

DETERMINATION DU SNR POUR LES BOBINES DE SURFACE

M. Khélif, D. Chogueur, A. Iles

Université Abou Bekr Belkaid, Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département d'Electronique, BP230 - Tlemcen 13000

Résumé : Le but de ce travail est de déterminer le rapport signal sur bruit pour une bobine de surface, utilisée en spectroscopie in vivo ou bien en imagerie. Pour déterminer ce rapport nous montrons que le champ magnétique radiofréquence produit par la bobine n'est pas homogène spatialement. Cette imperfection intrinsèque à la structure aura une influence sur la qualité des spectres ou des images.

Mots clés : résonance magnétique nucléaire, spectroscopie in vivo, imagerie, bobine de surface, champ radiofréquence.

I. Introduction (1), (2), (4)

La spectroscopie métabolique permet l'exploration des milieux vivants à l'échelle moléculaire. Cette exploration donne des informations précieuses sur les aspects biochimique ou biophysique. Pour le même objectif, une autre technique est possible : l'imagerie tissulaire. Elle concerne l'exploration des milieux vivants au niveau cellulaire, elle nous renseigne sur les pathologies fonctionnelles à titre d'exemple. Pour les deux techniques nous aurons à réaliser des mesures de paramètres spectroscopiques et d'imagerie sur des systèmes biologiques. Les mesures sur ces systèmes biologiques sont beaucoup plus complexes que celle effectuées sur de petites molécules en raison de leur hétérogénéité et de leur "compartmentation". Ces spécificités des milieux biologiques exigent des techniques et des instruments sophistiqués notamment l'inducteur radiofréquence ou bobine de surface. Cette bobine de surface est placée au contact du patient, elle permet d'explorer la zone "irradiée". De plus il faut noter la faible sensibilité de certains isotopes comme le ^{31}P . Pour toutes ces raisons il est

important d'optimiser le SNR (Signal Noise Ratio) ou rapport signal sur bruit.

II. Détermination du champ RF (4), (5)

Les bobines de surface présentent plusieurs variantes, dans ce travail nous étudions les bobines solénoïdales. Pour déterminer le champ magnétique radiofréquence généré par ce type de bobine, nous calculons le champ produit par spire (boucle de courant) et nous considérons que la bobine solénoïdale est un empilement de spires.

II.1. Champ créé par une spire

Une spire de rayon a parcourue par un courant I crée en un point $M(r,\varphi,z)$ un champ magnétique dont les composantes sont :

$$\begin{aligned} B_r &= \frac{\mu_0 I_M k_0 Z}{4\pi r \sqrt{ar}} \left[-J_1 + \frac{a^2 + r^2 + z^2}{(a-r)^2 + z^2} J_2 \right] \\ B_z &= \frac{\mu_0 I_M k_0}{4\pi \sqrt{ar}} \left[J_1 + \frac{a^2 + r^2 + z^2}{(a-r)^2 + z^2} J_2 \right] \\ k_0^2 &= \frac{4ar}{(a+r)^2 + z^2} \\ J_1(k) &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\psi}{\sqrt{1 - k_0^2 \sin^2 \psi}} \\ J_2(k_0) &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k_0^2 \sin^2 \psi} d\psi \end{aligned} \quad (1)$$

II.2. Champ crée par une bobine solénoïde

Pour déterminer le champ crée par une bobine solénoïde en un point $M(x,y,z)$, il suffit d'intégrer les expressions précédentes selon la dimension longitudinale z . Les expressions obtenues sont très fastidieuses à manipuler ainsi nous proposons de calculer le champ magnétique sur l'axe de la bobine au voisinage de $z=0$. Les nouvelles expressions du champ radiofréquence sont :

$$\begin{aligned} B_r &= \frac{3\mu_0 K' l a^2}{(a^2 + l^2)^{5/2}} z r \\ B_\phi &= 0 \\ B_z &= \frac{\mu_0 K' l}{(a^2 + l^2)^{5/2}} \left[1 - \frac{3a^2}{(a^2 + l^2)^{5/2}} z^2 \right] \quad (2) \\ \text{avec } K' &= \frac{N I_M}{2l} \end{aligned}$$

Les paramètres a , $2l$, N et I_M sont respectivement le rayon, la hauteur, le nombre de spires et le courant alimentant la bobine.

III. Détermination du SNR

Pour déterminer le SNR, il faut d'abord calculer le module du signal utile; or le signal utile est tout simplement la f.e.m induite par l'aimantation nucléaire \vec{M} . Moyennant certaines relations de l'électromagnétisme, la loi de Faraday permet d'écrire sous la forme :

$$e = - \iiint_{V_e} \frac{\partial}{\partial t} [\vec{B}_1 \cdot \vec{M}] dV_e \quad (3)$$

V_e étant le volume de l'échantillon.

Les conditions d'excitation du système de spins sont tels que :

Le champ de polarisation \vec{B}_0 et le champ radiofréquence \vec{B}_1 sont homogènes sur l'ensemble de l'échantillon.

- L'impulsion radiofréquence est de $\pi/2$.

Sachant que l'aimantation nucléaire à l'équilibre \vec{M}_0 est proportionnelle à l'excitation magnétique \vec{H}_0 alors l'expression de la f.e.m devient :

$$e \approx 2\pi\nu_0 B_1 B_0 \chi_0 V_e \quad (4)$$

ν_0 : est la fréquence de Larmor.

χ_0 : est la susceptibilité magnétique à l'équilibre.

Si Q est le coefficient de qualité de la bobine, alors à ses bornes nous recueillons une tension de la forme :

$$v = 2\pi\nu_0 Q B_1 B_0 \chi_0 V_e \quad (5)$$

Nous devons établir l'expression du bruit, or la valeur du bruit aux bornes d'une résistance $R(\nu)$ à la température T est dans une plage de fréquences $\Delta\nu$ est donnée par la relation suivante :

$$e_N = \sqrt{4kTR(\nu)\Delta\nu} \quad (6)$$

Où k est la constante de Boltzmann.

A partir des relations (5) et (6), l'expression du SNR serait :

$$\Psi = \frac{2\pi\nu_0 Q B_1 B_0 \chi_0 V_e}{\sqrt{4kTR(\nu)\Delta\nu}} \quad (7)$$

Avec l'hypothèse où les conditions d'adaptation sont réalisées et en substituant la fréquence par le champ de polarisation, la nouvelle expression du SNR s'écrit sous la forme :

$$\Psi = K_1 \frac{Q^{3/2} B_1 B_0^{3/2} \chi_0 V_e}{\sqrt{TR(\nu)}} \quad (8)$$

$$\text{Avec } K_1 = \sqrt{\frac{\pi\gamma}{4k}}$$

γ : est le rapport gyromagnétique de l'espèce étudiée.

Ce rapport ne reflète pas la réalité car le champ radiofréquence est loin d'être homogène spatialement. Les expressions (2) nous le confirment alors la f.e.m serait en réalité :

$$e = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{z=0}^h \int_{r=0}^R A r^2 z \sin(\omega_0 t + \sigma - \phi) dr dz d\phi$$

$$\text{avec } A = \frac{3\mu_0 \omega_0 K' l a^2}{(a^2 + l^2)^{5/2}} M_0 \quad (9)$$

ϕ et σ sont respectivement la phase du champ radiofréquence et celle de l'aimantation. En général, elles sont des fonctions de l'espace. Dans notre cas elles sont considérées constantes, alors la f.e.m s'écrit sous la forme:

$$e = \frac{\pi\mu_0 \omega_0 K' l a^2 R^3 h^2}{(a^2 + l^2)^{5/2}} M_0 \quad (10)$$

D'autre part le calcul réel du bruit thermique exige la prise en compte des variations de la résistance de la bobine en fonction de la fréquence et de la température. En considérant la relation (6) et les nouvelles dépendances, l'expression du bruit thermique serait donc:

$$e_N = \left(\frac{4}{3\sqrt{\pi}} (\alpha^{3/2} - \beta^{3/2}) \frac{k l_c}{r_c} (\mu_0 \rho_0 / T_0)^{1/2} (T \Delta\nu)^{3/2} \right)^{1/2} \quad (11)$$

μ_0 : perméabilité à vide

ρ_0 : résistivité de la bobine à 0°C

k est la constante de Boltzmann.

T est la température absolue de la résistance.

r_c et l_c sont respectivement le rayon et la longueur du conducteur dont est constituée la bobine.

α et β sont des constantes relatives à la bande de fréquences.

De plus dans un travail récent (6), il est démontré que le coefficient de qualité est proportionnel à la fréquence et inversement proportionnel à la température. Si nous combinons toutes ces relations alors la nouvelle expression du SNR serait:

$$\psi = CN_s \gamma I(I+1) \frac{N a^2 r_c^{1/2}}{(a^2 + l^2)^{5/2} l_c^{1/2}} R^3 h^2 \frac{v_0^3}{(\alpha^{3/2} - \beta^{3/2}) \Delta\nu^{3/4}} \frac{I_M}{T^{1/4}}$$

$$C = \frac{0.68310^{-60}}{\rho_0^{1/4}} \quad (12)$$

Les paramètres N_s , γ , et I sont les caractéristiques physiques de l'échantillon analysé; h et R sont respectivement sa hauteur et son rayon.

IV. Discussion

Contrairement à certains travaux, (2),(4) cette nouvelle expression nous montre clairement la dépendance du SNR avec :

- Les caractéristiques géométriques et électriques de la bobine solénoïdale.
- De la taille de l'échantillon à analyser.
- De la température du système "échantillon-bobine".

Rappelons que cette étude concerne uniquement la bobine permettant l'exploration de la zone irradiée, il n'est pas tenu compte des circuits annexes à la bobine. Dans ce contexte, il nous apparaît que l'optimisation du SNR de la bobine solénoïdale exige une meilleure homogénéité du champ magnétique radiofréquence. Une conception d'autres structures pour répondre à cet objectif s'impose.

V. Bibliographie

- [1] ACKERMAN J.J.M., GROVE T.H., GADIAN D.G. and RADDI K. Mapping of metabolites in whole animals by ^{31}P NMR using surface coils, Nature, 283, 167-170 (1980).
- [2] GADIAN D.G, Probe design in nuclear magnetic resonance and its application to living systems, Clarendon Press Oxford (Ed), 159-183 (1982).
- [3] BORE P., ^{31}P NMR studies of human tumours Lancet, 458-459 (1983).
- [4] KHELIF, 'Simulation numérique des résonateurs Rf et applications en RMN à des études de très haute

température', Thèse de doctorat, UPMC Paris Déc. 1991.

[5] B.QUESSON, 'Développements méthodologiques et instrumentaux appliqués à la spectroscopie et à l'imagerie par résonance magnétique nucléaire', Thèse de doctorat, Université Bordeaux I. 1998.

[6] F. LALLAM, 'Effet de la température sur les paramètres électromagnétiques d'un résonateur RMN simple irradiation ' Thèse de magister en cours.

[7] HOULD D.T. and RICHARDS R.E., The signal to noise ratio for the nuclear magnetic resonance experiment, J. of magnetic resonance, 24 , 71-85 (1976).