

ANALYSE DES EFFETS DE LA PRÉSENCE D'OBJETS FERROMAGNÉTIQUES EN IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE NUCLÉAIRE

Florence KRAEMER

Si nous publions ici un article de physique, ce n'est pas tant pour montrer les liens qui unissent cette discipline aux mathématiques qu'en raison de la personnalité de l'auteur. Florence KRAEMER est actuellement élève de T.C. au lycée Jean Monnet de Strasbourg. L'an passé, elle avait participé au club de mathématiques qui se réunissait à l'Université Louis Pasteur, et c'est à ce titre qu'elle a pu obtenir une subvention pour un stage d'un mois dans le laboratoire du Dr Denis LE BIHAN près de Washington ().*

PRÉSENTATION

Le but de ce projet est d'étudier deux des dangers des examens par Résonance Magnétique Nucléaire (RMN). Ces dangers, qui ne concernent que les patients porteurs d'implants ferromagnétiques, sont d'une part le déplacement des implants dans le corps des patients, particulièrement dangereux lorsque ces implants sont des clips posés sur une artère, d'autre part la déformation des images médicales de RMN. Ces distorsions peuvent en effet induire les médecins en erreur et leur faire poser des diagnostics erronés.

En conséquence le second objectif de cette étude, sujet du présent article, est d'analyser ces distorsions ou artefacts et d'essayer de les prédire au sein d'un modèle théorique. Une simulation informatique utilisant ce modèle théorique permet de tester sa validité par comparaison avec les images de RMN.

LES ARTEFACTS

a) Problème :

Selon la théorie de la RMN (cf. appendice), la présence d'un champ magnétique extrêmement homogène (environ 10^{-5} ppm sur un volume de 10 cm^3) est nécessaire à la réalisation d'une image. Un objet ferromagnétique placé dans le champ de l'aimant de RMN se magnétise et crée donc lui-même un champ magnétique parasite qui s'ajoute au champ principal.

L'interaction magnétique entre cet objet ferromagnétique et l'aimant de RMN a été simulé en utilisant un aimant en U et une barre magnétique. Les lignes de champ, visualisées par de la limaille de fer, ont été photographiées (fig. 1). Il apparaît qu'en présence d'un objet ferromagnétique, le champ au centre de l'aimant n'est plus très homogène.

(*) Diagnostic Radiology Department - National Institute of Health - BETHESDA MD 20892

ANALYSE DES EFFETS DE LA PRÉSENCE D'OBJETS FERROMAGNÉTIQUES

Comme on obtient une image de RMN en introduisant une variation contrôlée du champ magnétique dans l'espace, je formule l'hypothèse que la présence d'un objet ferromagnétique entraînera une variation incontrôlée du champ dans l'espace et créera ainsi des distorsions d'images par suite de mauvais calculs.

b) Procédure :

- 1) Les images sont générées grâce à un logiciel et un aimant supraconducteur de RMN de 1,5 Tesla.
- 2) L'objet étudié, baptisé fantôme, est constitué d'une bouteille cylindrique en plastique, de 6 cm de diamètre intérieur, remplie d'eau (fig. 2). Le fantôme est placé au centre de l'aimant (plus exactement, sa paroi est tangente à l'axe central de l'aimant).
- 3) On obtient une image du fantôme en coupe coronale (horizontale) de 10 mm d'épaisseur. Cette image est centrée avec soin par rapport au tunnel de l'aimant. Le gradient de lecture est placé le long de l'axe Z (cf. appendice), dans la direction opposée à celle du champ magnétique.
- 4) On répète les étapes 2 et 3 après avoir collé une aiguille de suture ferromagnétique sur le bord du fantôme. L'aiguille est ainsi exactement au centre de l'aimant.
- 5) On tire et on compare des photos de type "rayon X" de ces images.

c) Résultats :

Les images obtenues, avec puis sans l'aiguille, diffèrent sur les points suivants (fig. 3) :

- 1) L'image du fantôme est repoussée le long de l'axe Z (fig. 3b)
- 2) Les contours de l'objet sont modifiés : la section du fantôme n'est plus circulaire, mais plutôt "elliptique" du côté de l'aiguille ferromagnétique.
- 3) Le signal n'est plus homogène en présence de l'aiguille; il est plus lumineux en certains endroits, surtout du côté le plus proche de l'aiguille.

d) Interprétation :

L'hypothèse proposée est validée car la présence d'un objet ferromagnétique à proximité de l'objet étudié (le fantôme) entraîne de sévères distorsions de l'image. Non seulement les contours de l'objet sont modifiés, mais sur l'image, la position même de l'objet est modifiée, ainsi que l'intensité du signal lumineux.

Dans le but d'analyser et finalement de prévoir ces artefacts, j'étudie un cas simple (voir la procédure), où l'objet ferromagnétique est placé sur l'axe Z . Je limite les calculs, dans cette approche préliminaire, à la seule distorsion le long de l'axe Z .

- 1) Calcul du gradient de champ magnétique induit par un objet ferromagnétique :
* Le champ magnétique induit par l'objet ferromagnétique à une distance Z de l'objet, $B_z \text{ ind}$, vaut (voir réf. 1) :

$$B_z \text{ ind} = \mu_0 M / (2\pi Z^3)$$

où μ_0 est la perméabilité magnétique du vide et M le moment magnétique de l'objet.

* Ce champ additionnel entraîne un gradient induit de champ magnétique, $G_{z \text{ ind}}$ tel que :

$$G_{z \text{ ind}} = \frac{\delta B_z}{\delta z} = -3\mu_0 M / (2\pi Z^4).$$

* Le gradient résiduel, G_z , est la somme du gradient induit $G_{z \text{ ind}}$ et du gradient l_u , G_{l_u} , qu'utilise l'appareillage pour produire les images :

$$G_z = G_{z \text{ ind}} + G_{l_u}$$

donc, en Z , la fréquence de résonance $\nu(Z)$, (voir appendice), sera :

$$\nu(Z) = \nu_0 + \frac{\gamma}{2\pi} G_z \cdot Z$$

où ν_0 est la fréquence de résonance au centre de l'aimant et γ la constante gyromagnétique. L'équation précédente s'écrit alors :

$$\nu(Z) = \nu_0 + \frac{\gamma}{2\pi} (G_{z \text{ ind}} + G_{l_u}) \cdot Z$$

soit

$$\nu(Z) = \nu_0 + \frac{\gamma}{2\pi} (G_{l_u} - 3\mu_0 \frac{M}{2\pi Z^4}) \cdot Z.$$

2) Etude des effets sur l'image :

La valeur du gradient "connue" par l'ordinateur pour "calculer" l'image est G_{l_u} , qui est constant pour toute l'image. Donc, en présence du gradient inconnu $G_{z \text{ ind}}$, l'ordinateur donne une position erronée, Z' , telle que :

$$Z' = \frac{Z \cdot G_z}{G_{l_u}}$$

et donc :

$$Z' = Z - 3\mu_0 \frac{M}{2\pi Z^3 G_{l_u}}.$$

On trace la courbe représentative de la fonction F , telle que $Z' = F(Z)$ (fig. 4) en considérant que G_{l_u} est négatif dans l'expérience; on en déduit les conclusions suivantes :

* A l'emplacement de l'objet ferromagnétique, le gradient tend vers l'infini et aucune image ne peut apparaître, ce qui explique la présence d'un trou sur l'image visualisée.

* A une distance très grande de l'objet, le gradient tend vers G_{l_u} et la distorsion disparaît, l'image redevenant normale.

* Entre ces deux positions, la distorsion dépend de la distance entre le fantôme et l'objet selon une loi en $1/Z^3$. L'effet est plus important avec des objets ferromagnétiques ayant un grand moment magnétique M (objets fortement

ANALYSE DES EFFETS DE LA PRÉSENCE D'OBJETS FERROMAGNÉTIQUES

magnétiques ou grands objets). Cette distorsion fait apparaître les objets comme contractés.

Cette contraction expliquerait l'apparente augmentation de l'intensité du signal près de l'objet ferromagnétique, car davantage de protons seraient représentés au même endroit de l'image.

3) Simulation :

Dans le but de vérifier le modèle précédemment établi, j'ai conçu une simulation simple en BASIC sur IBM PC. Ce programme aide à visualiser la transformation des coordonnées de chaque point de l'objet étudié (ici un disque) en de nouvelles coordonnées (selon l'équation $Z' = F(Z)$ ci-dessus). Ce programme prend en compte la composante sur Z du champ magnétique induit par l'objet ferromagnétique mais ne tient pas compte des effets latéraux. Les résultats sont donnés sur la figure 5 : la corrélation avec les résultats expérimentaux est très bonne. Il m'est donc possible de prédire le déplacement apparent de l'objet étudié, la modification de ses contours et l'intensité du signal au voisinage de l'élément ferromagnétique. Cependant, certaines différences mettent en évidence l'imperfection du modèle théorique, lequel ne prend pas en compte les effets du moment magnétique sur les axes X et Y . Un modèle plus affiné serait nécessaire pour prédire les artefacts avec une meilleure précision.

Enfin, un traitement plus général du problème devrait inclure le cas où le gradient de lecture et le moment magnétique sont dans deux directions opposées. Il me paraît probable qu'on observerait une dilatation de l'image corrélativement avec une décroissance de l'intensité du signal lumineux. Ces expériences pourraient être facilement réalisées.

CONCLUSION

Les distorsions des images de RMN induites par la présence d'un objet ferromagnétique (déplacement et contraction apparente de l'image essentiellement dans les zones proches de l'objet ferromagnétique) peuvent donc être prédites, au moins dans un cas simple. Une analyse plus poussée devrait inclure les composantes latérales des moments magnétiques ainsi que différentes orientations du gradient de lecture utilisé pour composer les images de RMN. Je pense que les propriétés magnétiques d'un objet pourraient être testées et évaluées dans une manipulation inverse en étudiant le degré de distorsion des images de RMN produites en sa présence. Etant donnée la sensibilité du processus d'imagerie, cette méthode pourrait se montrer très utile pour étudier de nombreux matériaux.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier le docteur Denis LE BIHAN, qui m'a offert un projet de recherche utile et intéressant et qui m'a expliqué avec beaucoup de patience tout le processus de l'imagerie par RMN.

Je voudrais également remercier les docteurs RAJAN, LEVY, PATT et SEGHAL ainsi que Robert WALSH pour tous les précieux conseils qu'ils m'ont donnés.

Je remercie aussi Mrs RICHARDSON et Mr SANE pour l'aide qu'ils m'ont apportée dans la version anglaise de cet article.

Pour terminer je remercie Mlle GREINER, mon professeur de physique de première, qui a su m'intéresser à cette discipline.

RÉFÉRENCES

- 1) BLEANEY (Bi.) - BLEANY (B.), Electricity and Magnetism, p. 163-192, Oxford Univ. Press, 1989.
- 2) LE BIHAN (D.), Imagerie par résonance magnétique nucléaire : bases physiques, Paris, Masson, 1984.
- 3) NEW PFJ, ROSEN (Br.), BRADY (Tj) et al, Potential hazards and artifacts of ferromagnetic and nonferromagnetic surgical and dental materials and devices in nuclear magnetic resonance imaging. Radiology 147 : 139-148, 1983.
- 4) SHELLOCK (FG) - CURTIS (JS), Radiology 180 : pp. 541-550, 1991.
- 5) WILLIAMS (KD) - DRAYER (BP), Magnets, metal and medical devices : The good, the bad and the ugly, BNI quaterly 5 : pp. 46-52, 1989.

APPENDICE : THÉORIE DE L'IMAGERIE PAR R.M.N.

Lorsqu'ils sont placés dans un champ magnétique, les nucléons ayant un moment magnétique intrinsèque résonnent à la fréquence :

$$\nu_0[(\gamma/(2\pi)) \times B_0] \quad (A1)$$

où γ est le rapport gyromagnétique (42,576 MHz/T pour la molécule d'hydrogène), et B_0 le champ magnétique.

Une séquence de RMN consiste à modifier la magnétisation des nucléons en envoyant un champ électromagnétique oscillant (des photons) dont la fréquence est celle de résonance des nucléons. Lors de la résonance, les nucléons ré-émettent des photons qui sont recueillis et analysés. Ce sont ces photons qui constituent le signal de RMN qui est utilisé pour produire les images médicales ou pour analyser les substances chimiques (voir réf. 2).

Pour construire l'image, il faut localiser la provenance des photons émanant de la matière examinée. Pour cela, on ajoute un champ magnétique au champ principal B_0 ce qui introduit un gradient dans les trois dimensions permettant la reproduction des trois dimensions de l'espace.

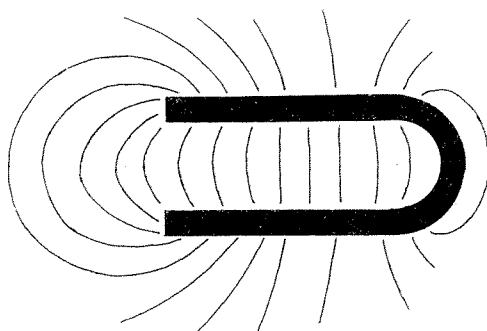
Considérons le gradient de lecture G_{lu} , utilisé le long d'une des dimensions, par exemple le long de l'axe Z . D'après l'équation (A1), la fréquence de résonance est donc :

$$\begin{aligned} \nu &= (\gamma/2\pi)[B_0 + G_{lu}.Z] \\ \nu &= \nu_0 + \frac{\gamma}{2\pi}.G_{lu}.Z. \end{aligned} \quad (A2)$$

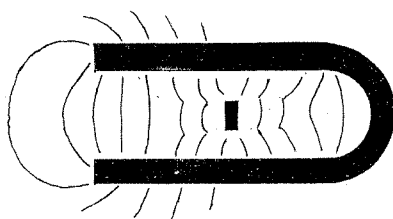
Une transformation mathématique (la transformation de FOURIER) programmée sur ordinateur permet d'identifier le signal provenant de la position Z à partir de sa fréquence de résonance (voir réf. 2).

ANALYSE DES EFFETS DE LA PRÉSENCE D'OBJETS FERROMAGNÉTIQUES

Figure 1

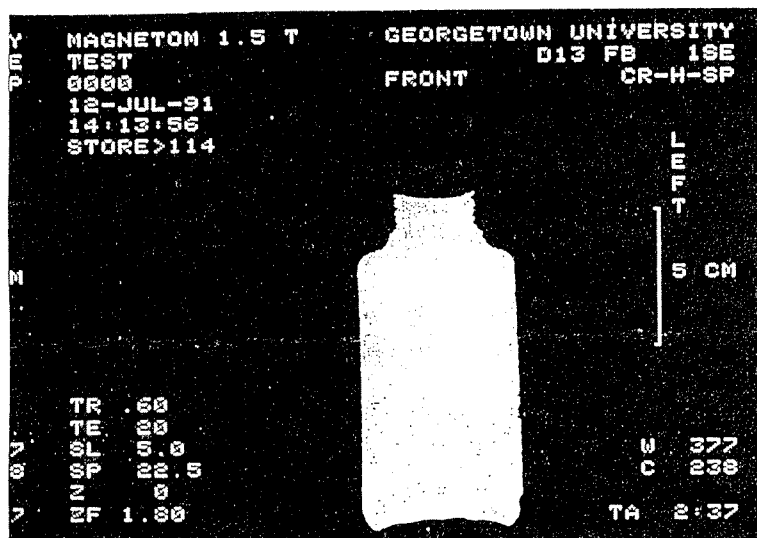


Champ magnétique engendré par un aimant en U.



*Champ magnétique engendré par un aimant en U
en présence d'une petite barre aimantée.*

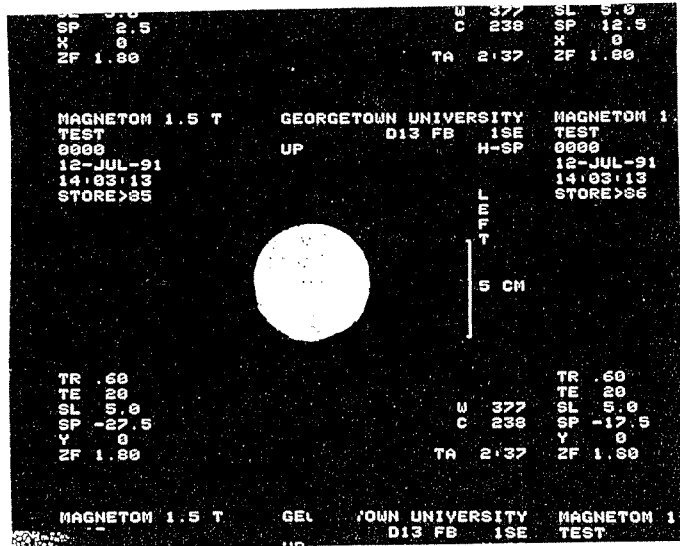
Figure 2



Coupe longitudinale du fantôme obtenue par RMN

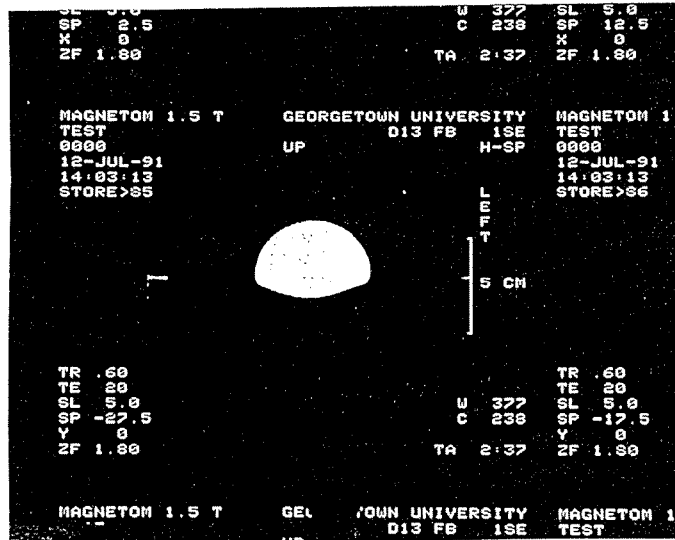
F. KRAEMER

Figure 3a



Coupe transversale du fantôme obtenue par RMN

Figure 3b

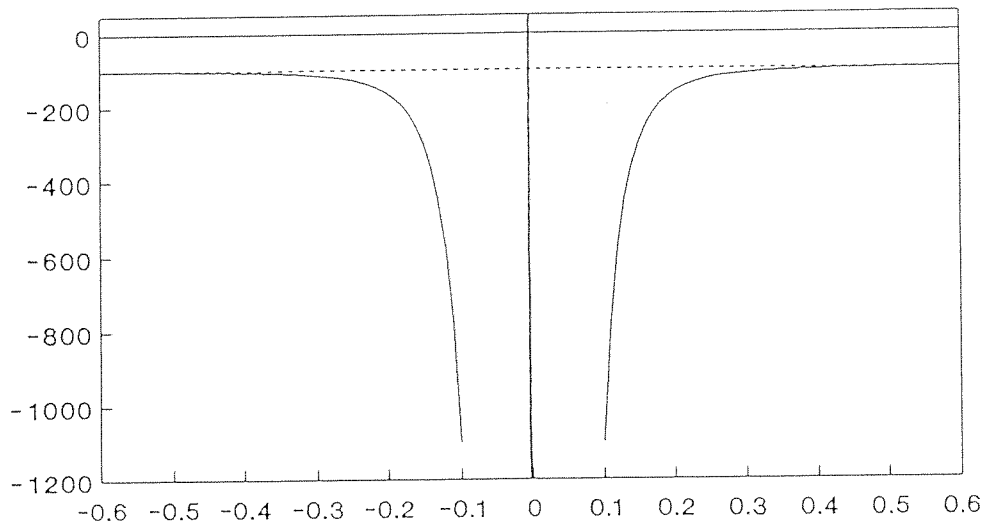


*Coupe transversale du fantôme en présence de l'aiguille aimantée
obtenue par RMN*

ANALYSE DES EFFETS DE LA PRÉSENCE D'OBJETS FERROMAGNÉTIQUES

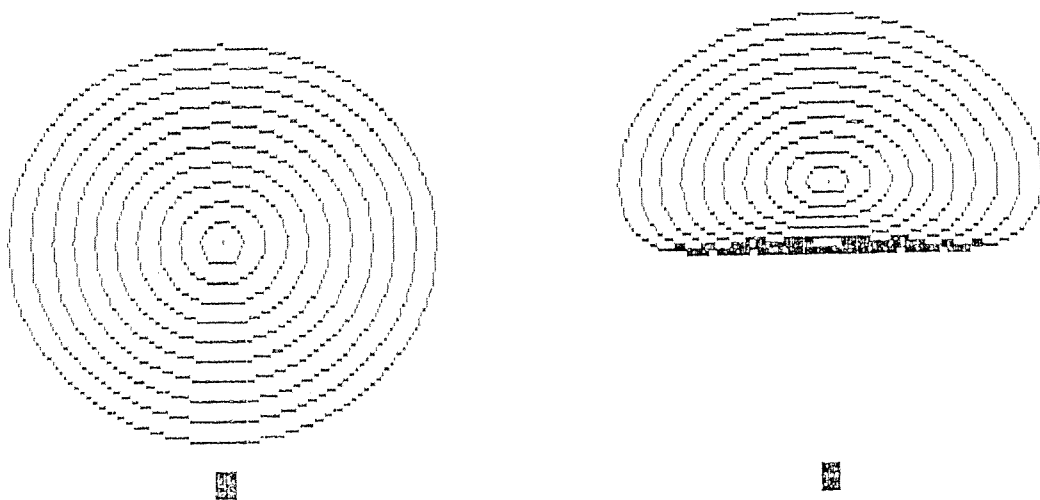
Figure 4

- . en abscisse : distance à l'objet
- . en ordonnée : gradient actuel (les unités sont arbitraires)
- . en pointillés : G_{lu} (asymptote)
- . en trait plein : $G_z ind.$



Courbe représentant le gradient réel G_z

Figure 5



Simulation