

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

T.L. Audet¹, P. Lee¹, F.G. Desforges¹, A. Maitrallain³, M. Hansson², G. Maynard¹, S. Dobosz Dufrénoy³, B. Aurand², I. Gallardo-González², C.-G. Wahlström², O. Lundh², J. -L. Vay⁴, A. Chancé⁵, A. Mosnier⁵, N. Delerue⁶, A. Specka⁷, 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, USA

⁵CEA, IRFU, SACM, Université Paris-Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

⁶LAL, CNRS/IN2P3, Univ. Paris Sud, Université Paris-Saclay, 91405, Orsay, France

⁷LLR, CNRS, Ecole Polytechnique, Université Paris Saclay, Palaiseau, France

CEA Saclay, 25 mai 2016

Plan

1 Contexte et motivations

- Accélération laser plasma
- Injection d'électrons dans l'onde de plasma
- Injecteur d'électrons

2 Propriétés du plasma

- Electron Injector for compact Staged high energy Accelerator (ELISA)
- Caractérisation de la cible

3 Résultats au LLC : Influence du plan focal

- Dispositif expérimental au LLC
- Position du plan focal
- Paquets d'électrons et évolution du laser

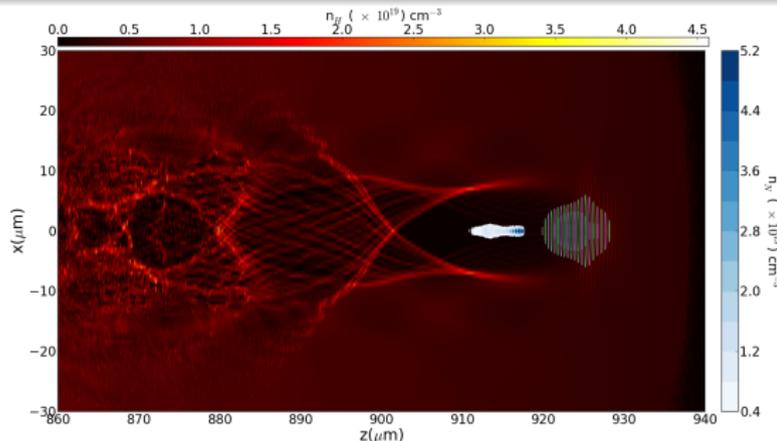
4 Résultats à UHI100 : DACTOMUS

- Dispositif expérimental à UHI100
- Spectres & pointé
- Utilisation de la ligne magnétique

L'accélération laser plasma : principe

Une onde plasma dans le sillage d'un laser

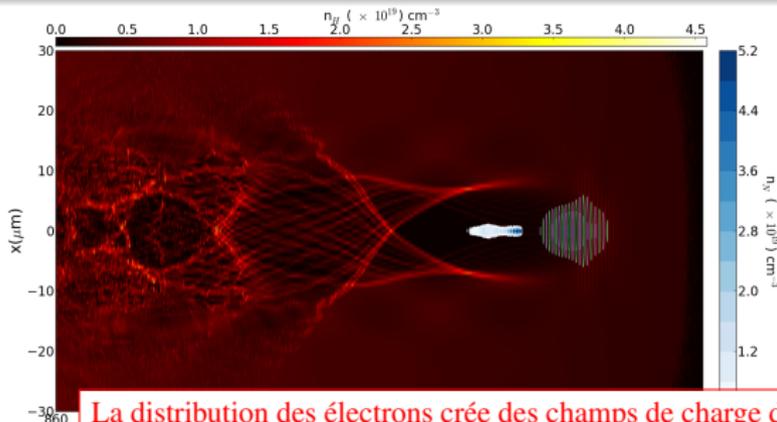
- Interaction d'un laser intense ($\geq 10^{18}$ W/cm²) avec un gaz (typiquement H₂ ou He)
- L'avant de l'impulsion ionise le gaz
- Les électrons sont repoussés par la force pondéromotrice du laser $F_p \propto \vec{\nabla} I_{laser}$
- Les ions sont immobiles sur l'échelle temporelle considérée
- Les électrons subissent une force de rappel coulombienne et se mettent à osciller
- Echelles spatiales : $n_e = 10^{17}$ cm⁻³ \rightarrow $\lambda_p \simeq 105$ μ m $n_e = 10^{19}$ cm⁻³ \rightarrow $\lambda_p \simeq 10.5$ μ m



L'accélération laser plasma : principe

Une onde plasma dans le sillage d'un laser

- Interaction d'un laser intense ($\geq 10^{18}$ W/cm²) avec un gaz (typiquement H₂ ou He)
- L'avant de l'impulsion ionise le gaz
- Les électrons sont repoussés par la force pondéromotrice du laser $F_p \propto \vec{\nabla} I_{laser}$
- Les ions sont immobiles sur l'échelle temporelle considérée
- Les électrons subissent une force de rappel coulombienne et se mettent à osciller
- Echelles spatiales : $n_e = 10^{17}$ cm⁻³ \rightarrow $\lambda_p \simeq 105$ μ m $n_e = 10^{19}$ cm⁻³ \rightarrow $\lambda_p \simeq 10.5$ μ m



La distribution des électrons crée des champs de charge d'espace de forte amplitude.

L'accélération laser plasma : un fort potentiel

Potential de l'ALP

- Fort champs accélérateurs :
 $|\vec{E}| \sim 1 - 100 \text{ GV/m}$
- Compacité

L'accélération laser plasma : un fort potentiel

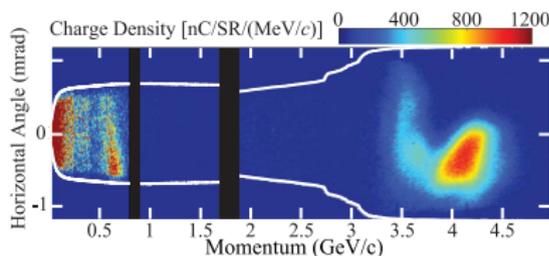
Potentiel de l'ALP

- Fort champs accélérateurs :
 $|\vec{E}| \sim 1 - 100 \text{ GV/m}$
- Compacité

- Faceaux d'électrons de hautes énergies sur 9 cm :

- ▶ $E = 4.2^{+0.6}_{-0.4} \text{ GeV } \Delta E = 6\%$
(rms)

- ▶ $Q = 6 \pm 1 \text{ pC } \text{div} = 0.3 \text{ mrad}$
(rms)



Leemans et al. [2014]

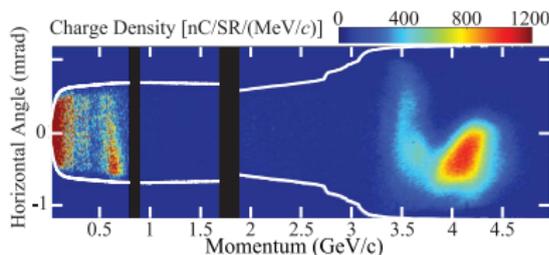
L'accélération laser plasma : un fort potentiel

Potential de l'ALP

- Fort champs accélérateurs :
 $|\vec{E}| \sim 1 - 100 \text{ GV/m}$
- Compacité
- Paquets ultra-courts : $\sim 10 \text{ fs}$
- Faible émittance transverse :
 $\sim \pi \text{ mm.mrad}$

- Faceaux d'électrons de hautes énergies sur 9 cm :

- ▶ $E = 4.2^{+0.6}_{-0.4} \text{ GeV } \Delta E = 6\%$
(rms)
- ▶ $Q = 6 \pm 1 \text{ pC } \text{div} = 0.3 \text{ mrad}$
(rms)



Leemans et al. [2014]

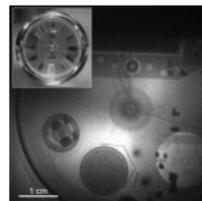
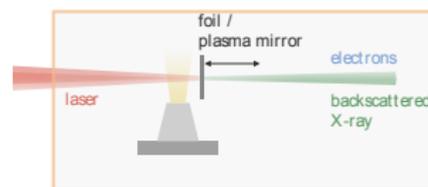
L'accélération laser plasma : un fort potentiel

Potential de l'ALP

- Fort champs accélérateurs :
 $|\vec{E}| \sim 1 - 100 \text{ GV/m}$
- Compacité
- Paquets ultra-courts : $\sim 10 \text{ fs}$
- Faible émittance transverse :
 $\sim \pi \text{ mm.mrad}$

- Sources de lumières : Bétatron, Compton

Albert et al. [2014]



Döpp et al. [2016]

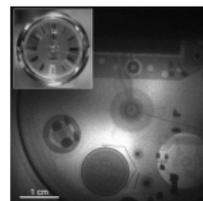
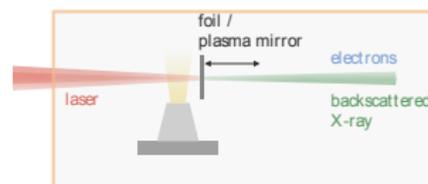
L'accélération laser plasma : un fort potentiel

Potentiel de l'ALP

- Fort champs accélérateurs :
 $|\vec{E}| \sim 1 - 100 \text{ GV/m}$
- Compacité
- Paquets ultra-courts : $\sim 10 \text{ fs}$
- Faible émittance transverse :
 $\sim \pi \text{ mm.mrad}$

- Sources de lumières : Bétatron, Compton

Albert et al. [2014]



Il y a cependant des limitations intrinsèques à l'ALP

L'accélération laser plasma : les limitations

Limitations

- Épuisement laser

L'accélération laser plasma : les limitations

Limitations

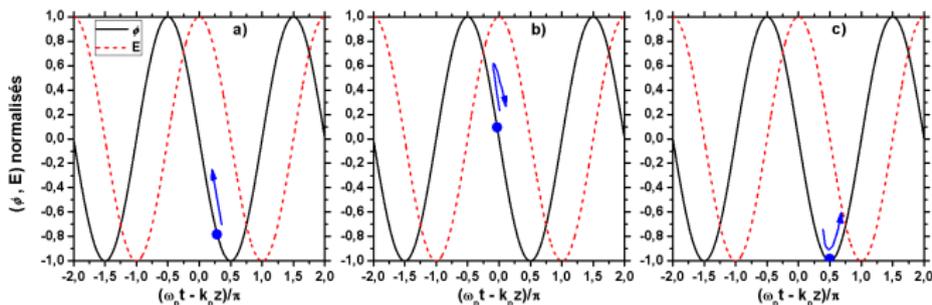
- Épuisement laser
- Diffraction laser

- De grandes longueurs d'accélération nécessitent le guidage de l'impulsion laser dans un canal de densité préformé
 - ▶ Geddes et al. [2004, 2005], Karsch et al. [2007]
- Ou un capillaire diélectrique
 - ▶ Andreev et al. [2002], Cros et al. [2002], Desforges et al. [2013], Hansson et al. [2014]

L'accélération laser plasma : les limitations

Limitations

- Épuisement laser
- Diffraction laser
- Déphasage des électrons L_ϕ
- Les électrons se déphasent par rapport à l'onde
 - ▶ Plus n_e est faible plus L_ϕ est grande mais les champs $|\vec{E}|$ diminuent



Comment contourner les limitations et améliorer les propriétés des paquets d'électrons ?

L'accélération laser plasma multi-étages

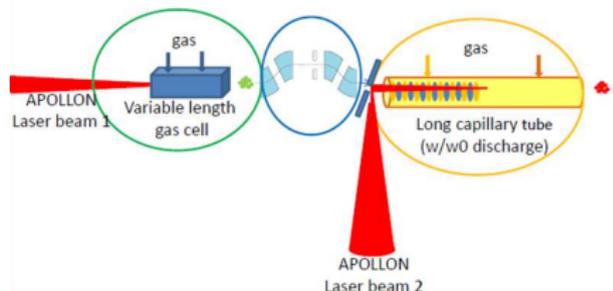
Solution : multi-étages

- Permet de découpler l'injection de l'accélération
- Injecteur : Régime non-linéaire ; Énergie modeste mais bonne qualité
- Second stage : Régime linéaire ; Accélération à haute énergie
- Ligne de transport magnétique : Couplage des deux étages

L'accélération laser plasma multi-étages

Solution : multi-étages

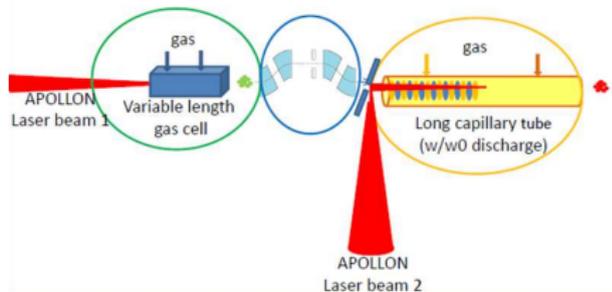
- Permet de découpler l'injection de l'accélération
- Injecteur : Régime non-linéaire ; Énergie modeste mais bonne qualité
- Second stage : Régime linéaire ; Accélération à haute énergie
- Ligne de transport magnétique : Couplage des deux étages



L'accélération laser plasma multi-étages

Solution : multi-étages

- Permet de découpler l'injection de l'accélération
- Injecteur : Régime non-linéaire ; Énergie modeste mais bonne qualité
- Second stage : Régime linéaire ; Accélération à haute énergie
- Ligne de transport magnétique : Couplage des deux étages

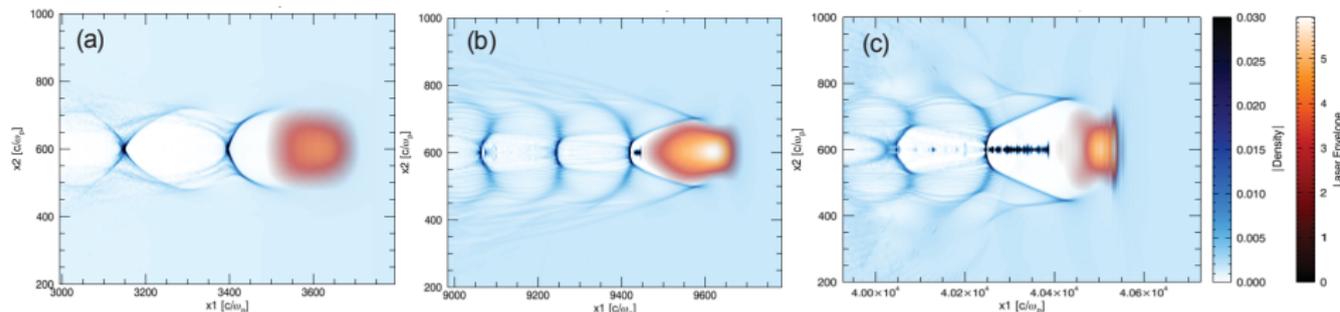


La communauté se concentre sur l'amélioration des propriétés des électrons : contrôle de l'injection

Injection d'électrons dans l'onde de plasma

Mécanismes d'injection

- Auto-injection
- Injection dans un gradient de densité
- Injections optiques
- Injection induite par ionisation

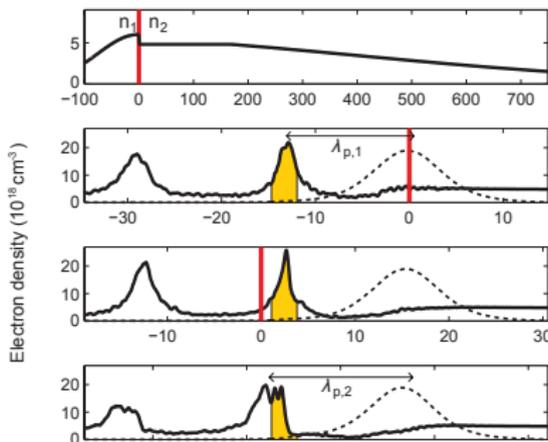


Froula et al. [2009] Schroeder et al. [2006], Mangles et al. [2012], Sävert et al. [2015]

Injection d'électrons dans l'onde de plasma

Mécanismes d'injection

- Auto-injection
- Injection dans un gradient de densité
- Injections optiques
- Injection induite par ionisation

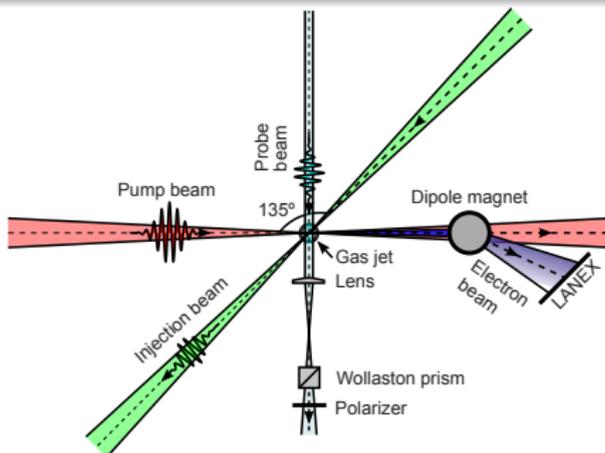


Buck et al. [2013] Schmid et al. [2010], Hansson et al. [2015, 2016]

Injection d'électrons dans l'onde de plasma

Mécanismes d'injection

- Auto-injection
- Injection dans un gradient de densité
- Injections optiques
- Injection induite par ionisation



Faure et al. [2010] Esarey et al. [1997], Schroeder et al. [1999], Faure et al. [2006], Lehe et al. [2013]

Injection d'électrons dans l'onde de plasma

Mécanismes d'injection

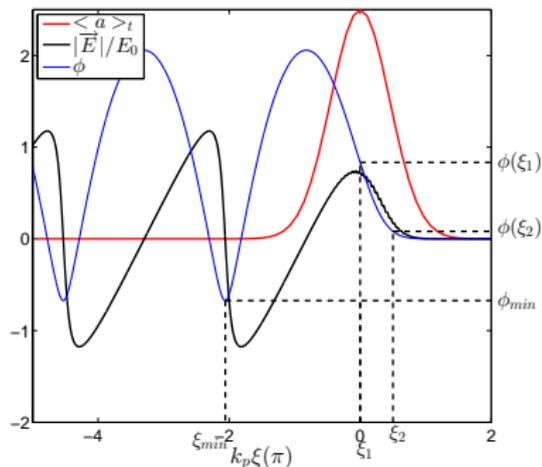
- Auto-injection
- Injection dans un gradient de densité
- Injections optiques
- Injection induite par ionisation

Mécanisme d'injection choisi pour sa simplicité et ses capacités de contrôle.

Injection induite par ionisation

Principe

- Faible pourcentage d'un gaz lourd ajouté (99% H_2 + 1% N_2)
- Les électrons des couches extérieures de N_2 se comportent comme les électrons de H_2
- Les électrons des couches intérieures de N_2 sont ionisés proche du pic d'intensité



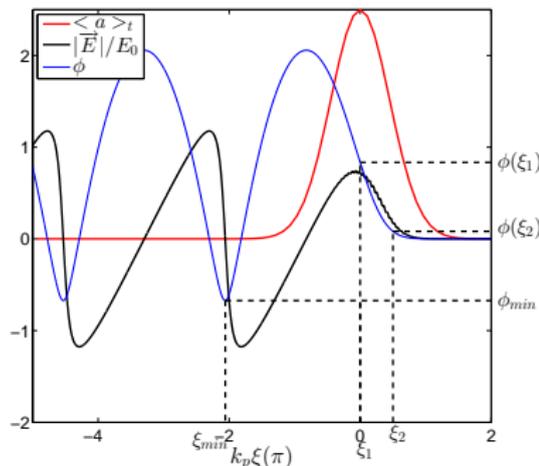
Injection induite par ionisation

Principe

- Faible pourcentage d'un gaz lourd ajouté (99% H_2 + 1% N_2)
- Les électrons des couches extérieures de N_2 se comportent comme les électrons de H_2
- Les électrons des couches intérieures de N_2 sont ionisés proche du pic d'intensité

Avantages

- Augmentation de la charge Desforges et al. [2014]
- Diminution de l'émittance transverse McGuffey et al. [2010]
- Seuil en intensité plus bas Pak et al. [2010], Chen et al. [2012]



Paramètres de l'injecteur d'électrons

Injecteur idéal

- Charge la plus grande possible dans la gamme 50-200 MeV
- Faible dispersion en énergie ($\sim 1\%$)
- Faible divergence (1-10 mrad)
- Stable et reproductible

Paramètres de l'injecteur d'électrons

Injecteur idéal

- Charge la plus grande possible dans la gamme 50-200 MeV
- Faible dispersion en énergie ($\sim 1\%$)
- Faible divergence (1-10 mrad)
- Stable et reproductible

Stabilité

- Densité du plasma \rightarrow Cellule de gaz pour réduire les fluctuations
- Pointé laser \rightarrow Pointé stabilisé [Genoud et al., 2011]
- Energie laser \rightarrow Contrôle de l'énergie tir à tir

Paramètres de l'injecteur d'électrons

Injecteur idéal

- Charge la plus grande possible dans la gamme 50-200 MeV
- Faible dispersion en énergie ($\sim 1\%$)
- Faible divergence (1-10 mrad)
- Stable et reproductible

Stabilité

- Densité du plasma \rightarrow Cellule de gaz pour réduire les fluctuations
- Pointé laser \rightarrow Pointé stabilisé [Genoud et al., 2011]
- Energie laser \rightarrow Contrôle de l'énergie tir à tir

Propriétés des électrons

- Densité du plasma
- Energie laser
- Distribution d'intensité laser \rightarrow Correction du front d'onde
- Composition du gaz \rightarrow **Utilisation d'un mélange de gaz**
- **Position du plan focal et profil de densité**

Paramètres de l'injecteur d'électrons

Injecteur idéal

- Charge la plus grande possible dans la gamme 50-200 MeV
- Faible dispersion en énergie ($\sim 1\%$)
- Faible divergence (1-10 mrad)
- Stable et reproductible

Stabilité

- Densité du plasma \rightarrow Cellule de gaz pour réduire les fluctuations
- Pointé laser \rightarrow Pointé stabilisé [Genoud et al., 2011]
- Energie laser \rightarrow Contrôle de l'énergie tir à tir

Propriétés des électrons

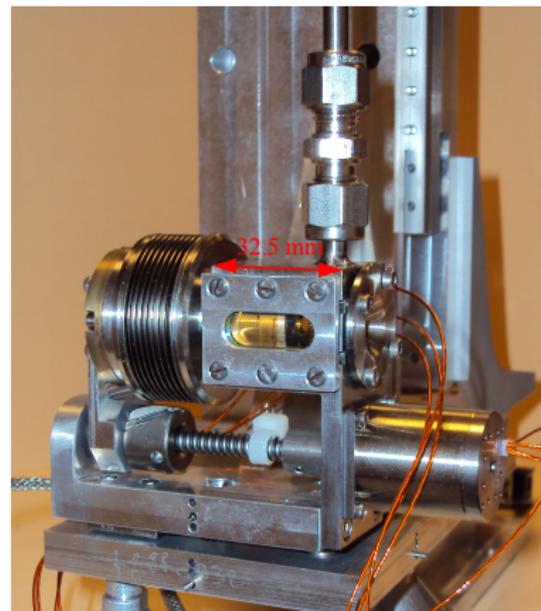
- Densité du plasma
- Energie laser
- Distribution d'intensité laser \rightarrow Correction du front d'onde
- Composition du gaz \rightarrow Utilisation d'un mélange de gaz
- Position du plan focal et profil de densité

Injecteur choisi : cellule de gaz de longueur variable avec injection induite par ionisation

ELectron Injector for compact Staged high energy Accelerator (ELISA)

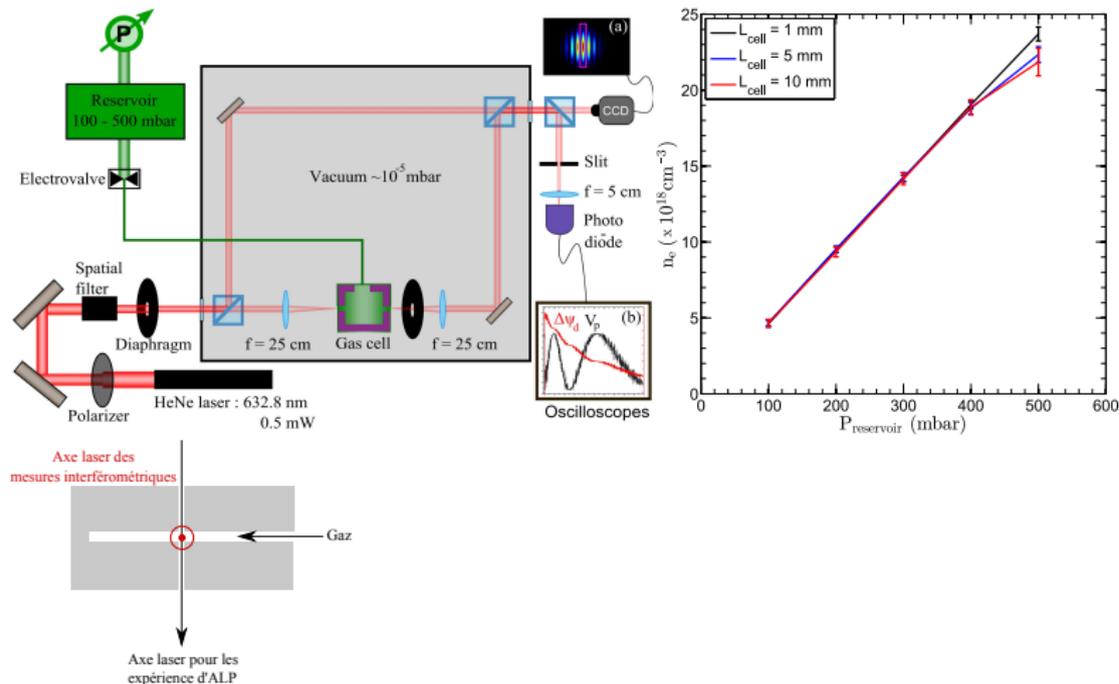
Cellule de gaz de longueur variable

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



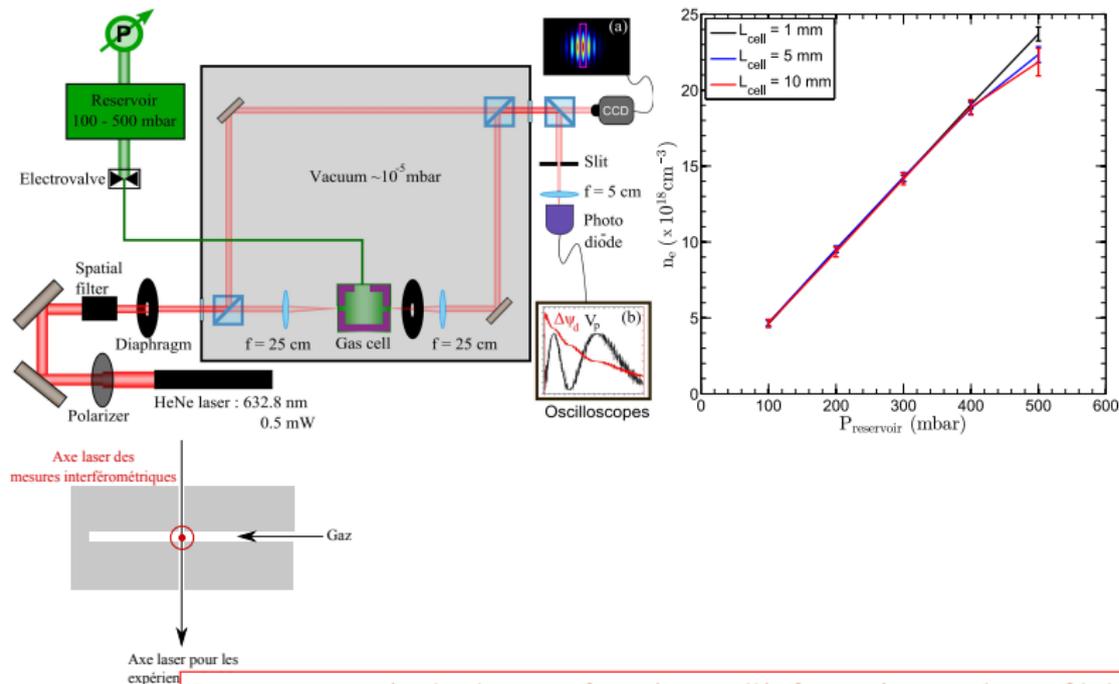
Mesure de la densité moyenne par interférométrie

- Utilisation d'un interféromètre Mach-Zehnder pour mesurer la densité moyenne du plateau



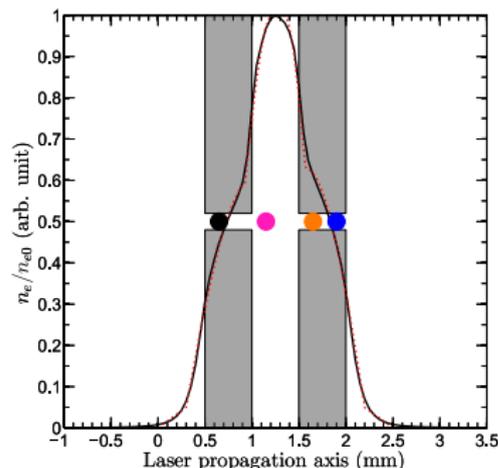
Mesure de la densité moyenne par interférométrie

- Utilisation d'un interféromètre Mach-Zehnder pour mesurer la densité moyenne du plateau



La mesure est intégrée et ne fournit pas d'information sur le profil de densité

Simulation numériques fluides du profil de densité



- Simulations fluides avec OpenFOAM et SonicFoam (solveur transitoire, turbulent avec capacité d'écoulements soniques)
- On a accès à la densité, aux vitesses, à la température... en tout point de l'espace en fonction du temps
- Ce profil de densité est nécessaire pour faire des simulations PIC réalistes

Utilisation de la cible

Utilisation au LLC

- Laser très stable
- Bien caractérisé
- Beaucoup de diagnostics

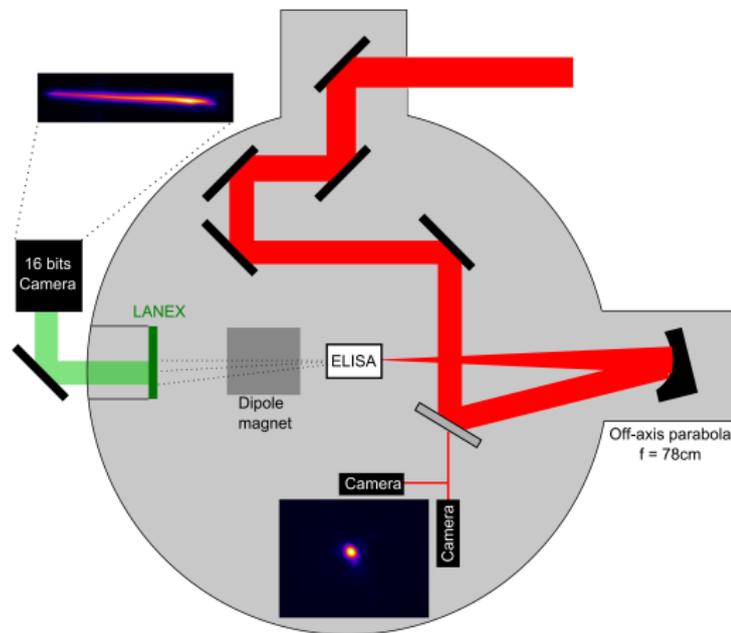
Utilisation à UHI100

- Plus d'énergie dans le plan focal
- Impulsions plus courtes
- Plus haute intensité

Dispositif expérimental au LLC

Le laser du LLC

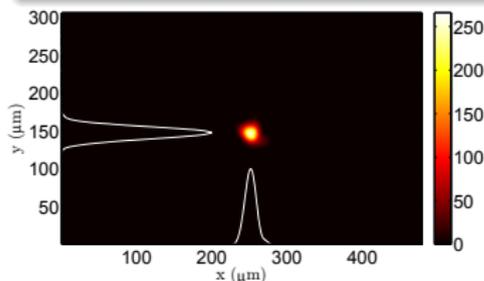
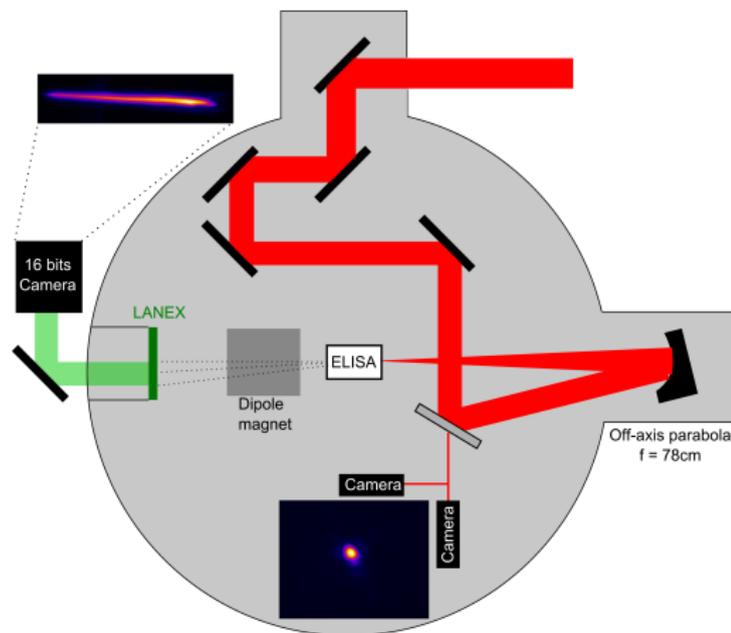
- Oscillateur Ti:Sapphire :
 $\lambda = 800 \text{ nm}$
- Durée d'impulsion :
 $\tau = 37 \pm 3 \text{ fs}$
- Correction du front d'onde
- Focal spot : $17 \mu\text{m}$ (FWHM)
- **Pointé stabilisé** $< 10 \mu\text{rad}$
- $I_L = (3.1 \pm 0.8) \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$



Dispositif expérimental au LLC

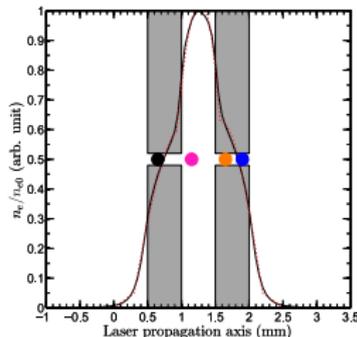
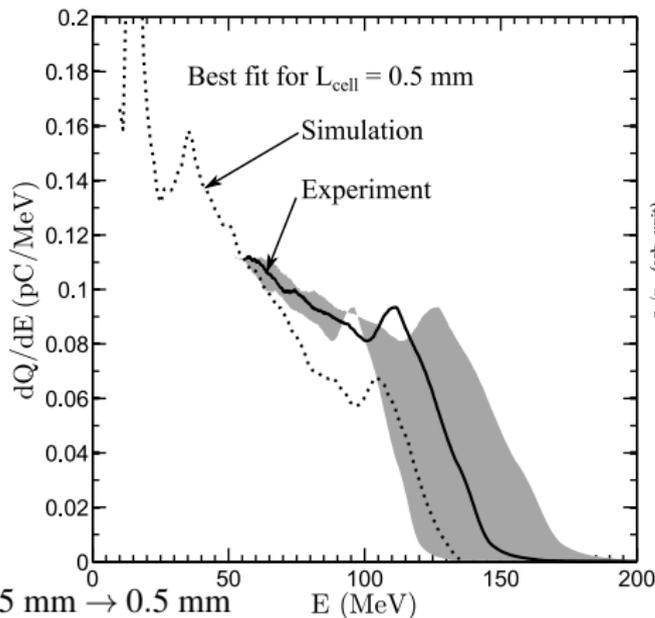
Le laser du LLC

- Oscillateur Ti:Sapphire :
 $\lambda = 800 \text{ nm}$
- Durée d'impulsion :
 $\tau = 37 \pm 3 \text{ fs}$
- Correction du front d'onde
- Focal spot : $17 \mu\text{m}$ (FWHM)
- **Pointé stabilisé** $< 10 \mu\text{rad}$
- $I_L = (3.1 \pm 0.8) \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$



La position du plan focal contrôle les propriétés des électrons

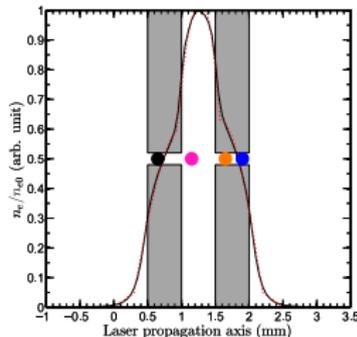
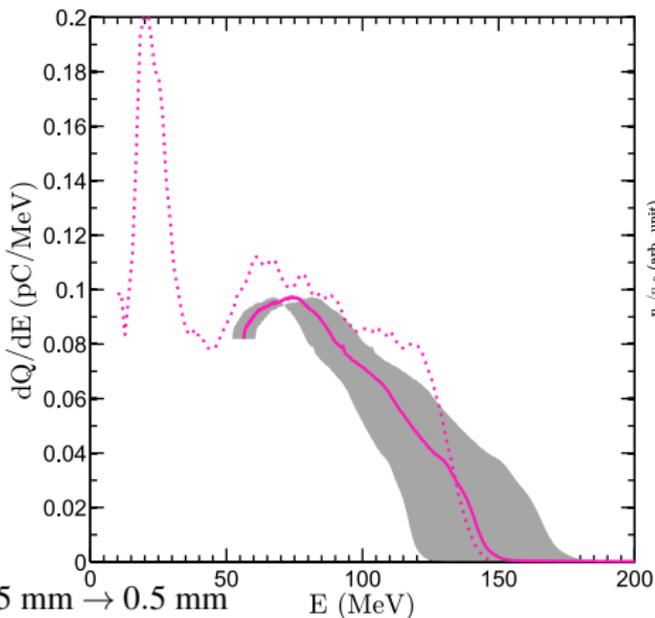
$z_f = 0.65 \text{ mm}$



- $L_{cell} = 1 \pm 0.5 \text{ mm} \rightarrow 0.5 \text{ mm}$
- La cellule est déplacée sur l'axe laser
- Les résultats expérimentaux sont comparés à des simulations WARP Circ

La position du plan focal contrôle les propriétés des électrons

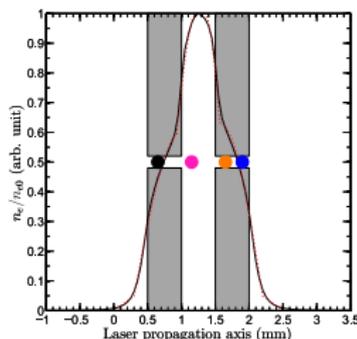
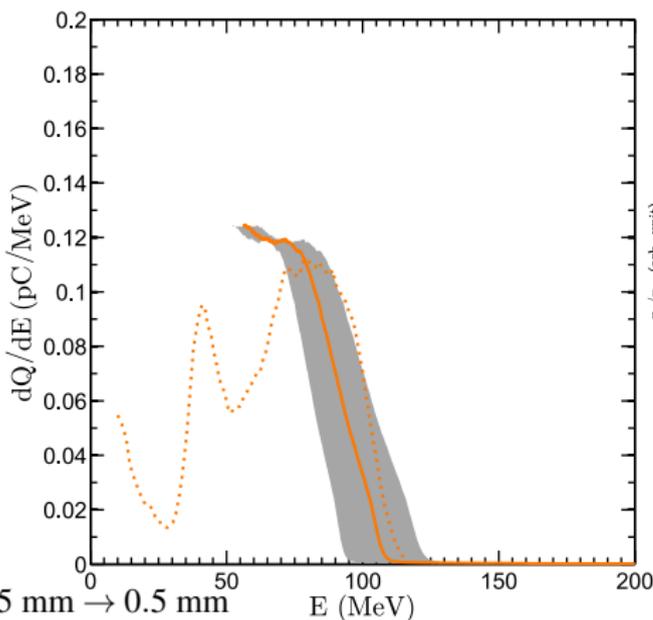
$$z_f = 1.15 \text{ mm}$$



- $L_{cell} = 1 \pm 0.5 \text{ mm} \rightarrow 0.5 \text{ mm}$
- La cellule est déplacée sur l'axe laser
- Les résultats expérimentaux sont comparés à des simulations WARP Circ

La position du plan focal contrôle les propriétés des électrons

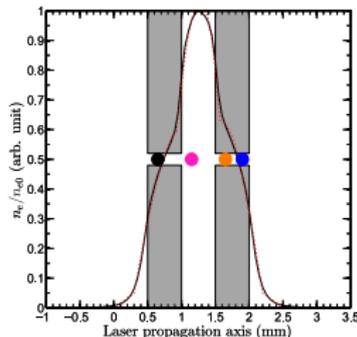
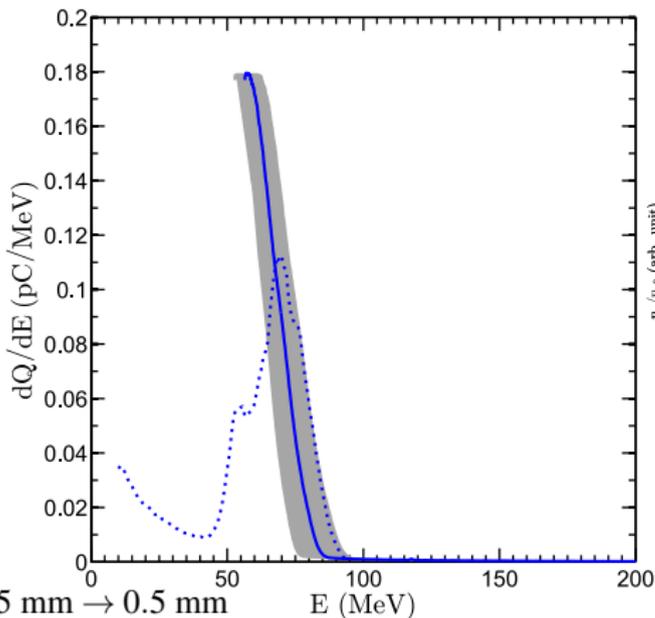
$z_f = 1.65 \text{ mm}$



- $L_{cell} = 1 \pm 0.5 \text{ mm} \rightarrow 0.5 \text{ mm}$
- La cellule est déplacée sur l'axe laser
- Les résultats expérimentaux sont comparés à des simulations WARP Circ

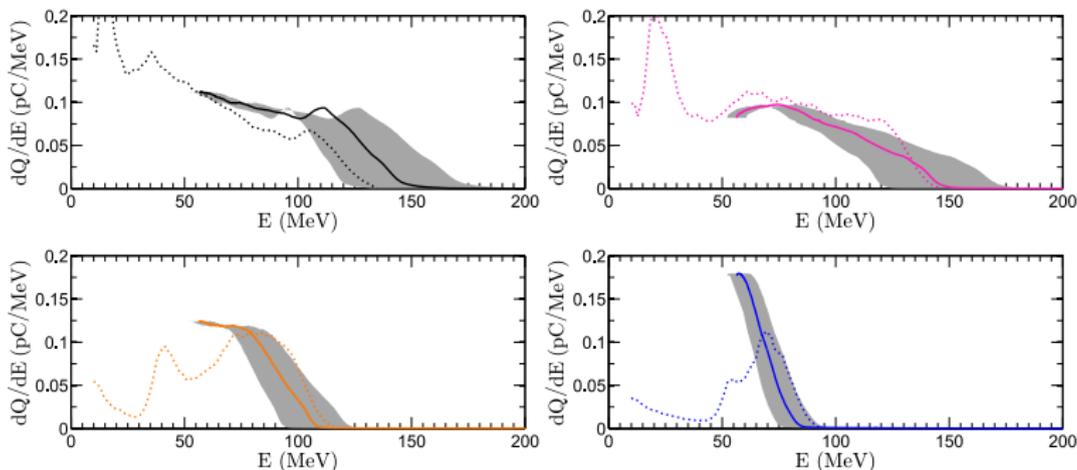
La position du plan focal contrôle les propriétés des électrons

$z_f = 1.9 \text{ mm}$



- $L_{cell} = 1 \pm 0.5 \text{ mm} \rightarrow 0.5 \text{ mm}$
- La cellule est déplacée sur l'axe laser
- Les résultats expérimentaux sont comparés à des simulations WARP Circ

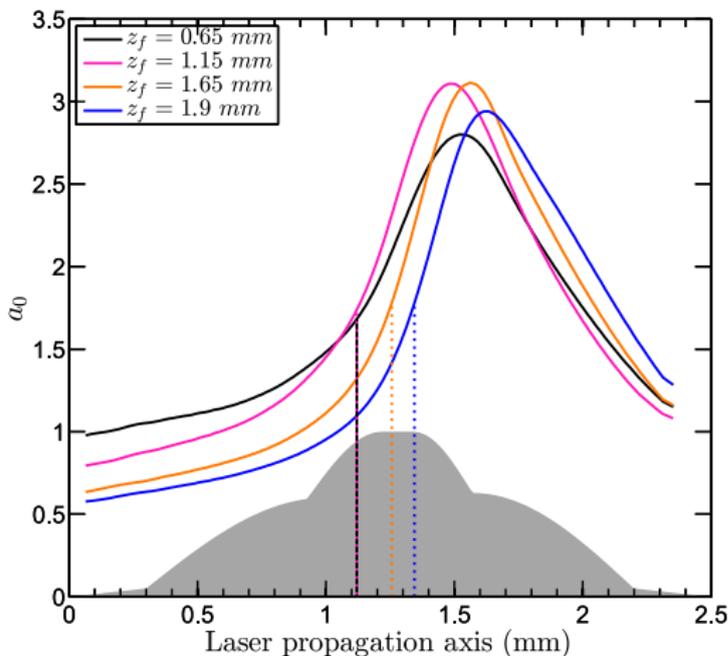
La position du plan focal contrôle les propriétés des électrons



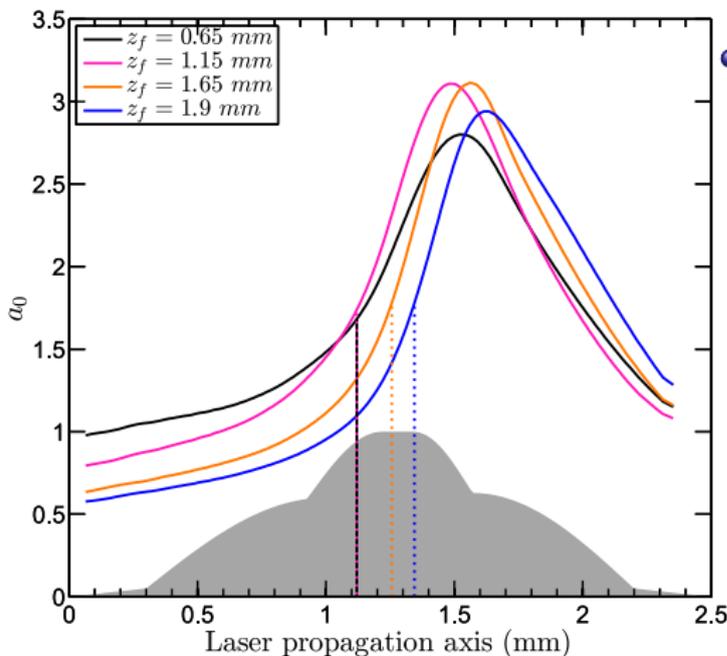
Audet et al. [2016a]

Ce comportement peut être expliqué par l'évolution du laser lors de l'interaction

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

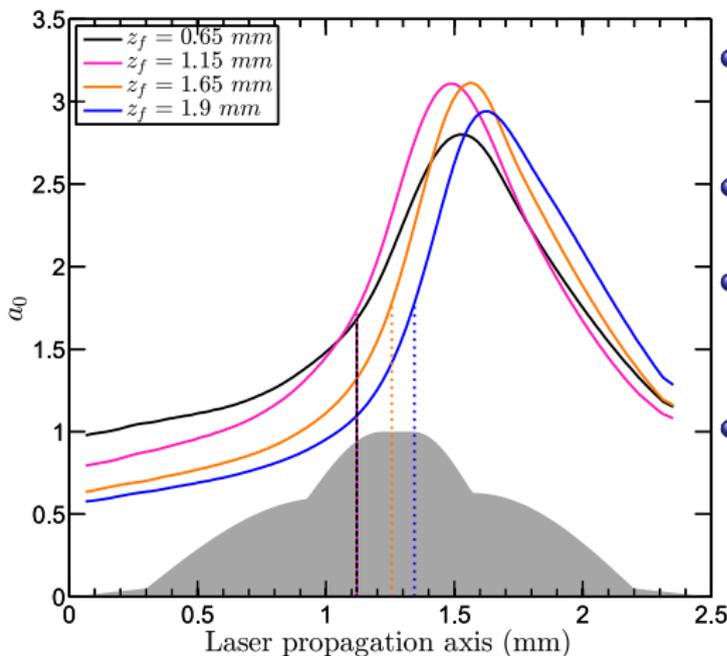


La forme du profil de densité et la position du plan focal contrôlent l'injection



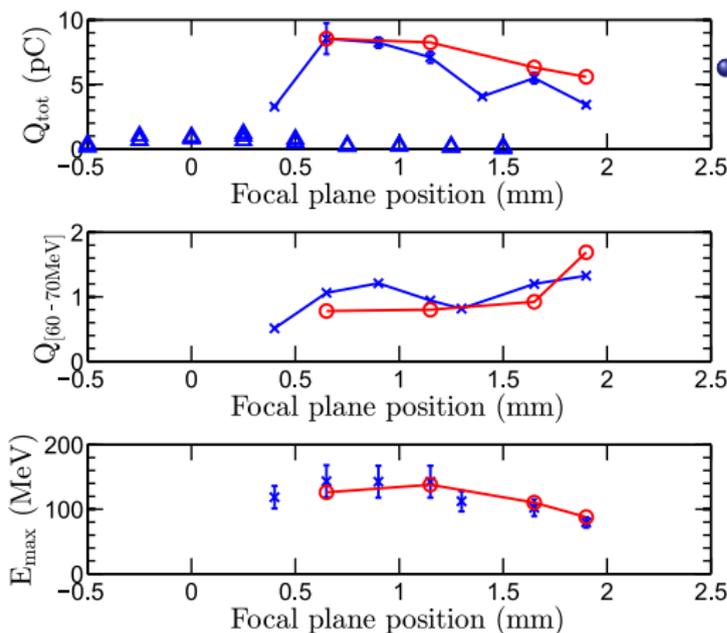
- Même évolution du $a_0 \rightarrow$ L'évolution du laser est dominée par le profil de densité

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



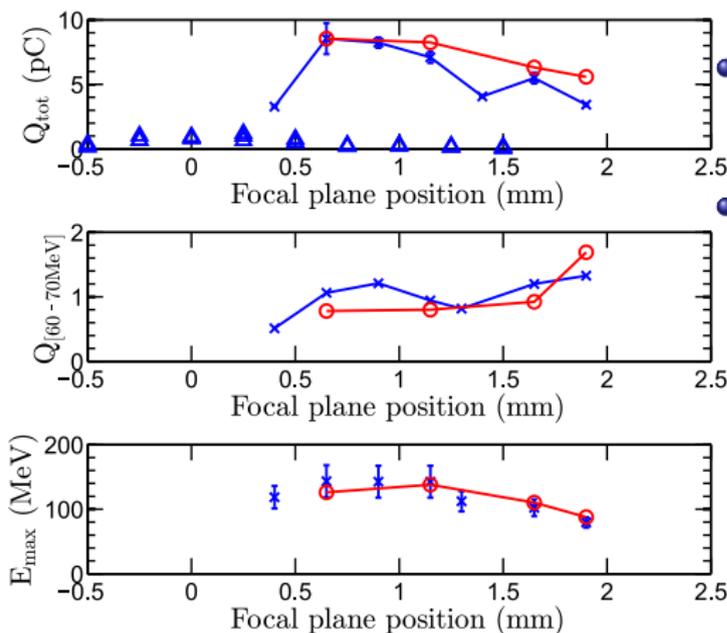
- Même évolution du $a_0 \rightarrow$ L'évolution du laser est dominée par le profil de densité
- La position du plan focal contrôle la valeur maximale de a_0
- L'injection commence quand $a_0 = 1.7 \pm 0.1$ pour toutes les position du plan focal
- La position du plan focal contrôle le début de l'injection et par conséquent la longueur d'accélération

L'énergie et la charge des paquets produits changent avec le plan focal



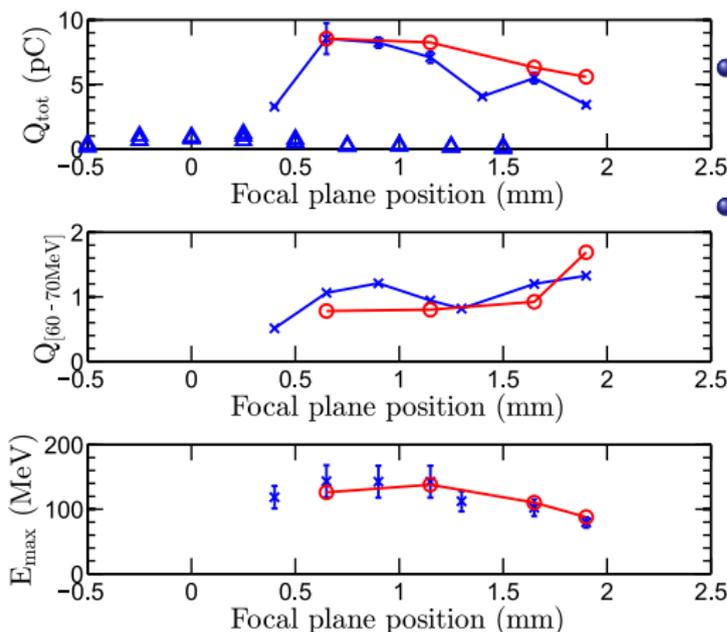
● L'injection induite par ionisation augmente la charge jusqu'à un facteur 10

L'énergie et la charge des paquets produits changent avec le plan focal



- L'injection induite par ionisation augmente la charge jusqu'à un facteur 10
- La position du plan focal contrôle le début de l'injection et par conséquent la longueur d'accélération
 - ▶ Q_{tot} diminue avec z_f quand $z_f > 1.15$ mm
 - ▶ E_{max} diminue avec z_f quand $z_f > 1.15$ mm
 - ▶ La charge dans une gamme d'énergie peut être optimisée

L'énergie et la charge des paquets produits changent avec le plan focal



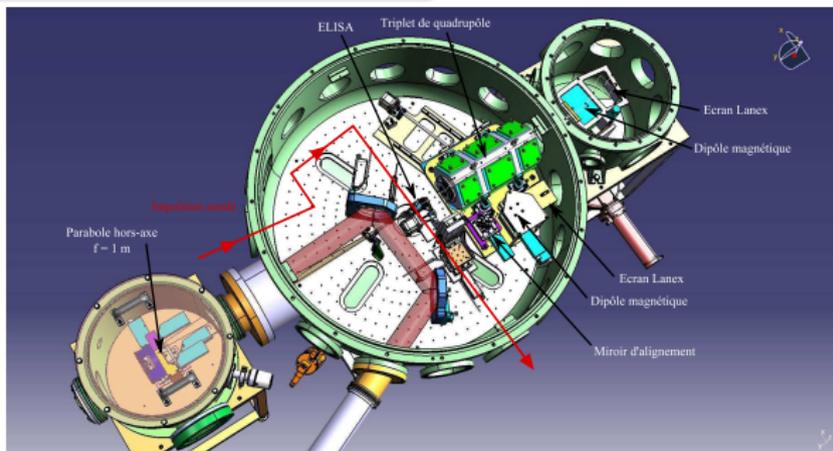
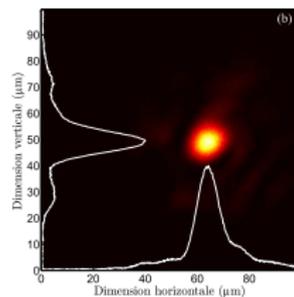
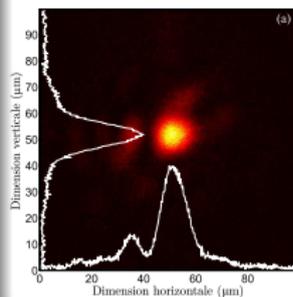
- L'injection induite par ionisation augmente la charge jusqu'à un facteur 10
- La position du plan focal contrôle le début de l'injection et par conséquent la longueur d'accélération
 - ▶ Q_{tot} diminue avec z_f quand $z_f > 1.15$ mm
 - ▶ E_{max} diminue avec z_f quand $z_f > 1.15$ mm
 - ▶ La charge dans une gamme d'énergie peut être optimisée

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

Dispositif expérimental à UHI100

Le laser UHI100 au LIDyL

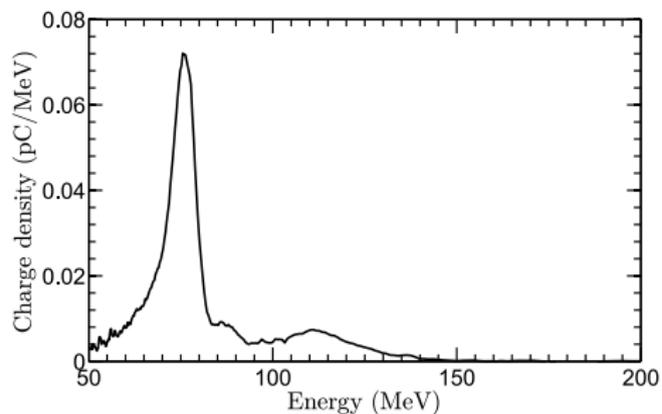
- Oscillateur Ti:Sapphire : $\lambda = 800 \text{ nm}$
- Durée d'impulsion : $\tau = 23 \pm 1 \text{ fs}$
- Correction du front d'onde
- Focal spot : $20 \mu\text{m}$ (FWHM)
- Pointé non stabilisé
- $I_L = (8.3 \pm 1.2) \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$



Spectres à UHI100

Spectres piqués

- $E_{pic} \simeq 76 \text{ MeV}$
- $\Delta E/E_{pic} \simeq 10 \%$
- $Q_{50-200\text{MeV}} \simeq 1.1 \text{ pC}$
- $Q_{fwhm} = 0.43 \times Q_{50-200\text{MeV}}$



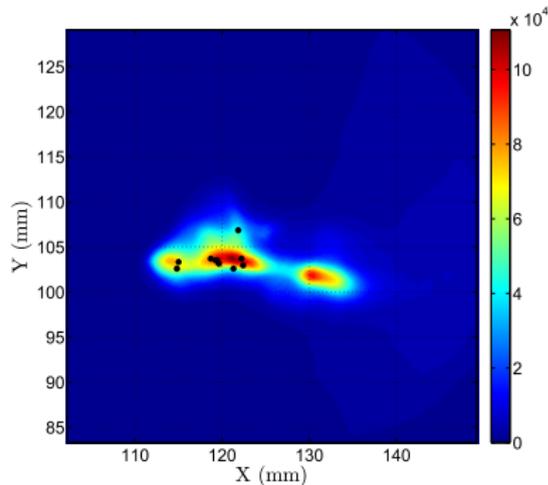
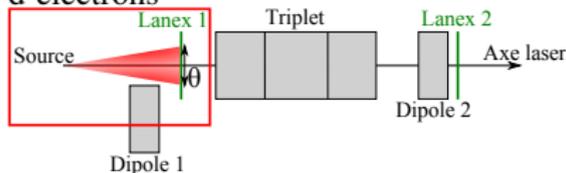
Audet et al. [2016b]

Pointé à UHI100

Distribution spatiale des électrons à 441 mm de la source

- $Q = 75.6 \pm 15.4$ pC
- $\theta_x = 15.2 \pm 5.5$ mrad (6.7 mm)
- $\theta_y = 10.1 \pm 2.6$ mrad (4.5 mm)
- $\phi_x = 2.9$ mm (rms)
- $\phi_y = 1.3$ mm (rms)

ϕ : écart-type des centroïdes des paquets d'électrons

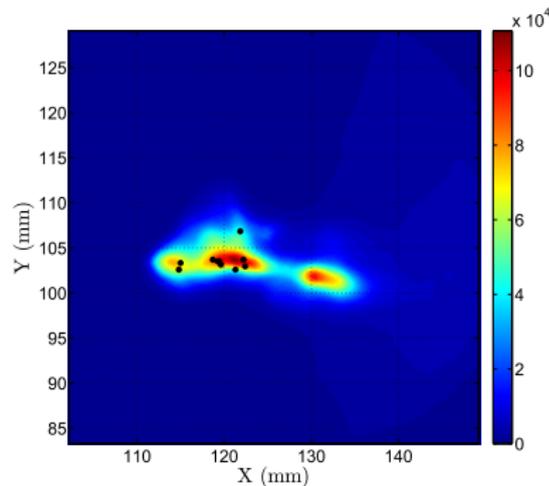
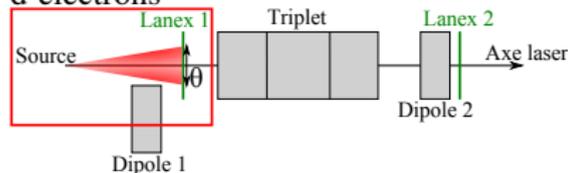


Pointé à UHI100

Distribution spatiale des électrons à 441 mm de la source

- $Q = 75.6 \pm 15.4$ pC
- $\theta_x = 15.2 \pm 5.5$ mrad (6.7 mm)
- $\theta_y = 10.1 \pm 2.6$ mrad (4.5 mm)
- $\phi_x = 2.9$ mm (rms)
- $\phi_y = 1.3$ mm (rms)

ϕ : écart-type des centroïdes des paquets d'électrons



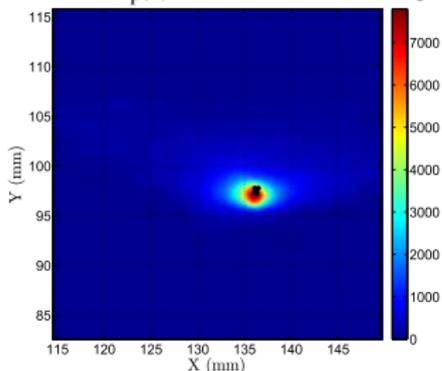
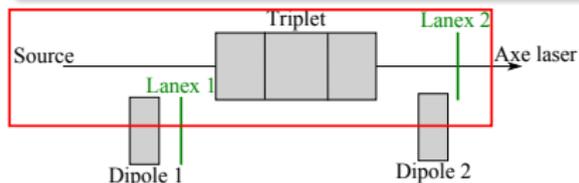
Les électrons issus de cette source imparfaite sont transportés grâce à une ligne magnétique.

Utilisation d'une ligne magnétique : DACTOMUS

Electrons non-dispersés

- Charge totale : $Q \simeq 3.6 \pm 1.3$ pC
- Stabilité du pointé : ~ 0.1 mm (rms)
- Taille : $\sim 2.0 \pm 0.7$ mm (fwhm)

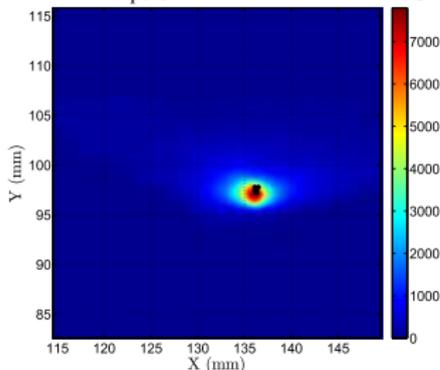
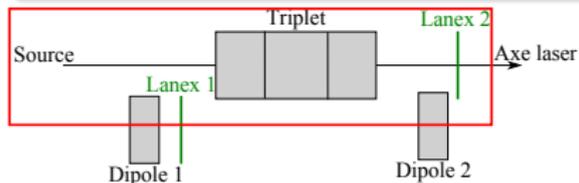
Chancé et al. [2013]



Utilisation d'une ligne magnétique : DACTOMUS

Electrons non-dispersés

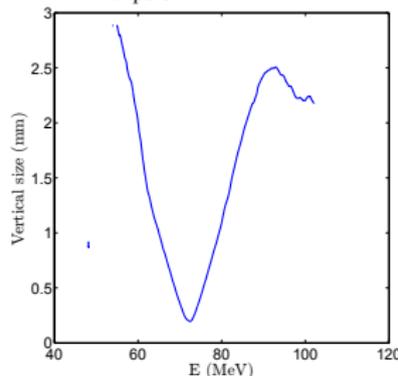
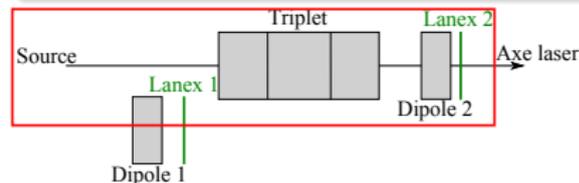
- Charge totale : $Q \simeq 3.6 \pm 1.3$ pC
- Stabilité du pointé : ~ 0.1 mm (rms)
- Taille : $\sim 2.0 \pm 0.7$ mm (fwhm)



Chancé et al. [2013]

Electrons dispersés

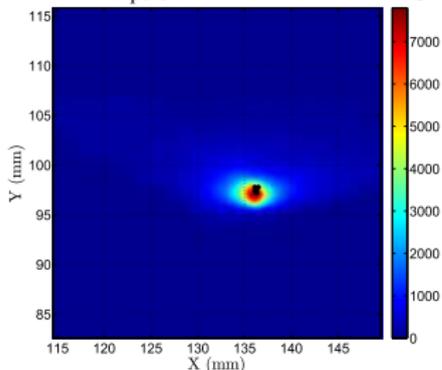
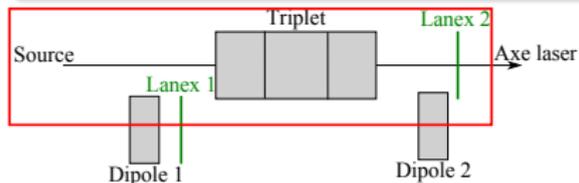
- Taille à l'énergie de fonctionnement : ~ 200 μm



Utilisation d'une ligne magnétique : DACTOMUS

Electrons non-dispersés

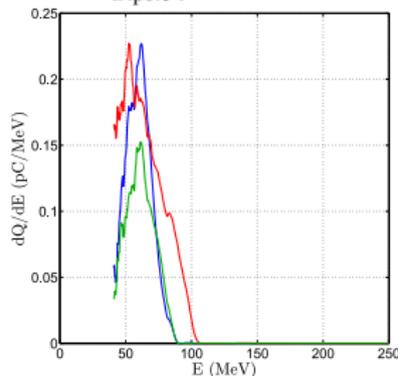
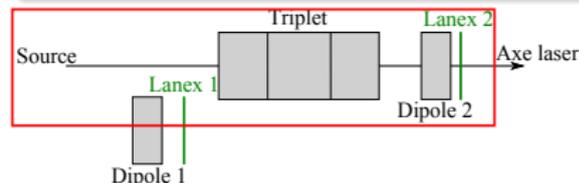
- Charge totale : $Q \simeq 3.6 \pm 1.3$ pC
- Stabilité du pointé : ~ 0.1 mm (rms)
- Taille : $\sim 2.0 \pm 0.7$ mm (fwhm)



Chancé et al. [2013]

Electrons dispersés

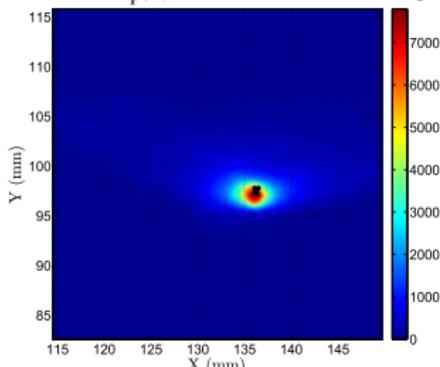
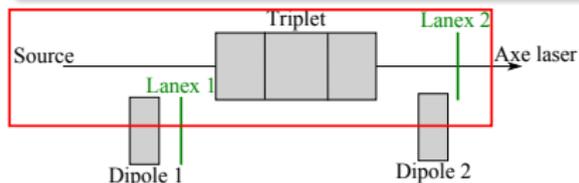
- Spectres transportés en accord avec ceux en sortie de cellule.



Utilisation d'une ligne magnétique : DACTOMUS

Electrons non-dispersés

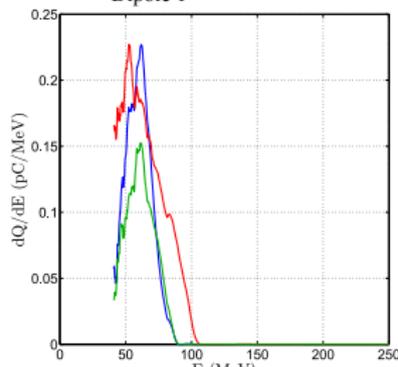
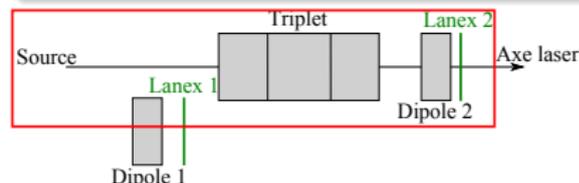
- Charge totale : $Q \simeq 3.6 \pm 1.3$ pC
- Stabilité du pointé : ~ 0.1 mm (rms)
- Taille : $\sim 2.0 \pm 0.7$ mm (fwhm)



Chancé et al. [2013]

Electrons dispersés

- Spectres transportés en accord avec ceux en sortie de cellule.



On obtient des électrons à l'énergie désirée et on peut les focaliser jusqu'à 200 μ m

Conclusion & perspectives

- Résumé

- ▶ L'ALP a démontré son potentiel mais a besoin de plus de contrôle pour améliorer les propriétés et la stabilité des paquets d'électrons.

Conclusion & perspectives

● Résumé

- ▶ L'ALP a démontré son potentiel mais a besoin de plus de contrôle pour améliorer les propriétés et la stabilité des paquets d'électrons.
- ▶ Notre injecteur "ELISA" est une cellule de gaz de longueur variable utilisant le mécanisme d'injection induite par ionisation.

Conclusion & perspectives

● Résumé

- ▶ L'ALP a démontré son potentiel mais a besoin de plus de contrôle pour améliorer les propriétés et la stabilité des paquets d'électrons.
- ▶ Notre injecteur "ELISA" est une cellule de gaz de longueur variable utilisant le mécanisme d'injection induite par ionisation.
- ▶ Nous avons identifié des paramètres pour contrôler la charge et la distribution en énergie des paquets d'électrons → Position du plan focal combiné au profil de densité.

Conclusion & perspectives

● Résumé

- ▶ L'ALP a démontré son potentiel mais a besoin de plus de contrôle pour améliorer les propriétés et la stabilité des paquets d'électrons.
- ▶ Notre injecteur "ELISA" est une cellule de gaz de longueur variable utilisant le mécanisme d'injection induite par ionisation.
- ▶ Nous avons identifié des paramètres pour contrôler la charge et la distribution en énergie des paquets d'électrons → Position du plan focal combiné au profil de densité.
- ▶ Ligne de transport de diagnostic DACTOMUS en cours de test sur l'installation UHI100.

Conclusion & perspectives

● Résumé

- ▶ L'ALP a démontré son potentiel mais a besoin de plus de contrôle pour améliorer les propriétés et la stabilité des paquets d'électrons.
- ▶ Notre injecteur "ELISA" est une cellule de gaz de longueur variable utilisant le mécanisme d'injection induite par ionisation.
- ▶ Nous avons identifié des paramètres pour contrôler la charge et la distribution en énergie des paquets d'électrons → Position du plan focal combiné au profil de densité.
- ▶ Ligne de transport de diagnostic DACTOMUS en cours de test sur l'installation UHI100.

● Perspectives :

- ▶ On peut améliorer la charge dans la zone d'intérêt en ajustant d'autres paramètres → Augmentation de la proportion de N_2 , ajustement de la forme du profil de densité.
- ▶ Caractérisation plus fine des paquets d'électrons grâce à la ligne de transport → Incertitude sur l'énergie plus faible, mesures de durée du paquet accessibles.
- ▶ Etude de l'injection dans un second étage.



Merci de votre attention



Merci de votre attention

Des questions ?

F Albert, A G R Thomas, S P D Mangles, S Banerjee, S Corde, A Flacco, M Litos, D Neely, J Vieira, Z Najmudin, R Bingham, C Joshi, and T Katsouleas. Laser wakefield accelerator based light sources: potential applications and requirements. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 56(8):084015, 2014. URL <http://stacks.iop.org/0741-3335/56/i=8/a=084015>.

N. E. Andreev, B. Cros, L. M. Gorbunov, G. Matthieussent, P. Mora, and R. R. Ramazashvili. Laser wakefield structure in a plasma column created in capillary tubes. *Phys. Plasmas*, 9:3999–4009, 2002. doi: 10.1063/1.1497165. URL <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pop/9/9/10.1063/1.1497165>.

T. L. Audet, M. Hansson, P. Lee, F. G. Desforges, G. Maynard, S. Dobosz Dufrénoy, R. Lehe, J.-L. Vay, B. Aurand, A. Persson, I. Gallardo González, A. Maitrallain, P. Monot, C.-G. Wahlström, O. Lundh, and B. Cros. Investigation of ionization-induced electron injection in a wakefield driven by laser inside a gas cell. *Physics of Plasmas*, 23(2):023110, 2016a. doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4942033>.

URL <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pop/23/2/10.1063/1.4942033>.

- T.L. Audet, F.G. Desforges, A. Maitrallain, S. Dobosz Dufrenoy, M. Bougeard, G. Maynard, P. Lee, M. Hansson, B. Aurand, A. Persson, I. Gallardo Gonzalez, P. Monot, C.-G. Wahlström, O. Lundh, and B. Cros. Electron injector for compact staged high energy accelerator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, pages –, 2016b. ISSN 0168-9002. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2016.01.035>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216000516>.
- A. Buck, J. Wenz, J. Xu, K. Khrennikov, K. Schmid, M. Heigoldt, J. M. Mikhailova, M. Geissler, B. Shen, F. Krausz, S. Karsch, and L. Veisz. Shock-front injector for high-quality laser-plasma acceleration. *Phys. Rev. Lett.*, 110:185006, May 2013. doi: 10.1103/PhysRevLett.110.185006. URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.110.185006>.
- A. Chancé, O. Delferrière, J. Schwindling, C. Bruni, N. Delerue, A. E. Specka, B. Cros, G. Maynard, B. S. Paradkar, and P. Mora. Transport line for a multi-staged laser-plasma acceleration: DACTOMUS. *Nucl. Instrum.*

Meth. A, 740:158 –164, 2013. ISSN 0168-9002. doi:

10.1016/j.nima.2013.10.036. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900213014162>.

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>.

B. Cros, C. Courtois, G. Matthieussent, A. Di Bernardo, D. Batani, N. E.

Andreev, and S. Kuznetsov. Eigenmodes for capillary tubes with dielectric

walls and ultraintense laser pulse guiding. *Phys. Rev. E*, 65:026405, 2002.

doi: 10.1103/PhysRevE.65.026405. URL

<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.65.026405>.

F. G. Desforges, M. Hansson, J. Ju, L. Senje, T. L. Audet,

S. Dobosz-Dufrénoy, A. Persson, O. Lundh, C.-G. Wahlström, and B. Cros.

Reproducibility of electron beams from laser wakefield acceleration in

capillary tubes. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 740:54 –59, 2013. ISSN

0168-9002. doi: 10.1016/j.nima.2013.10.062. URL [http://www.](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900213014538)

[sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900213014538](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900213014538).  

F. G. Desforges, B. S. Paradkar, M. Hansson, J. Ju, L. Senje, T. L. Audet, A. Persson, S. Dobosz Dufrénoy, 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>.

A Döpp, E Guillaume, C Thauray, J Gautier, I Andriyash, A Lifschitz, V Malka, A Rousse, and K Ta Phuoc. An all-optical Compton source for single-exposure x-ray imaging. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 58(3):034005, 2016. URL <http://stacks.iop.org/0741-3335/58/i=3/a=034005>.

E. H. Esarey, R. F. Hubbard, W. P. Leemans, A. Ting, and P. Sprangle. Electron injection into plasma wakefields by colliding laser pulses. *Phys. Rev. Lett.*, 79:2682–2685, 1997. doi: 10.1103/PhysRevLett.79.2682. URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.79.2682>.

J. Faure, C. Rechatin, A. Norlin, A. F. Lifschitz, Y. Glinec, and V. Malka. Controlled injection and acceleration of electrons in plasma wakefields by

colliding laser pulses. *Nature*, 444:737–739, 2006. ISSN 0028-0836. doi: 10.1038/nature05393. URL

<http://dx.doi.org/10.1038/nature05393>.

J. Faure, C. Rechatin, O. Lundh, L. Ammoura, and V. Malka. Injection and acceleration of quasimonoenergetic relativistic electron beams using density gradients at the edges of a plasma channel. *Phys. Plasmas*, 17:083107, 2010. doi: 10.1063/1.3469581. URL <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pop/17/8/10.1063/1.3469581>.

D. H. Froula, C. E. Clayton, T. Döppner, K. A. Marsh, C. P. J. Barty, L. Divol, R. A. Fonseca, S. H. Glenzerand, C. Joshi, W. Lu, S. F. Martins, P. Michel, W. B. Mori, J. P. Palastro, B. B. Pollock, A. Pak, J. E. Ralphand, J. S. Ross, C. W. Siders, L. O. Silva, and T. Wang. Measurements of the critical power for self-injection of electrons in a laser wakefield accelerator. *Phys. Rev. Lett.*, 103:215006, 2009. doi: 10.1103/PhysRevLett.103.215006. URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.103.215006>.

C. G. R. Geddes, C. Tóth, J. van Tilborg, E. H. Esarey, C. B. Schroeder, D. Bruhwiler, C. Nieter, J. R. Cary, and W. P. Leemans. High-quality electron beams from a laser wakefield accelerator using plasma-channel



guiding. *Nature*, 431:538–541, 2004. ISSN 0028-0836. doi:

10.1038/nature02900. URL

<http://dx.doi.org/10.1038/nature02900>.

C. G. R. Geddes, C. Tóth, J. van Tilborg, E. H. Esarey, C. B. Schroeder, J. R. Cary, and W. P. Leemans. Guiding of relativistic laser pulses by preformed plasma channels. *Phys. Rev. Lett.*, 95:145002, 2005. doi:

10.1103/PhysRevLett.95.145002. URL

<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.95.145002>.

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>.

M. Hansson, L. Senje, A. Persson, O. Lundh, C.-G. Wahlström, F. G.

Desforges, J. Ju, T. L. Audet, B. Cros, S. Dobosz Dufrénoy, and P. Monot. Enhanced stability of laser wakefield acceleration using dielectric capillary tubes. *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 17:031303, 2014. doi:

10.1103/PhysRevSTAB.17.031303. URL

<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTAB.17.031303>.   

M. Hansson, B. Aurand, X. Davoine, H. Ekerfelt, K. Svensson, A. Persson, C.-G. Wahlström, and O. Lundh. Down-ramp injection and independently controlled acceleration of electrons in a tailored laser wakefield accelerator. *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 18:071303, Jul 2015. doi:

10.1103/PhysRevSTAB.18.071303. URL

<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTAB.18.071303>.

M Hansson, T L Audet, H Ekerfelt, B Aurand, I Gallardo González, F G Desforges, X Davoine, A Maitrallain, S Reymond, P Monot, A Persson, S Dobosz Dufrenoy, C-G Wahlström, B Cros, and O Lundh. Localization of ionization-induced trapping in a laser wakefield accelerator using a density down-ramp. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 58(5):055009, 2016.

URL <http://stacks.iop.org/0741-3335/58/i=5/a=055009>.

S Karsch, J Osterhoff, A Popp, T P Rowlands-Rees, Zs Major, M Fuchs, B Marx, R Hörlein, K Schmid, L Veisz, S Becker, U Schramm, B Hidding, G Pretzler, D Habs, F Gräner, F Krausz, and S M Hooker. GeV-scale electron acceleration in a gas-filled capillary discharge waveguide. *New Journal of Physics*, 9(11):415, 2007. URL

<http://stacks.iop.org/1367-2630/9/i=11/a=415>.

W. P. Leemans, A. J. Gonsalves, H.-S. Mao, K. Nakamura, C. Benedetti, C. B. Schroeder, C. Tóth, J. Daniels, D. E. Mittelberger, S. S. Bulanov, J.-L. Vay, C. G. R. Geddes, and E. H. Esarey. Multi-GeV electron beams from capillary-discharge-guided subpetawatt laser pulses in the self-trapping regime. *Phys. Rev. Lett.*, 113:245002, 2014. doi:

10.1103/PhysRevLett.113.245002. URL

<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.113.245002>.

R. Lehe, A. F. Lifschitz, X. Davoine, C. Thaury, and V. Malka. Optical transverse injection in laser-plasma acceleration. *Phys. Rev. Lett.*, 111:085005, 2013. doi: 10.1103/PhysRevLett.111.085005. URL

<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.111.085005>.

S. P. D. Mangles, G. Genoud, M. S. Bloom, M. Burza, Z. Najmudin, A. Persson, K. Svensson, A. G. R. Thomas, and C.-G. Wahlström. Self-injection threshold in self-guided laser wakefield accelerators. *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 15:011302, 2012. doi:

10.1103/PhysRevSTAB.15.011302. URL

<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTAB.15.011302>.

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>.

A. Sävert, S. P. D. Mangles, M. Schnell, E. Siminos, J. M. Cole, M. Leier, M. Reuter, M. B. Schwab, M. Möller, K. Poder, O. Jäckel, G. G. Paulus, C. Spielmann, S. Skupin, Z. Najmudin, and M. C. Kaluza. Direct observation of the injection dynamics of a laser wakefield accelerator using few-femtosecond shadowgraphy. *Phys. Rev. Lett.*, 115:055002, Jul 2015. doi: 10.1103/PhysRevLett.115.055002. URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.115.055002>.

- K. Schmid, A. Buck, C. M. S. Sears, J. M. Mikhailova, R. Tautz, D. Herrmann, M. Geissler, F. Krausz, and L. Veisz. Density-transition based electron injector for laser driven wakefield accelerators. *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 13:091301, 2010. doi: 10.1103/PhysRevSTAB.13.091301. URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTAB.13.091301>.
- C. B. Schroeder, P. B. Lee, J. S. Wurtele, E. H. Esarey., and W. P. Leemans. Generation of ultrashort electron bunches by colliding laser pulses. *Phys. Rev. E*, 59:6037–6047, 1999. doi: 10.1103/PhysRevE.59.6037. URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.59.6037>.
- C. B. Schroeder, E. H. Esarey, B. A. Shadwick, and W. P. Leemans. Trapping, dark current, and wave breaking in nonlinear plasma waves. *Phys. Plasmas*, 13:033103, 2006. doi: 10.1063/1.2173960. URL <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pop/13/3/10.1063/1.2173960>.
- F. Wojda. *Mesure de l'amplitude d'une onde de plasma créée par sillage laser guidé*. PhD thesis, Université Paris Sud - Paris XI, 2010. URL <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00485671/>.
<http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00485671>.