

Optimisation d'impulsions radiofréquences basse-énergie en IRM et SRM : applications au cerveau et au foie

Mot clefs : IRM, SRM, contrôle optimal, impulsion radiofréquence, énergie

Contexte de la thèse

L'application d'impulsions à haute énergie est nécessaire pour de nombreuses séquences d'imagerie en de spectroscopie. Nous pouvons citer le cas des impulsions adiabatiques, ainsi que les impulsions à fort angle de bascule (refocalisation, inversion) indispensables notamment dans les séquences en écho de spin. Les restrictions légales en termes de SAR déterminent une dose maximale de radiation auxquelles le patient peut être exposé, ce qui impose une dégradation des images et/ou un allongement des temps d'acquisition des séquences utilisant ces impulsions.

La théorie du contrôle optimal permet de formaliser le design d'impulsions radiofréquences comme un problème d'optimisation sous contraintes visant à minimiser une fonction de coût. Cette dernière pénalise généralement un écart à un état cible correspondant au signal RMN désiré, et peut être régularisée de sorte à pénaliser l'énergie de l'impulsion.

Le sujet proposé consiste à générer des impulsions radiofréquences à basse énergie grâce à des algorithmes numériques de contrôle optimal existants. Les impulsions optimisées seront implémentées dans des séquences IRM et de spectroscopie adéquates, de sorte à montrer l'amélioration par rapport aux stratégies existantes en terme notamment de rapport signal-à-bruit, de robustesse aux inhomogénéités de champ B1, et de temps d'acquisition.

Points forts : L'équipe RMN et Optique de CREATIS, a développé ces dernières années une expertise forte dans le design de schéma d'excitation radiofréquence par contrôle optimal. L'encodage de l'information par les impulsions radiofréquences constitue un levier stratégique permettant d'innover dans les séquences IRM (Van Reeth, et al., 2018). La réduction significative de l'énergie obtenue avec la stratégie proposée devrait conduire à des avancées décisives pour plusieurs applications in vivo que nous avons identifiées. Des travaux préliminaires sur l'excitation à large bande ont montré que les impulsions optimisées non seulement réduisent le dépôt d'énergie par un facteur de 5,2 par rapport aux impulsions adiabatiques standard de BIR4, mais fournissent également une excitation beaucoup plus stable à de faibles amplitudes RF (Figure 1, Van Reeth, et al., 2019).

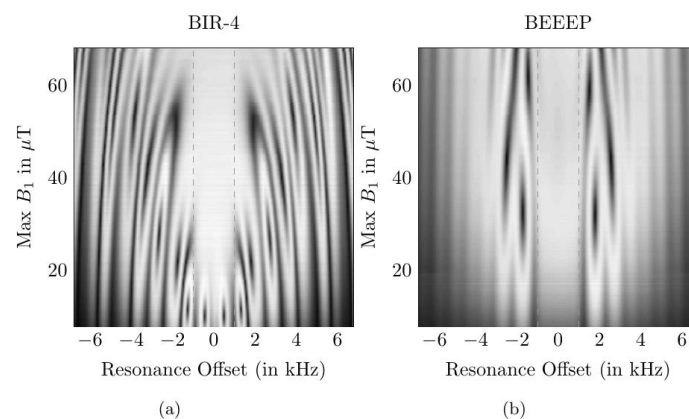


Figure 1 : Comparaison des profils d'excitation d'une impulsion adiabatique (gauche) et contrôle optimal (droite).

On peut prévoir que le fait de considérer le champ de gradient comme une variable d'optimisation supplémentaire pourrait encore améliorer ces résultats.

Collaboration/partenariat

Ces travaux de thèse pourront bénéficier de partenariats de longue date avec les partenaires suivants.

D. Sugny (PR, Université de Bourgogne) et S.J. Glaser (TUM, Allemagne) sont experts de la théorie du contrôle optimal et de ses applications notamment en résonance magnétique nucléaire. J.M. Bonny (DR, Clermont-Ferrand) dirige la plateforme AgroRésonance possède une solide expérience de l'imagerie du sodium et de ses applications.

Enfin, les travaux seront déployés sur la plateforme PILoT de CREATIS (IRM 7T et 11.7T petit-animal), dont les membres possèdent une expérience significative dans le développement de séquences Bruker.

Domaines et contexte scientifique

- Design d'impulsion radio fréquence pour l'IRM et la spectroscopie de résonance magnétique selon une approche d'optimisation mathématique (contrôle optimal)
- Développement de séquences en IRM et SRM
- Expérimentation sur système IRM préclinique sur fantôme et petit animal

Objectifs de la thèse

Design d'impulsions radiofréquence basse énergie (respectant les limitations matérielles et limitant le dépôt d'énergie) dans le cadre de 3 applications :

1. Assurer l'homogénéité de l'angle de bascule lors de la transmission par une bobine d'excitation inhomogène (sonde cryogénique par exemple)
2. Générer des impulsions sélectives refocalisantes à basse énergie, qui permettraient d'appliquer sans contraintes des séquences d'imagerie rapide de type turbo spin echo, ainsi que des séquences de spectroscopie de type LASER.
3. Générer des impulsions auto-refocalisantes pour des applications en imagerie du sodium où le signal, initialement peu abondant, décroît très rapidement du fait de temps de relaxation transversaux courts.

Verrous scientifiques

L'ajout du gradient de champ dans l'optimisation fondée sur l'algorithme GRAPE constitue le verrou méthodologique principal de la thèse. Il s'agira également d'intégrer les contraintes et spécificités expérimentales de chaque application afin de pouvoir tester, valider les solutions générées algorithmiquement. Dans ce cadre, un travail important portera sur la paramétrisation optimale, permettant une bonne convergence de l'optimisation et d'atteindre des solutions améliorées par rapport à l'existant.

Contribution originale

L'optimisation, par contrôle optimal, d'un champ radiofréquence et d'un gradient de champ magnétique appliqués conjointement constitue l'apport méthodologique original de la thèse. Des contributions méthodologiques originales sont attendues au niveau du formalisme du problème d'optimisation abordé (paramétrisation, prise en compte des contraintes), et au niveau des algorithmes numériques associés. Le déploiement des solutions optimales obtenues ouvrira la voie

vers des contributions applicatives originales, telle que le développement de séquences IRM jusqu'alors limitées par l'énergie radiofréquence déposée.

Programme scientifique

Le programme scientifique consistera principalement en les étapes suivantes :

- Mise au point algorithmique et méthodologique de stratégies d'optimisation incluant un gradient de champ magnétique variable au cours de l'application du champ radiofréquence
- Etudier de nouveaux espaces de paramètres à l'intérieur desquels les différents champs sont optimisés. Des espaces adéquats pourraient conduire à une réduction drastique de la dimension du problème d'optimisation et permettre le calcul en ligne des champs de RF et de gradient avec des caractéristiques définies par l'utilisateur.
- Implémentation sur système préclinique des solutions générées
- Validations expérimentales sur fantômes puis in vivo, sur le cerveau ou le foie du petit animal