

Hydrodynamic simulations in the context of laser particle acceleration

GDR SCIPAC | 16/10/2024

Pascal LOISEAU

¹ CEA/DAM/DIF, F-91297, Arpajon, France

² Université Paris-Saclay, CEA, LMCE, 91680 Bruyères-le-Châtel, France

pascal.loiseau@cea.fr

Un peu de contexte



De quelles simulations hydrodynamiques parle-t-on ?

- Codes développés dans un contexte de FCI (lasers ns, kJ)
- Simulation hydrodynamiques pour les plasmas chauds ($> 1\text{eV}$)
- Monofluide (multi-matériaux) neutre
- Couplé à la propagation d'un faisceau laser (tracé de rayon)
- L'interaction laser-plasma est limitée à une absorption (mais possibilité d'enrichissement)
- Modèles d'ionisation
- Ne sont pas adaptés aux lasers UHI utilisés pour l'accélération de particules, mais...

Système d'équations typique (code HERA à 2 températures)



$$\partial_t \rho + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0, \quad (1)$$

$$\partial_t (\rho \vec{u}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) + \vec{\nabla} P = \vec{F}_{\text{pond}} + \vec{D}_{\text{iaw}}^\perp, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \partial_t (\rho \epsilon) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \epsilon \vec{u}) + \vec{\nabla} P \vec{u} &= \vec{u} \cdot (\vec{F}_{\text{pond}} + \vec{D}_{\text{iaw}}^\perp) + P_{\text{abs}} \\ &\quad - \vec{\nabla} \cdot (\vec{Q}_e + \vec{Q}_i) + W_{ei} + W_{ie}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\partial_t (\rho \epsilon_e) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \epsilon_e \vec{u}) + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} P_e = P_{\text{abs}} - \vec{\nabla} \cdot \vec{Q}_e + W_{ei}, \quad (4)$$

Avec ρ la masse volumique, $\rho \vec{u}$ l'impulsion, $\rho \epsilon$ l'énergie totale et $\rho \epsilon_e$ l'énergie électronique.

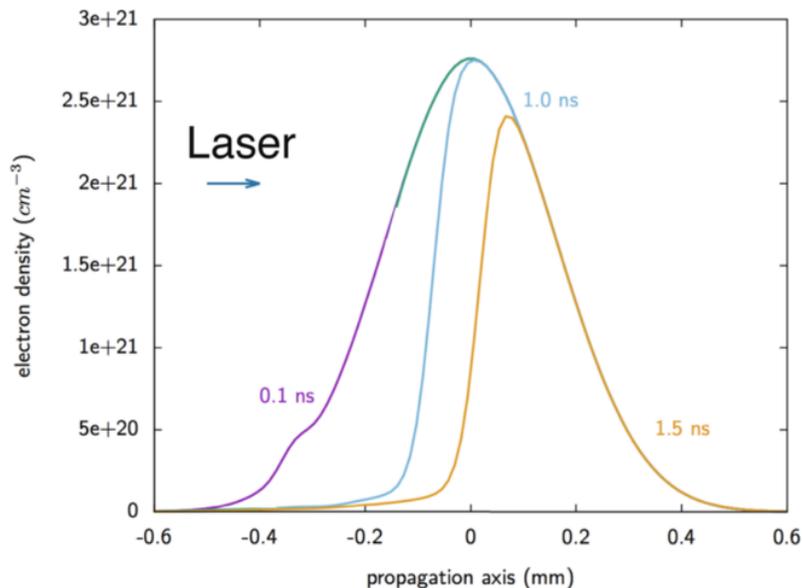
Les termes sources sont : l'absorption laser P_{abs} , les échanges d'énergie électrons-ion W_{ei} et ions-électrons W_{ie} , la diffusion de la chaleur $\vec{\nabla} \cdot (-\kappa \vec{\nabla} T_{e,i}) = \vec{\nabla} \cdot \vec{Q}_{e,i}$ dans la limite dite locale avec limiteur de flux, la force pondéromotrice \vec{F}_{pond} et son travail $\vec{u} \cdot \vec{F}_{\text{pond}}$

$\vec{D}_{\text{iaw}}^\perp$ est un terme phénoménologique d'amortissement

Les simulations hydrodynamiques permettent d'estimer les paramètres plasma de la cible laser UHI

- On cherche à caractériser le plasma avant l'arrivée d'un faisceau UHI ($I \gg 10^{16} \text{ W/cm}^2$, $\tau < 10^{-12} \text{ s}$) sur la cible
 - ▶ accélération d'ions à partir de jets de gaz denses (sur-critiques)
 - ▶ impact d'un ASE (dégradation/raidissement) ou d'un faisceau co-propagatif (raidissement)
 - ▶ impact d'un façonnage
 - ▶ $I \lesssim 10^{16} \text{ W/cm}^2$, $\tau \sim 10^{-9} \text{ s}$
 - ▶ conditions initiales pour une simulation cinétique (n_e, T_e, T_i, Z, v)
- Utilisation du code Troll du CEA
 - ▶ 2D / 3D
 - ▶ initialisation du jet de gaz avec un profil donné
 - ▶ évolution hydrodynamique 3T d'un fluide moyen
 - ▶ laser décrit par un module de tracé de rayon (puissance, réfraction et absorption)
 - ▶ conduction thermique électronique du plasma (local ou *non local*)
- Limitations
 - ▶ transport électronique potentiellement mal traité
 - ▶ prise en compte d'un champ magnétique externe ou auto-généré (en développement au CEA)
 - ▶ pas d'effet pondéromoteur
 - ▶ pas de diffraction

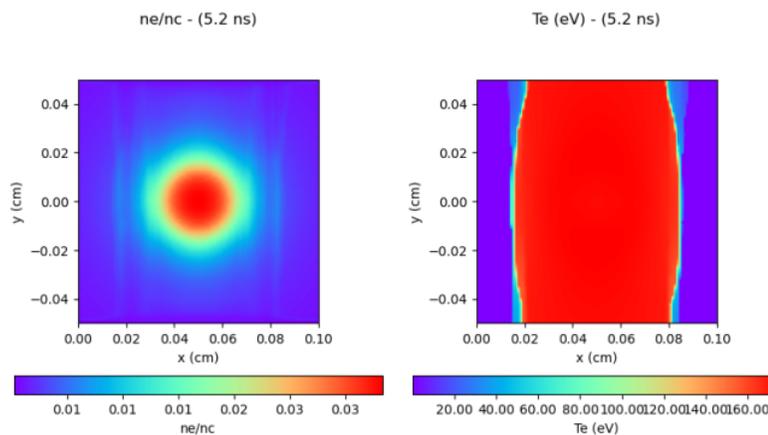
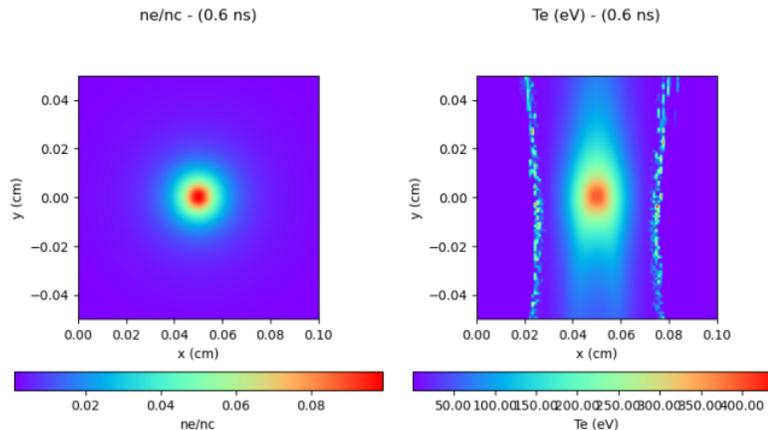
Faisceaux co-propagatifs dans un jet sur-critique



- Raidissement du profil par ASE [Chen *et al.*, Scientific Reports (2017)] → subit
- Création d'un canal (expansion latérale)
- Dépend de l'intensité, de l'énergie laser, du temps d'interaction, etc. → choisi

Faisceaux co-propagatifs sur GSI - 13 μm FWHM / 0.5 ps / 2 J H2 10% $n_c(\omega)$

18 ps
(P max)

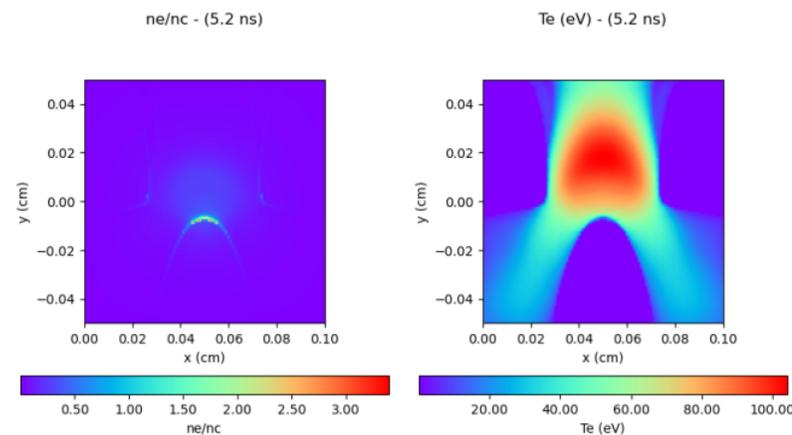
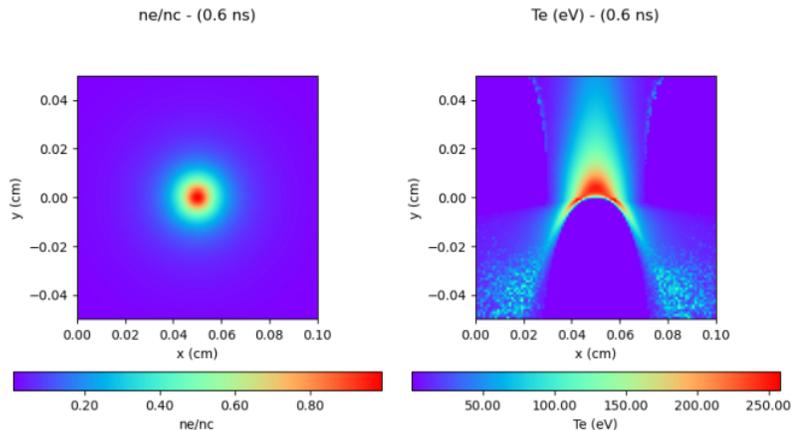


460 ps

Faisceaux co-propagatifs sur GSI - 13 μm FWHM / 0.5 ps / 100 mJ

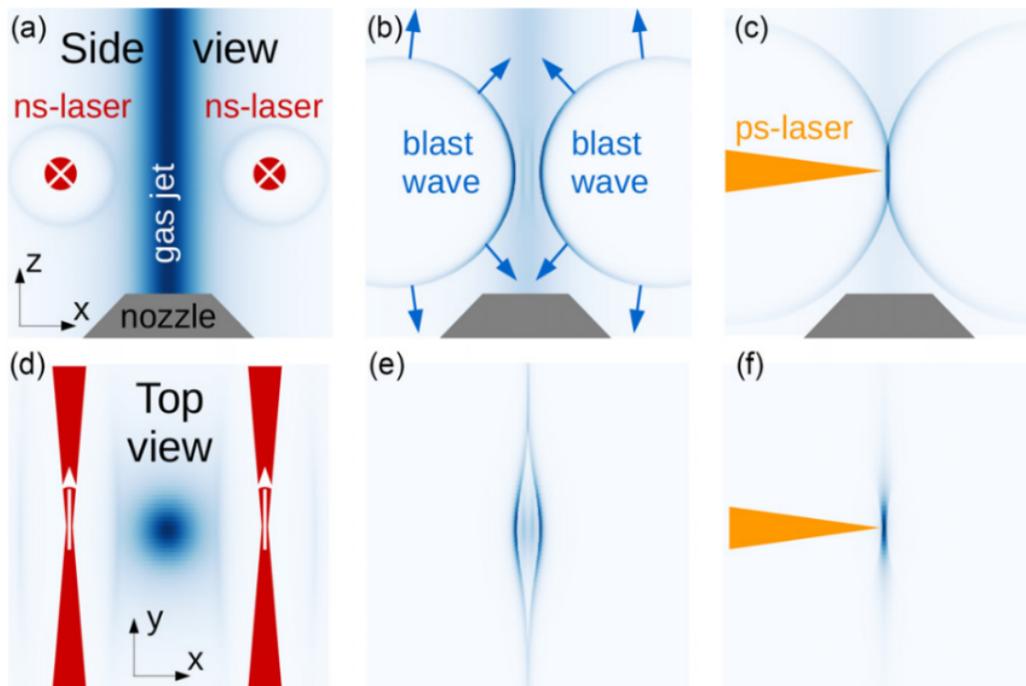
H2 $n_c(\omega)$

18 ps
(P max)



460 ps

Création de chocs (plasma shaping)



Marquès *et al.*, Phys. Plasmas (2021)

Création de chocs (plasma shaping)

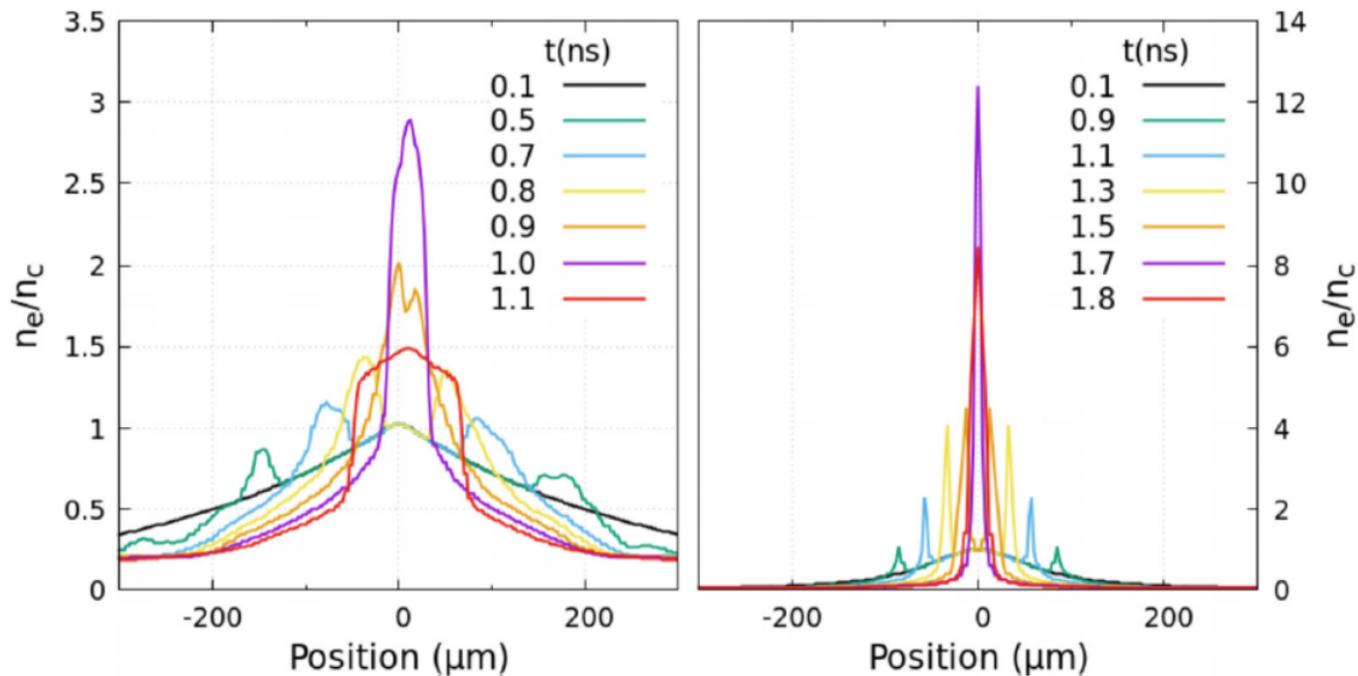


FIG. 21. Line-outs of the density profiles at $y = 0$, at different times, and for two initial density profiles: FWHM = $400 \mu\text{m}$ (left) and $140 \mu\text{m}$ (right). The lasers propagate at $\Delta x = \pm 250 \mu\text{m}$, and the initial peak density is $n_0/n_c = 1$.

Marquès *et al.*, Phys. Plasmas (2021)

Création de chocs (plasma shaping)

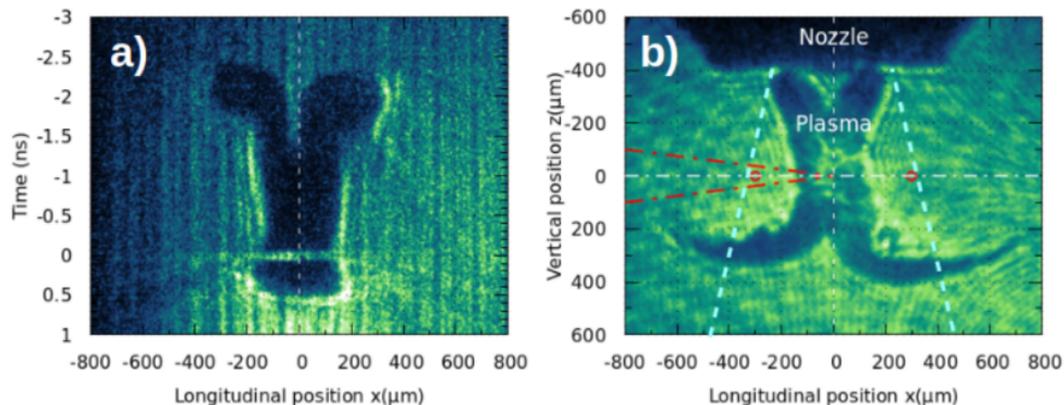


FIG. 6. *a) Time-resolved along the ps-beam axis (streak camera) and b) 2D space-resolved (GOI snapshot) shadowgraphy of the plasma tailored on the two opposite sides, for a gas jet backing pressure of 200 bars. The energy in each ns-beam is 4.5 J. The time integration window of the snapshot in b) was ~ 120 ps, ending just before the ps-pulse arrival. The blue dashed-lines indicate the edges of the shadowgraphy measured without plasma tailoring (Fig. 1).*

Création de chocs (plasma shaping)

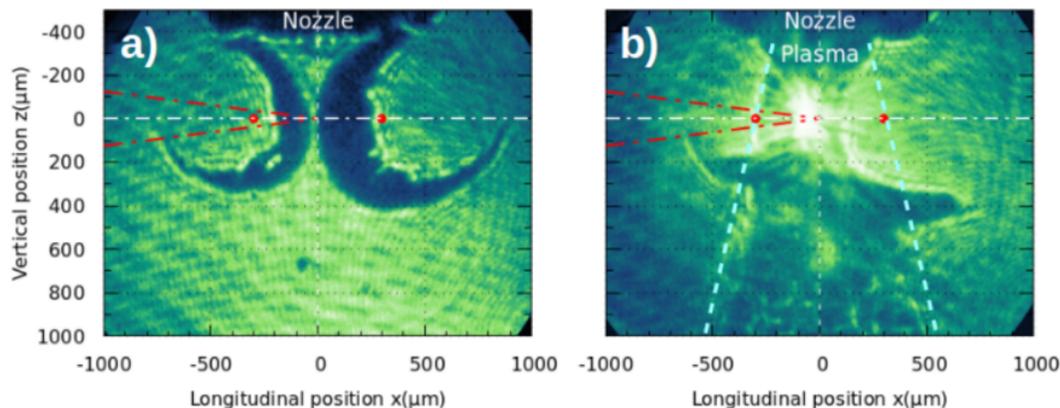


FIG. 7. *2D space-resolved (GOI snapshot) shadowographies of the plasma tailored on the two opposite sides, for a gas jet backing pressure of 300 bars, at two different times: a) before the collision of the HSWs, and b) just after their collision and the arrival of the ps-pulse. The blue dashed-lines indicate the edges of the shadowgraphy measured without plasma tailoring (Fig. 1).*

Création de chocs (plasma shaping)

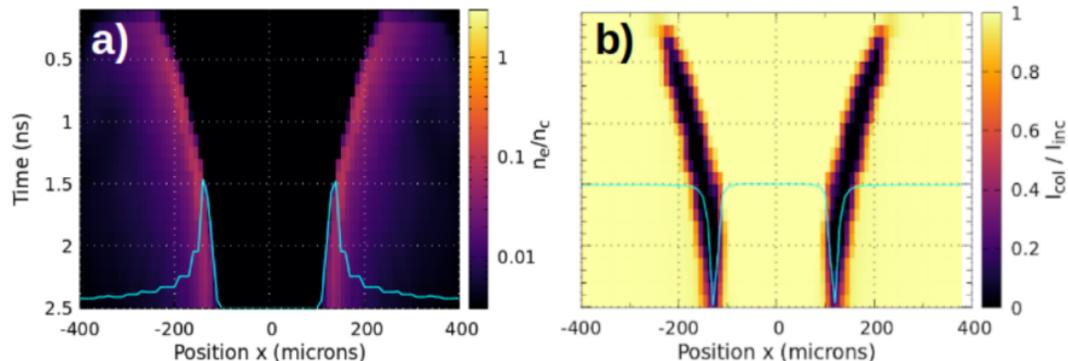


FIG. 10. a): Temporal evolution of the density profile along the ps-beam axis from 3D TROLL simulations. The two ns-beams are focused 300 μm from both sides of the gas jet center. The initial maximum plasma density (at $x = 0$) is $n_e^0 = 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ($n_c/5$). The spatial intensity profile of the ns-beams is $I(r) = 5.4 \times 10^{14} e^{-(r/25)^2}$, and the energy in each beam is 6 J. b) Post-processing of the shadowgraphy diagnostic from the TROLL outputs. The cyan line-outs are density and shadowgraphy profiles at $t = 2.5$ ns.

Création de chocs (plasma shaping)

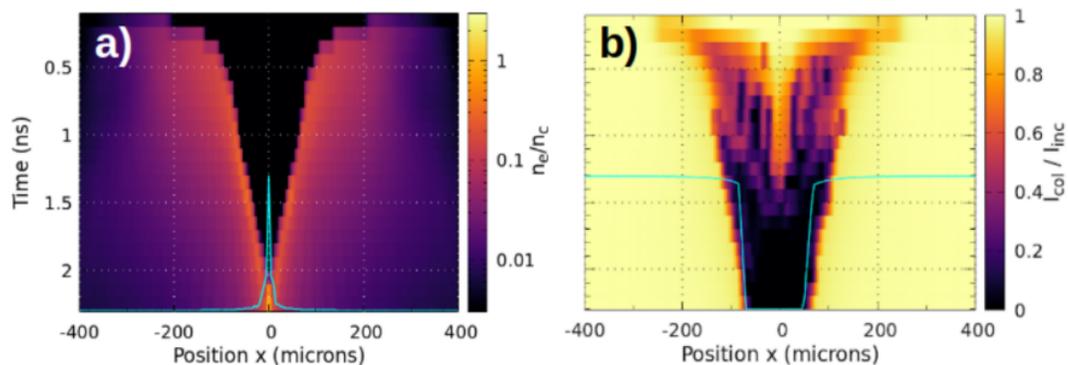


FIG. 11. Same as Fig. 10 but for a spatial profile of the ns-beams with a low-intensity wing: $I(r) = 3 \times 10^{14} [e^{-(r/25)^2} + 0.0172e^{-(r/110)^2}]$ W/cm², and 4.5 J in each beam. The cyan line-outs are density and shadowgraphy profiles at $t = 2.3$ ns.

Marquès et al., arXiv (2023) & Matter Radiat. Extremes 9, 024001 (2024)

Création de chocs (plasma shaping) - Simulations 3D

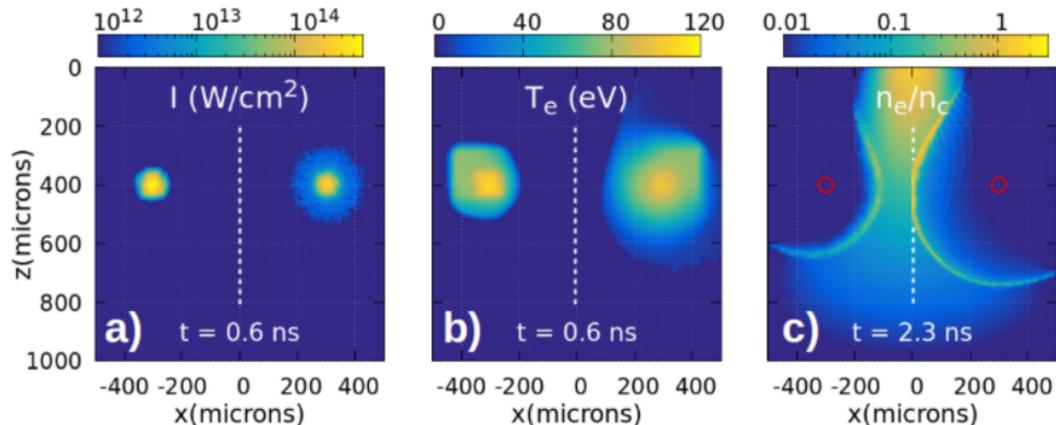


FIG. 12. *Spatial profiles of a) the laser focal spot, b) the electron temperature, c) the electron density for the case without the wing in the intensity profile (left, Fig. 10) or with (right, Fig. 11). a) et b) are at 0.6 ns, the maximum of the laser, c) is at 2.3 ns (time at which the HSWs collide in the case with the wing).*

Marquès et al., arXiv (2023) & Matter Radiat. Extremes 9, 024001 (2024)

Création de chocs (plasma shaping) - dépendance à l'énergie laser attention à la puissance !

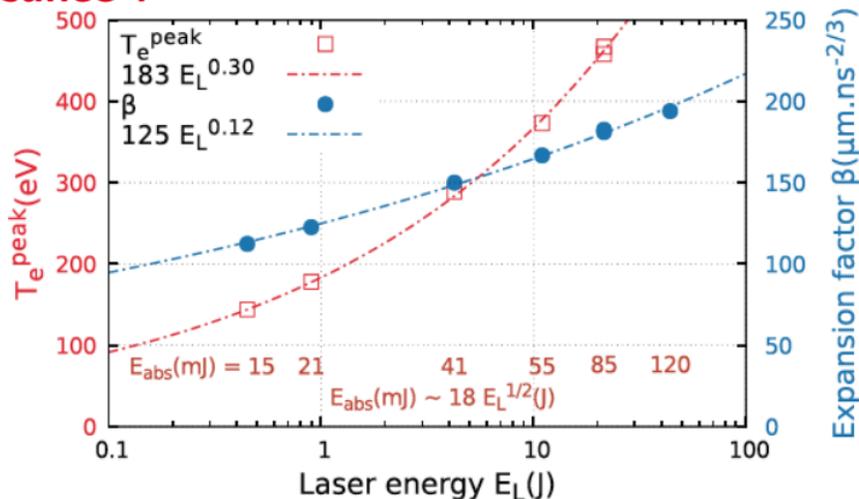


FIG. 6. Dependence of T_e and β on the incident laser energy E_L . Red, left scale: peak value of T_e (reached on the laser axis, at the pulse maximum). Blue, right scale: factor β of the radial expansion $r(t) = \beta t^{2/3}$. The dashed curves are fits. Values in the dark-orange: laser energy absorbed E_{abs} by the plasma, for each set of (T_e, β) points. A fit of these values gives $E_{abs}(mJ) \sim 18 E_L^{1/2}(J)$. As in Fig. 2, the initial peak density is $n_0/n_c = 1$, and the laser propagates along $\Delta x = 250 \mu\text{m}$.

Les simulations hydrodynamiques permettent de caractériser l'état des cibles utilisées avant l'impulsion laser UHI



En résumé :

- Simulations assez rapides (2D-axi, 2D-plan, 3D) de la cible complète (mm, cm, ps, ns)
- Modélisation de l'effet d'un préchauffage par ASE (contraste)
- Façonnage plasma
- Optimisation des conditions d'interaction pré-impulsion UHI
- Couplage à des simulations PIC (modélisations complémentaires)
- Modélisation limitée (effets pondéromoteurs, etc.)