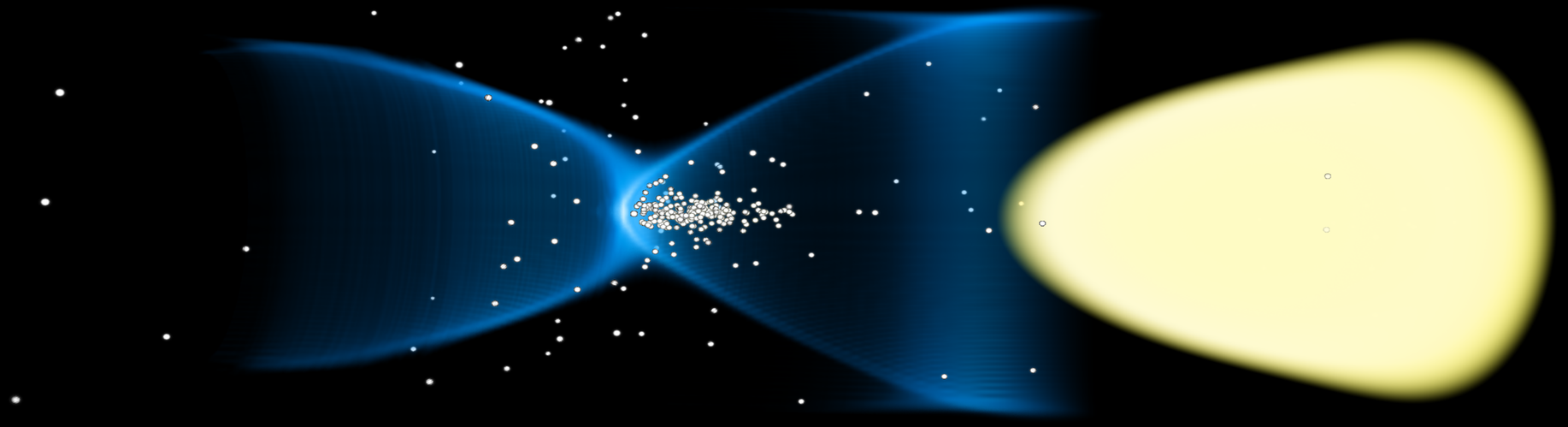
Simulations LWFA avec le modèle d'enveloppe et applications pour la conception d'un accélérateur laser-plasma



Francesco Massimo
Maison de la Simulation, CEA

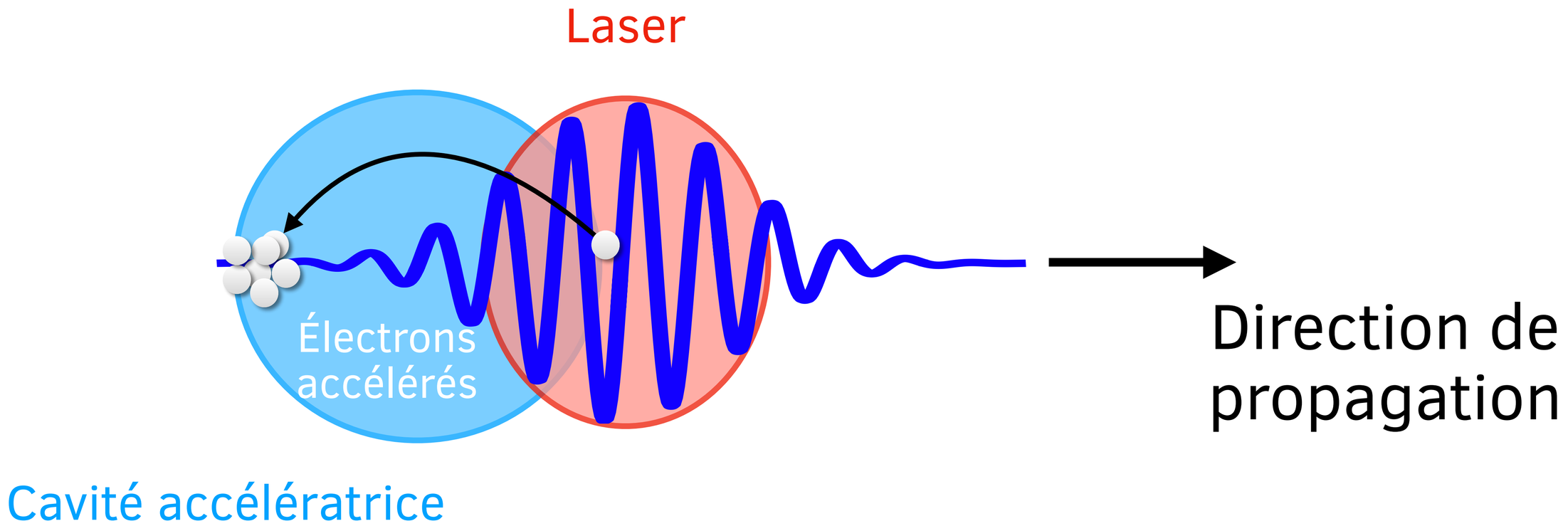
GdR APPEL,
Assemblée Générale
11-13 mai 2022

Plan de la présentation

- Contexte: LWFA avec injection par ionisation
- Modèle d'enveloppe dans Smilei
- Module d'ionisation tunnel enveloppe: validation et performances
- Couche parfaitement absorbante (PML) pour l'enveloppe
- Application: dimensionnement des expériences par Machine Learning
- Conclusions et développements futurs

Injection par ionisation: un défi de modélisation

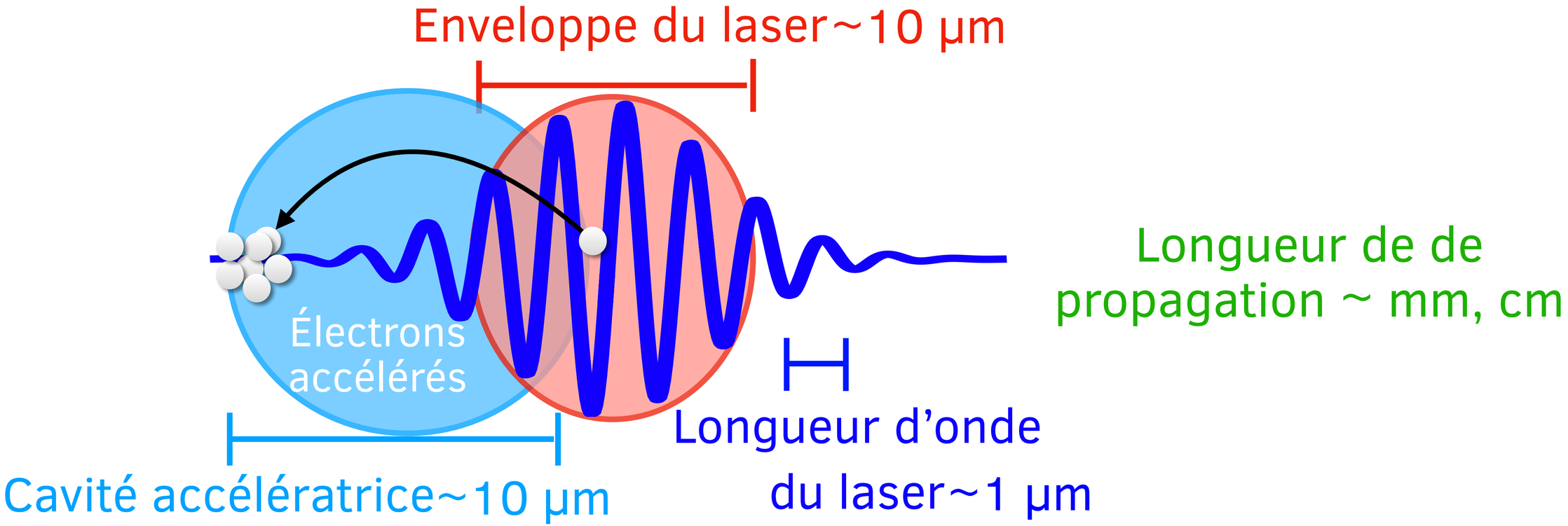
Cible: gaz à faible Z (e.g. helium)+gaz dopant à haut Z



Outil numérique nécessaire pour décrire ce schéma: codes Particle in Cell (PIC)

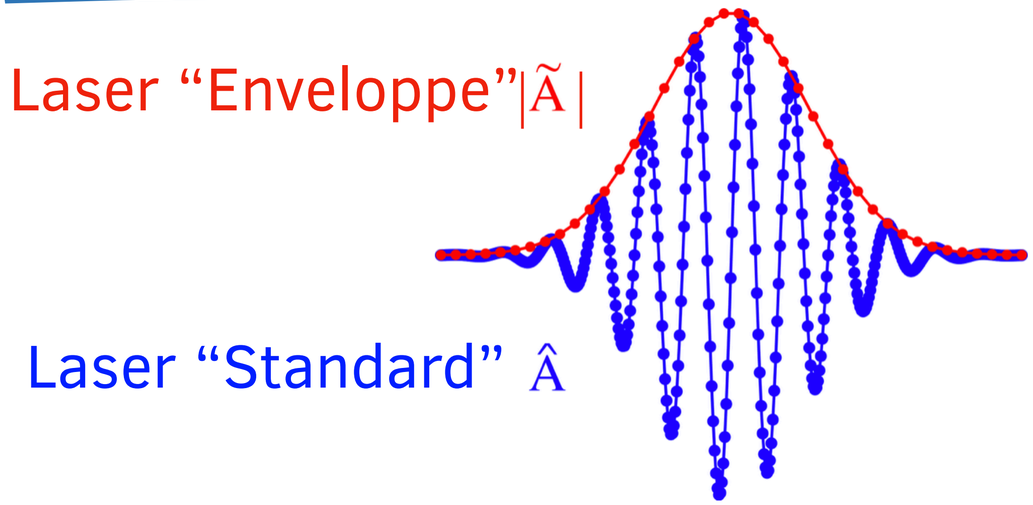
Injection par ionisation: un problème multi-échelle

Défi numérique:
Différence entre les échelles à simuler et à résoudre



Solution dans Smilei)
méthode PIC avec un **modèle d'enveloppe**

Méthode PIC avec enveloppe dans Smilei



$$\frac{\text{Résolution Laser “Enveloppe”}}{\text{Résolution Laser “Standard”}} = 10$$

Avantage: réduction d’ordres de grandeur des temps de calcul

Exemple en géométrie cylindrique, L=800 µm:

558k minutes-coeur — Simulation “Standard”

30 minutes-coeur — Simulation Enveloppe

Ressources pour le résultat

F. Massimo et al., Phys. Rev E (2020)

Modèle d'enveloppe: une ligne de recherche

Déjà disponibles avec Smilei v. 4.0-4.6:

- Modèle d'enveloppe dans toutes les géométries (1D, 2D, 3D, cylindrique)
- Polarisation linéaire et circulaire, solveur d'équation d'enveloppe à dispersion réduite

Modules pour l'enveloppe introduits par Smilei

- **Ionisation Tunnel:** régime relativiste, sans reconstruction du laser (F. Massimo)
- Conditions au bord absorbantes (**Perfectly Matched Layer**) (G. Bouchard)

Développements futurs

- Vectorisation SIMD, GPU
- Enveloppe cylindrique mais beam loading asymétrique

Applications en France

- Projet PALLAS (IJClab, LLR)
- Expériences LWFA APOLLON (LPGP, LLR)
- TP simulation de LWFA pour M2 GI-PLATO (Univ. Paris Saclay)

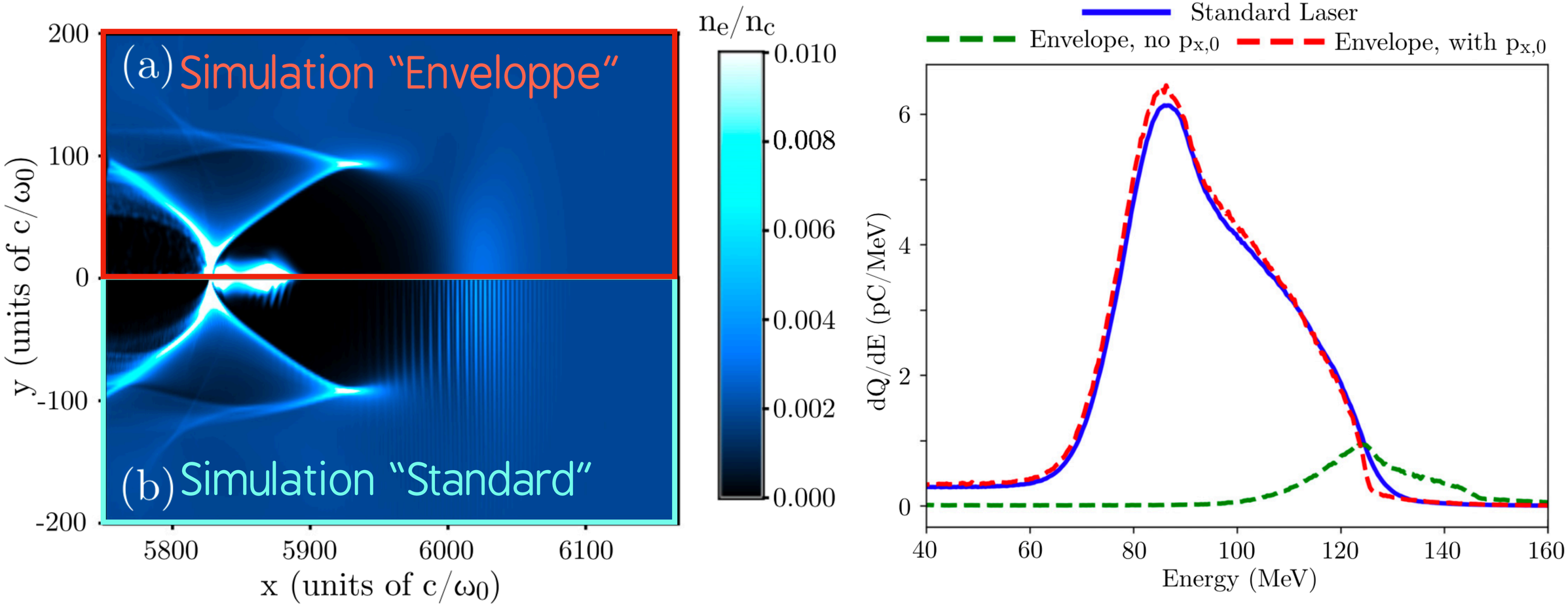
PALLAS

Apollon

MASTER GI.P.L.A.TO

Ionisation tunnel enveloppe: validation

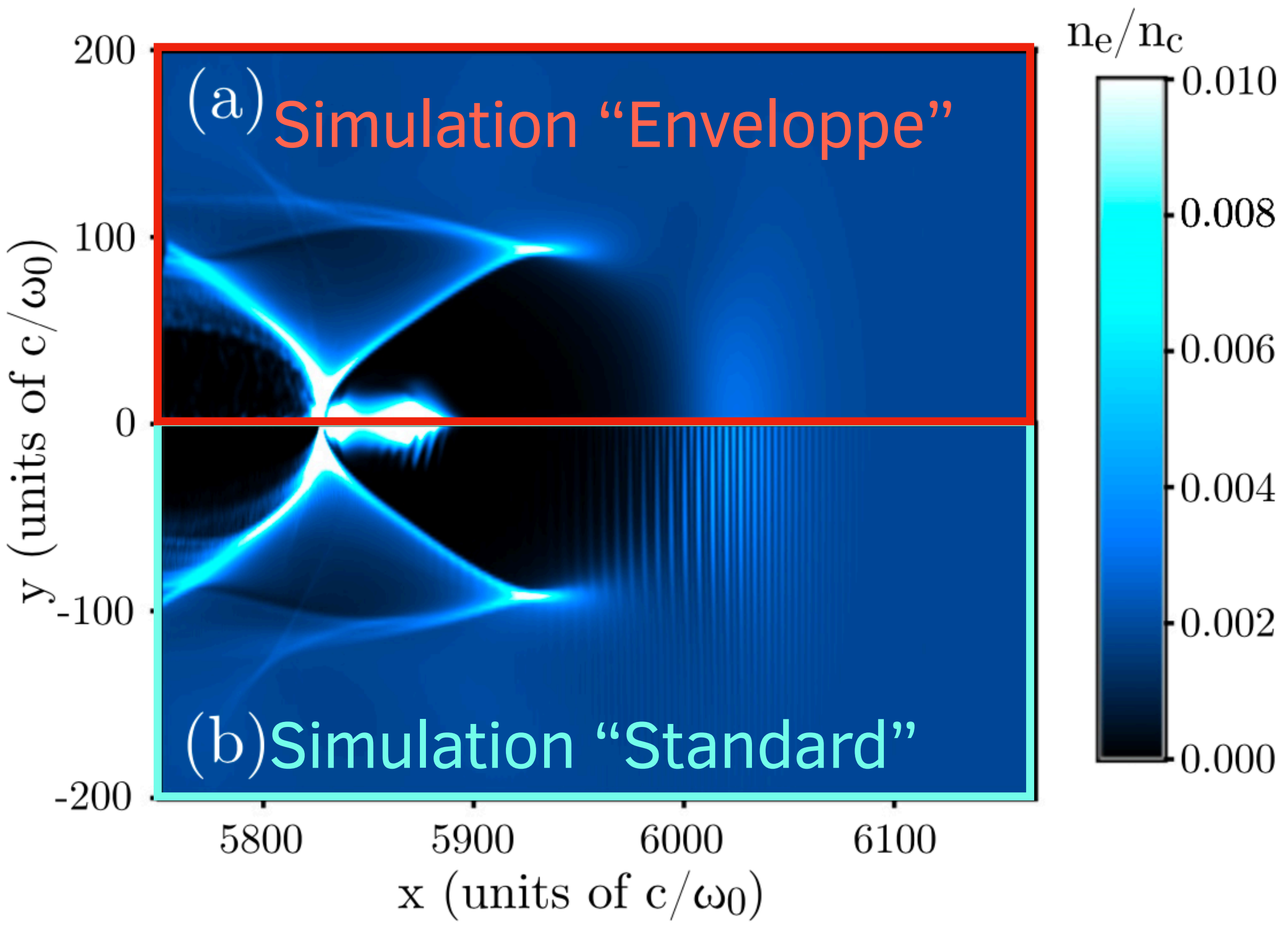
Densité électronique L=800 µm Spectres des électrons



F. Massimo et al., Phys. Rev E (2020)

Ionisation tunnel enveloppe: validation

Densité électronique L=800 µm



Paramètres du faisceau accéléré:

Paramètre en output	Standard	Enveloppe, 1 ppc
Charge [pC]	175	179
Emittance norm. y,z [mm-mrad]	3.9, 1.2	4.0, 1.2
Énergie moyenne [MeV], Dispersion en énergie [%]	90.2, 11.91	86.9, 11.52

558k minutes VS **30 minutes**

F. Massimo et al., Phys. Rev E (2020)

Ionisation enveloppe: performances

Géometrie cylindrique,
propagation dans le plasma + accélération d'électrons,
L=800 μm

558k minutes-coeur — Simulation "Standard"

30 minutes-coeur — Simulation Enveloppe

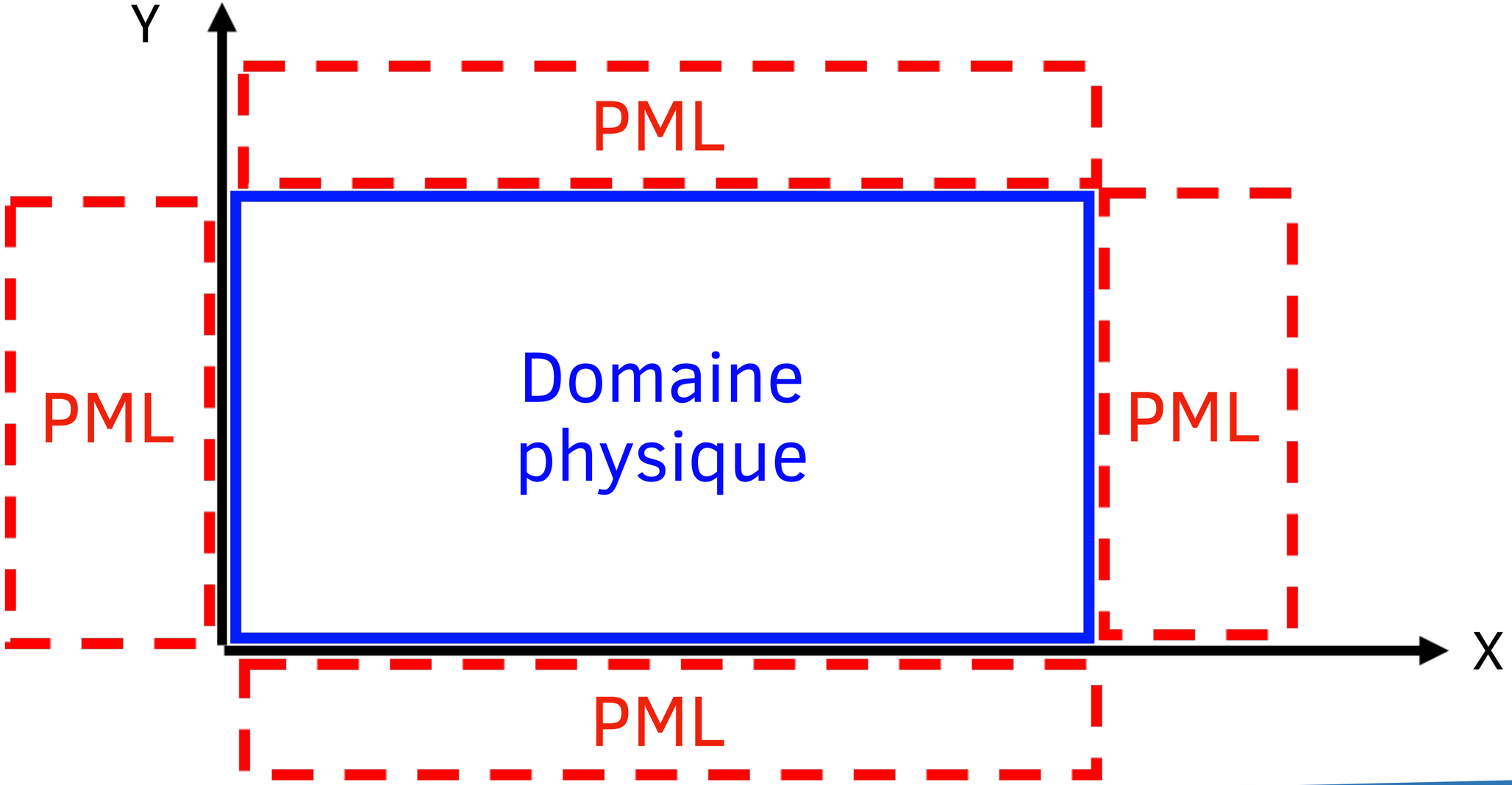
→ Ressources pour le résultat

F. Massimo et al., Phys. Rev E (2020)

Gain en temps typiques: ~10^3

Perfectly Matched Layer (PML): concept

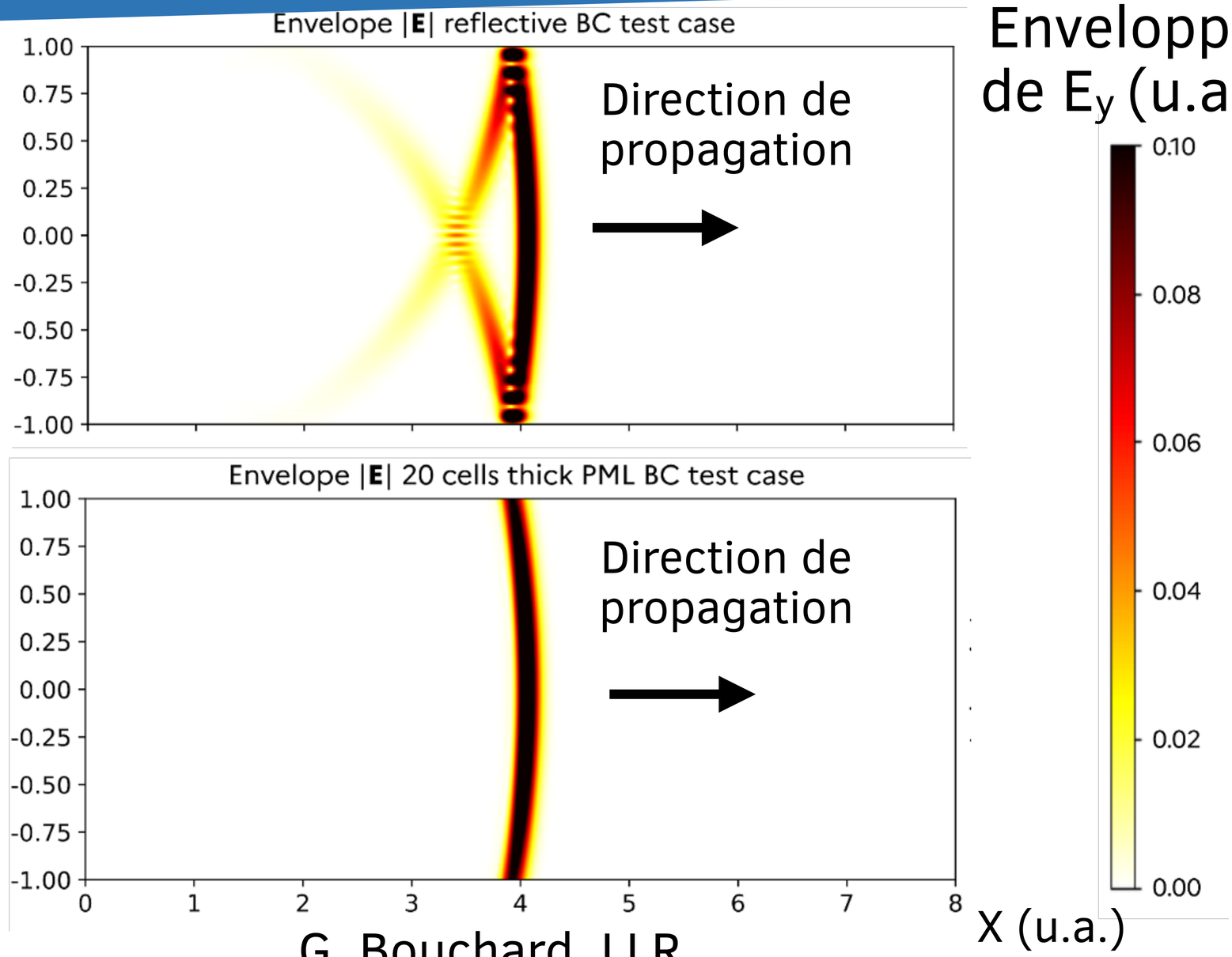
PML: milieu fictif parfaitement absorbant



Perfectly Matched Layer pour l'enveloppe

Sans PML

Avec PML

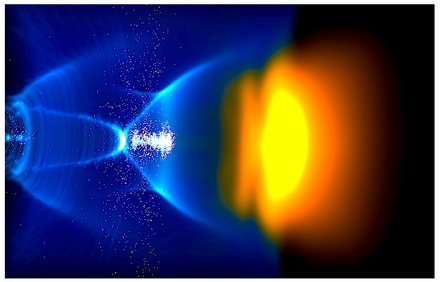


G. Bouchard, LLR

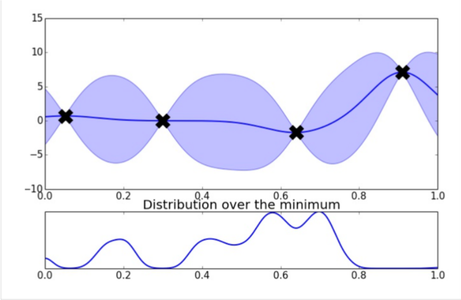
Dimensionnement d'expériences par Machine Learning

~10^2-10^3 Simulations
avec enveloppe cylindrique

Une (/ou plusieurs)
simulation(s) PIC rapides

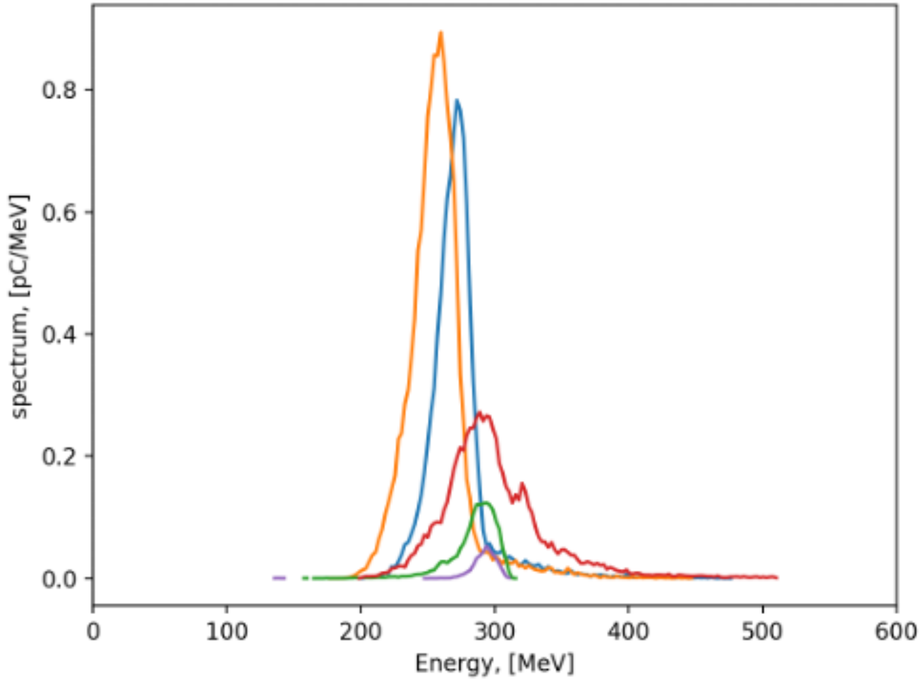


Analyse des résultats
de la (des) simulation(s)



Algorithme d'optimisation
(e.g. Optimisation bayesienne, CMA-ES,
Particle Swarm Optimisation)

Spectres optimisés



P. Drobniak and IJClab, 2021

Voir aussi Présentation K. Cassou jeudi 12

IJCLab Irène Joliot-Curie Laboratoire de Physique des 2 Infinis

PALLAS

Conclusions

- Modèle d'enveloppe: une ligne de recherche très active pour décrire la LWFA
- Modèle d'ionisation enveloppe et conditions au bord parfaitement absorbantes introduits par Smilei
- Résultats précis avec une réduction de plusieurs ordres de grandeur (10^3-10^4) des ressources nécessaires
- Applications en cours pour les expériences PALLAS et LWFA APOLLON
- Simulations LWFA avec injection par ionisation assez rapides pour le dimensionnement par Machine Learning des expériences

Développements futurs

- Améliorer la rapidité des simulations enveloppe avec ionisation avec plusieurs techniques: Perfectly Matched Layer, Vectorisation SIMD, portage sur GPU, modèle hybride …

Remerciements

- **Développeurs de Smilei**

A. Beck, G. Bouchard, J. Derouillat, M. Lobet, M. Grech, F. Pérez, T. Vinci

- **Collaboration LLR, IJClab**

A. Specka, K. Cassou, P. Drobniak, V. Kubytzkyi, S. Kazamias

- **Développeurs d'ALaDyn, QFluid**

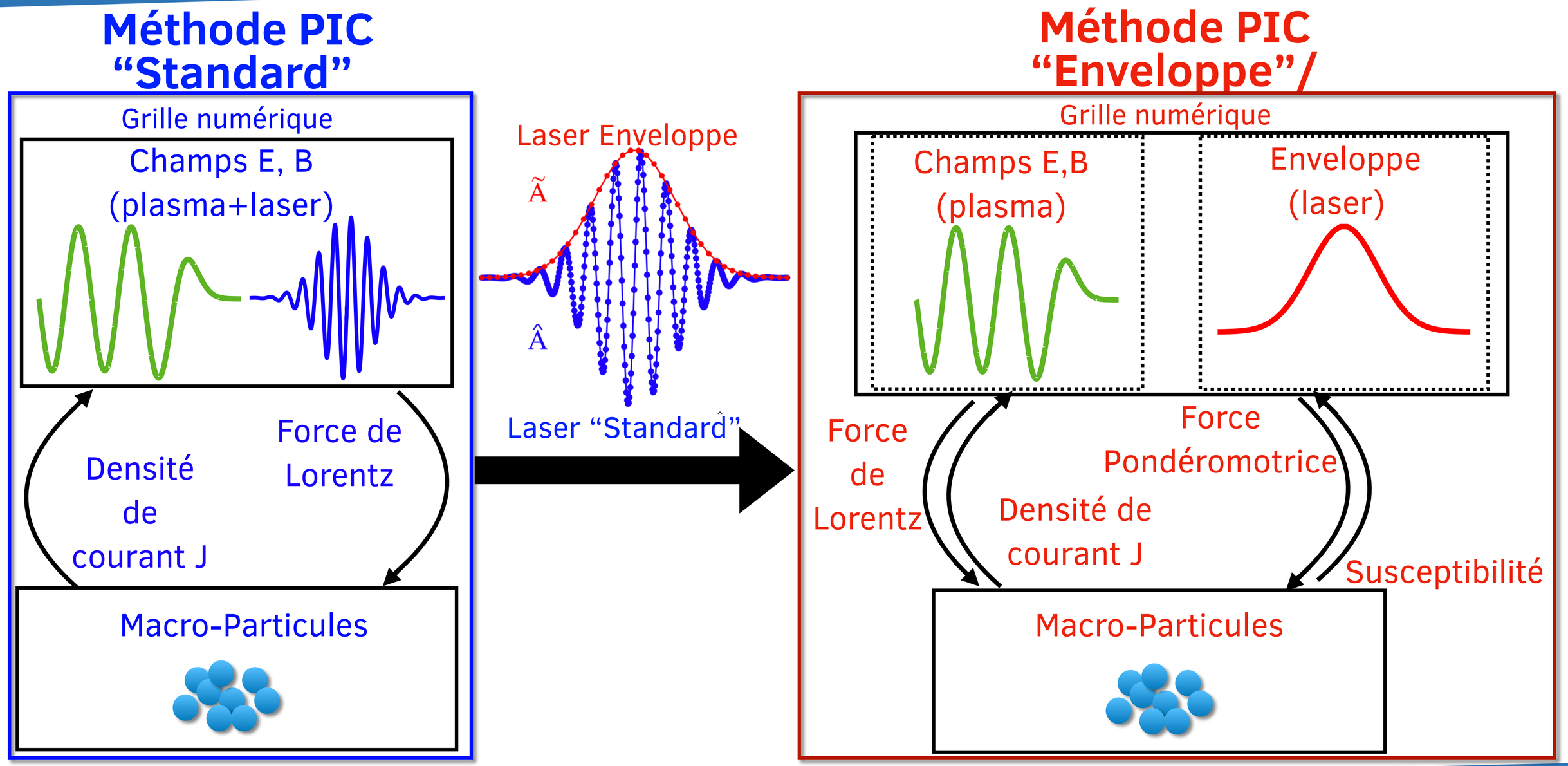
D. Terzani, P. Tomassini

- **LabEx P2IO (IN2P3), GENCI (project 2019-A0050510062),**

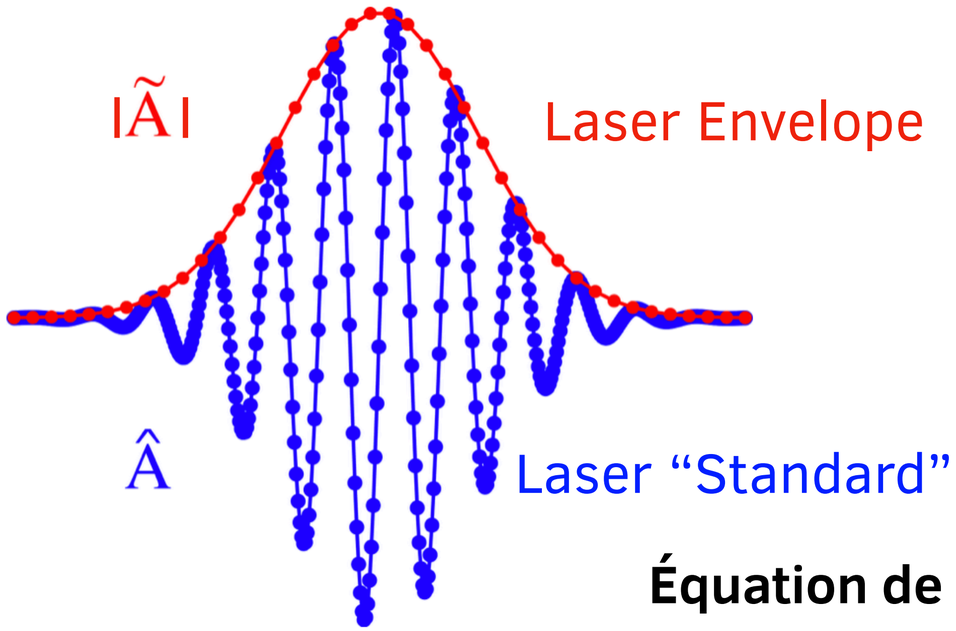
Ingénieurs du TGCC et CINES, LLR-LSI

Slides supplementaries

Modèle d'enveloppe dans Smilei



Modèle d'enveloppe: équation d'enveloppe



Hypothèse:

$$\hat{A}(\mathbf{x},t) = Re\left[\boxed{\tilde{A}(\mathbf{x},t)}e^{ik_0(x-ct)}\right]$$

Enveloppe complexe du Laser

+

Équation de d'Alembert:

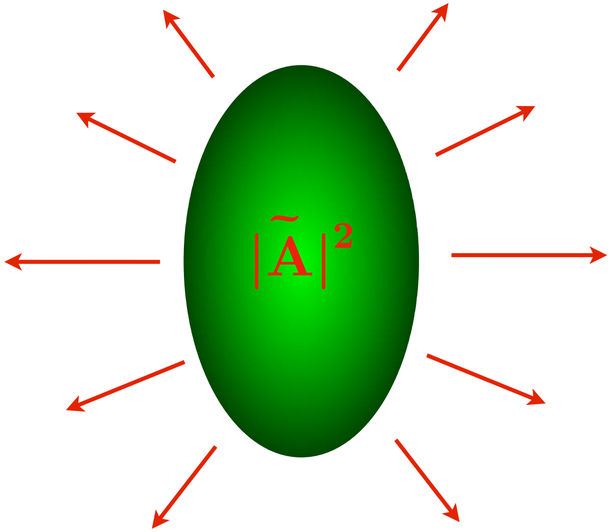
$$\nabla^2\hat{A} - \partial_t^2\hat{A} = -\hat{J}$$

Équation d'Enveloppe:

Susceptibilité Du Plasma

$$\nabla^2\tilde{A} + 2i\left(\partial_x\tilde{A} + \partial_t\tilde{A}\right) - \partial_t^2\tilde{A} = \boxed{\chi}\tilde{A}$$

Modèle d'enveloppe: équations de mouvement



F pondéromotrice

Équations du mouvement des électrons:

$$\frac{d\bar{\mathbf{x}}_p}{dt} = \frac{\bar{\mathbf{u}}_\mathbf{p}}{\bar{\gamma}_p}$$

$$\frac{d\bar{\mathbf{u}}_p}{dt} = \boxed{\left(\bar{\mathbf{E}}_p + \frac{\bar{\mathbf{u}}_p}{\bar{\gamma}_p} \times \bar{\mathbf{B}}_p\right)} \boxed{- \frac{1}{4\bar{\gamma}_p} \nabla \left(|\tilde{A}_p|^2\right)}$$

Force de Lorentz (Champs du

Force Pondéromotrice (Enveloppe du laser)

B. Quesnel and P. Mora, Physics Review E 58,

Ionisation ADK dans un code PIC “Standard”

Pour chaque ion “ionisable”:

- calculer la probabilité d’ionisation avec un taux d’ionisation, e.g. modèle d’ionisation tunnel ADK

$$\Gamma_{\mathrm{ADK,DC}} = A_{n^\star,l^\star}\, B_{l,|m|}\, I_p \left(\frac{2(2I_p)^{3/2}}{\boxed{|E|}} \right)^{2n^\star-|m|-1} \exp\left(-\frac{2(2I_p)^{3/2}}{\boxed{3|E|}} \right)$$

Taux d’ionisation Tunnel ADK

E: champ électrique

- si un électron est issu de l’ionisation:
  - initialiser la position de l’électron (typiquement $\mathbf{x}_{\text{électron}}=\mathbf{x}_{\text{ion}}$)
  - Initialiser l’impulsion de l’électron (typiquement $\mathbf{p}_{\text{électron}}= 0$ ou $\mathbf{p}_{\text{électron}}=\mathbf{p}_{\text{ion}}$)
  - Mettre à jour la charge de l’ion: $Q_{\text{ion}}+=1*e$

L’ionisation a lieu typiquement dans les pics du champ E du laser

Problème: ionisation tunnel dans un modèle d’enveloppe?

Ionisation ADK dans un code PIC “Enveloppe”

- Taux d’ionisation moyenné sur les cycles optiques du laser (M. Chen et al., J. Comput. Phys. 2013)
- Initialisation des impulsions transverses des électrons (P. Tomassini et al., Phys. Plasmas 2017)

$$\mathbf{p}_\perp - \mathbf{A}_\perp = \text{const} \longrightarrow \mathbf{p}_\perp = \mathbf{A}_\perp - \mathbf{A}_{\perp, t_{\text{ioniz}}}$$

$$|\mathbf{p}_{\perp,0}| = \begin{cases} p_{\text{pol},\,0} \leftarrow N(0, \sigma_{p_\perp}) & \text{Polarisation linéaire} \\ |\tilde{A}|/\sqrt{2} & \text{Polarisation circulaire} \end{cases}$$

→ C. B. Schroeder et al., Phys. Rev Accel. Beams (2014)

Déscription précise en régime non-relativiste ($a_0<1$)

Ionisation ADK dans un code PIC “Enveloppe”

- Taux d’ionisation moyenné sur les cycles optiques du laser (M. Chen et al., J. Comput. Phys., 2013)
- Initialisation des impulsions transverses des électrons (P. Tomassini et al., Phys. Plasmas 2017)
- Initialisation des impulsions longitudinales des électrons (F. Massimo et al., Phys. Rev. E 2020)

$$p_x = \frac{|\mathbf{p}_\perp|^2}{2} = \frac{1}{2}|\mathbf{A}_\perp - \mathbf{A}_{\perp,t_{\mathrm{ioniz}}}|^2$$

$$p_{x,0} = \begin{cases} |\tilde{A}|^2/4 + p_{\mathrm{pol},0}^2/2 \\ |\tilde{A}|^2/2 \end{cases}$$

Déscription précise
aussi en régime relativiste ($a_0>1$)

Benchmark: Accélération LWFA avec injection par ionisation

Impulsion Laser:

a_0=2.5 (polarisation linéaire)

λ_0=0.8 µm

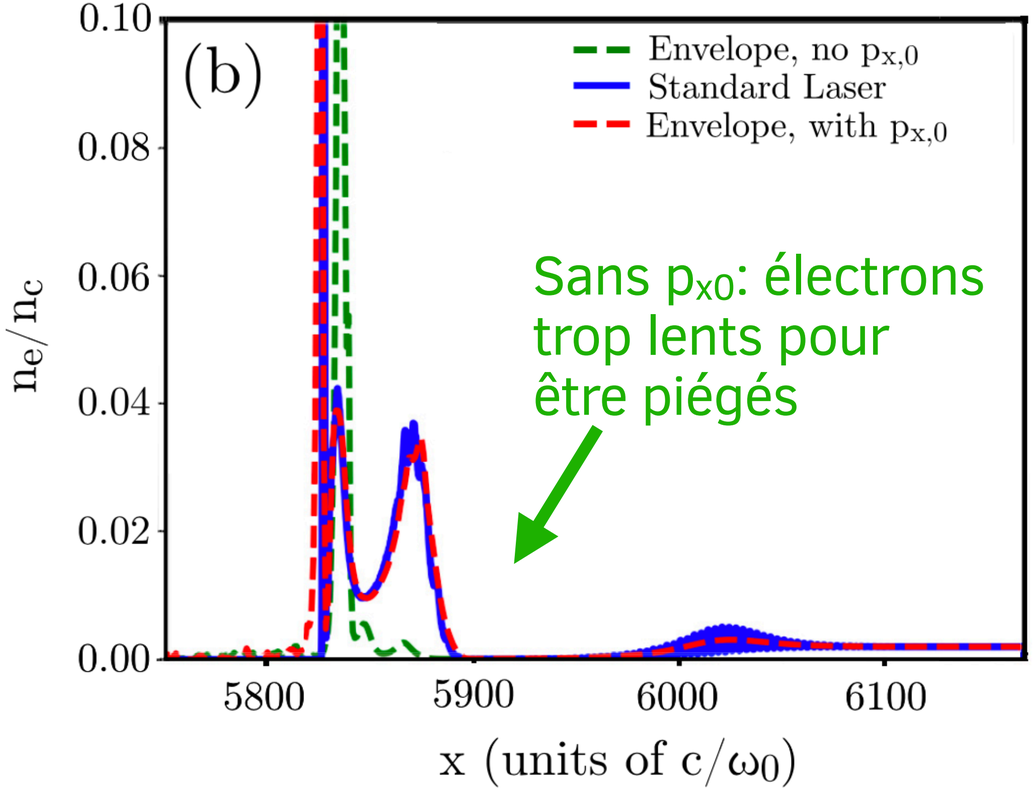
w_0=19 µm

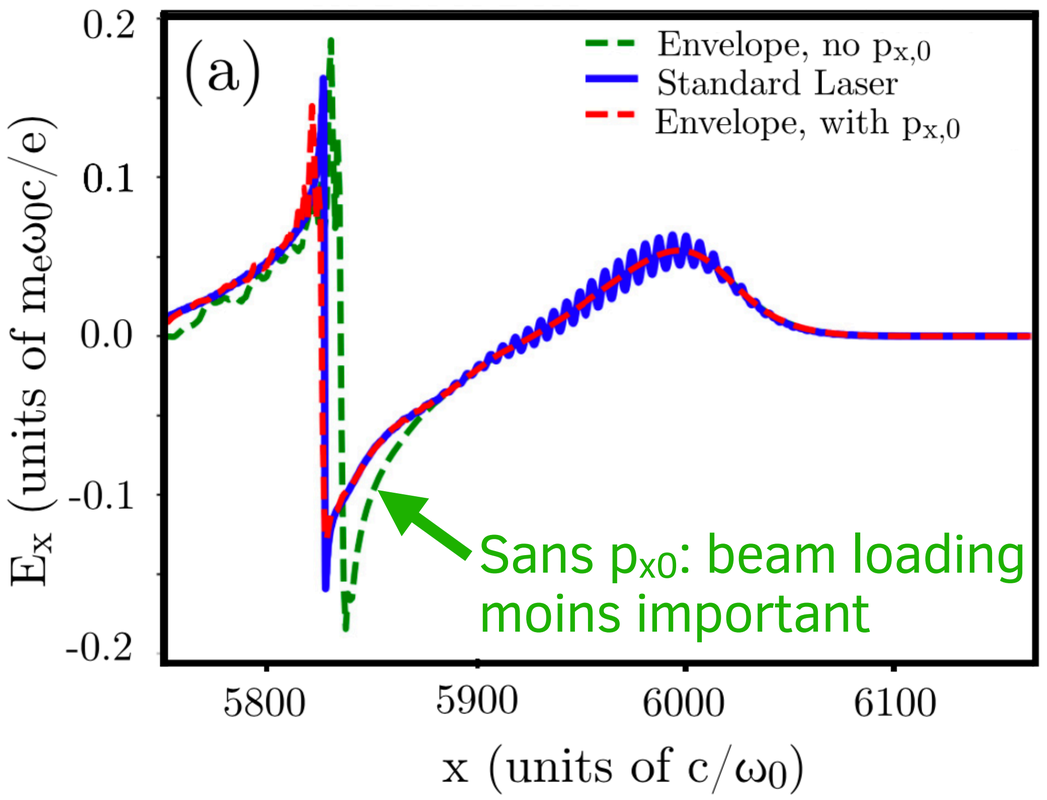
T_{FWHM}=33 fs

Cible (99%He +1%N^{5+}):

n=3.4*10^8cm^{-3}

L=800 µm





F. Massimo et al., Phys. Rev E (2020)

Benchmark: Accélération LWFA avec injection par ionisation

Impulsion Laser:

a_0=2.5 (polarisation linéaire)

λ_0=0.8 µm

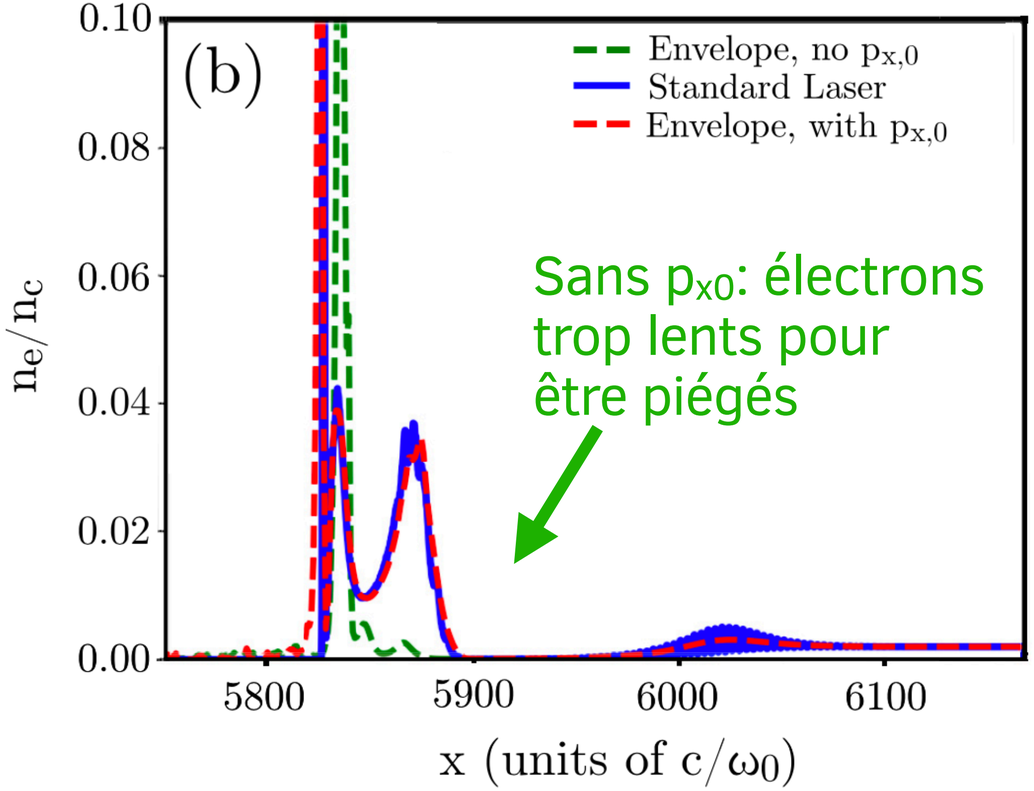
w_0=19 µm

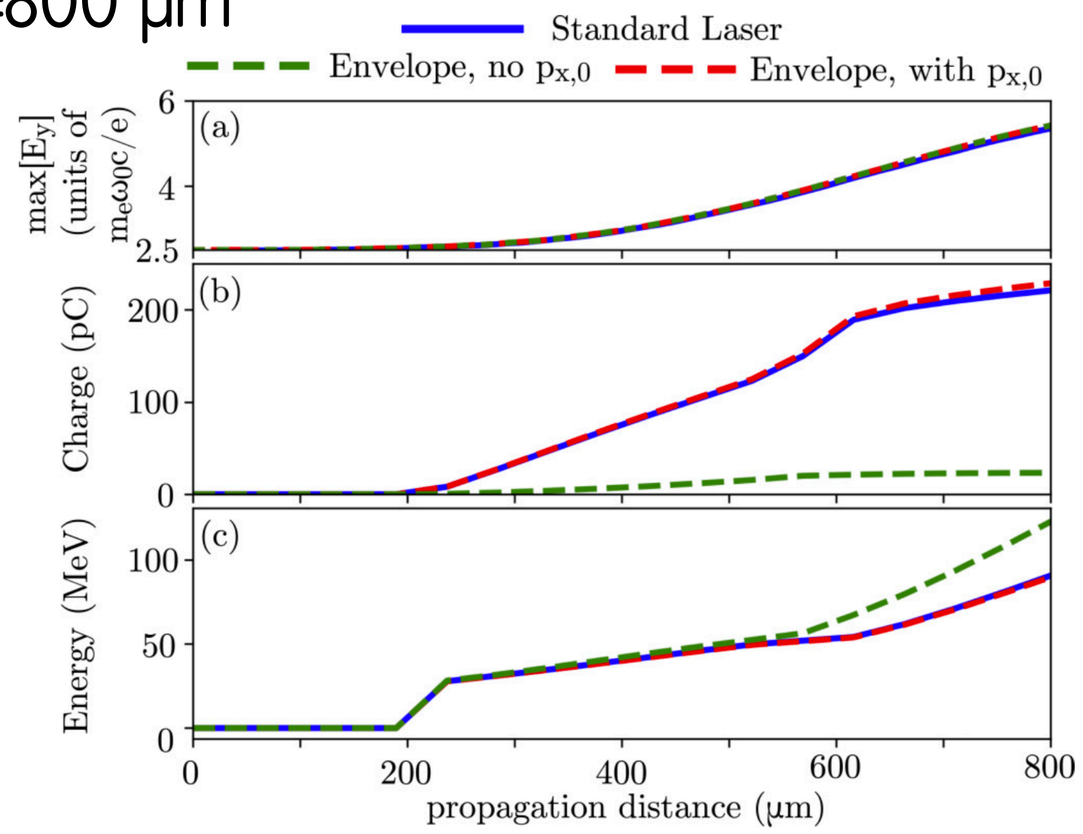
T_{FWHM}=33 fs

Cible (99%He +1%N^{5+}):

n=3.4*10^8cm^{-3}

L=800 µm





F. Massimo et al., Phys. Rev E (2020)