

Super-résolution en IRM appliquée à la reconstruction de cartographies quantitatives isotropes

Sujet de thèse

Campagne de recrutement doctoral EEA 2026

Mots clés : Imagerie médicale, Problèmes inverses, IRM quantitative, Super-résolution, Apprentissage automatique

1 Contexte scientifique de la thèse

1.1 Contexte général

L'acquisition d'images par IRM nécessite généralement de réaliser un compromis entre temps d'acquisition, rapport signal-à-bruit (RSB) et résolution spatiale. L'obtention d'images haute-résolution requises pour le diagnostic de certaines pathologies (atteintes articulaires, neuro-imagerie, infarctus, cancer colorectal), nécessite donc des temps d'acquisition importants pour obtenir des images de qualité suffisante. Or, l'allongement des temps d'acquisition est critique en clinique du point de vue du confort du patient et de la disponibilité des machines. La super-résolution en IRM est une méthode de post-traitement, visant à reconstruire une image à haute-résolution spatiale à partir de plusieurs images basse résolution. La combinaison des images basse-résolution permet d'obtenir une image présentant un RSB et une résolution spatiale supérieurs pour une durée d'acquisition équivalente [6]. La super-résolution a été initialement formalisée sous la forme d'un problème inverse régularisé (approches variationnelles), et résolu grâce à des algorithmes d'optimisation numériques, et abordé récemment avec des approches par apprentissage automatique [4].

1.2 Objectifs spécifiques de la thèse

Plus spécifiquement, cette thèse vise à exploiter les dernières avancées méthodologiques en super-résolution multi-contraste [2, 3, 7, 8, 5], pour la reconstruction de cartographies paramétriques à haute-résolution. Les pa-

paramètres ciblés, tels que les temps de relaxation T_1 , T_2 , T_2^* , la densité de proton ou la fraction lipidique, sont porteurs d'information sur les propriétés physiopathologiques des tissus imaged et nécessitent l'implémentation de séquences dédiées pour être obtenus, allongeant de fait la durée du protocole. Ce projet vise donc à réduire la durée nécessaire pour la reconstruction des cartes paramétriques à haute-résolution, en résolvant un problème inverse unique consistant à estimer de manière synchrone l'ensemble des paramètres ciblés à partir d'un nombre limité d'acquisitions rapides basse-résolution d'orientations et de contrastes différents. Ce problème fera d'une part intervenir un opérateur non-linéaire, $f(\theta, \sigma_i)$, permettant de faire le lien entre les paramètres liés à la séquence utilisée (σ_i , connus) et les propriétés de l'échantillon (θ , inconnus), aux intensités des images acquises, Y_i . Le problème posé sous forme variationnelle consistera par exemple à minimiser une fonction de coût de la forme suivante :

$$\mathcal{C}(\theta) = \sum_i \|Y_i - Hf(\theta, \sigma_i)\|^2 + \lambda R(\theta) \quad , \lambda \in \mathbb{R}_+$$

dans laquelle H est l'opérateur qui modélise le processus d'acquisition, et R une fonction de régularisation ayant pour objectif d'enrichir le contenu fréquentiel des différentes cartes paramétriques estimées, et pouvant s'inspirer de développements récents effectués dans l'équipe [1], et illustrés en Figure 1.

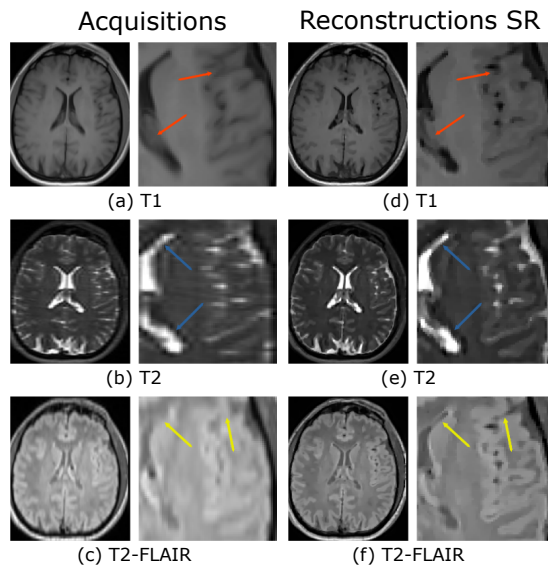


FIGURE 1 – Exemple de reconstructions multi-contraste par super-résolution sur cerveau (volontaire sain).

1.3 Programme de recherche et démarche scientifique proposée

Les principaux enjeux méthodologiques clés liés à cette thèse sont les suivants :

- Formalisation et résolution du problème d'estimation contenant un terme non linéaire (f)
- Apprentissage supervisé de l'opérateur f avec un réseau de neurones dédié
- Développement d'architectures déroulées de réseaux de neurones profonds afin d'apprendre la valeur des hyperparamètres liés au problème (liés aux opérateurs H et R notamment)

- Choix des contrastes acquis (Y_i) permettant la meilleure estimation des paramètres ciblés
- Validation expérimentale des méthodes implémentées sur des données acquises sur IRM clinique (échantillon normalisé, et volontaires sains)

2 Environnement et moyens mis à disposition pour la thèse

Les points listés ci-dessous décrivent l'environnement qui sera mis en place autour de cette thèse :

- un environnement de travail complet sera mis à disposition du doctorant (station de travail, accès au cluster du laboratoire) au sein du laboratoire CREATIS (équipe MAGICS) située sur le campus de la Doua
- le doctorant aura également accès au laboratoire LIP (ENS Lyon, site Gerland), afin de bénéficier de l'expertise de l'équipe INRIA OCKHAM dans le domaine de l'optimisation et de l'apprentissage machine (réunion d'équipe, séminaires)
- un ensemble de jeux de données d'origine variée (pré-clinique, clinique, *in vitro*, *in vivo*) déjà acquis sera mis à la disposition du candidat dès le début de la thèse
- l'étroite collaboration existante avec la plateforme d'imagerie PILoT (IRM 7T, IRM 11.7T) hébergée à CREATIS, permettra si nécessaire d'acquérir des données supplémentaires
- un accès aux IRM Siemens cliniques du CLB (1.5T Prisma et 3T Vida) sera possible après les vacances cliniques, soit à partir de 18h30 les soirs de semaine

3 Profil recherché et contacts

La personne retenue aura une formation liée au traitement de l'image/du signal, ou aux mathématiques appliquées. Une expérience ou formation liée aux problèmes inverses, à l'optimisation ainsi qu'à l'apprentissage automatique est également fortement recommandée. Une formation ou expérience en imagerie médicale, en particulier en IRM sera appréciée. La maîtrise du langage Python, de l'anglais (oral et écrit) est obligatoire. La ou le candidat.e aura la volonté de travailler et de s'intégrer dans un groupe pluridisciplinaire et multi-culturel, avec une volonté forte de développer des méthodes innovantes pour l'imagerie médicale et ses applications.

Note importante : L'attribution de la bourse de thèse est soumise au concours de l'école doctorale EEA. La personne retenue suite à un premier entretien sera amenée à présenter sa compréhension du sujet, sa motivation ainsi que son parcours devant un jury de l'école doctorale.

Lettre de motivation et CV sont à envoyer à l'équipe encadrante :

- Hélène Ratiney (Directrice de recherche CNRS) : helene.ratiney@creatis.insa-lyon.fr
- Marion Foare (Enseignante-chercheuse CPE Lyon) : marion.foare@ens-lyon.fr
- Eric Van Reeth (Enseignant-chercheur CPE Lyon) : eric.van-reeth@creatis.insa-lyon.fr

Références

- [1] Luis AMADOR et al. “Variational Reference-Free Multicontrast Super Resolution for MRI”. In : *IEEE International Symposium on Biomedical Imaging*. Avr. 2026.
- [2] Wenxuan CHEN et al. “Multi-contrast image super-resolution with deformable attention and neighborhood-based feature aggregation (DANCE) : Applications in anatomic and metabolic MRI”. In : *Medical Image Analysis* 99 (jan. 2025), p. 103359.
- [3] Batuhan GUNDOGDU et al. “Self-supervised multicontrast super-resolution for diffusion-weighted prostate MRI”. In : *Magnetic Resonance in Medicine* (fév. 2024).
- [4] Mohammad KHATERI et al. “MRI Super-Resolution with Deep Learning : A Comprehensive Survey”. In : *arXiv preprint arXiv :2511.16854* (2025).
- [5] Q. LYU et al. “Multi-Contrast Super-Resolution MRI Through a Progressive Network”. In : *IEEE Transactions on Medical Imaging* 39.9 (2020), p. 2738-2749.
- [6] Eric VAN REETH et al. “Super-resolution in magnetic resonance imaging : A review”. In : *Concept in Magnetic Resonance - Part A* 40A.6 (2012), p. 306-325.
- [7] Gang YANG et al. “MGDUN : An interpretable network for multi-contrast MRI image super-resolution reconstruction”. In : *Computers in Biology and Medicine* 167 (déc. 2023), p. 107605.
- [8] Tao ZHOU et al. “Hi-net : hybrid-fusion network for multi-modal MR image synthesis”. In : *IEEE transactions on medical imaging* 39.9 (2020), p. 2772-2781.