

## Augmentation de l'énergie des électrons produits par accélération laser-plasma

C. Thaury, K. Oubrierie, A. Leblanc, O. Kononeko, I. Andriyash, R. Lahaye, J. Gautier, J.P. Goddet, L. Martelli, K. Ta Phuoc, A. Tafzi



UMR 7639



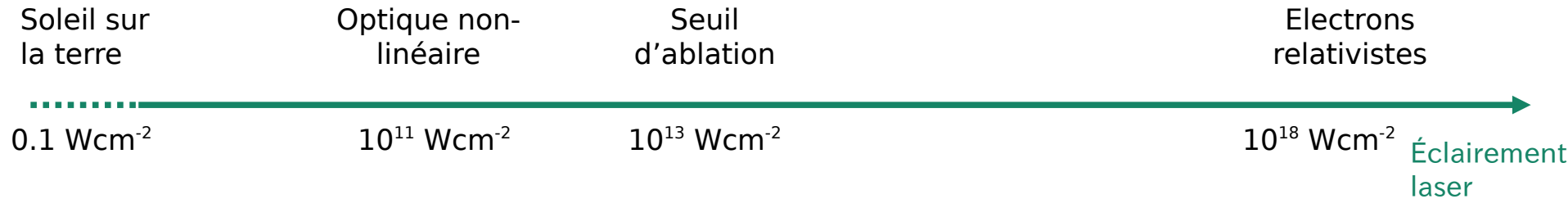
# Laser ultra-intense

- Energie  $\sim 1$  J
  - Durée  $\sim 30$  fs
  - Tache focale  $10 \mu\text{m}$
- Puissance crête  $> 30$  TW  
(puissance moyenne  $< 10$  W)
- Éclairement  $> 4 \cdot 10^{18} \text{ Wcm}^{-2}$



# Laser ultra-intense

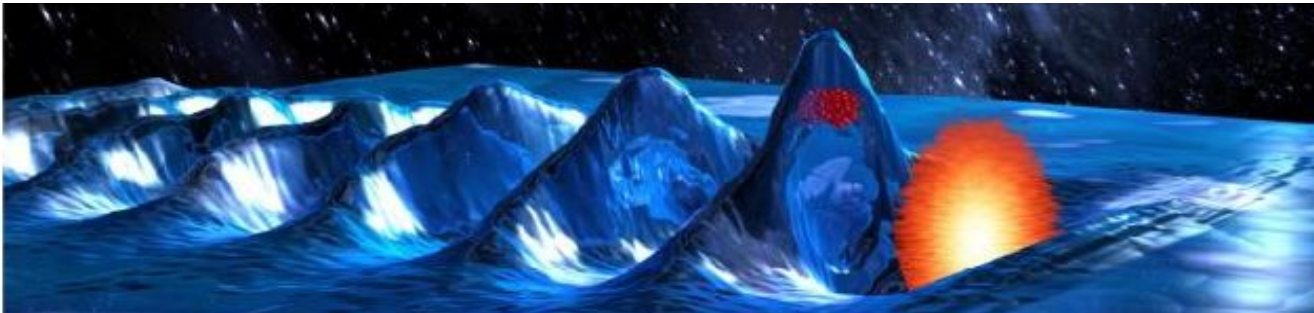
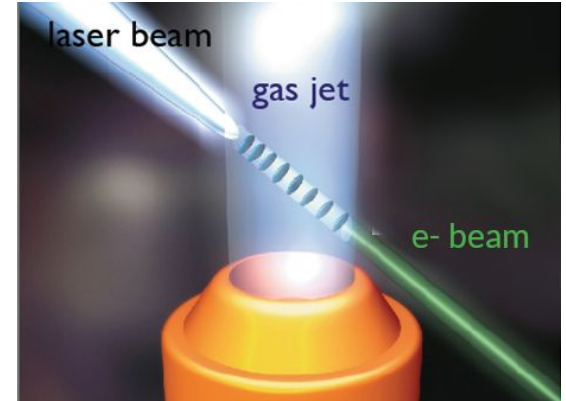
- Energie  $\sim 1$  J
  - Durée  $\sim 30$  fs
  - Tache focale  $10 \mu\text{m}$
- Puissance crête  $> 30$  TW  
(puissance moyenne  $< 10$  W)
- Éclairement  $> 4 \cdot 10^{18} \text{ Wcm}^{-2}$



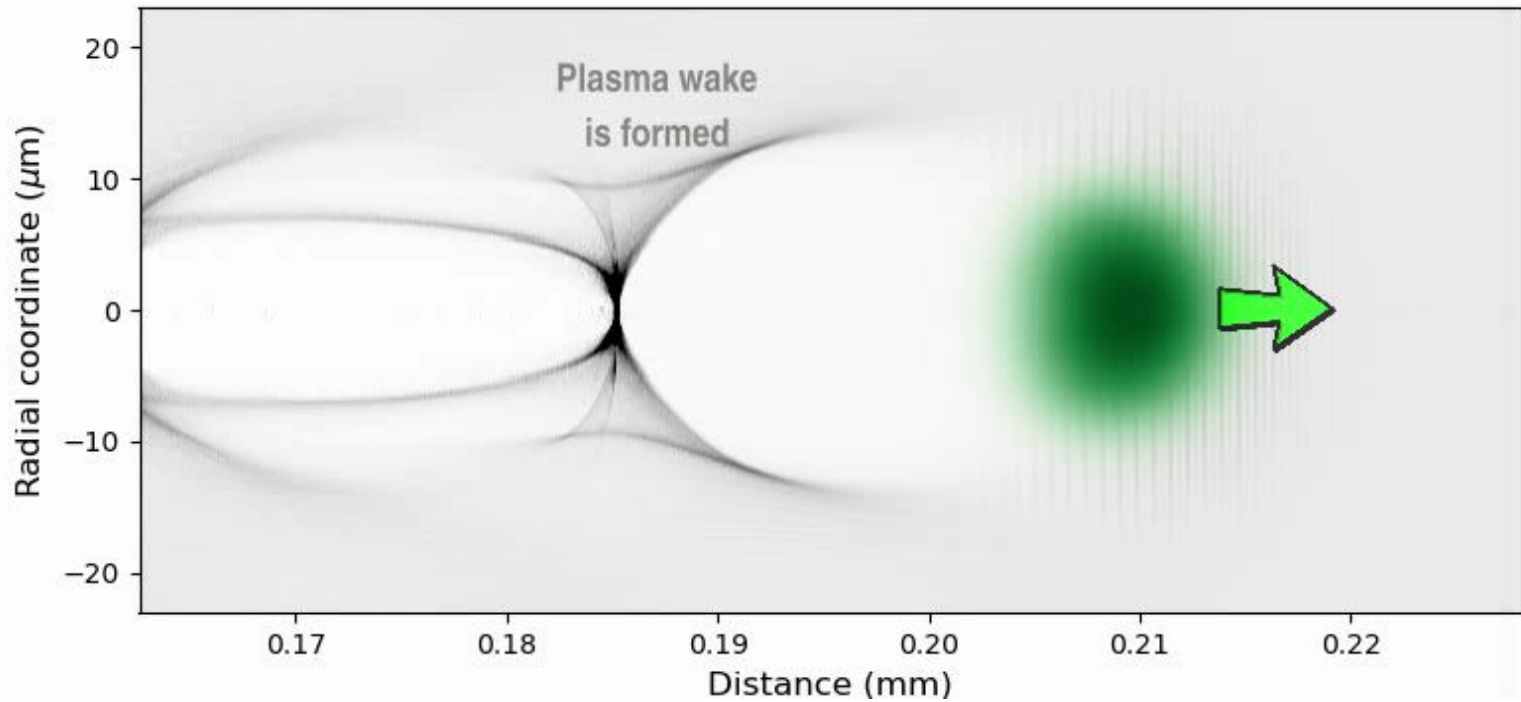
# Accélération laser-plasma

## Principe général :

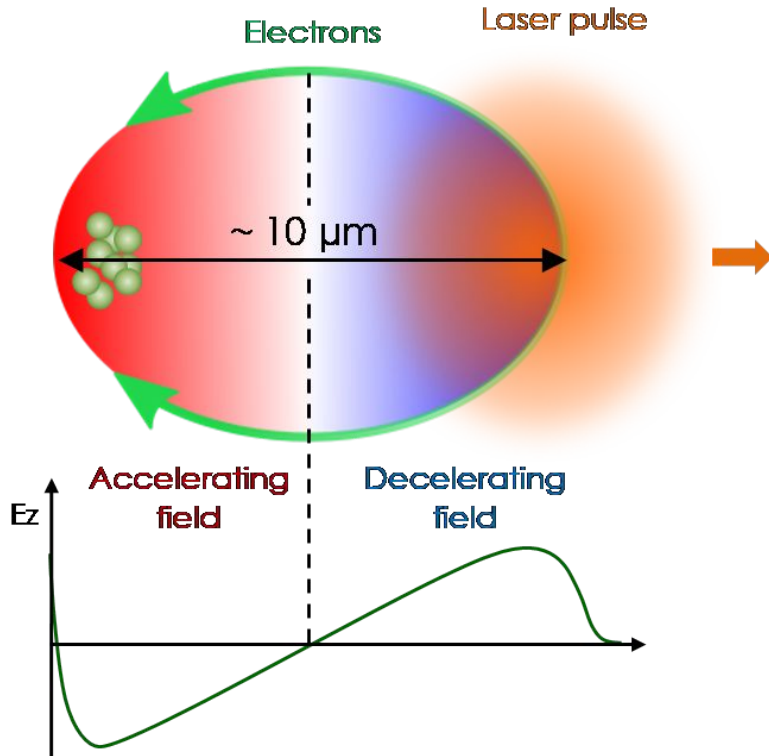
- Une impulsion laser intense est focalisée dans un jet de gaz qu'elle transforme en plasma.
- L'impulsion génère dans son sillage une cavité vide d'électrons où règnent de champs de très grande amplitude ( $>100$  GV/m).
- Les électrons piégés dans cette cavité sont accélérés et rayonnent dans le domaine X



# Accélération laser-plasma

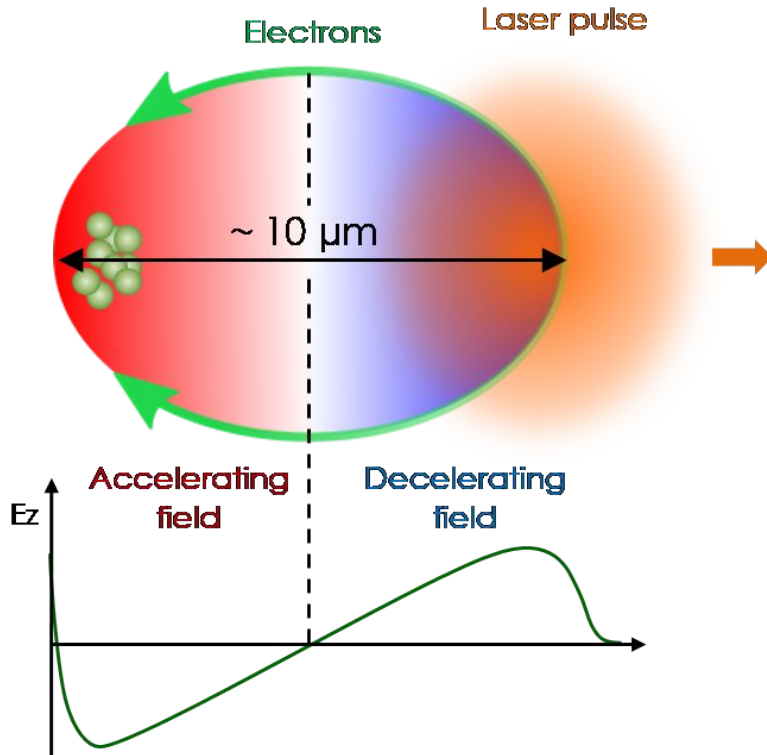


# Les défis de l'accélération plasma



- La production de **hautes énergies** requires to sustain a high amplitude electric field and to keep the electron beam in this field over a long distance ( $> \text{cm}$ ).
- La production de faisceau de qualité nécessite de contrôler l'injection d'un paquet d'électrons dans une cavité de quelques  $\mu\text{m}$  se déplaçant à  $c$ .

# Les défis de l'accélération plasma



- La production de **hautes énergies** requires to sustain a high amplitude electric field and to keep the electron beam in this field over a long distance ( $> \text{cm}$ ).

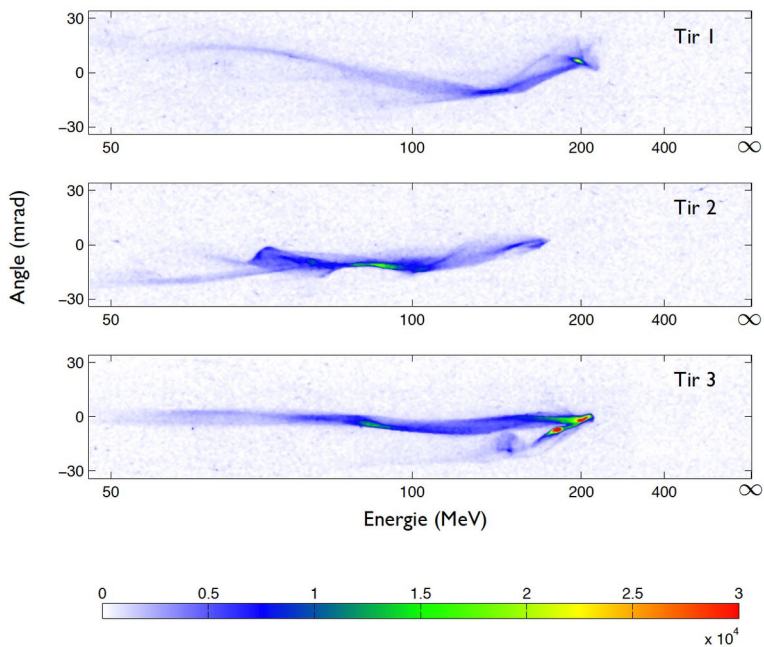
→ **Guidage plasma** [Leemans *et al.* Nature Phys. **2**, 696-699 (2006)].

- La production de faisceau de qualité nécessite de contrôler l'injection d'un paquet d'électrons dans une cavité de quelques  $\mu\text{m}$  se déplaçant à  $c$ .

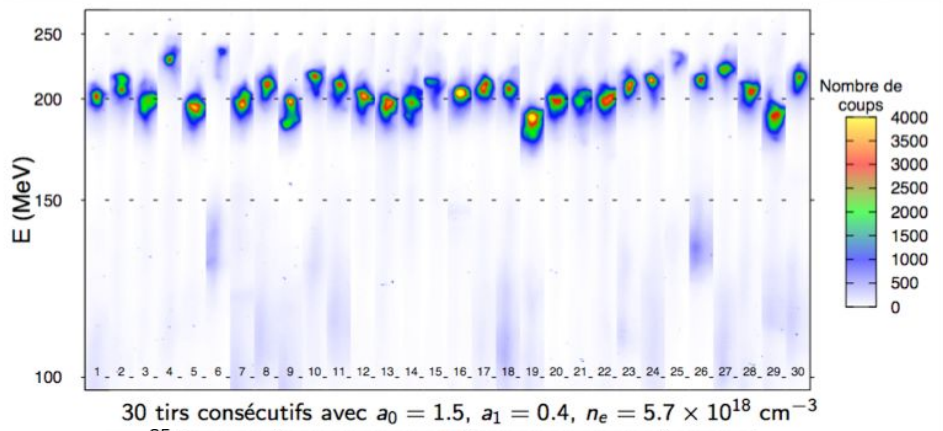
→ **Injection contrôlée** [Faure *et al.* Nature **444**, 737-739 (2006)]

# Injection dans un accélérateur plasma

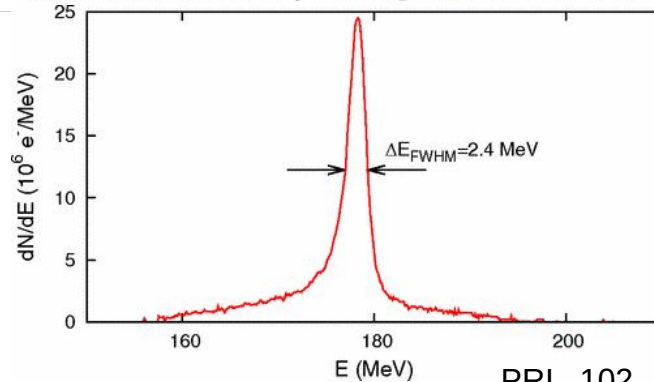
## Auto-injection



## Injection contrôlée



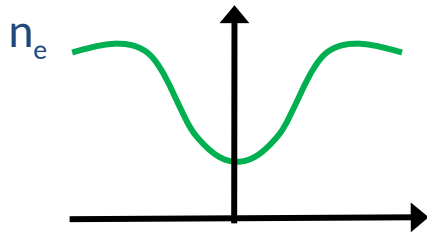
30 tirs consécutifs avec  $a_0 = 1.5$ ,  $a_1 = 0.4$ ,  $n_e = 5.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$





# Guidage plasma

## Guide d'onde plasma



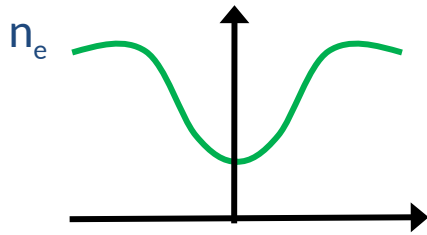
Indice de réfraction  $\eta = \sqrt{1 - n_e / n_c}$

→ agit comme une lentille

- On génère un filament plasma qui se détend pour former **un canal plasma**.
- Le filament peut être généré soit par une décharge électrique, soit par un laser.

# Guidage plasma

## Guide d'onde plasma



Indice de réfraction  $\eta = \sqrt{1 - n_e/n_c}$

→ agit comme une lentille

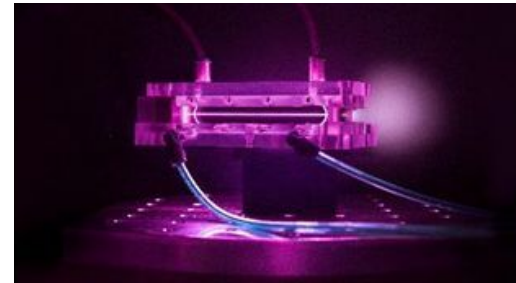
- On génère un filament plasma qui se détend pour former **un canal plasma**.
- Le filament peut être généré soit par une décharge électrique, soit par un laser.

### Guide optique

Durfee *et al.* PRL **71**, 2409-2412 (1993)

### Capillaire à décharge

Buttler *et al.* PRL **89**, 185003 (2002)



# Guidage plasma : capillaire à décharge

*W. Leemans group at Berkeley*

nature *physics* | VOL 2 | OCTOBER 2006

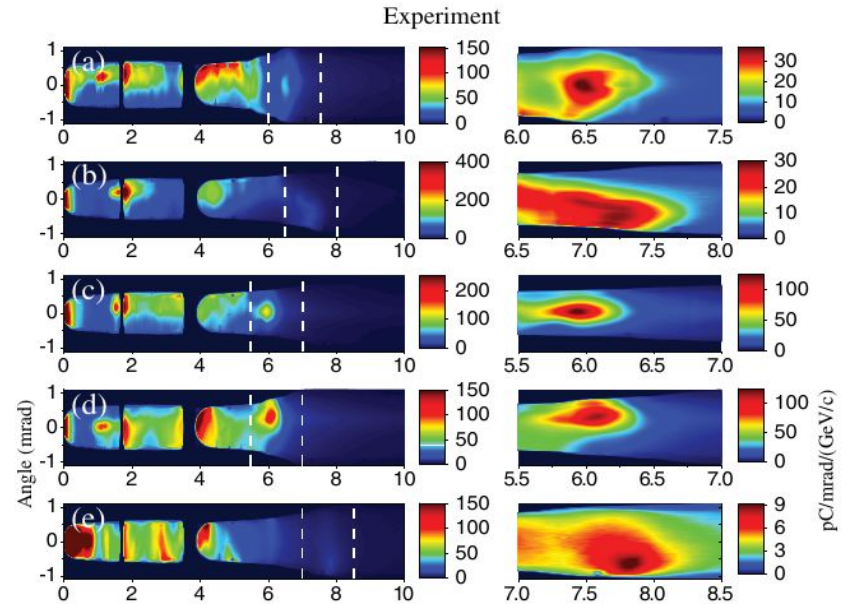
⇒ **1 GeV** (1 J, acc. length ~ 1 cm)

PRL **113**, 245002 (2014)

⇒ **4 GeV** (16 J, acc. length ~ 9 cm)

PHYSICAL REVIEW LETTERS **122**, 084801 (2019)

⇒ **8 GeV** (40 J acc. length ~ 20 cm)



# Guidage plasma : guide optique

Le schéma initial de guidage optique, utilisant des impulsions lasers longues, [PRL **71**, 2409-2412 (1993)] est inefficace aux densités plasmas requise pour l'accélération.

## → Nouveaux schémas avec impulsions ultra-courtes

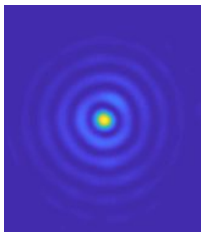
[Optics Letters 44, 3414-3417 (2019), PRE 102, 053201 (2020), PRL 125, 07480 (2020)]

### Axiparabole

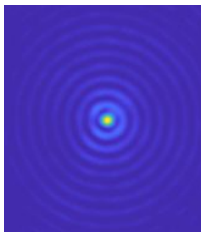
Optique en réflexion qui focalise le laser en ligne (faisceau quasi-Bessel)

*Tache focale le long de la ligne*

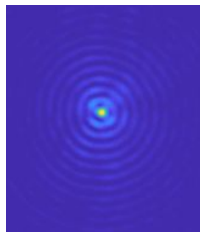
$z = 2 \text{ mm}$



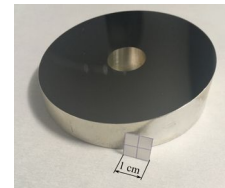
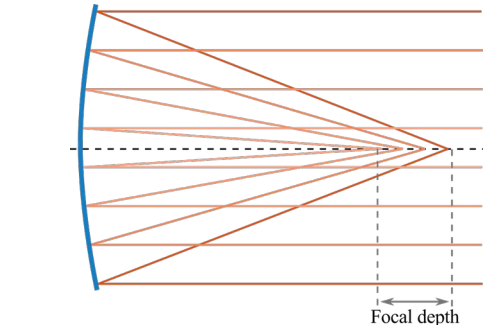
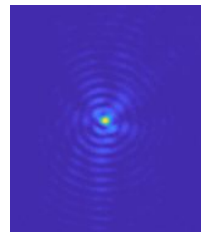
$z = 5 \text{ mm}$



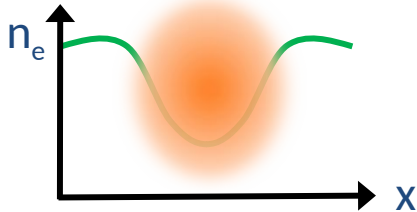
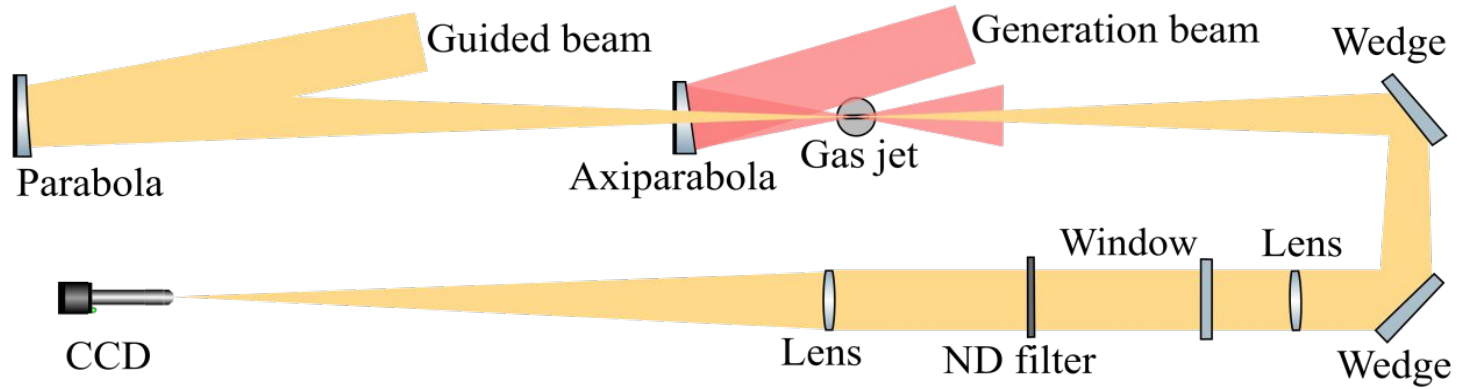
$z = 7.5 \text{ mm}$



$z = 10 \text{ mm}$

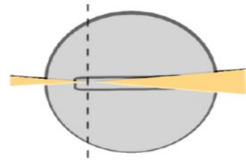
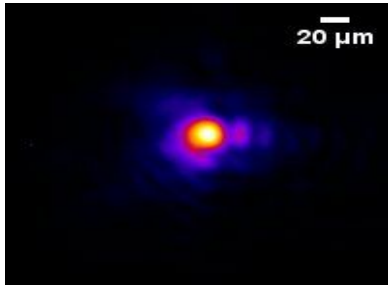


# Guidage plasma : guide optique

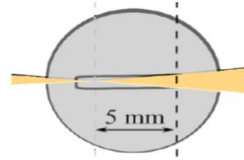
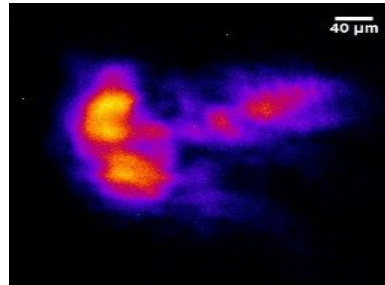


Ionisation par le champ  
⇒ l'efficacité ne dépend pas de  
la densité plasma

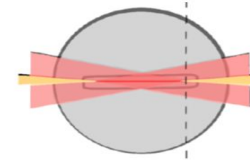
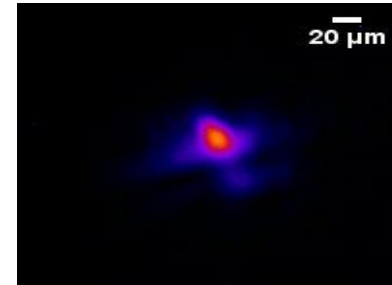
# Guidage plasma : guide optique



TW laser at focus



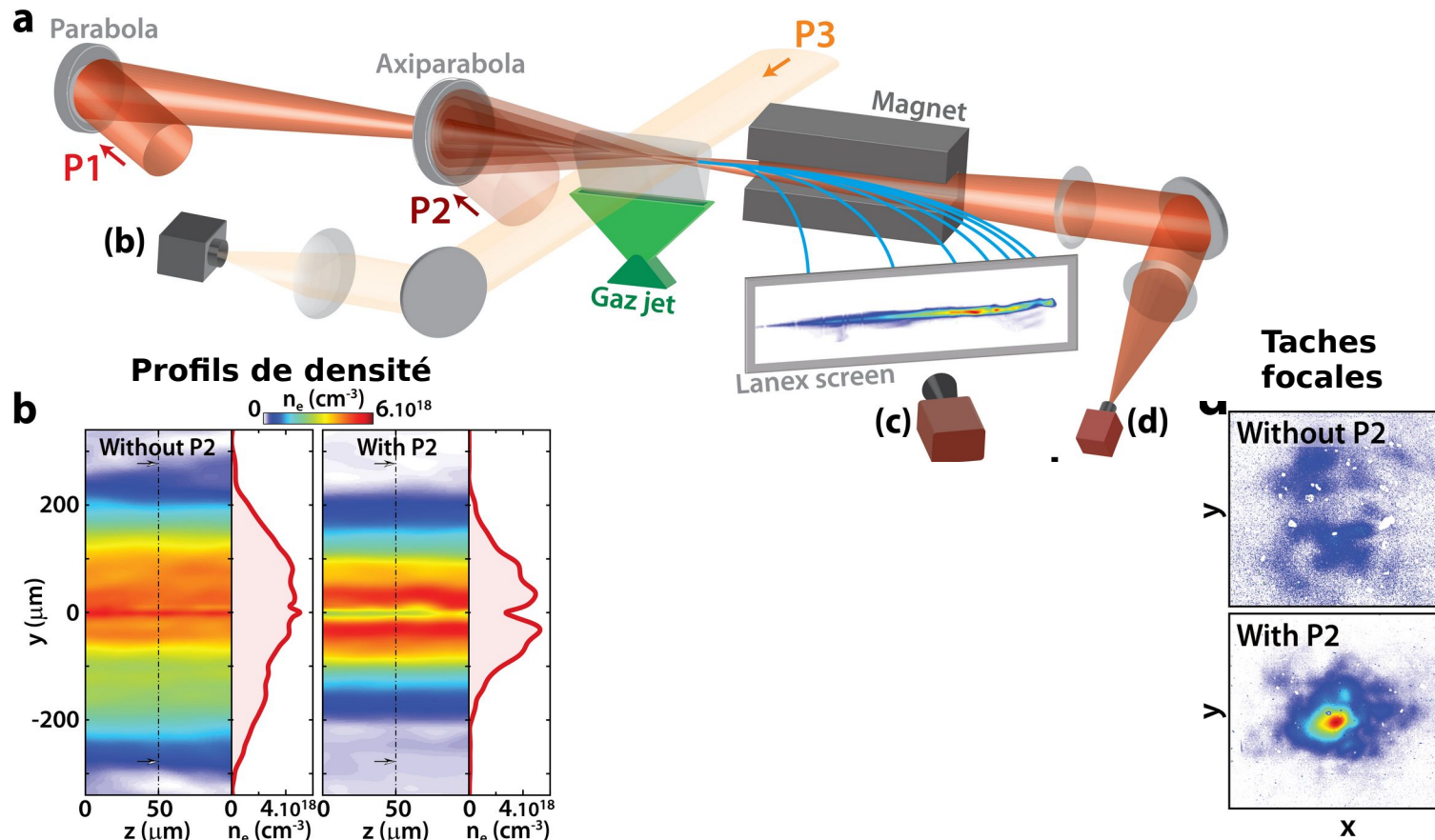
TW laser 10 mm after the focus



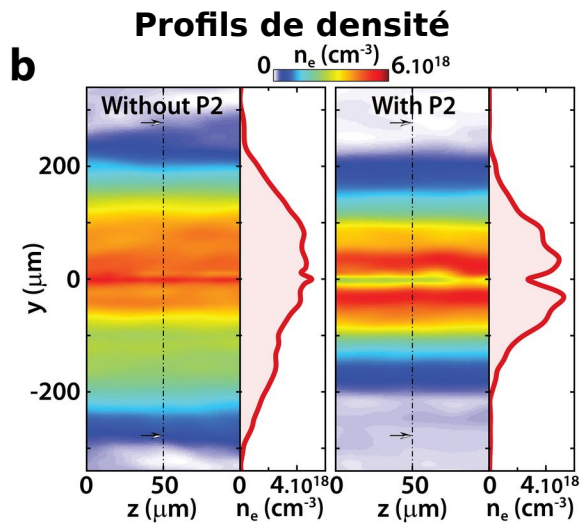
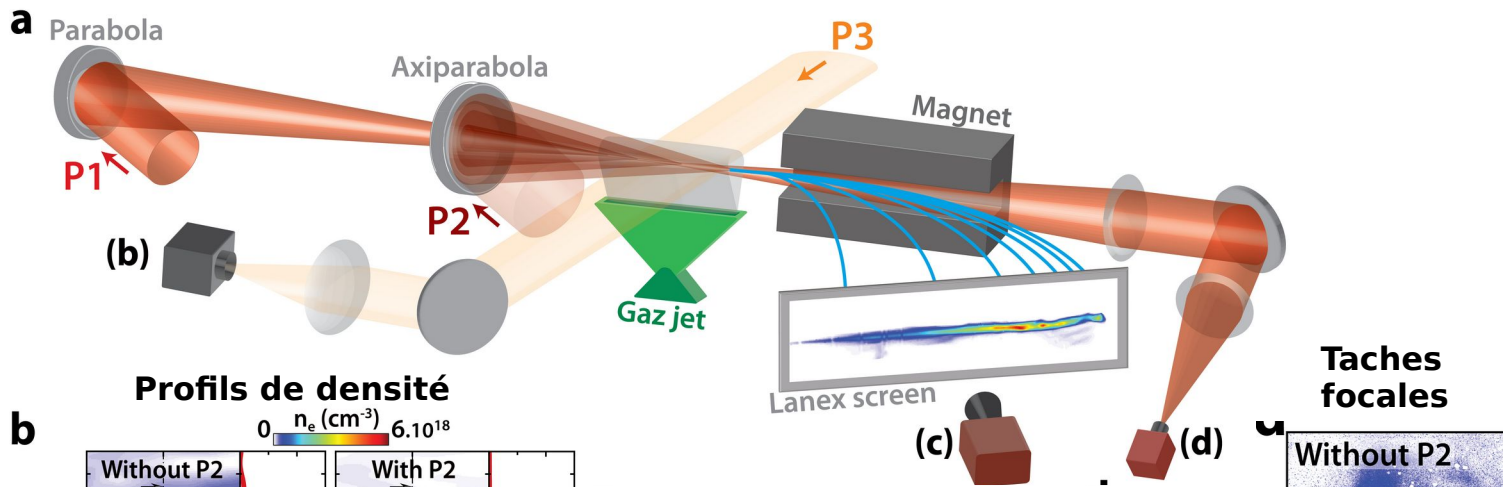
TW laser 10 mm after the focus **with guiding**

Efficacité de guidage ~ 50%

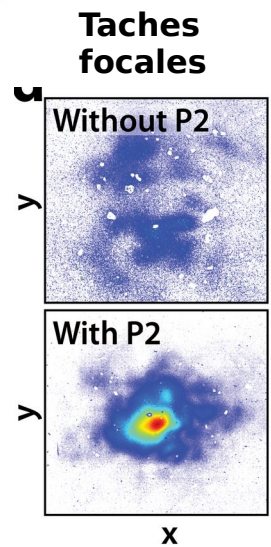
# Accélération dans un guide d'onde plasma



# Accélération dans un guide d'onde plasma



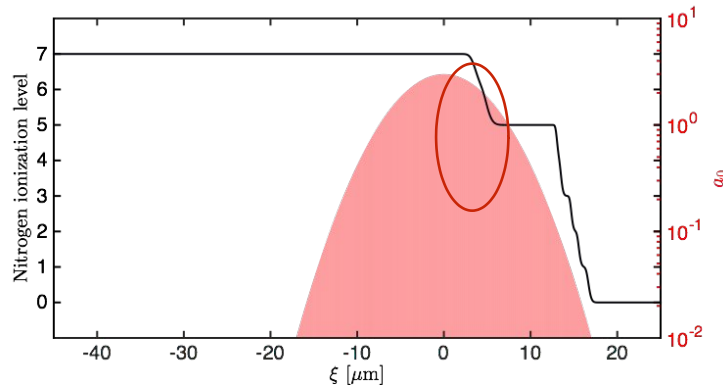
Comment injecter des électrons dans le champ accélérateur ?



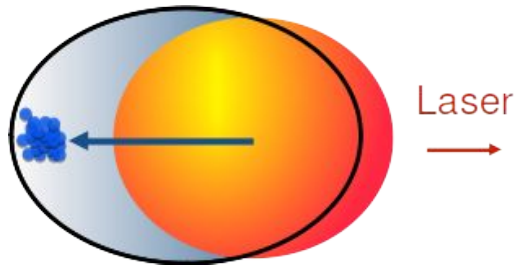


# Injection par ionisation

**Gaz = Hydrogène + 1% Azote**



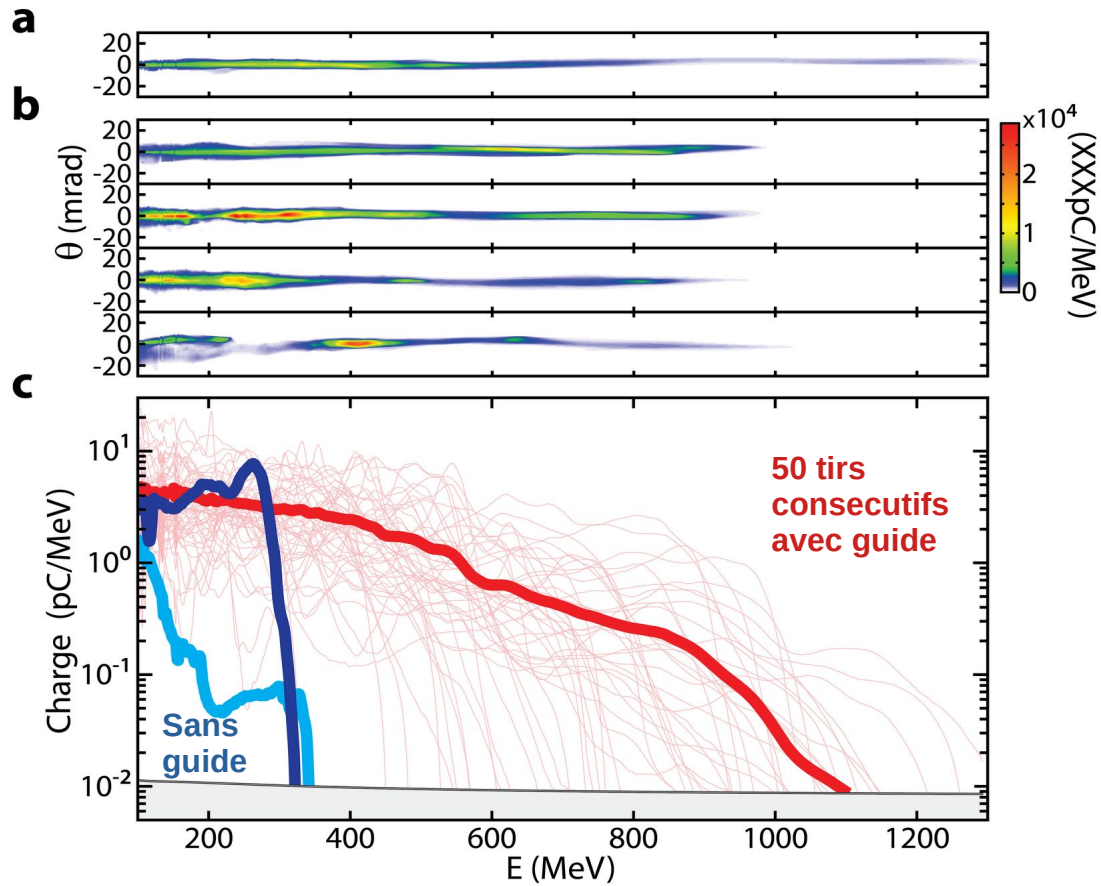
$N^{5+}$  et  $N^{6+}$  sont ionisés quand l'éclairement laser est maximal



Les électrons libérés au repos près du centre de la cavité plasma acquièrent l'énergie nécessaire pour être piégés, en glissant vers l'arrière de la cavité.

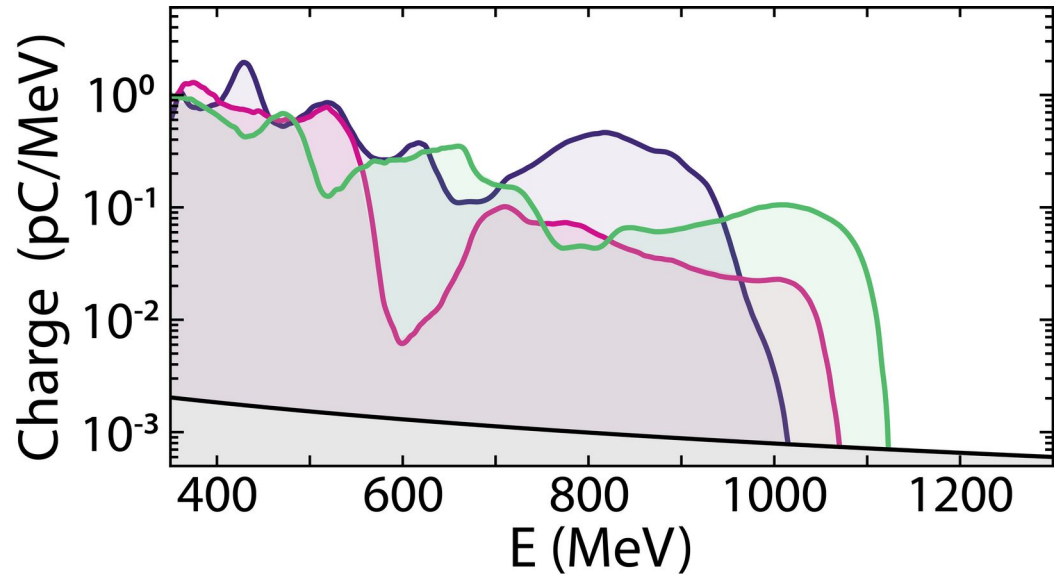
# Injection par ionisation

- ◆ Laser 1.7 J - 30 fs
- ◆ Jet de gaz de 15 mm
- ◆ Spectre continu jusqu'à ~ 1.1 GeV



# Injection par ionisation

- ◆ Laser 1.7 J - 30 fs
- ◆ Jet de gaz de 15 mm
- ◆ Spectre continu jusqu'à ~ 1.1 GeV

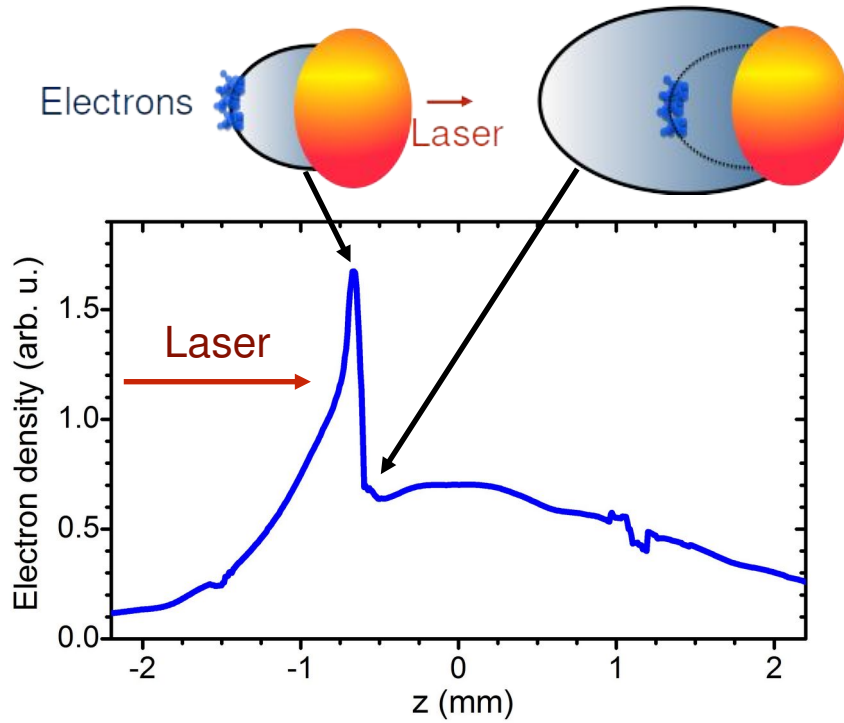


- ◆ Ajout d'une fente à l'entrée du spectromètre → erreur sur l'énergie < 44 MeV
- ◆ 70% des tirs avec guidage et énergie > 600 MeV
- ◆ 50 pC au dessus de 350 MeV (2% d'efficacité de conversion)

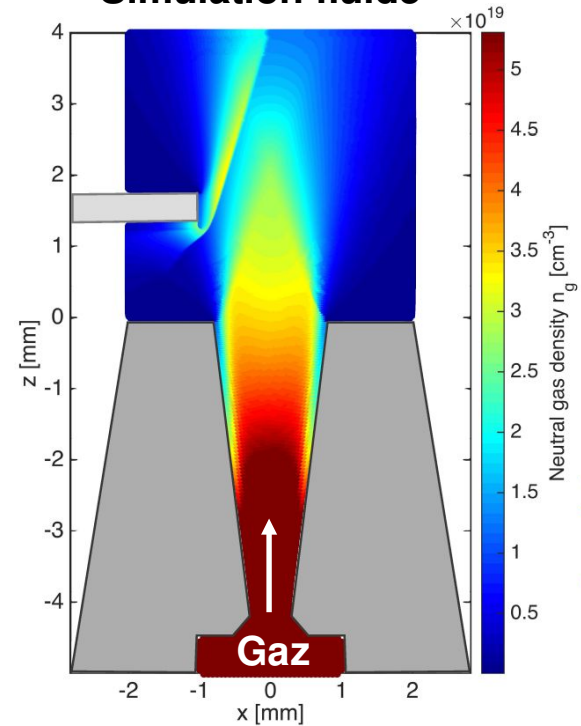
# Injection dans un gradient de densité raide

Plasma cavity before  
the shock front

Plasma cavity after  
the shock front

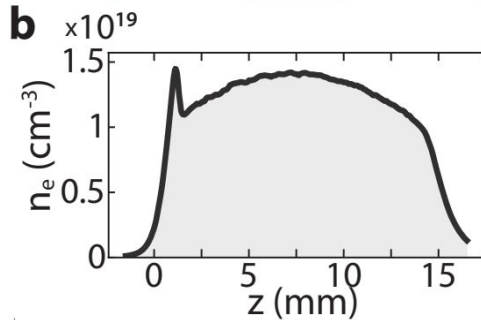
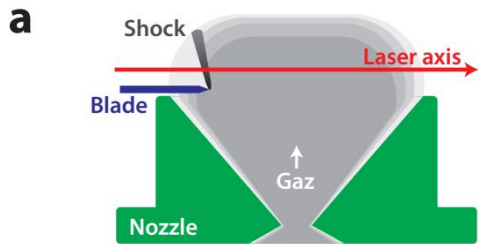


**Simulation fluide**

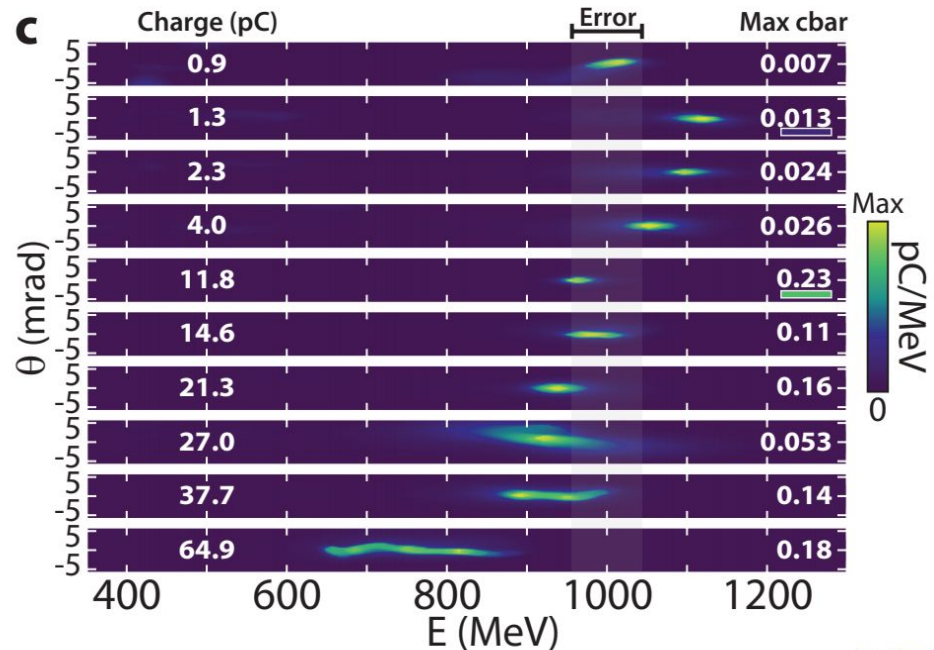


# Injection dans un gradient de densité raide

## Injection dans un gradient raide de densité

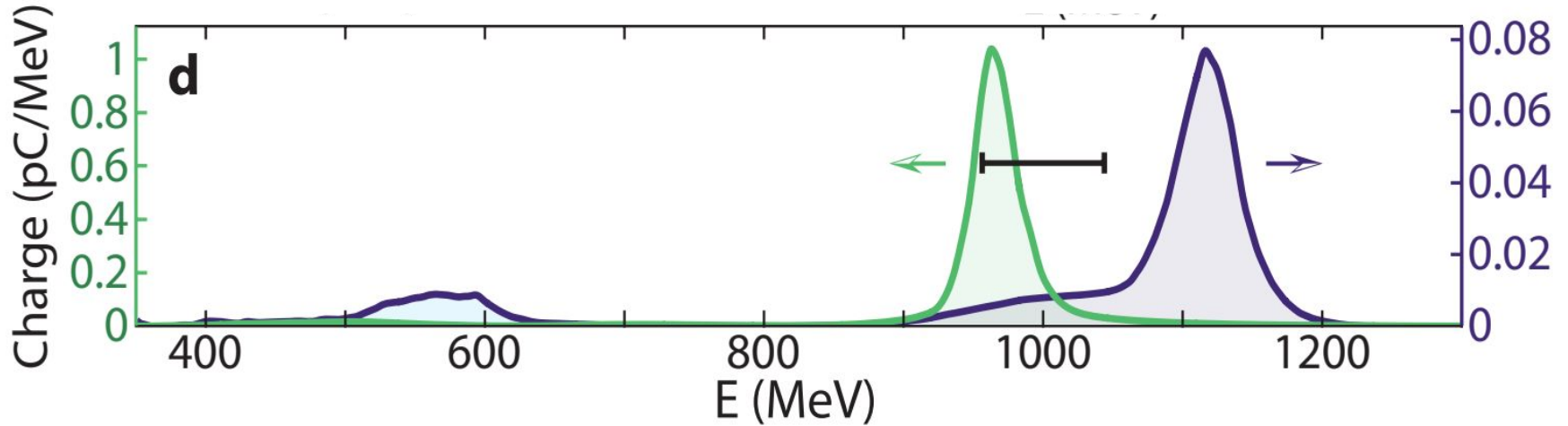


## 10 tirs d'une série de 14 tirs consécutifs triés par charge



Guided laser  $\Rightarrow$  peaked spectra  $> 600$  MeV

# Injection dans un gradient de densité raide



- ◆ Dispersion en énergie à mi-hauteur de 2% pour les meilleurs tirs
- ◆ Efficacité de conversion de 1% pour les tirs à 1 GeV, et de 6% pour les faisceaux les plus chargés

# Conclusion et perspectives

- 70% de tirs réussis (besoin d'améliorer la stabilité en pointé du laser).
- Guidage + injection dans un gradient raide → bonne qualité de faisceau à 1 GeV.
- Jusqu'à 6% d'efficacité de conversion.
- Jusqu'à 2% de dispersion en énergie à 1 GeV (FWHM).
- **Prochaines étapes :**
  - Laser PW → faisceaux de plusieurs GeV.
  - Remise en phase du faisceau → augmentation du gain en énergie.
  - Stabilisation du pointé laser → 100% de tirs réussis.

