

Mise en évidence d'instabilités de Kelvin-Helmholtz dans les cavités d'ignition laser

■ M. VANDENBOOMGAERDE - M. BONNEFILLE - A. GRISOLLET - P. GAUTHIER / CEA – DAM Île-de-France

Les expériences américaines de fusion par confinement inertiel font systématiquement apparaître un déficit de vitesse d'implosion de la capsule par rapport aux simulations numériques. Une des raisons de ce déficit est le rendement insuffisant de la cavité de conversion chargée de transformer l'énergie laser en rayonnement X. Cet article expose en détail la dynamique de la paroi de la cavité. Les simulations réalisées montrent le caractère instable de l'interface entre la paroi de la cavité et le gaz qui remplit cette dernière. Ces instabilités de Kelvin-Helmholtz [1] pourraient contribuer à la dégradation du rendement de conversion X.

La fusion par confinement inertiel (FCI) en attaque indirecte est conditionnée par le chauffage laser de l'intérieur d'une cavité en or. L'énergie laser absorbée par les parois est convertie en rayonnement X. Ce rayonnement inonde la cavité et vaporise la surface d'une petite capsule placée au centre de la cavité. Ce microballon est constitué d'une coquille de plastique qui retient un mélange de deutérium (D) et de tritium (T). Par réaction à l'ablation de sa surface, la coquille en plastique implose, comprimant ainsi le DT fusible. Si le rayonnement X de la cavité est suffisant, la compression résultante doit permettre aux réactions de fusion de s'enclencher au centre du microballon ; l'ignition est ainsi atteinte.

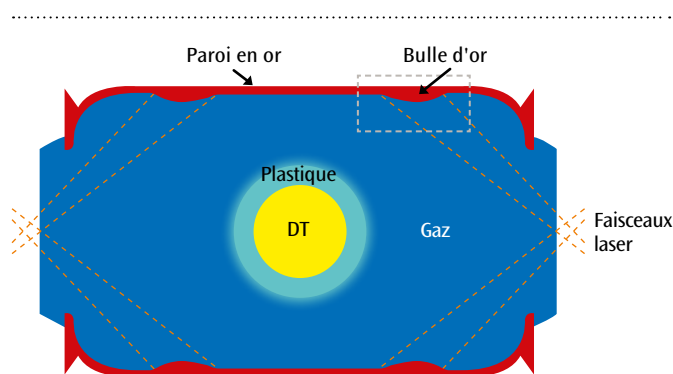


Figure 1. Schéma de principe d'une cavité d'ignition. Le combustible, mélange de deutérium et de tritium, est encapsulé dans une coquille de plastique. La surface de cette dernière est ablatée par le rayonnement X issu de la conversion de l'énergie laser absorbée par les parois d'or de la cavité. À l'endroit des impacts laser, une bulle de plasma d'or se crée. La longueur de la cavité est de l'ordre de 9 mm pour un diamètre de l'ordre de 6 mm. Le rayon extérieur de la coquille est de l'ordre de 1 mm.

Un effet collatéral de l'absorption du laser par les parois en or est la génération, à l'endroit de l'impact laser, d'une bulle de plasma d'or (**figure 1**). Afin de limiter la détente de cette bulle, la cavité est généralement remplie d'un gaz. Ce dernier freine le plasma en expansion et empêche sa concentration sur l'axe de la cavité.

Un résultat récurrent des études d'ignition par laser menées aux États-Unis est que les simulations numériques prévoient des rendements bien supérieurs à ce qui est observé dans les expériences. Pour rapprocher les résultats numériques des observations, il est désormais coutumier de réduire artificiellement la puissance laser dans les calculs sans qu'une justification théorique étayée de cet abattement puisse pour autant être proposée. Cette diminution est de l'ordre de 15 à 20 % pour des tirs laser américains standards. Les mécanismes qui sont envisagés pour expliquer le faible rendement des campagnes d'ignition sont la rétrodiffusion de l'énergie laser, l'apparition d'électrons chauds ou de la turbulence au sein de la cavité.

Cette étude du CEA – DAM s'intègre au sein d'un effort global de la communauté scientifique pour essayer de comprendre la physique manquante ou mal décrite dans les codes de simulation.

Dans l'expérience américaine, l'énergie laser investie dans la cavité est de 957 kJ. La température radiative de la paroi d'or mesurée dans l'expérience par les trous d'entrée du laser est de 270 eV. Les simulations du CEA – DAM donnent une température de 278 eV. Pour réduire cet écart, des simulations avec des maillages beaucoup plus fins, passant de mailles d'une taille de

66 μm à des mailles de 11 μm , ont été réalisées. De plus, un nouveau schéma de remaillage automatique adapté aux détentes de paroi a été utilisé. Ce dernier a la particularité de décrire de façon très précise l'interface entre l'or et le gaz. Si elle n'a pas eu l'effet espéré sur la conversion X de la cavité, cette description plus précise de l'hydrodynamique de la cavité fait émerger des instabilités qui étaient auparavant étouffées par la diffusion numérique. La **figure 2** présente l'interface or/gaz obtenue via ces nouvelles simulations à $t=6$ ns et $t=12$ ns. La durée totale de l'impulsion laser est de l'ordre de 20 ns.

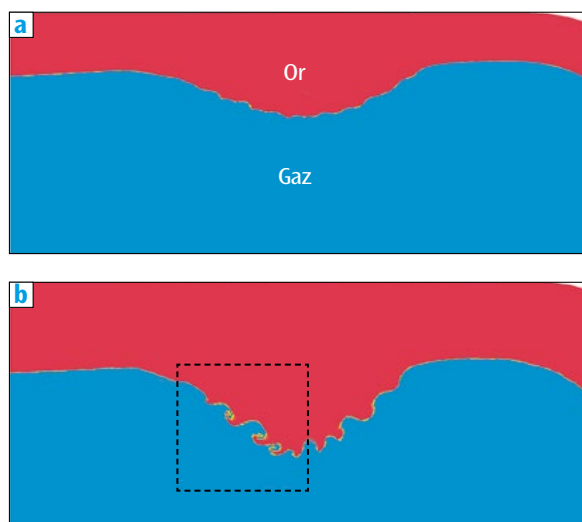


Figure 2. Zoom (rectangle en pointillé de la **figure 1**) sur la bulle d'or générée par l'impact des cônes laser situés au plus près des trous d'entrée laser de la cavité, à $t=6$ ns (**a**) et $t=12$ ns (**b**). Dès $t=6$ ns, des ondulations apparaissent à l'interface or/gaz. Il s'agit ici de l'instabilité de Kelvin-Helmholtz. Celle-ci continue de se développer jusqu'à former des enroulements conduisant éventuellement à de la turbulence.

Comme le montre la **figure 3** qui détaille les structures de l'interface à 12 ns, des enroulements caractéristiques de l'instabilité de Kelvin-Helmholtz sont observés. La longueur d'onde typique de ces enroulements est de l'ordre de 170 μm . Sous l'effet combiné de l'expansion de la bulle et de sa rencontre avec le gaz, un écoulement en cisaillement apparaît à l'interface or/gaz : le gaz est expulsé sur les côtés de la bulle alors que le plasma d'or se dirige vers le sommet de la bulle. Par la suite, la bulle est freinée par le gaz et les instabilités d'interface sont de plus soumises à l'instabilité de Rayleigh-Taylor [2]; cette dernière apparaît lorsqu'un matériau léger (ici le gaz) freine un matériau lourd (ici le plasma d'or).

L'instabilité de Kelvin-Helmholtz peut produire des structures turbulentes au niveau des enroulements. Un moyen classique d'estimer

la potentialité d'apparition de la turbulence au sein d'un écoulement est de calculer le nombre de Reynolds de cet écoulement. Si ce dernier est élevé (typiquement supérieur à 10^5 - 10^6), l'écoulement a toutes les chances d'être turbulent. Une estimation issue des simulations donne une valeur du nombre de Reynolds de 5×10^6 au sein des enroulements de Kelvin-Helmholtz.

Ainsi, pour la première fois, de nouvelles simulations numériques, faisant intervenir une discrétisation très fine de la géométrie et une méthode de remaillage originale, ont permis de mettre en évidence le caractère instable de l'hydrodynamique de la paroi d'or dans des cavités d'ignition à gaz [3]. La zone turbulente potentiellement créée par de telles instabilités pourrait expliquer une partie de la dégradation de la conversion X de la paroi de la cavité en modifiant absorption laser et conduction électronique. Les études actuelles se portent donc vers la stabilisation de cette interface or/gaz dans les cavités de FCI.

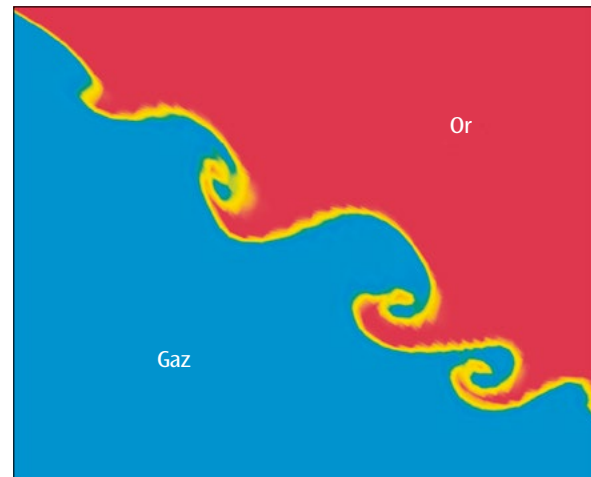


Figure 3. Zoom (rectangle en pointillé de la **figure 2**) sur les enroulements de l'instabilité de Kelvin-Helmholtz à l'interface or/gaz. La longueur d'onde de ces enroulements est de l'ordre de 170 μm .

Références

- [1] L. KELVIN, *Hydrodynamics and general dynamics*, Cambridge University Press, England (1910).
- [2] G. TAYLOR, "The Instability of Liquid Surfaces when Accelerated in a Direction Perpendicular to their Planes", *Proc. R. Soc. London A*, **201**, p. 192-196 (1950).
- [3] M. VANDENBOOMGAERDE, M. BONNEFILLE, P. GAUTHIER, "The Kelvin-Helmholtz instability in National Ignition Facility hohlraums as a source of gold-gas mixing", *Phys. Plasmas*, **23**, 052704 (2016).