

A. Casner, C. Mailliet, E. Le Bel, V. T. Tikhonchuk

Centre lasers intenses et applications (CELIA), UMR 5107 CNRS – CEA – Université de Bordeaux, Talence

S. F. Khan, D. A. Martinez, N. Izumi, D. Kalantar, P. Di Nicola,
J. M. Di Nicola, B. A. Remington, L. P. Masse, V. A. Smalyuk
Lawrence Livermore National Laboratory, États-Unis

I. Igumenshchev
Laboratory for Laser Energetics,
Rochester, États-Unis

QUALIFICATION D'UNE PLATEFORME EXPÉRIMENTALE D'HYDRODYNAMIQUE PLANE SUR LE NATIONAL IGNITION FACILITY

L'avènement des lasers de puissance de classe mégajoule, comme le Laser Mégajoule (LMJ) en France ou le National Ignition Facility (NIF) aux États-Unis, permet pour la première fois de créer en laboratoire des écoulements de plasmas denses et turbulents. En effet, ces installations autorisent des durées et des distances d'accélération d'échantillon beaucoup plus importantes qu'auparavant, favorables à l'apparition de régimes turbulents intéressants pour l'astrophysique de laboratoire. Cet article présente le principe et les premiers résultats d'une nouvelle plateforme en attaque dite directe sur le NIF, dédiée à des expériences d'hydrodynamique aux temps longs.

Dans le cadre des appels à propositions académiques « Discovery Science » sur le NIF, un programme de recherche portant sur le stade fortement non linéaire de l'instabilité de Rayleigh-Taylor au front d'ablation se poursuit depuis 2012 [1,2]. L'instabilité de Rayleigh-Taylor est une instabilité qui se développe à l'interface entre deux fluides, quand un fluide lourd est accéléré par un fluide léger. Dans le cadre de la fusion par confinement inertiel (FCI), l'instabilité de Rayleigh-Taylor au front d'ablation est un des facteurs limitant les performances des implosions de cibles cryogéniques. Au-delà de la FCI, on s'intéresse aussi au problème fondamental de la turbulence. En effet, le surcroît d'énergie et les durées d'impulsion laser plus longues offertes par les lasers mégajoule permettent de recréer, en laboratoire, des expériences de turbulence qui étaient jusqu'à maintenant réalisées uniquement avec des fluides classiques et non des plasmas [3].

Alors que les expériences précédentes avaient permis de mettre en évidence un régime de compétition – mélange de bulles bidimensionnelles (2D) pour l'instabilité de Rayleigh-Taylor au front d'ablation en attaque indirecte [4,5] –, on s'intéresse ici au cas de l'attaque directe. La première étape de ce travail consiste à qualifier une nouvelle plateforme et à en simuler les principales observables expérimentales.

GÉOMÉTRIE EXPÉRIMENTALE

Le schéma de l'expérience est représenté sur la figure 1. Entre 14 et 24 quadruplets (300 à 450 kJ d'énergie laser) de l'hémisphère Sud du NIF sont directement incidents sur l'échantillon accéléré (d'où la notion d'attaque directe). L'irradiation a été optimisée pour créer une irradiation uniforme sur une zone centrale de 2 mm de diamètre, avec une intensité laser maximum de $2 \times 10^{14} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. L'impulsion laser totale dure 20 ou 30 ns, en concaténant

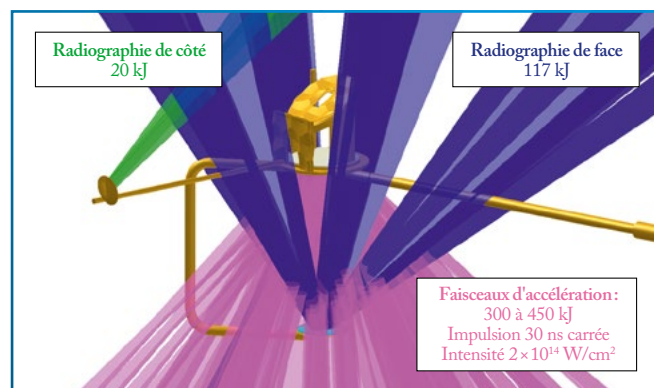


Figure 1

➔ Schéma d'irradiation de la plateforme NIF dévolue aux études d'hydrodynamique en attaque directe. Les faisceaux utilisés pour accélérer l'échantillon sont en rose, ceux pour irradier les sources de radiographie en bleu (radiographie de face) et vert (radiographie de profil).

dans le temps deux ou trois groupes de quadruplets partageant chacun une impulsion de 10 ns. Les mesures reposent sur des radiographies X, de face et de côté, résolues en temps. Le rayonnement de la source de radiographie de côté, en vanadium ou en zinc, est induit par le dépôt de l'énergie laser (20 kJ) d'un quadruplet. Le rayonnement de la source de radiographie de face en argent est engendré par 7 quadruplets, il est dirigé vers l'imageur X à images intégrales inséré dans le pôle Nord de la chambre.

La première étape de la campagne a consisté à s'assurer de la planéité du choc créé sur une expérience spécifique avec un échantillon épais de plastique (2 mm) pour visualiser la propagation du choc et du front d'ablation. La radiographie de côté correspondante enregistrée à $t=28$ ns est donnée sur la **figure 2a**. On constate que le front de choc et le front d'ablation sont remarquablement plans : la courbure n'excède pas 150 μm sur une zone centrale de 2 mm. Ces résultats sont bien reproduits par les simulations d'hydrodynamique radiative réalisées avec le code CHIC développé au CELIA **6**, tant pour la courbure que pour la position absolue des fronts de choc et d'ablation (**figure 2b**).

ÉVOLUTION D'UNE PERTURBATION BIDIMENSIONNELLE MONOMODE

La seconde étape de la campagne a consisté à calibrer le code d'hydrodynamique radiative CHIC utilisé au CELIA pour modéliser la croissance de perturbations initiales 2D préimposées (longueur d'onde $\lambda = 150 \mu\text{m}$, amplitude crête à crête $2a_0 = 1 \mu\text{m}$) sur une plaque mince de plastique (300 μm d'épaisseur) accélérée pendant 20 ns. La radiographie de face (**figure 3a**) montre les alternances, à la longueur d'onde attendue, de

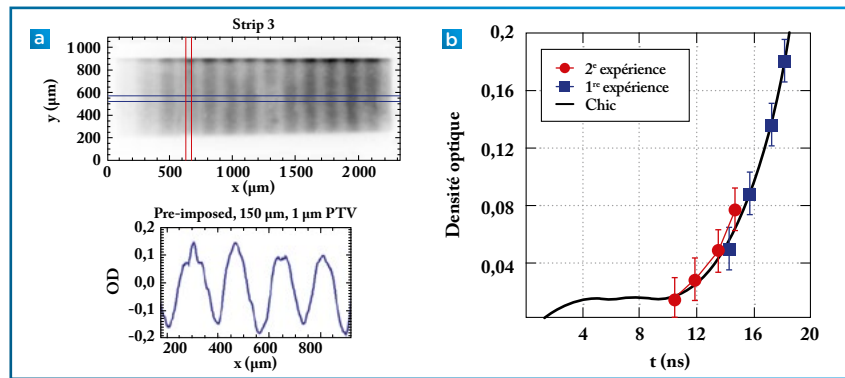


Figure 3

➔ (a) Radiographie de face enregistrée à $t=17,36$ ns correspondant à la croissance de modulations préimposées ($\lambda = 150 \mu\text{m}$, $2a_0 = 1 \mu\text{m}$). Une coupe horizontale (courbe bleue) illustre les modulations mesurées en densité optique après renormalisation par le profil de la source de radiographie. (b) Évolution des modulations en densité optique pour les deux expériences réalisées : les points expérimentaux et les calculs intégrés CHIC (en trait plein) sont en très bon accord.

zones plus ou moins absorbantes aux rayons X. On en extrait une amplitude de modulation en densité optique (**figure 3b**) qui peut ensuite être comparée aux simulations : l'évolution temporelle de l'amplitude des perturbations de l'instabilité de Rayleigh-Taylor au front d'ablation est en parfait accord avec les simulations CHIC et les interprétations réalisées post-campagne. De telles simulations sur des temps physiques de plus de 20 ns n'avaient encore jamais été réalisées, car elles nécessitent un grand nombre de mailles (du fait de la taille de l'échantillon), de nombreux tests préliminaires de maillage et un temps de calcul de près de trois semaines.

PERSPECTIVES : ÉVOLUTION D'UNE PERTURBATION TRIDIMENSIONNELLE MULTIMODE

Ces résultats **6** ont permis en premier lieu de valider une nouvelle plateforme académique sur le NIF, intéressante pour des expériences d'astrophysique de laboratoire ou d'équations d'état nécessitant une large zone d'irradiation

uniforme. En ce qui concerne l'instabilité de Rayleigh-Taylor ablative, la maîtrise de cette nouvelle plateforme a permis d'étudier la croissance de défauts 3D multimode. Ces données permettront d'affiner les théories et simulations du stade fortement non linéaire de l'instabilité de Rayleigh-Taylor ablative, facteur limitant les performances d'implosions de cibles cryogéniques, en attaque directe ou indirecte.

RÉFÉRENCES

- 1 A. CASNER *et al.*, "Designs for highly nonlinear ablative Rayleigh-Taylor experiments on the National Ignition Facility", *Phys. Plasmas*, **19**, 082708 (2012).
- 2 A. CASNER *et al.*, "Expériences d'instabilité Rayleigh-Taylor ablative en régime fortement non linéaire sur le National Ignition Facility", *Revue chocs avancées* 2012, p. 6-7 (2013).
- 3 F. DOSS *et al.*, "The Shock/Shear platform for planar radiation-hydrodynamics experiments on the National Ignition Facility", *Phys. Plasmas*, **22**, 056303 (2015).
- 4 A. CASNER *et al.*, "Probing the deep nonlinear stage of the ablative Rayleigh-Taylor instability in indirect drive experiments on the National Ignition Facility", *Phys. Plasmas*, **22**, 056302 (2012).
- 5 D. A. MARTINEZ *et al.*, "Evidence for a Bubble-Competition Regime in Indirectly-Driven Ablative Rayleigh-Taylor Instability Experiments on the NIF", *Phys. Rev. Lett.*, **114**, 215004 (2015).
- 6 A. CASNER *et al.*, "Long-duration planar direct-drive hydrodynamics experiments on the NIF", *Plasma Phys. Control. Fusion*, **60**, 014012 (2018).

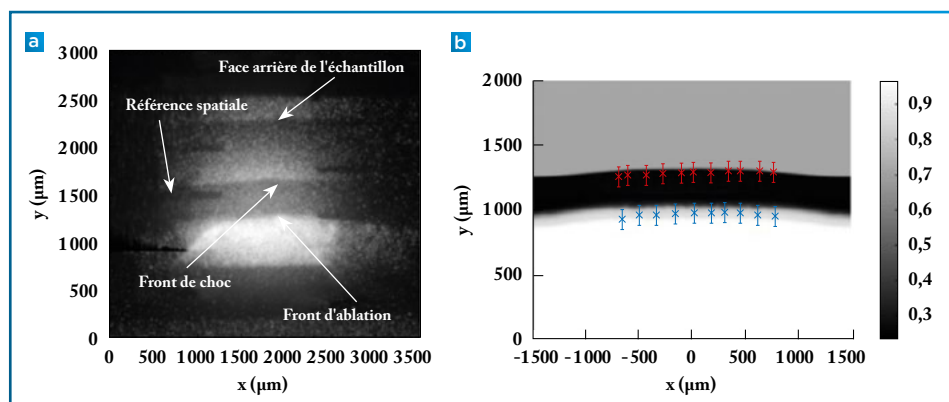


Figure 2

➔ (a) Radiographie X, résolution en temps, enregistrée à $t=28$ ns après le début de l'irradiation laser, réalisée pour vérifier la planéité des fronts de choc et d'ablation. (b) Radiographie synthétique issue d'un calcul à l'aide du code CHIC **6** ; les positions mesurées du front d'ablation et du front de choc sont respectivement indiquées par les croix bleues et rouges.