

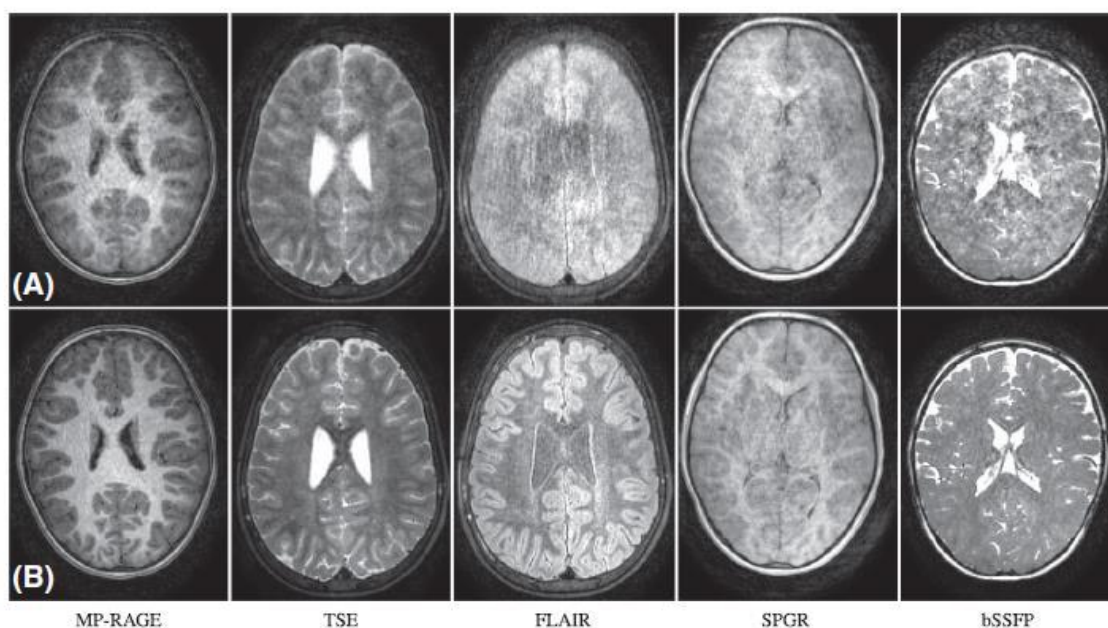
Méthodes de reconstruction avancées pour l'imagerie par résonance magnétique (IRM) à haute résolution

Résumé

Le projet de thèse vise à développer de nouvelles méthodes d'acquisition et de reconstruction d'images en IRM, afin d'améliorer la résolution spatiale pour l'imagerie diagnostique. Différentes approches seront étudiées : la modélisation et la correction des mouvements du patient pendant l'acquisition, les techniques de reconstruction super-résolution, ou encore la modélisation de l'image multi-dimensionnelle par un tenseur de rang faible. Les méthodes reposeront sur l'optimisation numérique, et pourront utiliser des informations additionnelles telles que les signaux issus de capteurs de mouvements du patient. Les applications concerneront l'imagerie des organes en mouvement sur un système IRM clinique à 3T, mais aussi l'imagerie neuro-pédiatrique à très haute résolution ($0,7 \times 0,7 \times 0,7 \text{ mm}^3$) sur un système 7T en collaboration avec le CEA Neurospin (Paris-Saclay).

Summary

The thesis project aims at developing novel image acquisition and reconstruction methods in MRI, in order to improve spatial resolution for diagnostic imaging. Several approaches will be studied: modelling and correction of patient motion during scanning, super-resolution reconstruction techniques, and/or modelling the multidimensional image as a low rank tensor. The methods will rely on numerical optimization, and may use additional information such as signals from patient motion sensors. Applications will include imaging of moving organs on a clinical 3T MRI system, but also neuropediatric imaging at very high resolution ($0.7 \times 0.7 \times 0.7 \text{ mm}^3$) on a 7T system in collaboration with CEA Neurospin (Paris-Saclay).



Images cérébrales corrompues par le mouvement de la tête (A) et images corrigées avec la méthode de reconstruction DISORDER (1) (B), pour différents contrastes IRM.

Contexte scientifique

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) est une modalité d'imagerie médicale permettant d'obtenir des images avec un large éventail de contrastes entre les tissus mous. L'acquisition des images est relativement lente, plusieurs minutes étant généralement nécessaires pour obtenir des images 3D avec une résolution de l'ordre du millimètre. Des résolutions spatiales submillimétriques restent difficiles à obtenir sur un imageur clinique. En effet, pour un type de contraste donné, un compromis doit être fait entre le temps d'acquisition, le rapport signal-sur-bruit et la résolution. De plus, de telles acquisitions sont sensibles aux mouvements des patients, qui représentent typiquement des déplacements de l'ordre du millimètre dans le cerveau (mouvements fortuits et pulsations d'origine cardiaque), et de quelques centimètres dans la région thoraco-abdominale (respiration, mouvement cardiaque, péristaltisme). Les données brutes IRM étant acquises séquentiellement dans l'espace de Fourier, de tels déplacements induisent des artéfacts de type flou ou fantômes dans l'image. Diverses stratégies peuvent être mises en œuvre pour surmonter les difficultés liées aux mouvements et aux limites du système.

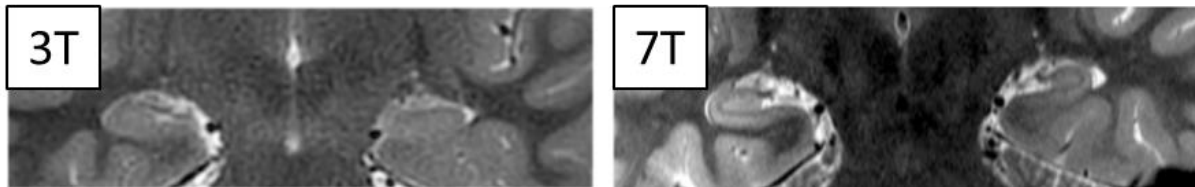
Les mouvements connus, « arbitraires » (rigide ou élastiques), peuvent être modélisés, dans le cadre d'un formalisme matriciel décrivant le processus d'acquisition IRM, et l'inversion de ce système linéaire permet de reconstruire une image corrigée (2). Dans le cas général où les mouvements ne sont pas connus, des techniques d'optimisation non-linéaire, visant à l'estimation conjointe de l'image et du mouvement, ont été proposées, dans le cas de mouvements rigides (translations et rotations globales) (1,3), ou dans le cas de mouvements élastiques (4). Cependant, de tels problèmes d'optimisation sont difficiles à résoudre et se basent généralement sur des hypothèses de régularité du mouvement. Des signaux issus de capteurs de mouvements, acquis simultanément aux données brutes IRM, permettent de contraindre la reconstruction (5). Dans ce projet de thèse nous étudierons en particulier les petits déplacements dans la région cérébrale, et nous combinerons différentes approches : modèles de mouvement rigide utilisant des informations de capteurs de mouvements. Les capteurs pourront être des dispositifs placés sur le patient ou dans la salle d'examen, mais aussi des données IRM partielles intercalées dans la séquence d'intérêt.

Pour surmonter les limites physiques, des approches super-résolution peuvent être mises en œuvre, consistant à acquérir des images de résolution anisotropes (par exemple $1 \times 1 \times 3 \text{ mm}^3$) dans 3 orientations orthogonales, puis de les combiner pour reconstruire une image isotrope ($1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$). La reconstruction super-résolution consiste à inverser un modèle d'acquisition représentant l'acquisition dégradée dans chacune des dimensions successivement (6–8). Ce modèle est généralement écrit sous forme d'un système matriciel de la forme $Ax = b$, dans lequel l'image x est un vecteur solution, mais peut être aussi vu comme un système tensoriel, dans lequel l'image x est un tenseur 3D (9,10). Des résultats préliminaires (9) montrent que le modèle tensoriel peut améliorer la qualité d'image et le temps de calcul.

Originalité et perspectives scientifiques

L'intérêt pour les méthodes de reconstruction corrigées en mouvement pour l'imagerie cérébrale est de plus en plus important à mesure que les évolutions technologiques de l'IRM (augmentation du champ magnétique, multiplication des antennes de réception etc...) permettent de repousser la limite de résolution du système. Dans le cadre du projet ANR MOSAR (Advanced Control of Head Motion and Specific Absorption Rate to Leverage the Potential of 7 Tesla MRI for Pediatric Neuroimaging), en collaboration avec le CEA Neurospin (Paris-Saclay), nous appliquerons la correction de mouvements à l'imagerie neuropédiatrique à 7T. Avec une résolution ciblée à $0,7 \times 0,7 \times 0,7 \text{ mm}^3$, l'IRM à 7T doit permettre de détecter les petites lésions épileptiques avec une meilleure sensibilité que l'IRM clinique à 3T actuelle. Ce diagnostic précoce est essentiel pour les patients souffrant d'épilepsie pharmaco-résistantes, car le succès de l'intervention chirurgicale est fortement lié à l'âge lors de la chirurgie, et le taux de succès augmente d'un facteur 2,5 à 3 lorsqu'une lésion est identifiée et localisée à l'IRM

(11). En termes de méthodologie, l'originalité de l'approche est de combiner une reconstruction conjointe de l'image et du mouvement avec des informations a priori fournies par des capteurs externes. L'augmentation des moyens de calcul, et la disponibilité de plateformes de reconstruction open-source, devraient permettre de déployer les méthodes développées dans ce projet dans un contexte clinique, avec des temps de reconstruction acceptables (< 1-2 minutes) (5).



Exemple d'IRM cérébrale à haute résolution obtenue à 3T (gauche) et à 7T (droite)

Concernant les techniques super-résolution et les modèles tensoriels de rang faible, ils constituent une nouvelle approche des problèmes de reconstruction en IRM, qui sont actuellement limités à des modèles matriciels. La raison principale est la difficulté de concevoir des algorithmes de résolution robustes et efficaces lorsqu'ils sont formalisés dans un cadre tensoriel. Nous nous appuyons sur une récente collaboration avec Clémence Prévost, chercheuse post-doctorante au CRISTAL (Lille). Les résultats préliminaires de cette collaboration (9), à la fois théoriques (preuves et conditions de reconstruction exacte) et expérimentaux, offrent de nouvelles perspectives dont les applications seront étudiées dans ce projet.

Description sommaire des étapes de thèse

Une première phase de la thèse correspond à l'étude des techniques existantes au laboratoire et dans la littérature. Un travail en simulation numérique sera notamment nécessaire pour s'approprier les techniques d'optimisation, les étendre, et les valider par rapport à une vérité terrain connue. Le prototypage sera réalisé sous Matlab. Pour les codes nécessitant des temps de calcul élevés, une intégration aux bibliothèques de reconstruction optimisées du laboratoire (codes C++) sera réalisée.

Des jeux de données test seront acquis sur des objets tests et sur volontaires sains, avec et sans mouvement. Une modification des séquences d'acquisition sera étudiée afin d'intercaler des données partielles, en vue d'extraire les paramètres du mouvement (translations, rotations). Les méthodes développées devront être applicables aux principaux noyaux d'acquisition utilisés lors des examens d'IRM cérébrale (séquences 3D en écho de gradient rapide et séquences 3D en écho de spin rapides, pour l'imagerie pondérée en T1, T2, FLAIR etc...). Des méthodes de traitement de signal seront mises en œuvre pour prétraiter ces données et/ou les données issues de plusieurs capteurs de mouvements disponibles (e.g. accéléromètres compatibles IRM positionnés sur la tête). Différentes métriques seront comparées pour évaluer la qualité d'image obtenue avec et sans correction de mouvement de manière objective, en termes de rapport signal-sur-bruit, contraste-sur-bruit ou netteté.

Pour l'étude des méthodes super-résolution et des modèles de rang faible, une méthodologie similaire, combinant simulation et expérimentation, sera adoptée. Des images de référence à hautes résolutions seront obtenues comme référence lorsque cela sera applicable. On étudiera en particulier la faisabilité des méthodes super-résolution aux séquences limitées à une acquisition 2D en coupes épaisses, telles que les séquences fortement pondérées T2 (séquences 2D Turbo Spin Echo) ou l'imagerie de diffusion. On identifiera en particulier des séquences ou stratégies d'acquisition qui permettront d'appliquer dans les meilleures conditions les algorithmes récemment développés dans le formalisme tensoriel. L'optimisation des hyperparamètres (poids des termes de régularisation, choix du rang du tenseur etc...) sera aussi étudiée.

Enfin, l'adaptation et l'intégration des algorithmes de reconstruction au sein de la plateforme de reconstruction Gadgetron (5,12) sera étudiée, en collaboration avec les autres membres du laboratoire



(Karyna Isaieva, post-doctorante), afin de permettre une reconstruction « inline » des images pendant l'examen IRM, en vue de l'application clinique à 7T, en collaboration avec le CEA Neurospin (Vincent Gras, Ingénieur-Chercheur). Un compromis pourra être réalisé si nécessaire pour obtenir une reconstruction rapide « inline » de qualité intermédiaire, puis une reconstruction « offline » de meilleure qualité après l'examen.

Environnement de travail

Le laboratoire IADI (unité Inserm U1254), dirigé par le Pr. Jacques FELBLINGER, Université de Lorraine - INSERM IADI (Imagerie Adaptation Diagnostique et Interventionnelle) est spécialisée dans la mesure des paramètres physiologiques en environnement IRM, dans les méthodes d'acquisition et reconstruction d'image en IRM, et dans la gestion des mouvements en IRM.

Basée au sein du CHRU de Nancy-Brabois, le IADI bénéficie du support du CIC-IT (Centre d'Investigation Clinique – Innovation Technologique) et entretient des liens privilégiés avec les différents services du Pôle Imagerie, Neurologie et Cardiologie du CHRU de Nancy. Ces structures disposent de temps recherche sur deux IRM du CHU de Nancy (1,5T et 3T) permettant ainsi une mise en œuvre et une validation rapides des méthodes de recherche développées.

Encadrement de la thèse

Directeur (50%): Freddy ODILLE, PhD-HDR (Chargé de recherche Inserm)

Co-directeur (50%) : Pierre-André VUISSOZ, PhD-HDR (Ingénieur de recherche Université de Lorraine)

Conditions scientifiques matérielles et financières du projet de recherche

Accès aux systèmes d'imagerie IRM cliniques du CHRU de Nancy (2 jours/semaine pour le laboratoire). Formation sécurité IRM fournie en début de thèse. Recrutement de volontaires sains/patients organisée par le Centre d'Investigation Clinique et d'Innovation Technologique (CIC-IT 1433). Contrat de collaboration avec le constructeur IRM (Siemens) et accès à la programmation des imageurs (acquisition et reconstruction, formation fournie si nécessaire). Autres équipements recherche disponibles : objets tests (fantômes de résolution etc...), capteurs de mouvements compatibles IRM, plateforme d'acquisition des signaux, système recherche pour la reconstruction des images en « temps réel », stations de travail performantes pour le calcul scientifique.

Le doctorant bénéficiera d'un poste de travail avec un ordinateur avec un accès aux différentes ressources matérielles (stations de travail pour le calcul haute-performance) et logicielles (licences Matlab et Office, serveurs git pour la gestion et le partage des codes sources, client ArchiMed pour l'accès aux bases de données image) du laboratoire. Les doctorants du laboratoire sont regroupés à plusieurs par bureau (2 à 4), afin d'éviter leur isolement. Des réunions scientifiques sont organisées de manière hebdomadaire : elles ont pour but de pouvoir discuter avec l'ensemble des chercheurs du labo des problèmes rencontrés dans les projets respectifs. Les doctorants/stagiaires ont également leurs propres réunions, qu'ils organisent hebdomadairement pour discuter entre eux, sans permanents, de concepts scientifiques, de leurs projets ou de difficultés qu'ils peuvent rencontrer.

Profil et compétences recherchées

- Formation : Ingénieur ou M2 dans une des disciplines suivantes : sciences de l'information, traitement du signal et de l'image, mathématiques, physique, génie électrique. Une



expérience (stage M2) dans le domaine de l'IRM ou du traitement d'images médicales serait un plus.

- Dynamique, autonome, présentant un vif intérêt pour la recherche et l'imagerie médicale.
- Bonne maîtrise de l'anglais et des outils de programmation scientifique (notamment Matlab).
- Bonnes capacités de communication.
-

Financement

ANR (projet MOSAR financé, en cours).

Contact

Envoyer CV et lettre de motivation à Freddy Odille (freddy.odille@inserm.fr) et Pierre-André Vuissoz (pa.vuissoz@chru-nancy.fr).

Bibliographie

1. Cordero-Grande L, Ferrazzi G, Teixeira RPAG, O'Muirheartaigh J, Price AN, Hajnal JV. Motion-corrected MRI with DISORDER: Distributed and incoherent sample orders for reconstruction deblurring using encoding redundancy. *Magn Reson Med*. 2020;84(2):713–26.
2. Odille F, Cindea N, Mandry D, Pasquier C, Vuissoz PA, Felblinger J. Generalized MRI reconstruction including elastic physiological motion and coil sensitivity encoding. *Magn Reson Med*. 2008 Jun;59(6):1401–11.
3. Cordero-Grande L, Teixeira RPAG, Hughes EJ, Hutter J, Price AN, Hajnal JV. Sensitivity Encoding for Aligned Multishot Magnetic Resonance Reconstruction. *IEEE Trans Comput Imaging*. 2016 Sep;2(3):266–80.
4. Odille F, Vuissoz PA, Marie PY, Felblinger J. Generalized reconstruction by inversion of coupled systems (GRICS) applied to free-breathing MRI. *Magn Reson Med*. 2008 Jul;60(1):146–57.
5. Isaieva K, Fauvel M, Weber N, Vuissoz PA, Felblinger J, Oster J, et al. A hardware and software system for MRI applications requiring external device data. *Magn Reson Med* [Internet]. [cited 2022 Jun 1];n/a(n/a). Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mrm.29280>
6. Odille F, Bustin A, Chen B, Vuissoz PA, Felblinger J. Motion-corrected, super-resolution reconstruction for high-resolution 3D cardiac cine MRI. Vol. 9351. 2015.
7. Bustin A, Voilliot D, Menini A, Felblinger J, de Chillou C, Burschka D, et al. Isotropic Reconstruction of MR Images Using 3D Patch-Based Self-Similarity Learning. *IEEE Trans Med Imaging*. 2018 Aug;37(8):1932–42.
8. Le Bars AL, Moulin K, Ennis DB, Felblinger J, Chen B, Odille F. In Vivo Super-Resolution Cardiac Diffusion Tensor MRI: A Feasibility Study. *Diagnostics*. 2022 Apr;12(4):877.
9. Prévost C, ODILLE F. MULTI-FRAME SUPER-RESOLUTION MRI USING COUPLED LOW-RANK TUCKER APPROXIMATION [Internet]. 2022. Available from: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03617754>
10. Prévost C, Usevich K, Comon P, Brie D. Hyperspectral Super-Resolution With Coupled Tucker Approximation: Recoverability and SVD-Based Algorithms. *IEEE Trans Signal Process*. 2020;68:931–46.



11. Bast T. Outcome after epilepsy surgery in children with MRI-negative non-idiopathic focal epilepsies. *Epileptic Disord Int Epilepsy J Videotape*. 2013 Jun;15(2):105–13.
12. Gadgetron: An open source framework for medical image reconstruction - Hansen - 2013 - *Magnetic Resonance in Medicine* - Wiley Online Library [Internet]. [cited 2022 Jun 2]. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/mrm.24389>