

---

# Simulation et métamodélisation par apprentissage automatique des chocs non collisionnels dans les cavités diamagnétiques

Clément Mazzocchi<sup>1</sup> and Renaud Ferrand<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>École nationale des ponts et chaussées – Institut Polytechnique de Paris – France

<sup>2</sup>Laboratoire Matière sous Conditions Extrêmes – DAM Île-de-France, Université Paris-Saclay – France

## Résumé

La formation de chocs dans un plasma non-collisionnel magnétisé, phénomène fréquemment rencontré en astrophysique, est largement étudié depuis plus de quarante ans à travers de multiples vecteurs. Souvent associé à la formation de cavités diamagnétiques, résultant de l'expansion d'un plasma perturbé dans un plasma ambiant magnétisé, le phénomène a été étudié expérimentalement *via* des expériences de lâcher de baryum dans l'ionosphère, en 1984 (1) et 1990 (2). Par la suite, l'attention s'est portée vers des expériences de pulvérisation par laser, plus simples à réaliser et offrant un environnement plus contrôlé. Les données furent ensuite confrontées à des codes de calcul toujours plus performants simulant l'expansion de ces cavités afin de mettre en lumière la physique responsable de la formation des chocs magnétiques (3,4). Cependant ces simulations, notamment les modèles PIC ou hybrides, sont bien souvent très coûteuses en ressources et la quantité de configurations physiques qui peut être explorée s'en voit drastiquement réduite.

L'approche présentée ici pour contourner ces limitations met en jeu un nouvel outil développé au CEA, KALYPSSO (5). Il s'agit d'une plateforme de simulation intégrant du raffinement de maillage adaptatif et une compatibilité GPU, doté d'un solveur magnétohydrodynamique qui permet de mener rapidement des simulations d'expansion 3D de cavités d'une grande précision. Ce code a permis de simuler plus de 4000 cavités, couvrant une vaste gamme de paramètres rencontrés dans la littérature, dont nous avons extrait des coupes 2D orthogonales au champ magnétique ambiant. La base de données ainsi formée, adéquatement nettoyée et post-traitée, a été utilisée pour alimenter un modèle d'apprentissage automatique. Celui-ci prend en entrée une sélection de paramètres physiques adimensionnés, le rendant compatible avec une vaste gamme de contextes physiques, et fourni en réponse le profil radial du champ magnétique à un instant donné de la vie de la cavité, moyenné par axisymétrie. Les performances de ce métamodèle se sont révélées très satisfaisantes, et les résultats obtenus sont en bon accord avec des exemples tirés de la littérature, y compris basés sur des modèles hybrides. Cet outil pourra être exploité pour mener des études préparatoires à des simulations de grandes envergure, réaliser efficacement des études statistiques complètes, et représente une base solide pour l'extension de cette étude à des phénomènes plus complexes.

(1) A. Valenzuela et al., Nature 320, 700 (1986)

(2) J. D. Huba et al., J. Geophys. Res. 97, 11–24 (1992)

---

\*Intervenant

- (3) S. E. Clark et al., Phys. Plasmas 20, 082129 (2013)
- (4) D. B. Schaeffer et al., Phys. Plasmas 24, 041405 (2017)
- (5) P. Kestener, DOI:10.13140/RG.2.2.18299.22562 (2025)