

Méthodologie de conception et d'optimisation d'antennes directives pour minimiser l'impact dosimétrique dans la bande FR3

<u>Mots-clés</u> :	Simulation électromagnétique, méthode TLM (Transmission Line Matrix), Antennes, DAS, densité de puissance, dosimétrie, modèles numériques humains.
<u>Ecole doctorale</u> :	ED-STIC
<u>Directeur de Thèse</u> :	Jean-Lou DUBARD
<u>Co-encadrant</u> :	Marylène CUEILLE (LEAT) Abdelrahman IJJEH (LEAT)
<u>Lieu du stage</u> :	LEAT, Campus SophiaTech, Bâtiment Forum 930 Route des Colles, 06903 Sophia Antipolis
<u>Début</u> :	Octobre 2026
<u>Thématique(s)</u> :	CMA
<u>Contacts</u> :	jean-lou.dubard@univ-cotedazur.fr marylene.cueille@univ-cotedazur.fr abdelrahman.ijjeh@univ-cotedazur.fr

Sujet, Contexte

Une nouvelle bande de fréquence (FR3) vient d'être libérée, légèrement plus haute (7,2-8,4 GHz) que la bande actuelle sous les 6 GHz. Cela permet de repenser certains principes de transmission. Le projet, dans le cadre duquel s'inscrit cette thèse, se concentre sur la mise en place de réseaux d'antennes intelligents capables d'adapter leur rayonnement en fonction de l'environnement et des besoins des utilisateurs. Une attention particulière est portée à la conception d'antennes garantissant une couverture optimisée et minimisant les interférences inter-cellulaires.

L'objectif de cette thèse est de faire une étude dosimétrique des antennes du terminal mobile à chaque étape de son développement pour évaluer l'impact de ces nouvelles architectures sur l'exposition aux ondes. Ces analyses assureront la conformité aux normes tout en réduisant l'absorption par l'utilisateur sans compromettre les performances. Il s'agira de mener une étude dosimétrique approfondie afin de quantifier et de réduire au minimum l'exposition des utilisateurs aux rayonnements, et ainsi orienter les choix technologiques, tant au niveau des terminaux que des points d'accès, vers des solutions ayant un impact moindre sur la santé. En effet, toutes les antennes n'ont pas le même comportement vis-à-vis des nombreux scénarios d'interaction antenne/corps humain. Afin de développer une antenne ayant un impact réduit sur la santé, il faut tenir compte des aspects dosimétriques dès sa conception. L'effet de la proximité du corps humain sur les antennes se traduit par une altération de leurs performances. Il est alors nécessaire d'étudier différentes configurations pour minimiser les niveaux de DAS et de densité de puissance dans les tissus.

L'objectif de cette étude est donc d'étudier l'impact des nouveaux types d'intégrations envisagés pour le dispositif rayonnant dans la bande 7.2 à 8.4 GHz.

Problématique

La dosimétrie bioélectromagnétique consiste à caractériser l'exposition des êtres vivants aux rayonnements non ionisants afin d'évaluer les effets thermiques ou biologiques potentiels. Elle contribue à garantir des niveaux d'exposition recommandés aux champs électromagnétiques émis par les appareils rayonnants [IEEE Standard, 2019], [ICNIRP, 2020].

En dosimétrie numérique, il s'agit d'évaluer les niveaux de débit d'absorption spécifique (DAS) (pour les fréquences jusqu'à 10 GHz) et/ou les niveaux de densité de puissance absorbée (DP) (pour les fréquences supérieures à 10 GHz), chez les êtres vivants en présence de dispositifs électromagnétiques rayonnants à l'aide de méthodes de calcul électromagnétique ([Clemens, 2001], [Podebrad, 2003], [Weiland, 2008], [Laisne, 2013], [Yee, 1966], [Johns, 1987], [Hoefler, 1985]). Avec la montée en fréquence, les méthodes de simulation doivent être adaptées pour prendre en compte l'aspect multi-échelle (taille du dispositif versus dimensions de la cible) et l'important volume de calcul engendré par le maillage à ces fréquences. Dans la bande FR3, la longueur d'onde λ_0 en espace libre varie entre 3.5 et 4.2 cm. Cependant, les dimensions du modèle humain sont exprimées en dizaines/centaines de centimètres, de sorte que la taille du problème de calcul devient extrêmement importante : pour des simulations précises, il faut une taille de maille $\Delta \leq \lambda_0/10$ dans l'air. Et, si l'on considère la taille des dispositifs, une maille beaucoup plus petite (réduite d'un facteur 10 à 100) est nécessaire pour bien décrire la complexité de leur géométrie.

L'axe de recherche principal consistera à mettre en place une méthode permettant de construire une représentation du dispositif (à partir de sa simulation en espace libre) visant à le remplacer dans la simulation avec le corps humain. Il faudra alors prendre en considération le comportement du dispositif qui est affecté par la présence du corps humain (Figure 1).

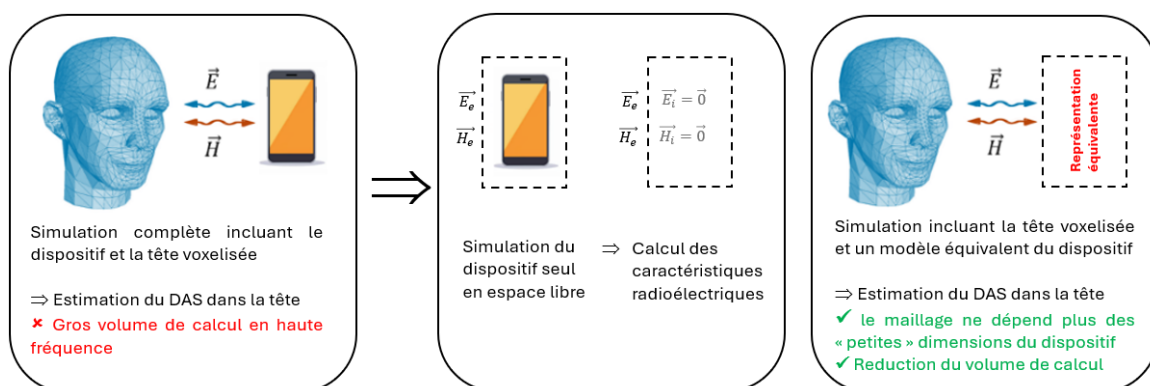


Figure 1, Méthode envisagée pour le traitement de l'aspect multi-échelle en dosimétrie numérique

Il est possible de construire des modèles équivalents capables de reproduire fidèlement les champs électromagnétiques à l'extérieur d'une surface donnée ([Devaney, 1982], [Harrington, 2001]). Plutôt que de chercher à reconstruire la structure physique réelle du dispositif, ces modèles visent à identifier un ensemble de sources équivalentes dont les champs correspondent aux caractéristiques radioélectriques du dispositif en espace libre (ou mesures du dispositif sous test selon le cas).

- L'une des approches les plus courantes est la méthode des dipôles équivalents (Equivalent Dipole Method, EDM), dans laquelle le dispositif est représenté par un ensemble de dipôles électriques et magnétiques dont les positions, orientations, amplitudes et phases sont inconnues [Vives, 2007]. Les paramètres du modèle sont estimés en minimisant l'écart entre les champs mesurés et les champs calculés à l'aide de techniques d'optimisation.

- Une autre famille d'approches repose sur les méthodes de diffusion inverse (inverse scattering methods), qui visent à reconstruire une représentation simplifiée de la source rayonnante à partir des champs électromagnétiques mesurés dans son voisinage ou dans le champ lointain ([Devaney, 1982], [Harrington, 2001], [Pastorino, 2010]). Dans ce contexte, le dispositif est considéré comme un objet inconnu dont les propriétés électromagnétiques effectives sont déterminées en résolvant un problème inverse gouverné par les équations de Maxwell. Les techniques de diffusion inverse permettent notamment d'estimer la distribution spatiale des sources équivalentes, des courants rayonnants ou des paramètres électromagnétiques effectifs du dispositif. En raison du caractère mal posé et non unique du problème, des méthodes de régularisation telles que celles de Tikhonov ou des approches d'optimisation contraintes sont généralement nécessaires pour obtenir des solutions stables et physiquement plausibles. Bien que la reconstruction détaillée de la géométrie interne demeure généralement inaccessible, ces méthodes permettent souvent d'obtenir un modèle réduit capable de reproduire avec une bonne précision le comportement radiatif du dispositif, tout en limitant la complexité numérique des simulations ultérieures.
- Une autre méthodologie largement utilisée repose sur le principe d'équivalence de Huygens et les théorèmes d'équivalence électromagnétique [Harrington, 2001]. Lorsque les champs électrique et magnétique sont mesurés sur une surface fermée entourant le dispositif, il est possible de calculer des courants surfaciques électriques et magnétiques équivalents. Ces courants reproduisent exactement le même champ électromagnétique à l'extérieur de la surface de mesure, permettant ainsi de prédire avec précision les diagrammes de rayonnement et les distributions de champ dans des régions où aucune mesure directe n'est disponible [Hansen, 1988]. Cette approche constitue la base de nombreuses techniques de transformation champ proche–champ lointain utilisées en métrologie des antennes.
- Pour les dispositifs électriquement compacts, les méthodes de développement en ondes sphériques offrent une représentation alternative particulièrement efficace [Hansen, 1988], [Balanis, 2016]. Dans ce cadre, les champs mesurés sont exprimés comme une combinaison linéaire de fonctions d'onde sphériques vectorielles. Les coefficients associés fournissent une description compacte et rigoureuse du rayonnement du dispositif, facilitant le stockage, l'analyse et la reconstruction de son comportement électromagnétique. Ces techniques sont aujourd'hui largement utilisées pour la caractérisation des antennes et des systèmes rayonnants complexes.
- Étant donné les dimensions d'un dispositif rayonnant et les champs électromagnétiques mesurés sur une surface fermée l'entourant, les techniques de retournement temporel peuvent être appliquées pour traiter le problème inverse de source et contribuer à la caractérisation du dispositif. Dans des milieux linéaires, réciproques et sans pertes, les équations de Maxwell sont invariantes par inversion temporelle, ce qui permet de conjuguer en phase les champs mesurés et de les propager en sens inverse vers la région source, où ils se refocalisent sur la structure rayonnante initiale. Ce processus permet la reconstruction de courants surfaciques électriques et magnétiques équivalents via le principe d'équivalence électromagnétique, fournissant une représentation des sources reproduisant exactement les champs externes observés. Cependant, bien que les champs externes déterminent de manière unique les sources équivalentes ainsi que le champ dans la région extérieure, la distribution réelle des courants internes au dispositif n'est généralement pas unique, sauf si des contraintes supplémentaires telles que la géométrie, les propriétés des matériaux ou les conditions d'excitation sont imposées. Par conséquent, les méthodes de retournement temporel sont efficaces pour la localisation des sources et la reconstruction de courants équivalents, mais la caractérisation physique complète du dispositif rayonnant nécessite généralement leur intégration avec des

formulations de diffusion inverse, des méthodes d'optimisation ou des techniques adjointes [Harrington, 2001], [Fink, 1997], [Balanis2, 2016], [Chew, 2001].

Dans ce projet de recherche, les travaux consisteront à étudier une approche novatrice fondée sur le concept d'un modèle de diffusion équivalent défini sur une surface fermée entourant l'objet rayonnant (par exemple, un téléphone mobile) en espace libre. Le modèle proposé se compose de deux éléments principaux :

- une matrice de diffusion équivalente [Ijeh, 2026] qui caractérise le comportement passif de l'objet rayonnant, c'est-à-dire sa réponse en diffusion lorsqu'il est soumis à des champs électromagnétiques (EM) incidents externes
- un vecteur source qui représente son comportement actif, à savoir le rayonnement généré par les éléments actifs situés à l'intérieur de la surface englobante [Ijeh, 2026]. Ce vecteur source peut être obtenu directement à partir des sources équivalentes de Huygens associées à l'objet rayonnant en espace libre.

La détermination de la matrice de diffusion équivalente nécessite la mise en œuvre d'une procédure de diffusion inverse. Cette procédure consiste à illuminer l'objet rayonnant par des ondes planes incidentes provenant de différentes directions et à mesurer les champs diffusés correspondants en espace libre. La connaissance des champs incidents et diffusés permet ensuite d'établir un modèle mathématique à partir duquel la matrice de diffusion équivalente peut être identifiée.

Une fois la matrice de diffusion équivalente et le vecteur source déterminés, ils peuvent être intégrés dans une simulation électromagnétique tridimensionnelle complète en remplacement de l'objet rayonnant réel. Cette représentation équivalente permet de substituer la structure physique détaillée par un modèle compact tout en préservant fidèlement les caractéristiques de diffusion passive et les propriétés de rayonnement actif du dispositif étudié. Une telle approche offre ainsi un potentiel important pour la réduction de la complexité numérique et du coût de calcul des simulations électromagnétiques.

Compétences et qualités requises

- Etudiant(e) très motivé(e) et dynamique.
- Facilité d'intégration dans une équipe.
- Connaissances en :
 - électromagnétisme
 - méthodes numériques
 - programmation
- La connaissance du logiciel CST serait un plus.

Références

[Balanis, 2016] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4e éd., Wiley, 2016.

[Balanis2, 2016] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2016.

[Chew, 2001] W. C. Chew et al., *Integral Equation Methods for Electromagnetic and Elastic Waves*. San Rafael, CA, USA: Morgan & Claypool, 2001.

[Clemens, 2001] M. Clemens et al., "Discrete Electromagnetism with the Finite Integration Technique," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 32, 65-87, 2001.

[CST] <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>

[Devaney, 1982] A. J. Devaney, « Inverse Source and Scattering Problems in Electromagnetics », *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 30, n° 3, pp. 355–364, 1982.

[Fink, 1997] M. Fink, "Time-reversed acoustics," *Physics Today*, vol. 50, no. 3, pp. 34–40, 1997.

- [Hansen, 1988]** J. E. Hansen, Spherical Near-Field Antenna Measurements, IET Electromagnetic Waves Series, 1988
- [Harrington, 1968]** R. F. Harrington, Field Computation by Moment Methods. New York, NY, USA: Macmillan, 1968.
- [Harrington, 2001]** R. F. Harrington, Time-Harmonic Electromagnetic Fields, Wiley-IEEE Press, 2001.
- [Hoefler, 1985]** W. J. R. Hoefler, "The Transmission-Line Matrix Method--Theory and Applications," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 33, no. 10, pp. 882–893, Oct. 1985.
- [ICNIRP, 2020]** "Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)", International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Health Phys., Health Physics. 2020, 118 (5), 483-524.
- [IEEE Standard, 2019]** "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz," in IEEE Std C95.1-2019 (Revision of IEEE Std C95.1-2005/ Incorporates IEEE Std C95.1-2019/Cor 1-2019) , vol., no., pp.1-312, 4 Oct. 2019.
- [Itis]** <https://itis.swiss/virtual-population/>
- [Ijeh, 2023]** Ijeh et al., «TLM Local Mesh-Refinement Scheme Based on N-Port Network Representation and Conference-Matrix Connection Topology,» *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2023, 71 (7), pp.2888 - 2896. (10.1109/TMTT.2023.3241890).
- [Ijeh, 2024]** Ijeh et al., «Unconditionally Stable Explicit Time-Domain Transmission-Line Matrix Method,» *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2024, 73 (4), pp.2298-2308. (10.1109/TMTT.2024.3467037).
- [Ijeh, 2026]** Ijeh, M. Cueille, A. Debard, J. L. Dubard et M. Ney, «Domain-Decomposition Scheme for Frequency-Domain TLM Method Using Equivalent Scattering Matrix Concept,» *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2026, pp.1-14. (10.1109/TMTT.2026.3680257).
- [Johns, 1987]** P.B. Johns, "A symmetrical condensed node for the TLM method," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn*, vol. 35, no. 4, pp. 370–377, Apr. 1987.
- [Laisné, 2013]** A Laisné et al. "Comparison of finite integration technique (fit) and transmission line matrix (tlm) for numerical dosimetry in hf/vhf band." *Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, 2013 International Symposium on. IEEE, 2013.
- [Pastorino, 2010]** M. Pastorino, *Microwave Imaging*, Wiley, 2010
- [Podebrad, 2003]** O. Podebrad et al., "New flexible subgridding scheme for the finite integration technique," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, no. 3, pp. 1662-1665, May. 2003.
- [Vives, 2007]** Y. Vives-Gilabert et al., « Modeling Magnetic Radiations of Electronic Devices Using Distributed Equivalent Dipoles », *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 49, n° 2, pp. 391–400, 2007.
- [Weiland, 2008]** T. Weiland et al., "A practical guide to 3-D simulation," in *IEEE Microwave Magazine*, vol. 9, no. 6, pp. 62-75, December 2008.
- [Wiaart, 2008]** J. Wiaart, "Analysis of RF exposures in the head tissues of children and adults." *Phys.Med. Biol*, 2008, 53(13): 3681–3695. doi:10.1088/0031-9155/53/13/019
- [Yee, 1966]** Kane Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, no. 3, pp. 302-307, May 1966.