

Campagne 2020 Contrats Doctoraux Instituts/Initiatives

Proposition de Projet de Recherche Doctoral (PRD)

Appel à projet IBEEs - Initiative Biodiversité Evol Ecolo Société 2020

Intitulé du Projet de Recherche Doctoral : Des sauts d'harmoniques aux métasurfaces acoustiques : Apport de la modélisation acoustique non linéaire pour l'étude des innovations évolutives et la recherche de métamatériaux

Directeur de Thèse porteur du projet (titulaire d'une HDR) :

NOM : **Robillard** Prénom : **Tony**
Titre : Choisissez un élément : ou Maître de conférences du Muséum
e-mail : tony.robillard@mnhn.fr
Adresse professionnelle : Muséum national d'Histoire naturelle, CP50, 45 rue Buffon, (site, adresse, bât., bureau) 75005 Paris

Unité de Recherche :

Intitulé : Institut Systématique Evolution, Biodiversité (ISYEB)
Code (ex. UMR xxxx) : UMR7205

ED227-Sciences vie homme : évolution

Ecole Doctorale de rattachement de l'équipe & d'inscription du doctorant :

Doctorants actuellement encadrés par le directeur de thèse (préciser le nombre de doctorants, leur année de 1^{ère} inscription et la quotité d'encadrement) : 2 : 1 doctorant 3^{ème} année, première inscription en juin 2017 (encadrement principal), 1 doctorant co-encadré en 1^{ère} année, inscription en septembre 2019 (encadrement secondaire 30%)

Co-encadrant :

NOM : **Tournat** Prénom : **Vincent**
Titre : Directeur de Recherche ou HDR ☒
e-mail : vincent.tournat@univ-lemans.fr

Unité de Recherche :

Intitulé : Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (LAUM)
Code (ex. UMR xxxx) : UMR 6613

Choisissez un élément :

Ecole Doctorale de rattachement : Ou si ED non Alliance SU : **ED602 Sciences pour l'ingénieur**

Doctorants actuellement encadrés par le co-directeur de thèse (préciser le nombre de doctorants, leur année de 1^{ère} inscription et la quotité d'encadrement) : 3, à 40, 40 et 30% respectivement et début de thèse en octobre 2017, 2017 et 2019

Cotutelle internationale : ☒ Non ☐ Oui, précisez Pays et Université :

Description du projet de recherche doctoral (en français ou en anglais)

3 pages maximum – interligne simple – Ce texte sera diffusé en ligne

Détailler le contexte, l'objectif scientifique, la justification de l'approche scientifique ainsi que

Des sauts d'harmoniques aux métasurfaces acoustiques : Apport de la modélisation acoustique non linéaire pour l'étude des innovations évolutives et la recherche de métamatériaux

Contexte

L'évolution est une source intarissable d'innovations pour le vivant, mais aussi une grande source d'inspiration pour l'Homme. A l'échelle des organismes, les innovations évolutives permettent le succès de lignées entières sur des périodes s'étalant sur des millions d'années ; pour l'Homme, les progrès techniques inspirés de la nature sont de plus en plus plébiscités, car ils s'appuient sur des solutions éprouvées sur le long terme et souvent déclinées de multiples manières organisées suivant les relations phylogénétiques. Or ces différentes facettes des innovations, évolutives, fonctionnelles et appliquées, sont rarement étudiées conjointement.

En acoustique, les fréquences harmoniques existent naturellement dans la plupart des signaux. Il s'agit par définition de fréquences ayant pour valeur des multiples entiers de la fréquence fondamentale du signal ¹. Les sauts d'harmoniques sont des phénomènes acoustiques non linéaires bien connus des musiciens, puisqu'ils correspondent au passage d'une octave à une autre : ils consistent à modifier la fréquence d'un son en passant d'un harmonique à un autre plutôt que de manière progressive et linéaire.

Dans le vivant, il n'existe que trois exemples de transposition du phénomène de sauts d'harmoniques : chez les colibris *Selasphorus* ², les chauves-souris *Rhinolophes* ³, et chez les grillons *Eneopterinae* ⁴, où de multiples sauts d'harmoniques ont favorisé la diversification et l'apparition de nouveaux systèmes de communication ^{5,6}. Bien que rares, les sauts d'harmoniques constituent des innovations évolutives de premier ordre pour les clades concernés, car ils entraînent des bouleversements de la biologie des espèces en affectant considérablement les signaux avec lesquels les animaux interagissent entre eux et avec leur environnement. Sur le plan évolutif, les sauts d'harmoniques constituent de rares exemples d'évolution saltatoire (i.e., non linéaire) de signaux de communication. La façon dont ils sont réalisés d'un point de vue physique reste inconnue, de même que la manière dont ils se sont mis en place d'un point de vue évolutif.

Sur le plan de l'acoustique physique, les métamatériaux acoustiques sont largement étudiés pour leur intérêt dans la réalisation de divers types de contrôle des ondes. Le terme « métamatériaux » désigne un ensemble vaste de matériaux composites artificiels, en optique, acoustique, mécanique, etc, qui présentent des propriétés inhabituelles émanant de leur composition et de leur structure ^{7,8}. Pour la propagation des ondes acoustiques, cela se traduit par des propriétés acoustiques qu'on ne retrouve pas dans un matériau classique et généralement pas dans un matériau naturel, sauf cas exceptionnel. Souvent, des résonances locales sont utilisées pour induire un comportement inhabituel visé, car ces résonances permettent de produire des effets notables sur les ondes, même lorsque la longueur d'onde est grande devant la taille du résonateur. Ainsi, une fine couche de métamatériau peut fortement influencer sur la transmission, la réflexion, l'absorption, ou encore la focalisation d'une onde, même si cette couche ou "métasurface" est bien plus fine que la longueur d'onde en jeu, ce qui est inhabituel et peut mener à de nombreuses applications (eg. couche absorbante ultra-fine pour des basses fréquences nécessitant habituellement des matériaux absorbants encombrants ou lourds).

Les métasurfaces acoustiques ont montré leur capacité à manipuler des ondes en limites de milieux de propagation. Contrairement au régime linéaire qui concerne l'immense majorité des travaux sur les métamatériaux acoustiques, les études sur les propriétés non linéaires des métamatériaux, de surcroit des métasurfaces, restent peu nombreuses. Les effets non linéaires en acoustique apparaissent aux forts niveaux, lorsque l'effet n'est plus proportionnel à sa cause ou que le principe de superposition, propre aux systèmes linéaires, n'est plus applicable. Des travaux récents ont permis de concevoir des architectures de métasurfaces élastiques permettant un contrôle des ondes acoustiques dans le régime non linéaire. En particulier l'effet de conversion d'une onde fondamentale vers son deuxième harmonique, analogue à un saut d'harmoniques, a été étudié dans le processus de réflexion et de transmission unidirectionnelle par une méta-interface comportant une architecture composée de masses tournantes ^{9,10}. Les métasurfaces ainsi conçues, résonantes et à non-linéarité contrôlée, permettent de générer des effets non linéaires acoustiques inhabituels, potentiellement intéressants

pour la manipulation d'ondes acoustiques. Les principaux freins au développement des métamatériaux non linéaires sont l'efficacité généralement faible de la réponse non linéaire et le manque de contrôle sur cette non-linéarité.

Un réel dialogue entre étude des formes et des structures biologiques, analyse phylogénétique, modélisation physique et acoustique théorique permettra de faire s'éclairer mutuellement l'étude des innovations évolutives correspondant aux sauts d'harmoniques et l'étude des métasurfaces acoustiques dans un contexte biomimétique. Chez les grillons Eneopterinae, le processus de saut d'harmonique n'a pas encore été expliqué, mais pourrait faire appel à un processus non linéaire de transfert d'énergie de la composante fondamentale du signal vibratoire à un harmonique supérieur, similaire à celui prenant place dans les métasurfaces non linéaires étudiées^{9,10}. Cette particularité évolutive reste à expliquer et la piste des métamatériaux, aux propriétés inhabituelles, contrôlables et modélisables, offre les outils permettant d'explorer les processus en jeu. De surcroît, par une approche biomimétique, la conception de nouveaux métamatériaux reproduisant les effets acoustiques surprenants comme les sauts d'harmonique, pourra être menée.

Justification de l'approche scientifique et complémentarité des équipes

Comprendre les sauts d'harmoniques multiples observés, c'est comprendre à la fois les mécanismes de production du son et les transitions évolutives morpho-fonctionnelles qui se sont opérées. Grâce aux inférences phylogénétiques préalablement conduites chez les grillons Eneopterinae¹¹, on connaît précisément les positions phylogénétiques et configurations bioacoustiques correspondant aux sauts d'harmoniques dans cette lignée. Cependant la morphologie fine et l'ultrastructure des ailes des espèces actuelles restent à analyser. Des méthodes comparatives phylogénétiques permettront ensuite d'inférer les dimensions, formes et caractéristiques ultrastructurales aux nœuds clés de la phylogénie, de manière à caractériser chacune des transitions ayant conduit d'un harmonique à un autre au cours de l'évolution (tâche ISYEB).

Des modélisations acoustiques seront menées en parallèle afin d'identifier les processus responsables des sauts d'harmoniques en partant de modèles de vibration connus des ailes de grillons¹². Vibrations de plaques ou membranes en grandes déformations, contacts non linéaires, éléments architecturaux avec contrastes d'élasticité importants, sont autant d'ingrédients à considérer dans les modèles à tester. Ces modèles seront validés par l'étude de cas concrets associant morphologies 3D et analyses par laser des modes de vibration alaires chez une sélection d'espèces actuelles. Les ingrédients importants des modèles théoriques seront également confrontés aux modèles pertinents pour les architectures de métasurfaces élastiques permettant un contrôle des ondes acoustiques dans le régime non linéaire, en vue de développer des métasurfaces inspirées des ailes de grillons (tâche LAUM).

Les informations fournies par les inférences phylogénétiques et le modèle théorique de vibration permettront de paramétrer des modèles acoustiques afin de comprendre les transitions évolutives réalisées au sein de la lignée étudiée, puis de comparer les solutions théoriques aux solutions sélectionnées par l'évolution (tâche conjointe ISYEB-LAUM).

Objectifs scientifiques et faisabilité

1. Caractérisation des espèces à sauts d'harmoniques en termes de formes, dimensions, et ultrastructures. Analyse des ailes chez les espèces actuelles. Etude morphométrique et ultrastructurale centrée sur les espèces représentées dans la phylogénie moléculaire des grillons Eneopterinae, soit 60 taxons représentant les principales lignées évolutives. De nombreux spécimens sont disponibles dans les collections du MNHN pour l'étude et 15 espèces sont maintenues en élevage, ce qui permettra de mener des analyses ultrastructurales et approfondies.

2 Caractérisation des transitions évolutives correspondant aux sauts d'harmoniques. Quelles modifications physiques ont conduit aux innovations convergentes au sein d'une même lignée ? Analyse comparative phylogénétique : reconstruction des états ancestraux de l'ensemble des traits des espèces liés aux sauts d'harmoniques (traits acoustiques, formes, dimensions et ultrastructures des ailes) à partir de la phylogénie moléculaire datée déjà disponible.

3. Fondements physiques des sauts d'harmoniques. Conception de modèles acoustiques et vibratoires afin de déterminer quelles modifications des caractéristiques vibratoires peuvent résulter en des sauts d'harmoniques.

> Modélisation acoustique et mécanique : construction d'un modèle théorique de vibration des élytres des grillons à basse fréquence à partir des modèles existants et à l'aide de la méthode numérique des éléments finis, puis perturbation du modèle en vue de proposer des solutions théoriques pouvant conduire aux sauts d'harmoniques en faisant varier les paramètres suivants : formes et dimensions du modèle, présence, nombre et forme de nervures du résonateur, élasticité du matériaux constituant l'aile, épaisseur, densité et microstructure de surface (tâche initiée lors du M2 de T. Gaiddon).

> Modélisation des solutions évolutives réalisées. Caractérisation physique des états aux nœuds correspondant aux sauts d'harmoniques réalisés, puis comparaison avec les solutions théoriques.

4. Intégration et biomimétisme : Comparaison des solutions évolutives avec les architectures de métasurfaces connues dans le régime non linéaire. Quels enseignements peut-on en tirer quant au développement de métasurfaces acoustiques inspirées des multiples sauts d'harmoniques observés dans le vivant ? Les transitions morpho-fonctionnelles et structurales réalisées lors des sauts d'harmoniques évolutifs seront confrontées aux solutions théoriques. La comparaison sera ensuite étendue aux architectures de métasurfaces acoustiques en vue de développements biomimétiques.

Adéquation à l'initiative IBEES

Même si l'on sait reconstruire des morphologies ancestrales à l'aide d'outils phylogénétiques d'une part, et modéliser la physique des ailes d'espèces actuelles d'autre part, ces deux approches n'ont jamais été conciliées pour prédire des transitions évolutives et fonctionnelles à l'aide de modèles physiques. Ce projet de thèse propose de créer ce lien entre la biologie de l'évolution et de la physique acoustique.

L'extrapolation d'informations sur le vivant, vers des recherches d'architectures biomimétiques de métasurfaces acoustiques est également un challenge de taille, et a fortiori si l'on s'intéresse à des transitions acoustiques évolutives. En cas de succès, le gain sera cependant considérable pour la communauté des biologistes de l'évolution comme pour celle des acousticiens.

Profil du candidat recherché

Le candidat devra avoir une expérience dans l'utilisation de la méthode numérique des éléments finis pour modéliser des matériaux (logiciel COMSOL Multiphysics) et connaître les principes des analyses phylogénétiques comparatives. Une expérience dans le domaine de la bioinspiration est également souhaitée.

Littérature citée (en gras, issue de nos équipes)

1. Fletcher, N.H. (1992) *Acoustic systems in biology*. Oxford University Press, New York, 333 pp.
2. Clark, C.J. (2014) Harmonic Hopping, and Both Punctuated and Gradual Evolution of Acoustic Characters in *Selasphorus* Hummingbird Tail-Feathers. *PLoS One* 9.
3. Kingston, T. & Rossiter, S.J. (2004) Harmonic-hopping in Wallacea's bats. *Nature* 429, 654–657.
4. Robillard, T., Grandcolas, P. & Desutter-Grandcolas, L. (2007) A shift toward harmonics for high-frequency calling shown with phylogenetic study of frequency spectra in Eneopterinae crickets (Orthoptera, Grylloidea, Eneopteridae). *Canadian Journal of Zoology* 85, 1264–1275.
5. Benavides-Lopez, J.L., ter Hofstede, H. & Robillard, T. (2020) Novel system of communication in crickets originated at the same time as bat echolocation and includes male-male multimodal communication. *The Science of Nature* 107, 9.
6. ter Hofstede, H.M., Schoeneich, S., Robillard, T. & Hedwig, B. (2015) Evolution of a Communication System by Sensory Exploitation of Startle Behavior. *Current Biology*.
7. Bertoldi K, Vitelli V, Christensen J, Hecke M.V. (2017) Flexible mechanical metamaterials. *Nat. Rev. Mater.* 2, 17066
8. Deymier P A (2013) *Acoustic Metamaterials and Phononic Crystals*, Springer Series in Solid-State Sciences Vol. 173 Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.
9. X. Guo, V.E. Gusev, V. Tournat, B. Deng, K. Bertoldi, Frequency-doubling effect in acoustic reflection by a nonlinear, architected rotating-square metasurface, *Phys. Rev. E* 99, 052209 (2019).
10. X. Guo, V.E. Gusev, K. Bertoldi, V. Tournat, Manipulating acoustic wave reflexion by a nonlinear elastic metasurface, *J. App. Phys.* 123(12), 124901 (2018).
11. Vicente, N., Kergoat, G.J.G.J., Dong, J., Yotoko, K., Legendre, F., Nattier, R. & Robillard, T. (2017) In and out of the Neotropics: historical biogeography of Eneopterinae crickets. *Journal of Biogeography* 44, 2199–2210.
12. Mhatre, N., Montealegre, Z.F., Balakrishnan, R. & Robert, D. (2012) Changing resonator geometry to boost sound power decouples size and song frequency in a small insect. *Proc Natl Acad Sci U S A* 109, E1444-52.