

Optimisation et contrôle d'un cylindre de HALLBACH en vue de la réalisation d'un dispositif RMN portable haute résolution

Porteur du projet : Bastien Roucariès (Laboratoire SATIE)

Participants au projet :

- Kamila Abahri (LMT)
- Rachid Bennacer (LMT)
- Bastien Roucariès (SATIE)
- Lionel Vido (SATIE)

Montant demandé : 16 000 €

Résumé du projet

Les dispositifs à base de Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) participent grandement à la caractérisation et l'innovation de matériaux complexes d'origine chimique et biologique. Utilisés comme outils de contrôle non destructif en médecine, ils permettent d'obtenir des images scanner (IRM) de haute résolution. Ces dispositifs sont d'autant plus coûteux et difficiles à mettre en œuvre que la résolution recherchée est importante. En effet, pour atteindre des résolutions élevées, ils utilisent notamment des aimants à haut champ cryogéniques à base de supraconducteurs nécessitant une alimentation permanente en hélium liquide limitant de ce fait les applications et leurs conditions d'utilisations.

Dans le cadre de la mise au point au sein du laboratoire SATIE d'une nouvelle génération d'IRM haute résolution portable, la mise au point d'un dispositif à aimants ponctuels statiques confinés judicieusement positionnés est un des verrous à lever. Pour y parvenir le laboratoire se propose d'utiliser un aimant statique fonctionnant à température ambiante s'appuyant sur les avancées récentes des aimants permanents à base de terre rare.

Afin d'atteindre un champ magnétique statique homogène dans la zone d'investigation, le positionnement des aimants ponctuels et leur aimantation sont tout à fait cruciaux. En pratique le contrôle en température des aimants et les forces mises en jeu sont des contraintes fortes. Ce projet a pour objectif, l'étude et l'optimisation du positionnement de ces aimants en fonction de l'ensemble de ces paramètres en collaboration avec le LMT. Ce projet devrait aboutir à la réalisation d'un premier prototype à échelle 1/10.

1 Sommaire

Optimisation et contrôle d'un cylindre de HALLBACH en vue de la réalisation d'un dispositif RMN portable haute résolution	1
1 Sommaire	3
2 Situation du projet sur le plan national, européen et international	4
3 Objectifs	5
4 Description et déroulement du projet	7
5 Partenaires	8
6 Communication et valorisation du projet	9
7 Budget du projet	9
8 Bibliographie	10

2 Situation du projet sur le plan national, européen et international

L'IRM (Imagerie par Résonance Magnétique) ou la RMN (Résonance Magnétique Nucléaire) sont des technologies qui ont déjà fait leurs preuves. Les travaux fondamentaux de cette discipline datent de Rabi (1938), Bloch et Purcell (1946). Ces travaux, qui ont reçu les prix Nobel en 1944 et 1952, ont donné lieu à de nombreux brevets tant pour la spectroscopie RMN que pour l'imagerie par résonance magnétique (IRM).

Le principe de base de la RMN repose sur la détection d'un signal radiofréquence émis lorsque des noyaux atomiques, de spin non nul, sont disposés dans un champ magnétique externe. Classiquement le dispositif expérimental est constitué (voir figure 1) d'un aimant supraconducteur entourant un tube de test à température ambiante, ce tube incorporant une sonde RF d'émission/réception.

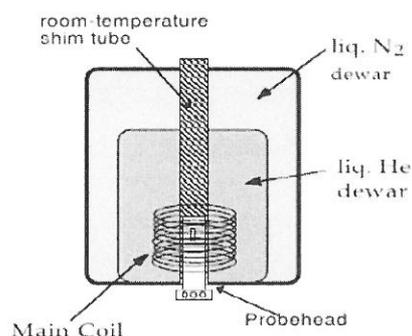


Figure 1 : Schéma de principe d'une RMN classique

Bien que le principe de la RMN soit simple, la mise en œuvre est compliquée par le design de l'aimant. En effet, la résolution dépend en particulier de l'intensité du champ statique (généralement > 1 T). Une haute résolution nécessite alors d'utiliser des aimants à base de supraconducteur, ce qui impose des techniques de mise en œuvre complexes de surcroît cryogéniques. L'aimant est souvent entouré d'un bain d'hélium liquide, lui-même entouré d'un bain d'azote liquide calorifugé.

La complexité des systèmes RMN rend les dispositifs très coûteux. L'utilisation de la cryogénie et raréfaction de l'hélium conduisent à des prix de l'ordre de 500 000 € pour une entrée de gamme sans les accessoires (Bruker). Pour construire un système d'IRM les coûts sont encore plus prohibitifs, ce qui limite le nombre d'appareils en France et accroît les délais d'attente des patients (34 jours en moyenne en 2012) ainsi que le coût pour la collectivité (plus de 1000 € l'examen).

Parallèlement, de nouveaux matériaux magnétiques à base de terre rare ont depuis les années 1990 révolutionnées le domaine des moteurs électriques, en permettant une compacité et des rendements très élevés à l'aide de leur très forte aimantation rémanente [1]. Plusieurs équipes dans le monde ont eu alors l'idée d'utiliser ces aimants afin de réaliser des dispositifs permettant d'effectuer des analyses par RMN. Ces structures sont basées majoritairement sur des dispositifs appelés cylindres de Hallbach [2] et ont permis d'obtenir quelques résultats dans le domaine de la RMN [3].

La principale difficulté rencontrée est double. En premier lieu un manque de reproductibilité des résultats due à une variation des paramètres magnétiques liée à la température (de l'ordre de 1% par °C) et aux séquences RMN utilisées [4] (auto échauffement). En second lieu, la réalisation de ce type de dispositif nécessite un long réglage pour obtenir des résultats d'uniformité de champ à un millième en sacrifiant de manière importante l'intensité du champ [5]. Ce long réglage, préalable à toute mesure, nuit grandement à l'industrialisation ou à son utilisation en routine. En outre, la manufacturabilité de ces cylindres de Hallbach est difficile. Les forces mécaniques en jeu (1000 N [6] force exercée entre des aimants standards de 5 cm de côté), amènent les concepteurs de ce type de dispositif à rendre la structure mécanique hyperstatique. Ceci diminue fortement les possibilités de réglage par éloignement des aimants rendu nécessaire par la dispersion de leurs fabrications.

La mise au point d'un dispositif de type HALLBACH répondant à ces contraintes constitue un enjeu majeur pour la réalisation d'un système de diagnostic RMN à faible coût.

3 Objectifs

Ce projet transdisciplinaire à l'interface de l'ingénierie électrique/thermique/mécanique consiste donc à étudier et développer un aimant prototype de nouvelle génération pour la RMN. Les résultats préliminaires obtenus par ce projet permettront d'envisager la réalisation d'un système de caractérisation complet en réponse à un appel à projet de recherche plus ambitieux (ANR, FUI..), l'objectif final étant de permettre à terme la réalisation d'un démonstrateur d'un appareil RMN transportable à faible coût pour des applications dédiées au contrôle non destructif, la santé et le bien être.

Un schéma préliminaire de l'aimant permanent est présenté ci-après figure 2.

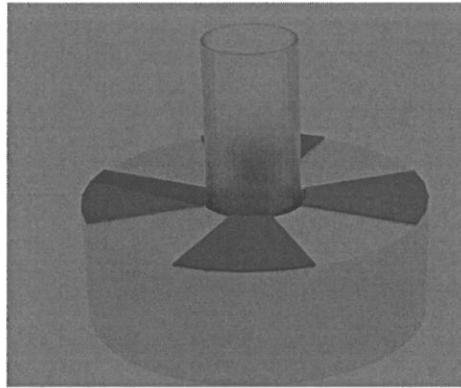


Figure 2 : schéma du dispositif proposé. En rouge et argenté aimants terre rare d'orientations différentes (en interaction entre eux). En gris : structure de maintien (environ 400 mm de diamètre). En transparence et à l'intérieur le tube d'analyse.

Cet aimant doit répondre à un premier cahier des charges strict et particulièrement contraignant propre à la caractérisation de matériaux par RMN. Il doit être constitué de plusieurs aimants élémentaires judicieusement placés pour assurer une grande uniformité du champ magnétique statique dans la zone d'investigation (ici appelée zone utile). Compte tenu que dispositif est conçu pour être manuellement transportable, ce champ magnétique permanent doit garder une stabilité suffisante quel que soit l'environnement et les conditions d'utilisation (à l'ambiante).

Afin d'atteindre une sensibilité de mesure RMN acceptable voire une haute résolution en IRM, l'intensité du champ magnétique choisie B_0 est d'environ 1 Tesla. Compte tenu des contraintes mécaniques et thermiques engendrées par une telle intensité cette valeur correspond à la limite haute que doit permettre les technologies à base d'aimants statiques constitués de terre rare. Les fréquences de précession du proton d'environ 42 MHz permettront une analyse spectroscopique de matériaux complexes (plus le champ est important meilleure est l'analyse). Le champ choisi est par ailleurs compatible avec la transportabilité.

Le volume total visé correspond à 8 L. En supposant que les aimants représentent 50 % du volume, la masse du dispositif ne devra pas excéder 30 kg.

Dans la zone d'investigation, ce champ doit être particulièrement homogène à des ordres supérieurs afin d'éviter des artéfacts de mesure lors de la précession des spins.

Afin d'atteindre une telle homogénéité, il est possible d'adjoindre un système de compensation actif permettant un réglage fin de la répartition spatiale du champ. Ce réglage est néanmoins limité, car une boucle de courant de 5 mm de rayon traversé par un courant de 10 A ne génère qu'un champ d'environ 1 mT. Un courant plus fort est difficile à

faire passer dans une boucle pour des raisons thermiques (auto échauffement et déformation d'origine thermomécanique). Ainsi la répartition des aimants élémentaires doit assurer au niveau de l'entrefer un champ statique (B_0) sans compensation électrique constant et homogène d'au maximum $\pm 0,1$ % sur un cylindre de rayon 5 mm et hauteur 15 mm.

Ces contraintes sont particulièrement difficiles à atteindre. Elles expliquent la nécessité de réaliser une étude préliminaire de faisabilité magnétique, mécanique et thermique pour aboutir à la réalisation d'un prototype. Ces objectifs constituent le cœur de cette demande.

Il faudra en pratique :

- Proposer un système de contrôle en température limitant la dérive en température des aimants. Il est important que ce contrôle ne perturbe pas le champ magnétique. Les moyens utilisés devront également être neutres vis à vis de la RMN (absence de protons).
- Assurer mécaniquement la sécurité des personnes (une quantification des forces mise en jeux est nécessaire). Cette quantification des efforts en fonction de la distance entre les aimants est primordiale pour concevoir le système de guidage et de réglage. Ce dispositif de consolidation mécanique doit être amagnétique (pas d'acier) pour ne pas perturber la mesure.
- Proposer des moyens de réglage mécanique des différents aimants composant l'Hallbach (compenser les dispersions de fabrication des aimants et les dispersions de réalisation de la structure de type Hallbach).
- Enfin mettre en œuvre un premier prototype de validation de concept à échelle réduite si nécessaire.

4 Description et déroulement du projet

Le projet se déroulera sur 18 mois.

Le projet se décline en plusieurs tâches impliquant deux chercheurs du LMT et deux chercheurs du laboratoire SATIE dont voici la description synthétique :

- La tâche 1 doit assurer l'étude du positionnement des aimants élémentaires et de leur composition pour assurer le champ statique souhaité. Cette étape sera

réitérée autant de fois que nécessaire en fonction des résultats des tâches suivantes.

- La tâche 2 consistera à étudier et minimiser l'influence de la température. Elle comportera trois sous tâches :
 - Dans la tâche 2.1, nous étudierons les variations des aimants en fonction d'un chauffage localisé particulièrement sur la face interne de l'Hallbach (face la plus exposée aux séquences et à l'auto-échauffement).
 - Dans la tâche 2.2 nous proposerons un dispositif de contrôle de la température compatible avec la RMN (non magnétique et dont le matériau est transparent à la RMN)
 - La tâche 2.3 comportera une réalisation de ce dispositif de contrôle.
- La tâche 3 consistera à étudier la possibilité de rendre la structure mécanique réglable et ainsi permettre un ajustement du champ magnétique. Elle comportera trois sous-étapes
 - Une étude mécanique fine (tâche 2.1) du comportement des aimants afin de faire des études de dimensionnement du dispositif mécanique. En effet, en première approximation le calcul idéal de forces entre deux aimants en contact donne un résultat singulier. La simulation numérique permet d'obtenir des valeurs finies mais reste une approximation grossière de la réalité car elle ne tient pas compte de tous les effets secondaires comme par exemple la désaimantation par proximité.
 - Du fait des enjeux sécuritaires une approche expérimentale est donc nécessaire afin de dimensionner au mieux ces dispositifs de réglage.
 - Une réalisation pratique d'un dispositif de mesure pour une configuration typique des aimants d'un Hallbach. Cette réalisation permettra de tester les types de réglages et de repositionnement.
- La tâche 4 consistera à mettre en place un banc de mesure pour vérifier l'homogénéité du champ magnétique statique. Cette étape permettra également la validation expérimentale du dispositif.

5 Partenaires

Ce projet sera porté par le laboratoire SATIE et par le LMT

Le SATIE apportera son savoir faire dans la conception des dispositifs à base d'aimants et sa connaissance de l'instrumentation associé à la RMN. Le LMT apportera son savoir faire dans le domaine de la thermique et de la mécanique.

Les étapes 1 et 4 seront assurées par :

- Bastien Roucariès en tant que spécialiste RMN et instrumentation (50%) responsable scientifique pour le SATIE,
- Lionel Vido en tant que spécialiste des aimants à base de terre rare (50%).

Les étapes 2 et 3 seront assurées par :

- Kamila Abahri en tant que spécialiste de la thermique (50%) responsable scientifique pour le LMT,
- Rachid Bennacer en tant qu'interlocuteur des spécialistes des structures mécanique (50%).

Il est souhaitable pour réaliser les tâches #1 et #2 de pouvoir bénéficier de deux stagiaires de master. En effet, ces études nécessiteront de la simulation numérique et de l'optimisation tâche particulièrement demandeuse en ressource numérique.

Ce projet contribuera à la formation par la recherche des stagiaires en leurs permettant d'acquérir des connaissances en réalisation de structures magnétiques, une initiation aux problématiques à la convergence de trois domaines mécanique thermique et magnétique et complétera leurs compétences en techniques numériques.

6 Communication et valorisation du projet

La communication du projet se fera par les canaux habituels :

- publication d'articles,
- participation à des conférences nationales ou internationales. Cette action est soumise à l'obtention d'une subvention auprès de la fondation.

Néanmoins cette communication devra tenir compte des contraintes imposées par la propriété industrielle et donnera lieu à avis de la part du service lié à la valorisation.

7 Budget du projet

L'achat des aimants dédiés est assuré par le laboratoire SATIE. Le budget demandé ne concerne que la mise en place du dispositif et du banc de mesure de validation du premier prototype.

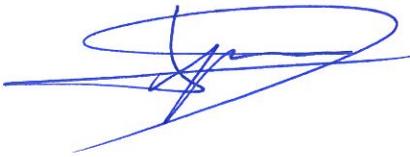
	Montant demandé en €
Stagiaire (2 * 6 mois)	5300
Conférence (*2)	3000
Etude et réalisation thermique	3000
Réalisation mécanique	3000
Réalisation du banc de mesure	1700
Total	16000

L'estimation des coûts a été effectuée au plus proche compte tenu de l'expérience de mise en œuvre de volumes d'aimants identiques pour la réalisation de moteurs électriques.

Le coût d'une conférence internationale est estimé à partir du standard de remboursement du laboratoire (500 € d'inscription, 500 € de transport, 500 € de logement).

8 Bibliographie

1. B. Nedjar, B.; S. Hlioui S.; Lecrivain M.; Vido, L.; Amara, Y. ; Gabsi, M; Miraoui, A, (2011) "New Hybrid Excitation Synchronous Machine: Principle, 3D Finite elements and experimental validation", Magnetics, IEEE Transactions on
2. K. Halbach (1980). "Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material". Nuclear Instruments and Methods 169 (1)
3. G. Moresi, R. Magin (2003). "Miniature permanent magnet for table-top RMN" Concepts Magn. Reson. B, 19B (1)
4. C. Bauer, H. Raich, G. Jeschke, P. Blümmler, (2009) "Design of a permanent magnet with a mechanical sweep suitable for variable-temperature continuous-wave and pulsed EPR spectroscopy" Journal of Magnetic Resonance, Volume 198, Issue 2
5. Ernesto Danieli, Jörg Mauler, Juan Perlo, Bernhard Blümich, Federico Casanova, "Mobile sensor for high resolution RMN spectroscopy and imaging" Journal of Magnetic Resonance, (198)
6. Marc T. Thompson, (2009) "Practical Issues in the Use of NdFeB Permanent Magnets in Maglev, Motors, Bearings, and Eddy Current Brakes" Proceeding of IEEE, Vol. 97, Issue 11 [invited paper]

Maître de conférences <i>Kamilia ABAHRI</i> 	Responsable du secteur Génie Civil <i>Frédéric RAGUENEAU</i> 	Directeur du LMT-Cachan <i>Ahmed BENALLAL</i> 
---	--	---

