

Start-to-end simulation of a laser accelerator facility

Francesco Massimo

Arnaud Beck, Julien D erouillat, Mickael Grech, Mathieu
Lobet, Frédéric Pérez, Imen Zenzemi, Arnd Specka



15 novembre 2018, Journée du LabEx



Plan de la Présentation

■ Contexte

- Interaction laser-plasma et CILEX
- Accélération laser-plasma d'électrons

■ Les objectifs

- Modélisation de l'accélération plasma et enjeux impliqués
- Simulation d'expériences d'accélération multi-étage

■ Modèle d'enveloppe et sa validation

- 1^{er} étage plasma
- 2^{ème} étage plasma
- Résultats du Grand Challenge

■ Conclusions

Plan de la Présentation

■ Contexte

- Interaction laser-plasma et CILEX
- Accélération laser-plasma d'électrons

■ Les objectifs

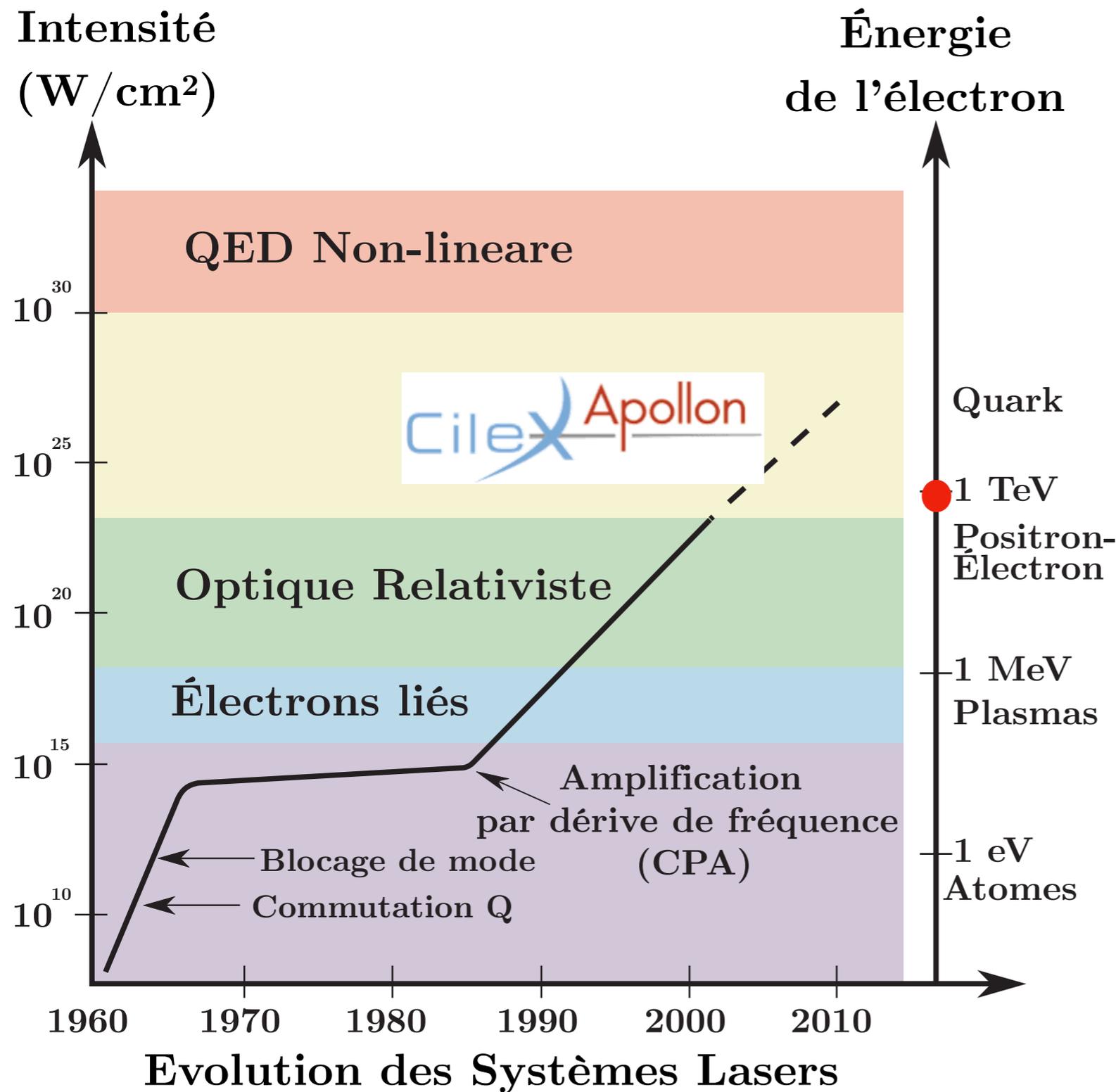
- Modélisation de l'accélération plasma et enjeux impliqués
- Simulation d'expériences d'accélération multi-étage

■ Modèle d'enveloppe et sa validation

- 1^{er} étage plasma
- 2^{ème} étage plasma
- Résultats du Grand Challenge

■ Conclusions

Interaction Laser-Matière à Haute Intensité



Techniques:

- CPA
- Lasers femtoseconde
- Optique non-linéaire
- ...

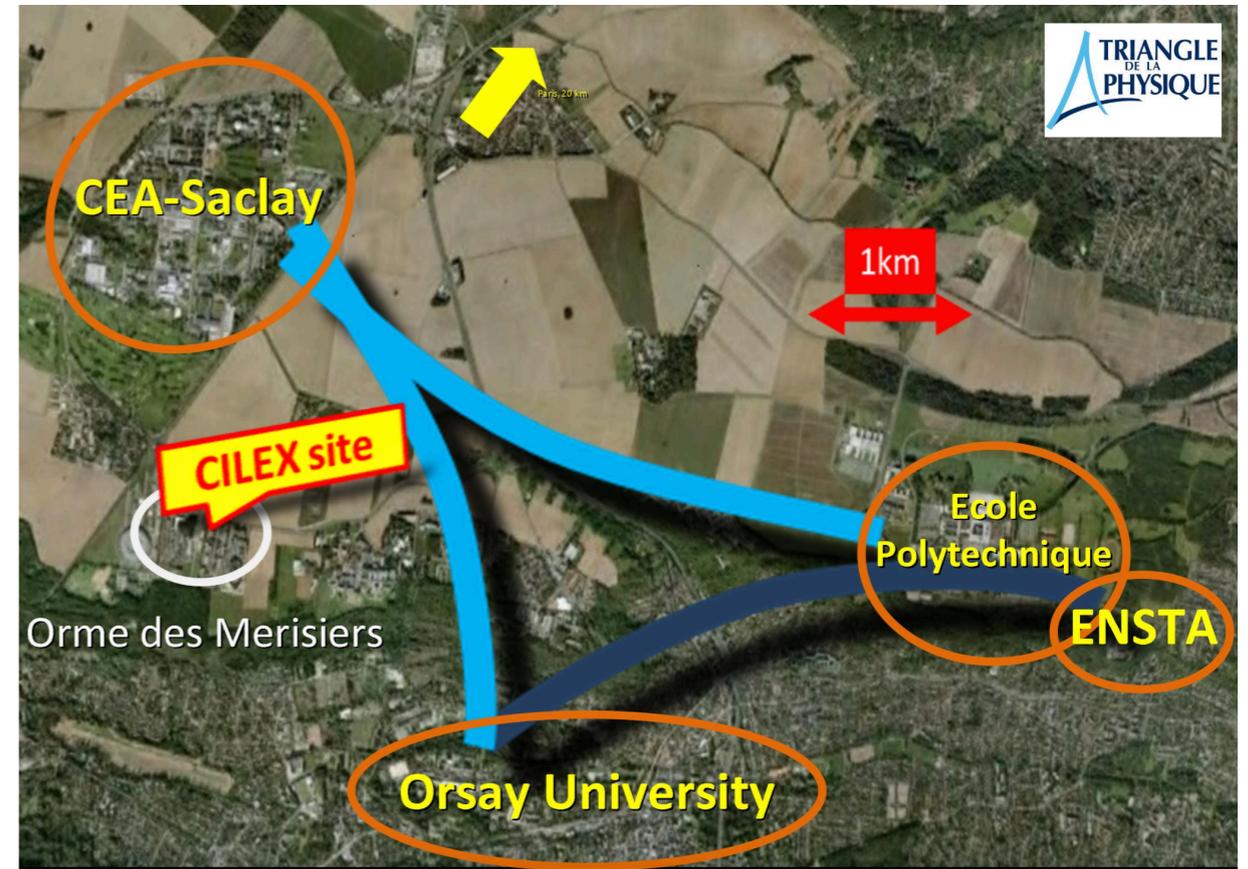
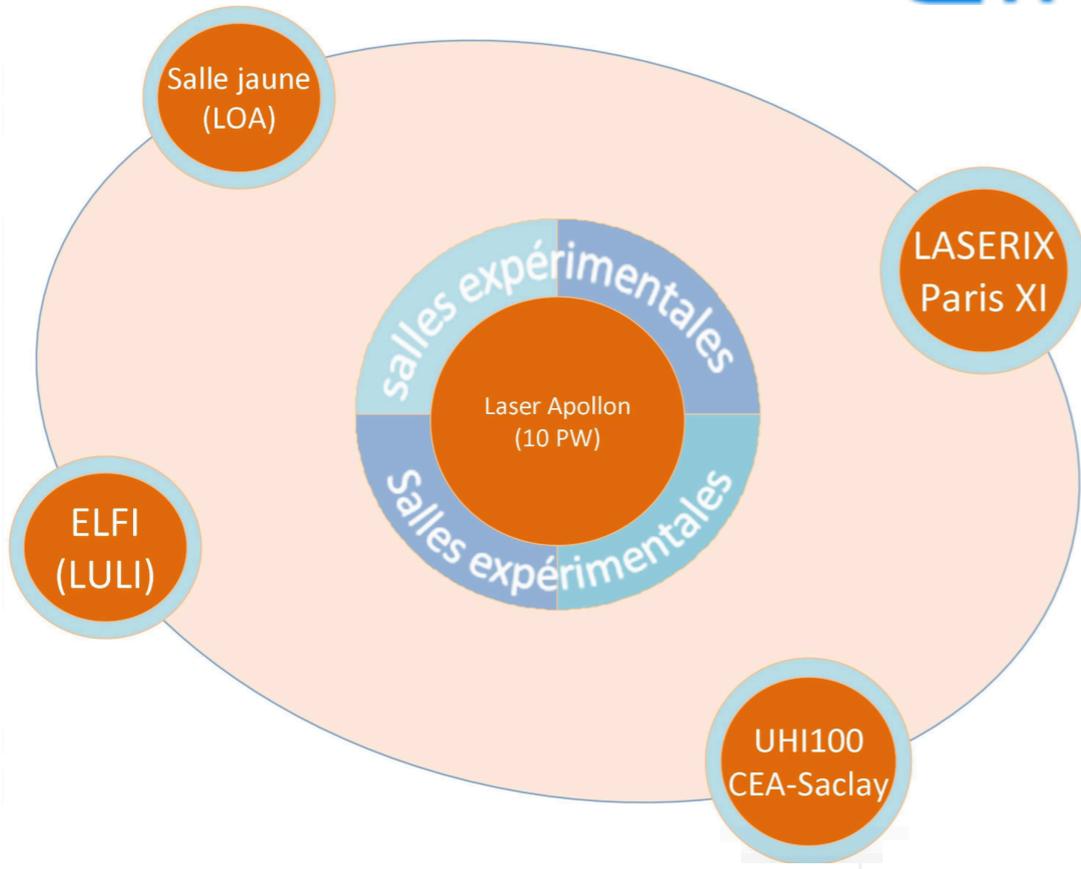
Domaines de la Physique:

- Fluides Relativistes
- Physique des Plasmas Relativistes
- Optique Relativiste
- Astrophysique de Laboratoire

Applications:

- Sources d'électrons, ions
- Accélération de particules
- Sources de rayonnement (UV, X, γ)
- Diagnostics innovants de haute résolution
- Mesures pompe-sonde

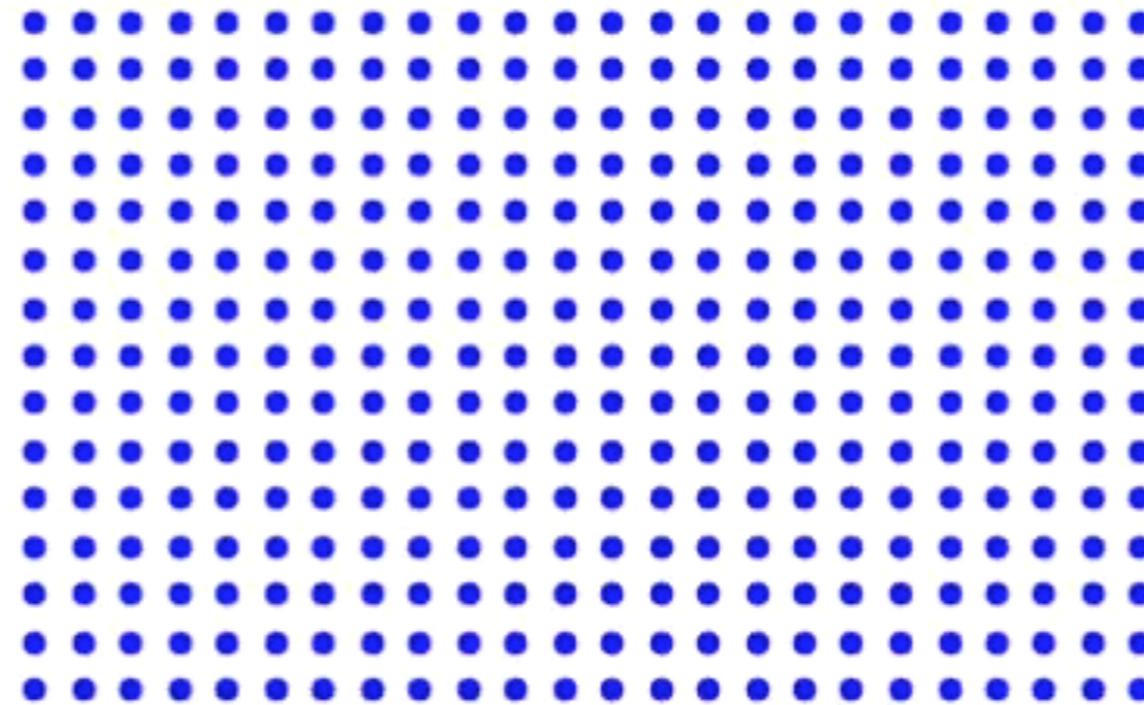
Centre Interdisciplinaire de la Lumière Extrême (CILEX)



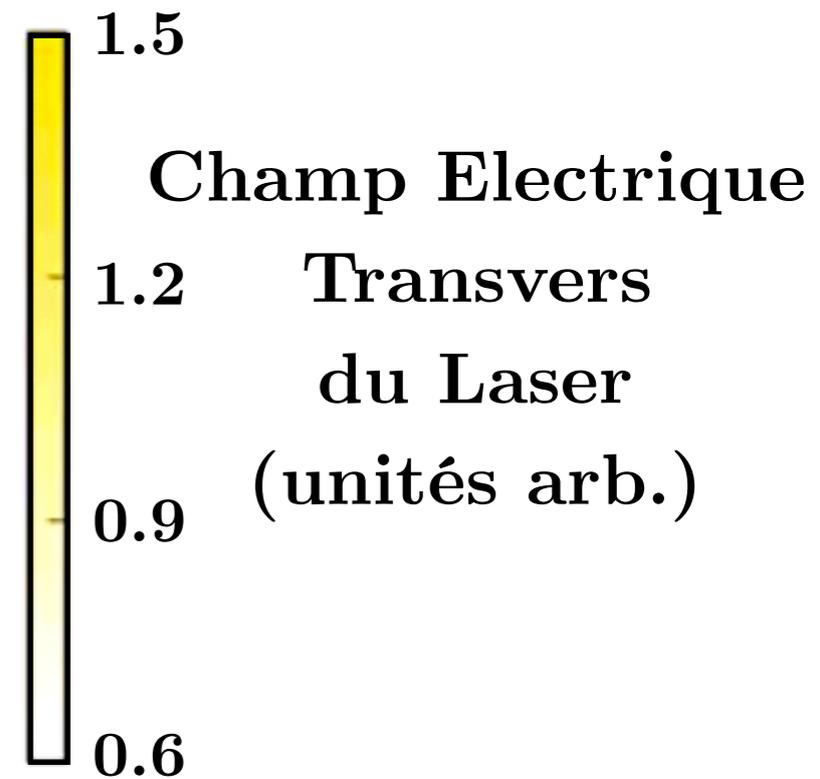
Impulsions lasers à haute intensité créent des cavités électroniques dans plasmas sousdenses

Impulsion Laser
Durée: 28 fs

Force
Pondéromotrice:
$$\mathbf{F} = -\nabla I_{\text{Laser}}$$

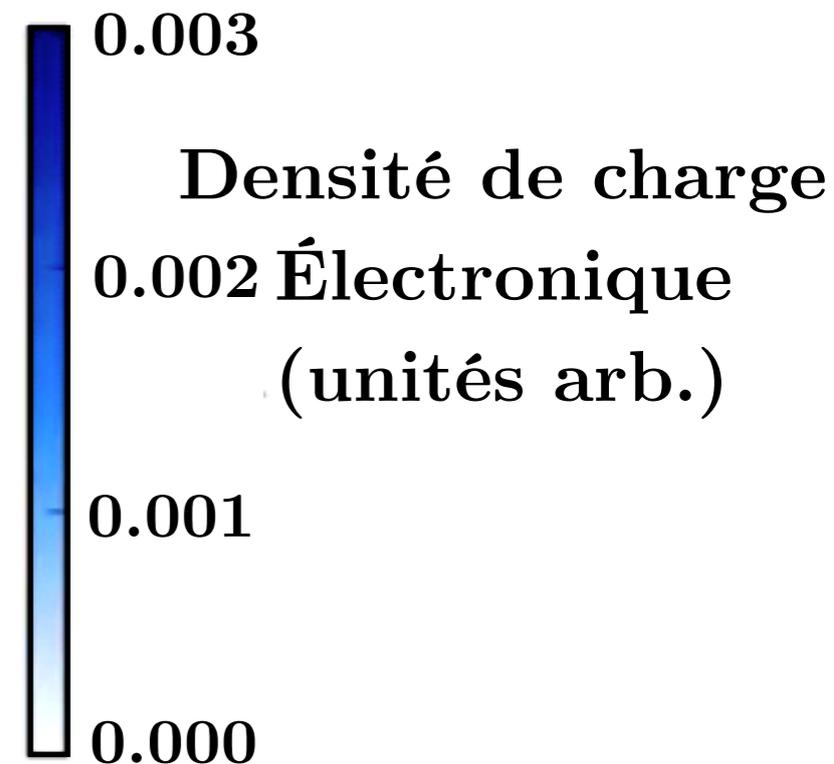
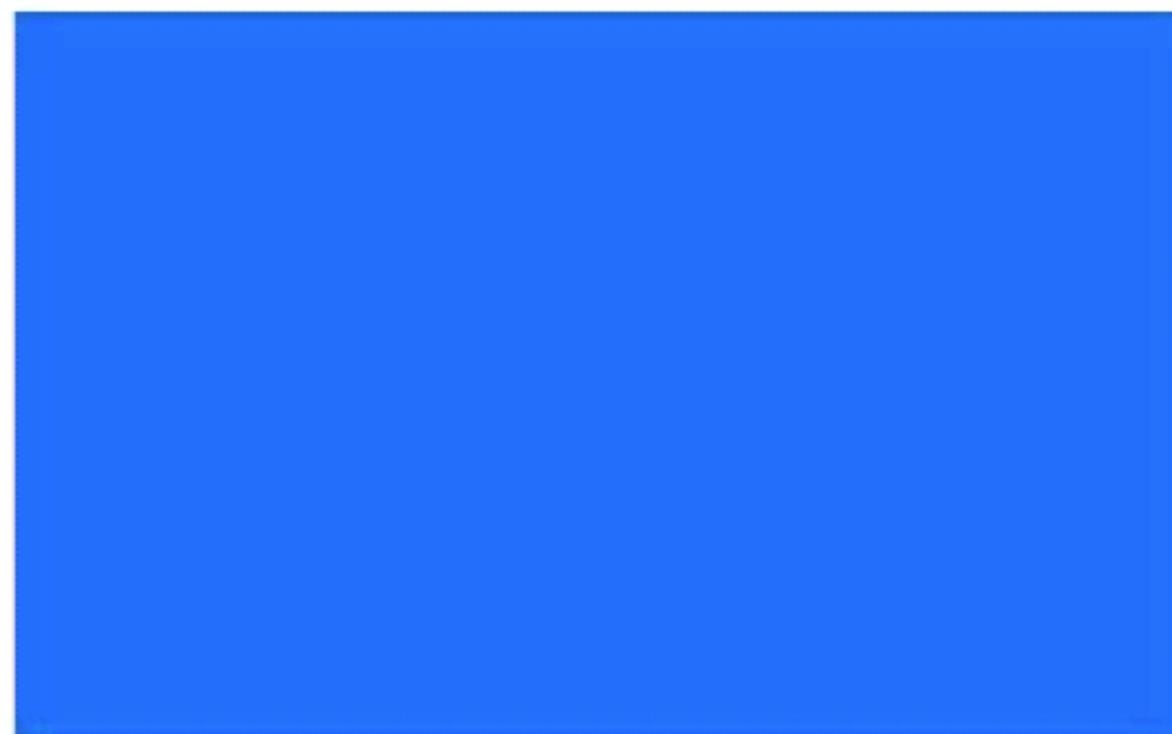


Électrons ● Ions Immobiles ● $M_i \gg m_e$



Densité plasma:
 $3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

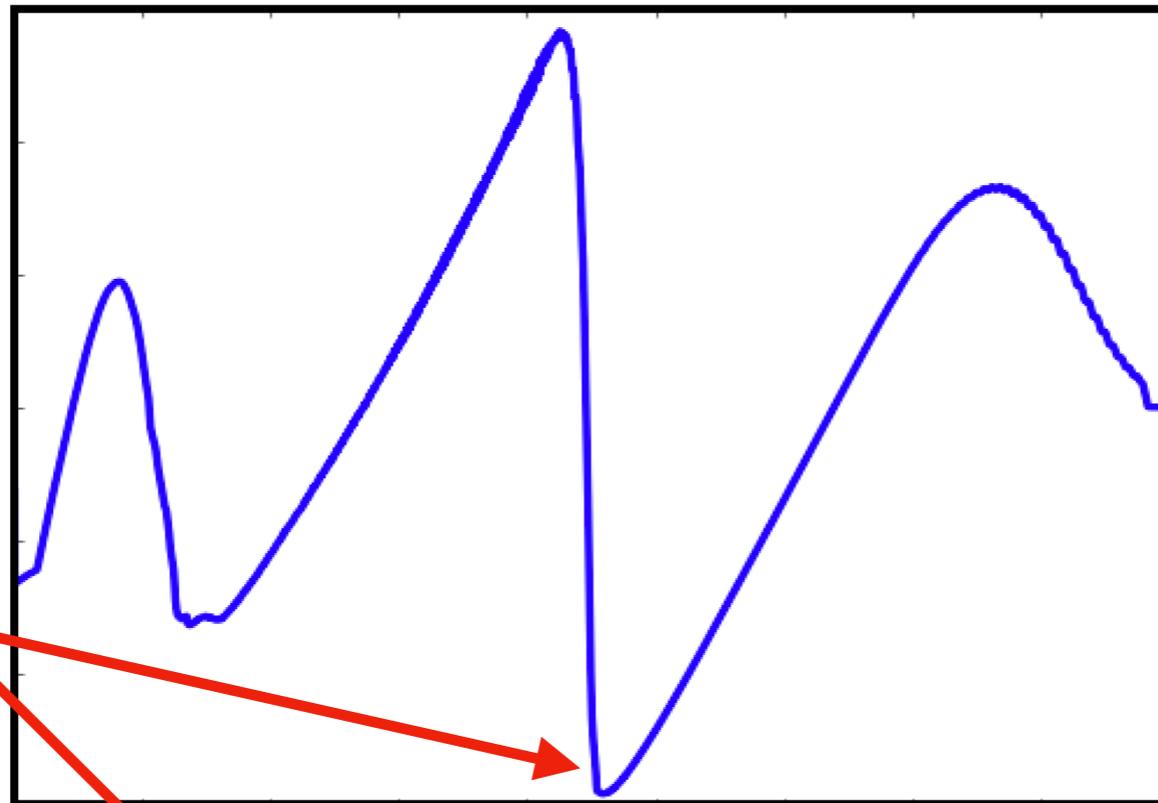
Longueur d'onde
Plasma:
 $20 \mu\text{m}$



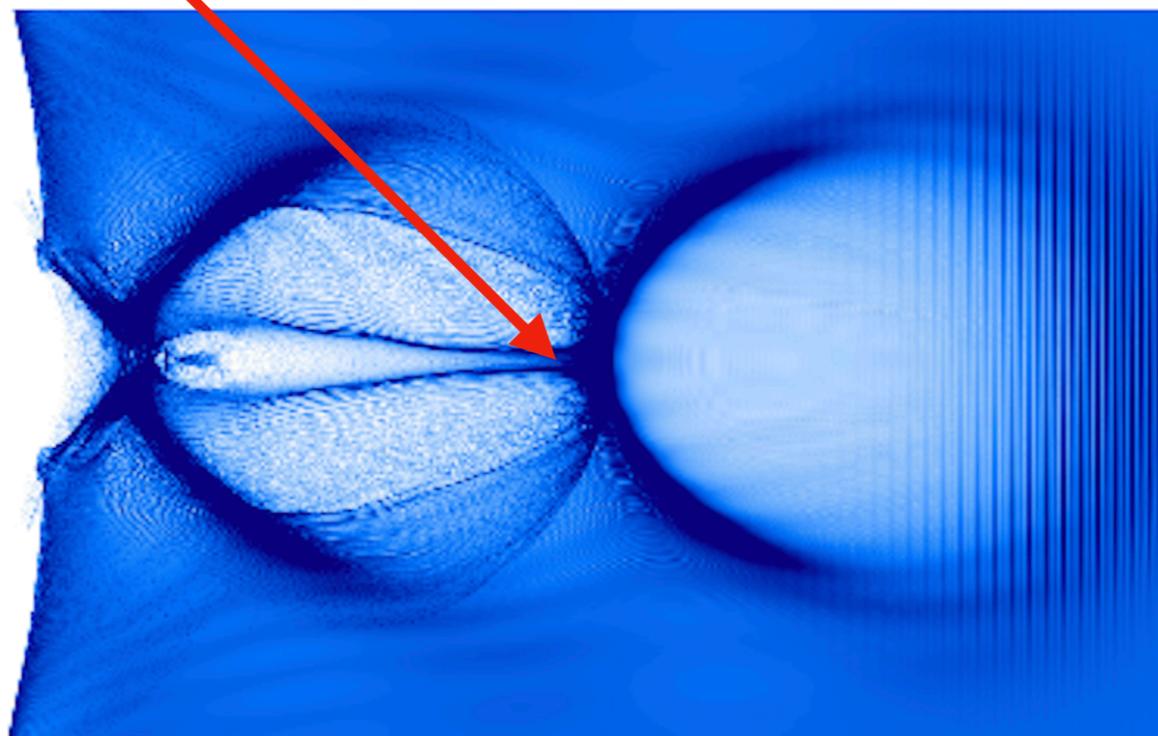
Champs électriques accélérants dans le sillages laser

$E > 100 \text{ GV/m}$

Les Electrons
injectés ici
Sont accélérés



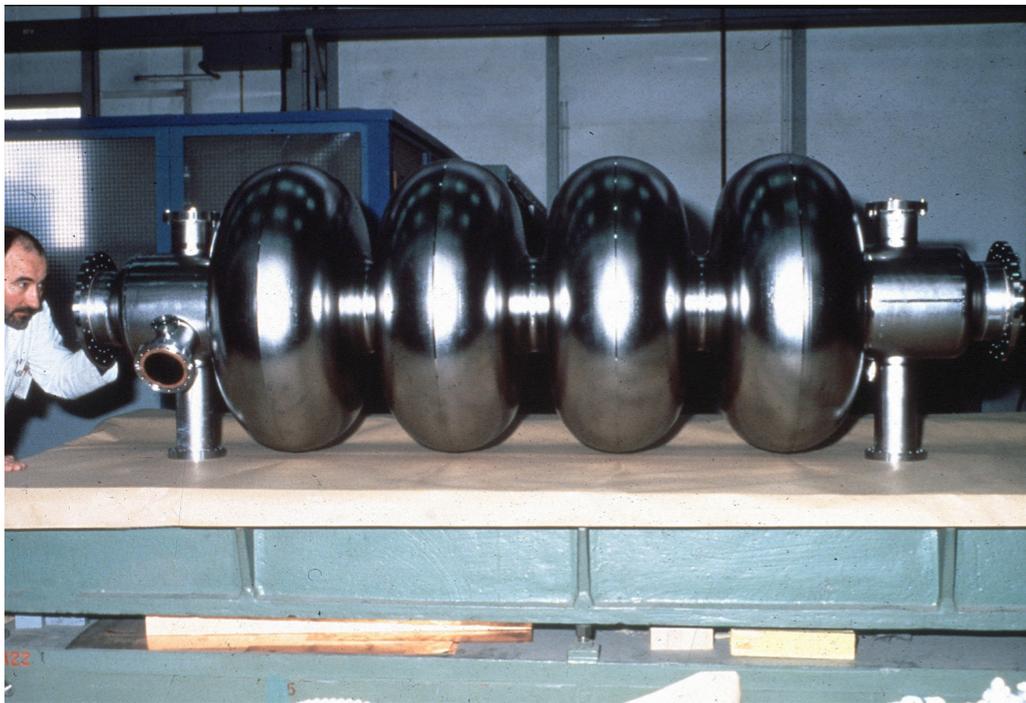
0.04 Champ Electrique
Longitudinal
Dans l'axe de
propagation
(unités arb.)
0.00
-0.04



0.003
Densité de charge
Électronique
(unités arb.)
0.002
0.001
0.000

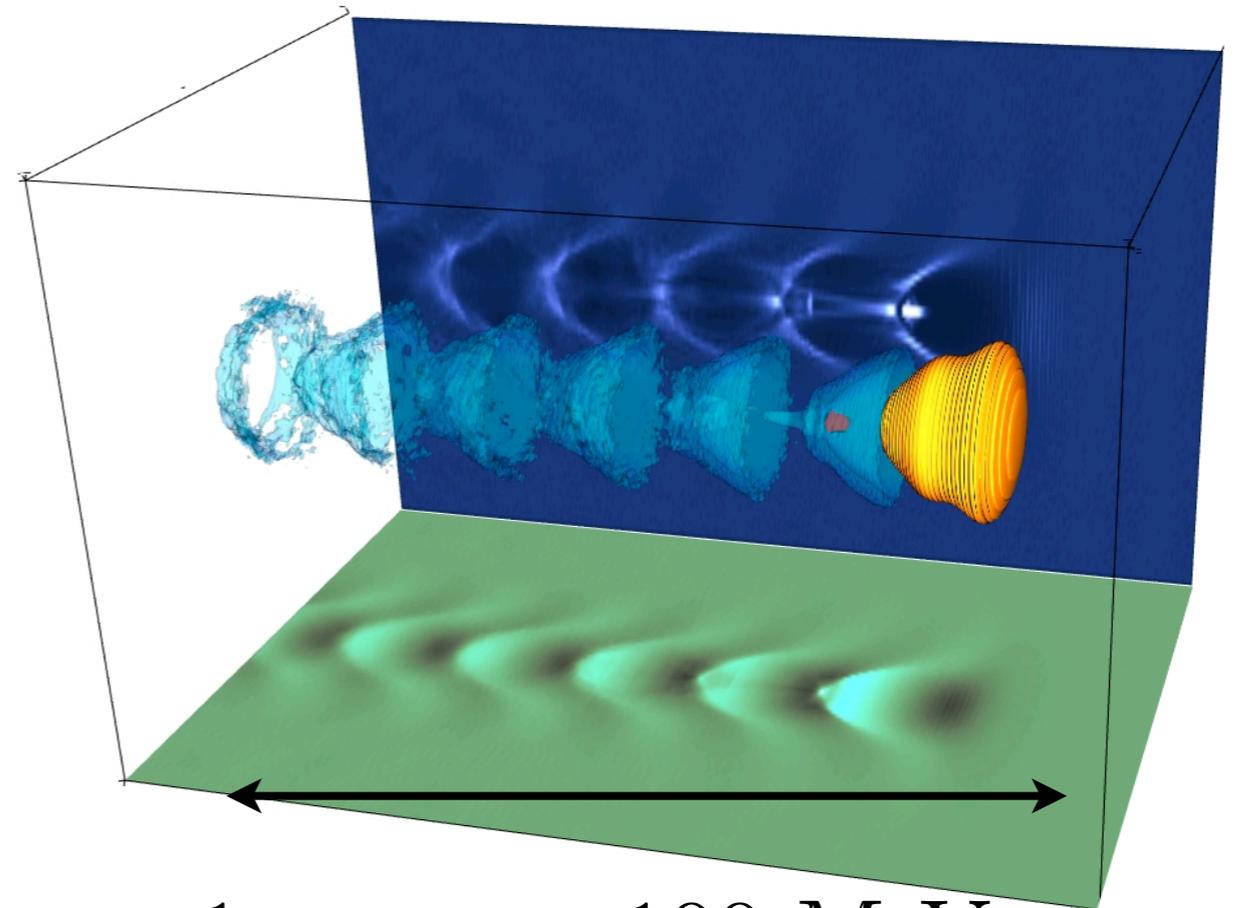
Taille des Accélérateurs Laser-Plasma

Cavité RF



1 m \Rightarrow 50 MeV
Champ Electrique
< 100 MV/m

Cavité plasma



1mm \Rightarrow 100 MeV
Champ Electrique
> 100 GV/m

V. Malka et al., Science 298, 1596 (2002)

Plan de la Présentation

■ Contexte

- Interaction laser-plasma et CILEX
- Accélération laser-plasma d'électrons

■ Les objectifs

- Modélisation de l'accélération plasma et enjeux impliqués
- Simulation d'expériences d'accélération multi-étage

■ Modèle d'enveloppe et sa validation

- 1^{er} étage plasma
- 2^{ème} étage plasma
- Résultats du Grand Challenge

■ Conclusions

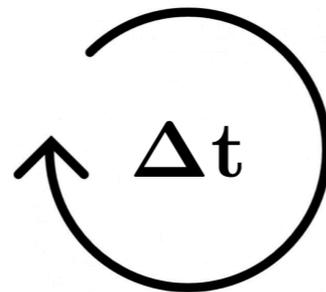
La simulation avec des codes “PIC” coût cher!

Initialisation des particules
et des champs électromagnétiques

Code Particle in Cell (“PIC”) =
Particules du Plasma + E, B sur grille

Mise à jour
des champs électromagnétiques:
Equations de Maxwell

Projection des densités
de courant sur le maillage



Interpolation de la force
sur les particules

Mise à jour des
positions et impulsions:
Equations du mouvement

Pour simulations 3D: parallelisation obligatoire!

1 mm plasma ~ 100 kcpu-heures ~ 3.2 k€

Code “Particle in Cell” (PIC) SMILEI

Smilei)

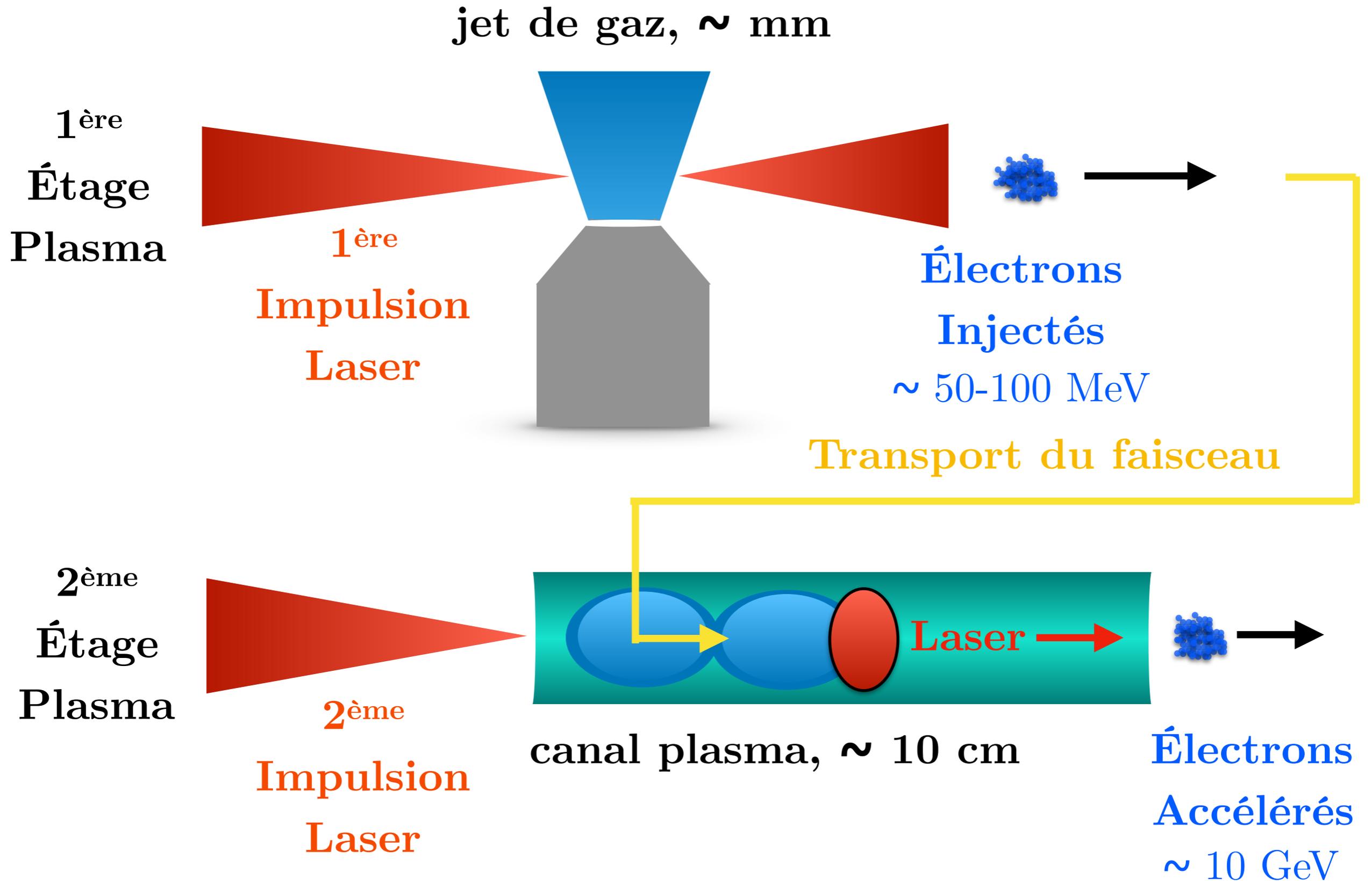
<http://www.maisondelasimulation.fr/smilei/>

<https://github.com/SmileiPIC/Smilei>



J. Derouillat, et al., *Comput. Phys. Commun.* **222**, 351-373 (2018)

Expériences Multi-étages d'Accélération d'Électrons



Plan de la Présentation

■ Contexte

- Interaction laser-plasma et CILEX
- Accélération laser-plasma d'électrons

■ Les objectifs

- Modélisation de l'accélération plasma et enjeux impliqués
- Simulation d'expériences d'accélération multi-étage

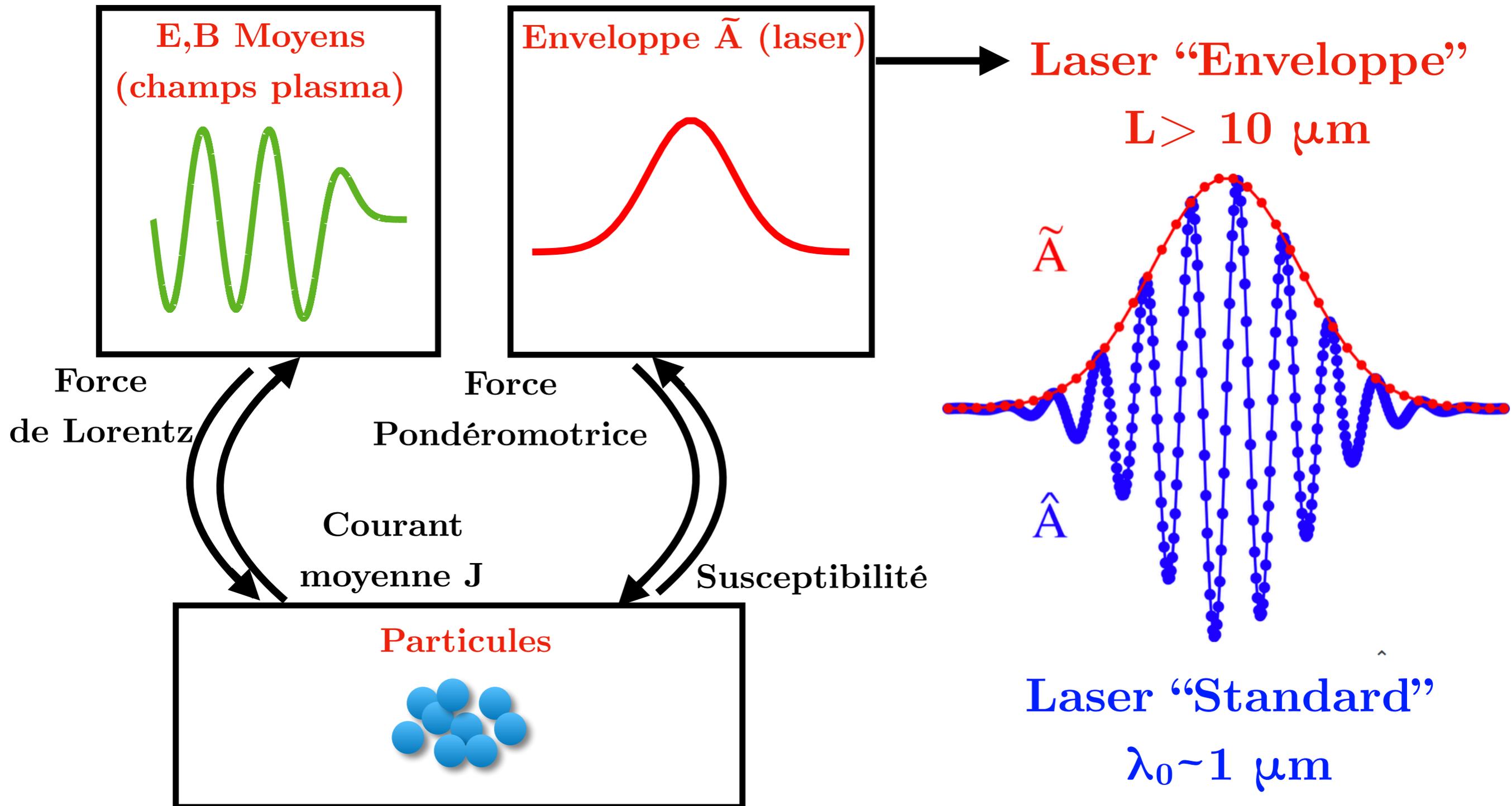
■ **Modèle d'enveloppe et sa validation**

- 1^{er} étage plasma
- 2^{ème} étage plasma
- Résultats du Grand Challenge

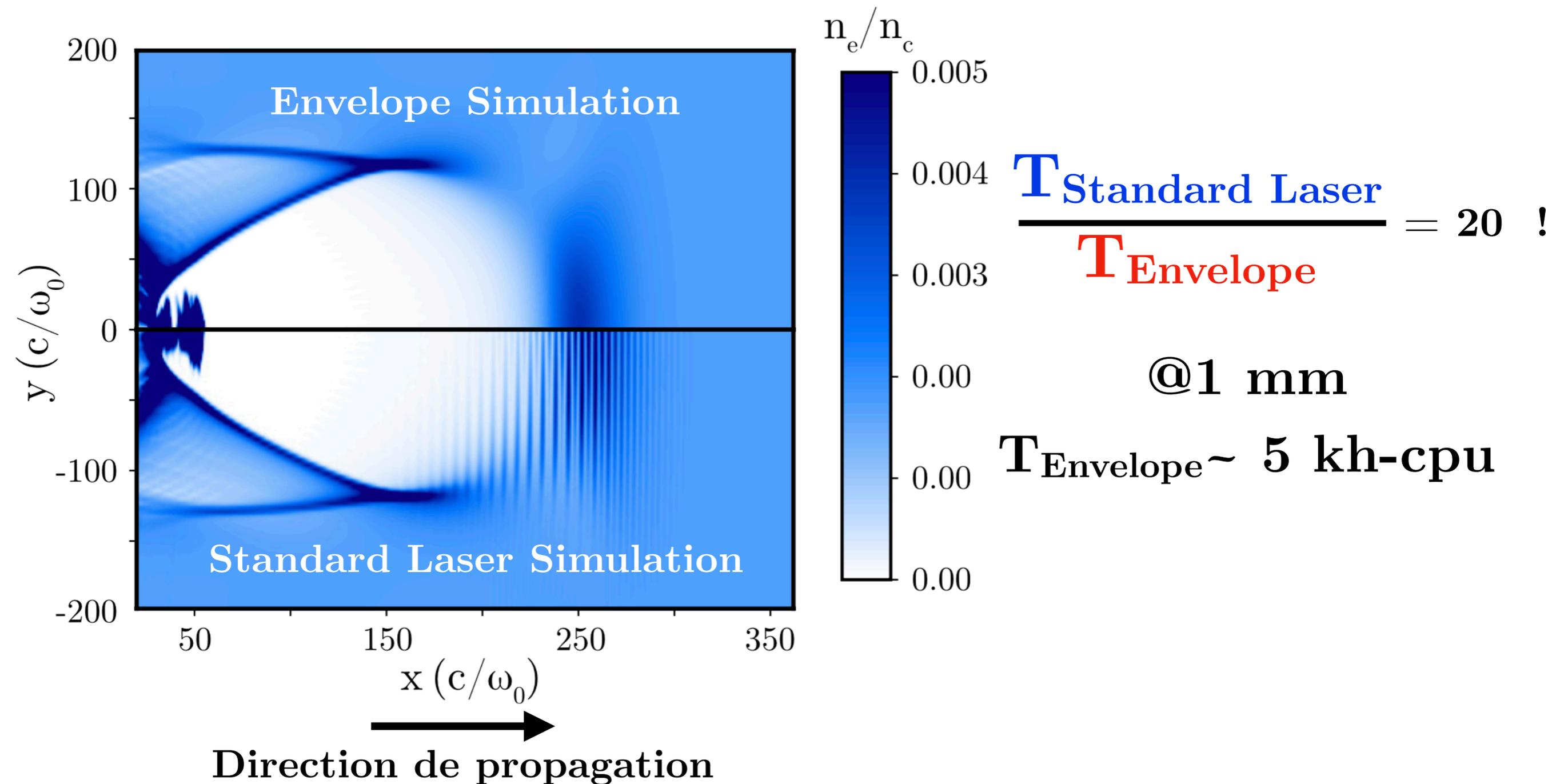
■ Conclusions

Modèle d'Enveloppe Complexe pour le Laser

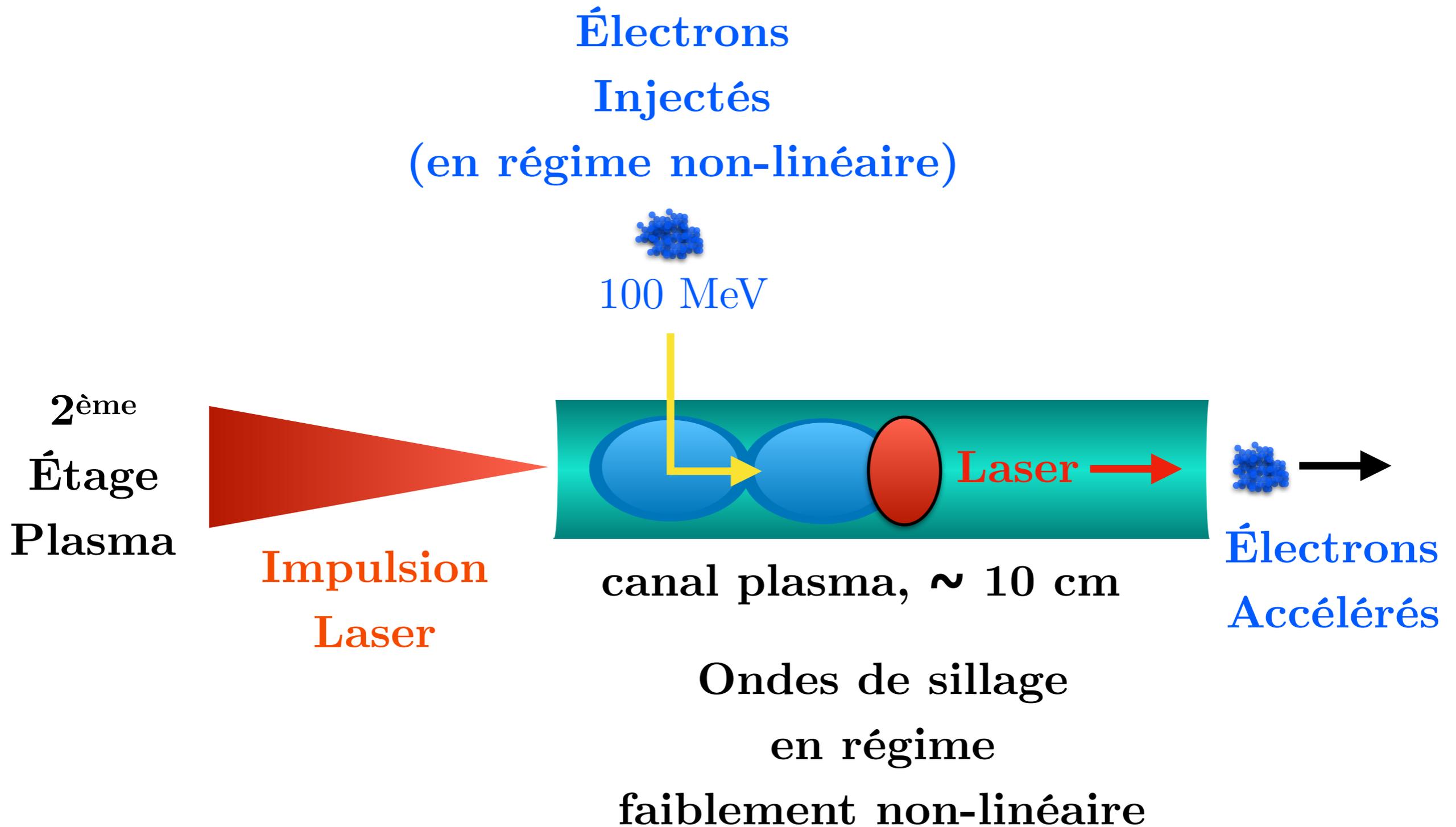
PIC avec Laser Enveloppe



Test de validation: Nonlinear LWFA, Electron density



Injection externe d'un faisceau d'électrons dans un sillage laser-plasma



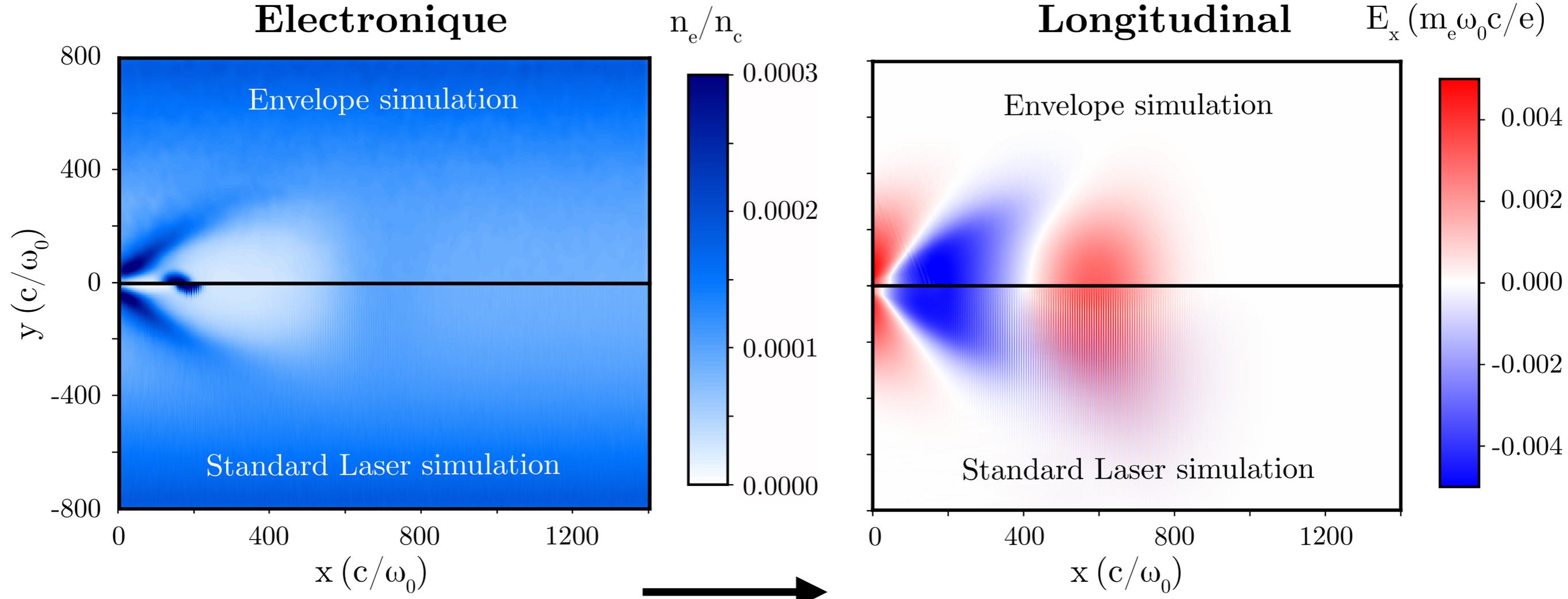
Injection externe d'un faisceau d'électrons dans un sillage laser-plasma

Comparaison @15 mm de propagation

Densité
Electronique

Champ Electrique
Longitudinal

$E_x (m_e \omega_0 c / e)$



Direction de Propagation

$$\frac{T_{\text{Standard Laser}}}{T_{\text{Envelope}}} = 20 !$$

Grand challenge

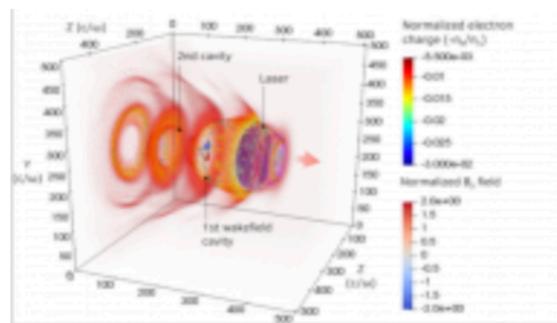
Grand Equipement National de Calcul Intensif



<http://www.genci.fr/fr>

Laser CILEX-APOLLON - Simulation d'accélération d'électrons en configuration double-étage

Actualités  Lundi 22 Octobre 2018



CT5 - PHYSIQUE THEORIQUE ET PHYSIQUE DES PLASMAS
Supercalculateur : JOLIOT-CURIE
Nombre d'heures : 10 millions d'heures
#GRANDSCHALLENGES #JOLIOT-CURIE

Simulation d'accélération d'électrons en configuration double-étage dans le cadre du laser CILEX-APOLLON

Mathieu Lobet, Julien Dérouillat - Ingénieur-chercheurs [CEA](#) à la Maison de la Simulation

Arnaud Beck, Francesco Massimo - Chercheurs au Laboratoire Leprince-Ringuet, École Polytechnique

Image: Mathieu Lobet (MdS)

A. Beck et al. (2019), en cours d'examen, <https://arxiv.org/abs/1810.03949>

Conclusions

- Implementation d'un modèle d'enveloppe pour le laser
- Validation avec simulations massives grâce au Grand Challenge
GENCI
- Simulations d'expériences multi-étages d'accélération laser
plasma d'électrons envisagées pour CILEX désormais accessibles
- Prochain développement: laser+faisceau d'électrons réaliste
- Travaux préliminaires pour l'éventuel PHE ALP@P2IO proposé
pour le renouvellement du LabEx

Remerciements

F. MASSIMO est financé par P2IO LabEx (ANR-10-LABX-0038) dans le Cadre "Investissements d'Avenir" (ANR-11-IDEX-0003-01) géré par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR, France)



Groupe GALOP



- Arnaud Beck, Imen Zemezmi, M. Khojoyan, A. Specka

Développeurs de



- Francesco Massimo, Arnaud Beck, Imen Zemezmi
- Frédéric Pérez, Mickael Grech
- Julien Derouillat, Heithem Kallala, Mathieu Lobet



Développeurs de ALaDyn

- Alberto Marocchino
- Stefano Sinigardi, Pasquale Londrillo
- Davide Terzani



- Gilles Maynard



Ces travaux ont bénéficié d'un accès aux moyens de calcul du TGCC, du CINES, au travers de l'allocation de ressources 2018-A0010510062 et Grand Challenge "Irene" projet 2018 gch0313 attribuée par GENCI (Grand Equipement National de Calcul Intensif)



Pour utilisateurs, futurs développeurs:

Smilei) Training Workshop!

<http://www.maisondelasimulation.fr/smilei/>

Prochaine Edition: 7-8 Mars 2019

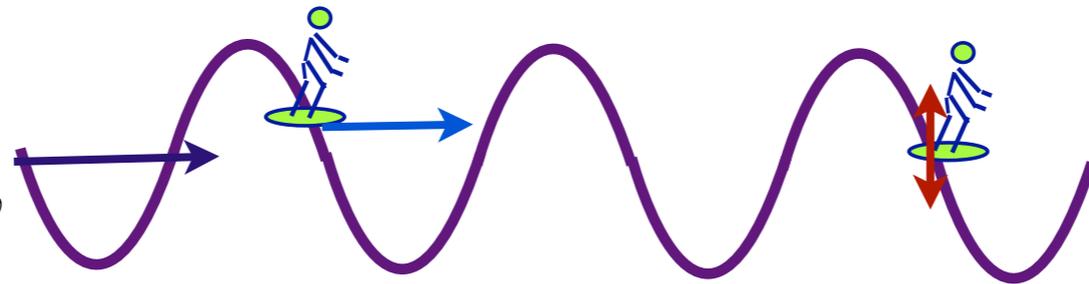


Additional slides

Sources d'Électrons à Haute Énergie par Lasers et Plasmas

Injection des électrons dans l'onde de sillage (laser/ionisation/profil de densité/?)

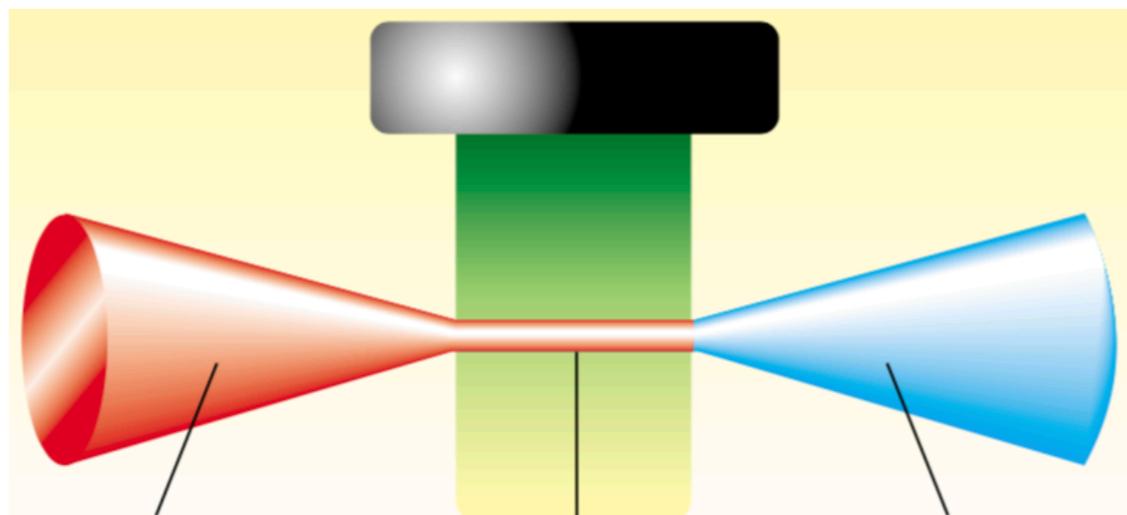
Surfeur avec
vitesse initiale suffisante,
position, phase adaptées



Surfeur: électron

Vague: Champ électrique longitudinal de l'onde de sillage plasma

Longueur d'onde $< 100 \mu\text{m}$, durée des faisceaux d'électrons $< 10 \text{ fs}$



Laser fs, TW

Plasma

Électrons

$L \sim 1 \text{ mm}$, $E_{\text{électron}} \sim 100 \text{ MeV}$

L'enjeu des hautes Énergies
($>10 \text{ GeV}$)?

- Expériences multi-étage
- Guidage laser

Applications souhaitées

- Lasers à électrons libres
- Collisionneurs
- Applications médicales