

## ASTROPHYSIQUE DE LABORATOIRE : DES LASERS POUR COMPRENDRE L'UNIVERS

S. BOUQUET, E. FALIZE, B. LOUPIAS  
CEA - DAM - ÎLE-DE-FRANCE

L'astrophysique de laboratoire est une nouvelle thématique visant à étudier des phénomènes et objets astrophysiques en laboratoire, à l'aide de lasers de puissance. Le lien entre le plasma laser et celui d'astrophysique est établi par des lois d'échelle, étudiées pour différents régimes d'hydrodynamique radiative. Pour la première fois, la pertinence de ces expériences pour l'astrophysique est démontrée de façon rigoureuse.

L'astrophysique de laboratoire (AL) a pour objectif l'étude de phénomènes et d'objets astrophysiques à partir d'expériences d'interaction laser-matière.

Bien que ces expériences soient nouvelles, la démarche date du début du XIX<sup>e</sup> siècle lorsque le savant français *J. Fourier* étudia le refroidissement du globe terrestre en examinant l'évolution de la température d'une boule chaude de fer, de plusieurs centimètres de rayon [1]. Il venait de créer une maquette ou un "modèle réduit" de la Terre. Cette approche peut être considérée comme les premiers pas de l'AL. Pour faire le lien entre la sphère et la Terre, il faut utiliser des "lois d'échelle".

Deux mille ans avant J.-C. ces lois d'échelle étaient déjà connues. Les Babyloniens avaient noté qu'en prenant des cercles de diamètres  $D$  différents, le quotient  $p/D$  ( $p$  est le périmètre) valait toujours  $\pi$ . Cette propriété montre que les cercles obéissent à une loi d'échelle "géométrique".

Dans le cadre de l'AL, en plus de l'extension spatiale, notée  $x$ , les lois d'échelle agissent aussi sur le temps  $t$ , la vitesse  $v$  et sur toutes les grandeurs physiques (*densité  $\rho$ , pression  $P$ ...*) relatives au phénomène ou à l'objet étudié. L'AL a débuté aux Etats-Unis vers 1990 pour aboutir en 1999 à la première réalisation française [2]. Elle bénéficie de l'état de l'art le plus avancé à propos des lasers et diagnostics, des codes numériques, et des méthodes analytiques, comme la théorie des groupes. Celle-ci mène à une justification rigoureuse des lois d'échelle à partir des modèles mathématiques décrivant les phénomènes astrophysiques. Elle montre comment un plasma laser de quelques mm<sup>3</sup> et d'une durée de quelques ns est représentatif de l'astrophysique où interviennent des échelles d'espace et de temps très différentes (par exemple, le rayon du Soleil vaut 700 000 km et il vivra pendant 10 milliards d'années. Mille ans après l'explosion, un reste de supernova

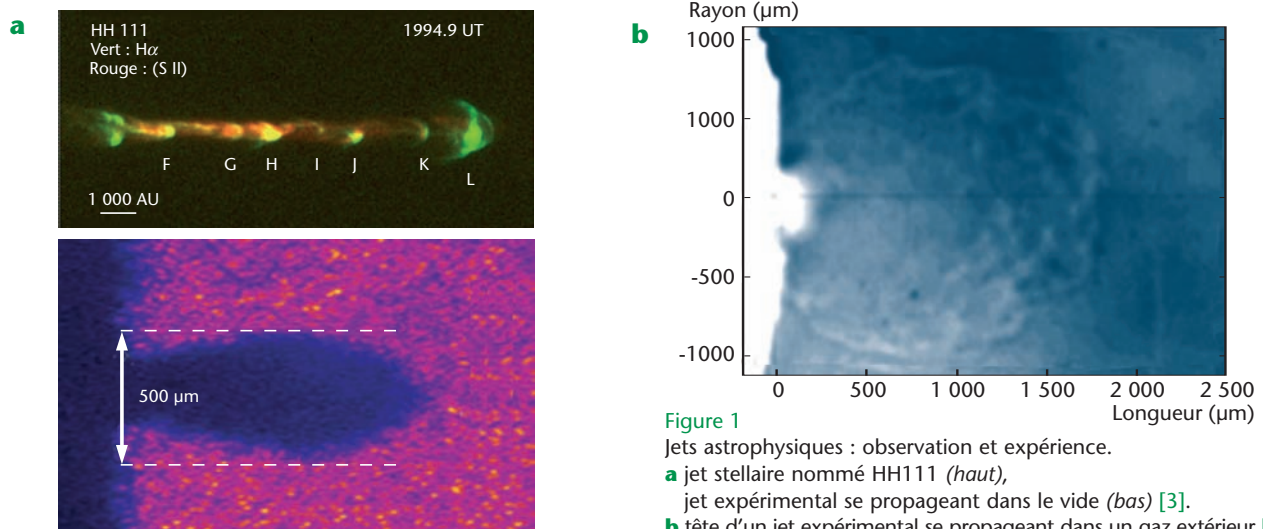


Figure 1  
Jets astrophysiques : observation et expérience.  
**a** jet stellaire nommé HH111 (*haut*),  
jet expérimental se propageant dans le vide (*bas*) [3].  
**b** tête d'un jet expérimental se propageant dans un gaz extérieur [4].

a un rayon d'environ  $3.10^{16}$  m, soit un parsec...). Considérons le cas des jets d'étoiles jeunes. Sur la figure 1, l'un d'entre eux (HH 111) est comparé à des jets expérimentaux de plasma obtenus auprès du laser LULI 2000 avec une impulsion de 1 ns et une énergie sur cible de 600 J. Bien que les rapports d'aspect ne soient pas identiques, les tendances sont bonnes et l'accord avec la théorie est correct. La figure 1b montre une radiographie protonique de l'interaction de la tête d'un jet avec un milieu ambiant. L'effet est net car nous voyons un choc d'étrave et des "bosses" dues sans doute à l'instabilité de Rayleigh-Taylor. Des dépouillements plus fins seront nécessaires pour vérifier ces hypothèses et mieux comprendre la formation et la propagation des jets astrophysiques.

Bien que les équations (conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie) modélisant les jets ne soient pas intégrables analytiquement, nous pouvons déduire des relations caractérisant leurs solutions, l'existence de résultats expérimentaux "homothétiques" à ce que nous voyons dans le ciel. Ces relations prouvent qu'en un point  $x$ , à l'instant  $t$ , la vitesse  $v(x,t)$  vérifie que la quantité  $I_1 = v(x,t).t/x$  est un invariant du système considéré. C'est aussi vrai pour  $I_2 = (p(x,t).t)/(x.\rho(x,t).v(x,t))$ . D'autres invariants existent et on déduit que deux nombres sans dimension  $A \equiv \rho_{astro}/\rho_{lab}$  et  $B \equiv P_{astro}/P_{lab}$  sont libres (les quantités indicées "astro" et "lab" sont les grandeurs typiques du jet astrophysique et de laboratoire, respectivement) [5]. De plus, la structure des équations indique que les autres rapports satisfont  $x_{astro}/x_{lab} \equiv B/A^2$ ,  $t_{astro}/t_{lab} \equiv (B/A^3)^{1/2}$ ,  $v_{astro}/v_{lab} \equiv (B/A)^{1/2}$  et  $T_{astro}/T_{lab} \equiv B/A$  ( $T$  est la température). Les valeurs de  $A$  et  $B$  sont déterminées à partir de données expérimentales et astrophysiques. En effet, nous savons que la longueur typique des jets expérimentaux est  $x_{lab} \approx 1$  mm et celle des jets d'étoiles

vaut  $x_{astro} \approx 0,1$  parsec. L'observation indique aussi que les jets se propagent à  $v_{astro} \approx 100$  km/s. Nous avons alors  $t_{astro} \approx 1\ 000$  ans. Comme avec les sources laser utilisées, nous avons  $t_{lab} \approx 10$  ns, nous trouvons  $A \approx 3B \approx 2.10^{-19}$  en utilisant les lois analytiques précédentes.

Grâce à ces valeurs, on peut déduire  $\rho_{lab}$  à partir de la densité observée dans les jets astronomiques. Ces observations donnent  $\rho_{astro} \approx 2.10^{-22}$  g/cm<sup>3</sup> et on trouve  $\rho_{lab} \approx 1$  mg/cm<sup>3</sup>. Ce résultat est en accord avec la valeur expérimentale obtenue à partir de cônes remplis de mousse de CH, de densité initiale égale à 50 ou 100 mg/cm<sup>3</sup> [3], voir figure 2).

Pour conclure, une expérience de laboratoire est représentative d'un phénomène astrophysique si de fortes contraintes (lois d'échelle) sont vérifiées. Nous les avons étudiées et, à notre connaissance, c'est la première fois que la pertinence de l'AL pour l'astrophysique est démontrée aussi rigoureusement [5].

### Références

[1] J. FOURIER, "Théorie Analytique de la Chaleur", 1822, réédition J. Gabay (2001).  
 [2] E. BERTHIER, S. BOUQUET, J.-P. CHIEZE, R. TEYSSIER, "L'Astrophysique en Laboratoire : utilisation des lasers de forte Energie", *Clefs CEA*, **41**, p. 37-38 (1999).  
 [3] B. LOUPIAS et al., "Supersonic-Jet Experiments Using a High-Energy Laser", *Phys. Rev. Lett.*, **99** (26), 265001-1-4 (2007).  
 [4] C. D. GREGORY et al., "Astrophysical Jets Experiments", *Plasma Phys. Control. Fusion*, **50**, p. 124039-1-7 (2008).  
 [5] E. FALIZE, S. BOUQUET, C. MICHAUT, "Radiation Hydrodynamics Scaling Laws in High Energy Density Physics and Laboratory Astrophysics", *J. Phys. Conf. Ser.*, **112**, p. 042016-1-4 (2008).

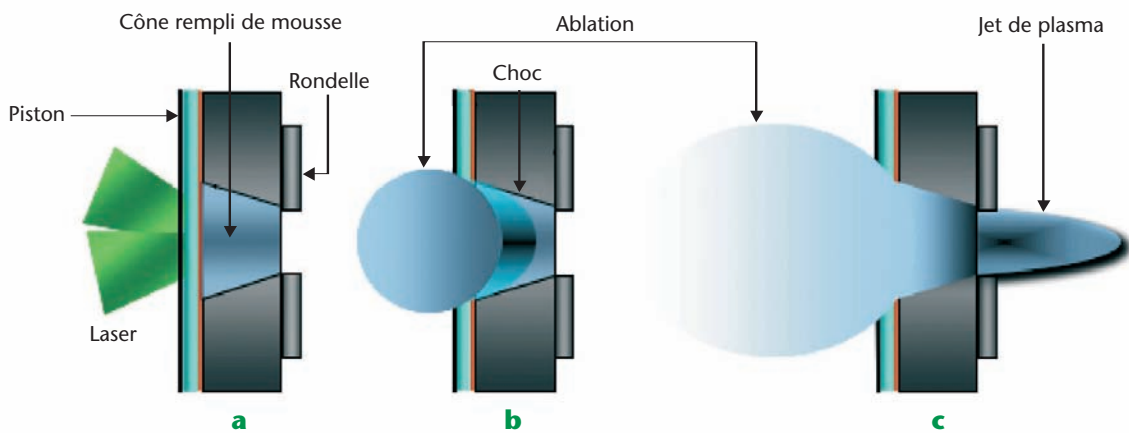


Figure 2  
 Jet de laboratoire [3].  
**a** interaction des faisceaux laser avec le piston.  
**b** ablation du piston et propagation d'un choc dans la mousse.  
**c** éjection d'un jet de plasma en face arrière après débouché de choc.