



Grenoble, le 17 Aout 2017

Rapport sur le mémoire de thèse intitulé

Miniature Antennas for Biomedical Applications

Présenté par Denys Nikolayev

La télémétrie biomédicale pour les applications de santé, de suivi post chirurgical, de monitoring temps réel ou de diagnostic constitue un domaine d'activité particulier de l'électronique qui s'est significativement développé ces dix dernières années. Dans un système de bio-télémétrie, les signaux sont échangés de l'intérieur du corps vers un collecteur externe (et inversement). L'utilisation des ondes radiofréquences pour transmettre les signaux est une solution actuellement privilégiée pour assurer une portée et un débit d'information significatif mais de nombreux défis restent à relever pour améliorer les performances des systèmes implantés et satisfaire les futurs besoins. Notamment, la miniaturisation des dispositifs implantés requiert des aériens très compacts dont l'interaction avec les tissus biologiques restent encore à étudier. Ce travail de thèse s'intéresse à cette thématique d'actualité. Il propose d'analyser le milieu de propagation constitué des tissus biologiques et de développer des antennes miniatures optimisées en efficacité et robuste à l'environnement ainsi que des méthodes pour leur analyse et leur caractérisation expérimentale.

Les travaux sont réalisés en cotutelle entre l'institut d'électronique et de télécommunications de Rennes (IETR) et le Département de Théorie d'Ingénierie Electrique (KTE) de l'Université de Bohême de l'Ouest (Pilsen, République tchèque) et avec un partenaire industriel français (Body-Cap).

Le document rédigé en anglais est constitué de six chapitres. Il est complété par une introduction générale, une conclusion et 3 annexes. Un résumé en français accompagne également le document provisoire.

L'introduction générale présente de façon détaillée le problème posé et le contexte de la recherche adressée. Les différentes innovations réalisées sont ensuite explicitées puis l'organisation du manuscrit est proposée avec une synthèse du contenu de chaque chapitre. *Cette introduction détaille très concrètement la thématique de recherche adressée. Elle décrit parfaitement les objectifs des travaux en les situant dans leur contexte d'étude et en annonçant l'organisation du manuscrit.*

Le premier chapitre est dédié à une revue de l'état de l'art en matière de conception d'antenne pour dispositif biomédicaux implantables. Après un rappel historique sur l'évolution des implants électroniques biomédicaux, le candidat focalise son analyse sur les antennes pour capsules de télémétrie opérant en bande VUHF principalement. Il passe

The Leti logo consists of the word 'leti' in a bold, blue, lowercase sans-serif font.

Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
MINATEC Campus | 17 rue des Martyrs | 38054 Grenoble Cedex 9
T. | F.

leti@cea.fr

Établissement public à caractère industriel et commercial RCS Paris B 775 685 019

Direction de la recherche technologique

méthodiquement en revue les différentes solutions d'antennes identifiées dans la littérature en analysant leur topologie, leurs performances, le type de fantôme utilisé, les méthodes de simulation et les approches expérimentales. Cette revue est organisée selon 3 catégories d'antenne définies en fonction de la technologie de réalisation : antenne filaire, antenne planaire imprimée, antenne imprimée conformée. Une synthèse présente en fin de chapitre les avantages et inconvénients des différentes solutions étudiées. La bande de fréquence VUHF apparaît comme la plus intéressante pour assurer une bonne portée et un haut débit de communication. Les antennes imprimées conformées sont identifiées comme les solutions industrialisables les plus performantes pour les capsules implantées.

Dans ce chapitre, le candidat concentre son analyse sur son problème spécifique. Il réalise une revue de l'état de l'art très complète et détaillée du domaine d'intérêt. On apprécie le tableau regroupant les caractéristiques des antennes analysées et le résumé de l'état de l'art proposé en fin de chapitre. Ce travail témoigne d'une excellente assimilation de la thématique de recherche traitée par le candidat. On peut mentionner un intérêt limité à citer certains travaux n'apportant pas d'informations nouvelles ou pertinentes. Une analyse de la problématique de miniaturisation des antennes placée dans un milieu diélectrique à pertes aurait pu être présentée en préambule à cet état de l'art pour souligner la complexité du problème adressé. Un inventaire des techniques de miniaturisation utilisées ainsi qu'une illustration des topologies d'antennes de l'état de l'art aurait constitué un plus dans le tableau de synthèse.

Le deuxième chapitre traite de la modélisation des propriétés électromagnétiques du corps humain aux fréquences VUHF. Les formulations analytiques classiques modélisant les propriétés diélectriques des tissus considérés comme isotropes, linéaires, hétérogènes et dispersifs sont tout d'abord rappelées. Le problème de variabilité des propriétés des tissus est étudié pour le cas d'une capsule transitant dans l'appareil digestif et dans le cas d'une implantation fixe (variabilité des sites d'implantation). Une stratégie de pondération des propriétés des tissus indexé sur le temps de transit est proposée. Le candidat dresse ensuite un état de l'art des modèles numériques de fantôme utilisés dans les outils de simulation électromagnétique 3D en distinguant trois générations de modèle. Un modèle 2D de cerveau et de la région abdominale est spécifiquement développé avec la méthode de représentation aux limites pour l'étude réaliste de la propagation dans le corps. Une revue des modèles physiques de fantôme utilisé pour les expérimentations est ensuite détaillée. Un modèle prédictif de formulation de mélange eau-saccharose-sel est bâti pour émuler les propriétés de l'environnement gastro-intestinal entre 200 MHz et 1 GHz. Enfin, les problématiques de mesure d'antennes miniatures et implantées dans un milieu à pertes conduisent le candidat à concevoir un modèle de fantôme et une configuration de mesure en chambre anéchoïde spécifique à la mesure d'impédance et de rayonnement. Une forme sphérique convenablement dimensionnée est utilisée pour mesurer les propriétés de rayonnement et une fibre optique connectée à un transducteur optique-radiofréquence remplace le câble coaxial de mesure pour limiter les courants de fuite.

Ce chapitre détaille la mise en place des outils de simulation et expérimentaux utiles à la conception et la mesure des caractéristiques des antennes miniatures implantées. Le travail réalisé s'appuie sur une analyse pertinente de l'état de l'art en identifiant les spécificités liées à ce domaine d'activité et les problèmes à résoudre. Le modèle prédictif de mélange est issu d'une approche intéressante mais la dépendance en fréquence n'est pas clairement présentée dans le manuscrit. La problématique d'expérimentation autour des antennes miniatures implantées est justement identifiée, les solutions proposées semblent pertinentes mais les choix opérés (forme, dimensions de la sphère, coaxial dans l'air connecté à l'antenne) auraient mérités une analyse plus étoffée et des justifications.

Le troisième chapitre propose une étude des propriétés de rayonnement d'antennes miniatures dans les tissus biologiques. L'approche théorique est dans un premier temps positionnée, avec le rappel des équations de l'électromagnétisme, la modélisation des phénomènes de pertes et de réflexion ainsi que les limites fondamentales des antennes électriquement petites. Le candidat détaille ensuite la construction et la validation d'un outil numérique 2D spécifiquement adapté pour les études des configurations de rayonnement in vivo considérées. Quatre configurations de fantôme à complexité croissante sont étudiées. Une analyse très détaillée des résultats multiparamétriques (profondeur, type de fantôme,

type de sources rayonnantes, orientation) obtenus permet au candidat d'interpréter les phénomènes physiques prépondérants et d'en déduire des règles de conception d'antenne à efficacité optimisée. Une formule est d'ailleurs proposée pour estimer la fréquence optimale de communication en fonction de la profondeur d'implantation de l'antenne. Une synthèse conclut cette analyse en apportant des éclairages appropriés sur la validité des résultats de l'étude menée.

Ce chapitre regroupe une étude riche en développements, résultats et analyses. L'approche du problème non trivial étudié est parfaitement maîtrisée par le candidat avec une démarche à complexité croissante des configurations étudiées (du modèle homogène au plus réaliste) pour mieux appréhender les phénomènes mis en jeu. On apprécie la présentation idoine des résultats, la rigueur des travaux et la qualité des références utilisées pour justifier certaines approches et comparer les résultats obtenus. Ces résultats sont particulièrement intéressants et les limitations associées bien identifiées. Le rôle clé de la source rayonnante dans cette étude aurait toutefois mérité d'être plus largement décrit et étudié, notamment l'effet de la proximité du milieu à pertes. D'autre part, la considération de sources rayonnantes plus réalistes et de taille variable serait également intéressante à introduire dans l'étude de l'optimisation d'efficacité. Enfin, l'utilisation de la formule de Wheeler dans un milieu diélectrique à pertes mérite de plus amples discussions et pourrait être complétée avec la formulation plus récente de Gustafsson issue de la théorie de la diffraction.

Le quatrième chapitre s'intéresse à la caractérisation et l'optimisation de l'antenne de la capsule du partenaire industriel. L'antenne et ses contraintes de réalisation sont dans un premier temps présentés. Les matériaux diélectriques utilisés, aux propriétés non connues, sont expérimentalement caractérisés. Le modèle théorique d'antenne est ensuite décrit pour illustrer son fonctionnement et approcher son comportement de résonateur quart d'onde court-circuité à impédance étagée. Une modélisation électromagnétique 3D s'impose pour tenir compte de la complexité du problème à résoudre, liés aux différents éléments constitutifs de l'antenne, de la capsule et de son proche environnement biologique. Le choix du simulateur est justifié, les paramètres de modélisation du simulateur vérifiés et les différents effets des éléments constitutifs de l'antenne sont détaillés. Une étude paramétrique sur les éléments de réglages géométrique de l'antenne est menée pour identifier les plus influents. Des expérimentations sont menées sur différents prototypes et dans différentes configurations pour confirmer les résultats de simulation : antenne en version planaire, enroulée, avec la capsule, dans l'air, l'eau et différents fantômes. Une fois les performances de l'antenne correctement estimées expérimentalement et en simulation, une phase d'optimisation de son efficacité de rayonnement est engagée. En se basant sur l'état de l'art et en intégrant les contraintes de réalisation, quatre pistes d'amélioration sont privilégiées : augmentation de l'épaisseur du substrat diélectrique, de la taille électrique de l'antenne, limitation de la bande passante et suppression des méandres. Une nouvelle conception est proposée utilisant notamment une ligne coplanaire droite en lieu et place du résonateur replié en méandre. Une amélioration de 11 dB de l'efficacité de l'antenne est obtenue en simulation. Le bon comportement en impédance est vérifié à partir de mesures pratiquées sur différents prototypes plans et encapsulés dans l'air, l'eau et différents fantômes (les courbes de mesure ne sont pas montrées dans le document).

Un travail rigoureux sur la modélisation, la simulation et la caractérisation expérimentale d'impédance d'antenne miniaturisée est décrit dans ce chapitre. Le candidat démontre sa parfaite maîtrise de la complexité de la simulation de ce type d'antenne dans un tel environnement. La correspondance des résultats obtenus lors des comparaisons simulation-mesure est assez remarquable. L'augmentation d'efficacité de l'antenne implantée constatée en simulation l'est tout autant. La présence du câble coaxial de mesure ne semble pas perturber le comportement en impédance de l'antenne dans les différentes configurations de test et il serait intéressant de justifier ce comportement particulier. Cette partie manque globalement d'information sur les propriétés de rayonnement de l'antenne (polarisation, diagrammes, dans l'air, enroulé dans la capsule,...) qui peut s'avérer un élément d'optimisation de son efficacité. Dans le même ordre d'idée, la recherche de solution d'amélioration de l'efficacité aurait mérité une réflexion plus large sur les différentes techniques de miniaturisation d'antenne (voir commentaires chapitre 1). A titre de curiosité, il serait intéressant de quantifier individuellement l'apport des différentes solutions mise en

œuvre pour l'amélioration de l'efficacité. Les comparaisons simulation-mesure des paramètres S de l'antenne optimisée seraient intéressantes à montrer.

Le cinquième chapitre décrit la conception d'une antenne microruban adaptée à une grande variété d'applications de capsules implantées et sa caractérisation expérimentale. La problématique de variation d'environnement biologique est caractérisée et des spécifications de performances d'adaptation d'impédance d'antennes sont formulées. Une analyse théorique basée sur les limites fondamentales des antennes miniatures est utilisée pour orienter la stratégie de conception. Une preuve de concept est dans un premier temps développée : La structure microruban bande étroite à impédance étagée est reprise en version demi-onde et un chargement diélectrique (coque + partie centrale de la capsule) est proposé pour limiter la sensibilité à l'environnement changeant et améliorer l'efficacité de l'antenne. Le concept est éprouvé grâce à une analyse par simulation électromagnétique et un prototype est réalisé pour valider expérimentalement les performances. Une phase d'optimisation du design est présentée avec l'introduction de fente dans le plan de masse pour réduire les dimensions de l'antenne. Une analyse détaillée de la fabricabilité de l'antenne dans la capsule conduit à certains choix technologiques argumentés. Le candidat détaille ensuite la mise en œuvre des outils de simulation utilisés pour obtenir une évaluation précise des propriétés de l'antenne (réglage fin) et étudier les effets environnementaux (tissus biologiques, composants internes de la capsule, capteur endoscopique, proximité autre capsule). Un prototype d'antenne est finalement réalisé et caractérisé expérimentalement. Les performances mesurées en impédance sont similaires aux simulations et montrent une certaine robustesse à l'environnement changeant. Une courbe de rayonnement mesurée dans le plan azimutal est comparée aux prédictions du simulateur. *Ce chapitre propose un travail de conception d'antenne particulièrement complexe et bien étayé. L'analyse du besoin est pertinente et les réflexions théoriques opérées conduisent à l'identification de solutions non classiques. Le candidat parvient à les mettre en œuvre avec une démarche de conception progressive bien maîtrisée. Les résultats obtenus au final sont très intéressants et confirment les choix de conception opérés. Le développement de la structure antennaire demi-onde mérite d'être mieux illustré et argumenté avec notamment l'introduction des fentes et l'utilisation de la ligne microruban versus ligne coplanaire (il est troublant que les solutions proposées au chapitre précédents ne soient plus utilisées). On apprécie la présentation synthétique des résultats de sensibilité au contexte (fig. 5.13). Cependant, les résultats d'insensibilité au contexte biologique semblent au final à nuancer. Notamment les assertions avancées sur la compensation des pertes de désadaptation d'impédance dans la graisse ne semblent pas vérifiées avec le modèle réaliste de fantôme (max. gain -30 dBi). Les mesures de rayonnement constituent des résultats attendus dans ce travail. Il est regrettable que la configuration spécifique de mesure mise au point pour obtenir une caractérisation précise des propriétés de rayonnement omnidirectionnel (chapitre 2) soient dégradée par l'utilisation d'un positionneur obstruant recouvert d'absorbants aux propriétés non connues aux fréquences d'intérêt. Ces problèmes expérimentaux expliquent certainement l'absence de présentation de mesure d'efficacité d'antenne dans le manuscrit.*

Le sixième chapitre détaille la conception d'une antenne microruban dual-bande (434 MHz et 2450 MHz) adaptée à une grande variété d'applications de capsules implantées et sa caractérisation expérimentale. L'analyse du problème posé et l'approche de conception sont menées de manière très similaires à celles du chapitre précédent. Une longueur plus importante de capsule est cette fois-ci utilisée. La structure microruban bande étroite à impédance étagée est reprise en version quart-d'onde. Un résonateur microruban supplémentaire est introduit pour opérer en bande haute. Une duplication du motif d'antenne est justifiée pour élargir la bande haute de fonctionnement et améliorer l'omnidirectionnalité du rayonnement, toujours en bande haute. La solution de chargement diélectrique environnant l'antenne est reprise pour limiter la sensibilité à l'environnement. Une discussion est proposée sur les options de réalisation technologique. La mise en œuvre des simulations numériques est détaillée et les résultats d'analyses de robustesse aux milieux biologiques variables sont synthétisés. Un prototype est fabriqué puis mesuré en impédance et rayonnement. Seules les comparaisons de coefficient de réflexion sur un cas de fantôme (muscle) sont présentées. Une proposition d'utilisation de l'antenne développée comme

capteur in-vivo de propriétés d'environnement électromagnétique est décrite en fin de chapitre.

Un travail similaire, dans son approche et son déroulement, au chapitre précédent est reporté dans ce chapitre. Le challenge de conception proposé est fortement complexifié par la recherche d'un fonctionnement dual bande dont un bref état de l'art aurait été utile. Les résultats obtenus restent dans leur ensemble d'une grande qualité et résultent d'un travail de conception significatif. On regrette le manque d'illustrations des travaux de conception et réglage de l'antenne, ainsi qu'un choix de topologie d'antenne dual bande non argumenté. Le doublement du motif d'antenne interpelle dès lors que l'on cherche à concevoir des antennes miniatures. Les mesures et simulations semblent moins en accord que pour les précédentes antennes étudiées et une explication serait intéressante à fournir, notamment en bande de fréquence haute où les différences sont plus marquées. L'idée d'utiliser l'antenne implantée comme capteur in vivo est pertinente mais semble aller à l'encontre des efforts déployés pour rendre l'antenne insensible à son contexte. Des compromis ou solutions complémentaires semblent donc à développer pour mettre en œuvre efficacement ce principe.

La conclusion générale résume parfaitement les travaux réalisés en soulignant l'originalité des contributions apportées par le candidat tant au point de vue modélisation (fantôme, simulation, outil numérique), physique de l'électromagnétisme (propagation dans les tissus), développements de concept d'antenne miniature et pratique (prototypage et dispositifs de caractérisation expérimentale). Des perspectives pertinentes sont également mises en avant comme axe de développement à poursuivre.

Le document s'achève par un ensemble d'annexes qui complète utilement les travaux présentés dans le manuscrit.

Dans l'ensemble, le manuscrit proposé par M. Nikolayev est **remarquable en qualité et quantité de résultats scientifiques théoriques et pratiques**. Malgré la densité d'informations présentées, il reste agréable à lire, est correctement rédigé avec des illustrations appropriées, des références pertinentes et des synthèses très utiles. M. Nikolayev a su associer **développements théoriques** (avec des **analyses** et **modélisations physiques, numériques** pour étudier la **propagation** et développer des **concepts d'antennes miniatures**) et **expérimentaux** pour améliorer les performances d'antennes miniatures implantées. Il s'agit d'un **travail complet** sur la problématique d'interaction et optimisation d'antennes miniatures avec les milieux biologiques aboutissant à des **résultats originaux** répondant aux **objectifs initiaux**. La qualité des travaux est confirmée par la production scientifique du candidat constituée à ce jour de 6 publications internationales (dont 1 en soumission), 9 communications internationales à comité de lecture et 4 communications dans des conférences nationales. M. Nikolayev est également l'auteur de 3 brevets en cours de dépôt.

Compte tenu de l'ensemble de ces remarques, de la qualité et quantité de résultats reportés dans le manuscrit, je tiens à féliciter M. Nikolayev pour l'ensemble du travail accompli et j'émetts un avis très favorable pour que M. Nikolayev puisse présenter ses travaux en vue d'obtenir le grade de docteur de l'Université de Rennes 1.



Christophe Delaveaud
HDR, Expert senior du CEA
Chef du Laboratoire Antenne, Propagation, Couplage Inductif

Rapport sur le mémoire de thèse de Mr Denys NIKOLAYEV intitulé : « Antennes miniatures pour applications Biomédicales »

L'objectif de la thèse de Monsieur Denys Nikolayev est le développement de dispositifs électroniques miniaturisés, communicants, pour des applications à la télémétrie biomédicale. Une des applications de ses travaux est le monitoring de certains paramètres physiologiques (température corporelle, tension artérielle, etc....) d'animaux et d'êtres humains. Son travail porte plus particulièrement sur le développement d'antennes miniatures innovantes, à haute efficacité, adaptées aux milieux biologiques dans lesquels elles sont « plongées ». Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une cotutelle entre l'IETR (Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes) et l'Université de Bohème de l'Ouest (République Tchèque) en partenariat avec l'industriel Français « Body-Cap ».

Le mémoire de thèse comporte 6 chapitres, une introduction et une conclusion générales ainsi que 3 annexes.

Le premier chapitre est consacré à une rapide présentation du domaine de la biométrie « in-body » suivi d'un état de l'art détaillé des antennes utilisées dans le domaine. Le candidat présente tout d'abord le schéma général d'une capsule pour télémétrie biomédicale et décrit les différentes catégories de capsules (ingérables, implantables et injectables) ainsi que leurs principales applications. Il rappelle ensuite les objectifs de sa thèse et décrit plus particulièrement la capsule « e-Celsius », développée par la société Body-Cap, sur laquelle certains de ses développements seront à réaliser. Il poursuit par un état de l'art très complet des antennes miniatures utilisées pour ce type d'application. Elles sont classées en trois catégories :

- Les antennes filaires qui sont performantes en termes de bande passante et d'efficacité mais demeurent encombrantes et donc difficiles à intégrer dans une capsule.
- Les antennes imprimées qui sont moins encombrantes, assez faciles à associer à l'électronique et peu coûteuses. Elles souffrent d'une efficacité réduite.
- Les antennes imprimées conformées qui possèdent les avantages des antennes imprimées et pour lesquelles l'efficacité peut être améliorée en « occupant de façon plus optimum » la sphère de Chu en utilisant le volume de la capsule.



Un tableau récapitulatif résume très bien les caractéristiques de ces différents types d'aériens.

Dans le deuxième chapitre Mr Nikolayev s'intéresse à l'environnement biologique de l'antenne et aux méthodes pour le modéliser ou le reproduire physiquement. Il commence par adresser la modélisation des tissus dans le cas de gélules ingérables et implantables en s'appuyant sur un modèle de Cole-Cole. Il prend en compte dans son approche le fait que la capsule ingérable traverse plusieurs milieux aux caractéristiques différentes. Il procède ensuite au développement de modèles de fantômes numériques puis physiques. Le premier est une évolution du modèle B-Rep mais en 2D afin de réduire les temps de simulation sans affecter la précision de modélisation. Ce modèle est testé pour un cerveau humain et pour la région abdominale humaine. Un modèle physique est également mis au point. Pour terminer le candidat propose une méthode de caractérisation du champ rayonné par l'antenne intégrée dans le fantôme. Celle-ci doit permettre de s'affranchir des effets néfastes du câble RF sur la mesure.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude et la modélisation des phénomènes de propagation dans le corps humain. Après un rappel des problématiques générales : atténuation par les tissus biologiques – limites d'efficacité des antennes miniatures – etc... le candidat présente les différentes modélisations effectuées. Il propose ainsi une modélisation progressive et de plus en plus précise du problème en utilisant des fantômes homogènes dans un premier temps puis hétérogènes avec des complexités croissantes. Il modélise ainsi 4 cas de figure :

- Une source « plongée » dans un tissu homogène (muscle) juxtaposée à un milieu infini planaire représentant l'espace libre.
- Une source plongée dans un milieu hétérogène plan (muscle + graisse + peau) juxtaposée à un milieu infini planaire représentant l'espace libre.
- Une source insérée dans un milieu « cylindrique » contenant muscle, graisse et peau.
- Une source rayonnant dans un fantôme réaliste correspondant à l'abdomen humain.

Deux catégories de sources sont envisagées : un dipôle magnétique avec différentes orientations – Un source de courant magnétique.

Les modélisations sont effectuées à l'aide d'un code « maison » et comparées aux résultats d'un outil du commerce. Il est difficile de tirer une conclusion « définitive » de ces simulations quant à l'optimisation du dispositif. Il apparaît clairement que l'efficacité du dispositif dépendra : - de sa profondeur d'implantation, de la fréquence de travail, de la polarisation de l'aérien et de sa directivité. Tous ces paramètres devront être considérés précisément lors de la mise au point.

Dans le quatrième chapitre le candidat s'intéresse à l'antenne actuellement utilisée par son partenaire industriel pour sa capsule e-Celsius. Il cherche dans un premier temps à



estimer ses performances (inconnues jusque-là) puis ensuite à les améliorer. Il commence pour cela par caractériser les matériaux utilisés pour la réalisation de l'antenne et pour la capsule. Un modèle théorique de l'antenne est ensuite proposé avant une modélisation numérique fine de l'aérien. Le logiciel CST Microwave Studio est utilisé pour cela car il permet une simulation plus rapide en raison de l'utilisation de la carte GPU. L'influence de différents paramètres (bobine, point d'alimentation, capsule,...) sur la fréquence de travail de l'antenne est étudiée. Il apparaît clairement que la capsule modifie fortement la fréquence de fonctionnement et qu'elle devra donc être prise en compte dans toute phase d'optimisation. L'épaisseur du substrat est également un paramètre influent. L'antenne est modélisée en configuration planaire puis conformée. Des réalisations (9 prototypes pour tester la reproductibilité) et des mesures sont effectuées sur une structure planaire dans un premier temps. Les résultats de simulation et de mesures sont en bon accord. Les mesures de l'antenne intégrée dans la capsule sont également concluantes. Pour terminer Mr Nikolayev entreprend une démarche d'optimisation de l'antenne existante afin de parfaitement maîtriser sa fréquence de travail et d'améliorer son efficacité. Il joue pour cela sur les dimensions de l'aérien, l'épaisseur du substrat et il « accepte » une réduction de la bande passante pour conserver une meilleure efficacité. Les simulations sont effectuées dans un fantôme sphérique homogène caractérisant le muscle humain. Des prototypes sont réalisés et mesurés. On peut regretter que les comparaisons simulations/mesures ne soient pas présentées sous forme de courbes.

Le chapitre cinq est consacré à la mise au point d'une antenne performante dédiée aux applications « in-body ». Le candidat s'affranchit ici de la capsule proposée par son partenaire industriel. L'objectif est que l'aérien soit utilisable pour des capsules ingérables et/ou implantables et fonctionne donc dans des environnements (tissus humains/animaux) différents avec des permittivité pouvant varier fortement. Tous les développements sont faits en considérant tout l'éventail (valeurs maxi et mini) des caractéristiques diélectriques des milieux susceptibles d'être traversés par la capsule. La bande ISM 434 MHz est visée. Un premier prototype qualifié de « preuve de concept » est conçu. L'antenne est conformée. Elle associe 2 éléments à faible impédance reliés par une ligne microruban contenant des boucles. Une validation expérimentale planaire vient confirmer la simulation. Par la suite la structure est miniaturisée afin d'être intégrable dans une cellule de 17mm de longueur et 7mm de diamètre. Le premier dimensionnement de l'antenne est fait en utilisant la méthode hybride analytique-numérique. Une simulation numérique fine suit bien évidemment. L'antenne optimisée est chargée par un substrat céramique à haute permittivité qui permet d'améliorer son efficacité et de réduire sa sensibilité à l'environnement (désadaptation). Elle est modélisée sur un fantôme dont les caractéristiques sont fournies par CST microwave studio (Nelly). Un prototype est réalisé et mesuré, alimenté (pour la mesure en rayonnement) par fibre optique pour s'affranchir des effets du câble RF. L'adaptation attendue est « tenue », le gain mesuré est meilleur que celui des antennes concurrentes.



Le candidat souligne toutefois que les conditions de mesures ne sont pas forcément les mêmes.

Dans le sixième et dernier chapitre Monsieur Nikolayev propose une antenne bi-bande (434 MHz – 2,5 GHz) destinée à permettre à la fois la transmission de données et le transfert d'énergie sans fil. Celle-ci doit, comme pour le chapitre précédent, être « robuste » aux éventuels problèmes de désadaptation liés au changement de caractéristiques des milieux accueillant l'aérien. Il ne cherche pas ici, contrairement au chapitre précédent, à concevoir une antenne ultra miniaturisée, mais un aérien intégrable dans une capsule de taille moyenne soit 28mm x 9mm. Il va, pour obtenir un aérien possédant une efficacité convenable, jouer sur les mêmes paramètres que dans le chapitre précédent soit : - l'encombrement – l'épaisseur du substrat – l'ajout d'un superstrat. Les caractéristiques des tissus à chacune des fréquences sont prises en compte. L'antenne est conçue sur un substrat souple. Elle est réalisée et mesurée. Le gain mesuré est meilleur que celui obtenu avec les solutions concurrentes. On note cependant quelques différences entre les S11 simulés et mesurés. Pour terminer le candidat propose une méthode permettant d'utiliser les antennes développées pour détecter in-vivo les propriétés électromagnétiques des tissus biologiques.

En résumé Denys Nikolayev a effectué un travail de qualité, sur un domaine porteur. Il a mis en œuvre des compétences multiples en antennes, modélisation électromagnétique et mesures, connaissance des milieux biologiques,... Il a cherché dans sa démarche à maîtriser au maximum les nombreux paramètres liés aux milieux biologiques et à la modélisation. Une production scientifique particulièrement riche (publications dans des revues, communications à des congrès, dépôts de brevets en cours,...) atteste de la qualité de ses travaux. Je suis donc totalement favorable à ce que Monsieur Nikolayev soutienne ce mémoire en vue de l'obtention du grade de Docteur de l'Université de Rennes1.

Fait à Limoges, le 14 Août 2017



Thierry Monédière
Professeur à l'Université de Limoges

