



Comprendre le monde,  
construire l'avenir®



UNIVERSITE PARIS-SUD

ÉCOLE DOCTORALE

Sciences et Technologie de l'Information, des Télécommunications  
et des Systèmes

Laboratoire d'Imagerie par Résonance Magnétique Médicale et Multi-Modalités (IR4M)

*DISCIPLINE : Physique*

**THÈSE DE DOCTORAT**  
**Synthèse en français**

Soutenance prévue le 17/12/2014

par

**Roberta KRIEGL**

**A flexible coil array for high resolution magnetic  
resonance imaging at 7 Tesla**

**Composition du jury :**

*Directeur de thèse :*  
*Co-directeur de thèse :*  
*Examineurs :*

Jean-Christophe Ginefri  
Ewald MOSER  
Wolfgang DREXLER  
Elmar LAISTLER

HDR, IR4M, Université Paris Sud  
Professeur, CMPBME, Université médicale de Vienne  
Professeur, CMPBME, Université médicale de Vienne  
Chercheur, CMPBME, Université médicale de Vienne

## Introduction et objectives

Cette thèse résulte d'une collaboration internationale entre le Laboratoire d'Imagerie par Résonance Magnétique Médicale et Multi-Modalités (IR4M) de l'Université Paris Sud (France) et le Center for Medical Physics and Biomedical Engineering de l'Université de médecine de Vienne (Autriche). Cette thèse porte sur le développement des antennes radiofréquence (RF) pour l'imagerie par résonance magnétique (IRM) à haute résolution et à ultra-haute intensité du champ magnétique.

L'IRM est un outil d'investigation majeur donnant accès de manière non invasive à de nombreuses informations quantitatives et fonctionnelles. De nombreuses applications biomédicales de l'IRM requièrent des images à haute résolution spatiale, avec un rapport signal sur bruit (RSB) élevé et des temps d'acquisition raisonnablement courts. D'un point de vue instrumental, ces exigences nécessitent l'utilisation d'antennes RF hautement sensibles, adaptées en taille et en forme à la région d'intérêt observée. Pour développer de telles antennes, plusieurs stratégies connues pour améliorer la sensibilité de détection peuvent être combinées, comme l'utilisation de champs statiques élevés, la mise en réseau de petites bobines RF, ou encore l'utilisation de matériaux flexibles pour la fabrication de la bobine afin de permettre la conformation de la bobine à la surface de la région cible. Bien que des principes et des techniques efficaces soient disponibles pour ces stratégies lorsqu'elles sont suivies individuellement, la combinaison de ces stratégies pour développer un réseau flexible composé de petites bobines fonctionnant en émission/réception pour l'IRM à haut champ pose plusieurs défis que nous nous sommes proposé de relever au cours de cette thèse.

La technologie classique pour la fabrication des antennes RF utilise des composants RLC discrets et pose des limites pratiques pour la conception et la fabrication de dispositifs RF flexibles miniaturisés. Ces limitations sont dues à la rigidité des bobines elles-mêmes et à l'espace minimum requis pour le placement des condensateurs discrets. Par conséquent, dans ce travail, nous avons retenu le concept de résonateurs monolithiques à ligne de transmission (TLR) pour ainsi lever les limites de miniaturisation des antennes. Un TLR se compose de

deux bandes conductrices circulaires déposées sur les deux faces d'un substrat diélectrique, et coupées par des fentes diamétralement opposées. Dans cette thèse, le substrat retenu pour la fabrication des antennes est un substrat souple en Téflon. Ces résonateurs sont auto-résonants, et peuvent être utilisés comme bobines RF sur une large plage de fréquences de fonctionnement RMN sans l'utilisation d'éléments discrets en ajustant les paramètres géométriques du TLR.

Comparés à une seule grande bobine, les réseaux de petites bobines RF présentent plusieurs avantages pour l'imagerie de grandes régions anatomiques. En mode réception, les réseaux peuvent atteindre un large champ de vue tout en conservant la sensibilité élevée intrinsèque des petites bobines. Combinés avec des techniques d'imagerie parallèle de tels réseaux permettent d'accélérer l'acquisition des images. En mode émission, ils permettent d'homogénéiser le champ RF d'excitation ou d'obtenir des cartes de champs spécifiques. Un défi majeur dans la conception des réseaux d'antennes concerne le découplage mutuel entre les bobines élémentaires constituant le réseau. Les techniques de découplage classiques ne sont pas appropriées pour les structures monolithiques double face comme le TLR. Soit ces techniques sont limitées à des bobines classiques, utilisant des éléments discrets, et donc incompatibles avec la nature monolithique des TLR (comme par exemple le découplage par composants LC soudés sur la bobine), soit elles nécessitent plusieurs couches conductrices (comme par exemple, le découplage par chevauchement des bobines elles-mêmes) impliquant de fait un processus de fabrication plus complexe et rendant également la manutention après fabrication plus délicate. En outre, aucune de ces techniques n'est facilement applicable pour le développement de réseaux RF flexibles constitués d'antennes monolithiques. Aucun réseau flexible de TLR n'existait donc jusqu'à présent en raison de l'absence d'une stratégie de découplage approprié et efficace.

L'objectif principal de cette thèse est le développement d'un réseau original composé de petits TLR monolithiques fabriqués sur substrat flexible pour l'IRM à 7 T. Pour ce faire, nous avons développé une nouvelle technique de découplage adaptée aux réseaux de TLR. Dans le cadre

de ce travail, nous avons pu établir la preuve de concept de cette nouvelle technique, et montré qu'associée à des principes de conception monolithique et des procédés de fabrication par micro-technologie, elle peut être utilisée pour réaliser des réseaux de TLR flexibles avec un nombre arbitraire d'éléments et augmenter ainsi la sensibilité de détection RF.

Les différentes recherches conduites au cours de cette thèse ont également permis, de concevoir un nouveau type de TLR, le « multi-turn multi-gap TLR » (MTMG TLR), permettant d'introduire un degré de liberté supplémentaire pour optimiser la géométrie des résonateurs. Ainsi, les applications de l'IRM à haut champ nécessitant un grand champ de vue comme la plupart des applications biomédicales, peuvent être traités par la technologie de TLR multi-tour, ce qui était inenvisageable jusqu'à présent.

## **Plan de thèse**

La thèse présentée est divisée en cinq chapitres.

Dans le chapitre I, les principes de base de l'IRM sont résumés. À partir du phénomène de RMN, les fondamentaux de mécanismes de contraste et de la formation d'une image en IRM sont présentés, et les origines physiques du signal et du bruit détecté dans les expériences de RMN sont décrites.

Le chapitre II présente tout d'abord l'état de l'art de la technologie des bobines RF, introduit le principe de TLR, et décrit les méthodes pour caractériser et optimiser ce type de bobines. Les méthodes de simulation, y compris la modélisation analytique et la simulation FDTD, sont détaillées et plusieurs techniques de mesures sur banc ainsi que des expériences en imagerie sont présentées.

Le chapitre III porte sur la conception, la mise en œuvre et l'évaluation des performances d'un réseau de TLR flexible. Cet chapitre est une reproduction d'un article publié dans le journal *Magnetic Resonance in Medicine* (Kriegl, R., et al., *Magn Reson Med*, 2014, doi: 10.1002/mrm.25260).

Dans le chapitre IV, des données et informations additionnelles concernant le réseau de TLR flexible et qui n'ont pas été publiées dans l'article original sont présentées. Ces données comportent notamment des images RMN à haute résolution supplémentaires. Dans le chapitre V, un nouveau concept de TLR permettant de réaliser des résonateurs comprenant à la fois plusieurs tours et plusieurs fentes est présenté. La preuve de concept de ce nouveau type de TLR, établie à 4,7 T, et son application à 7 T sont décrits. En outre, un système de désaccord actif, qui permet l'utilisation des TLR en réception seule est présenté.

Dans le chapitre VI est proposée une discussion générale et les conclusions les plus importantes des études réalisées sont établies. Ce chapitre ouvre notamment sur quelques perspectives pour des projets de suivi et les travaux futurs.

L'annexe de cette thèse décrit le principe de fonctionnement des TLR et la condition de résonance qui en découle ainsi que les différentes étapes nécessaires à leur fabrication. A la fin du manuscrit toutes les références, figures et tableaux sont répertoriés. Une liste de publications et un CV de l'auteur sont donnés.

## **Développement d'un réseau d'antennes flexible**

L'objectif principal de cette thèse est le développement d'un réseau original pour l'IRM à 7 T, composé de petits TLR monolithiques fabriqués sur un substrat flexible et utilisé en émission/réception. Pour atteindre cet objectif, différents défis doivent être relevés.

Une stratégie appropriée pour assurer le découplage mutuel entre les éléments individuels du réseau doit être recherchée, les paramètres géométriques des éléments individuels (TLR) doivent être déterminés de façon à atteindre la fréquence de résonance souhaitée, et un système d'adaptation dédié doit être trouvé avant la fabrication d'un premier prototype de réseau. Après la fabrication, les performances du prototype développé doivent être évaluées au regard du taux d'absorption spécifique (SAR), de la flexibilité, de l'imagerie parallèle, de la robustesse vis-à-vis des conditions de charge, et de leur utilisation en IRM haute résolution à haut champ.

Les différentes étapes nécessaires au développement d'un réseau de TLR sont présentées dans les chapitres III et IV.

Il y est décrit comment le couplage mutuel entre les TLR a été évalué par calcul et par mesure de l'inductance mutuelle, indiquant clairement la nécessité du découplage dans un réseau de TLR. Pour découpler les éléments dans un réseau de TLR, le nouveau principe développé au cours de cette thèse repose sur la modification de la géométrie de base de TLR par l'ajout de petites annexes circulaires connectées en série avec les conducteurs principaux du TLR. Les éléments voisins sont découplés entre eux par le chevauchement d'une annexe d'un élément (sur une face du substrat) et d'une annexe de l'autre élément (sur l'autre face du substrat). De cette façon, le flux magnétique partagé par les conducteurs principaux peut être annulé par le flux partagé par les annexes. Quatre annexes par TLR permettent le découplage entre les voisins les plus proches dans des réseaux 2D agencés en tétragone.

Les géométries des TLR utilisés en tant qu'éléments individuels du réseau prototype et les fréquences de résonance correspondantes sont spécifiées. La conception et l'étude de TLR simple- et double-fentes combinés avec une technique d'adaptation par couplage inductif ou capacitif a été réalisée et a conduit à quatre configurations possibles pour la réalisation d'un prototype. La taille des annexes de découplage a été optimisée par simulations FDTD pour les TLR simple et double-fentes en évaluant le paramètre de transmission  $S_{21}$  entre deux éléments voisins en fonction du diamètre de l'annexe. La taille de l'annexe offrant la meilleure isolation magnétique entre les éléments voisins a été considérée comme optimale.

Le processus de sélection d'une taille de coupleur pour coupler inductivement les éléments constituant le réseau à la chaîne de réception de l'imageur est décrit. Cinq coupleurs différents avec des diamètres variant de 10 à 30 mm par pas de 5 mm ont été évalués en simulations et testés expérimentalement. Les critères de comparaison retenus sont le facteur de bruit du coupleur, le couplage entre les coupleurs voisins et la distorsion du champ RF produit par les TLR. Après analyse des résultats au regard de ces critères de sélection, des coupleurs de 15

mm ont été sélectionnés. Le facteur de bruit de ces coupleurs était de 1,6 (soit 2 dB dégradation du bruit), et l'isolement mesuré entre TLR voisins était de 14,3 dB.

Une comparaison des quatre configurations de réseau étudiées en termes d'efficacité de découplage obtenue avec la nouvelle technique de découplage est présentée. A partir de simulations FDTD et de mesures sur banc, il est démontré que l'efficacité de découplage dans les réseaux de TLR est fortement liée à la distribution de la densité de courant le long de la ligne de transmission. En particulier, la densité de courant doit être la même pour toutes les annexes de découplage afin d'équilibrer les flux magnétiques partagés par les annexes et ainsi uniformiser les niveaux de découplage entre les plus proches voisins dans des réseaux 2D. Il est montré que ceci peut être réalisé en utilisant une conception de TLR à double-fentes combinée avec une technique d'adaptation par sur-couplage inductif. Cette configuration a ensuite été sélectionnée pour une utilisation en l'IRM à 7 T.

La problématique du SAR a également été abordée. Il est montré qu'aucune augmentation locale du SAR n'est observée à l'endroit des annexes de découplage, que ce soit pour un TLR isolé ou pour le réseau à quatre éléments.

Nous détaillons ensuite la méthode suivie pour évaluer les performances vis-à-vis de la flexibilité du réseau et de son utilisation en imagerie parallèle à l'aide de fantômes. La robustesse des performances du réseau développé a été démontrée avec succès lorsque celui-ci était enroulé sur un fantôme cylindrique. Les paramètres S de transmission, la matrice de corrélation de bruit et les facteurs d'accélération  $g$  n'ont pas été significativement dégradés par la déformation mécanique du réseau.

En dernier lieu, nous détaillons la mise en place du système de détection complet, incluant le réseau flexible, les coupleurs et l'électronique associée pour l'acquisition d'images à haute résolution spatiale de plusieurs fruits et une jambe de mouton dans un IRM corps entier de 7T.

## Autres avancées avec des antennes TLR

En marge du développement d'un réseau de TLR flexible, d'autres avancées concernant les TLR pour l'IRM ont été faites dans le cadre de cette thèse. Elles sont résumées dans le chapitre V.

Tout d'abord, une solution alternative pour l'adaptation capacitive du réseau, qui ne perturbe pas la répartition de la densité de courant intrinsèquement symétrique le long du TLR a été étudiée. Cette solution consiste à connecter le circuit aux bornes d'une fente supplémentaire qui est insérée dans l'un des conducteurs et située au centre d'une section du conducteur. L'accord en fréquence et l'adaptation à  $50 \Omega$  peuvent être réalisés en ajustant les condensateurs respectifs. Ce circuit de couplage capacitif a été testé avec les TLR double-fentes et les annexes utilisées pour le développement du réseau prototype. Les expériences menées sur banc de mesures et les simulations FDTD ont montré qu'une distribution de courant symétrique le long du TLR, et donc entre les annexes de découplage, peut être obtenue avec le nouveau circuit capacitif proposé. Les niveaux de découplage entre voisins les plus proches dans le réseau à quatre éléments étaient inférieurs à ceux obtenus avec l'adaptation par couplage inductif.

En complément, un circuit pouvant être combiné avec la technique de couplage capacitive et permettant de désaccorder activement un TLR pendant la phase d'émission afin de l'utiliser uniquement en réception a été développée et est présentée dans la section V.3. En plus des condensateurs initiaux pour l'accord et l'adaptation, un circuit bouchon accordé à la fréquence de résonance du TLR est utilisé afin de réaliser une haute impédance et ainsi bloquer le courant circulant dans la bobine. Le principe de désaccord actif des TLR a été évalué sur banc et dans un imageur corps entier de 3 T. Des images 3D GRE ont été acquises dans deux configurations différentes: (1) La bobine corps entier de l'imageur a été utilisée pour l'émission RF et le TLR a été utilisé pour la réception du signal; (2) La bobine corps entier a été utilisée à la fois en émission et en réception, tandis que la bobine TLR a été activement désaccordée. La première configuration a permis de montrer que le circuit proposé permet l'acquisition des images avec le TLR en mode réception seul. Cependant, la deuxième configuration a révélé qu'un courant



est induit dans le TLR pendant la phase d'émission RF malgré le circuit de désaccord, et génère des artefacts d'imagerie détectable. Le TLR utilisé dans cette première étude de faisabilité n'ayant pas été initialement conçu pour l'imagerie à 3 T, il est attendu un blocage du courant induit plus efficace avec un TLR plus soigneusement sélectionné.

Nous avons également proposé une nouvelle géométrie TLR qui permet la fabrication de TLR multi-tours avec plusieurs fentes par bande conductrice (MTMG TLR). La première étude de cette nouvelle géométrie de TLR a été réalisée à 4,7 T, et est présentée dans la section V.4. Le prototype utilisé avait un diamètre extérieur de 42 mm, six tours et quatre fentes; et a été fabriqué sur un substrat de PTFE de 0,51 mm d'épaisseur. La fréquence de résonance calculée (215 MHz) et la fréquence de résonance mesurée (204,2 MHz) sont en accord avec un écart de 5%. Des expériences d'IRM avec le MTMG TLR ont été réalisées en mode émission-réception à 4,7 T en utilisant la méthode d'adaptation par couplage inductif. Des images 3D GRE ont été acquises dans trois configurations: La bobine a été placée à plat sur un fantôme avec une surface plane. Ensuite, la bobine a été testée à plat sur un fantôme cylindrique puis enroulée autour de ce fantôme. Il est montré que ce nouveau type de TLR peut être utilisé en IRM et que ses performances en imagerie sont robustes au regard de sa flexibilité.

Après la mise en œuvre réussie d'un prototype de MTMG TLR, une étude comparative de plusieurs MTMG TLR avec un diamètre extérieur de 10 cm a été menée à 7 T et est décrite dans la section V.5. Le modèle analytique a permis d'obtenir une large variété de géométries différentes pour les MTMG TLR utilisables à 7T, dont neuf ont été sélectionnées pour fabrication. Les neuf géométries retenues varient au niveau du nombre de tours (2, 4 et 6) et du diamètre intérieur du TLR (environ 3 cm, 5 cm et 8 cm). Dans des expériences sur banc il a été constaté que l'écart entre les fréquences de résonance mesurées et celles calculées peut atteindre 23%, et que, par conséquent, seulement trois des neuf MTMG TLR conçus peuvent être utilisés pour des expériences d'IRM (2T-5cm, 2T-8cm et 5T-6cm). Pour ces trois MTMG TLR, des simulations FDTD ont été utilisées pour évaluer la distribution de densité de courant, et estimer les profils de champs  $B_1^+$  et les valeurs moyennes de SAR-10g. Les simulations de

distribution de densité de courant montrent que le courant est maximal au centre des bandes conductrices et minimal au niveau de leurs extrémités. Les projections d'intensité maximale de SAR10g- simulée varient légèrement dans la distribution spatiale avec le diamètre intérieur du MTMG TLR. Les profils de  $B_1^+$  simulés montrent que la distribution de  $B_1$  varie fortement entre les trois MTMG TLR. Le 2T-5cm MTMG TLR produit un fort  $B_1^+$  sur un champ de vue latéral étroit, le 2T-8cm MTMG TLR génère un  $B_1^+$  de moindre intensité mais sur un champ de vue plus large; Le profil de  $B_1^+$  du 5T-6cm MTMG TLR apparaît comme un compromis entre les deux premiers. Dans les expériences d'IRM, des images 3D GRE et des cartes d'angle de basculement ont été acquises. Les cartes d'angle de basculement sont qualitativement en bon accord avec les cartes  $B_1^+$  simulées.

## Discussion

L'objectif principal de cette thèse est le développement d'un réseau de TLR flexible pour l'IRM à 7 T. Le concept de TLR a été choisi pour la réalisation des éléments individuels du réseau car il permet de fabriquer des bobines RF monolithiques auto-résonantes qui peuvent être adaptées à différentes géométries d'échantillons sans utiliser d'éléments localisés. Pour atteindre les objectifs de cette thèse et pour optimiser le réseau de TLR développé, le couplage mutuel entre les TLR a été étudié en détail, et plusieurs réseaux d'adaptation dédiés aux TLR monolithiques ont été étudiés et comparés. Des méthodes expérimentales ont été combinées avec des simulations analytiques et numériques avancées afin de permettre le développement et la mise en œuvre du premier réseau flexible de TLR pour l'IRM.

Jusqu'à maintenant, aucun réseau TLR n'existait en raison de l'absence d'une stratégie adaptée pour découpler mutuellement les éléments individuels du réseau. Dans ce travail, une nouvelle technique de découplage compatible avec des résonateurs monolithiques à double face a été développée. En utilisant cette technique, un réseau de quatre éléments a été développé et optimisé par des simulations FDTD combinées à des co-simulations et par des mesures sur banc de test. Sur quatre configurations de réseau étudiées, la plus performante a été retenue et utilisée dans des expériences d'IRM à 7 T. Dans ces expériences, la flexibilité du réseau a été démontrée avec succès. Il a été montré que l'accord et l'adaptation peuvent être réalisés avec une méthode de couplage inductive pour différentes conditions de charge (torse humain, fantôme en forme de boîte, fantôme cylindrique, plusieurs fruits et patte de mouton), et que le découplage obtenu entre les éléments ainsi que les performances en imagerie parallèle sont robustes vis-à-vis de la déformation mécanique du réseau TLR.

Les applications biomédicales potentielles des réseaux flexibles de TLR basés sur les concepts présentés dans cette thèse concernent l'imagerie haute résolution de la peau et des articulations comme le poignet, le coude ou le genou, ainsi que l'imagerie dynamique d'organes en mouvement tels que le cœur. Pour répondre au mieux aux besoins de ces différentes applications, les performances du réseau développé dans ce travail peuvent encore être

améliorées en augmentant le nombre d'éléments du réseau et en optimisant la taille des différents éléments en fonction de l'organe ou de la structure à observer.

Dans cette thèse, un nouveau concept de TLR a également été proposé: le MTMG TLR. Ce nouveau concept élargit la gamme des paramètres d'ajustement de la géométrie des TLR autorisant ainsi leur utilisation pour les applications en IRM à haut champ nécessitant un grand champ de vue, comme la plupart des applications biomédicales. Ceci était inenvisageable jusqu'à présent en raison de la fréquence de résonance intrinsèquement basse des TLR multi-tour de grande dimension qui possède de fait une inductance élevée. La conception des MTMG TLR exploite le fait que la fréquence de résonance d'un TLR augmente presque linéairement avec le nombre de fentes. Jusqu'à maintenant, les résonateurs avec plus d'une fente par bande conductrice n'existaient que dans la configuration mono-tour car aucun schéma de conception pour plusieurs tours n'avait été proposé. Bien qu'il soit attendu que l'utilisation des MTMG TLR soit principalement intéressante pour des applications biomédicales en IRM à haut champ, ce concept est applicable pour toutes les intensités de champ et toutes les tailles d'antennes. Le degré de liberté supplémentaire dans la conception apporté par ce nouveau concept permet d'optimiser conjointement la géométrie des TLR, la distribution de courant, et le profil de  $B_1$  avec une meilleure précision. Finalement, ce concept apparaît également avantageux pour le développement de TLR de petites dimensions fonctionnant en basse fréquence, et, en principe, pour le développement d'antennes supraconductrices.

## Conclusion générale

En conclusion, cette thèse décrit de nouveaux concepts technologiques pour le développement d'antennes flexibles pour l'IRM à champ élevé sur la base de résonateurs à ligne de transmission monolithiques. Le réseau de TLR développé dans ce travail permet d'exploiter le RSB élevé associé aux bobines de petites tailles tout en accédant à un champ de vue élargi, et autorise l'utilisation de techniques d'imagerie parallèle pour l'acquisition accélérée et de techniques d'optimisation de  $B_1^+$ . La possibilité d'adapter la forme de la bobine RF à la surface de la région anatomique étudiée peut être exploitée pour augmenter la sensibilité de détection dans les examens d'imagerie.