



**HAL**  
open science

## MaSuRe : méta Matériau Surfamique Résonant - rapport à 2 ans

Laurent Krähenbühl, Olivier Chadebec, Viviane Cristine Silva

### ► To cite this version:

Laurent Krähenbühl, Olivier Chadebec, Viviane Cristine Silva. MaSuRe : méta Matériau Surfamique Résonant - rapport à 2 ans. [Rapport de recherche] Laboratoire Ampère CNRS UMR 5005, Université de Lyon, INSA - Lyon; G2Elab; Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2019. hal-02456244

**HAL Id: hal-02456244**

**<https://hal.science/hal-02456244>**

Submitted on 27 Jan 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# MaSuRe :

## méta Matériau Surfamique Résonant

### Rapport à 2 ans (2018-2019) – août 2019

Projet USP-COFECUB 173/18

---

Laurent Krähenbühl<sup>1,4</sup>, Olivier Chadebec<sup>2,4</sup>, Viviane C. Silva<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Ampère – <sup>2</sup>G2Elab – <sup>3</sup>EP-USP – <sup>4</sup>LIA Maxwell 2

## 1 Objectif général du projet

Extrait de l'introduction du projet déposé en 2017 (p. 4) :

« Nous proposons d'évaluer numériquement, puis expérimentalement, les possibilités nouvelles offertes par le concept de métamatériau, dans le domaine du Génie Electrique, de l'électronique de puissance et de la compatibilité électromagnétique (CEM), c'est-à-dire dans des gammes de fréquence plus basses (de 10kHz à 100 MHz) que celles explorées jusqu'ici. A ces fréquences-là, les résonances utilisées ne pourront pas être liées à des ondes dans des cavités : la cellule élémentaire sera par exemple être constituée d'une piste de cuivre formant spire, court-circuitée sur une capacité (qui peut être « intégrée » au substrat), conformément aux idées originales de Tesla ; ce motif peut être répété des milliers de fois sur le substrat, formant ainsi un méta matériau, surfamique ou éventuellement même volumique. La résonance de ce système sera excitée par un champ magnétique harmonique, qui sera, pour nos essais expérimentaux, généré à proximité par un courant circulant dans une bobine ».

## 2 Rappel des objectifs des 2 premières années 2018-2019

Le projet MaSuRe comporte 3 phases pour les 4 années prévues, dont les 2 premières concernent la première période de 2 années :

Extrait de l'introduction du projet déposé en 2017 (p. 4) :

- Phase 1 (années 1 et 2) « Modélisation et outil numérique » : réalisation d'un outil efficace de modélisation, compatible avec les outils de conceptions utilisés en Génie Electrique (calculs de circuits électriques, calcul de champs électromagnétiques dans l'espace). Le gain en efficacité numérique sera obtenu par des techniques d'homogénéisation, pour laquelle les 3 équipes ont déjà une bonne expérience dans d'autres contextes.
- Phase 2 (années 2 et 3) « Conception optimale » : à partir des simulations et des contraintes technologiques, recensement exhaustif des possibilités offertes par ces surfaces artificielles dans la gamme de fréquences utilisée en génie électrique

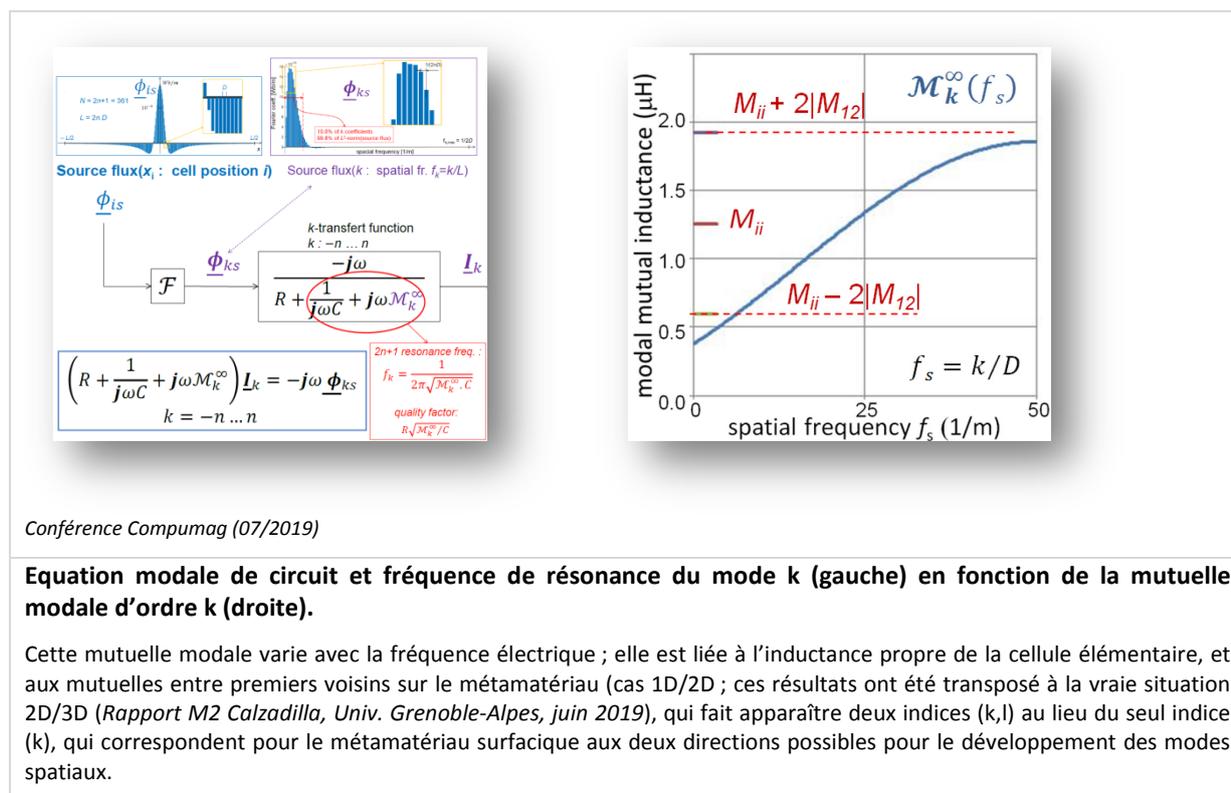
Etant donné le bon état d'avancement en juin 2019, la phase 1 (étude et amélioration des méthodes de modélisation) devrait être comme prévu terminée à la fin des deux premières années. La phase 2 s'appuie sur ces méthodes de modélisation pour préparer la phase expérimentale de la phase 3 : elle va pouvoir commencer maintenant (dernier semestre de l'année 2) et devrait s'achever à la fin de l'année 3.

### 3 Réalisation après 18 mois (07/2019)

L'essentiel de la phase 1 a été mené avec succès.

#### 3.1 Théorie modale

Nous sommes les premiers à avoir montré (résultat totalement original) que la théorie modale s'applique à ce type de méta-matériaux, ce qui permet d'obtenir des résultats de simulation numérique extrêmement rapides. En raison des effets de bords, ces résultats ne sont pas exacts, mais ils permettent de comprendre comment fonctionnent ces matériaux, et quels sont les paramètres essentiels qui interviennent dans leurs propriétés « à grande échelle » (c'est-à-dire lorsque le métamatériau comporte un grand nombre de cellules, et qu'on étudie ses effets à des distances grandes par rapport à la taille de la cellule élémentaire utilisée).

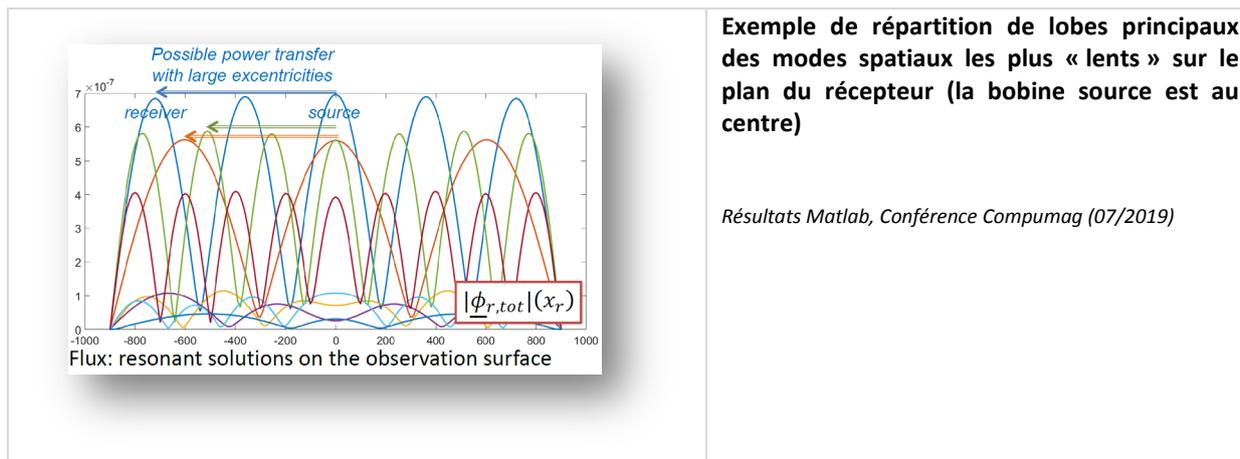


Conférence Compumag (07/2019)

#### Equation modale de circuit et fréquence de résonance du mode k (gauche) en fonction de la mutuelle modale d'ordre k (droite).

Cette mutuelle modale varie avec la fréquence électrique ; elle est liée à l'inductance propre de la cellule élémentaire, et aux mutuelles entre premiers voisins sur le métamatériau (cas 1D/2D ; ces résultats ont été transposé à la vraie situation 2D/3D (Rapport M2 Calzadilla, Univ. Grenoble-Alpes, juin 2019), qui fait apparaître deux indices (k,l) au lieu du seul indice (k), qui correspondent pour le métamatériau surfacique aux deux directions possibles pour le développement des modes spatiaux.

La théorie modale montre qu'il est possible de réaliser un transfert efficace d'énergie entre deux bobinages même s'ils ne sont pas du tout co-axiaux, et permet d'expliquer pourquoi cela est possible : la cellule élémentaire a une fréquence de résonance précise, qui ne dépend que de son inductance propre et de la capacité connectée ; le métamatériau présente pour sa part un grand nombre de fréquences de résonances différentes, liées aux modes spatiaux excités : en modifiant la fréquence électrique du champs d'excitation, on modifie la répartition spatiale du champ généré par la résonance du métamatériau, ce qui permet de « corriger » un éventuel décentrement du récepteur. Ce résultat, confirmé expérimentalement, est lui aussi totalement original.



### 3.2 Solutions de référence

Nous avons mis en place de plusieurs manières les outils numériques qui permettent d'obtenir les solutions numériques « exactes » : sous MatLab pour des méta-matériaux 1D dans un système magnétique 2D, cas noté dans la suite 1D/2D ; avec Altair Flux / PEEC pour les vrais méta-matériaux surfaceutiques, donc 2D dans un système magnétique 3D, ce que nous notons dans la suite 2D/3D). Fondés sur la méthode des circuits (et les méthodes analytiques pour le calcul des inductances propres et mutuelles), ces outils ne peuvent traiter que des systèmes comportant un nombre « raisonnable » de cellules élémentaires (quelques centaines en 1D/2D, quelques dizaines en 2D/3D) : nous avons ainsi à disposition des « solutions de référence » qui permettent de tester la précision obtenue par des méthodes approchées (qui ne sont pas exactes, mais beaucoup plus rapides, et qui pourront traiter des systèmes à nombre beaucoup plus élevé de cellules).

### 3.3 Homogénéisation

L'objectif d'homogénéisation directe du métamatériau n'est (en juin 2019) pas encore tout à fait atteint ; néanmoins, nous avons montré qu'il est possible de réduire la taille  $N$  de la matrice ( $N \times N$ ) de la méthode exacte des circuits d'un facteur correspondant en 1D/2D au rapport des tailles entre bobinages d'excitation et cellule élémentaire (et à son carré pour les vrais systèmes 2D/3D). Ainsi, pour un métamatériau surfaceutique comportant  $N=10^4=100 \times 100$  cellules élémentaires de 1 cm, excité par des bobinages externes de 10 cm (soit un rapport des tailles de 10), la solution exacte s'appuie sur l'inversion d'une matrice  $10^4 \times 10^4$ , mais on peut construire une solution approchée avec prise en compte des effets de bords en réduisant les degrés de liberté d'un facteur 10 dans chaque direction de l'espace, donc avec un matrice dont la taille est seulement  $100 \times 100$ .

Ce résultat est pleinement cohérent avec la théorie modale : la réduction faite du nombre de degrés de liberté peut en effet être interprétée comme un filtrage spatial passe-bas ; on ne retient dans la solution approchée que l'effet des modes dont la variation spatiale est la plus lente, c'est-à-dire les seuls modes qui sont excités lorsque les bobinages externes sont beaucoup plus grands que la taille de la cellule élémentaire du métamatériau.

### 3.4 Paramètres essentiels

La méthode modale permet de démontrer que le comportement fréquentiel global du métamatériau dépend bien entendu de la valeur de la capacité utilisée pour la cellule de base, puis :

- de l'inductance propre de la cellule élémentaire,
- et principalement des inductances mutuelles seulement avec les cellules immédiatement voisines.

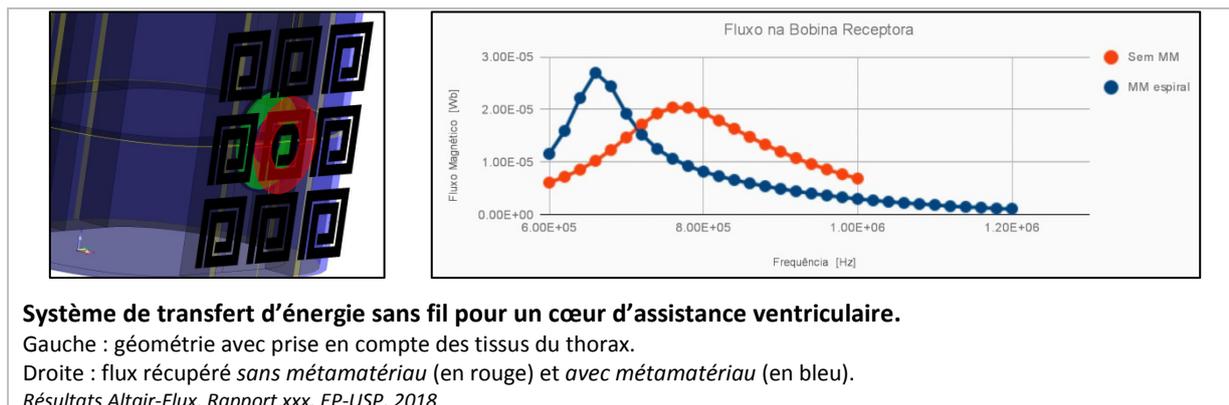
Il est donc essentiel de savoir calculer précisément ces inductances propres et mutuelles en fonction de la géométrie précise de la cellule élémentaire, et si nécessaire en fonction de la fréquence (si l'effet de peau intervient), soit en raison des symétries, deux valeurs d'inductances en 1D/2D et 3 en

2D/3D. C'est pour cette raison que nous avons traité (via des travaux d'étudiants) des systèmes avec quelques cellules seulement, en utilisant Altair Flux (São Paulo), Altair PEEC (Grenoble) et HFSS (Lyon). Nous avons aussi vérifié la cohérence des résultats obtenus par ces calculs avec des résultats expérimentaux sur ces systèmes simples : nous avons ainsi la garantie que nous saurons, par le calcul, prévoir le comportement de systèmes à très grand nombre de cellules.

### 3.5 Méthodes de modélisation mises en œuvre

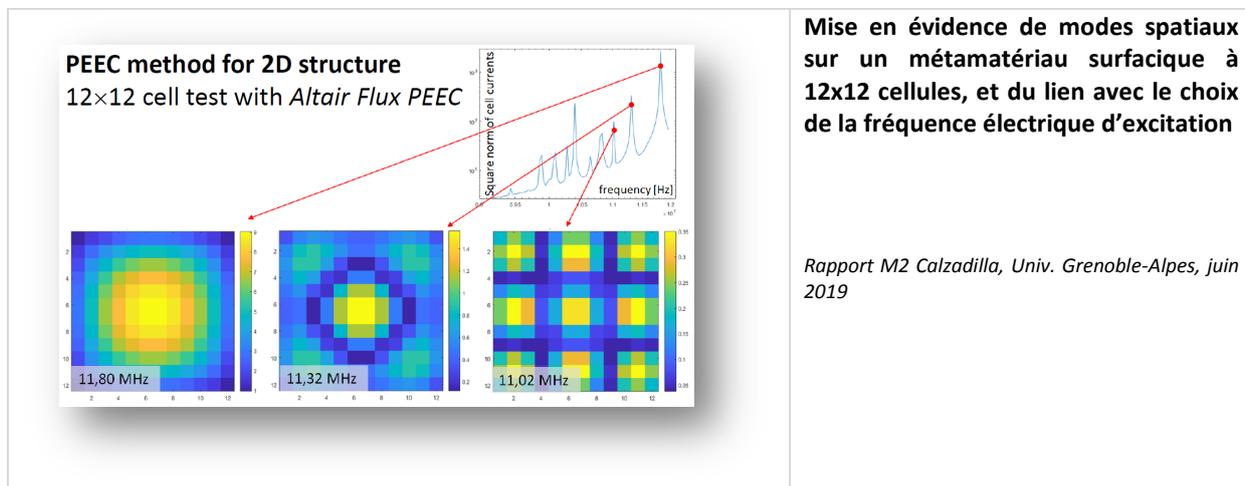
#### 3.5.1 Méthode des éléments finis, approximation quasi-statique

LMAG, São Paulo. Logiciel : Altair FLUX



#### 3.5.2 Méthode PEEC

G2Elab, Grenoble. Logiciel Altair FLUX-PEEC

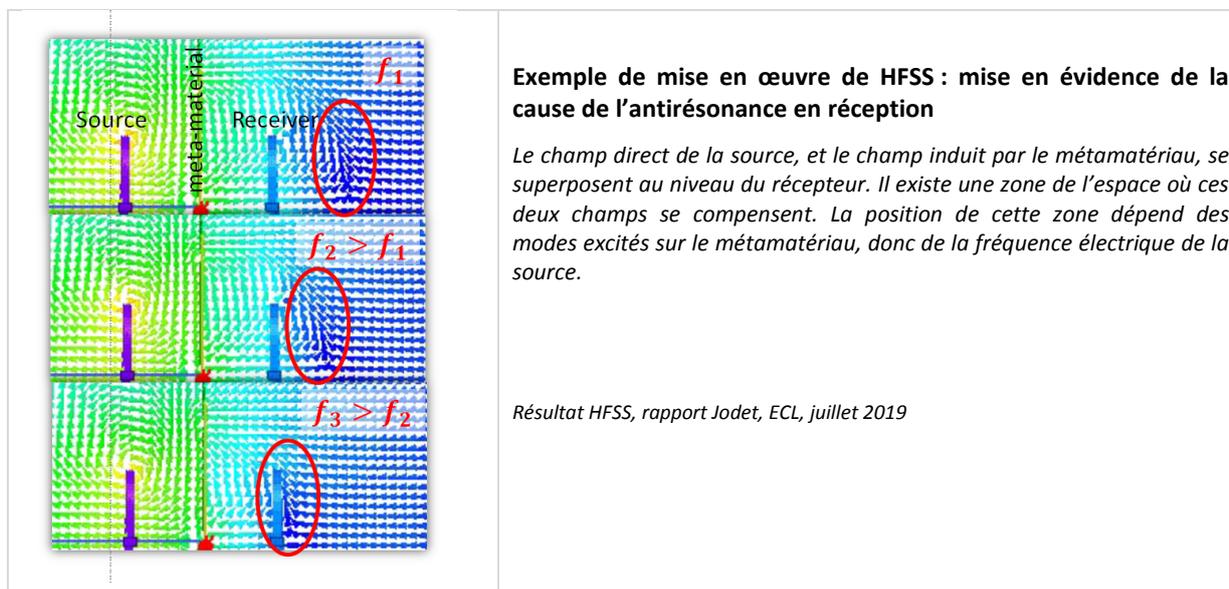


#### 3.5.3 Méthode des éléments finis, Maxwell complet

Laboratoire Ampère, Lyon. Logiciel Ansys-HFSS

Les technologies de réalisation possibles pour ces métamatériaux (circuits imprimés multicouches, intégration sur substrat, plastronique, ..., à étudier en année 3 du projet), et certaines des applications visées (grappillage énergétique, transmission d'énergie par micro-ondes) peuvent conduire à des tailles réduites (par rapport aux réalisations « artisanales » actuelles) et à l'utilisation de bandes de fréquences un peu plus élevées. Il est alors possible que des effets capacitifs directs entre pistes deviennent significatifs sur le comportement global du métamatériau, voire même que la propagation électromagnétique commence à perturber le comportement purement « inductif »

que nous cherchons à exploiter dans ce projet. C'est pourquoi nous avons tenu à vérifier que le logiciel HFSS est utilisable aussi vers la limite des basses fréquences : il permettrait alors de modéliser ces cas à fréquences intermédiaires, et de construire des solutions de références, inaccessibles avec les modules classiques de Flux3D.



### 3.6 Programmation de la fin de l'année 2

Les travaux à mener de juillet à décembre 2019 concernent principalement 3 points (les deux derniers se poursuivront en 2020, si le projet est reconduit) :

- Suites de l'étude de l'homogénéisation directe. L'approche via l'approche circuit et réduction de matrice permet de réduire les temps de calcul, via la réduction du coût de résolution de la matrice. Par contre, le temps de calcul préliminaire, lié à l'assemblage de la matrice, n'est pas réduit par rapport à la méthode circuit complète. Nous avons d'ici la fin de l'année encore plusieurs pistes à explorer, qui permettraient une véritable homogénéisation, avec l'économie correspondante sur le temps d'assemblage matriciel.
- Démarrage de la phase 2 (recensement des technologies de réalisation pratique de métamatériaux à grand nombre de cellules), en collaboration avec des équipes du Laboratoire Ampère à Lyon, et de l'IPT à São Paulo (électronique intégrée, plastronique).
- En lien avec les résultats théoriques obtenus, nous pensons ajouter une tâche qui n'était pas prévue à l'origine : la théorie modale a en effet montré que le mode spatial de fonctionnement est déterminé par le choix de l'une des fréquences de résonance « électriques », et qu'il détermine l'efficacité du transfert d'énergie (notamment en cas de décentrage entre émetteur et récepteur). Nous pensons donc ajouter le démarrage d'une étude de l'électronique de puissance associée, en particulier des possibilités de commande en fréquence. Les 3 laboratoires impliqués (LMAG à São Paulo, G2Elab et Ampère) peuvent apporter leurs compétences pour proposer des architectures, et pour les tester expérimentalement (il s'agit d'une tâche bien adaptée à des travaux d'étudiants non gradués).

Projets de publications à brève échéance.

- Mi-août 2019 : dépôt d'une proposition d'article pour la revue IEEE T-Mag, qui reprendra en détail les principaux résultats théoriques présentés à Compumag 2019. Ce papier est en phase finale d'écriture.

- Mi-septembre 2019 : dépôt d'une proposition de contribution pour la conférence internationale IEEE CEFC 2020 (Pise, Italie, avril 2020 : <https://www.cefc2020.org/>). Il s'agit d'une conférence consacrée aux méthodes numériques pour l'électromagnétisme. Nous voulons présenter la simulation et l'explication du transfert de puissance via le métamatériau, particulièrement dans les situations excentrées, en mettant en évidence l'onde de surface générée (de type ligne de transmission).
- Nous préparons également une synthèse des travaux menés depuis 18 mois par les étudiants à São Paulo, Grenoble et Lyon, qui comprendra les validations expérimentales réalisées. Le mode de publication (via une conférence, ou directement dans une revue à choisir) n'est pas encore fixé. Cette synthèse sera co-signée par les 3 équipes et mentionnera le financement USP-COFECUB.

## 4 Demande de renouvellement

Etant donnés les très bons résultats obtenus pendant les 18 premiers mois du projet MaSuRe, il nous paraît justifié de demander son renouvellement pour la période 2020-2021.

### 4.1 Rappel des objectifs pour 2020-2021

La seconde période de 2 années doit être consacrée à finaliser la phase 2 déjà mentionnée (et qui commence en juillet 2019), et à la phase 3, expérimentale, décrite ainsi dans le projet déposé en 2017 :

- Phase 3 (années 3 et 4) « Expérimentation » : quelques réalisations expérimentales (validation de concept) pour les applications potentiellement les plus prometteuses : à ce jour, nous envisageons a/ transfert d'énergie par induction (partie basse de la gamme de fréquences envisagée), coordonné à São Paulo ; b/ électronique de puissance et CEM (partie intermédiaire de la bande des fréquences), coordonné à Grenoble ; c/ transfert d'énergie par ondes, RWU, grappillage (partie haute des fréquences), coordonné à Lyon.

### 4.2 Mise en place d'un travail de doctorat.

Les conditions définies au moment de l'appel à projet USP-COFECUB en 2017 ne permettaient pas le financement de déplacements d'un doctorant. Nous n'avions donc pas prévu de lier directement un travail de thèse à ce projet. Les règles ont été modifiées en 2019, mais la date à laquelle nous avons été informés (en mai-juin 2019) était trop tardive par rapport au calendrier des Ecoles Doctorales, pour nous permettre de proposer un sujet financé par les allocations doctorales de l'un de nos Etablissements de tutelle : pour cela, les sujets doivent être proposés en février.

De ce fait, du côté français, une thèse financée commencerait au plus tôt en septembre 2020, donc seulement pour les 3 derniers semestres du projet. Cependant, nous espérons bénéficier de la candidature d'un étudiant brésilien qui a déjà fait un stage de recherche sur ce sujet.

Cet étudiant (Gustavo Domingues Carvalho) devrait terminer ses études d'ingénieur en juillet 2020, il pourrait donc être candidat sur une allocation française pour une thèse en cotutelle. Pour lui permettre de préparer dans de bonnes conditions cette candidature, il est prévu de le prendre en stage de fin d'études à l'ECLyon à partir de janvier/février 2020 : au total, il aurait donc été intégré au projet MaSuRe pendant l'année 2018 (initiation scientifique à l'EP-USP), puis comme stagiaire à Lyon pour le premier semestre 2020, puis comme doctorant pendant les 3 derniers semestres du projet (2020, 2021), soit au total 3 années.

### 4.3 Autres ressources humaines.

Outre les enseignants-chercheurs permanents prévus lors du dépôt du projet, nous pourrions nous appuyer sur un nouvel enseignant-chercheur recruté à Grenoble en 2018, membre du G2Elab, spécialiste des méthodes numériques : M. Innocent Nyonzima, Maître de Conférences. Nous souhaitons le voir officiellement associé au projet

Par ailleurs, le recours aux projets d'étudiants en formation ingénieur, tant au Brésil qu'en France, a montré sa pertinence pendant les deux premières années (et déjà en amont, avant acceptation du présent projet). Ce type de sujet, même s'il est sous-tendu par une théorie assez complexe, comporte des éléments concrets novateurs qui passionnent les étudiants, les attirant ainsi vers des activités de recherche. Nous continuerons donc dans cette voie.

## Liste de productions de l'action

---

Une liste donnant accès aux textes complet, et mise à jour en temps réel, est disponible à l'adresse :

[https://haltools.archives-ouvertes.fr/Public/afficheRequetePubli.php?solrQuery=collaboration\\_t%3A%22173%2F18%22&CB\\_ref\\_biblio=oui&langue=Francais&trip=typdoc&ordre\\_aff=TA&Fen=Aff&css=../css/VisuCondense.css](https://haltools.archives-ouvertes.fr/Public/afficheRequetePubli.php?solrQuery=collaboration_t%3A%22173%2F18%22&CB_ref_biblio=oui&langue=Francais&trip=typdoc&ordre_aff=TA&Fen=Aff&css=../css/VisuCondense.css)

### 1 Article de revue

*en cours de soumission (prévue le 18/08/2019) à IEEE Transactions on Magnetics.*

Cet article reprend (avec beaucoup plus de détails) les résultats présentés à la Conférence Compumag 2019 (voir plus bas). Cosigné (São Paulo, Grenoble et Lyon) et USP-Cofecub remercié.

Laurent Krähenbühl, Riccardo Scorretti, Arnaud Bréard, Christian Vollaire, Jean-Michel Guichon, et al.. Large surface LC-resonant metamaterials: from circuit model to modal theory and efficient numerical methods. *IEEE Trans. on Magnetics*, 2020 (soumis le 18/08/2019) ([hal-02194948v1](#))

### 2 Présentations en conférences

**Momag 2018 (MG, Brésil) :** Cosigné. A la date de la Conférence, le projet n'avait pas encore été sollicité pour un financement, il n'y a donc pas de remerciement.

Gustavo Domingues Carvalho, Viviane Cristine Silva, Florent Haffner, Carlos Sartori, Luiz Lebensztajn, et al.. Modeling of a metamaterial in the FEA of a contactless transcutaneous energy transfer device. *MOMAG*, SB-Mag, Aug 2018, Santa Rita do Sapucaí, MG, Brazil. ([hal-01912989](#))

**Compumag 2019 (Paris, F.) :** Cosigné (São Paulo, Grenoble et Lyon) et USP-Cofecub remercié.

Laurent Krähenbühl, Riccardo Scorretti, Arnaud Bréard, Christian Vollaire, Jean-Michel Guichon, et al.. Large surface LC-resonant metamaterials: from circuit model to modal theory and efficient numerical methods. *Compumag 2019*, Jul 2019, Paris, France. ([hal-01985864](#))

*à soumettre (deadline 09/2019) :*

**IEEE CEFC 2020 :** Cosigné (SP, Grenoble et Lyon) et USP-Cofecub remercié.

Sujet : simulation et explication du transfert de puissance via le métamatériau, particulièrement dans les situations excentrées, en mettant en évidence l'onde de surface générée

### 3 Rapports

Lyon :

Côme Jodet, Juan Garcia Thieux, Christian Vollaire, Arnaud Bréard. Dimensionnement d'un système de transfert d'énergie électrique par induction utilisant des métamatériaux pour amplifier le transfert de puissance et pour empêcher les flux de fuite [Rapport de recherche]. PAr 150, Ecole Centrale Lyon, 2 avril 2019. ([hal-02194988](#))

Côme Jodet, Christian Vollaire. Etude d'un système de transfert d'énergie électrique par induction utilisant un métamatériau. [Rapport de recherche] Ecole Centrale Lyon, 07/2019. ([hal-02190336](#)) (à paraître).

L. Krähenbühl, C. Vollaire, A. Bréard. Homogénéisation d'un métamatériau surfaccie résonant (projet MaSuRe), Rapport intermédiaire de recherche, Laboratoire Ampère, sept. 2018.

Grenoble :

Alberto Urdaneta-Calzadilla, Olivier Chadebec, Jean-Michel Guichon, Gérard Meunier. Numerical study of metamaterials for contactless energy transfer. [Rapport de recherche] G2Elab. 2019. ([hal-02175827](#))

Jean-Michel Guichon, Olivier Chadebec, Gérard Meunier, Premier résultat MaSuRe, rapport intermédiaire de recherche, G2Elab, 07/2018.

São Paulo :

Lucas Prado Castelo, Viviane Cristine Silva. Computational study of different metamaterial configurations and their impact on the performance of a Wireless Energy Transmission Systems, Proc. FAPESP 2018/15106-2, juillet 2019 (*à paraître*).

Gustavo Domingues Carvalho, Viviane Cristine Silva. INICIAÇÃO CIENTÍFICA - FAPESP - RELATÓRIO FINAL: PROCESSO 2017/15808-4. [Research Report] Escola politécnica (São Paulo). 2018. ([hal-02190431](#))

*Nous rappelons que, avant acceptation de ce projet par l'USP-COFECUB, plusieurs travaux d'étudiants avaient déjà été réalisés sur ce sujet, y compris avec échanges franco-brésiliens, notamment :*

S. Nishimura, double diplômé EP-USP/ECL en 2014, présentation à la conférence MOMAG 2014 (Curitiba, Brésil):  
S. Nishimura, J. de Almeida, C. Voltaire, C. Sartori, A. Bréard, et al.. Enhancing the inductive coupling and efficiency of wireless power transmission system by using metamaterials. MOMAG 2014, Brazil. pp.121-125. □[hal-01064690](#)□

F. Haffner, étudiant ECL, qui a fait un stage de recherche de 6 mois à l'EP-USP à l'occasion d'une « césure » :  
F. Haffner, V. Silva, C.A.F. Sartori, Estudo baseado na simulação por elementos finitos em 3D sobre a viabilidade de utilização de metamaterial no TET- sistema transcutâneo de transmissão de energia sem fio, Relatório Parcial de Estágio de Pesquisa em Laboratório de Engenharia, EPUSP, Maio de 2017