

## Soutenance de thèse

**Alexis TOUZALIN** soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'équipe d'accueil ISAE-ONERA MOIS et intitulée «*Méthode des éléments virtuels pour la discrétisation des équations intégrales de frontière en électromagnétisme dans le domaine fréquentiel*»

**Le 29 avril 2025 à 14h00**

**Amphithéâtre Institut Lasers et Plasmas 2640 Av. du Médoc, 33114 Le Barp**

devant le jury composé de

M. Sébastien PERNET	ONERA	Directeur de thèse
M. Emanuele ARCESE	CEA	Co-directeur de thèse
M. Christophe GEUZAINÉ	Université de Liège	Rapporteur
M. Jérôme DRONIOU	Université de Montpellier	Rapporteur
M. Abderrahmane BENDALI	INSA Toulouse	Examineur
Mme Stéphanie CHAILLAT	CNRS-POems	Examinatrice
M. Xavier CLAEYS	ENSTA	Examineur

**Résumé :** L'analyse des phénomènes de diffraction des ondes électromagnétiques par des objets en trois dimensions nécessite l'utilisation de méthodes numériques, capables d'approcher finement les différentes composantes du champ électromagnétique. Aujourd'hui, avec l'avancée des techniques de compression et de préconditionnement, les solveurs basés sur les équations intégrales de frontière, discrétisées en utilisant la méthode des éléments finis de frontière (BEM), font partis des outils de calcul efficaces et reconnus pour la simulation numérique de ces phénomènes.

Le maintien de compétitivité de ces solveurs est essentiel pour garantir leur capacité à simuler des objets de complexité géométrique, et structurelle croissante. Dans ce contexte, cette thèse vise à améliorer la performance et la flexibilité des approches BEM, face aux maillages irréguliers et non conformes. Pour cela, nous avons proposé une nouvelle approche de discrétisation des équations intégrales de frontière en électromagnétisme, dans le régime harmonique, en s'appuyant sur la méthode des éléments virtuels (VEM). Introduite en 2013, cette méthode numérique innovante généralise la méthode des éléments finis, aux maillages polygonaux et polyédriques, pour la résolution de nombreuses équations aux dérivées partielles. Plus précisément, nous avons étendu le principe de la VEM aux formulations intégrales, modélisant trois scénarios caractéristiques de diffraction par des objets non réguliers : parfaitement conducteurs, revêtus et pénétrables. Une analyse théorique et numérique approfondie a été menée sur la discrétisation par éléments virtuels de l'équation intégrale en champ électrique, démontrant en particulier une convergence du schéma induit équivalente à celle du schéma traditionnel, mais dans le cadre de maillages composés de polygones, comme, par exemple, de triangles avec des nœuds d'ancrage (soit hanging nodes en anglais). Par ailleurs, des stratégies d'implémentation, de la discrétisation basées sur des techniques numériques de calcul des intégrales singulières, ont été proposées afin d'optimiser la complexité des algorithmes et de garantir la précision des résultats. Enfin, nous mettons en avant l'efficacité et l'intérêt pratique de ces nouveaux schémas de discrétisation au travers de benchmarks dédiés au calcul de la surface équivalente radar et à la compatibilité électromagnétique.

**Mots-clés :** Éléments virtuels, Diffraction électromagnétique, Équations intégrales de frontière, Maillages polygonaux, Analyse de convergence

**Summary:** The analysis of electromagnetic wave scattering phenomena, by three-dimensional objects, requires the use of numerical methods capable of accurately approximating the different components of the electromagnetic field. Nowadays, with advances in compression and preconditioning techniques, solvers based on boundary integral equations, discretized using the boundary element method (BEM), are among the most effective and recognized computational tools for the numerical simulation of these phenomena.

Maintaining the competitiveness of such solvers is essential to guarantee their ability to simulate objects of increasing geometrical and structural complexity. In this context, this thesis aims to improve the performance and the flexibility, in handling irregular and nonconforming meshes, of BEM approaches. To this end, we have proposed a new discretization of electromagnetic boundary integral equations in time-harmonic domain based on the virtual element method (VEM). Introduced in 2013, this innovative numerical method generalizes the finite element method to polygonal and polyhedral meshes, for the solution of various partial differential equations. More precisely, we have extended the principle of the VEM to boundary integral formulations, modeling three characteristic configurations which involve nonsmooth scatterers : perfectly electric conducting, coated and penetrable objects. A theoretical and numerical analysis has been carried out on the virtual element based-discretization of the electric field integral equation, demonstrating in particular that the resulting scheme converges in the same way as the traditional scheme, but within the framework of meshes composed of polygons, as for instance, triangles with hanging nodes. Furthermore, implementation strategies on the basis of numerical techniques for the calculation of singular integrals have been proposed to optimize the computational complexity of the algorithms and to guarantee the results accuracy. Finally, we highlight the efficiency and the practical interest of these new discretization schemes through benchmarks of radar cross section calculation and electromagnetic compatibility.

**Keywords:** Virtual Elements, Electromagnetic scattering, Boundary integral equations, Polygonal meshes, Convergence analysis