

Les Journées
accélérateurs

Roscoff

du 3 au 6 octobre 2023

Fil rouge des Journées 2023 :
travailler ensemble



Développements récents dans la modélisation pour l'accélération laser-plasma d'électrons

F. Massimo

Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas
CNRS Université Paris-Saclay, Orsay, France

Brigitte Cros, Lewis Dickson, Ioaquin Moulanier, Gilles Maynard



Accélération plasma → projets à grande échelle et déploiement de la stratégie de R&D



Projet EuPRAXIA:

<https://www.eupraxia-facility.org/projects>



Projet AWAKE au CERN:

<https://home.cern/science/accelerators/awake>



Groupe d'étude ALEGRO:

<https://indico.cern.ch/event/1193719/>



“European Strategy for Particle Physics (ESPP)”:

<https://arxiv.org/abs/2201.07895>



Accélération multi-étages: découplage de l'injection et de l'accélération pour améliorer la qualité des faisceaux et concevoir un accélérateur

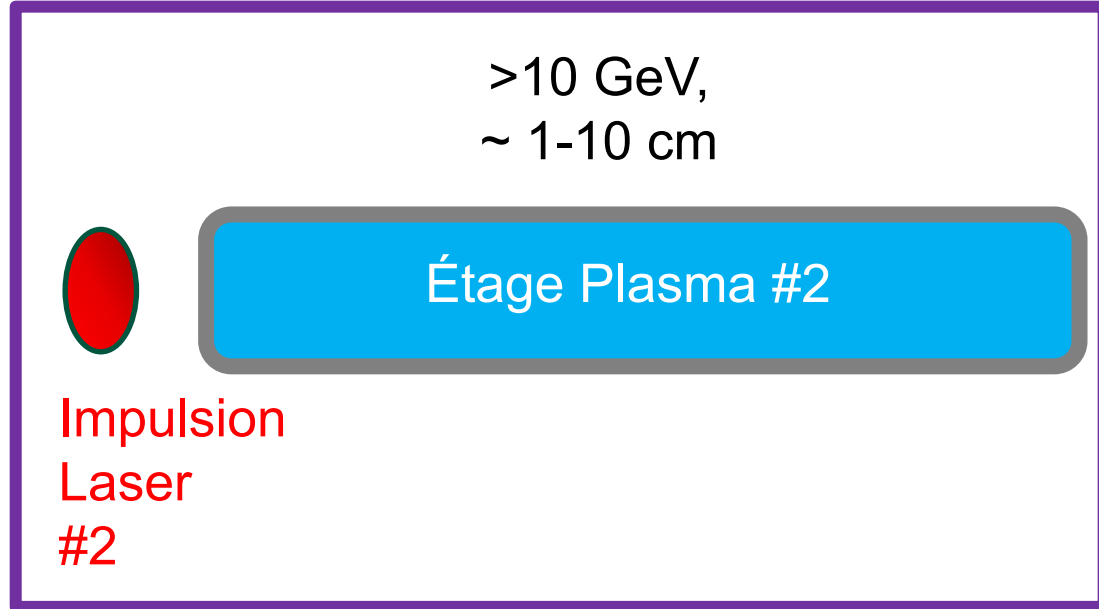
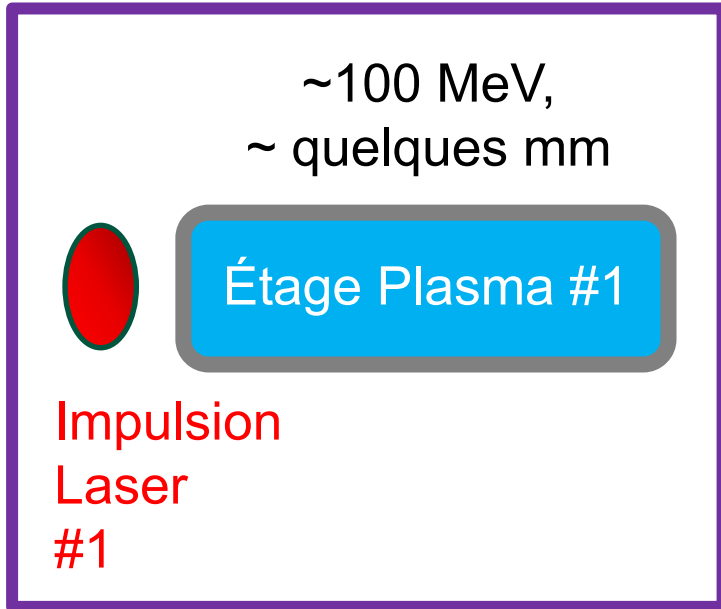


Étage injecteur:

Production de faisceaux d'électrons
de haute qualité

Étage accélérateur:

Augmenter l'énergie des faisceaux tout en
maintenant leur haute qualité



Modélisation de l'étage injecteur: un sujet à haute priorité



Étage injecteur:

Production de faisceaux d'électrons de haute qualité

Étage accélérateur:

Augmenter l'énergie des faisceaux tout en maintenant leur haute qualité

~100 MeV,
~ quelques mm



Étage Plasma #1

Impulsion
Laser
#1

>10 GeV,
~ 1-10 cm



Étage Plasma #2

Impulsion
Laser
#2



Plan de la présentation



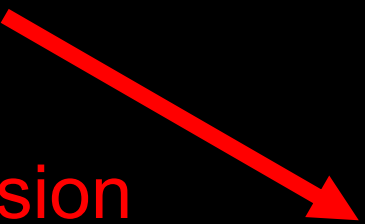
Le schéma d'accélération:

- Accélération par sillage laser plasma (“Laser Wakefield Acceleration” LWFA) avec injection par ionization

Méthodes and Résultats

- Reconstruction du champ laser pour des simulations réalistes
- Modèle d'enveloppe pour des simulations rapides
- Génération de jeux de données et apprentissage automatique

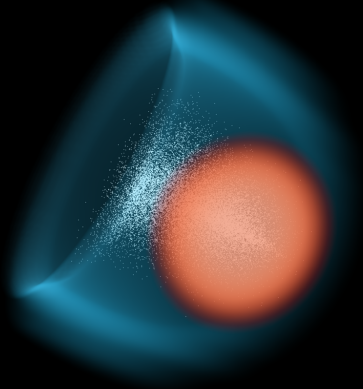




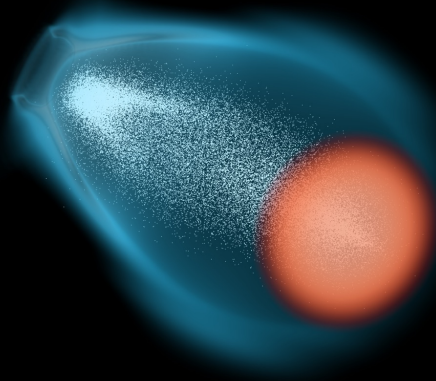
Impulsion
laser intense
(enveloppe
du champ)

Direction
de propagation
vers le gaz

Le laser ionise l'hydrogène et l'azote dopant



Une cavité accélératrice se forme ...

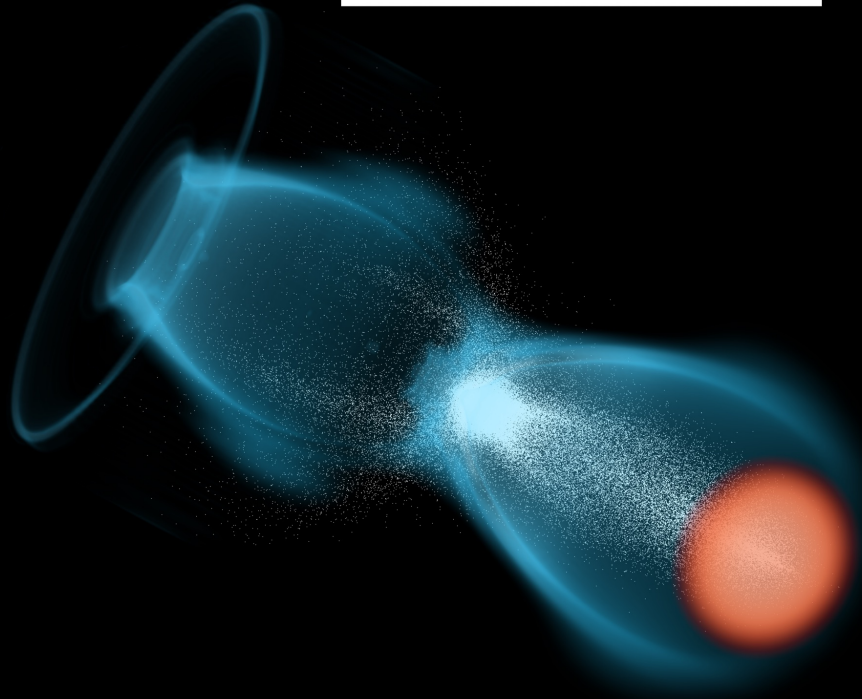


Électrons de l'azote

Impulsion laser intense (enveloppe)

Pics de densité électronique de l'hydrogène

Le laser ionise les couches internes de l'azote dans la cavité



Électrons de l'azote

Impulsion laser intense (enveloppe)

Pics de densité électronique de l'hydrogène

Les électrons accélérés se propagent avec
la cavité accélératrice derrière le laser



Électrons de l'azote

Impulsion laser intense (enveloppe)

Pics de densité électronique de l'hydrogène

Accélération par sillage laser-plasma avec injection par ionisation



Électrons de l'azote

Impulsion laser intense (enveloppe)

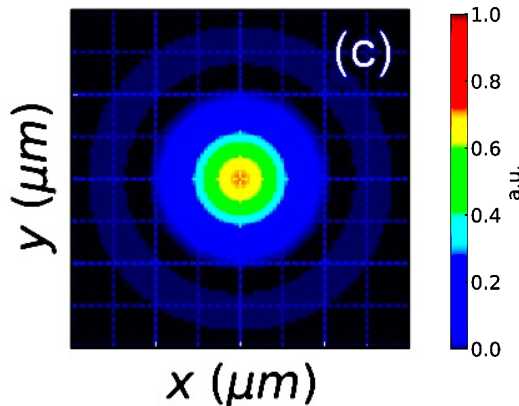
Pics de densité électronique de l'hydrogène

Maîtrise du laser = Prédiction de la physique qu'il déclenche

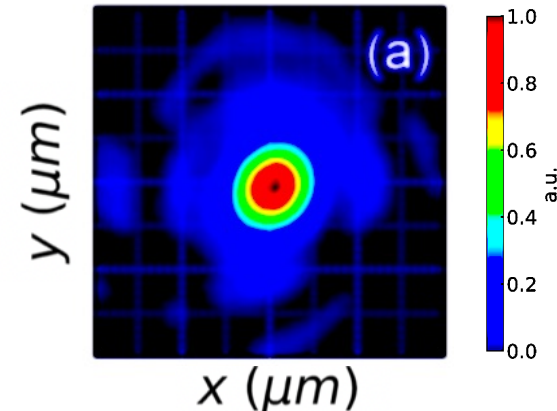
Laser:

- ionise le gaz
- pilote les ondes plasma
- libère les électrons à accélérer

Algorithmes de reconstruction rapide
du champ laser développés au LPGP
pour des simulations réalistes



- Simulations avec un laser "idéal" (symétrique) :
- plus simples et rapides à tourner
 - plus simples et rapides à analyser
 - moins fiables



- Simulations avec un laser "réaliste" (asymétrique) :
- plus coûteuses à tourner
 - plus complexes à analyser
 - quantitativement plus précises

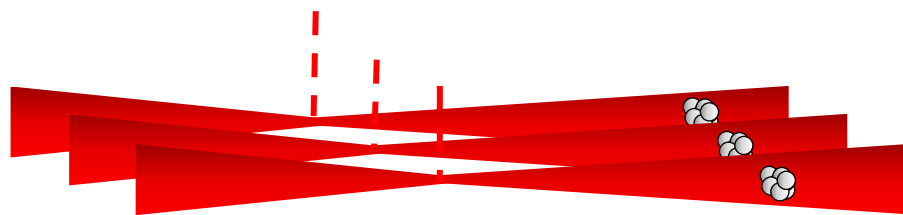
→ Voir présentation et articles d'I. Moulanier

F. Massimo, Journées Accélérateurs de la SFP2023

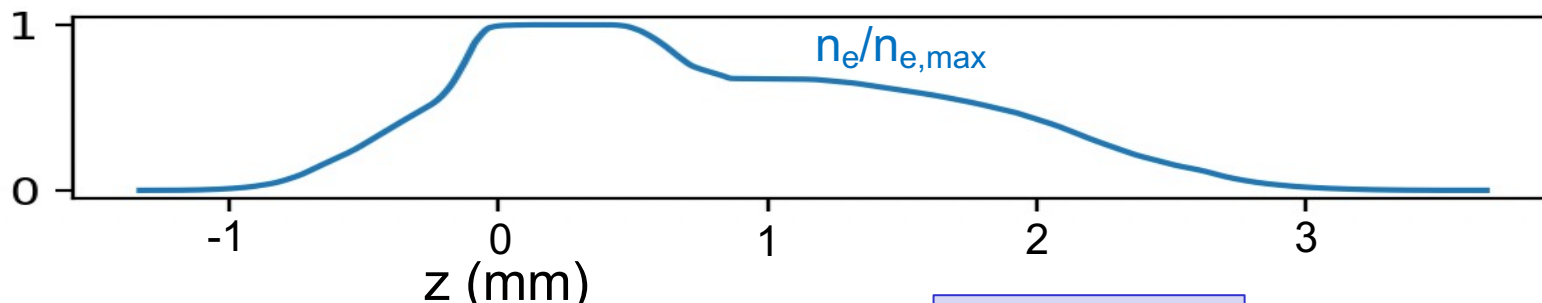
Les simulations « réalistes » permettent de retrouver la charge mesurée



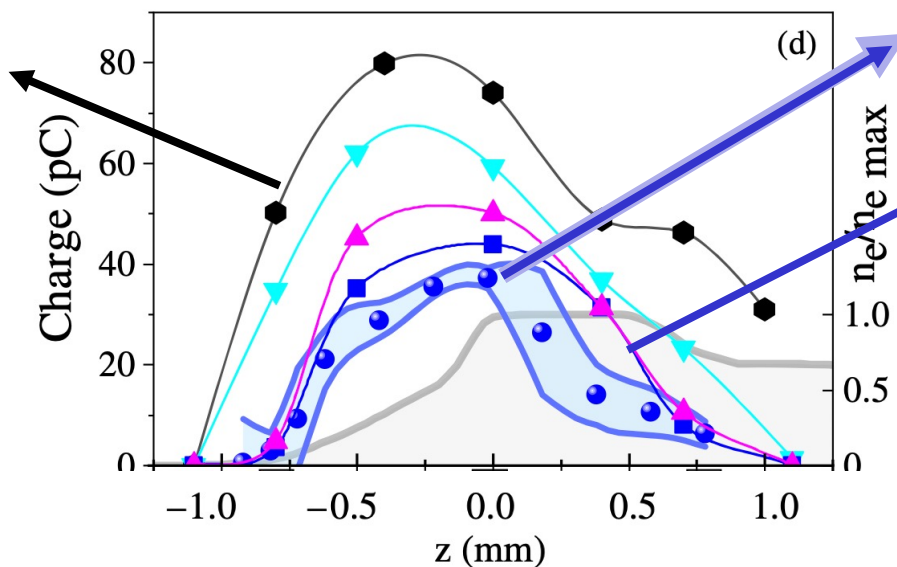
Variation du plan focal du laser



Mésure de la charge du faisceau d'électrons



Simulation avec "laser idéal"



Expérience

Simulation avec "laser réaliste"

L. Dickson et al., Phys. Rev. Accel. Beams **25**, 101301 (2023)



Smilei)

Un code “Particle in Cell” open source,
polyvalent et collaboratif

<https://smileipic.github.io/Smilei/index.html>

“User-friendly”

- En ligne: documentation, tutoriaux
- Entrées/sorties Python
- librairie de visualisation rapide
- plateforme d’enseignement
- workshop bi-annuel

Hautes Performances

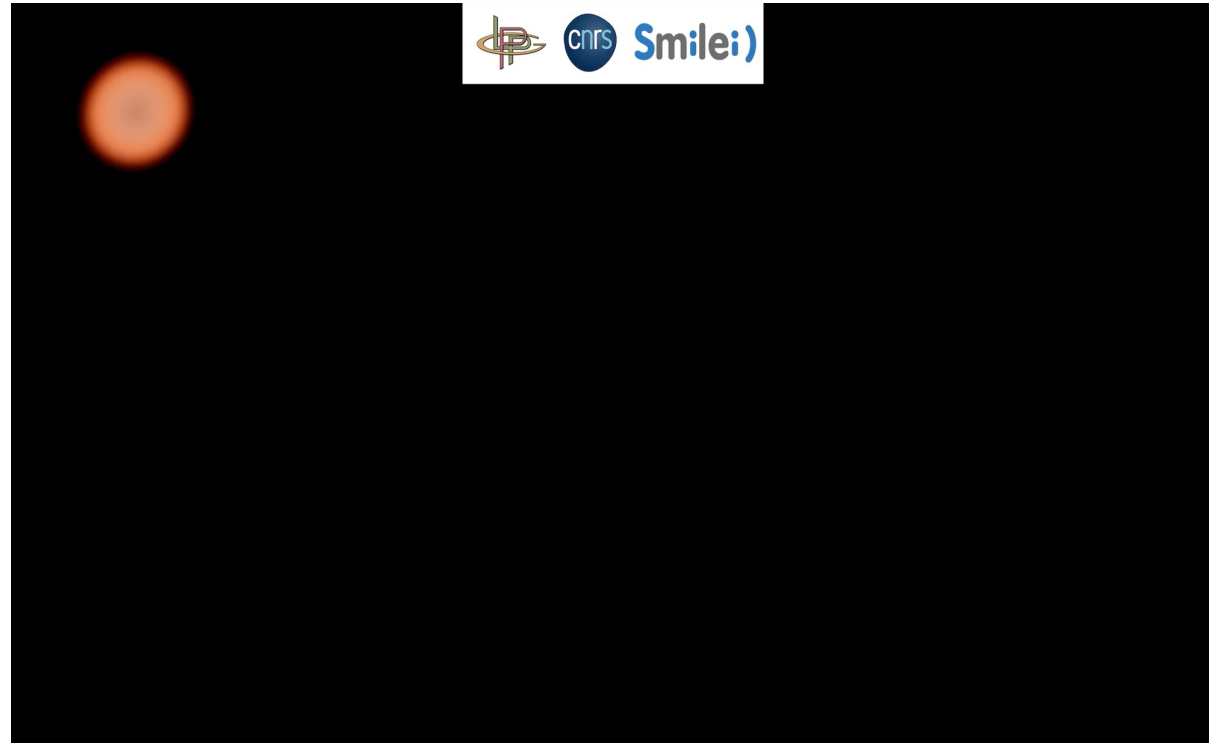
- parallelization MPI + OpenMP
- équilibrage de charge dynamique
- vectorization adaptative
- “macro-particle merging”

Multi-physique

- 1D, 2D, 3D, géométrie quasi-3D
- ionisation, collisions
- QED avec champs forts
- modèle d’enveloppe du laser
- ionization ADK avec envelope
- initialization de faisceaux de particules relativistes
- interpolation B-TIS3 anti-Cherenkov

Haute Qualité

- développeurs: experts de physique et de calcul à hautes performances
- integration continue
- logiciel “open source” sur GitHub
- standard OpenPMD

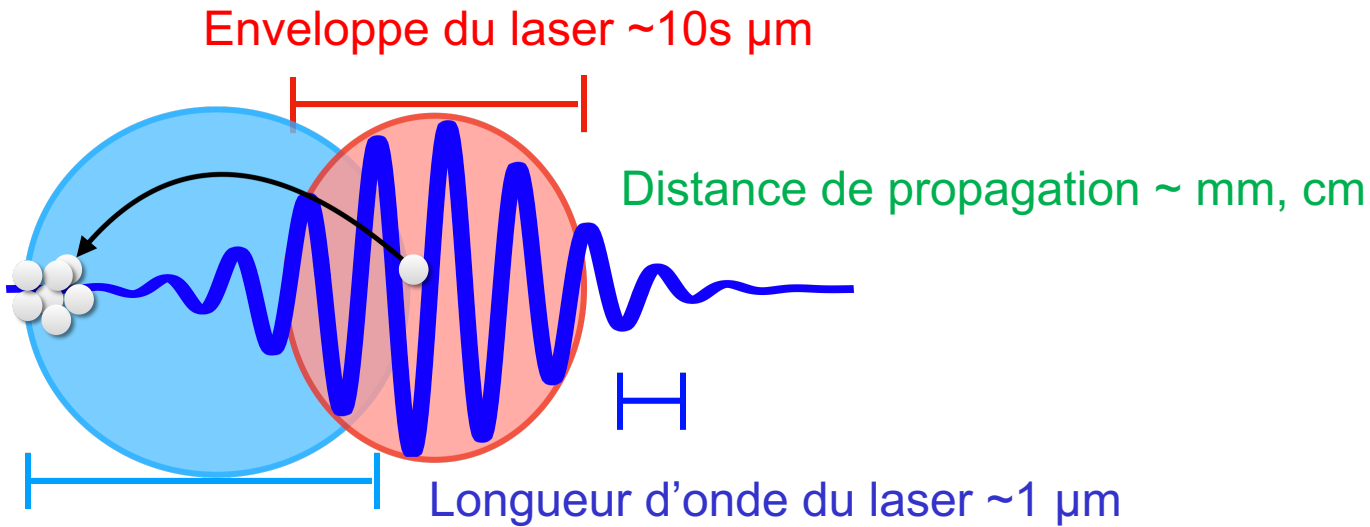


**Prochain Workshop Smilei Workshop:
Prague, 8-10 Nov 2023**

<https://indico.math.cnrs.fr/event/9577/>

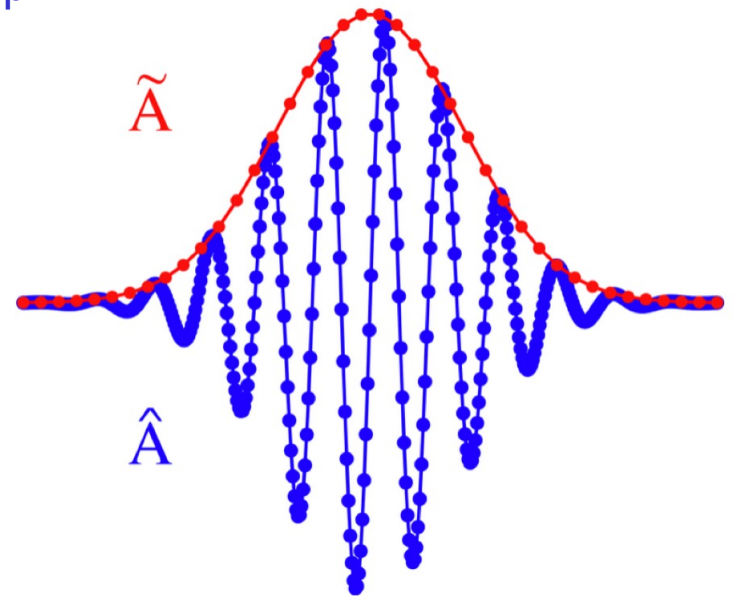


Modélisation avec un modèle d'enveloppe une approche moyennée pour des simulations rapides

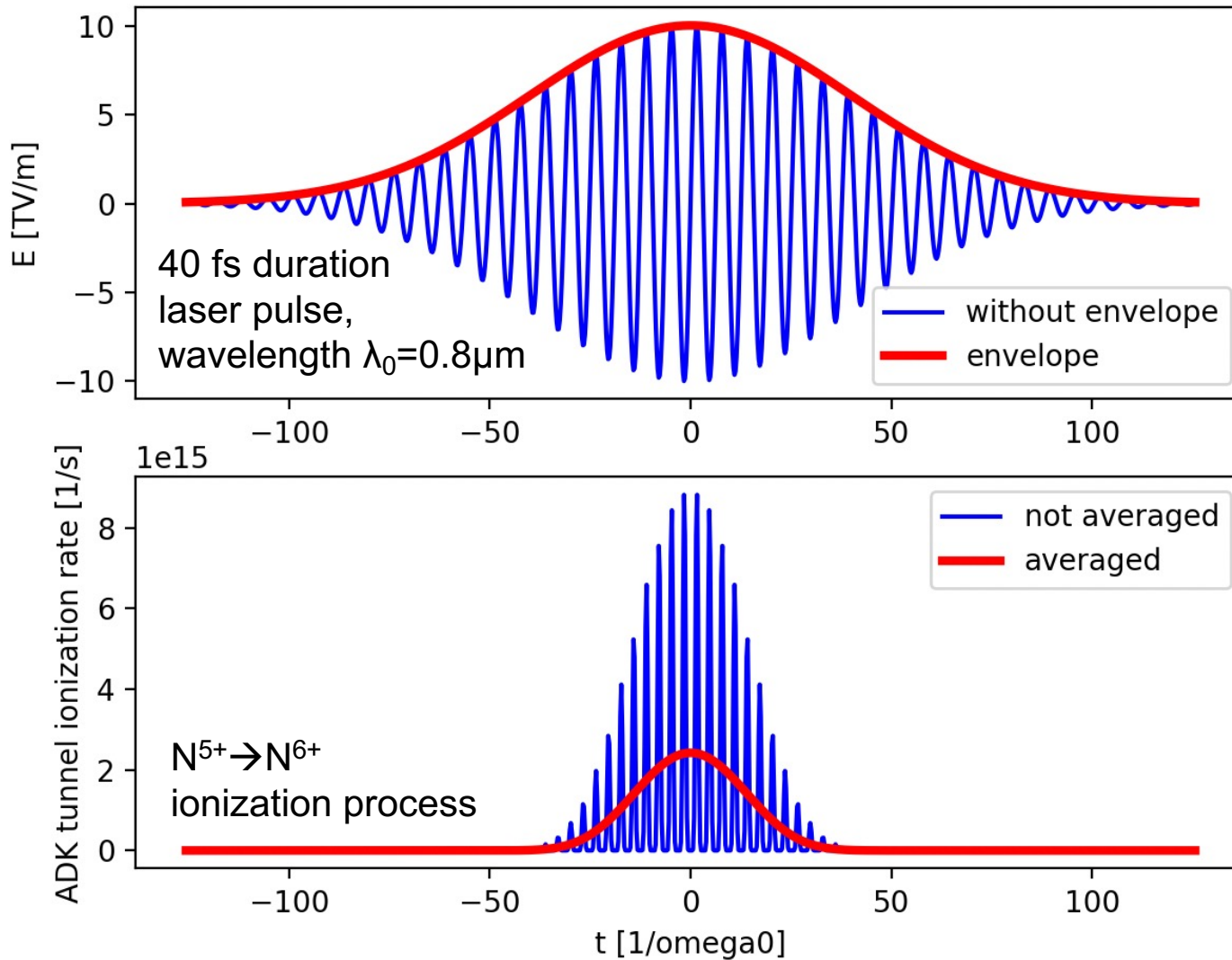


Cavité accélératrice $\sim 10\text{s } \mu\text{m}$

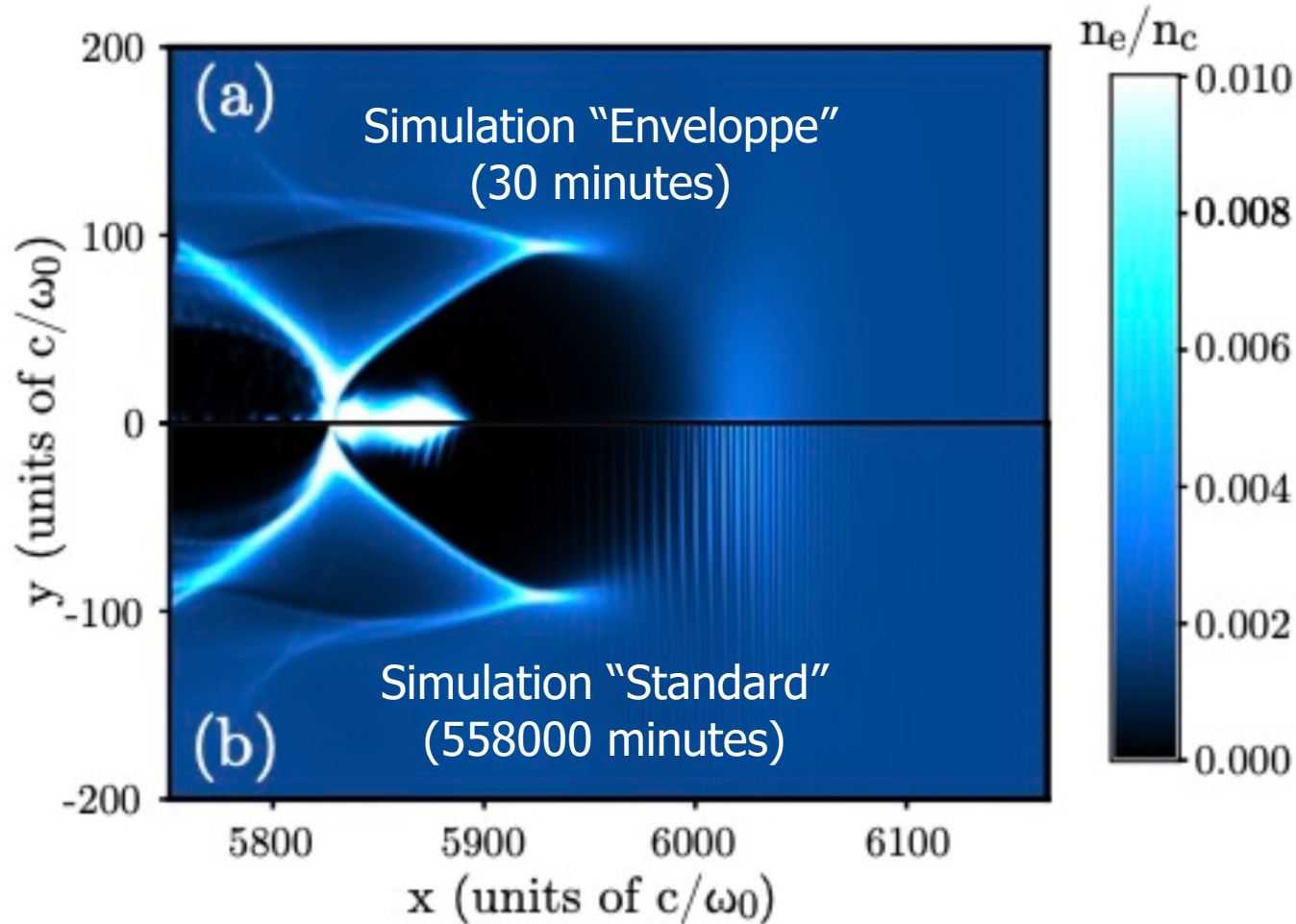
$$\frac{\text{Resolution laser "enveloppe"}}{\text{Resolution laser "standard"}} = 10$$



Ionisation tunnel avec un modèle d'enveloppe: une moyenne sur les cycles optiques de l'interaction laser-plasma



Modélisation rapide de l'ionisation avec un modèle d'enveloppe

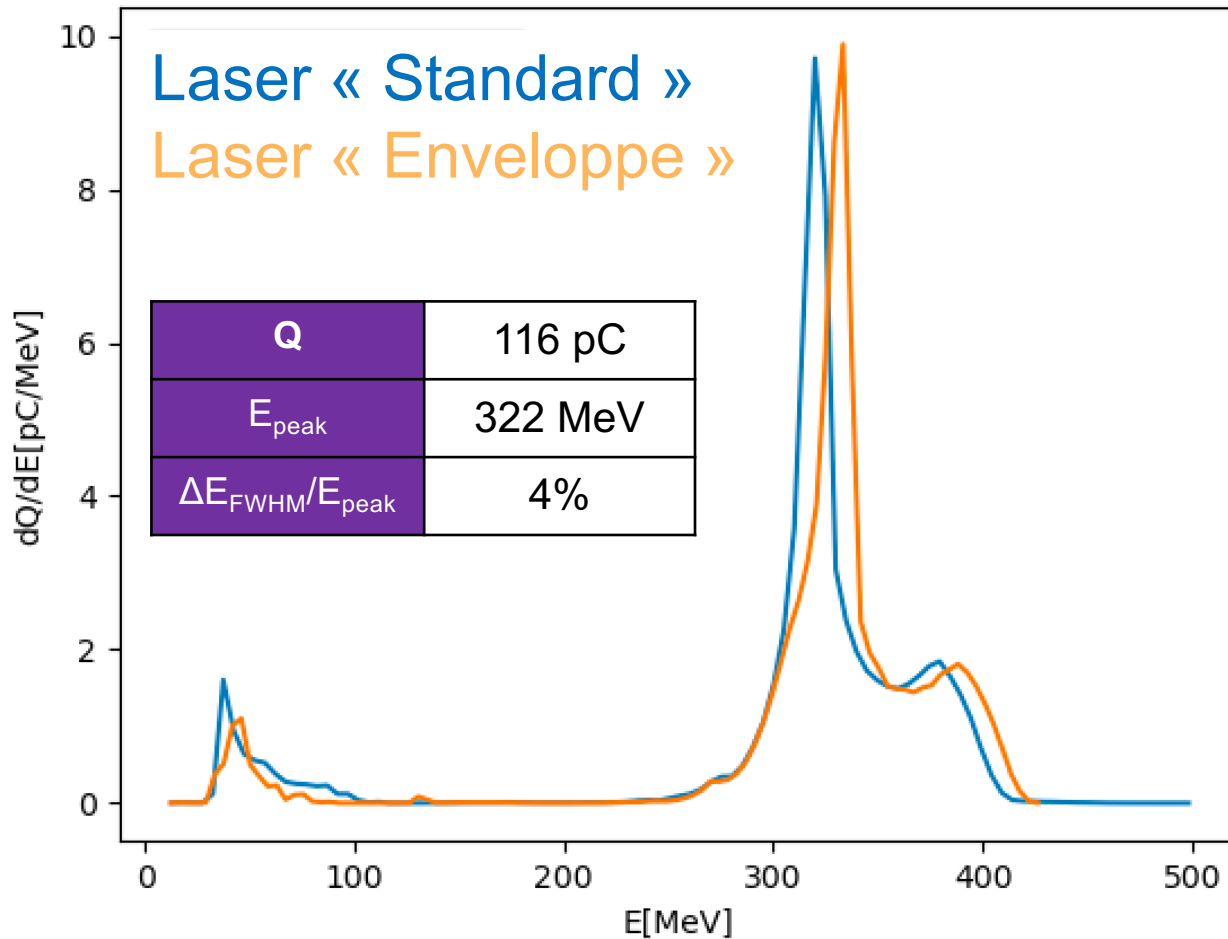


F. Massimo et al., Phys. Rev. E **102**, 033204 (2023)

F. Massimo, Journées Accélérateurs de la SFP2023



Modélisation enveloppe de l'injection par ionisation → études préliminaires rapides et précises



Apprentissage automatique → nouvelles techniques pour explorer l'espace de paramètres de la LWFA



Plus de 10 paramètres à faire varier, e.g. énergie du laser, densité du plasma, ...

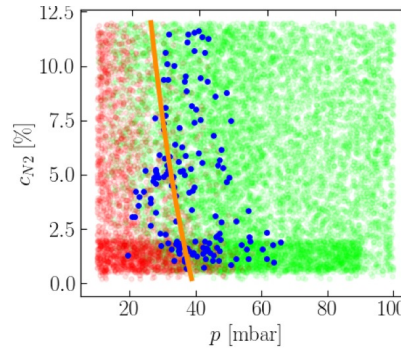
Jeux de données générés avec des simulations rapides, e.g. modèle d'enveloppe



Modèles de substitution avec l'apprentissage automatique

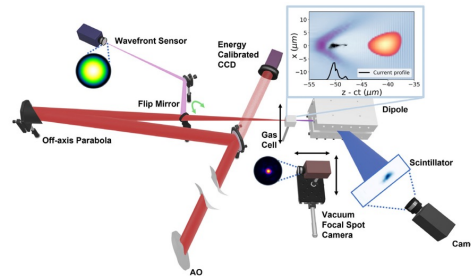
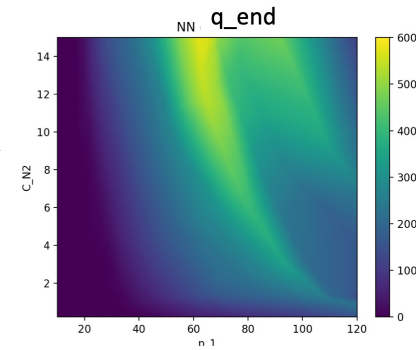


Compréhension de la physique
Conception rapide des expériences



P. Drobniak et al.,
Phys. Rev. Accel. Beams (2023)

V. Kubytskyi, Journée Modélisation LWFA
du GdR APPEL
<https://indico.ijclab.in2p3.fr/event/9271/>



L. Dickson et al.,
Phys. Rev. Accel. Beams **25**,
101301 (2023)

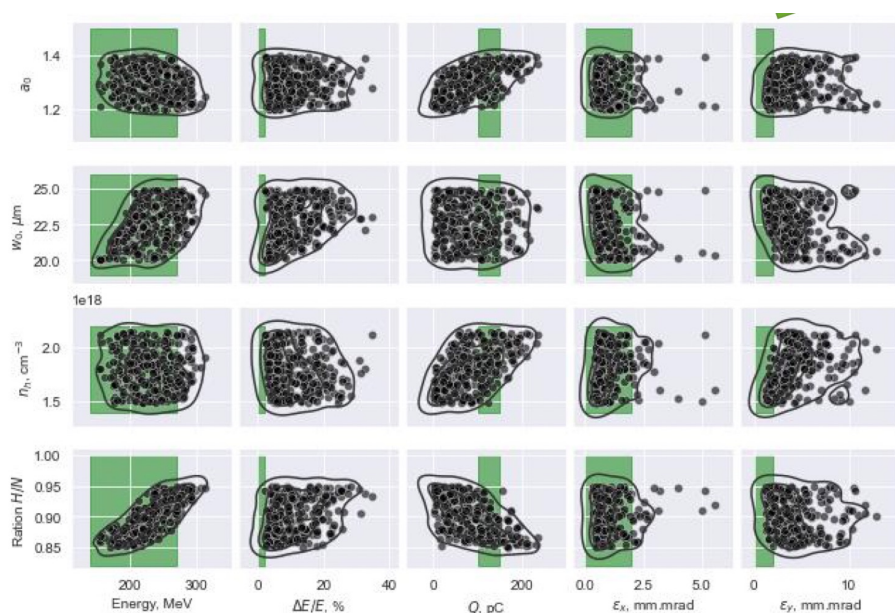


Random scan dataset generation for machine learning through fast numerical modeling



D. Minenna et al.,
EuroNNAc Special Topics Workshop
(2022)

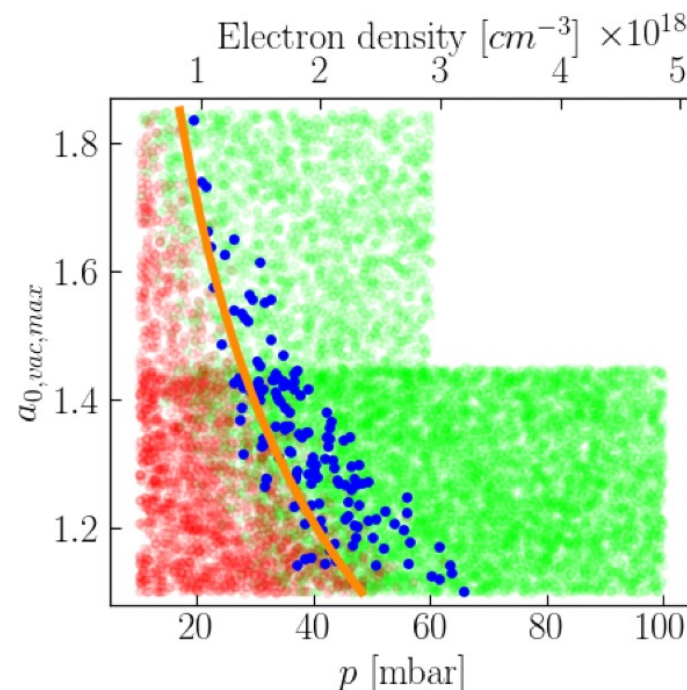
16 Paramètres variés



Voir présentation
de S. Marini's!

P. Drobniak et al.,
Phys. Rev. Accel. Beams (2023)

4 Paramètres variés



Voir présentation de
G. Kane!



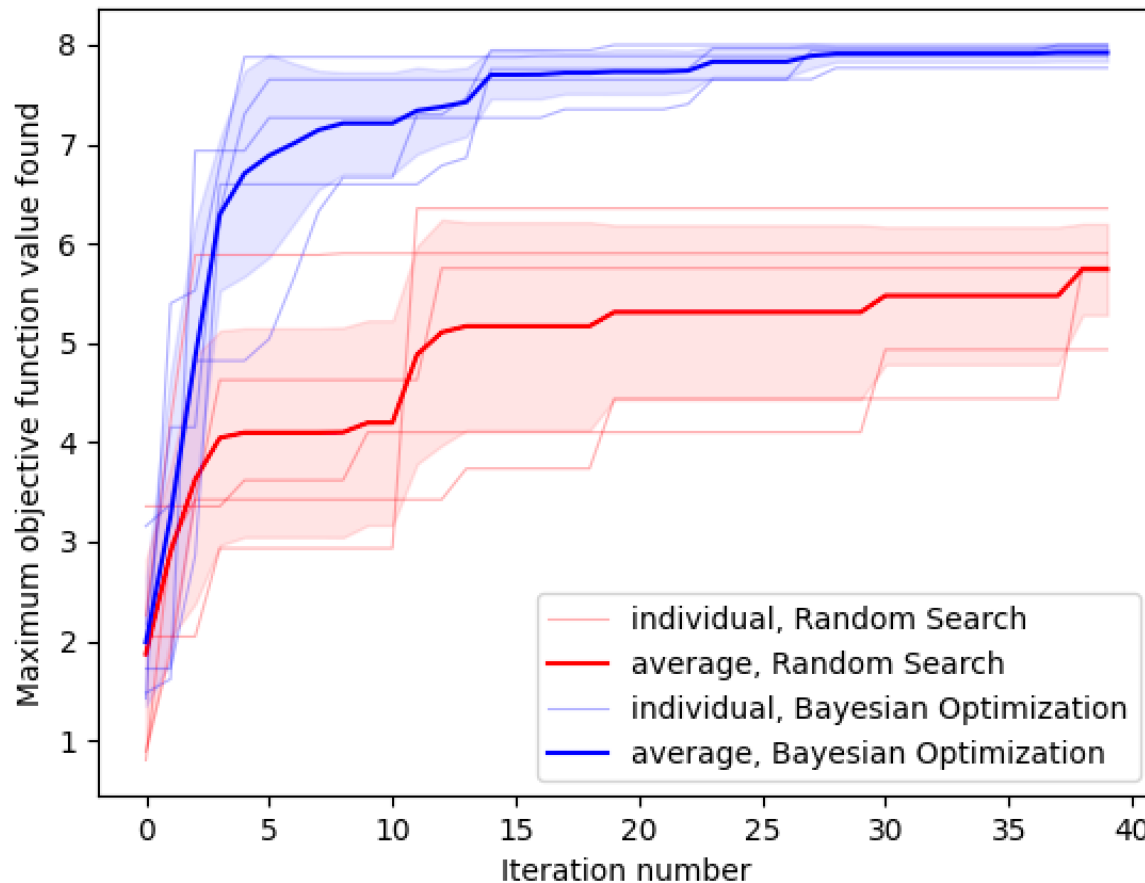
Une meilleure qualité de faisceau obtenue avec l'optimisation bayésienne



Paramètres variés:

énergie du laser, concentration du dopant, position du plan focal, densité du plasma

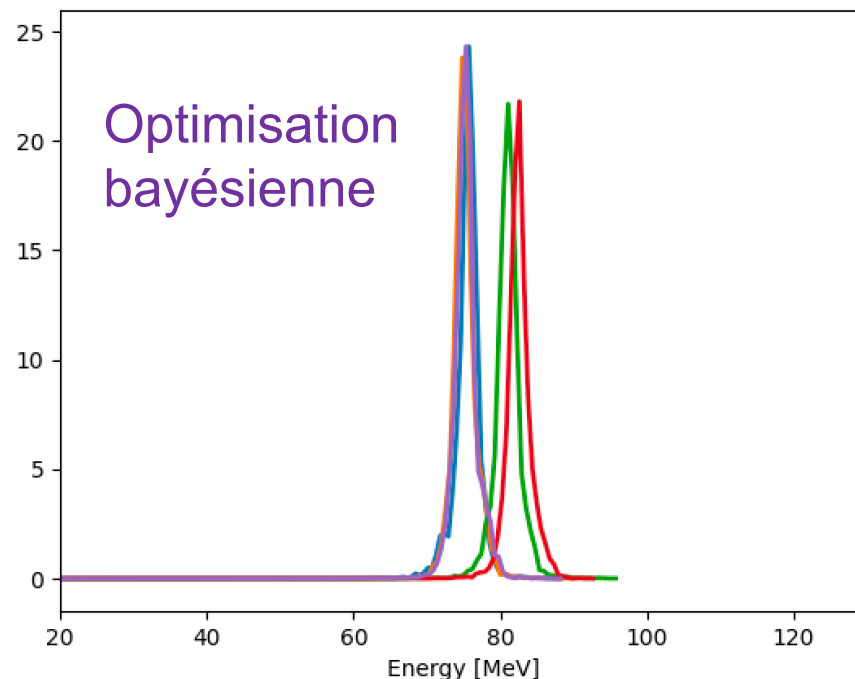
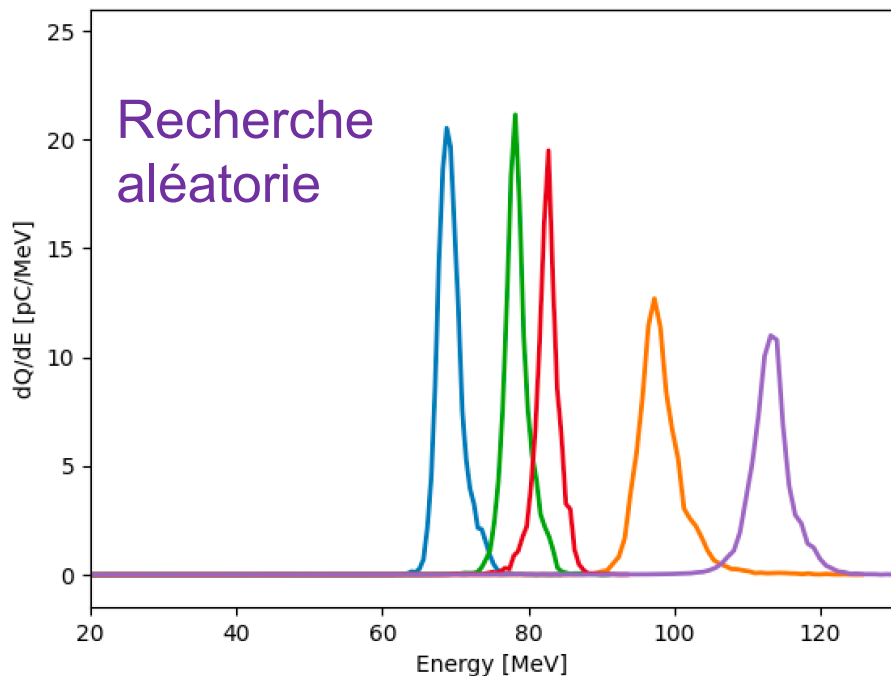
Même fonction à optimiser ($\sqrt{Q} * E / \Delta E$) de S. Jalas et al, PRL 2020



Comparaison entre les spectres des « faisceaux optimaux » trouvés par des algorithmes d'optimisation



Même fonction à optimiser ($\sqrt{Q} * E/\Delta E$) de S. Jalias et al, PRL 2020

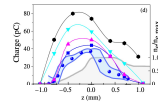


	Recherche aléatoire	Optimisation bayésienne
Q	53.12±6.19 pC	50.24±2.52 pC
E_{MED}	88.19±15.54 MeV	77.86±3.17 MeV
ΔE_{MAD}	1.25±0.34 MeV	0.81±0.02 MeV
$\Delta E_{MAD}/E_{MED}$	1.41±0.26%	1.04±0.02 %

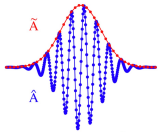


Résumé

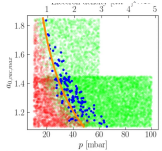
- Des outils numériques puissants sont en cours de développement pour l'accélération par sillage laser-plasma



- Simulations réalistes de l'accélération par sillage → accord avec les expériences

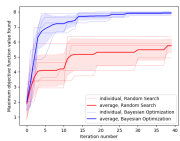


- Modèle d'enveloppe → Simulations rapides → exploration d'espaces de paramètres vastes



- Simulations rapides → génération de jeux de données pour l'apprentissage automatique, comparaison d'algorithmes d'optimisation

Perspectives



- Y-a-t-il d'autres algorithmes comparables à l'optimisation bayésienne pour l'accélération par sillage laser-plasma d'électrons?

- L'exploration de configurations multi-étage est indispensable, le travail est en cours de démarrage

- La conception de plasmas longs, le couplage entre les étages seront des défis clés



Remerciements



Développeurs de Smilei

A. Beck, G. Bouchard, M. Grech, M. Lobet, F. Pérez, C. Prouveur,
T. Vinci

Projet EARLI et projet AWAKE

D. F. G. Minenna, L. Batista, B. Cros, C. Simon-Boisson,
S. Bethuys, B. Bolzon, A. Jeandet, S. Marini, I. Moulanier,
P. A. Phi Nghiem, N. Pichoff, S. Ricaud, C. Simon,
P. Muggli, E. Gschwendter, J. Farmer

Projet PALLAS

P. Drobniak, K. Cassou, V. Kubytskyi, G. Kane



Slides extra





Smilei) 4th Smilei user & training workshop

8–10 Nov 2023 @ ELI beamlines & CTU Europe/Prague timezone

<https://indico.math.cnrs.fr/event/9577/>

