

## INTERACTION D'UN JET DE PLASMA SUPERSONIQUE AVEC UN GAZ

P. NICOLAI, V. TIKHONCHUK, C. STENZ, X. RIBEYRE

CENTRE LASERS INTENSES ET APPLICATIONS (CELIA), UMR 5107 UNIVERSITE DE BORDEAUX 1, CNRS ET CEA - CESTA

**L'**interaction d'un jet de plasma supersonique avec différents gaz à des pressions variées a été étudiée expérimentalement, analysée et interprétée numériquement. En changeant la nature du gaz, nous avons obtenu des évolutions quasi adiabatiques ou, au contraire, fortement dépendantes du refroidissement radiatif. Les structures obtenues sont similaires à celles observées dans certains objets astrophysiques à l'image des chocs courbes se propageant dans les gaz moléculaires, les matériaux sous choc, les discontinuités de contact et les disques de Mach.

Certaines expériences de laboratoire peuvent lever des hypothèses relevant de l'astrophysique. Par exemple, la création, la propagation et l'interaction de jets issus d'étoiles naissantes avec des gaz moléculaires demeurent des sujets de recherches actives, qui peuvent également être abordés au moyen de lasers de puissance [1].

Les plasmas de laboratoire et les objets astrophysiques ont des échelles de temps, d'espace et de densité très différentes. Cependant, certaines grandeurs caractéristiques, comme les vitesses des fluides ou des chocs, certains paramètres adimensionnés comme les taux de refroidissement ou le nombre de *Mach* peuvent être rendus comparables. Dans les expériences laser, des critères de similitude sont utilisés pour extrapoler les résultats obtenus en laboratoire aux conditions d'objets astrophysiques [2].

Dans l'expérience décrite dans cet article, nous utilisons une méthode de formation de jet [3] qui permet d'obtenir des vitesses d'environ 400 km/s à partir d'une énergie laser inférieure à 100 J. Nous avons fait interagir ces jets, longs de plusieurs mm, avec différents gaz placés en face d'eux. En jouant sur la nature du gaz et sa pression, nous avons obtenu des structures dans la zone d'inter-

action couvrant toute une gamme de conditions, de quasi adiabatiques à fortement refroidies par rayonnement. Ces structures ont été analysées et reproduites au moyen d'un code bidimensionnel d'hydrodynamique radiative [4].

### Dispositif expérimental et résultats

L'expérience a eu lieu sur l'installation PALS (*Prague Asterix Laser System*) à Prague (*République Tchèque*). Un faisceau laser, opérant à la longueur d'onde de 438 nm, d'énergie ~ 100 J et de 250 ps en durée (*FWHM*), a été focalisé dans une tache de 300  $\mu\text{m}$  de rayon sur une plaque de cuivre. Une colonne de gaz de 3 mm de diamètre a été placée en face de la plaque. Le dispositif expérimental est présenté sur la **figure 1**. Deux diagnostics principaux ont été utilisés dans les domaines visible (438 nm) et X, pour caractériser les structures de la zone d'interaction. La **figure 2** présente des ombroscopies et des images X (*gamme 100 – 900 eV*) typiques, obtenues avec des gaz d'argon et d'hélium. Nous pouvons clairement identifier différentes structures : la trace du laser dans le gaz (*argon*) par effet d'ionisation, le choc courbe qui se propage dans le gaz non perturbé, le gaz sous choc, le disque de Mach et le jet de cuivre lui-même.

### Analyse des résultats et lien avec des objets astrophysiques

Dans le cas de l'argon, nous observons une bonne correspondance entre les ombroscopies et les images X. En effet, l'argon et le cuivre sont de bons émetteurs X et les structures de densité données par l'image visible réapparaissent dans l'image X. Par contre, dans le cas de l'interaction du jet avec un gaz d'hélium, le choc courbe et le gaz sous choc n'apparaissent pas dans l'image X.

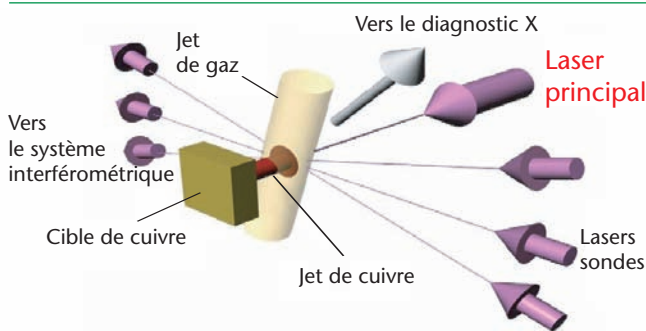


Figure 1

Dispositif expérimental et alignement des diagnostics.

Nous avons comparé l'évolution au cours du temps de la zone d'interaction à des estimations analytiques et aux résultats du code hydroradiatif. Dans le cas de l'hélium, les pertes radiatives sont faibles, le plasma à l'arrière du choc demeure chaud et faiblement comprimé. La zone d'interaction est large (~1 mm) et suit une évolution adiabatique. Au contraire, dans le cas de l'argon, les pertes radiatives induisent une baisse de la température et conduisent à la formation d'une coquille dense et fine. Ce comportement est caractéristique d'une évolution non adiabatique. Par ailleurs, une analyse dimensionnelle montre qu'à partir d'un changement d'échelle, les résultats précédents peuvent être extrapolés aux jets produits par des jeunes étoiles [5]. La vitesse, le nombre de Mach, le rapport de densité jet sur gaz et les processus dissipatifs sont comparables dans les deux systèmes. De plus, si les temps d'évolution hydrodynamiques et les temps de refroidissement semblent incompatibles (de quelques nanosecondes à quelques siècles), leur rapport peut être réglé dans l'expérience, en jouant sur la composition du gaz et sa pression, et devenir identique pour les deux systèmes.

### Conclusion

L'astrophysique de laboratoire ne nécessite pas obligatoirement l'utilisation d'installations laser multi-kilojoules. Au moyen d'un seul faisceau laser de 100 J et d'un jet de gaz, nous avons pu aborder l'étude de l'interaction

de jets provenant d'étoiles naissantes avec des gaz interstellaires. Nous avons pu ainsi confirmer la nature hydrodynamique de ces jets et mis en évidence l'effet du refroidissement radiatif dans la zone d'interaction du jet avec le gaz moléculaire. Dans l'expérience de laboratoire, un simple changement de gaz et de pression a permis de modifier l'adiabaticité du système, et ainsi de couvrir l'ensemble du domaine d'étude. Enfin, tous les résultats expérimentaux ont été reproduits par nos outils de simulation.

### Références

[1] B. A. REMINGTON, R. P. DRAKE, D. D. RYUTOV, "Experimental astrophysics with high power lasers and Z pinches", *Rev. Mod. Phys.* **78** (3), p. 755-807 (2006)  
 [2] D. RYUTOV, R. P. DRAKE, J. KANE, E. LIANG, B. A. REMINGTON, W. M. WOOD-VASEY, "Similarity Criteria for the Laboratory Simulation of Supernova Hydrodynamics", *Astrophys. J.*, **518**, p. 821-832 (1999).  
 [3] P. NICOLAI *et al.*, "Plasma jets produced in a single laser beam interaction with a planar target", *Phys. Plasmas*, **13**, 062701 (2006)  
 [4] P. H. MAIRE *et al.*, "A cell-centered lagrangian scheme for 2-dimensional compressible flow problems", *SIAM, J. Sci. Comput.*, **29**, 1781 (2007)  
 [5] P. NICOLAI *et al.*, "Studies of supersonic, radiative plasma jet interaction with gases", *Phys. Plasmas*, **15**, 082701 (2008)

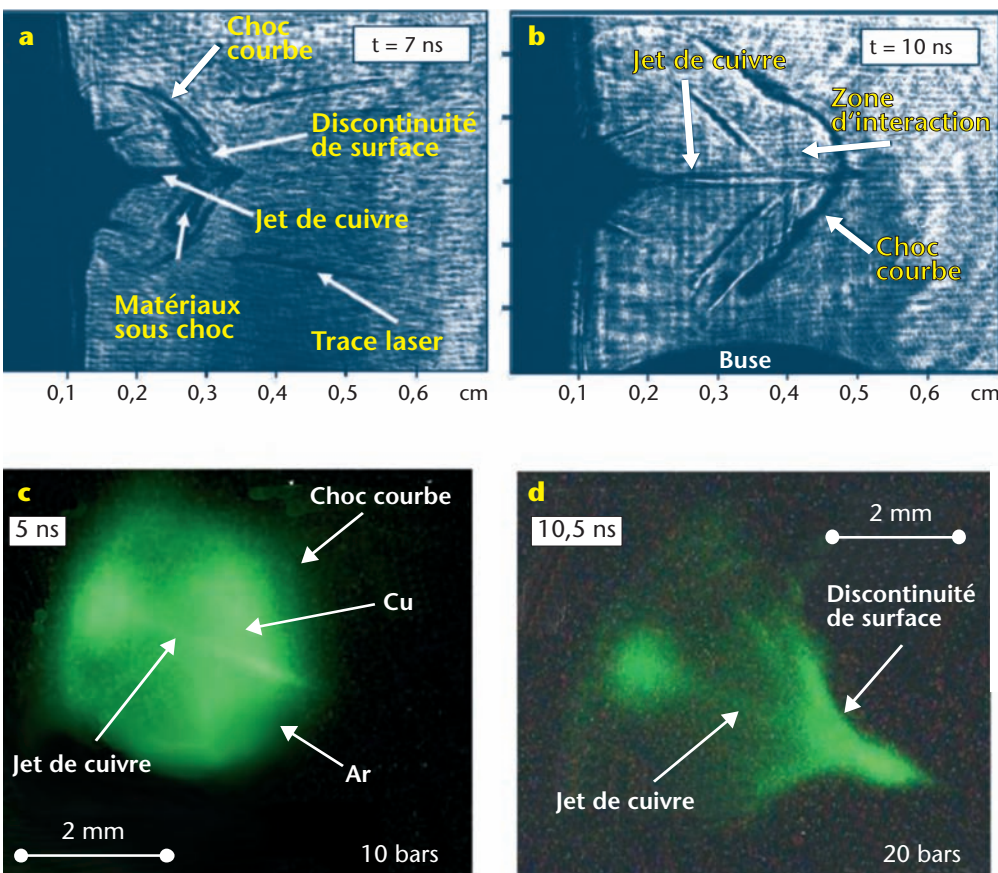


Figure 2  
 Ombroscopies obtenues à différents instants :  
 (a) à 7 ns pour un gaz d'argon à une pression de 10 bars.  
 (b) à 10 ns pour un gaz d'hélium à une pression de 20 bars.  
 Images X obtenues dans les mêmes conditions :  
 (c) pour le gaz d'argon.  
 (d) pour le gaz d'hélium.