont été soumis à des essais dans un système RM à 0,15 T avec un champ RF de 6,4 MHz produit par un transmetteur fonctionnant à une puissance maximale de 1 kW et avec une période d'impulsions de 130 à 500 ms<sup>(12,15)</sup>. Le champ magnétique statique a provoqué dans tous ces stimulateurs la fermeture du commutateur à lames, ce qui a amené une stimulation asynchrone par rapport à la fréquence programmée. La seule exception a été le stimulateur dont la programmation comprenait un mode de "suppression du champ magnétique". Ce stimulateur continuait de fonctionner normalement dans un champ magnétique de 0,15 T lors des essais in vivo (stimulateur implanté dans un chien)<sup>(15)</sup>. Les auteurs concluent que la conversion à une stimulation asynchrone ne présente habituellement aucun problème, mais que chez certains malades, elle peut provoquer une arythmie.

Les effets des champs RF pulsés varient en fonction des divers modèles et types de stimulateurs. Dans certains stimulateurs, le rythme est influencé par le taux d'impulsions du champ RF provoquant soit une diminution<sup>(12)</sup> ou une augmentation<sup>(15)</sup> du taux. Toutefois, lors d'essais in vivo,<sup>(12,15)</sup> le fonctionnement de certains modèles de stimulateurs n'était aucunement influencé par les champs RF. Dans tous les cas, le champ RF a causé des artefacts dans l'enregistrement de l'ECG, mais ces artefacts n'avaient aucune conséquence grave pour le fonctionnement du cœur. Aucun des stimulateurs n'a subi de modifications des paramètres programmés ou de sa capacité à être reprogrammé après avoir été retiré du champ RF<sup>(15)</sup>. Les auteurs recommandent que les porteurs de stimulateur cardiaque soient soumis à une surveillance continue des stimulations lors d'essais avec un appareil IRM à 0,15 T<sup>(12)</sup>.

Les implants métalliques faits de matériaux ferromagnétiques et même diamagnétiques subissent l'action d'une force et d'un couple dans les champs magnétiques. Tous les implants métalliques sont chauffés par le champ RF et, à un niveau négligeable par le champ magnétique variable dans le temps, présents dans les systèmes RM. Des essais ont été menés avec vingt et une pinces d'anévrisme et autres pinces hémostatiques ainsi qu'avec divers autres matériaux afin d'examiner l'effet des forces et des couples subis dans les systèmes IRM à des intensités allant de 0,147 à 1,44 T<sup>(18)</sup>. Seize pinces ont été déviées par l'action des champs et dans le cas de cinq pinces d'anévrisme, les forces et les couples ont été jugés suffisants pour représenter un risque d'hémorragie dû à la dislocation de la pince au vaisseau ou à l'anévrisme, et même un risque de lésion cérébrale dû au déplacement et la pince. Le degré du risque dépend de l'intensité du ferromagnétisme et de la forme de la pince, du gradient et de la force du champ, ainsi que d'autres facteurs comme l'orientation de la pince par rapport au champ, la force de fermeture de la pince, l'état de la paroi vasculaire, les structures et tissus adjacents à la pince. Les alliages en acier inoxydable contenant des pourcentages élevés de nickel (10 à 20%) ont des propriétés ferromagnétiques négligeables, tandis que certains aciers inoxydables utilisés dans les pinces d'anévrisme et autres pinces présentent un ferromagnétisme important<sup>(18)</sup>. Les pinces faites de tantale ou de titane ne sont pas ferromagnétiques<sup>(30)</sup>. Dans une autre étude<sup>(3)</sup>, les caractéristiques de 54 divers types de pinces chirurgicales ont été examinées dans un champ de 0,15 T et 1,5 mT/m. Les propriétés non magnétiques du tantale et de divers alliages d'acier inoxydable austénitique ainsi que d'alliages d'argent ont été confirmées<sup>(3)</sup>. Divers autres types de pinces d'anévrisme ont été examinés et l'usage des pinces à haute teneur de martensite a été déconseillé<sup>(10)</sup>. On a étudié divers types de magnétomètres et de détecteurs de métal qui pourraient servir d'appareils de détection avant le passage à l'imagerie<sup>(13)</sup>. Ces deux types d'appareil peuvent détecter les pinces ferromagnétiques implantées chez un patient<sup>(13)</sup>.

On a étudié les effets caloriques des champs magnétiques variables dans le temps et des champs RF sur les pinces chirurgicales (en acier et en cuivre) et sur les prothèses de la hanche<sup>(9)</sup>. On a conclu que l'effet calorique des appareils RM sur les pinces chirurgicales n'est pas important, mais que des problèmes pourraient survenir avec des grandes tiges et prothèse métalliques implantées à cause de l'effet calorique, dans des circonstances spéciales, lorsqu'elles sont soumises à des champ de très hautes fréquences<sup>(9)</sup>.

Au total, 305 examens à RM ont été menés auprès de 236 malades porteurs d'implants métalliques<sup>(16)</sup>. La plupart des examens ont été effectués avec un appareil de 0,3 T. Dans cette étude, on a exclu les patients porteurs de stimulateur cardiaque, d'implant électrique, de valves cardiaques de prothèse et de pinces d'anévrisme. L'étude avait pour but d'évaluer des artefacts d'image et divers effets négatifs causés par les implants métalliques. Les types d'implants métalliques comprenaient: les pinces chirurgicales, les appareils de dérivation du système nerveux central (SNC), le filet de tantale, les sutures de craniotomie, de sternotomie et autres sutures en fil métallique, les agrafes cutanées et les appareils orthopédiques (prothèses de hanche, prothèses de genou, tiges, plaques, vis, broches et fils). Deux patients seulement se sont plaints de douleurs qui pourraient, mais non nécessairement, être liées à l'examen par RM. Dans un cas, un enfant ayant un appareil de dérivation du SNC s'est plaint d'une douleur derrière l'oreille. Dans un autre cas, un malade ayant une prothèse de la hanche s'est plaint d'une sensation de brûlures à la hanche, au genou et au mollet<sup>(16)</sup>.

## 5. LIGNES DIRECTRICES RELATIVES AUX EXPOSITIONS

### 5.1 Patients

Les expositions aux systèmes RM ne dépassant pas les limites suivantes représentent pour la santé un danger minime ou nul:

- i) le champ magnétique statique: 2T,

- ii) le taux de variation du champ magnétique: 3 T/s (valeur efficace),
- iii) un champ RF qui n'augmente pas la température du corps (température interne ou rectale) de plus de 0,5°C, ni d'une partie du corps de plus de 1°C. Ces limites sont considérées comme ayant été respectées lorsque les taux d'absorption spécifiques (TAS) ne dépassent pas 1 W/kg, la moyenne étant établie sur 25 p. 100 du total de la masse corporelle pour des expositions d'une durée de plus de 15 min, et w W/kg, la moyenne étant établie sur 25 p. 100 du total de la masse corporelle pour des expositions d'une durée de moins de 15 min, à la condition que durant le reste de l'heure, la personne ne soit pas exposée aux champs RF produits par l'appareil RM.

Des expositions aux appareils RM qui dépassent les limites spécifiées ne sont pas nécessairement dangereuses. Cependant, il faut évaluer avec soin chaque cas d'exposition, puisque les données scientifiques actuelles ne permettent pas d'établir des recommandations générales.

## 5.2 Opérateurs

Les opérateurs d'appareils RM ne doivent pas être exposés continuellement durant toute leur journée de travail à une induction magnétique supérieure à 0,01 T. L'exposition à des inductions supérieures est permise pour de courtes périodes (environ dix minutes par heure), mais leur nombre et leur durée devraient être réduits le plus possible.

## 5.3 Considérations spéciales

À cause des dangers que présentent pour la santé les appareils RM, voir la section 4, il faut prendre des précautions et porter une attention spéciale aux catégories suivantes de patients:

- i) les porteurs de stimulateur cardiaque,

- ii) les porteurs de pinces métalliques et autres implants métalliques,
- iii) les femmes enceintes.

Il faut prévoir des mesures d'action corrective et exercer une surveillance médicale continue durant l'examen avec l'appareil MR de porteurs de stimulateur cardiaque. Étant donné que de nombreux appareils de réanimation cardiaque ne fonctionnent pas convenablement lorsqu'ils sont situés dans des champs magnétiques supérieurs à 10 mT, il faut, lorsque le réanimateur est utilisé, déplacer le patient à l'extérieur de la pièce dans laquelle se trouve l'appareil RM.

Dans le cas de porteurs de pinces métalliques et autres implants métalliques, il faut effectuer une évaluation individuelle pour déterminer si le patient est apte à subir un examen RM. Il faut exercer une surveillance continue des porteurs d'implants métalliques de grandes dimensions lorsqu'ils sont soumis à un examen RM. Dès que le patient ressent un malaise dans la région de l'implant, il faut cesser l'exposition immédiatement. Les expositions RM ne présentent aucun problème dans le cas des petits implants métalliques tels que les plombages dentaires.

Aucun fait scientifique ne permet de croire qu'il est dangereux pour une femme enceinte de subir un examen à l'aide d'un appareil RM à l'intérieur des limites spécifiées au paragraphe 5.1. Toutefois, ce mode de diagnostic clinique étant relativement nouveau, il serait préférable d'effectuer une évaluation individuelle dans chaque cas de grossesse.



## RÉFÉRENCES

1. Advice on acceptable limits of exposure to nuclear magnetic resonance clinical imaging by the National Radiological Protection Board, U.K., *Radiography*, Vol. 50, No. 593, p. 220, 1984.
2. Athey, T.W., Ross, R.J. et Ruggera, P.S., Magnetic fields associated with a nuclear magnetic resonance imaging system. *Magn. Res. Imag.*, Vol. 1, pp. 149-154, 1982.
3. Barrafoto, D. et Helkelman, M., Magnetic resonance imaging and surgical clips, *Canada J. Surg.*, Vol. 27, pp. 509-510, 1984.
4. Bernhardt, J.H. et Kossel, F., Recommendations for the safe use of NMR equipment. *Clin. Phys. Physiol. Meas.*, Vol. 6, pp. 65-74, 1985.
5. Budinger, T.F., Health effects of in vivo nuclear magnetic resonance. *IEEE Eng. Med. Biol. Magazine*, Vol. 1, pp. 31-38, Sept. 1985.
6. Budinger, T.F., Nuclear magnetic resonance (NMR) in vivo studies: known thresholds for health effects, *J. Comput. Assist. Tomogr.*, Vol. 50, pp. 800-811, 1981.
7. Budinger, T.F., Thresholds for physiological effects due to RF and magnetic fields used in NMR imaging. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. NS-26, pp. 2821-1825, 1979.
8. Cooke, P. et Morris, P.G., The effects of NMR exposure on living organisms. II - A genetic study of human lymphocytes. *Brit. J. Radiol.*, Vol. 54, pp. 622-625, 1981.
9. Davis, P.L., Crooks, L., Arakawa, M., McRee, R., Kaufman, L. et Margulis, A.R., Potential hazards in NMR imaging: heating effects of changing magnetic fields and RF fields on small metallic implants, *Am. J. Roentgeonology*, Vol. 137, pp. 857-860, 1981.

10. Dujovny, M., Kossovsky, N., Kossovsky, R., Valdivia, R., Suk, J.S., Diaz, F.G., Berman, S.K. et Cleary, W., Aneurysm clip motion during magnetic resonance imaging: in vivo experimental study with metallurgical factor analysis. *Neurosurgery*, Vol. 17, pp. 543-548, 1985.
11. Elder, J.A. et Chaill, D.F. (Eds.), *Biological Effects of Radio-frequency Radiation*. Report No. EPA-600/8-83-026F. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, 27711, 1984.
12. Fetter, J., Aram, G., Homes, D.R., Gray, J.E. et Hayes, D.L., The effect of nuclear magnetic resonance imagers on external and implantable pulse generators. *PACE*, Vol. 7, pp. 720-727, 1984.
13. Finn, E.J., Di Chiro, G., Brooks, R.A. et Sato, S., Ferromagnetic materials in patients: detection before MR imaging. *Radiology*, Vol. 156, pp. 139-141, 1985.
14. Guidelines for evaluating electromagnetic exposure risk for trials of clinical NMR systems. Center for Devices and Radiological Health, Food and Drug Administration, U.S., 25 February, 1982.
15. Holmes, D.R., Hayes, D.L., Gray, J.E. et Merideth, J., The effects of magnetic resonance imaging on implantable pulse generators. *PACE*, Vol. 9, pp. 360-370, 1986.
16. Laakman, R.W., Kaufman, B., Hans, J.S., Nelson, A.D., Clampitt, M., O'Block, A.M., Haaga, J.R. et Alfydi, R.J., MT imaging in patients with metallic implants. *Radiology*, Vol. 157, pp. 711-714, 1985.
17. McRobbie, D. et Foster, M.A., Pulsed magnetic field exposure during pregnancy and implications for NMR foetal imaging: a study with mice. *Magn. Res. Imag.*, Vol. 3, pp.231-234, 1985.

18. New, P.F.J., Rosen, B.R., Brady, T.J., Buonanno, F.S., Kistler, J.P., Burt, C.T., Hinshaw, W.S., Newhouse, J.H., Pohost, G.M. et Taveras, J.M., Potential hazards and artifacts of ferromagnetic and nonferromagnetic surgical and dental materials and devices in nuclear magnetic resonance imaging. *Radiology*, Vol. 147, pp. 139-148, April 1983.
19. Ossenkopp, K.P., Kavaliers, M., Prato, F.S., Teskey, G.C., Sestini, E. et Hirst, M., Exposure to nuclear magnetic resonance imaging procedure attenuates morphine-induced analgesia in mice. *Life Sciences*, Vol. 37, pp. 1507-1514, 1985.
20. Pavlicek, W., Geisinger, M., Castle, L., Borkowski, G.P., Meaney, T.F., Bream, B.L. et Gallagher, J.H., The effects of nuclear magnetic resonance on patients with cardiac pace-makers. *Radiology*. Vol. 147, pp. 149-153, April 1983.
21. Prasad, N., Bushang, S.C., Thornby, J.I., Bryan, R.N., Hazlewood, C.F. et Harrell, J.E., Effect of nuclear magnetic resonance on chromosomes of mouse bone marrow cells. *Mag.Res. Imag.*, Vol. 2, pp. 37-39, 1984.
22. Recommendations on preventing health risks caused by the magnetic and high frequency electromagnetic fields produced in NMR tomography and in vivo NMR spectroscopy. *Bundes ges undheitsblatt, Federal Republic of Germany*, Vol. 27, No. 3, pp. 92-96, 1984 (in German).
23. Recommandations visant la protection des malades et du personnel contre les dangers que peut comporter l'imagerie par RMN. Publication 85-DHM-124 de la Direction de l'hygiène du milieu, Santé et Bien-être social Canada.
24. Saunders, R.D. et Orr, J.S., Biologic effects of NMR. In *Nuclear Magnetic REsonance, NMR, Imaging*. Partain, C.L., James, A.E., Rollo, F.D. et Price, R.R. (Eds.), W.B. Saunders Co., Philadelphia, 1983, pp. 383-396.

25. Schwartz, R.D. et Smith, H., Safety aspects of NMR clinical-imaging. *Brit. Med. Bull.*, Vol. 40, pp. 148-154, 1984.
26. Schwartz, J.L. et Crooks, L.E., NMR imaging produces no observable mutations and cytotoxicity in mammalian cells. *Am. J. Roentgenology*, Vol. 139, pp. 583-585, 1982.
27. Stuchly, M.A., Human exposure to static and time-varying magnetic fields, *Health Physics*, Vol. 51, pp. 215-225, 1986.
28. Tenforde, T.S., Biological effects of high DC magnetic fields. Report No. LBL-12954, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, 1981.
29. Tenforde, T.S., Interaction of time-varying ELF magnetic fields with living matter. In *Biological Effects of Electromagnetic Fields*. Polk, C. et Postow, E. (Eds.), CRC Press, Boca Raton, FL, 1986.
30. Tenforde, T.S. et Budinger, T.F., Biological effects and physical safety aspects of NMR imaging and *in vivo* spectroscopy. American Assoc. Physicist in Medicine Summer School on NMR In Medicine, 1985.
31. Thomas, A. et Morris, P.G., The effects of NMR exposure on living organisms. I - A microbial assay. *Brit. J. Radiol.*, Vol. 54, pp. 615-621, 1981.
32. Vannier, N.W., Nuclear magnetic resonance imaging. *Post-graduate Med.*, Vol. 76, No. 5, pp. 159-170, 1984.
33. Willis, R.J. et Brooks, W.M., Potential hazards of NMR imaging, no evidence of the possible effects of static and changing magnetic fields on cardiac function of the rat and guinea pig. *Mag. Res. Imag.*, Vol. 2, pp. 89-95, 1984.
34. Wolff, S., Crooks, L.E., Brown, P., Howard, R. et Painter, R.B., Tests for DNA and chromosomal damage induced by nuclear magnetic resonance imaging. *Radiology*, Vol. 136, pp. 707-710, 1980.