UNIVERSITÉ PARIS-SUD

ÉCOLE DOCTORALE 422 :
SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION DES TÉLÉCOMMUNICATIONS ET DES SYSTÈMES

Laboratoire : NeuroSpin UNIRS

THÈSE DE DOCTORAT SUR TRAVAUX

PHYSIQUE

par

Aurélien Emilien Florian Massire

Non-selective Refocusing Pulse Design in Parallel Transmission for Magnetic Resonance Imaging of the Human Brain at Ultra High Field

Date de soutenance : 26/09/2014

Composition du jury :

Directeur de thèse :	Denis Le Bihan	Directeur, CEA NeuroSpin.
Rapporteurs :	Ulrich Katscher	Senior Scientist, Philips Research
	Jean-Philippe Ranjeva	Professeur, Université Aix-Marseille.
Examinateurs :	Jean-Christophe Ginefri	Maître de Conférence, Univ. Paris XI.
	Alexis Amadon	Ingénieur chercheur CEA NeuroSpin.

Preface

Cette thèse est présentée conformément aux exigences du diplôme de docteur en philosophie à l'Université Paris-Sud XI. Les résultats présentés ici sont basés sur les travaux scientifiques de l'auteur réalisés entre Mars 2011 et Juillet 2014, à NeuroSpin.

Ce manuscrit se concentre sur l'élaboration de stratégies de transmission parallèle afin de maximiser les performances des systèmes à ultra-haut champ d'imagerie par résonance magnétique actuels et futurs, y compris l'imageur corps entier à 11,7 Tesla attendu à NeuroSpin en 2015.

© Aurélien Massire 2014

Plan

Dans le premier chapitre de cette thèse, les concepts fondamentaux de la RMN et l'IRM sont introduits, soulignant à la fois les avantages rencontrés en UHF et les défis correspondants. Par la suite, les concepts et les techniques liées à la conception d'impulsions RF et à l'approche pTX sont détaillés dans le chapitre 2, suivis par un aperçu de la configuration expérimentale (chapitre 3) utilisé dans les chapitres suivants. La méthode mise au point pour évaluer le dépôt d'énergie RF dans le contexte de l'imagerie du cerveau humain, et sa validation expérimentale, sont discutées au chapitre 4. Puis dans le chapitre 5, les simulations numériques ont été réalisées afin d'évaluer la conformité des lignes directrices de SAR, recommandés pour l'IRM, avec le paramètre primaire biologique d'intérêt, la température, pour éviter tout dommage thermique local ou des problèmes de thermorégulation dans le contexte de l'IRM de transmission en parallèle. Par la suite, une nouvelle stratégie de conception d'impulsions en s'appuyant sur un contrôle optimal est introduite pour générer une refocalisation uniforme non-sélective en UHF, suivie d'une démonstration in vitro à 7 Tesla pour l'impulsion d'une séquence d'écho de spin (chapitre 6). Ce concept est ensuite généralisé à tout angle de rotation, avec un accent particulier mis sur la conception de matrices de rotation plutôt que des états d'aimantation finale. Ces impulsions RF de refocalisation sont évaluées in vivo à 7 Tesla dans l'une des séquences pondérée T2 les plus couramment utilisés en 3D: la VFA TSE (chapitre 7). Cette thèse est conclue avec un résumé de ses contributions scientifiques et un bref aperçu sur les développements futurs possibles.

Synthèse

En Imagerie par Résonance Magnétique (IRM), l'augmentation de la valeur du champ magnétique statique permet en théorie de fournir un rapport signal sur bruit accru, améliorant ainsi la qualité des images produites. L'objectif de l'IRM à ultra haut champ est d'atteindre une résolution spatiale suffisamment haute pour pouvoir distinguer des structures si fines (soit l'échelle de quelques centaines de neurones) qu'elles sont actuellement impossibles à visualiser de façon non-invasive. Le Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA) s'inscrit directement dans cette dynamique, avec l'installation imminente d'un imageur IRM clinique à 11.7 Tesla unique en son genre. Celui-ci est actuellement en fabrication, et sera rendu opérationnel au cours de l'année 2015 à NeuroSpin. Cet appareil de nouvelle génération, dont la réalisation en elle-même mobilise d'importants moyens, ambitionne de faire avancer l'imagerie médicale à un niveau inédit.

Cette dynamique tournée vers les hauts champs est un formidable élan qui mobilise de nombreux chercheurs du monde entier afin de développer de nouvelles méthodes d'acquisition prenant en compte le changement de régime imposé par les fréquences électromagnétiques très élevées (transmission et reconstruction parallèles, impulsions radiofréquences et réseaux d'antennes dédiées...). En effet, à de telles valeurs de champs magnétiques statiques, la longueur d'onde du rayonnement électromagnétique envoyé pour basculer les spins des protons de l'eau est du même ordre de grandeur que l'objet dont on souhaite faire l'image (soit environ 13 cm à 7 Tesla). Des phénomènes d'interférences ondulatoires sont alors observés, ce qui se traduit par l'inhomogénéité de ce champ radiofréquence (RF) au sein de l'objet, qui est d'autant plus accentuée à très hauts champs. Ces interférences engendrent alors des artefacts de signal et/ou de contraste dans les images IRM, et rendent ainsi leur exploitation délicate voire impossible dans certaines régions du corps. Il est donc crucial de fournir des solutions pour atténuer la non-uniformité de l'excitation des spins. A défaut de quoi, de tels systèmes d'imagerie à très haut champ ne pourront atteindre leurs pleins potentiels.

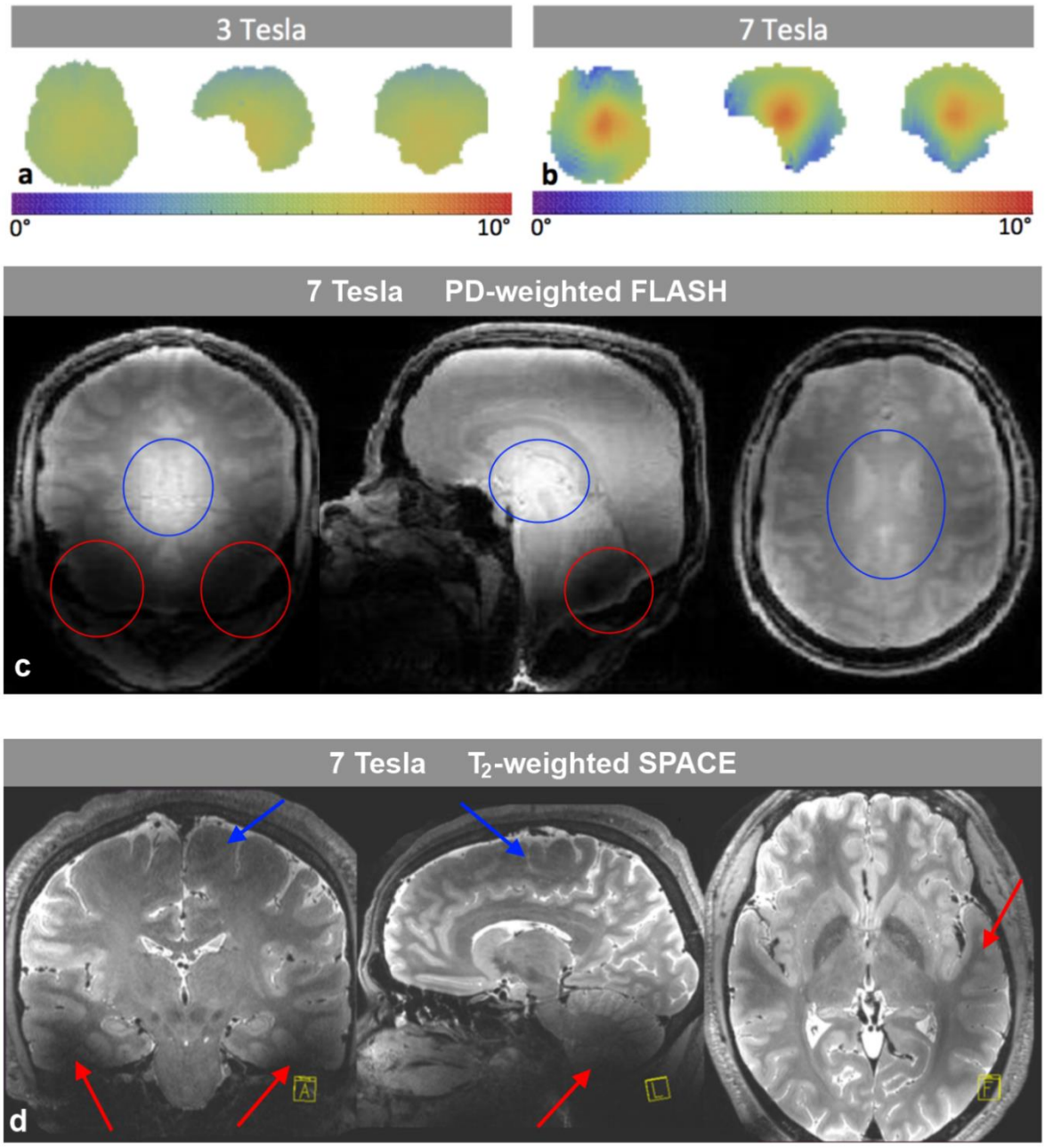

Figure 1 : Non-uniformité de l'excitation RF en UHF. Les anneaux bleus indiquent ce qui est communément appelé l'effet d'éclaircissement central, tandis que les anneaux rouges indiquent les zones de perte de signal. Images acquise avec la séquence de SPACE à 7 Tesla (0,6 mm résolution isotrope). Les flèches bleues correspondent aux pertes locales de contraste, alors que les flèches rouges montrent des pertes de signal.

Pour obtenir des diagnostics cliniques pertinents à très haut champ, il est donc nécessaire de créer des impulsions RF homogénéisant l'excitation de l'ensemble des spins (ici du cerveau humain), optimisées pour chaque individu que l'on souhaite imager. Pour cela, un système de transmission parallèle (pTX) à 8 canaux a été installé au sein de notre imageur à 7 Tesla. Alors que la plupart des systèmes IRM cliniques n'utilisent qu'un seul canal d'émission, l'extension pTX permet de jouer différentes formes d'impulsions RF de concert sur plusieurs canaux. La somme résultante de ces interférences doit alors être optimisée pour atténuer la non-uniformité observée classiquement.

L'objectif de cette thèse est donc de synthétiser ce type d'impulsions RF élaborées, en utilisant la transmission parallèle. Ces impulsions auront pour contrainte supplémentaire le respect des limitations internationales en vigueur concernant l'exposition à des champs radiofréquence, qui induit une hausse de température dans les tissus. En ce sens, de nombreuses simulations électromagnétiques et de températures ont été réalisées en introduction de cette thèse, afin d'évaluer la relation entre les seuils recommandés d'exposition RF et l'élévation de température effectivement prédite dans les tissus. Les résultats de ces simulations indiquent que les recommandations de TAS (Taux d'Absorption Spécifique) semblent : 1) être une métrique adaptée pour s'assurer que la température dans la tête ne dépasse pas des valeurs dangereuses pour la santé dans le cadre d'examens IRM en transmission parallèle à 7 Tesla et 2) sont plus limitantes que des seuils de température (qui reste très difficile à mesurer en temps réel), à l'exception des yeux.

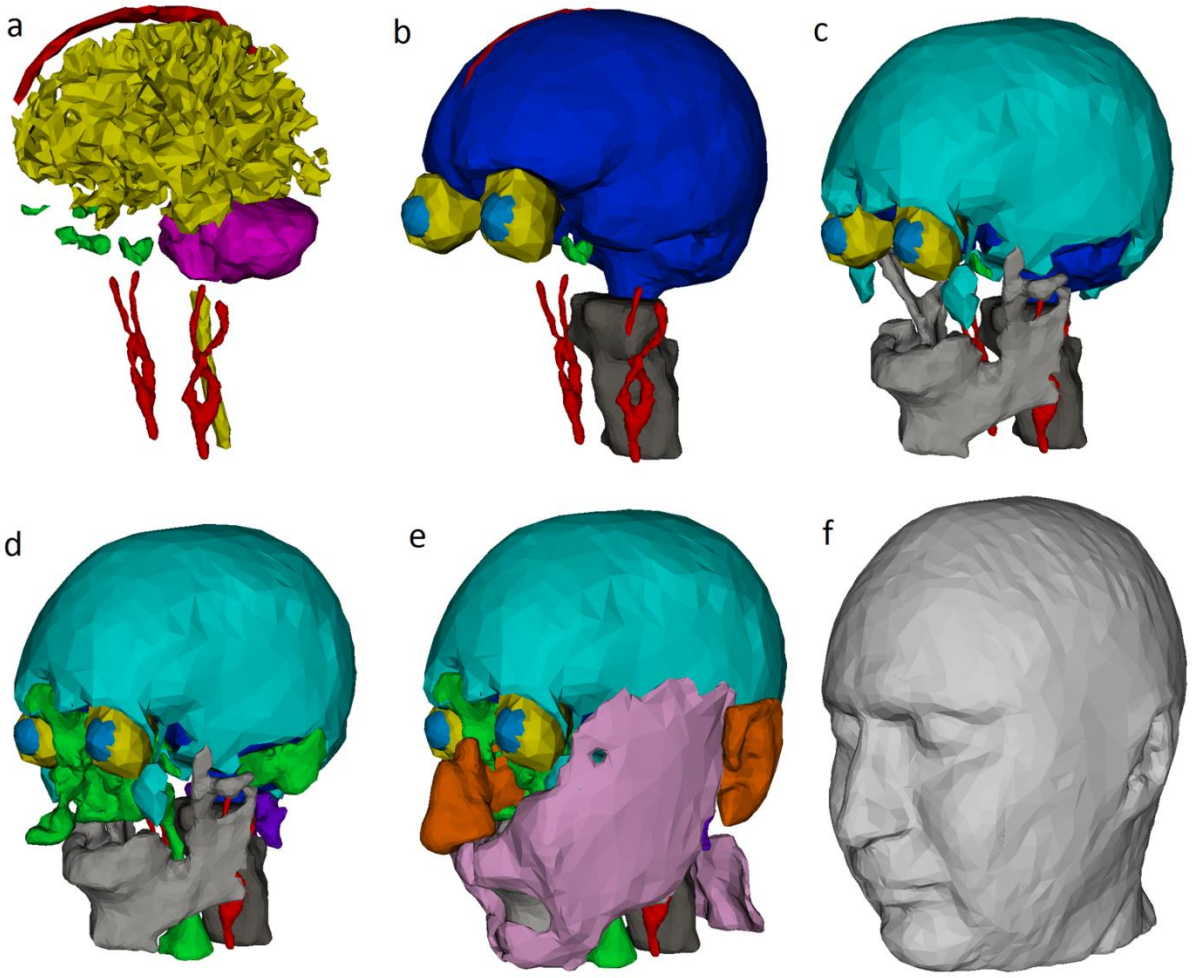

Figure 2 : Vue 3-D de modèle de tête pour le calcul du SAR. a: la substance blanche (jaune), les vaisseaux sanguins (en rouge), les nerfs (vert) et le cervelet (violet). b: Matière grise (bleu foncé), la graisse orbitaire (jaune), les yeux (bleu), la colonne vertébrale (noir). c: Crâne (cyan), les os du visage (gris). d: Air et cellules mastoïdiennes (vert), graisse (violet). e: cartilage (orange), les muscles sous-cutanés (rose). f: modèle entier.

Cette thèse porte plus spécifiquement sur la conception de l'ensemble des impulsions RF refocalisantes utilisées dans des séquences IRM non-sélectives, basées sur l'écho de spin. Dans un premier temps, seule une impulsion RF a été générée, pour une application simple : l'inversion du déphasage des spins dans le plan transverse, dans le cadre d'une séquence spin écho classique. Dans un deuxième temps, sont considérées les séquences à très long train d'échos de refocalisation appliquées à l'imagerie in vivo. Dans tous les cas, l'opérateur mathématique agissant sur la magnétisation, et non pas son état final comme il est fait classiquement, est optimisé. Le gain en imagerie à très haut champ est clairement visible puisque les opérations mathématiques (c'est-à-dire la rotation des spins) voulues sont réalisées avec bien plus de fidélité que dans le cadre des méthodes de l'état de l'art.

Pour cela, la génération de ces impulsions RF combine une méthode d'excitation des spins avec navigation dans l'espace de Fourier, les k_T-points, et un algorithme d'optimisation, appelé Gradient Ascent Pulse Engineering (GRAPE), utilisant le contrôle optimal. Le principe des k_T-points est de limiter la trajectoire de l'espace-k de transmission (parcourue avec les gradients du scanner) à un petit groupe de points autour du centre de cet espace. De cette façon, comme les inhomogénéités RF sont dominées par de basses fréquences spatiales, la limitation des excursions dans l'espace-k garantit qu'aucune énergie n'est gaspillée à des fréquences spatiales élevées d'un faible intérêt pour l'uniformisation de l'excitation des spins. De plus, le temps requis pour couvrir les quelques k_T-points est minimisé, permettant une faible durée des impulsions simultanées résultantes.

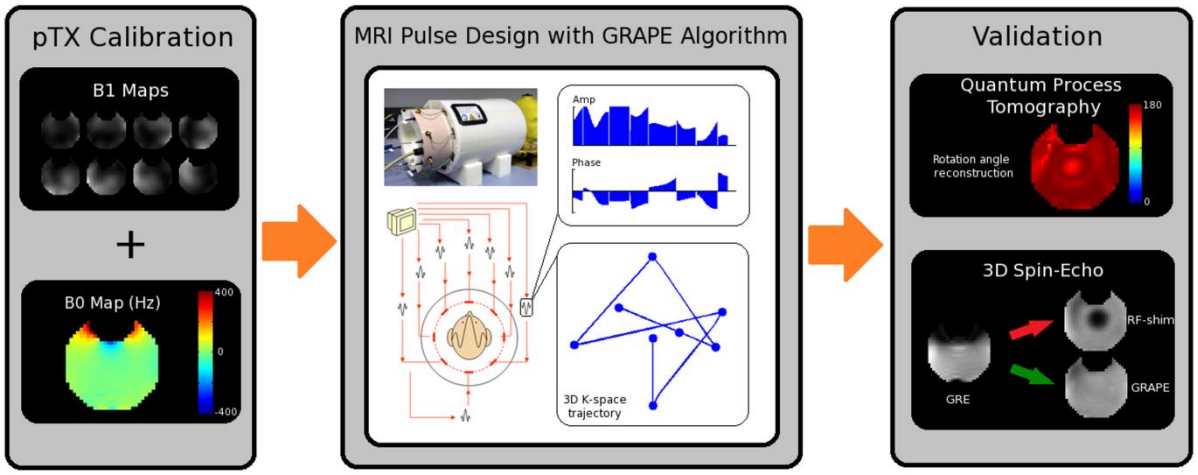

Figure 3 : Dans ce travail, nous explorons le potentiel de GRAPE pour concevoir des impulsions refocalisantes d'écho de spin non-sélectifs qui réduisent simultanément de grands défauts d'uniformité B1 et ΔB0. La méthode a été validé expérimentalement à 7 T. Les deux expériences confirment une très bonne performance, tout en maintenant une faible durée d'impulsion et dépôt d'énergie par rapport aux solutions adiabatiques bien connues.

Pour étendre la portée des k_T-points aux séquences utilisant l'écho de spin, il est nécessaire de leur donner des propriétés refocalisantes du déphasage des spins, induit dans le plan transverse, pour produire une image de qualité, sans utiliser les approximations typiquement utilisées. Les stratégies d'optimisation classiques font en effet une approximation, appelée « classe linéaire de grand angle de bascule », pour optimiser l'angle de rotation des spins de façon homogène. Toutefois, ces stratégies d'optimisation tentent une telle opération via une approximation rendue possible par une certaine symétrie imposée dans les impulsions RF et dans la trajectoire dans l'espace k. Cette approximation se détériore pour de grandes valeurs d'angles de bascule et introduit donc des erreurs dans la manipulation de la magnétisation, qui se répercutent ensuite dans l'image produite. Pour finir, ce formalisme n'est strictement valide qu'en l'absence d'offset de champ statique dans le repère tournant, une approximation plus que grossière dans le cerveau humain à très haut champ.

Une originalité supplémentaire de cette méthode est qu'elle permet la conception d'impulsions RF avec des contraintes spécifiques, selon l'utilisation faite de l'impulsion RF dans la séquence. Celle-ci peut par exemple posséder un angle de refocalisation de valeur choisie, ou encore soit une distribution de phase précise, soit une distribution de phase laissée libre. La totalité des impulsions RF utilisées dans une séquence d'imagerie à très long train d'échos peut être conçue par le biais de cette méthode en une seule fois, ce qui constitue également une nouveauté (le plus souvent, une seule impulsion est conçue, puis dilatée pour obtenir les autres). Cette conception est relativement rapide par rapport à l'état de l'art, grâce à des calculs analytiques plus directs que des méthodes de différences finies. La prise en compte d'un très grand nombre de paramètres nécessite l'usage de GPUs (*Graphics Processing Units*) pour atteindre des temps de calcul compatibles avec un examen clinique.

Cette méthode de conception d'impulsions RF a été validée expérimentalement avec succès sur l'imageur 7 Tesla de NeuroSpin, sur une cohorte de volontaires sains. Un protocole d'imagerie, d'abord testé à de multiples reprises sur fantômes (des boules d'eau de la taille d'un cerveau humain servant à tester les réglages de la machine), a été développé pour évaluer l'amélioration de la qualité des images par rapport à des impulsions RF non optimisées, typiquement utilisées.

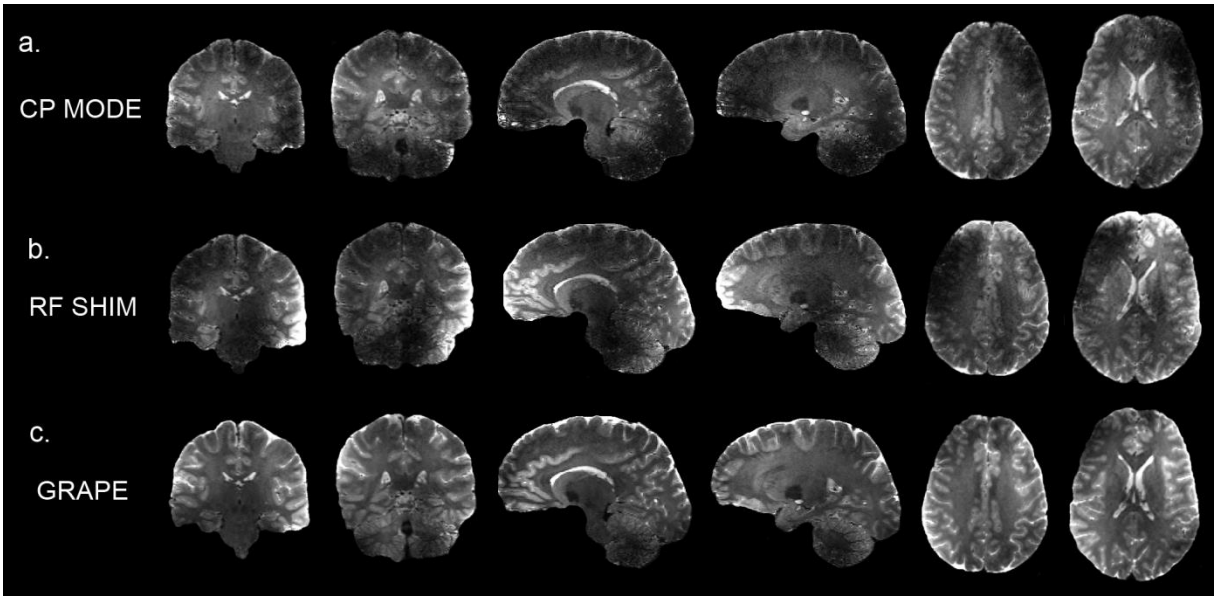

Figure 4 : Images T2 résolution isotrope 1mm (toutes les images sont corrigées pour le profil de réception). De haut en bas: a. Impulsions classiques jouées dans un mode polarisé circulairement. b. Impulsions jouées dans une configuration RF-shim statique. c. La méthodologie proposée avec des impulsions GRAPE adaptées pour l'excitation et la refocalisation.

L'ensemble des développements méthodologiques réalisés au cours de cette thèse a donc contribué à améliorer les performances de l'IRM à très haut champ à NeuroSpin, en augmentant le nombre de séquences IRM compatibles en mode de transmission parallèle. De futurs développements sont prévus afin d'augmenter encore les possibilités de la transmission parallèle, en particulier concernant l'acquisition ultra-rapide et simultanée de plusieurs coupes d'imagerie. L'ensemble des travaux présentés dans ce manuscrit, ainsi que les futurs travaux menés, devraient contribuer à faire fonctionner le futur aimant corps entier de 11.7 Tesla à son plein potentiel.