

PROPOSITION DE STAGE EN COURS D'ETUDES

Référence : **DPHY-2026-11**
(à rappeler dans toute correspondance)

Lieu : Palaiseau

Département/Dir./Serv. : DPHY

Tél. : 01 80 38 64 29

Responsable(s) du stage: Fabien THOLIN

Email : fabien.tholin@onera.fr

DESCRIPTION DU STAGE

Thématique(s) : Hypersonique/ plasma

Type de stage : ☒ Fin d'études bac+5 ☐ Master 2 ☐ Bac+2 à bac+4 ☐ Autres

Intitulé : Modélisation MHD multiphasique de fils à exploser

Sujet : L'explosion de fils conducteurs de faible diamètre ($\varnothing \simeq 10 - 500 \mu m$) soumis à de forts courants impulsionnels ($I \simeq 10 - 10^4$ kA, $\Delta t \simeq 0.1 - 1 \mu s$) permet de sonder les propriétés de la matière dans des conditions extrêmes de pression (100 GPa) et de température (1 MK). Dans certaines conditions, le plasma métallique ainsi créé est non idéal ($\Gamma > 1$) et peut exhiber des densités proches de celle du solide, mais avec des températures entre 1 et 10 eV, se rapprochant ainsi de l'état WDM (Warm Dense Mater). L'étude des plasmas non idéaux et l'extension des équations d'état de la matière dans ces conditions extrêmes revêt un intérêt fondamental pour l'astrophysique ou la fusion inertielle.

Au delà de cet intérêt fondamental, les fils à exploser sont au cœur de nombreuses applications tels que la fusion nucléaire pulsée (Z-machine), les détonateurs [1], la production de nanomatériaux [2], les sources X [3,4], ou la fragmentation des roches [5]. A l'ONERA, l'unité FPA (Foudre, Plasma et Applications) travaille sur l'impact de la foudre sur les avions. Les avions doivent protéger les matériaux foudroyés avec de fins maillages métalliques appelés LSP (Lightning Protection Systems), pouvant exploser sous l'effet du courant, et ainsi favoriser l'étalement du pied d'arc. Afin d'améliorer la compréhension de ces explosions électriques, un modèle MHD (MagnétoHydroDynamique) multiphasique avec changements de phase est en cours de développement dans l'unité. Les propriétés thermodynamiques et de transport du plasma reposent sur une équation d'état QEOS (Quotidian Equation Of State [6]), capable de décrire la matière dans une très large gamme de conditions, du solide au plasma, ainsi que la zone diphasique liquide-gaz.

Le sujet du stage porte sur l'utilisation de cet outil sur des cas-tests 1D et 2D de fils à exploser. Dans la littérature, la plupart des expériences et des simulations opèrent le plus souvent dans le vide [7]. Le stagiaire devra dans un premier temps reproduire ce type d'explosion. Dans un second temps, l'influence d'un milieu confinant autour du fil comme de l'air ou de l'eau sera abordée. Concernant l'air, une thèse de doctorat se déroulera en parallèle de ce stage concernant l'analyse de résultats en imagerie X issus de campagnes expérimentales menées en 2024 à l'ESRF (European Synchrotron Facility) (cf. Figure 1). Ces travaux permettront de confronter le modèle aux expériences sur l'évolution du courant et des profils de densité pour des fils Al, Ti et W. Concernant l'eau, de nombreuses expériences effectuées dans la littérature permettront d'étudier l'influence d'un fort confinement et de modéliser un plasma en régime non idéal.

Le paramétrage de QEOS pour chaque matériau est réalisé grâce à un code Python. Le stagiaire devra prendre en main cet outil, paramétrer l'équation d'état pour chaque matériau de fil considéré, et analyser les résultats avec un regard critique (cf. Figure 2). Des comparaisons avec des équations d'état tabulées issues de la littérature pourront être conduites. L'influence du matériau du fil, du confinement, du diamètre du fil, de l'onde du courant sont autant de variables qui pourront faire l'objet d'études paramétriques visant à dimensionner de futures campagnes expérimentales à l'ESRF.

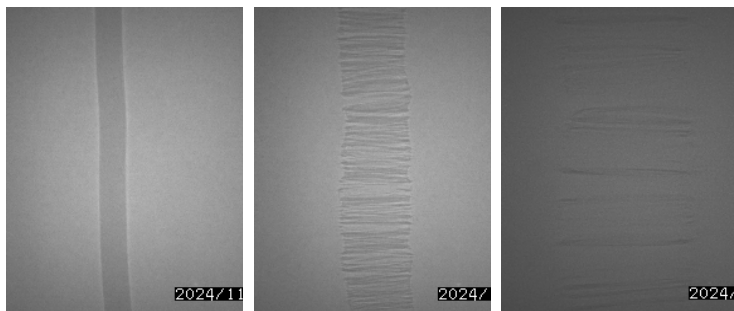
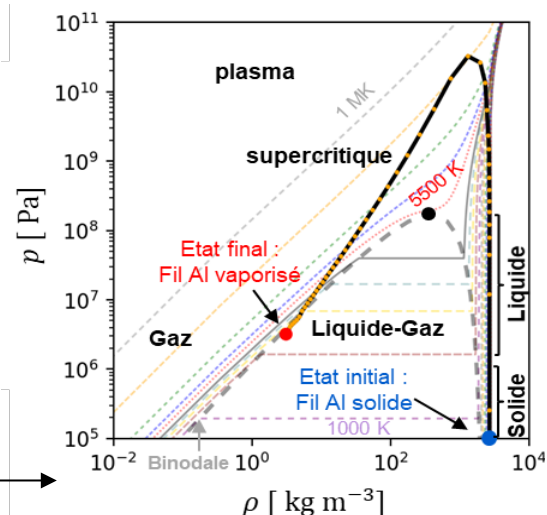


Figure 1: Expériences 2024 ONERA-ESRF (European Synchrotron Facility) : Explosion électrique d'un fil d'aluminium ($\phi=500\ \mu\text{m}$).

Figure 2 : Simulation MHD 1D d'un fil à exploser d'aluminium : Evolution dans le diagramme p vs ρ d'un point au cœur du fil.



- [1] Rae, P. J., and Dickson, P. M., "A Review of the Mechanism by Which Exploding Bridge-Wire Detonators Function," *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 475, No. 2227, 2019, p. 20190120. <https://doi.org/10.1098/rspa.2019.0120>
- [2] Kotov, Y. A., "Electric Explosion of Wires as a Method for Preparation of Nanopowders," *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 5, No. 5, 2003, pp. 539–550. <https://doi.org/10.1023/B:NANO.0000006069.45073.0b>
- [3] Shelkovenko, T. A., Pikuz, S. A., and Hammer, D. A., "A Review of Projection Radiography of Plasma and Biological Objects in X-Pinch Radiation," *Plasma Physics Reports*, Vol. 42, No. 3, 2016, pp. 226–268. <https://doi.org/10.1134/S1063780X16030065>
- [4] Prukner, V., Kolacek, K., Schmidt, J., Frolov, O., and Straus, J., "Ag Wire Explosion in Water - a Potential Source of Coherent Soft X-Ray Radiation," presented at the 2008 IEEE International Power Modulators and High-Voltage Conference, 2008. <https://doi.org/10.1109/IPMC.2008.4743676>
- [5] Peng, J., Zhang, F., Yan, G., Qiu, Z., and Dai, X., "Experimental Study on Rock-like Materials Fragmentation by Electric Explosion Method under High Stress Condition," *Powder Technology*, Vol. 356, 2019, pp. 750–758. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.09.001>
- [6] More, R. M., Warren, K. H., Young, D. A., and Zimmerman, G. B., "A New Quotidian Equation of State (QEOS) for Hot Dense Matter," *Physics of Fluids*, Vol. 31, No. 10, 1988, p. 3059. <https://doi.org/10.1063/1.866963>
- [7] Sarkisov, G. S., Rosenthal, S. E., Cochrane, K. R., Struve, K. W., Deeney, C., and McDaniel, D. H., "Nanosecond Electrical Explosion of Thin Aluminum Wires in a Vacuum: Experimental and Computational Investigations," *Physical Review E*, Vol. 71, No. 4, 2005, p. 046404. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.046404>

Est-il possible d'envisager un travail en binôme ? **Non**

Méthodes à mettre en oeuvre :

- | | |
|---|--|
| ☒ Recherche théorique | ☒ Travail de synthèse |
| ☒ Recherche appliquée | ☒ Travail de documentation |
| ☐ Recherche expérimentale | ☐ Participation à une réalisation |

Possibilité de prolongation en thèse : **OUI**

Durée du stage : Minimum : 4 Maximum : 6

Période souhaitée : 2026

PROFIL DU STAGIAIRE

Connaissances et niveau requis : MHD, physique des plasmas, écoulements compressibles, simulation numérique, changements de phase, électromagnétisme.	Ecoles ou établissements souhaités : Université ou grandes écoles.
--	---