

Développement d'un injecteur pour l'accélération laser-plasma multi-étages

T.L. Audet¹, M. Hansson², P. Lee¹, F.G. Desforges¹, G. Maynard¹, S. Dobosz Dufrenoy³, R. Lehe⁴,
J.-L. Vay⁴, B. Aurand², A. Persson², I. Gallardo-González², A. Maitrallain³, P. Monot³, C.-G.
Wahlström², O. Lundh², B. Cros¹

¹LPGP, CNRS, Univ Paris Sud, Université Paris-Saclay, 91405, Orsay, France

²Department of Physics, Lund University, P.O. Box 118, S-22100 Lund, Sweden

³LIDyL, CEA, Université Paris-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France

⁴Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, 94720 U.S.A.

Journées accélérateurs, Roscoff, 5 - 7 Octobre 2015

Plan

1 Contexte et Motivations

- Accélération laser plasma multi-étages
- Injecteur d'électrons
- Injection induite par ionisation

2 Caractérisation de la cible et dispositif expérimental

- ELectron Injector for compact Staged high energy Accelerator (ELISA)
- Caractérisation de la cible
- Dispositif expérimental au LLC

3 Résultats

- Position du plan focal
- Evolution du laser et paquets d'électrons

Le multi-étages pour dépasser les limitations de l'accélération laser-plasma (ALP)

Potentiel de l'ALP

- Forts champs accélérateurs :
 $|\vec{E}| \sim 1 - 100 \text{ GV/m}$
- Compacité
- Paquets ultra-courts : $\sim 10 \text{ fs}$
- Faible émittance

Le multi-étages pour dépasser les limitations de l'accélération laser-plasma (ALP)

Potential de l'ALP

- Forts champs accélérateurs :
 $|\vec{E}| \sim 1 - 100 \text{ GV/m}$
- Compacité
- Paquets ultra-courts : $\sim 10 \text{ fs}$
- Faible émittance

Limitations

- Déphasage des électrons par rapport à l'onde de plasma L_ϕ
- Epuisement de l'énergie laser L_D
- Diffraction du laser L_R

Le multi-étages pour dépasser les limitations de l'accélération laser-plasma (ALP)

Potentiel de l'ALP

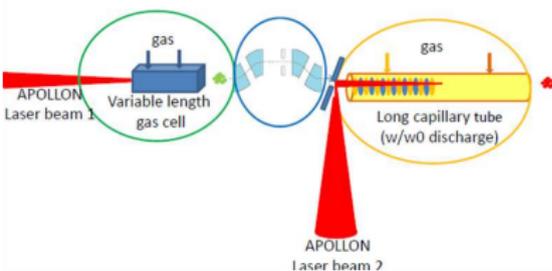
- Forts champs accélérateurs : $|\vec{E}| \sim 1 - 100 \text{ GV/m}$
- Compacité
- Paquets ultra-courts : $\sim 10 \text{ fs}$
- Faible émittance

Limitations

- Déphasage des électrons par rapport à l'onde de plasma L_ϕ
- Epuisement de l'énergie laser L_D
- Diffraction du laser L_R

Solution : multi-étages

- Injecteur : régime non-linéaire ; énergie modeste (50-100 MeV) mais contrôlable
- Second stage : régime linéaire ; augmentation de l'énergie
- Ligne de transport magnétique : Couplage des deux étages **Voir présentation de S. Dobosz Dufrénoy**



Le multi-étages pour dépasser les limitations de l'accélération laser-plasma (ALP)

Potentiel de l'ALP

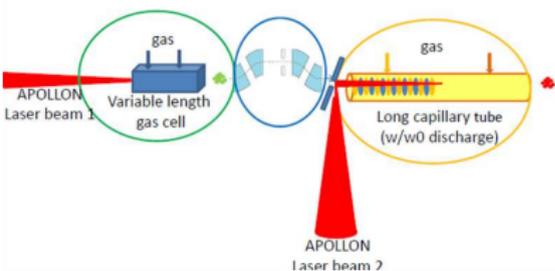
- Forts champs accélérateurs : $|\vec{E}| \sim 1 - 100 \text{ GV/m}$
- Compacité
- Paquets ultra-courts : $\sim 10 \text{ fs}$
- Faible émittance

Limitations

- Déphasage des électrons par rapport à l'onde de plasma L_ϕ
- Epuisement de l'énergie laser L_D
- Diffraction du laser L_R

Solution : multi-étages

- Injecteur : régime non-linéaire ; énergie modeste (50-100 MeV) mais contrôlable
- Second stage : régime linéaire ; augmentation de l'énergie
- Ligne de transport magnétique : Couplage des deux étages **Voir présentation de S. Dobosz Dufrénoy**



Travail en cours sur l'injecteur

Paramètres de contrôle des paquets d'électrons

L'injecteur adapté

- La plus grande charge possible dans la gamme 50-100 MeV
- Dispersion en énergie : $\sim 1\%$
- Divergence : 1-10 mrad
- Stable et reproductible

Paramètres de contrôle des paquets d'électrons

L'injecteur adapté

- La plus grande charge possible dans la gamme 50-100 MeV
- Dispersion en énergie : $\sim 1\%$
- Divergence : 1-10 mrad
- Stable et reproductible

Stabilité & reproductibilité

- Fluctuations de densité → Cellule de gaz pour le confinement
- Fluctuations du pointé laser → Stabilisation du pointé [Genoud et al., 2011]
- Variations d'énergie laser → Contrôle tir à tir de l'énergie laser
- Profil d'intensité du laser → Correction du front d'onde

Paramètres de contrôle des paquets d'électrons

L'injecteur adapté

- La plus grande charge possible dans la gamme 50-100 MeV
- Dispersion en énergie : $\sim 1\%$
- Divergence : 1-10 mrad
- Stable et reproductible

Stabilité & reproductibilité

- Fluctuations de densité → Cellule de gaz pour le confinement
- Fluctuations du pointé laser → Stabilisation du pointé [Genoud et al., 2011]
- Variations d'énergie laser → Contrôle tir à tir de l'énergie laser
- Profil d'intensité du laser → Correction du front d'onde

Propriétés des paquets d'électrons

- Densité électronique du plasma
- Énergie laser
- Composition du gaz → **Utilisation d'un mélange de gaz**
- **Position du plan focal et profil de densité**

Paramètres de contrôle des paquets d'électrons

L'injecteur adapté

- La plus grande charge possible dans la gamme 50-100 MeV
- Dispersion en énergie : $\sim 1\%$
- Divergence : 1-10 mrad
- Stable et reproductible

Stabilité & reproductibilité

- Fluctuations de densité → Cellule de gaz pour le confinement
- Fluctuations du pointé laser → Stabilisation du pointé [Genoud et al., 2011]
- Variations d'énergie laser → Contrôle tir à tir de l'énergie laser
- Profil d'intensité du laser → Correction du front d'onde

Propriétés des paquets d'électrons

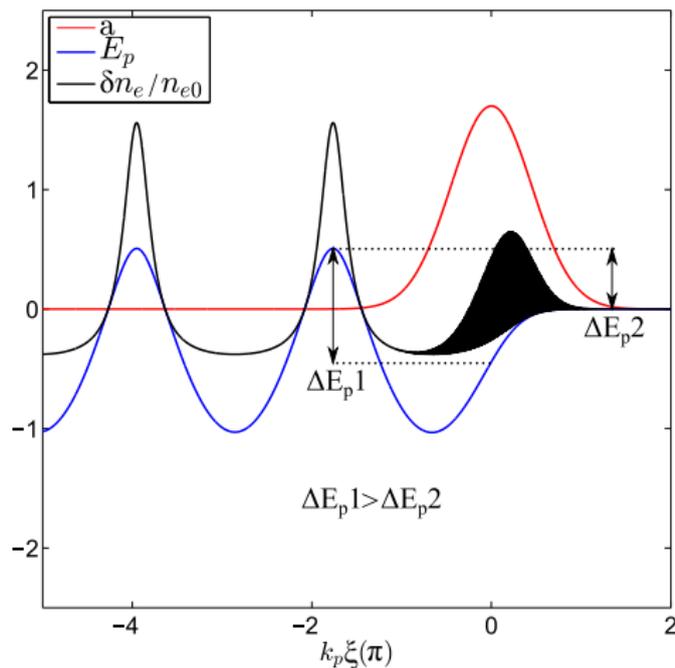
- Densité électronique du plasma
- Énergie laser
- Composition du gaz → **Utilisation d'un mélange de gaz**
- **Position du plan focal et profil de densité**

Utilisation de la technique d'injection induite par ionisation

Mécanisme de l'injection induite par ionisation

Principe

- Faible proportion d'un gaz lourd ajouté (99% H_2 + 1% N_2)
- Les électrons des couches externes de N se comportent comme ceux de H
- Les électrons des couches internes de N sont ionisés proches du pic d'intensité laser



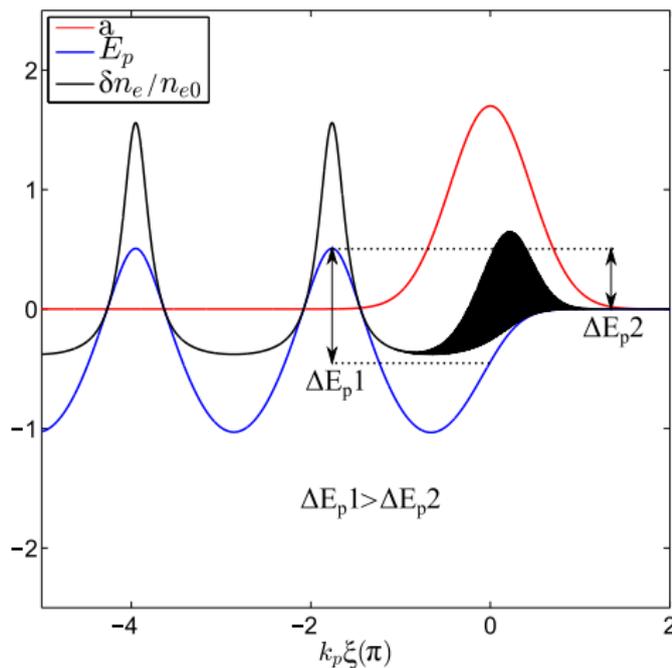
Mécanisme de l'injection induite par ionisation

Principe

- Faible proportion d'un gaz lourd ajouté (99% H_2 + 1% N_2)
- Les électrons des couches externes de N se comportent comme ceux de H
- Les électrons des couches internes de N sont ionisés proches du pic d'intensité laser

Avantages

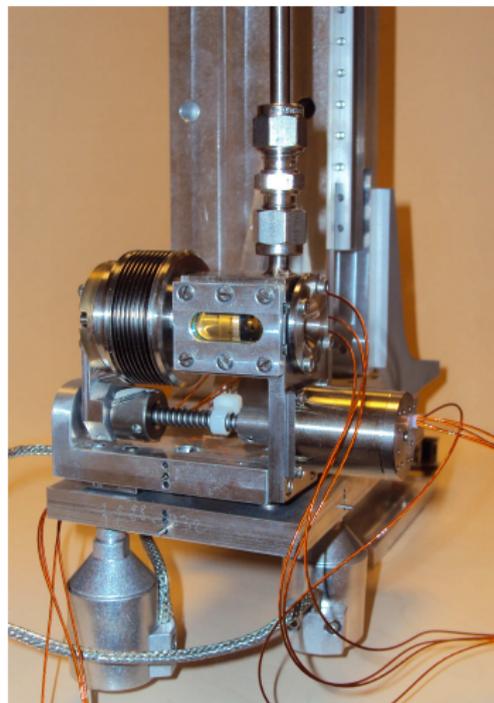
- Augmentation de la charge [Desforges et al., 2014]
- Diminution de l'émittance transverse [McGuffey et al., 2010]
- Diminution du seuil de piégeage en a_0 [Pak et al., 2010, Chen et al., 2012]



ELectron Injector for compact Staged high energy Accelerator (ELISA)

Cellule de gaz de longueur variable

- $P_{\text{reservoir}} = 100 \rightarrow 500 \text{ mbar}$
($\sim 4.5 \times 10^{18} \rightarrow 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)
- $L_{\text{cell}} = 0 \rightarrow 10 \text{ mm}$
- Gaz : 99% H_2 + 1% N_2

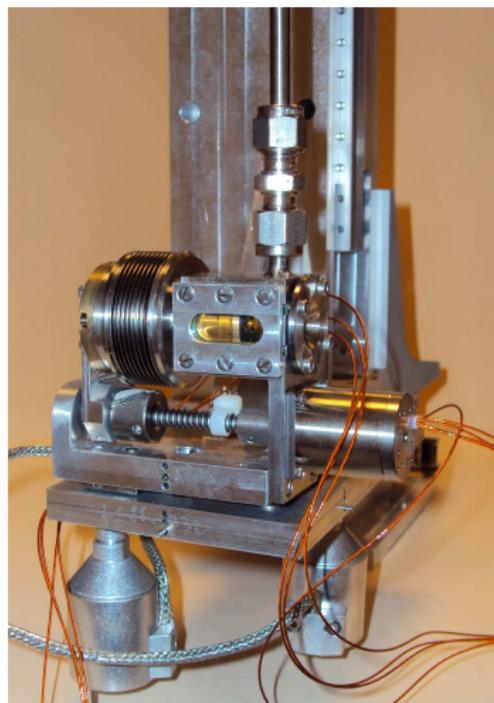


ELectron Injector for compact Staged high energy Accelerator (ELISA)

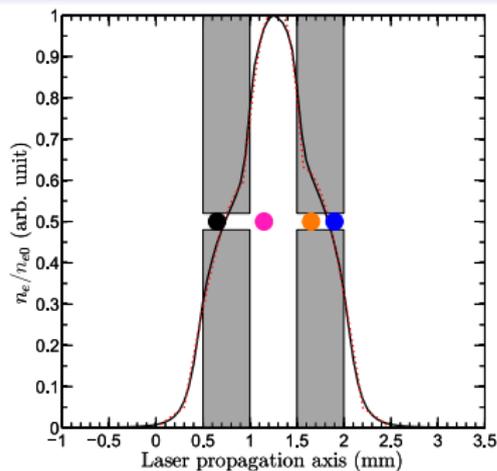
Cellule de gaz de longueur variable

- $P_{\text{reservoir}} = 100 \rightarrow 500 \text{ mbar}$
($\sim 4.5 \times 10^{18} \rightarrow 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)
- $L_{\text{cell}} = 0 \rightarrow 10 \text{ mm}$
- Gaz : 99% H_2 + 1% N_2

La densité dans la cellule a été caractérisée

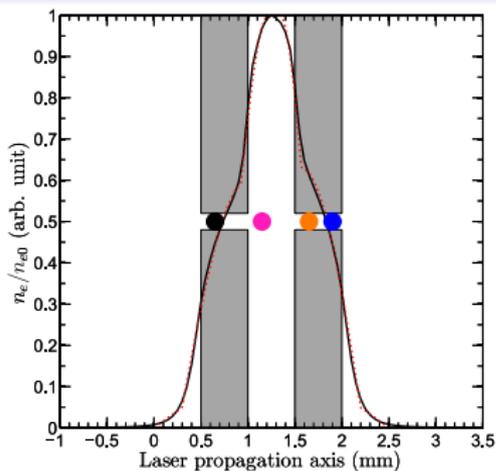


Les simulations fluides permettent de déterminer le profil de densité longitudinal



- Simulations fluides avec OpenFOAM et le solveur SonicFoam (transitoire, turbulent, capacité d'écoulements soniques)
- On a accès à la densité, aux vitesses, température... en fonction de l'espace et du temps
- Le profil de densité est normalisé aux valeurs mesurée expérimentalement par interférométrie
- Le profil de densité sera injecté dans les simulations PIC

Les simulations fluides permettent de déterminer le profil de densité longitudinal



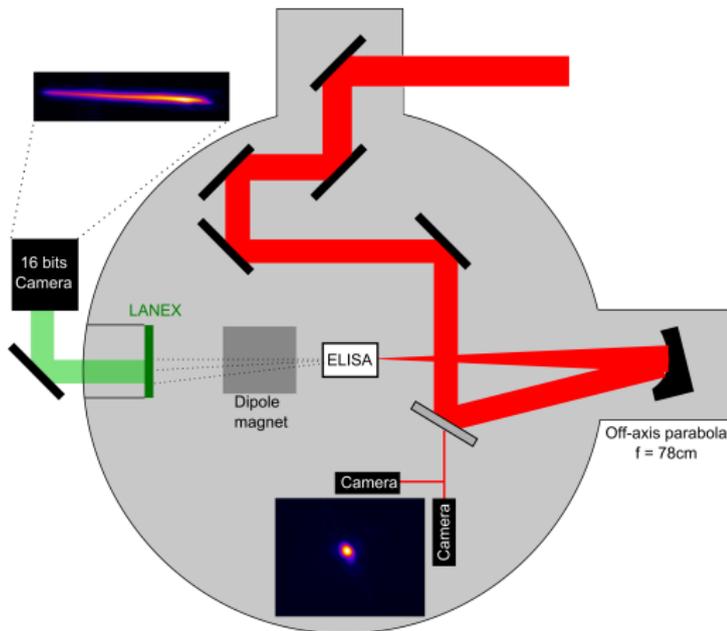
- Simulations fluides avec OpenFOAM et le solveur SonicFoam (transitoire, turbulent, capacité d'écoulements soniques)
- On a accès à la densité, aux vitesses, température... en fonction de l'espace et du temps
- Le profil de densité est normalisé aux valeurs mesurée expérimentalement par interférométrie
- Le profil de densité sera injecté dans les simulations PIC

Résultats expérimentaux obtenus avec cette cellule

Dispositif expérimental au LLC

Le laser du LLC

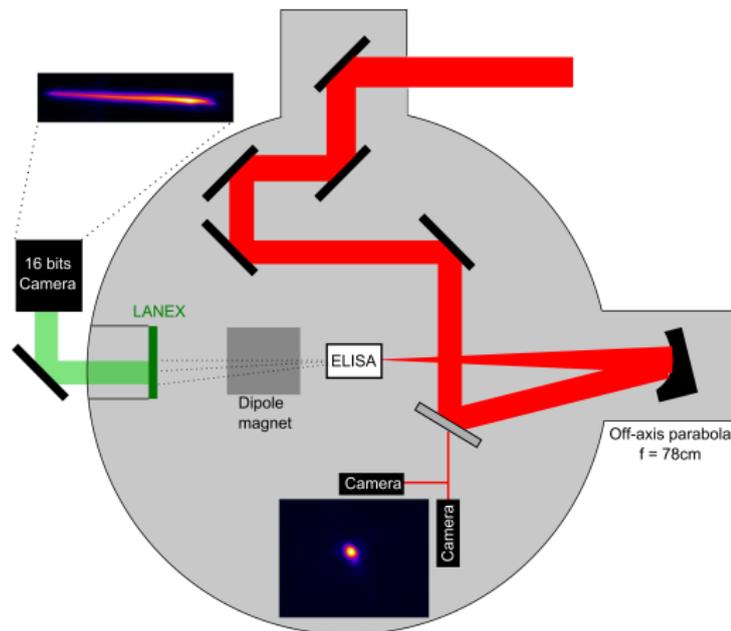
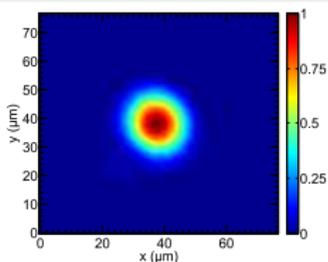
- Oscillateur Ti :Saphire :
 $\lambda = 800 \text{ nm}$
- Durée d'impulsion :
 $\tau = 37 \pm 3 \text{ fs}$
- Correction du front d'onde
- Tache focale : $17 \mu\text{m}$
(FWHM)
- $I_L = (3.1 \pm 0.8) \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$
- $a_0 = 1.2 \pm 0.1$



Dispositif expérimental au LLC

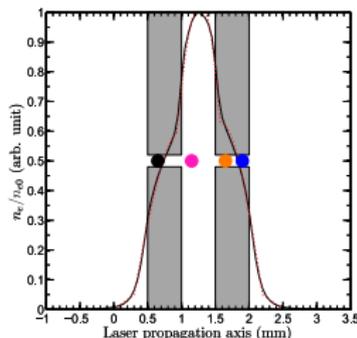
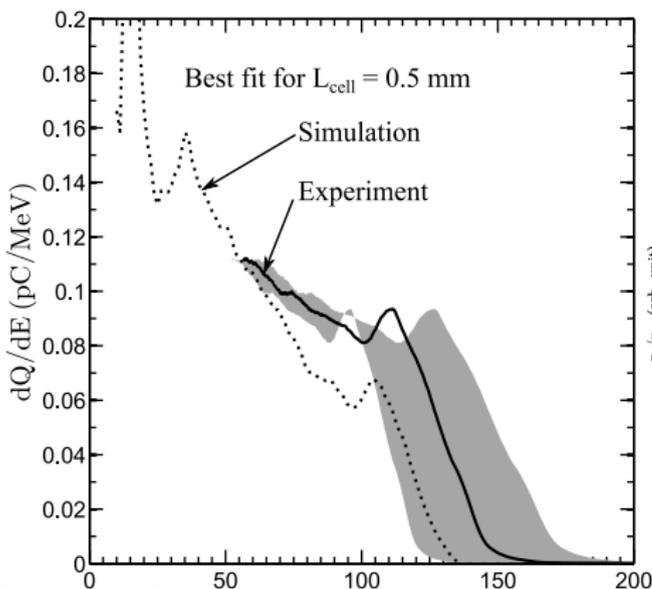
Le laser du LLC

- Oscillateur Ti :Saphire :
 $\lambda = 800 \text{ nm}$
- Durée d'impulsion :
 $\tau = 37 \pm 3 \text{ fs}$
- Correction du front d'onde
- Tache focale : $17 \mu\text{m}$
(FWHM)
- $I_L = (3.1 \pm 0.8) \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$
- $a_0 = 1.2 \pm 0.1$



La position du plan focal contrôle les propriétés des paquets d'électrons

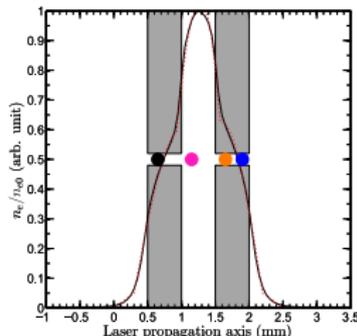
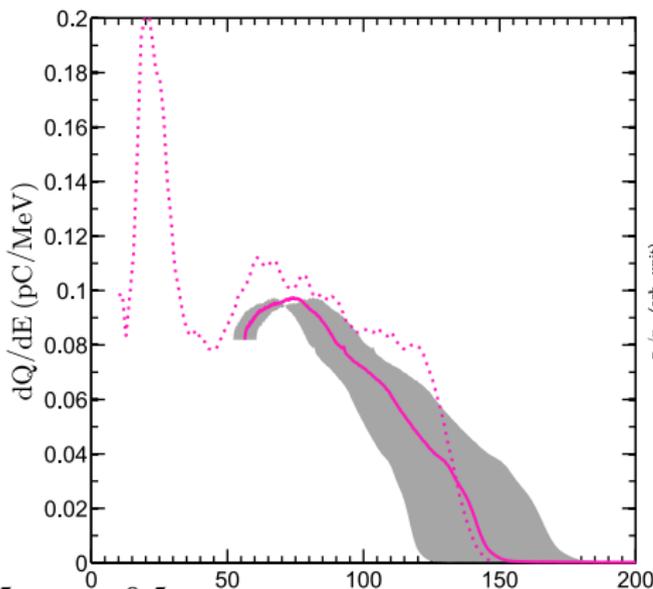
$z_f = 0.65 \text{ mm}$



- $L_{\text{cell}} = 1 \pm 0.5 \text{ mm} \rightarrow 0.5 \text{ mm}$
- La cellule est déplacée le long de l'axe laser
- Les résultats expérimentaux sont comparés aux simulations PIC avec WARP CIRC Voir [présentation de Patrick Lee](#)

La position du plan focal contrôle les propriétés des paquets d'électrons

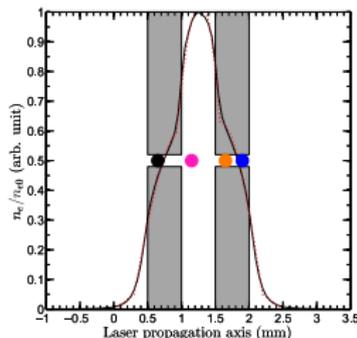
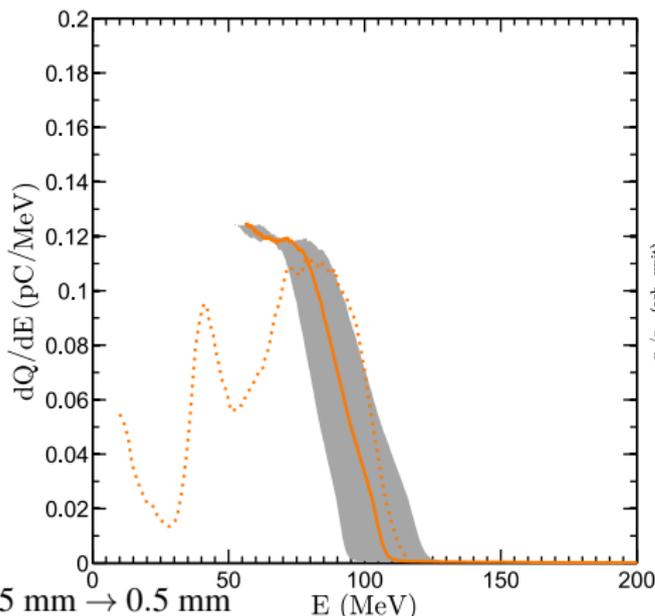
$$z_f = 1.15 \text{ mm}$$



- $L_{cell} = 1 \pm 0.5 \text{ mm} \rightarrow 0.5 \text{ mm}$
- La cellule est déplacée le long de l'axe laser
- Les résultats expérimentaux sont comparés aux simulations PIC avec WARP CIRC Voir [présentation de Patrick Lee](#)

La position du plan focal contrôle les propriétés des paquets d'électrons

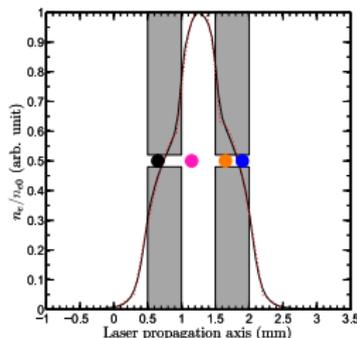
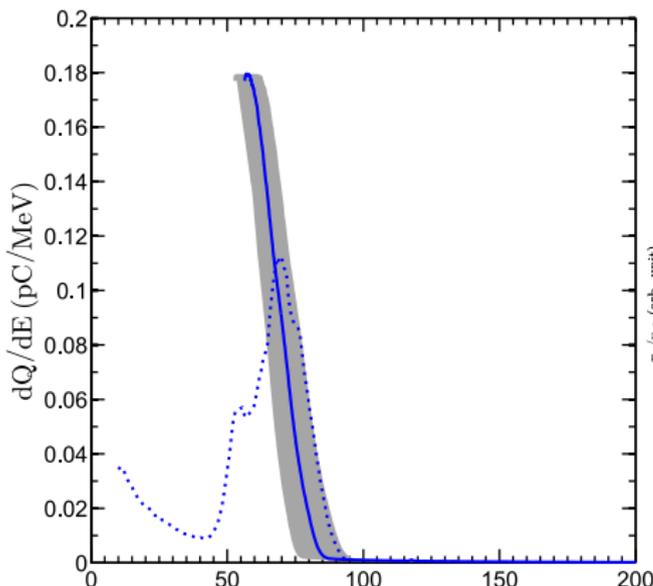
$$z_f = 1.65 \text{ mm}$$



- $L_{cell} = 1 \pm 0.5 \text{ mm} \rightarrow 0.5 \text{ mm}$
- La cellule est déplacée le long de l'axe laser
- Les résultats expérimentaux sont comparés aux simulations PIC avec WARP CIRC Voir [présentation de Patrick Lee](#)

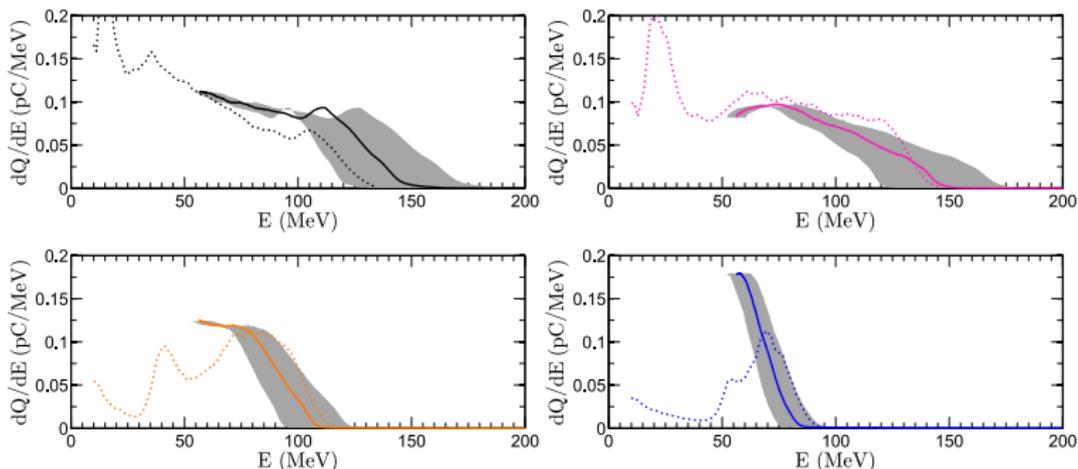
La position du plan focal contrôle les propriétés des paquets d'électrons

$$z_f = 1.9 \text{ mm}$$



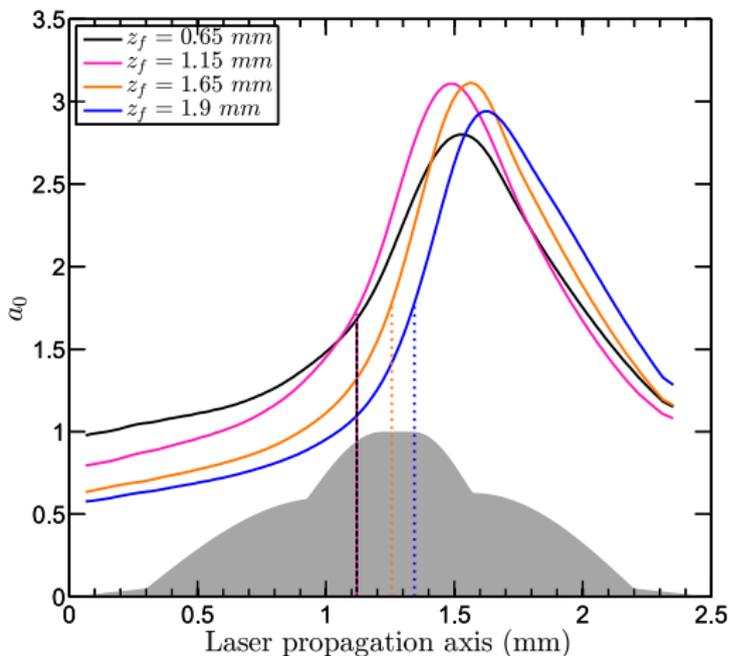
- $L_{cell} = 1 \pm 0.5 \text{ mm} \rightarrow 0.5 \text{ mm}$
- La cellule est déplacée le long de l'axe laser
- Les résultats expérimentaux sont comparés aux simulations PIC avec WARP CIRC Voir [présentation de Patrick Lee](#)

La position du plan focal contrôle la distribution en énergie des électrons accélérés

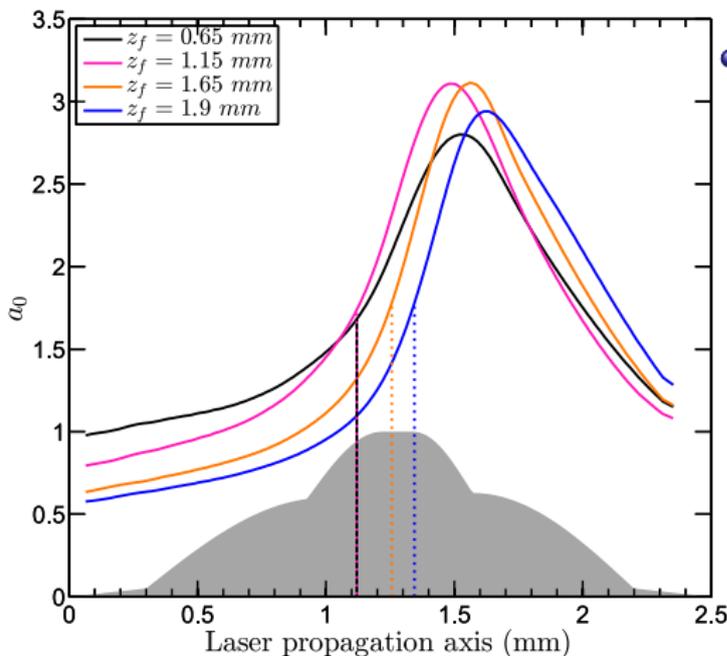


Ce comportement peut être expliqué en observant l'évolution de a_0 pendant l'interaction

La forme du profil de densité et la position relative du plan focal contrôlent la position d'injection

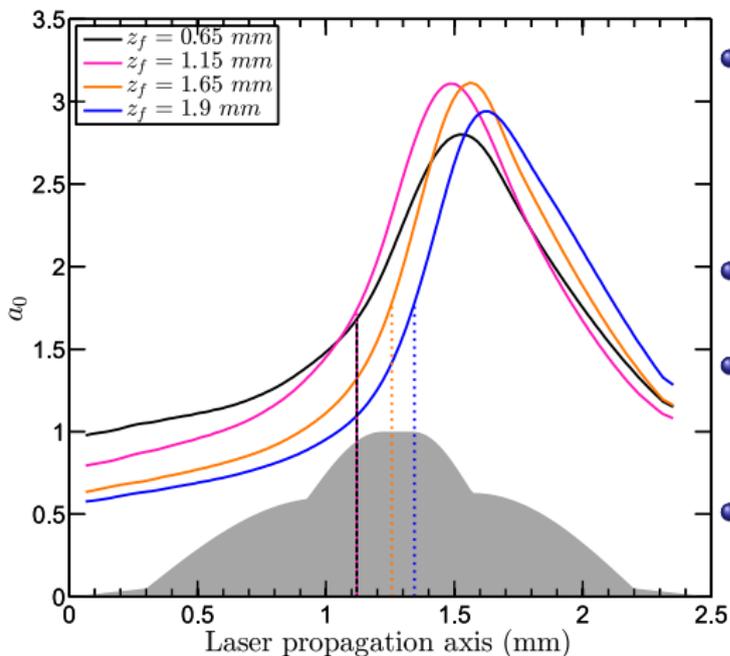


La forme du profil de densité et la position relative du plan focal contrôlent la position d'injection



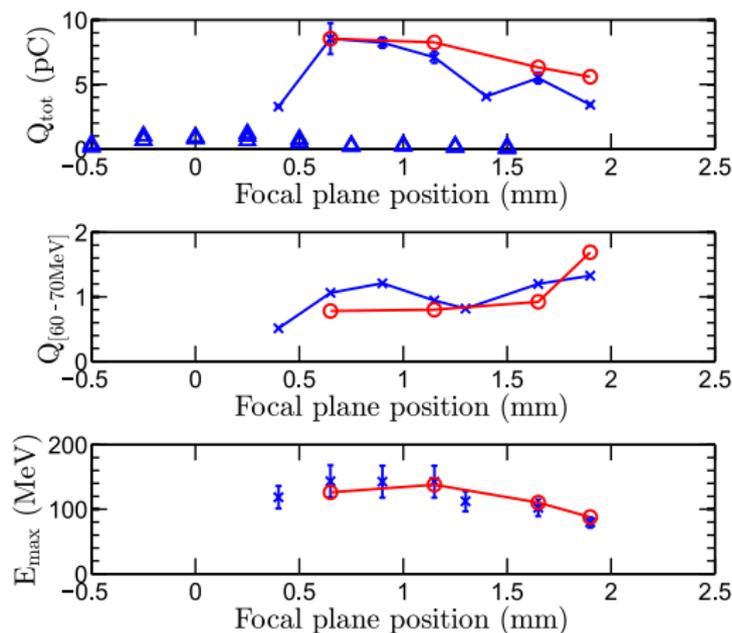
- Evolution du a_0 similaire pour toutes les positions \rightarrow La focalisation et défocalisation du laser sont dominées par le profil de densité

La forme du profil de densité et la position relative du plan focal contrôlent la position d'injection

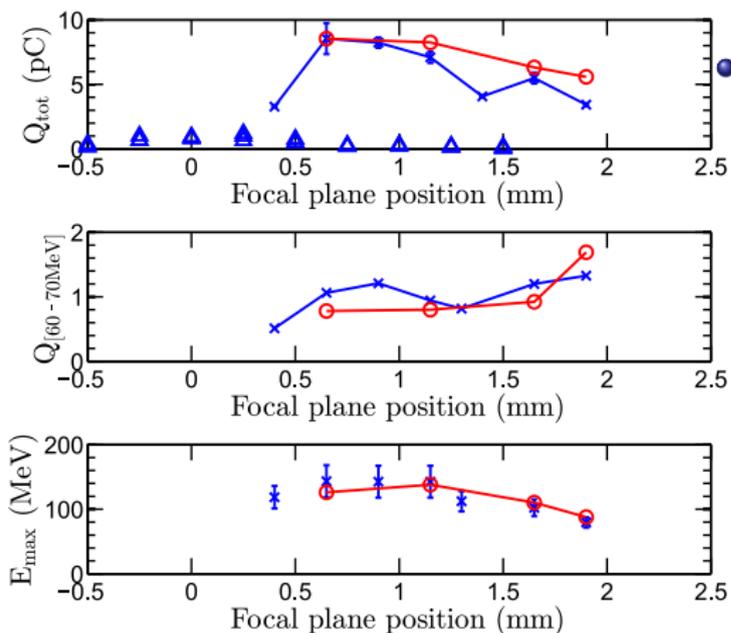


- Evolution du a_0 similaire pour toutes les positions \rightarrow La focalisation et défocalisation du laser sont dominées par le profil de densité
- La position du plan focal contrôle la valeur de a_0
- L'injection commence lorsque $a_0 = 1.7 \pm 0.1$ est atteint pour toutes les positions
- La position du plan focal détermine le début de l'injection et par conséquent la longueur d'accélération

Modifications de la charge et énergie des paquets d'électrons avec la position du foyer

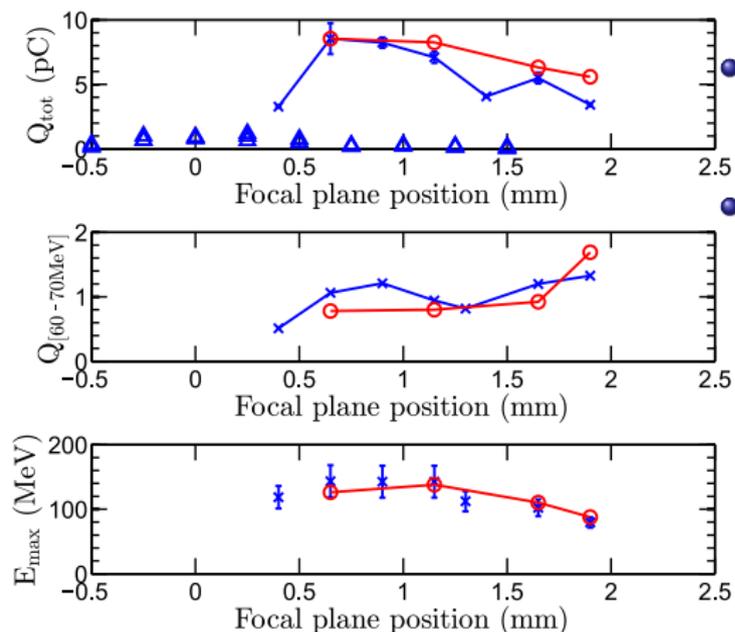


Modifications de la charge et énergie des paquets d'électrons avec la position du foyer



● L'injection induite par ionisation peut augmenter la charge d'un facteur 10

Modifications de la charge et énergie des paquets d'électrons avec la position du foyer

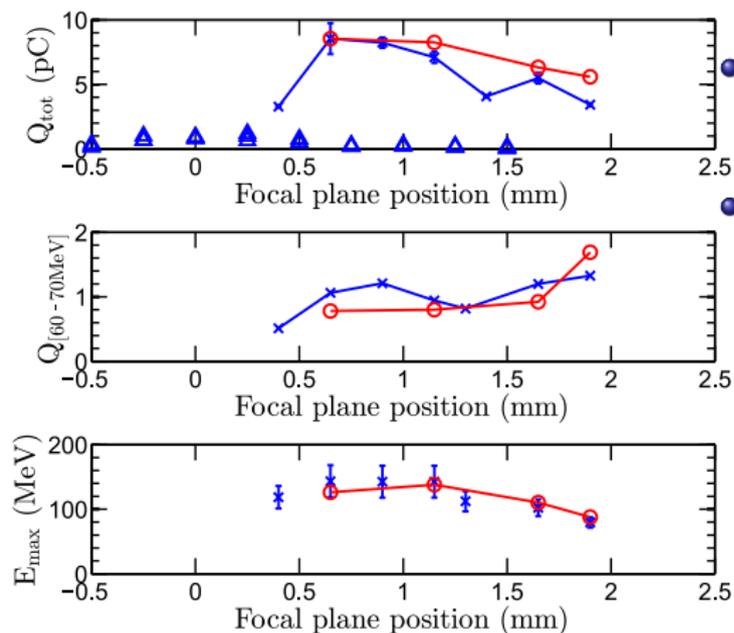


- L'injection induite par ionisation peut augmenter la charge d'un facteur 10

- La position du plan focal détermine le début de l'injection et la longueur d'accélération

- ▶ Q_{tot} diminue lorsque $z_f > 1.15$ mm
- ▶ E_{max} diminue lorsque $z_f > 1.15$ mm
- ▶ La charge dans la gamme 60-70 MeV peut être optimisée

Modifications de la charge et énergie des paquets d'électrons avec la position du foyer



- L'injection induite par ionisation peut augmenter la charge d'un facteur 10

- La position du plan focal détermine le début de l'injection et la longueur d'accélération

- ▶ Q_{tot} diminue lorsque $z_f > 1.15$ mm
- ▶ E_{max} diminue lorsque $z_f > 1.15$ mm
- ▶ La charge dans la gamme 60-70 MeV peut être optimisée

Dans cette gamme de puissance et de densité, le profil de densité et la position relative du plan focal contrôlent les propriétés des paquets d'électrons.

Conclusion & perspectives

- La position du plan focal dans ce profil de densité détermine la position d'injection, la longueur d'injection et l'amplitude des champs accélérateurs.

Conclusion & perspectives

- La position du plan focal dans ce profil de densité détermine la position d'injection, la longueur d'injection et l'amplitude des champs accélérateurs.
- La charge dans une gamme d'énergie souhaitée pour un injecteur peut être optimisée.

Conclusion & perspectives

- La position du plan focal dans ce profil de densité détermine la position d'injection, la longueur d'injection et l'amplitude des champs accélérateurs.
- La charge dans une gamme d'énergie souhaitée pour un injecteur peut être optimisée.

- Perspectives :
 - ▶ La charge peut encore être augmentée en ajustant d'autres paramètres : n_e , a_0 ou la proportion de N_2 .
 - ▶ Travail sur les autres éléments de l'accélérateur multi-étages → Ligne de transport magnétique.

Merci de votre attention

- M. Chen, E. H. Esarey, C. B. Schroeder, C. G. R. Geddes, and W. P. Leemans. Theory of ionization-induced trapping in laser-plasma accelerators. *Phys. Plasmas*, 19 :033101, 2012. doi : 10.1063/1.3689922. URL <http://link.aip.org/link/?PHP/19/033101/1>.
- F. G. Desforges, B. S. Paradkar, M. Hansson, J. Ju, L. Senje, T. L. Audet, A. Persson, S. Dobosz Dufrenoy, O. Lundh, G. Maynard, P. Monot, J.-L. Vay, C.-G. Wahlström, and B. Cros. Dynamics of ionization-induced electron injection in the high density regime of laser wakefield acceleration. *Phys. Plasmas*, 21 :120703, 2014. doi : 10.1063/1.4903845. URL <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pop/21/12/10.1063/1.4903845>.
- G. Genoud, F. Wojda, M. Burza, A. Persson, and C.-G. Wahlström. Active control of the pointing of a multi-terawatt laser. *Rev. Sci. Instrum.*, 82 : 033102, 2011. doi : 10.1063/1.3556438. URL <http://link.aip.org/link/?RSI/82/033102/1>.
- C. McGuffey, A. G. R. Thomas, W. Schumaker, T. Matsuoka, V. Chvykov, F. J. Dollar, G. Kalintchenko, V. Yanovsky and A. Maksimchuk, K. Krushelnick, V. Y. Bychenkov, I. V. Glazyrin, and A. V. Karpeev. 

Ionization induced trapping in a laser wakefield accelerator. *Phys. Rev. Lett.*, 104 :025004, 2010. doi : 10.1103/PhysRevLett.104.025004. URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.104.025004>.

A. Pak, K. A. Marsh, S. F. Martins, W. Lu, W. B. Mori, and C. Joshi. Injection and trapping of tunnel-ionized electrons into laser-produced wakes. *Phys. Rev. Lett.*, 104 :025003, 2010. doi : 10.1103/PhysRevLett.104.025003. URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.104.025003>.