

## Accélération laser-plasma en régime kilohertz : stabilité sur plusieurs heures et contrôle d'effets de CEP

*Lucas Rovige, Julius Huijts, Igor Andryash, Aline  
Vernier, Marie Ouillé, Jasmeen Kaur, Rodrigo  
Lopez-Martens et Jérôme Faure*

28/09/2021

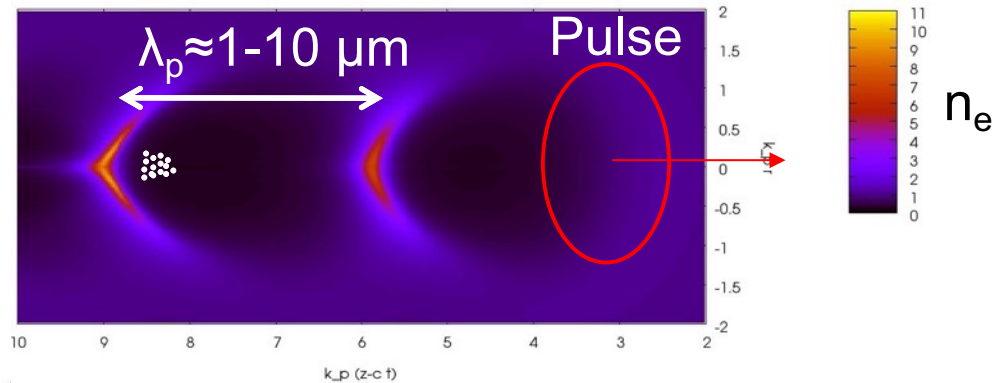


# Plan de la présentation

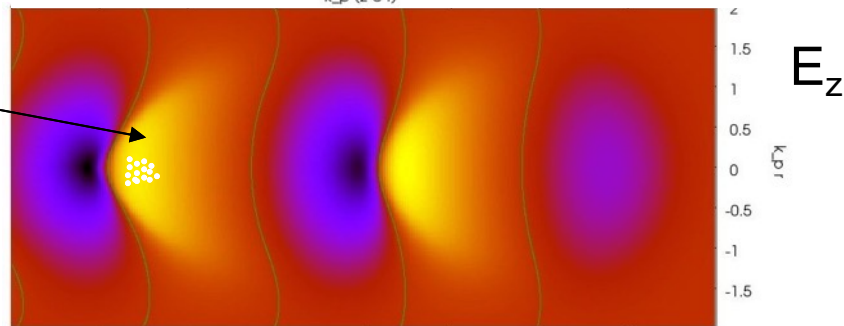
- Introduction à l'accélération laser-plasma au kilohertz
- Micro-jets choc et stabilité sur plusieurs heures
- Contrôle de l'injection par la phase du laser (CEP)

# Accélération d'électrons par sillage laser

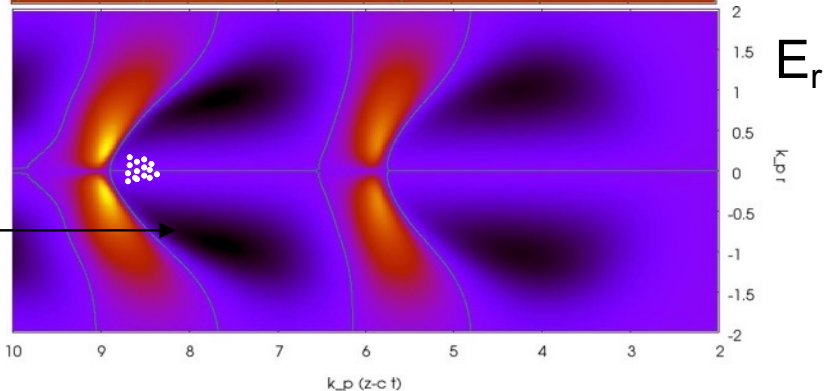
Principe : Tajima & Dawson, PRL 1979



accélérateur



focalisant



## Avantages :

- Champs très élevés : 1 MeV / 10  $\mu\text{m}$   
→ Accélérateur compact
- Faisceaux fs  
<  $\lambda_p/4$

## Pour fonctionner au kHz :

$$\tau = 3.5 \text{ fs}$$

$$E_{\text{las}} \sim 3 \text{ mJ / tir}$$

$$\text{spot : } 3 \mu\text{m}$$

$$\left. \begin{array}{l} \tau = 3.5 \text{ fs} \\ E_{\text{las}} \sim 3 \text{ mJ / tir} \\ \text{spot : } 3 \mu\text{m} \end{array} \right\} E_{e^-} \sim 1-10 \text{ MeV}$$

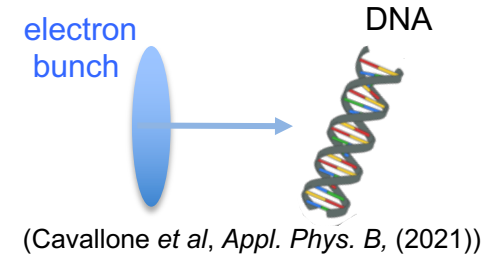
# L'intérêt de la haute cadence

- Statistique dans les expériences (source et applications)
- Stabilité thermique
- Boucles d'asservissement
- Électrons 1-20 MeV : utiles pour diverses applications

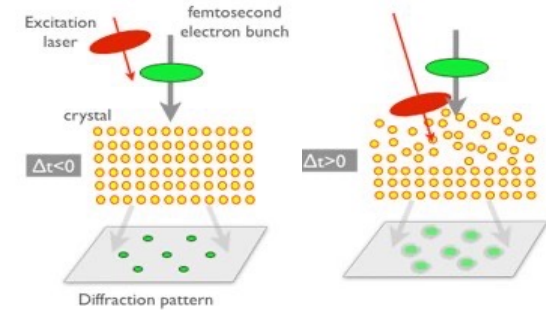
## Notre but: source pour les applications

- Fonctionne au kHz (avec  $<10$  mJ)
- Électrons à quelques MeV
- Bonne qualité de faisceau
- Source stable
- Durée sub-10 fs

Radiobiologie

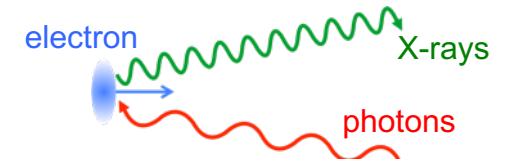


diffraction d'électrons



(Mourou & Williamson, APL (1982),  
Z-H He et al, APL (2013) )

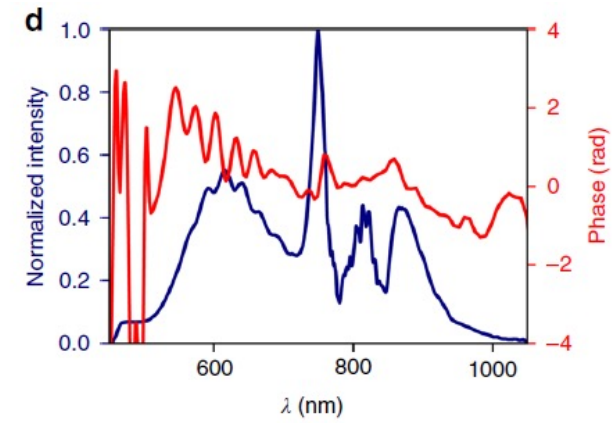
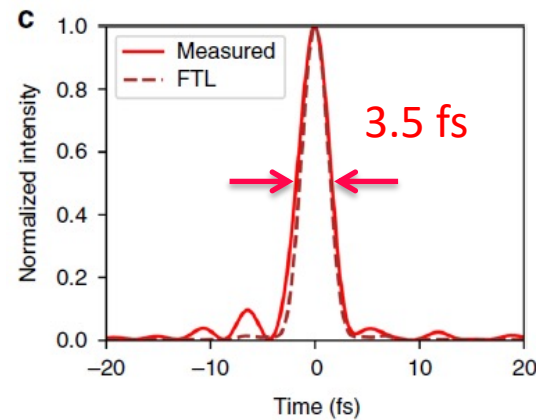
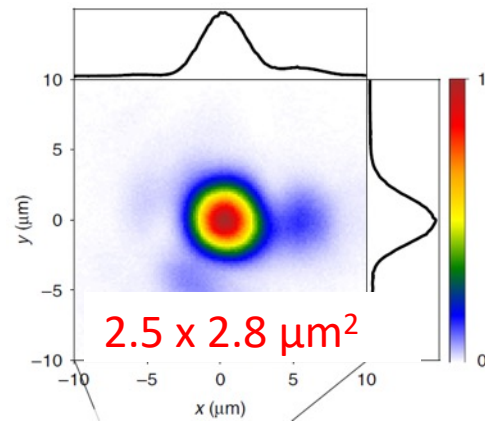
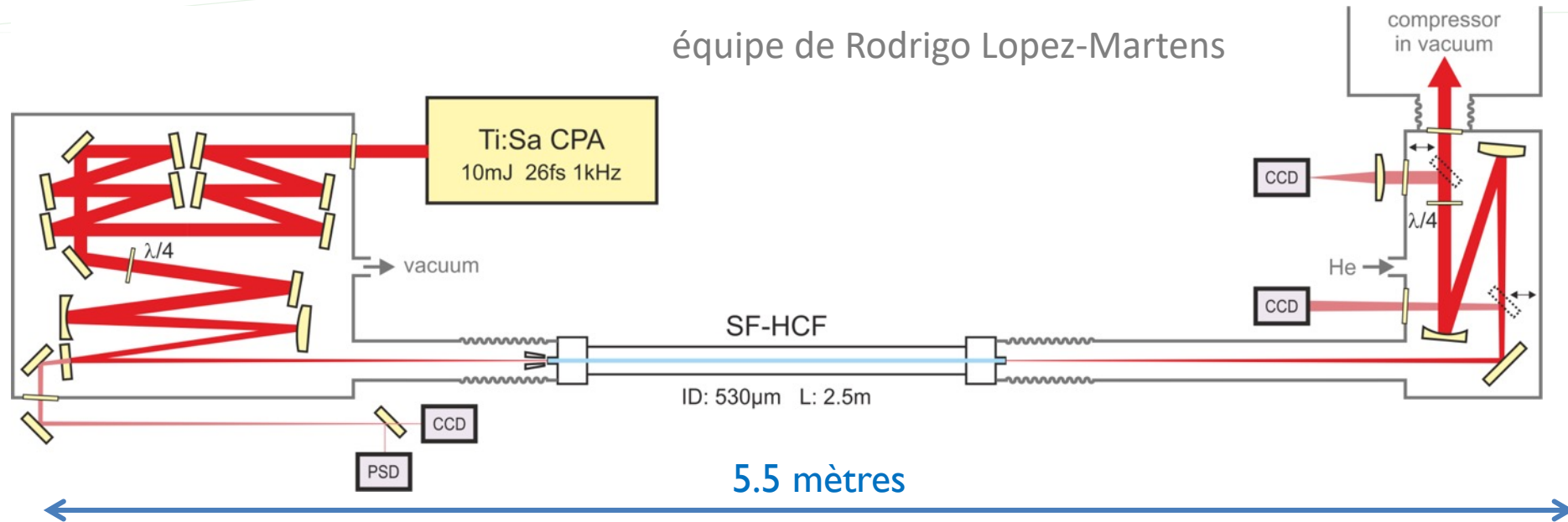
Source X-ray  
Compton



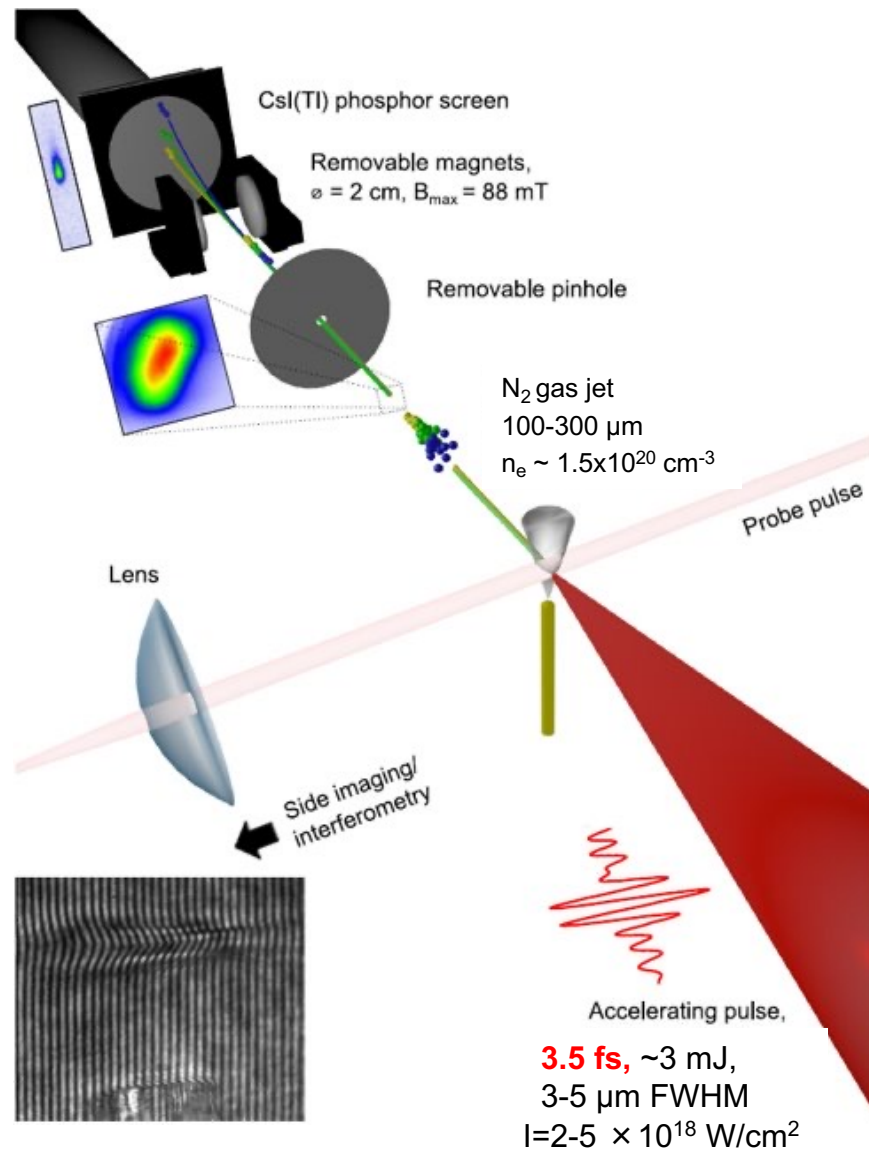
(Ta Phuoc, Nat. Phot. 2012)

# Système laser 1 TW, 1.5 cycle au kHz

équipe de Rodrigo Lopez-Martens



# Configuration expérimentale



*La cible est un jet de  $\text{N}_2$  gaz qui s'écoule en continu*

→ Fonctionnement réel au kHz !

# Plan

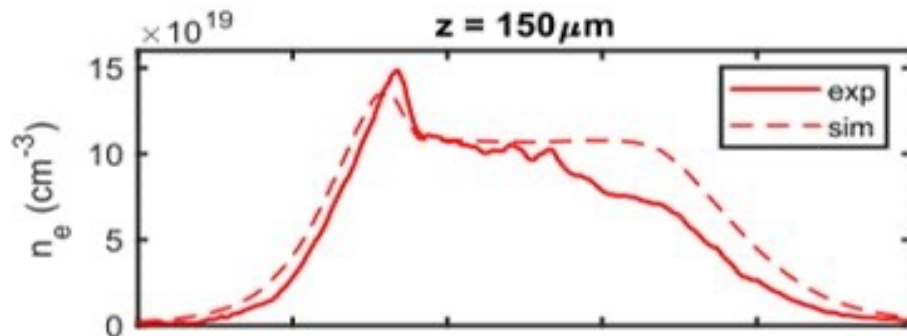
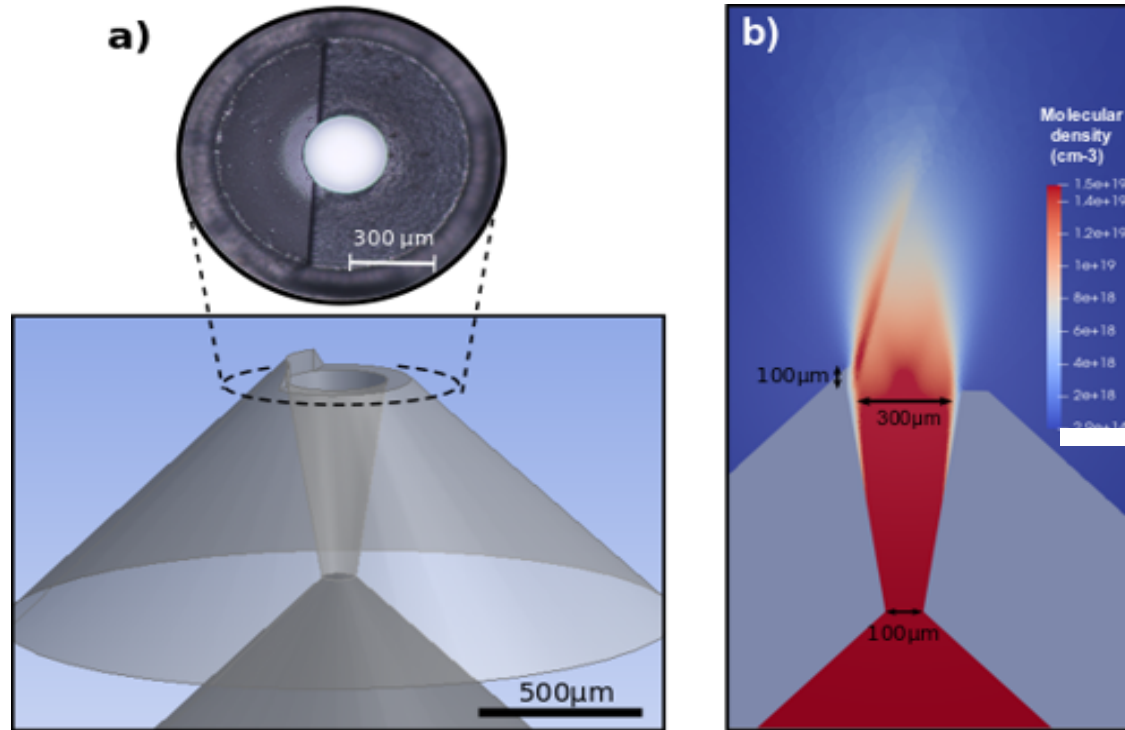
I. Introduction au régime kilohertz

**II. Micro-jets choc et stabilité sur plusieurs heures**

III. Contrôle de l'injection par la CEP

IV. Conclusions et perspectives

# Nouveau design : micro-jet choc

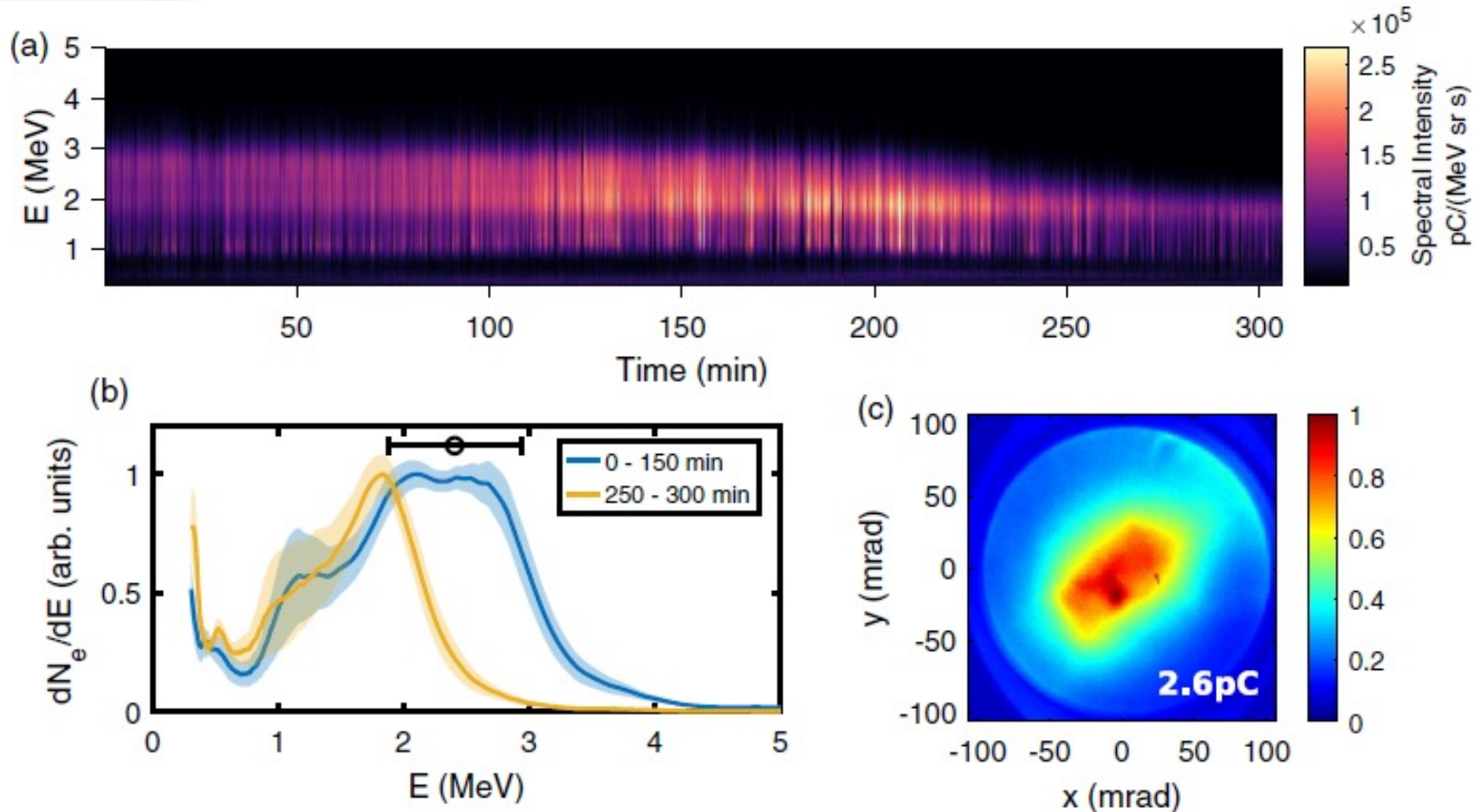


Pourquoi utiliser un choc ?

- Zone avec une haute densité, assez loin du jet  $\rightarrow$  limite les dommages
- Forme un gradient de densité: injection dans le gradient  $\rightarrow$  stabilise le faisceau



# 5h de fonctionnement en continu



**18 x 10<sup>6</sup> tirs !**

Param. exp.:

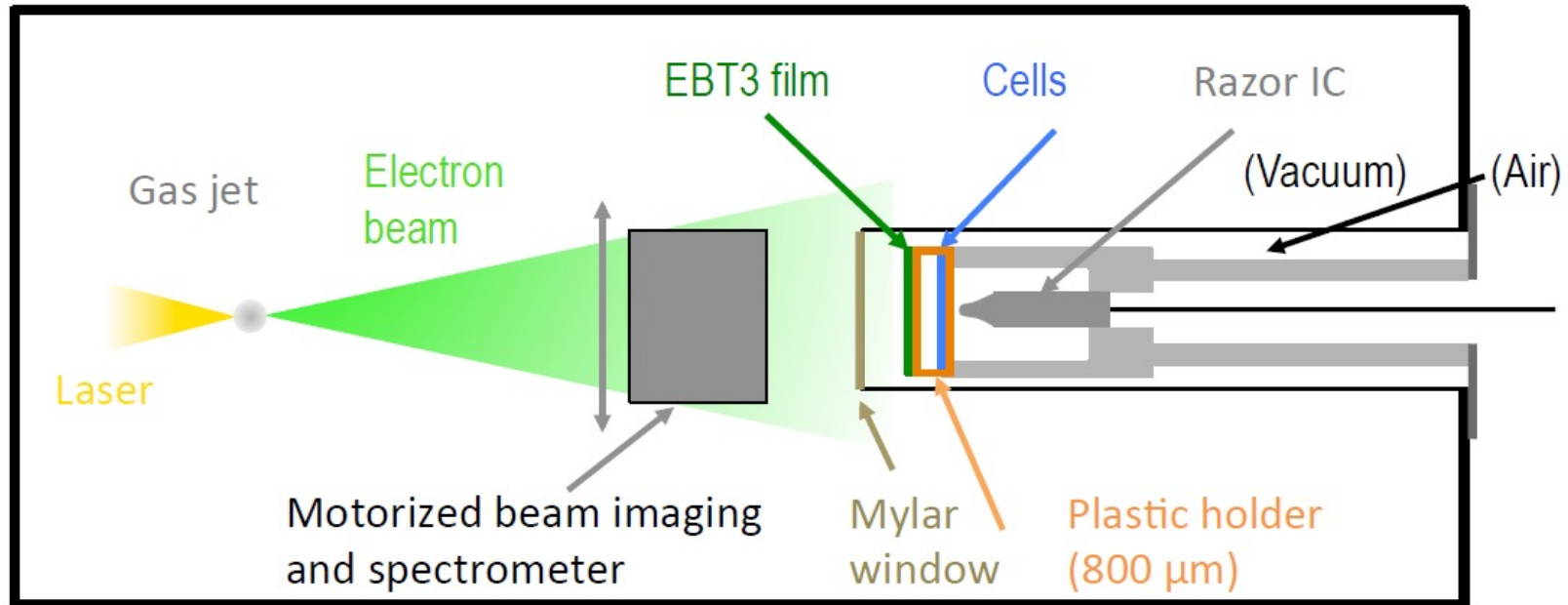
EI = 3.8 mJ ;  $\tau = 4.1$  fs

I =  $2 \times 10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>

Spot size : 6.2x5.5  $\mu$ m FWHM  
One-sided shock jet (densité

pic:  $\approx 1 \times 10^{20}$  cm<sup>-3</sup>)

# Application: Radiobiologie

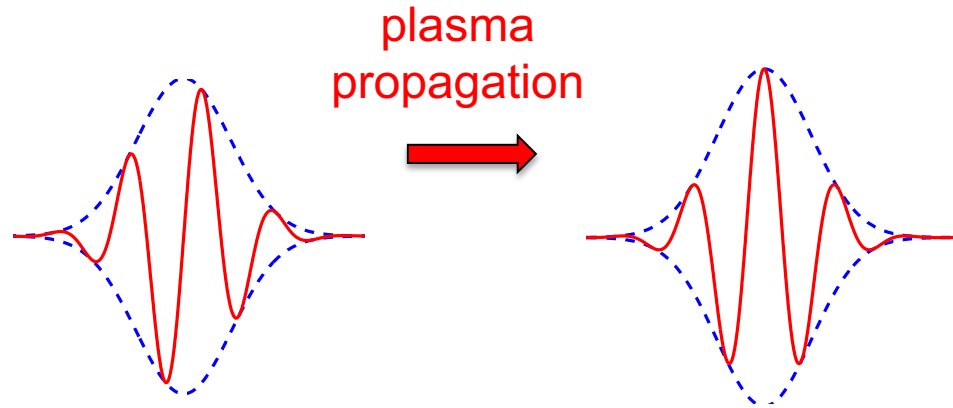


M. Cavallone, L. Rovige, J.Huijts. *et al. Appl. Phys. B* **127**, 57 (2021).

# Plan

- I. Introduction au régime kilohertz
- II. Micro-jets choc et stabilité sur plusieurs heures
- III. Contrôle de l'injection par la CEP**
- IV. Conclusions et perspectives

# Glissement de la CEP



CEP = **C**arrier-**E**nveloppe **P**hase

Dans le plasma :

$$v_{\varphi} > v_g$$

La CEP glisse de  $2\pi$  après propagation de :

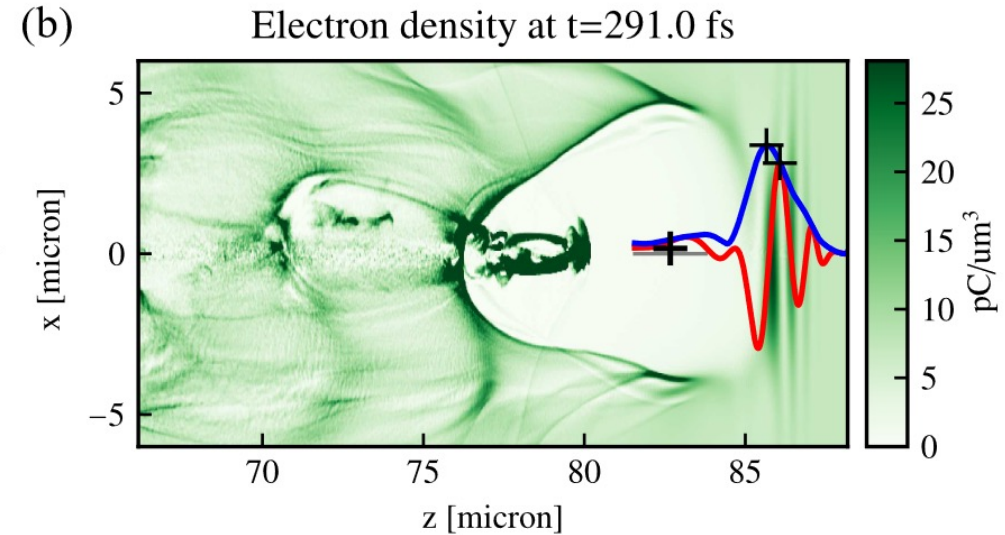
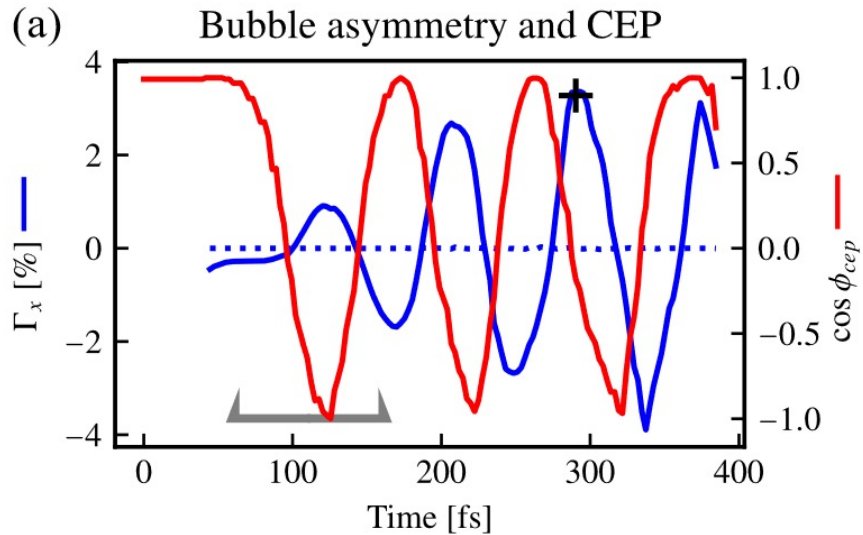
$$L_{2\pi} = \lambda_0 \frac{c}{v_{\varphi} - v_g} \simeq \lambda_0 \frac{n_c}{n_e}$$

Effet significatif de CEP si la longueur d'injection est inférieure à  $L_{2\pi}$

$$L_{inj} \leq L_{2\pi} \simeq 10\mu m$$

# CEP et asymétrie de la bulle

Nerush et Kostyukov, PRL (2009) : asymétrie de la réponse plasma dépendante de la CEP

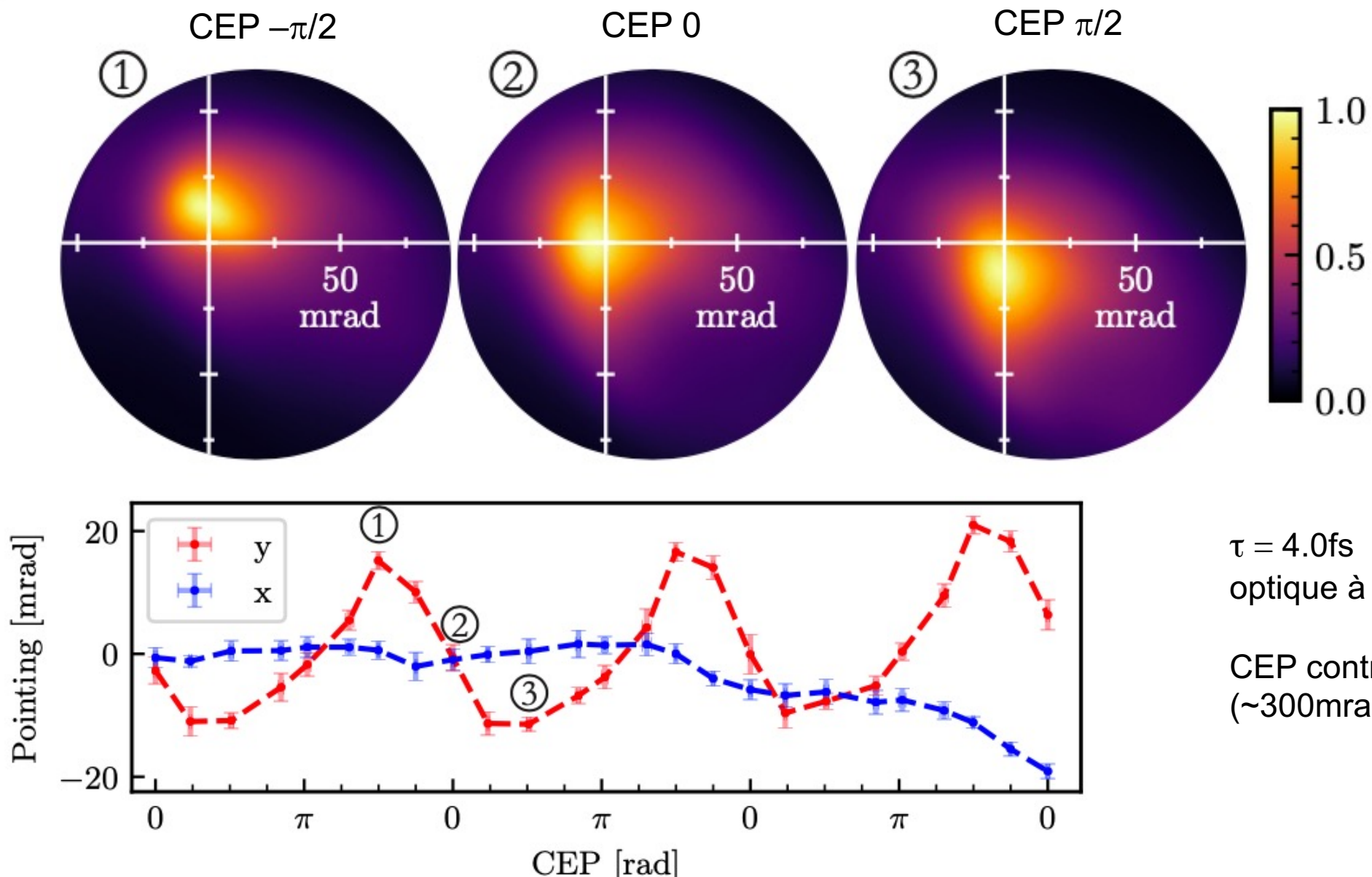


J. Huijts *et al.* Phys. of Plasma (2021)

Oscillation de la bulle avec le glissement de la CEP

Other recent work on CEP (circular polarization) :  
F. Salehi *et al.*, PRX, (2021)

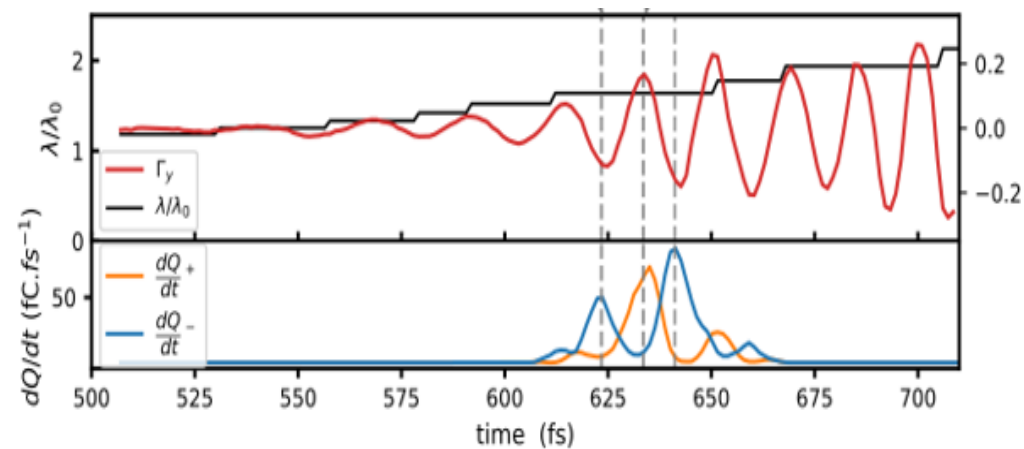
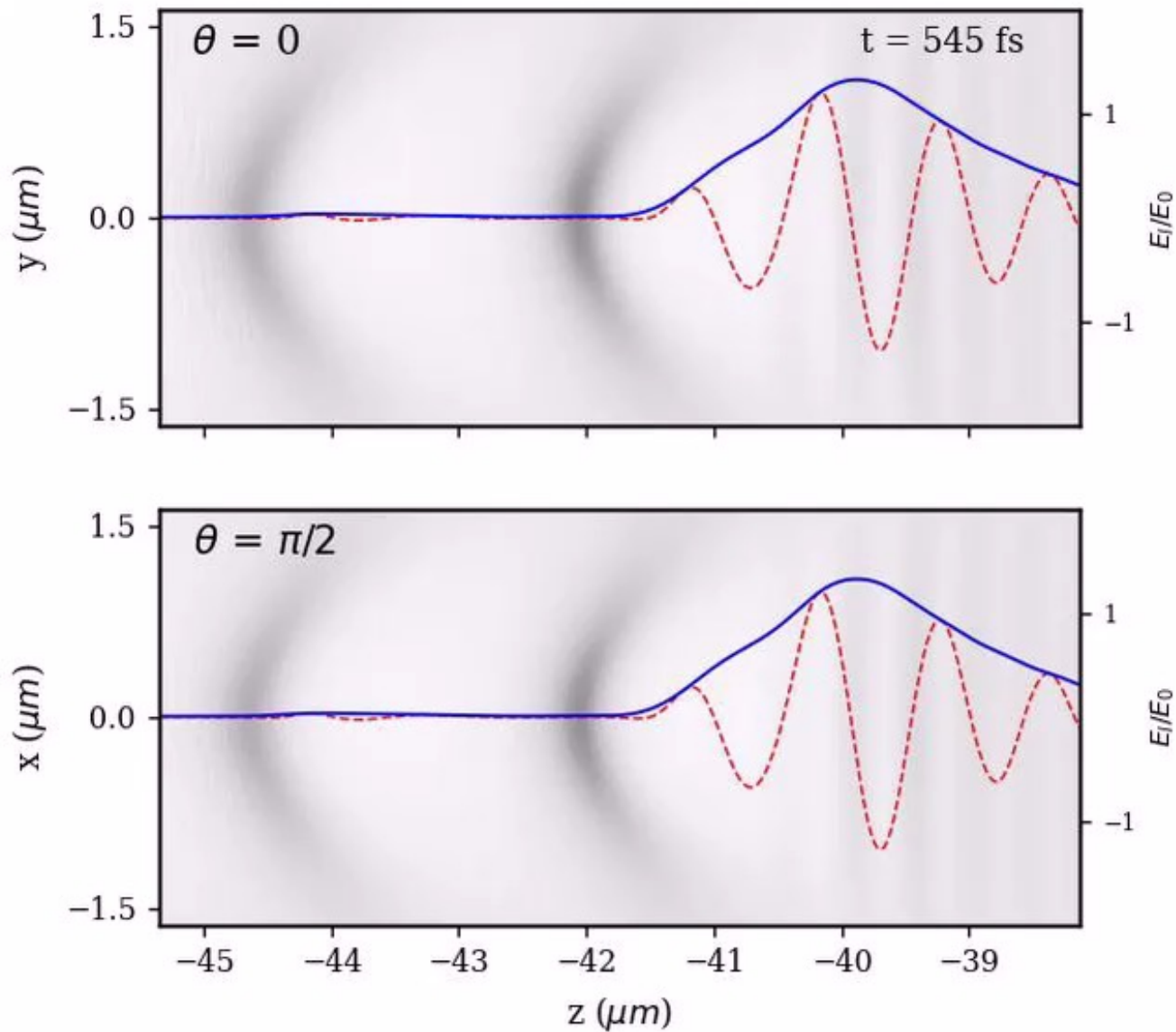
# Expérience : CEP et pointé des électrons



$\tau = 4.0\text{fs}$  (=1.5 cycle optique à 800nm)

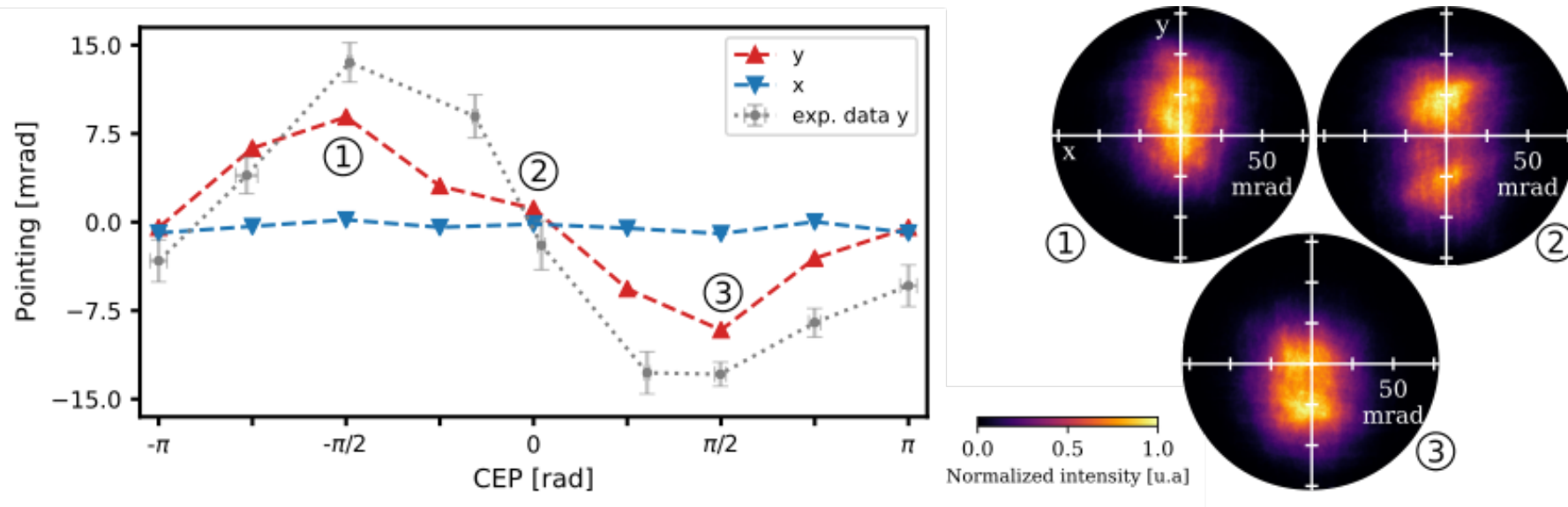
CEP contrôlable (~300mrad RMS tir-à-tir)

# Simu PIC : oscillation du wake avec la CEP



Le wake oscille avec la CEP :  
injections hors axe

# Simu PIC : variation de pointé avec la CEP



Comportement expérimental très bien reproduit par les simulations

Perspectives :

→ Contrôle et injection de bunches sub-fs !



# Conclusions et perspectives

- Systématiquement 1-10 pC at 1-5 MeV (récemment 8-10MeV!)
- Fonctionnement stable et autonome pour 18M tirs (record!)
- Première application démontrée
- Injection CEP-dépendante observée pour la première fois

## Et pour la suite ?

- Diffraction d'électrons
- Bientôt 15MeV ?

# L'équipe

## **kHz laser-plasma source**

J. Huijts, J. Monzac, A. Vernier, I. Andriyash, J. Faure

## **Salle Noire Laser system:**

M. Ouillé, J. Kaur, R. Lopez-Martens

## **Radiobiology experiment:**

M. Cavallone, E. Bayart, R. Delorme, A. Flacco

## **Gas jet fabrication:**

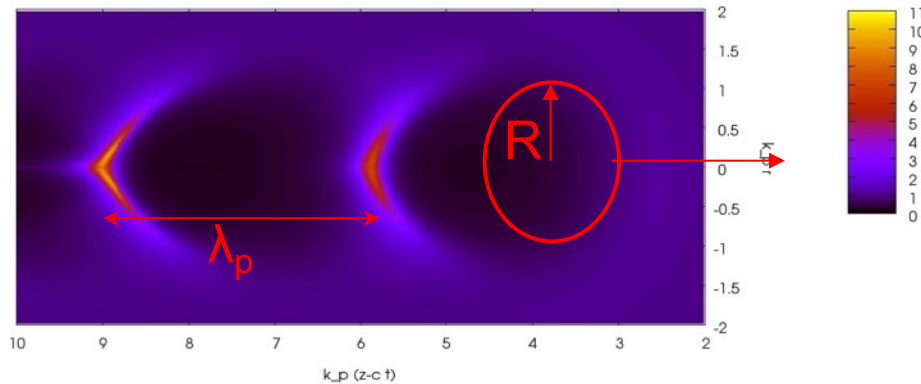
V. Tomkus, V. Girdauskas, G. Raciukaitis, J. Dudutis ,  
V. Stankevicius, P. Gecys



# Supplementaires

# Lois d'échelle pour les lasers kilohertz

Puissance moyenne des laser  $\approx$  constante



Résonance de l'impulsion laser  
avec l'onde plasma:  
 $R \approx \lambda_p/2$ ,  $c\tau \approx \lambda_p/2$

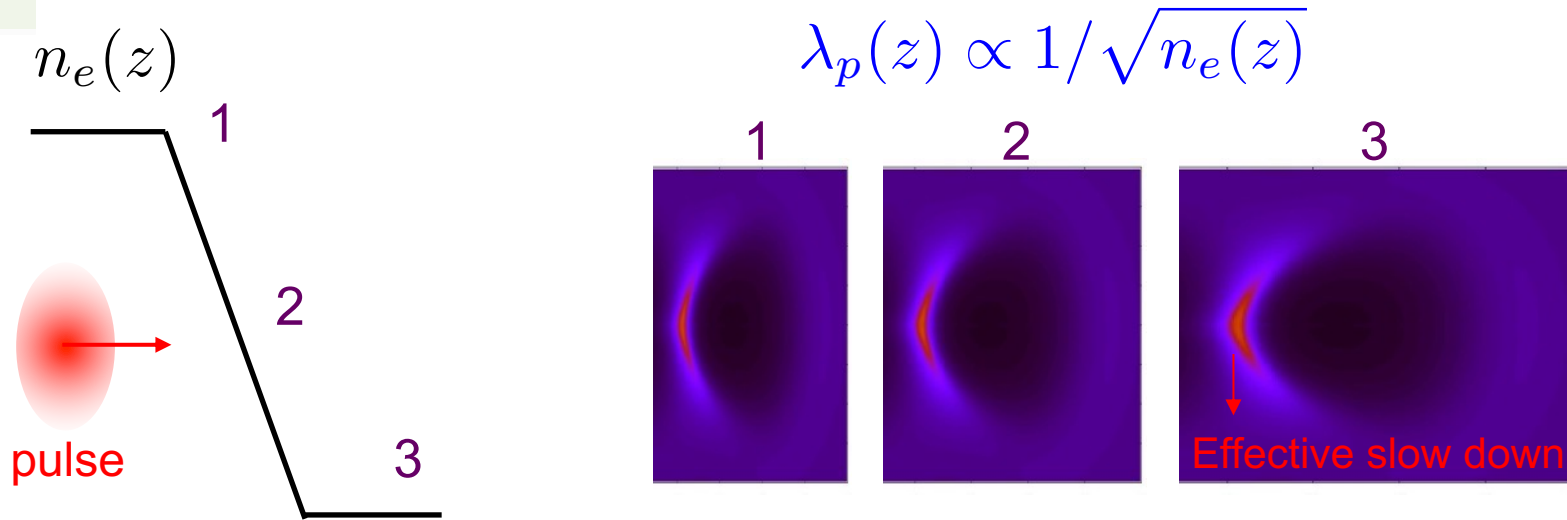
Énergie laser :  $E_L \propto \tau^3 \propto \lambda_p^3$

Gain d'énergie des electrons :  $\Delta E \propto \tau^2 \propto \lambda_p^2$

30 fs  $\rightarrow$  1 J  $\rightarrow$  100 MeV-1 GeV  
3 fs  $\rightarrow$  1 mJ  $\rightarrow$  1-10 MeV

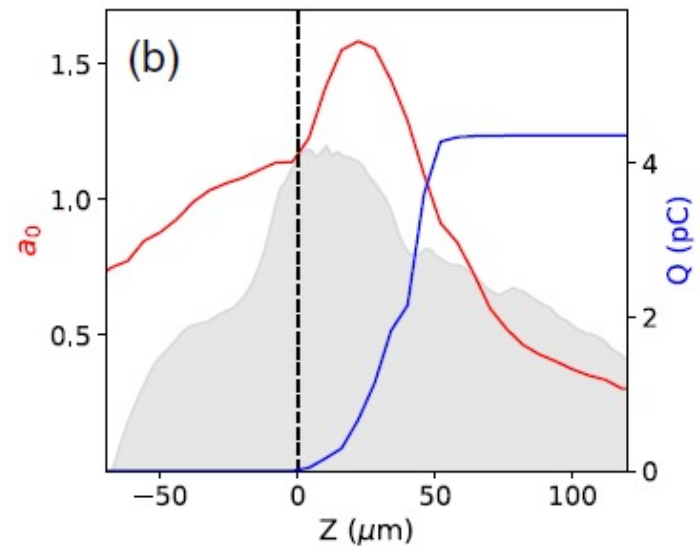
et haute densité  $n_e > 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

# What is the physics ? density gradient injection

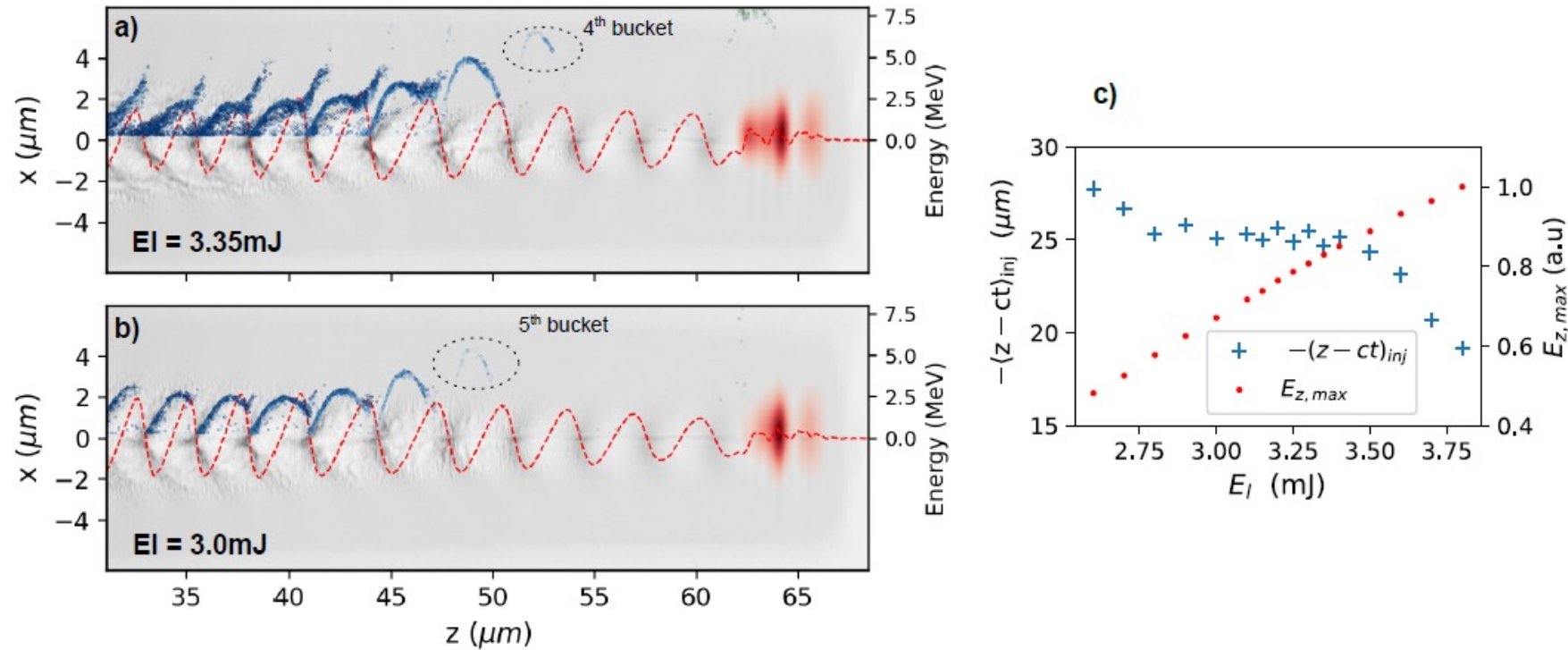


The idea: slowing down the accelerating structure

Simulations confirm that electrons are injected in the gradient



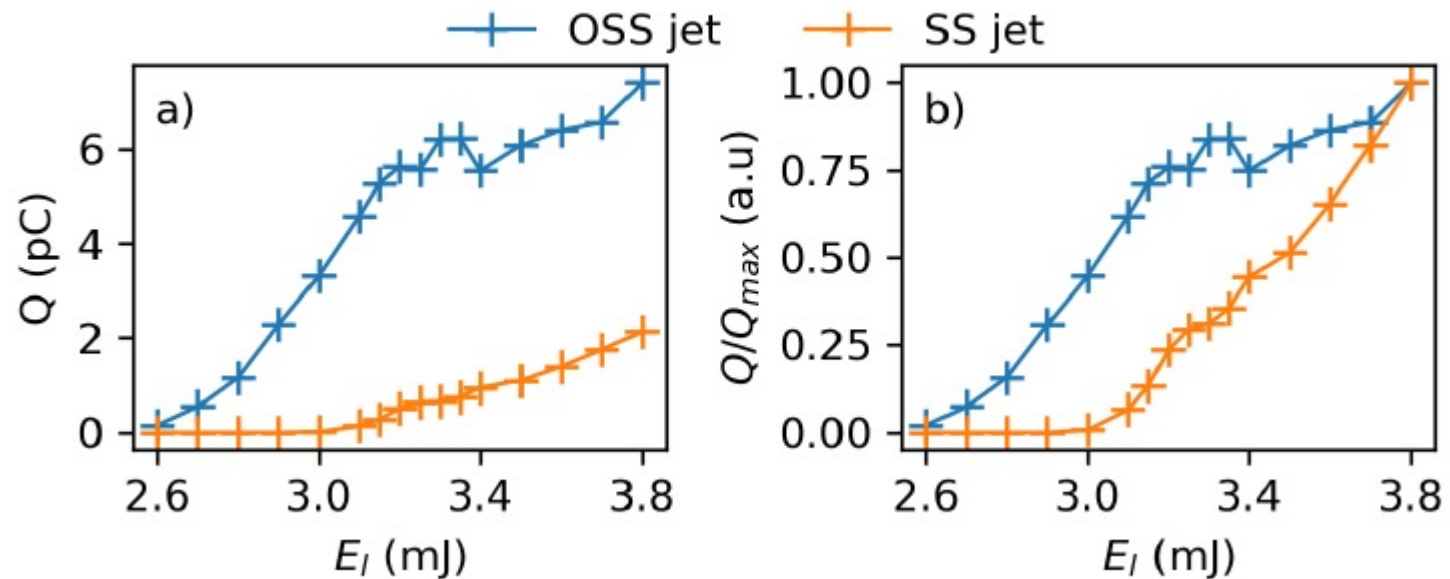
# PIC simulation OSS : laser driver energy scan



- Downward gradient : wake  $v_{\phi}$  decreases behind laser (V. Brantov *et al*, Phys. Plasmas 15, 073111 (2008)).
- Lower  $E_l$  : injection further behind
- Electron energy limited by dephasing

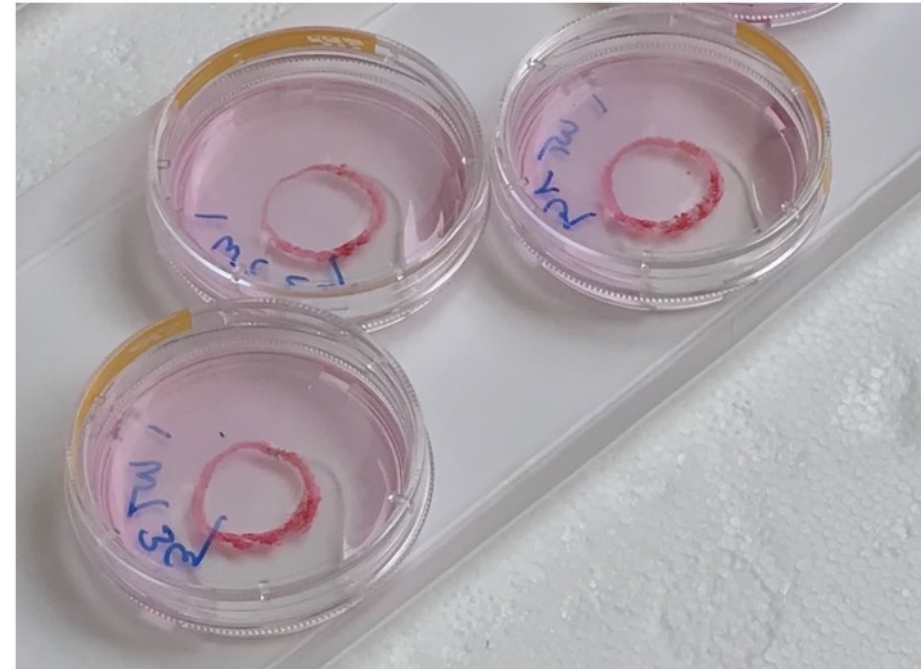
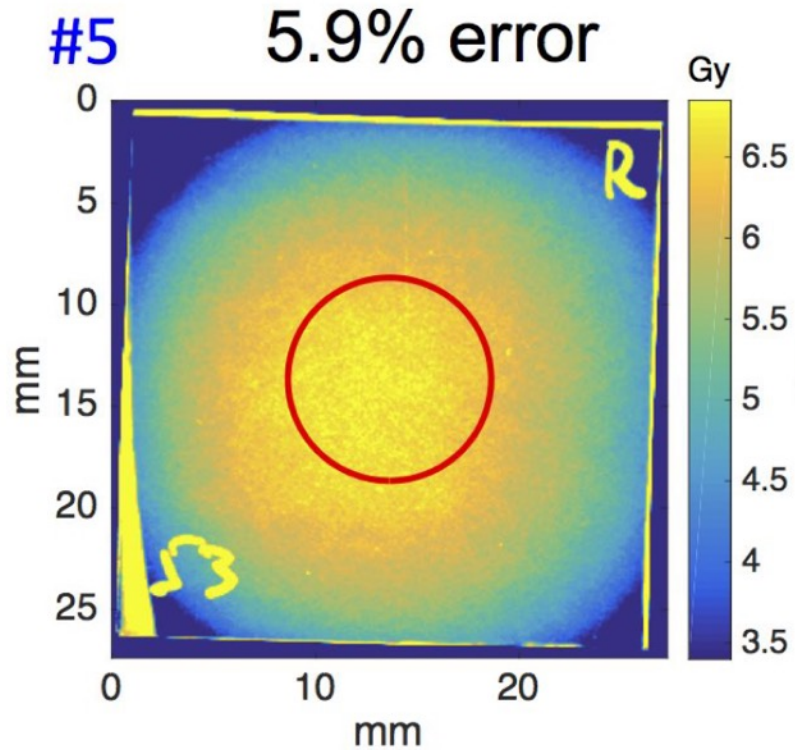
# Simulations PIC : comparaison avec un profil supersonique

Simulation jets OSS/SS avec les autres paramètres gardés identiques



# Application: Radiobiology

High charge, divergent electron beams

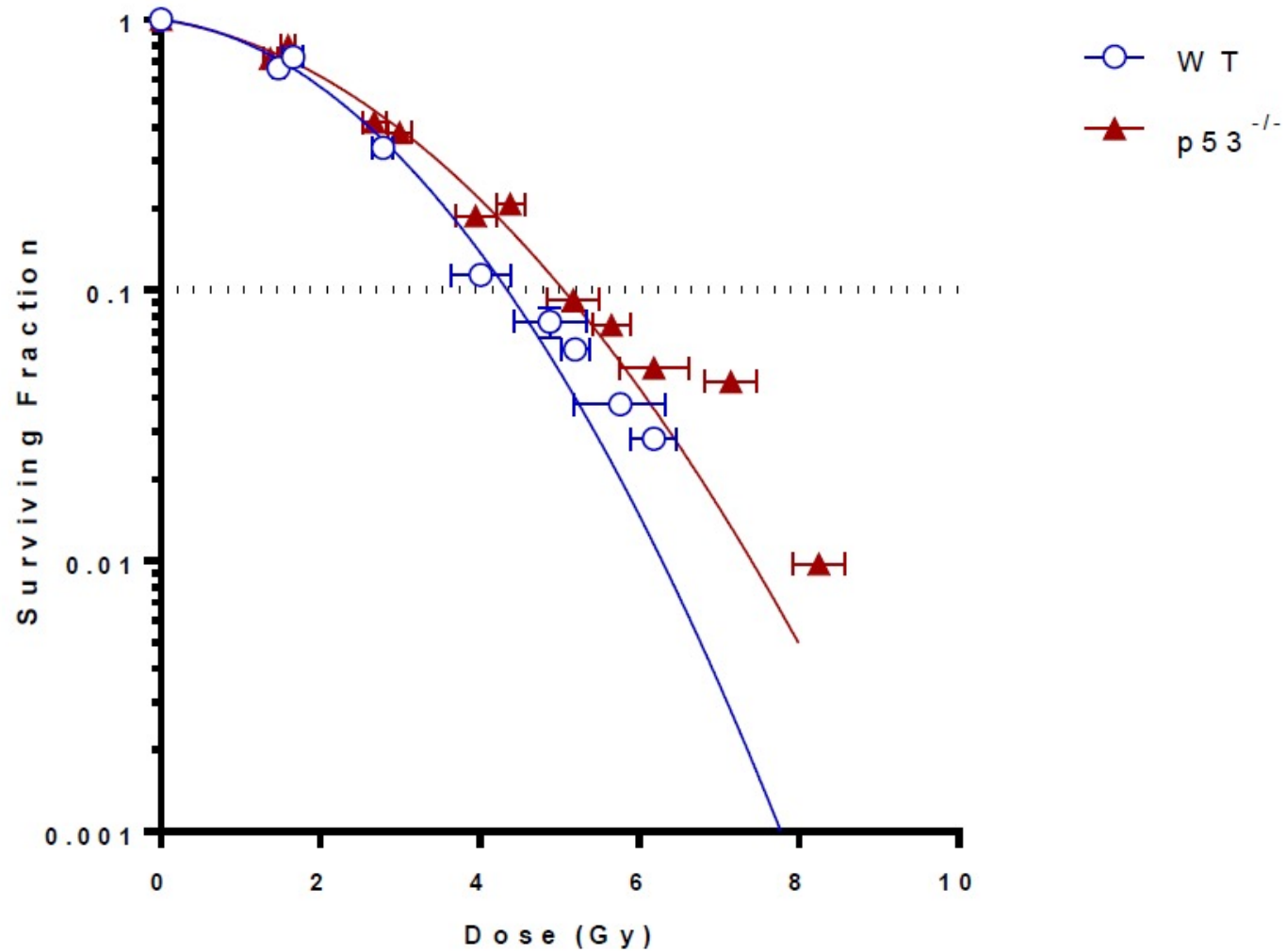


Human Colorectal Tumor cells HCT116

Mean dose rate : 1 Gy/s



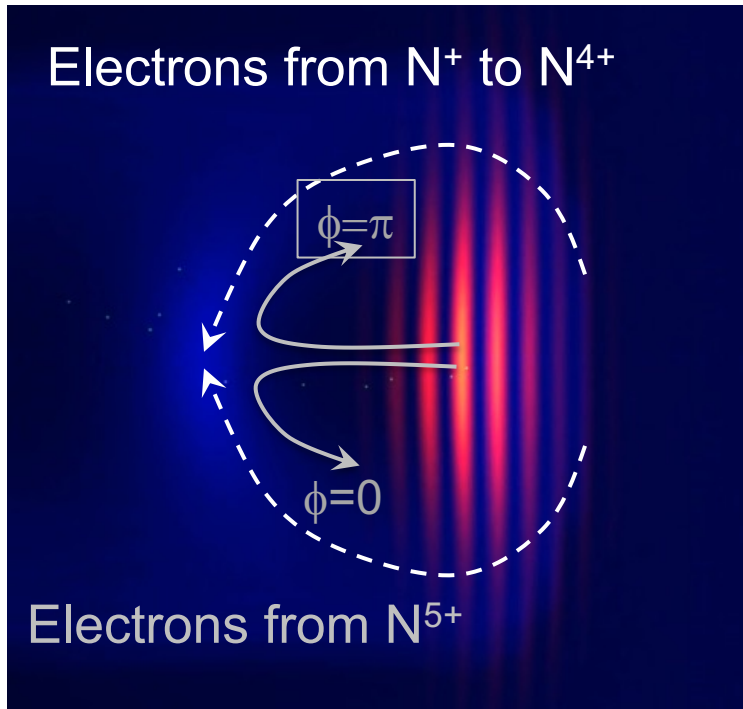
# Application: Radiobiology



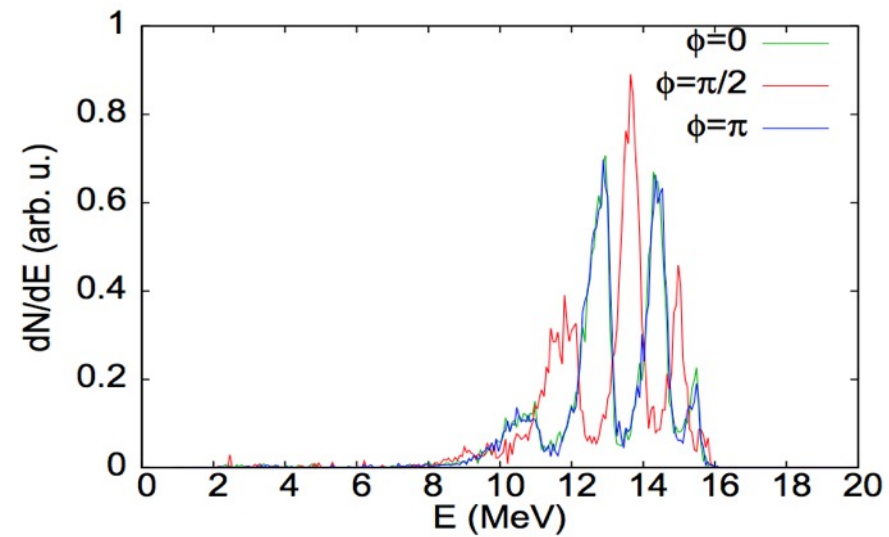
M. Cavallone, L. Rovige, J.Huijts. *et al. Appl. Phys. B* **127**, 57 (2021).

# CEP effects : what is expected

## Ionization-injection case



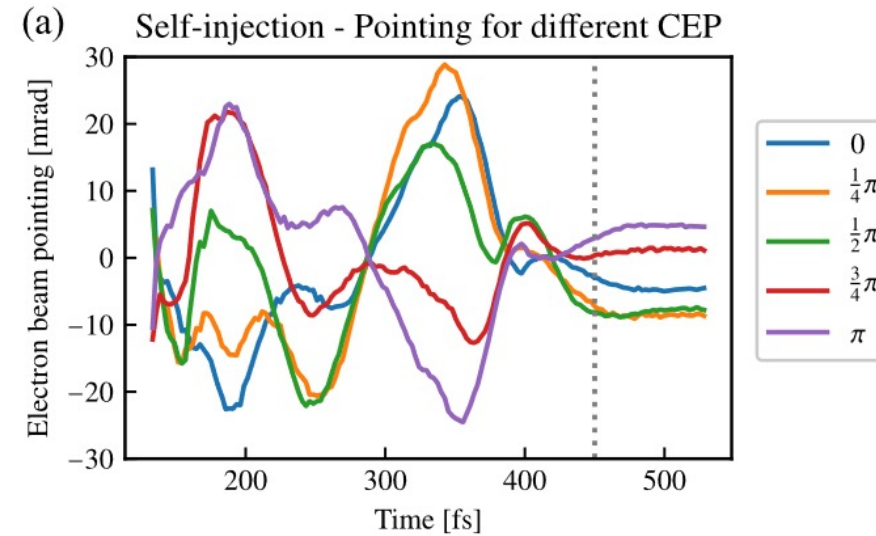
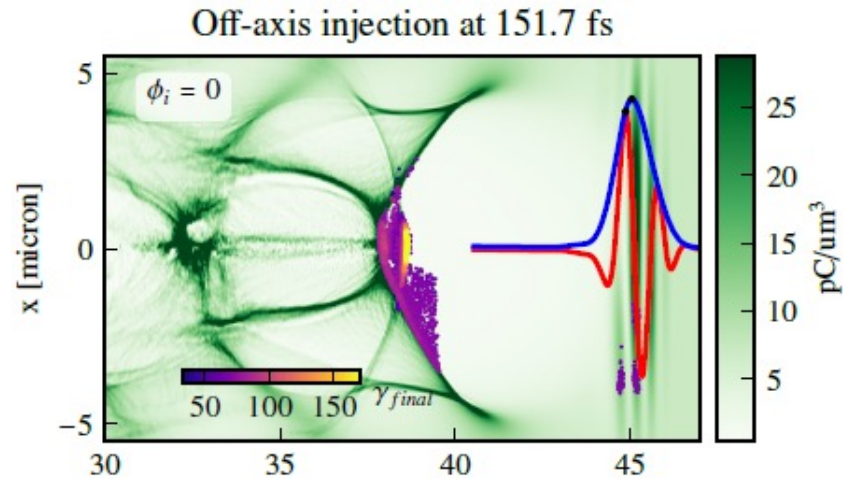
electron spectra (3D PIC)



Lifschitz & Malka, NJP 14 053045 (2012)

# CEP effects : what is expected

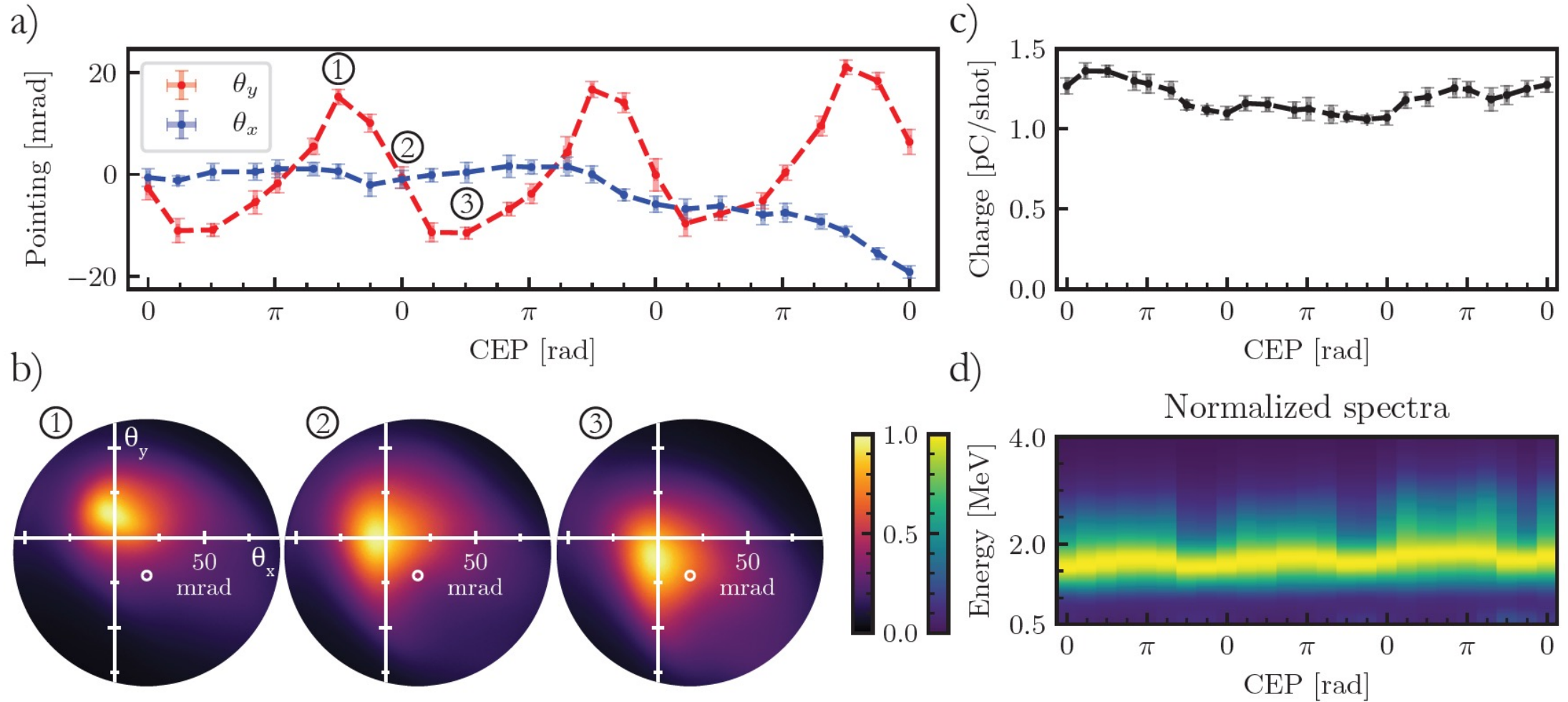
## Self-injection case



J. Huijts et al. arXiv:2006.10566 (2020)

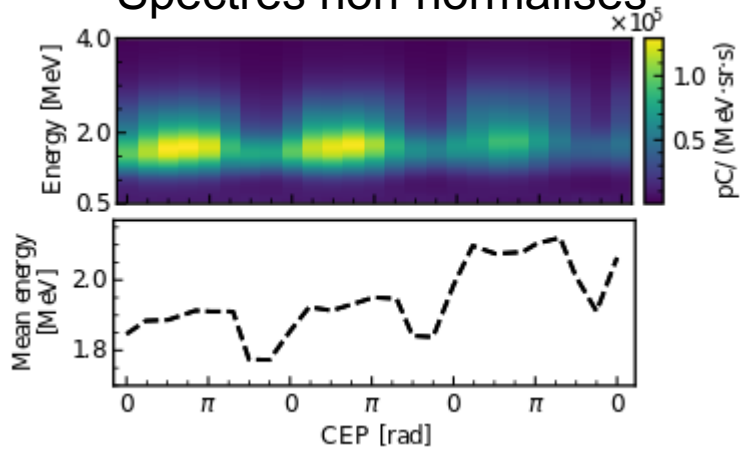
Asymmetry in self-injection leads to CEP-dependent pointing

# CEP : Full exp figure

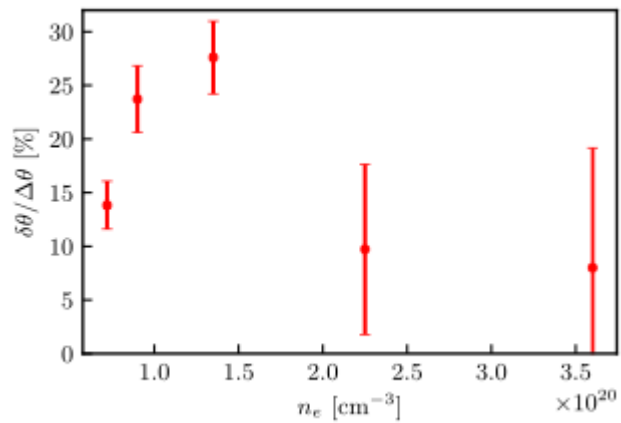


# CEP : all figures

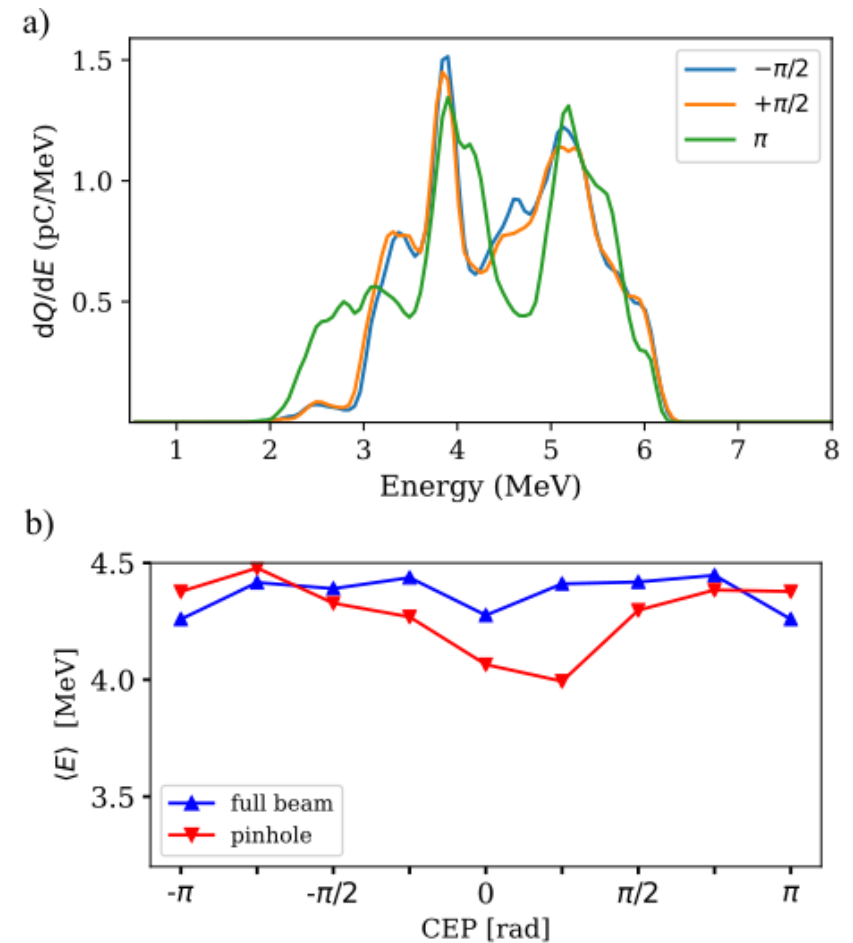
## Spectres non-normalisés



## Scan CEP en fonction $n_e$



## Énergie simu PIC



# 8-10 MeV

