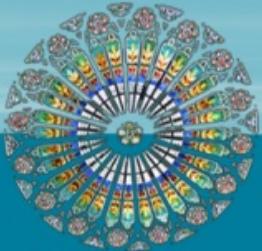


L'accélération laser-plasma, une piste pour les futurs accélérateurs

Brigitte CROS

Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas, UMR 8578
CNRS- Université Paris Sud - Orsay

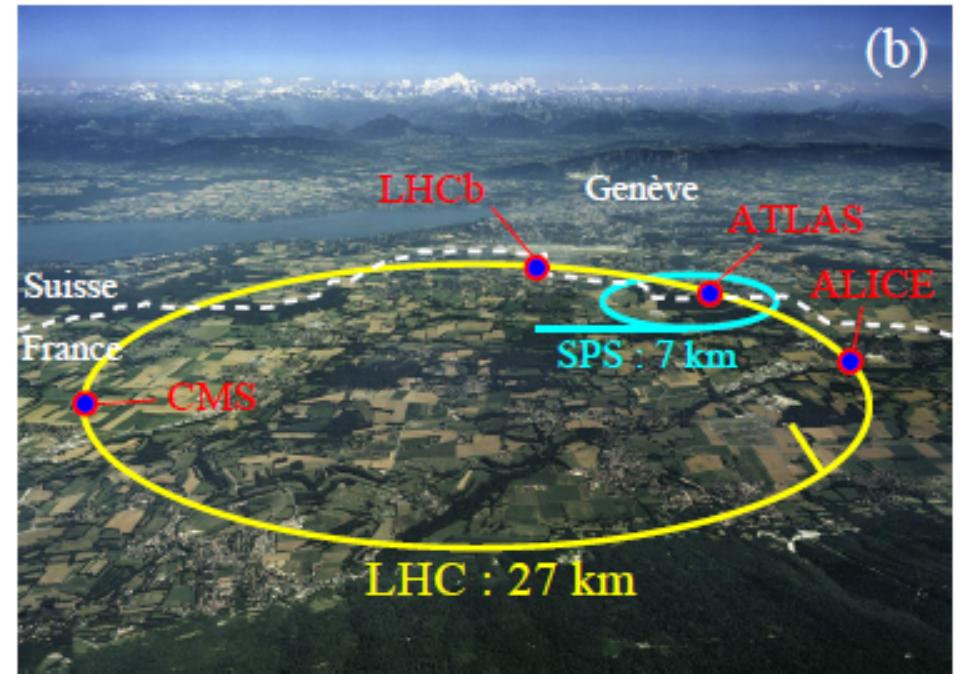
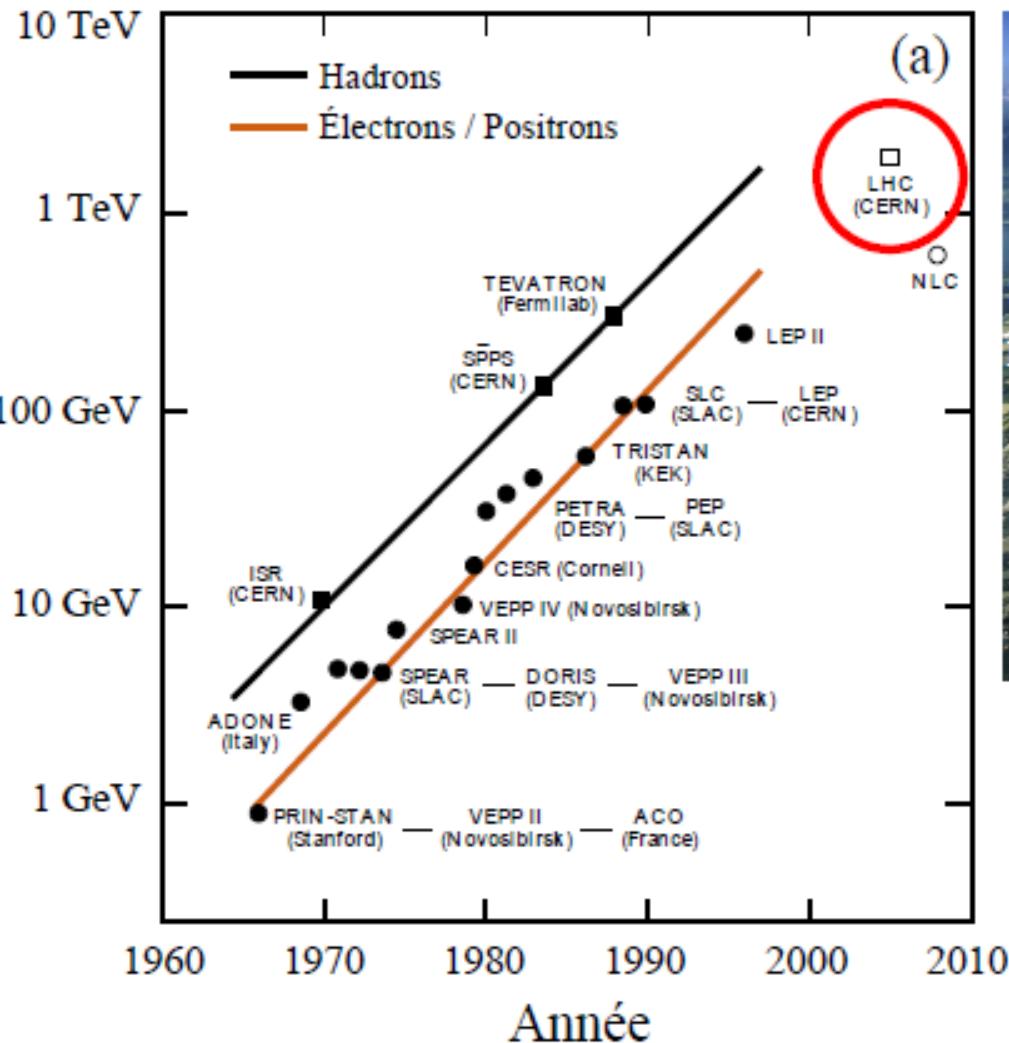
XXIII^e CONGRÈS GÉNÉRAL
Société Française
de Physique



Strasbourg
24-28 août 2015



Des outils de pointe pour la recherche en physique



► Les accélérateurs sont largement utilisés: industrie, médecine, recherche





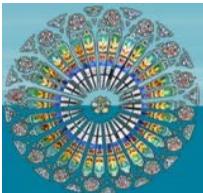
De nouveaux concepts pour des accélérateurs plus compacts



- ➔ Les accélérateurs linéaires sont plus adaptés pour l'accélération d'électrons
- ➔ Leur taille croît avec l'énergie des électrons

- ➔ Le champ maximum des accélérateurs RF sous vide est limité par la tension de claquage aux parois ~ 50 MV/m

- ➔ Nouveaux concepts pour contourner cette limitation, concept ALP proposé en 1979 [Tajima & Dawson, PRL]



L'ALP est une voie prometteuse pour le développement d'accélérateurs compacts



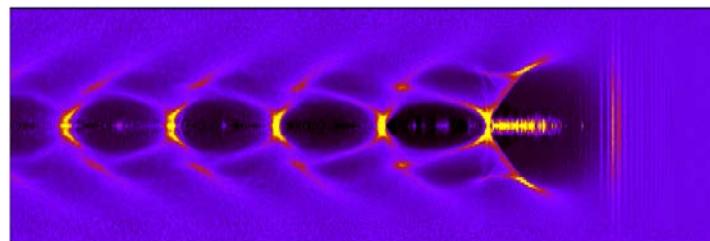
- L'échelle d'un collisionneur e-e+ au TeV est de l'ordre de 100 km pour un champ maximum <50MV/m avec la technologie actuelle

Echelles cavités:

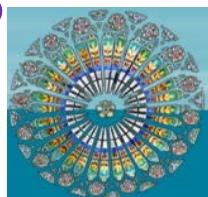
~ 10 cm



~ 10 µm



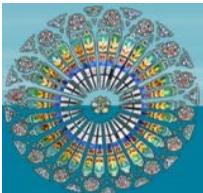
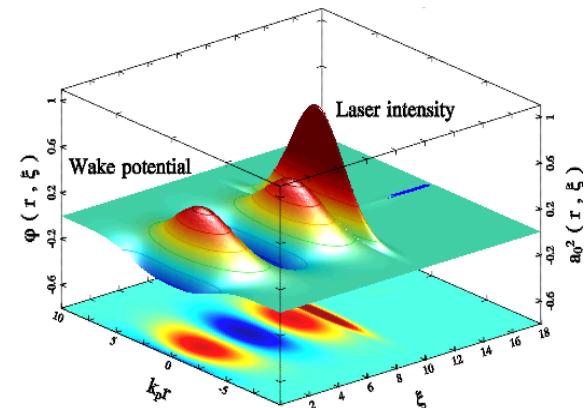
- L'accélération laser plasma produit des champs accélérateurs dans la gamme 1-100 GV/m:
- **Les propriétés de l'ALP attirent l'attention d'une large communauté, depuis les premiers électrons au GeV en 2006**



Plan de l'exposé



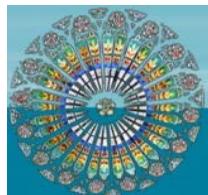
- ▶ Quelques caractéristiques de l'accélération laser plasma (ALP)
 - ✿ Principes de base
 - ✿ Performances actuelles des ALP
 - ✿ Vers l'accélération multi-étages
- ▶ Avancement dans le cadre du projet CILEX
 - ✿ Installation laser Apollon 10PW
 - ✿ Modélisation de l'accélérateur
 - ✿ Etudes sur l'injecteur et l'étage accélérateur
- ▶ Conclusion



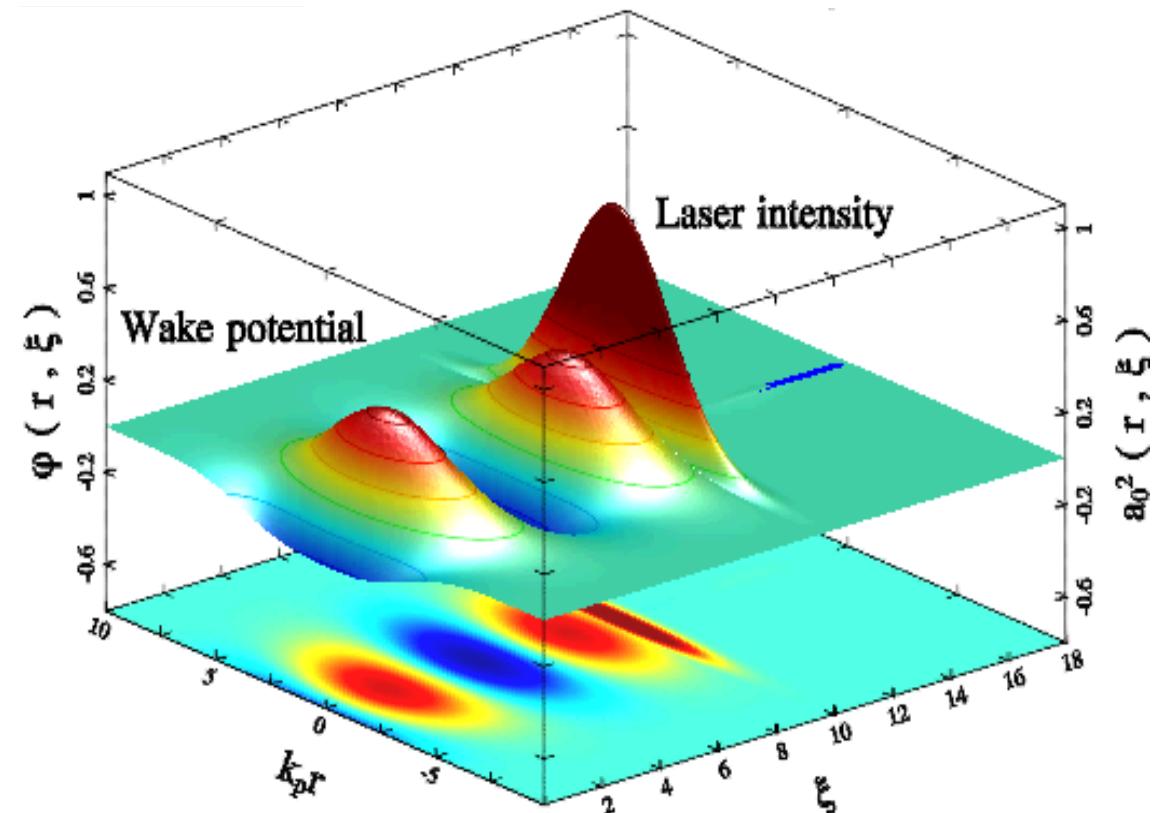
Principe du sillage



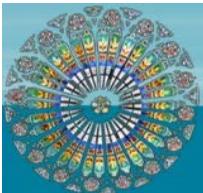
- ▶ Pour l'accélération laser plasma, on focalise un laser intense dans un plasma



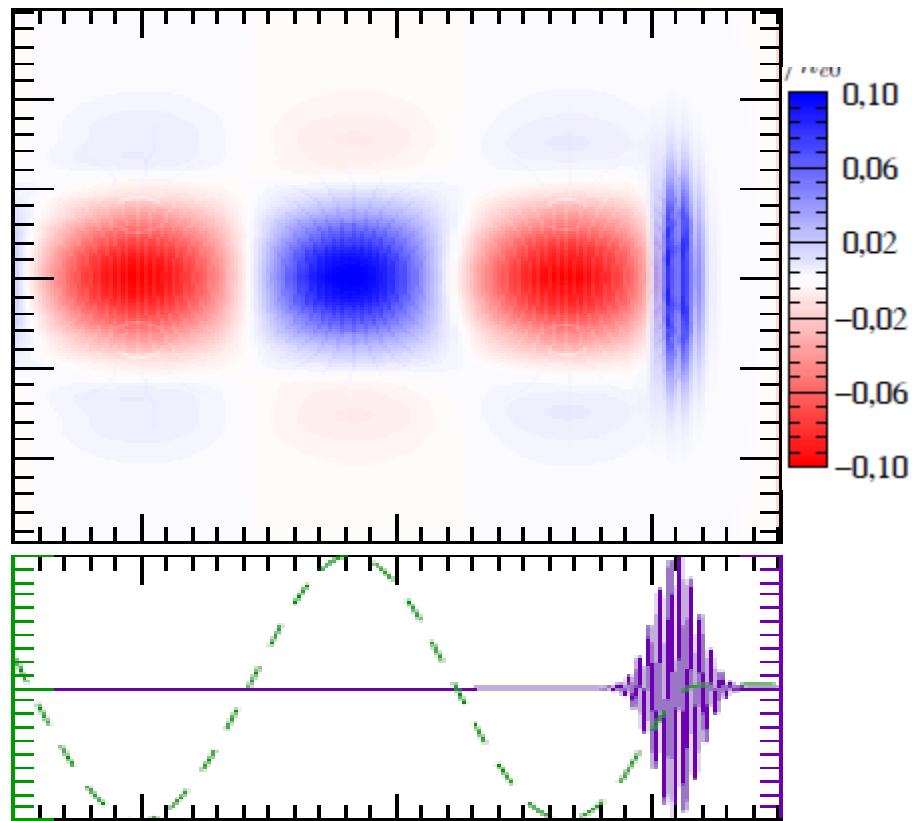
Un champ accélérateur élevé est créé dans le sillage d'un laser intense



➡ Force Pondéromotrice ~ gradient d'énergie laser

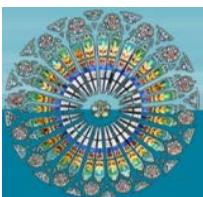


Un champ accélérateur élevé est créé dans le sillage d 'un laser intense

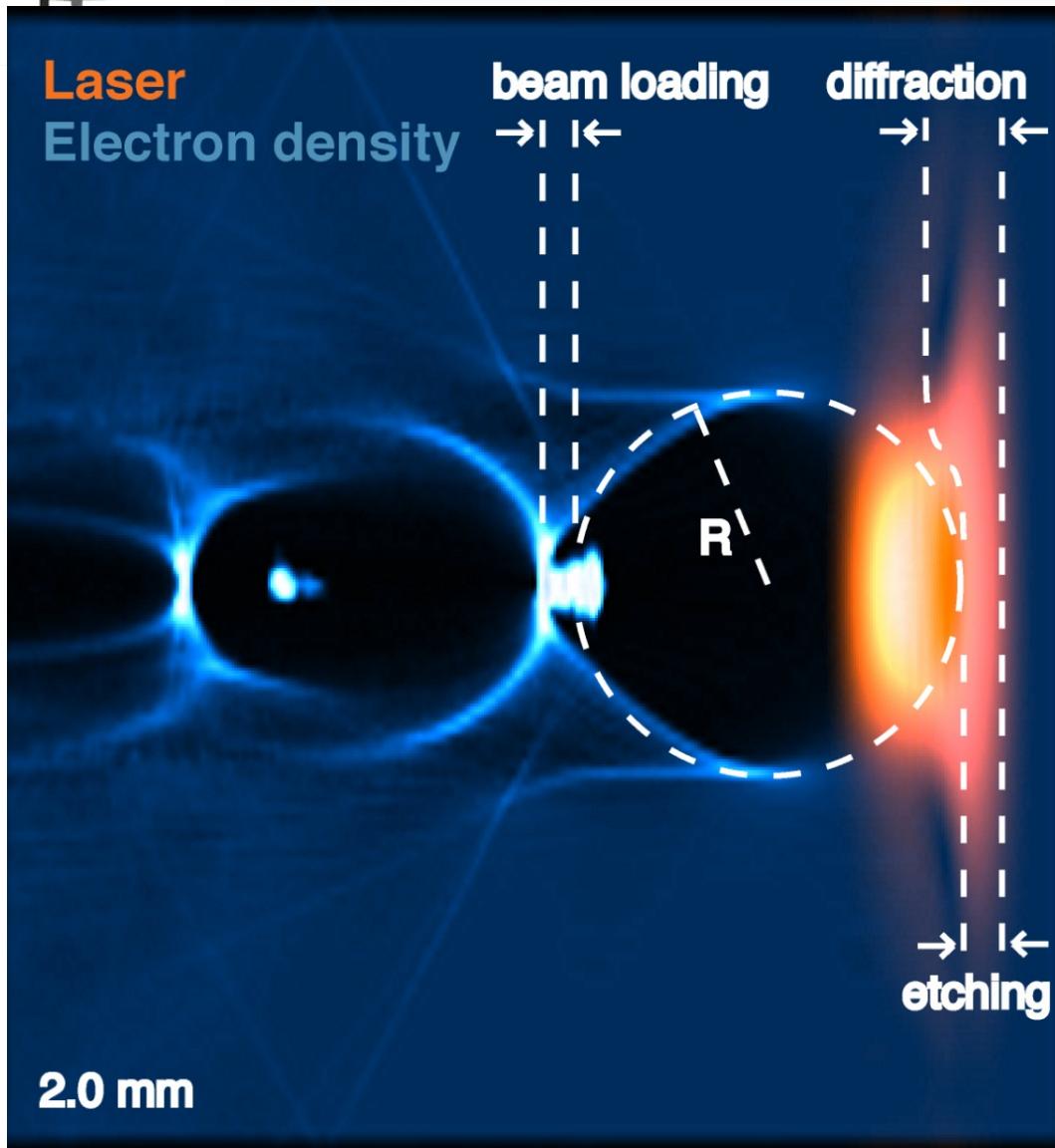


$$E(GV/m) = 30 \left[\frac{n_e(cm^{-3})}{10^{17}} \right]^{1/2} \frac{dn_e}{n_e}$$

- ➡ Force Pondéromotrice ~ gradient d'énergie laser
- ➡ Structure accélératrice sinus: $\lambda_p \sim 10-100\mu\text{m}$
- ➡ Champ accélérateur: 1-100 GV/m
- ➡ Champ normalisé $a_0 \sim 1$, régime quasi-linéaire
- ➡ Il faut injecter des électrons produits par une source externe

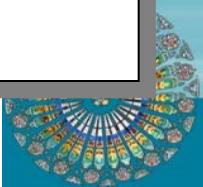


Le régime non linéaire conduit à l'auto-injection d'électrons du plasma



$$a_0 > 2$$

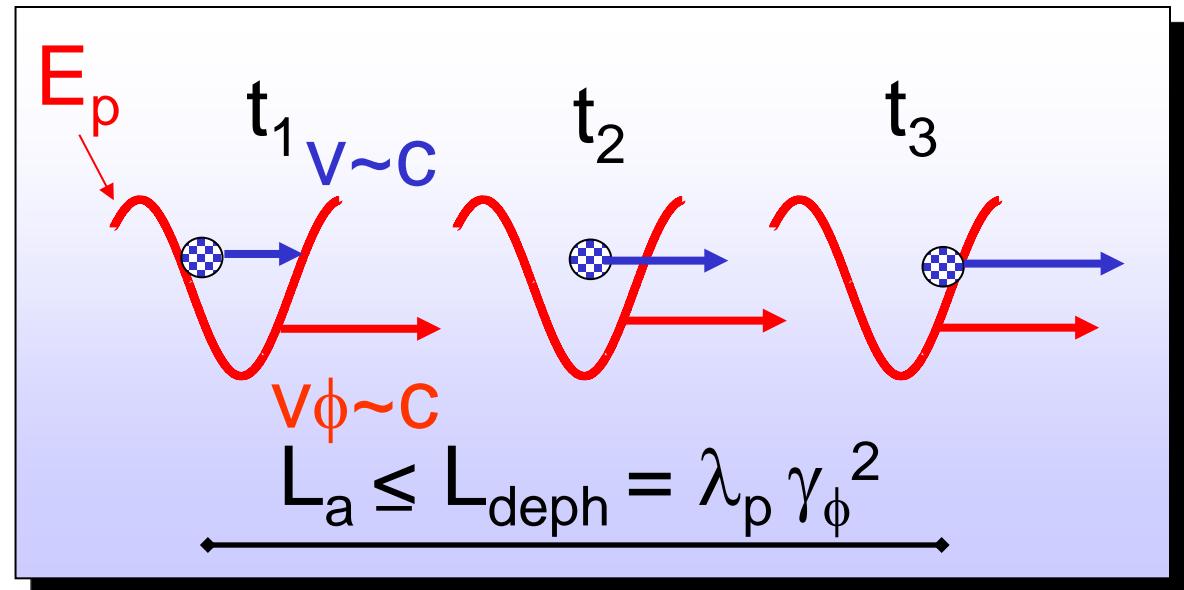
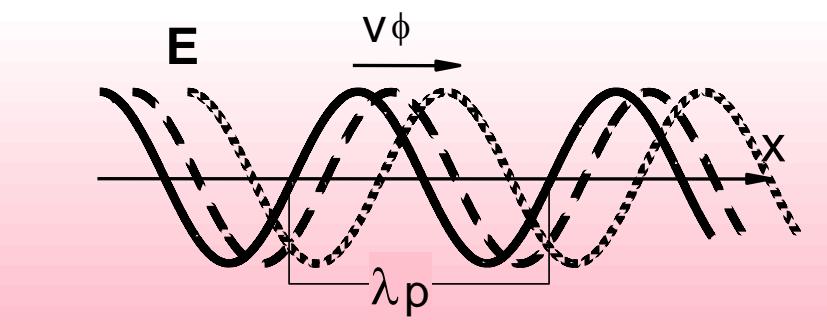
- Compression et auto-focalisation de l'impulsion
- Expulsion des électrons: création d'une bulle (ions)
- Electrons auto-injectés à l'arrière de la bulle par les champs accélérateurs et focalisants
- Electrons injectés modifient l'arrière de la bulle (beam loading)
- Génération de rayonnement bétatron



Gain d'énergie optimisé sur la longueur de déphasage

→ Onde plasma relativiste:

vitesse de phase ~ vitesse groupe laser
 $\sim c (1 - n_e/n_c)^{1/2}$



→ Gain d'énergie

$$\Delta W = e E_p L_a$$

→ Facteur relativiste

$$\gamma_\phi \sim (n_c/n_e)^{1/2}$$

n_e	10^{17} cm^{-3}	10^{19} cm^{-3}
γ_ϕ	100	10
L_a	1 m	1 mm
$c \Delta W_{\text{max}}$	20 GeV	200 MeV



Le gain d'énergie est plus important à basse densité, sur une grande longueur



$$\Delta W = e E_p L$$

→ La longueur d'accélération est la plus courte entre

- ✿ La longueur de Rayleigh

- ✿ La longueur de déphasage: $L_{\text{deph}} \propto 1/n_e^{3/2}$

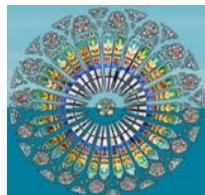
- ✿ La longueur d'amortissement
de l'énergie laser: $L_{\text{am}} \propto 1/(a_0^2 n_e^{3/2})$

→ Optimum $L_{\text{deph}} \sim L_{\text{am}}$ et $a_0 \sim 1$, $E_p \propto n_e^{1/2}$

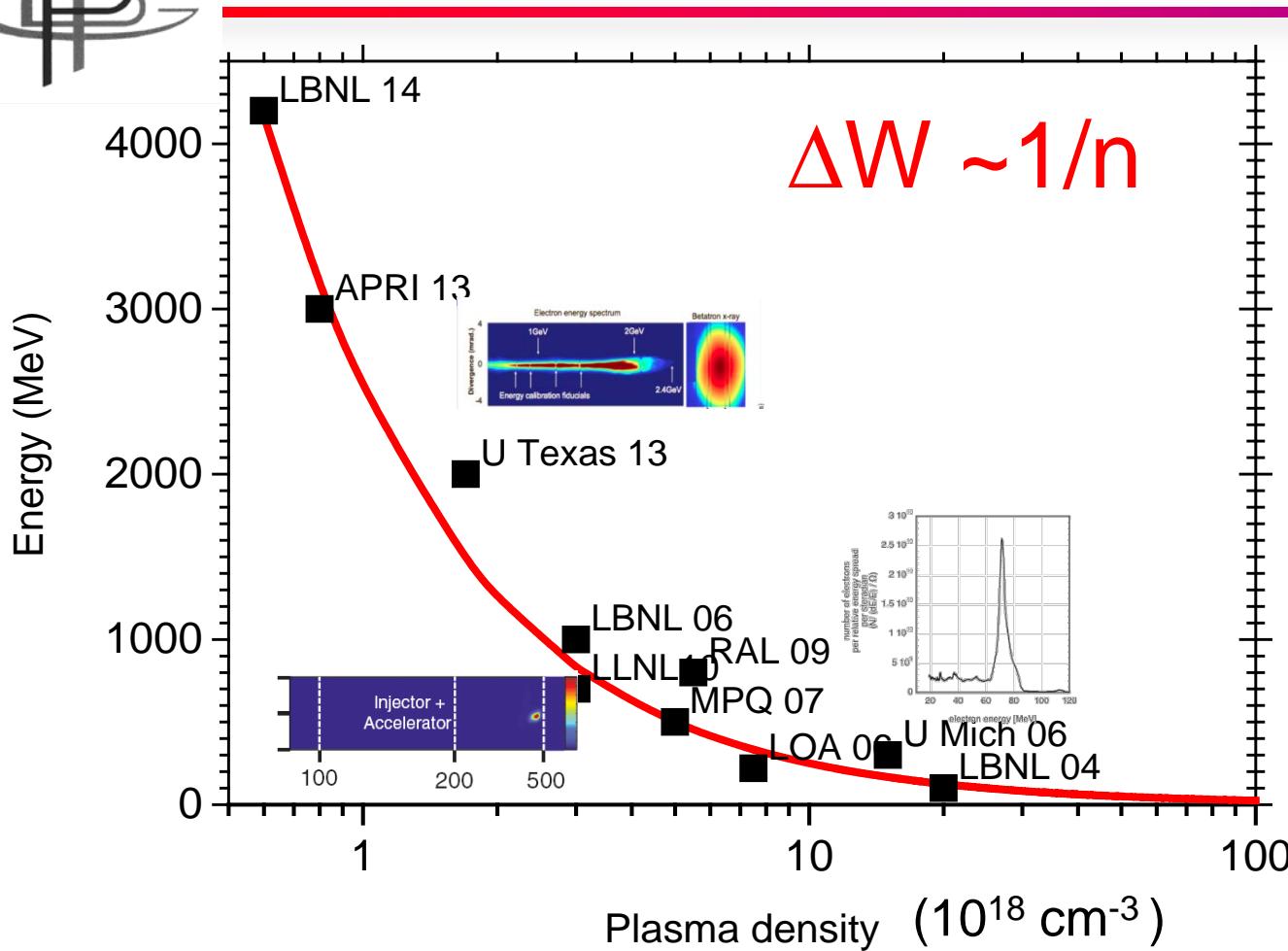
$$\Delta W \propto 1/n_e$$

→ **L'augmentation du gain d'énergie passe par**

l'augmentation de la longueur d'interaction à basse densité, tout en gardant une intensité laser élevée $a_0 \sim 1$



Les résultats expérimentaux depuis 2004 suivent la loi d'échelle pour le gain d'énergie

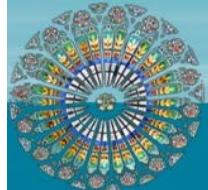


Résultats en régime non linéaire avec auto-injection des électrons du plasma

Le passage au-dessus du GeV est franchi pour des laser PW :
UTexas13, APRI13: 2 jets de gaz

LBNL14: gain avec guidage externe

- Il faut diminuer la densité pour augmenter l'énergie
- La diminution de la densité empêche l'auto-injection à très basse densité → injection externe nécessaire



Résumé de l'état de l'art de l'accélération laser plasma



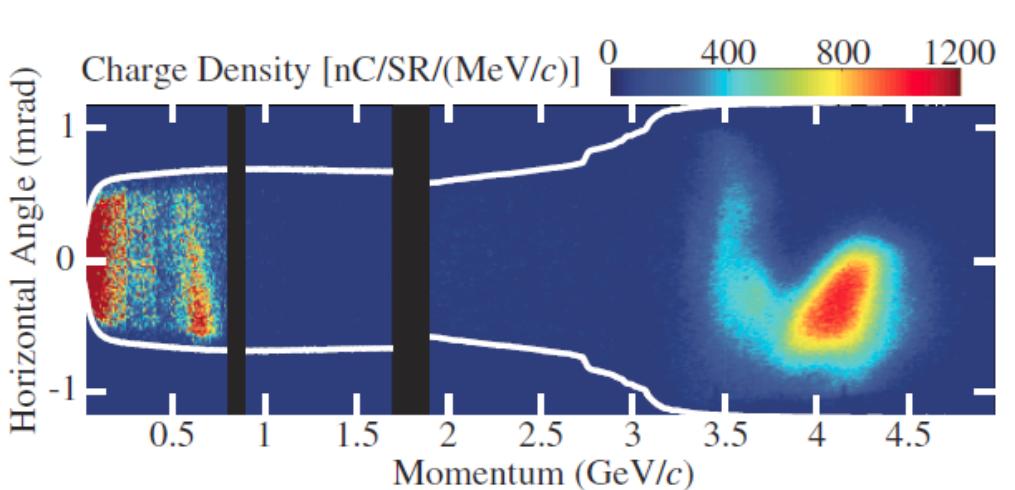
- ▶ Les accélérateurs laser plasma sont des sources d'électrons et de rayonnement (THz, X, gamma)

- Accélérateurs **Compacts**

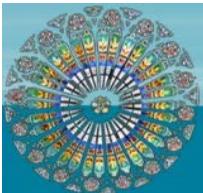
- 4.2 GeV, 9 cm, 300 TW laser

- Paquets de courte durée (~10 fs)

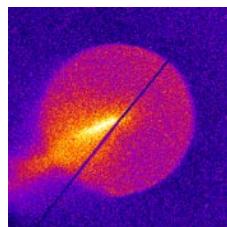
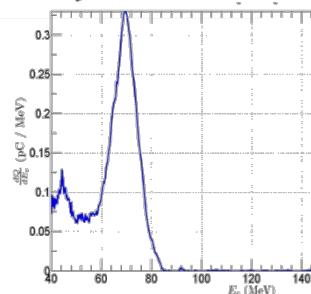
Leemans et al. PRL 2014



- ▶ Gradients accélérateurs élevés ~100 GV/m démontrés
- ▶ Accord avec les modèles théoriques
- ▶ Propriétés des électrons dépendent beaucoup des mécanismes d'injection dans l'onde de plasma



Le contrôle et l'efficacité sont les prochain défis des ALP



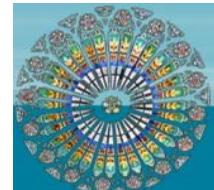
► **Objectifs:** contrôler les propriétés des faisceaux accélérés et augmenter leur énergie

- ✿ Optimiser les paramètres des faisceaux (largeur en énergie, emittance, fiabilité) dans la gamme 100MeV - 1GeV
- ✿ Contrôler le rayonnement émis
- ✿ Accroître l'énergie: études de faisabilité pour un accélérateur multi-étages (MUST_LPA)

► **Défis**

- ✿ Fabiliser et améliorer les performances des laser
- ✿ Augmenter la longueur d'accélération
- ✿ Injecter les électrons dans le plasma de façon précise et contrôlée

► **1ere étape de test: l'accélération multi-étages**

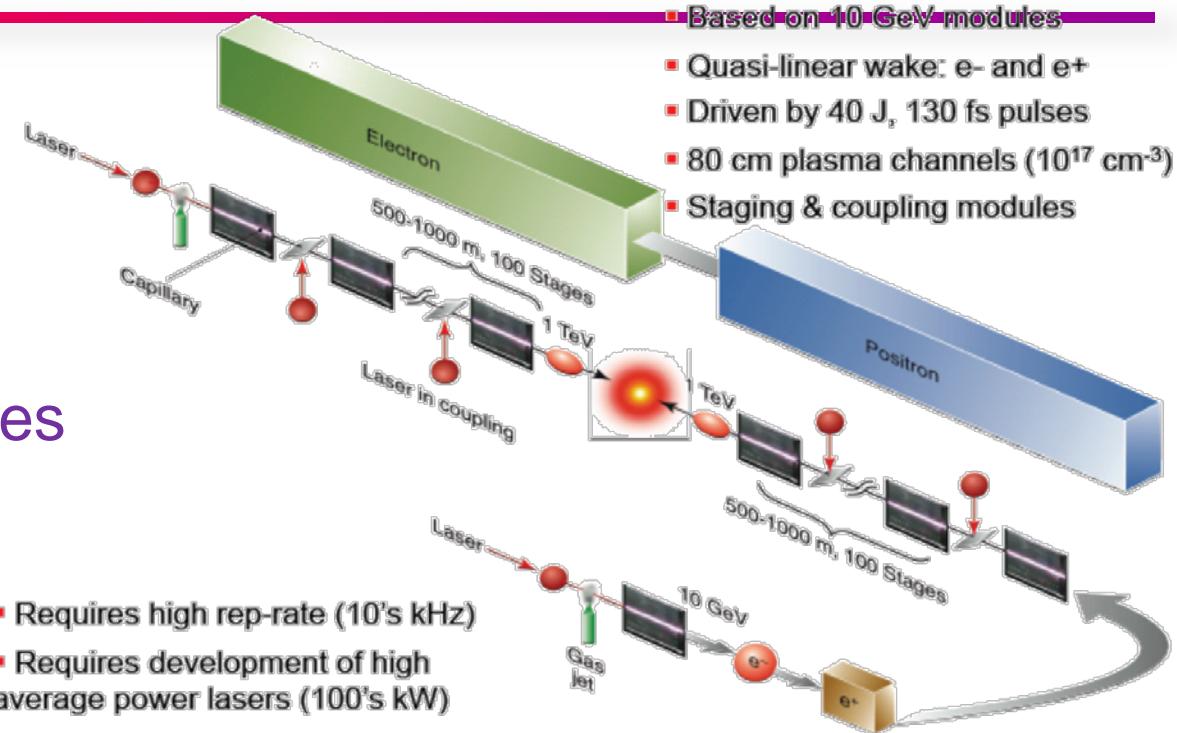


Les lasers de puissance donnent accès à de nouveaux régimes de l'ALP



→ Accélérateurs pour la physique des hautes énergies

- ✿ Etages~10 GeV



→ Sources intenses d'électrons et de rayonnement et leur combinaison

- ✿ Faisceau pour LEL de courte longueur d'onde
- ✿ Production de positrons
- ✿ Interaction Particules-photons, génération de rayonnement multi-MeV (gamma rays)

Leemans & Esarey, Physics Today, March 2009



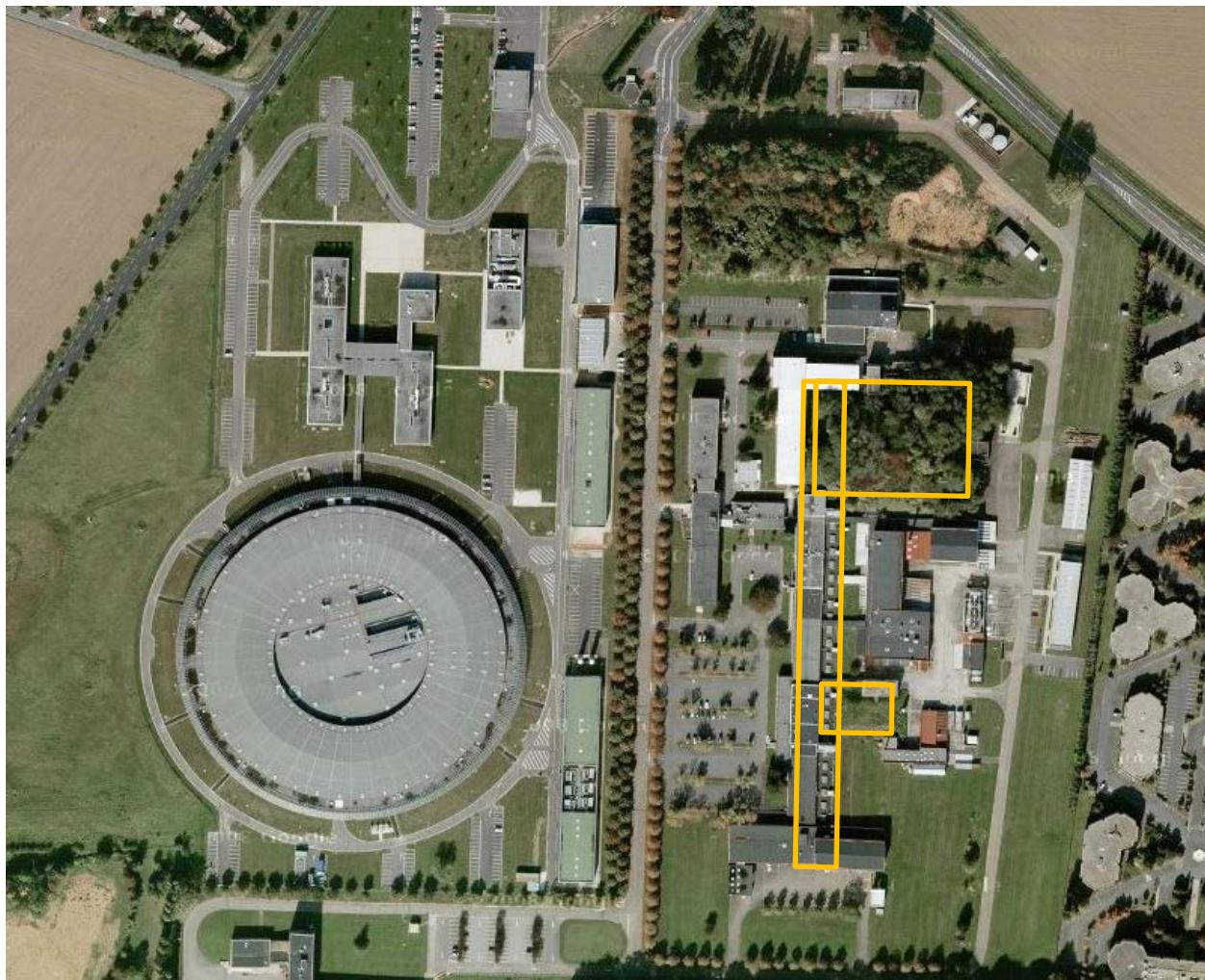
Plusieurs installations laser PW en développement au niveau mondial



ICUIL World Map of Ultrahigh Intensity Laser Capabilities



Centre Interdisciplinaire Lumière Extrême



Laser Multi-PW
APOLLON 10PW

Installation multi-faisceaux
1 PW + probe + ns

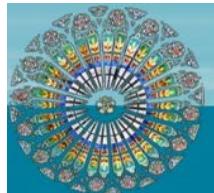
Zones expérimentales dédiées

Installations satellites
UHI100, LASERIX

Programme multi-disciplinaire

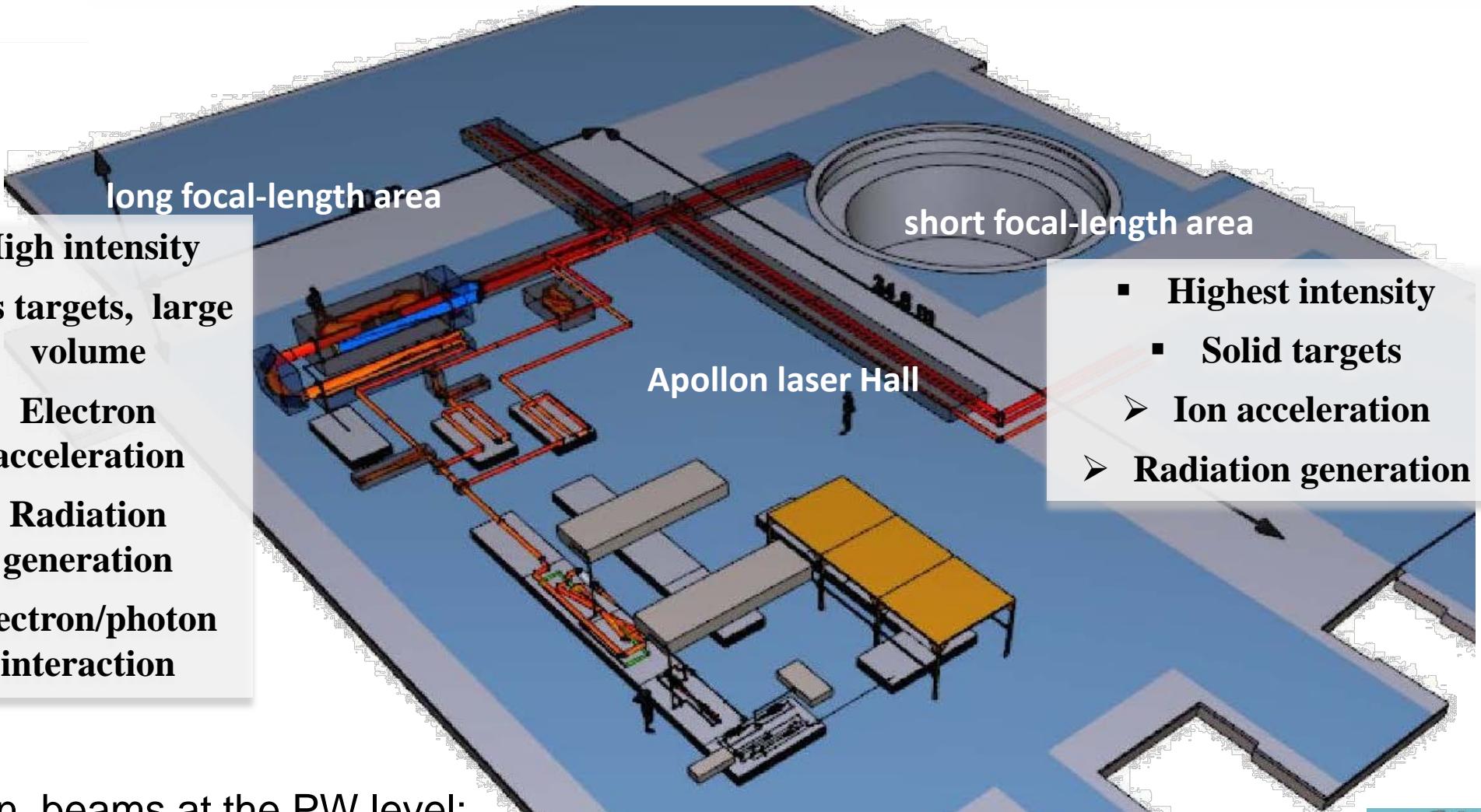
Formation de scientifiques et
d'ingénieurs

Accueil des utilisateurs

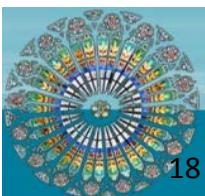


Vue d'ensemble de l'installation laser Apollon

- **High intensity**
- **Gas targets, large volume**
 - Electron acceleration
 - Radiation generation
 - Electron/photon interaction



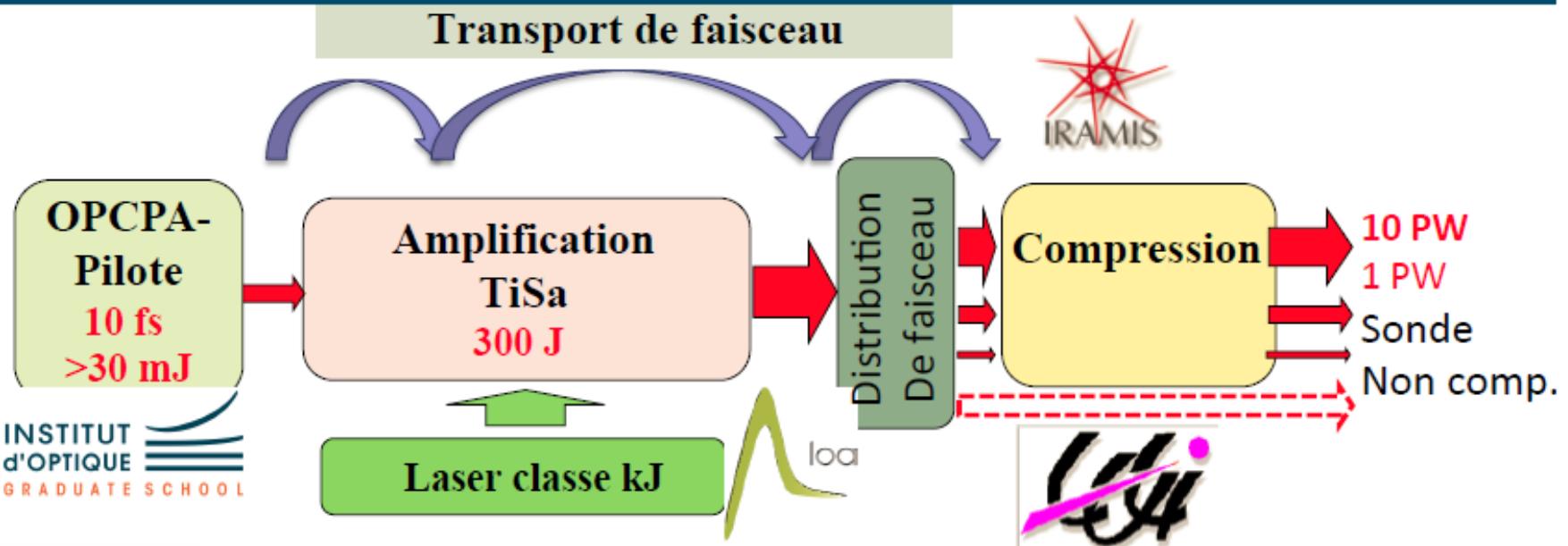
2 main beams at the PW level:
 15J, 15fs
 150J, 15fs



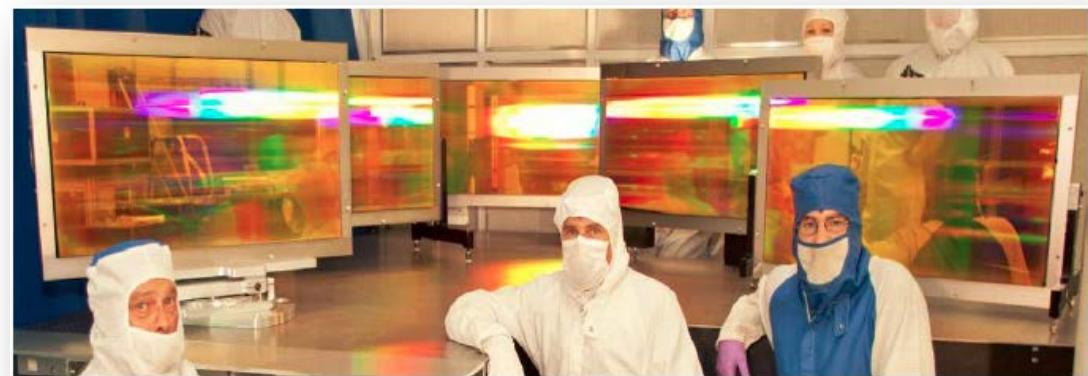
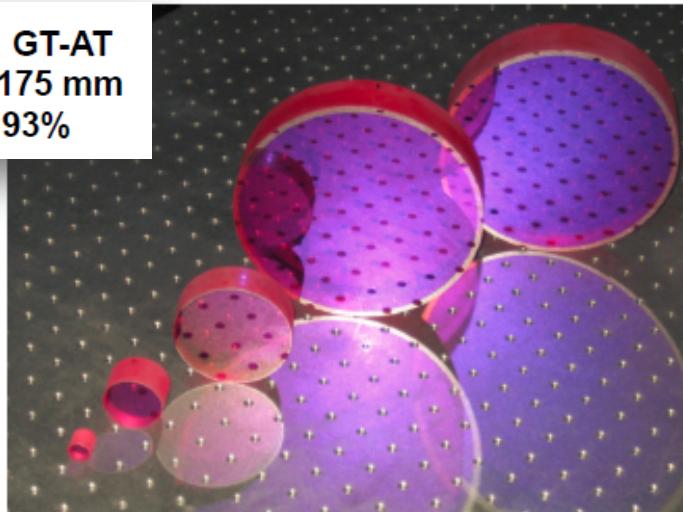
Une installation laser de pointe, construite par un consortium de recherche



Apollon 10 PW



Cristaux de TiSa : GT-AT
de 15 mm à 175 mm
Absorption: 93%

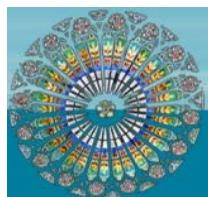


slide courtesy of G Cheriaux

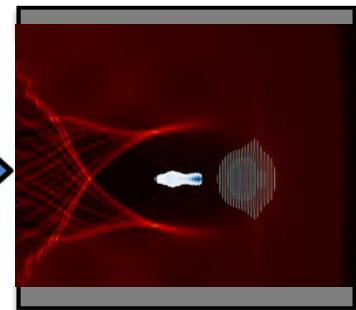
Objectifs de l'ALP dans le cadre de CILEX



- ➡ Développer un ALP à deux étages
 - Installation de test pour l'accélération d'électrons et prototype pour les études à venir sur l'accélération laser plasma multi-étages (MUST_LPA)
- ➡ Etude des processus fondamentaux
 - Validité des lois d'échelle pour l'accélération à ultra-haute intensité laser
 - Production et accélération de positrons
 - Génération de rayonnement (betatron, injection dans un onduleur, diffusion Compton et Thomson)



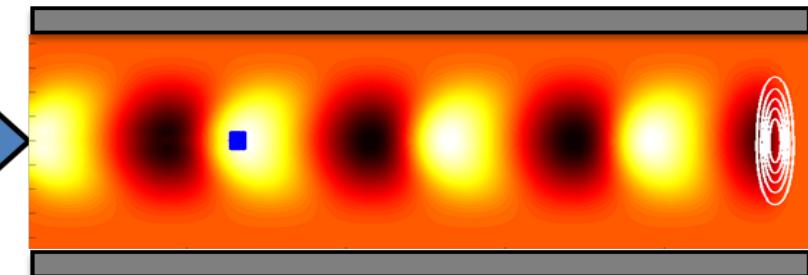
Une installation pour tester le couplage entre 2 étages laser plasma



First stage
Laser

Bubble regime
operation inside
a short gas cell

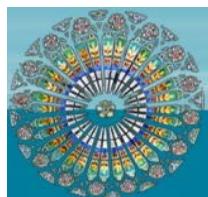
Electron
Beam
Focusing
Optics



Laser for
second
stage

Moderately non-linear regime
operation inside a long
dielectric capillary tube

- 1^{er} étage: fort gain, 2^e étage: contrôle et stabilité, couplage: montée en énergie par modules successifs
- Défis scientifiques et techniques: mécanismes d'accélération et de guidage, stabilité, synchronisation.



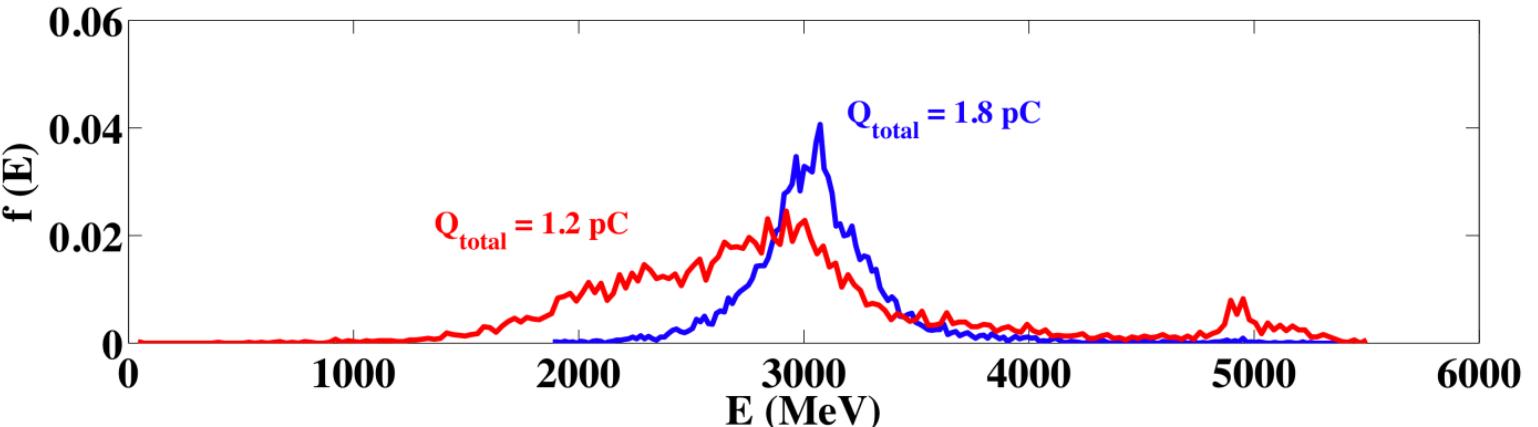
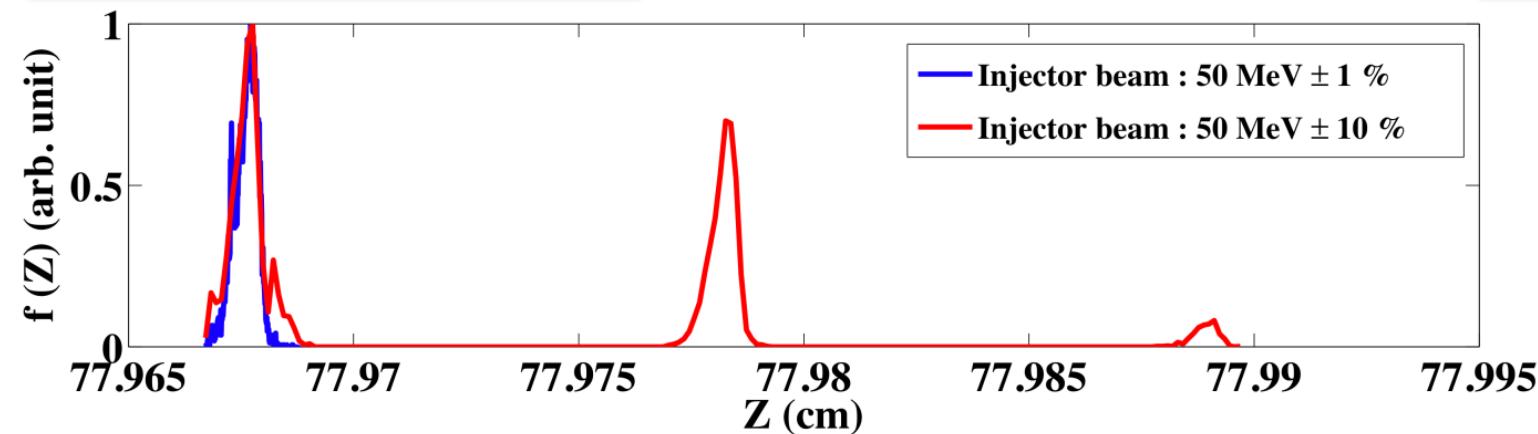
Des simulations intégrées pour concevoir un accélérateur multi-étages sont en cours



Simulations de la source d'électrons
PIC avec WARP
 $1\mu\text{m} - 1\text{mm}$

Ligne de transport du paquet d'e-
(TraceWin, WARP)

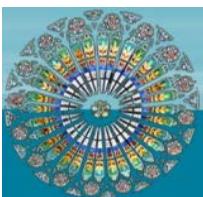
Régime de sillage quasi-linéaire avec WAKE-EP
 $10\mu\text{m} - 1\text{m}$



Laser :
 $a_0 = 1.42$
 $T(\text{FWHM}) = 40 \text{ fs}$,
 $W_0 = 100 \mu\text{m}$

Densité plasma
 $= 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Ligne transport = 1 m



Des simulations intégrées pour concevoir un accélérateur multi-étages sont en cours

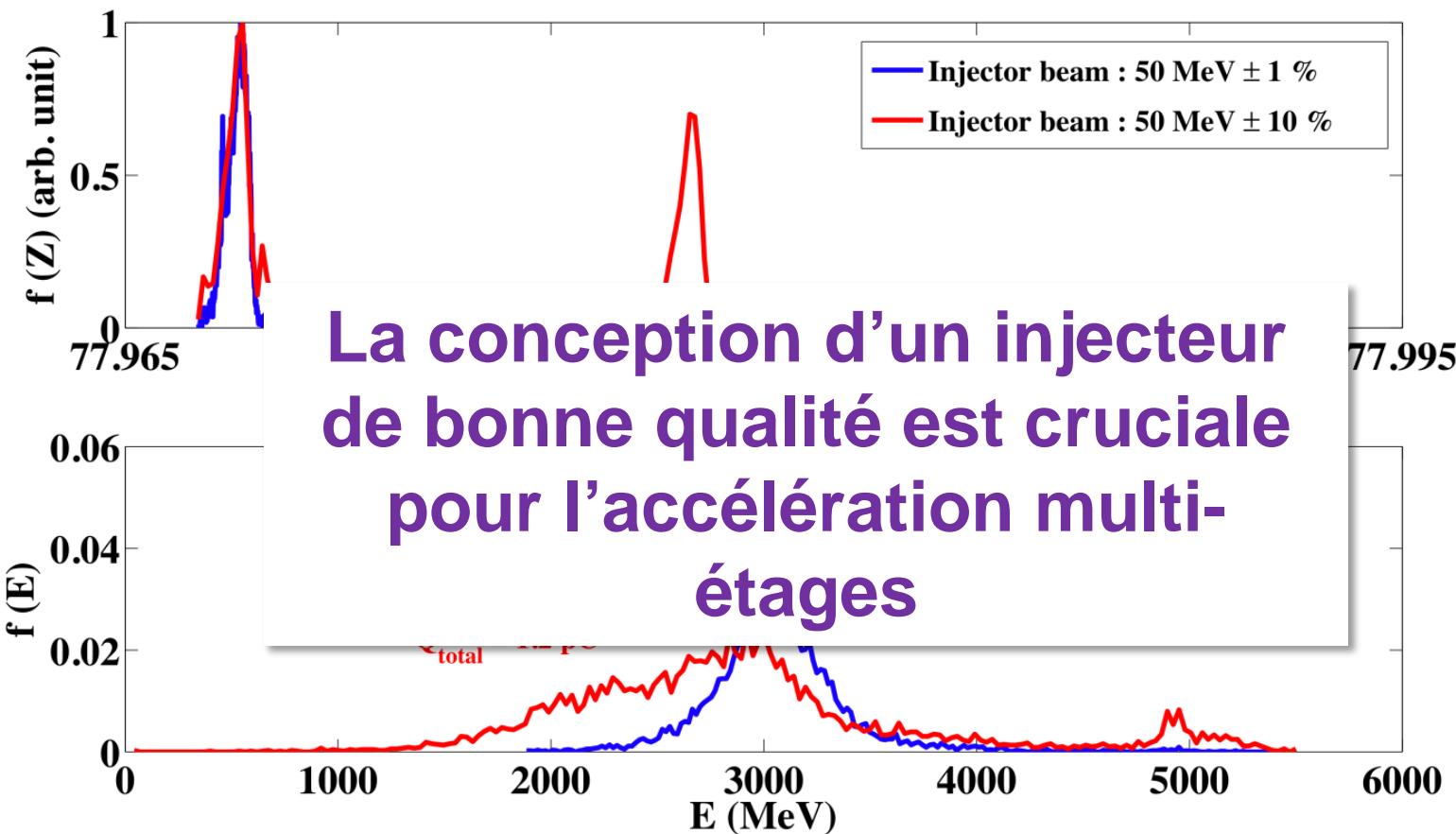


Simulations de la source d'électrons
PIC avec WARP

Ligne de transport
du paquet d'e-
(TraceWin, WARP)

Régime de sillage
quasi-linéaire avec
WAKE-EP

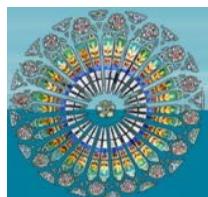
La conception d'un injecteur de bonne qualité est cruciale pour l'accélération multi-étages



Laser :
 $a_0 = 1.42$
 $T(\text{FWHM}) = 40 \text{ fs}$,
 $W_0 = 100 \mu\text{m}$

Densité plasma
 $= 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

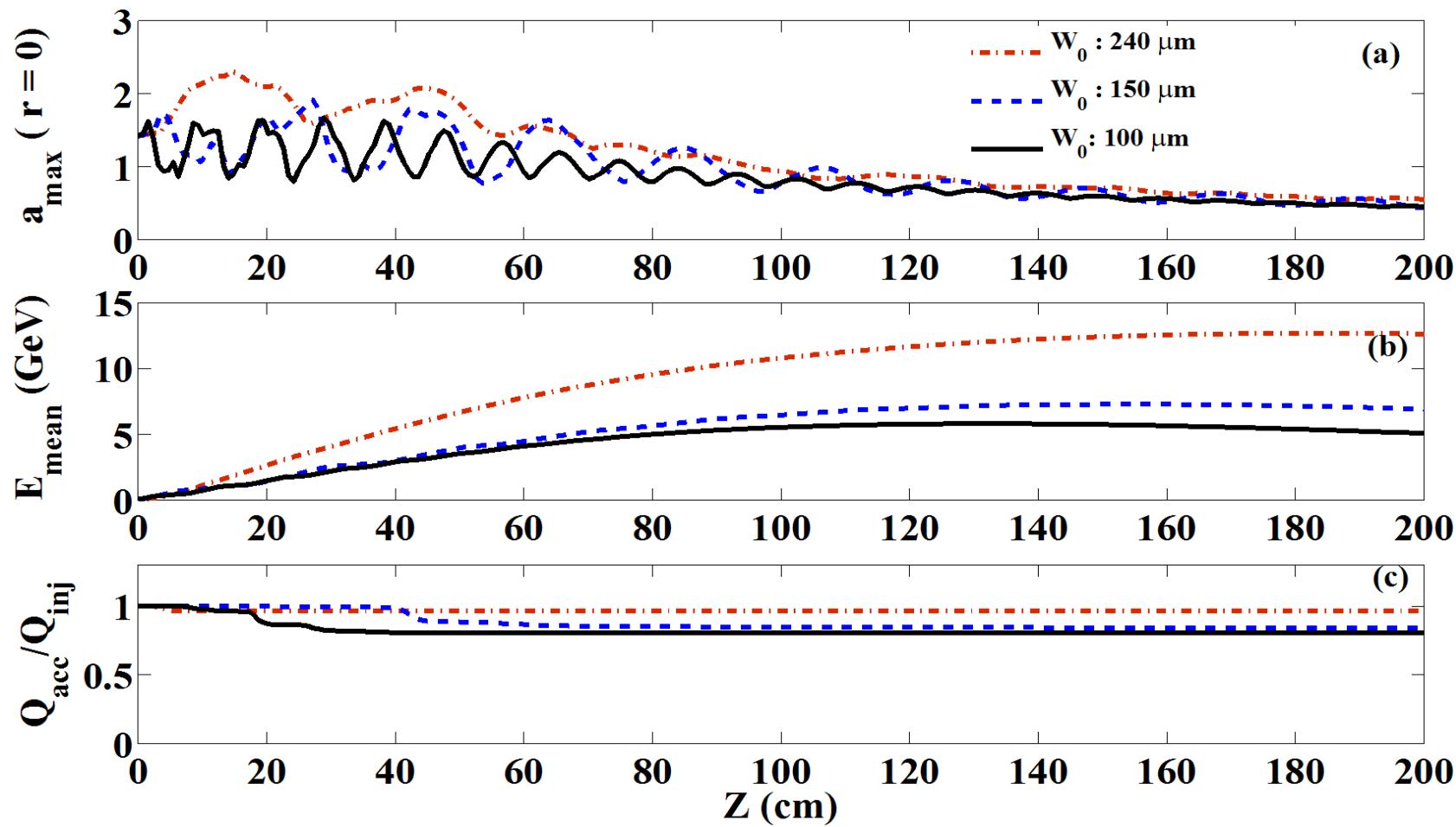
Ligne transport = 1 m



L'étage accélérateur est modélisé avec le code PIC réduit WAKE _EP



Capillary radius $154\mu\text{m}$, electron density 10^{17}cm^{-3} , plasma wavelength $100\mu\text{m}$
e- injection (10pC , 10fs , $10\mu\text{m}$, 50MeV)



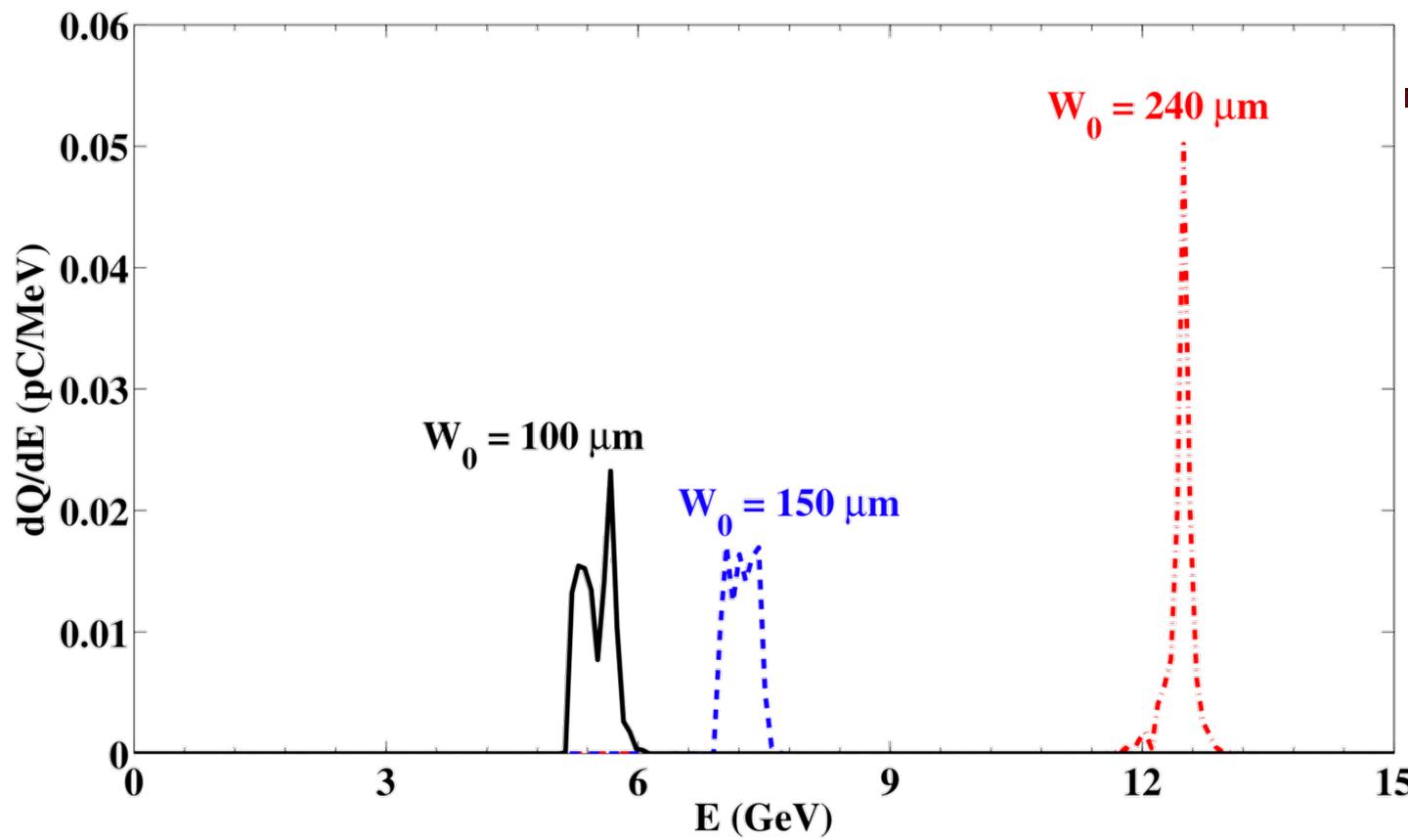
Influence de la taille transverse du faisceau laser



Accélération multi- GeV dans un tube diélectrique sur la longueur de déphasage

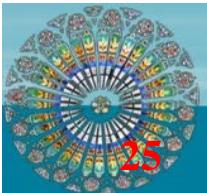


Capillary radius 154 μm , electron density 10^{17}cm^{-3} , plasma wavelength 100 μm
e- injection (10pC, 10fs, 10 μm , 50MeV)

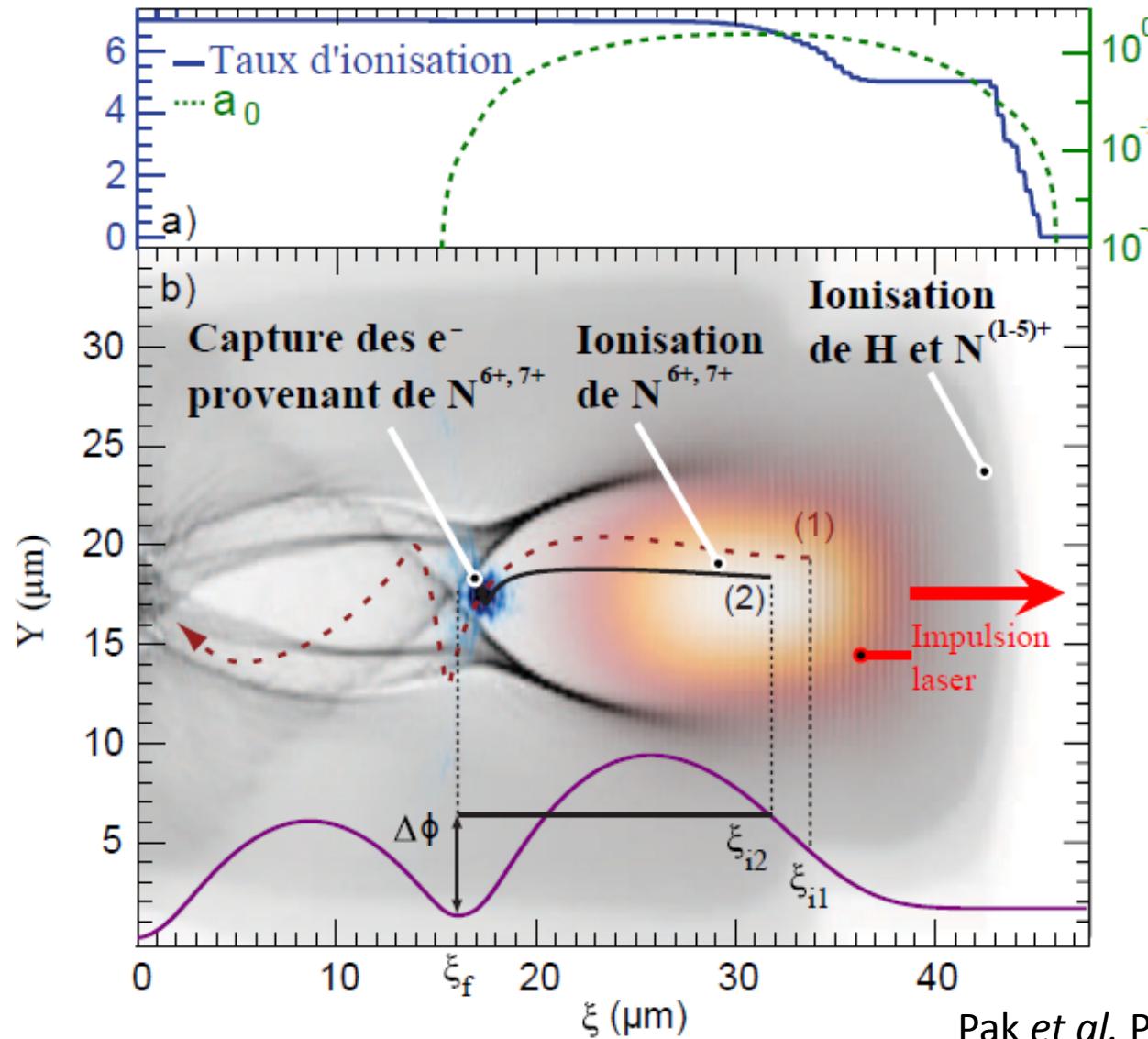


→ Faisceau avec une dispersion en énergie < 5% obtenu après 1.5 m d'accélération

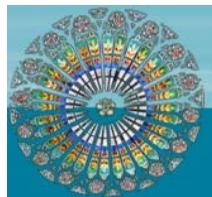
$a_0=1.4; 40 \text{ fs}$
(30J, 65J, 165J)



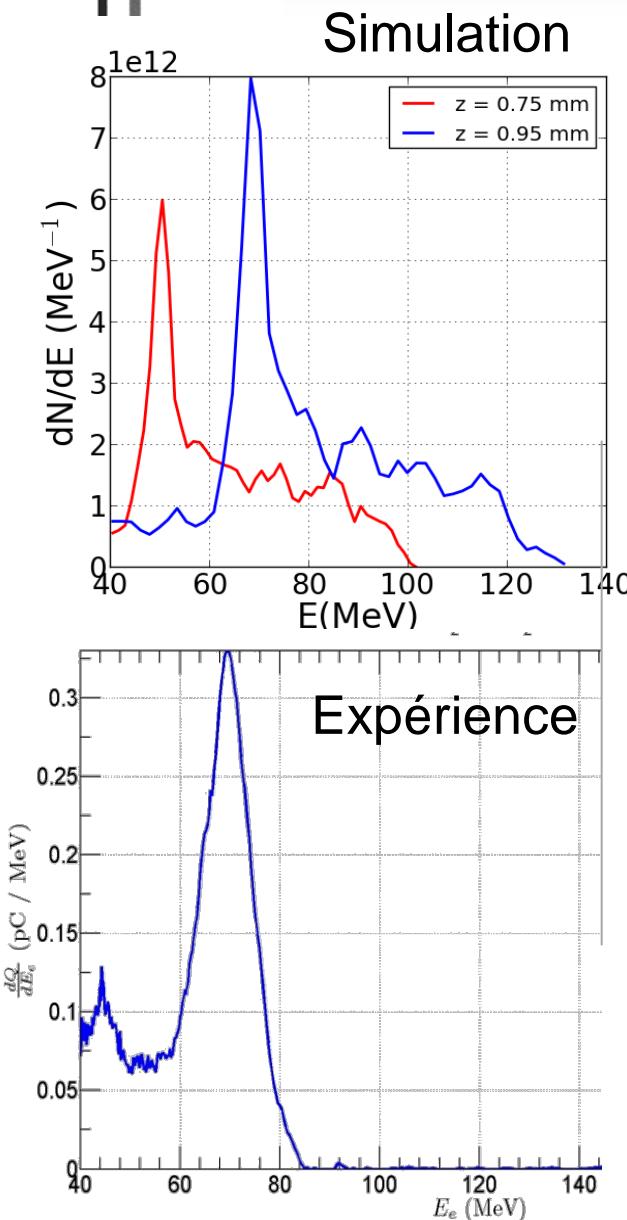
L'injection induite par ionisation permet d'augmenter la charge accélérée



- Ionisation de couches internes au pic de l'intensité laser, pour des atomes de Z élevé (azote), présents en faible quantité dans un gaz d'hydrogène
- Seuil d'injection abaissé par rapport à l'auto-injection
- Moment transverse réduit
- Charge accélérée plus élevée
- Pas de modification du sillage

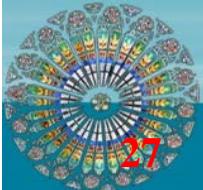
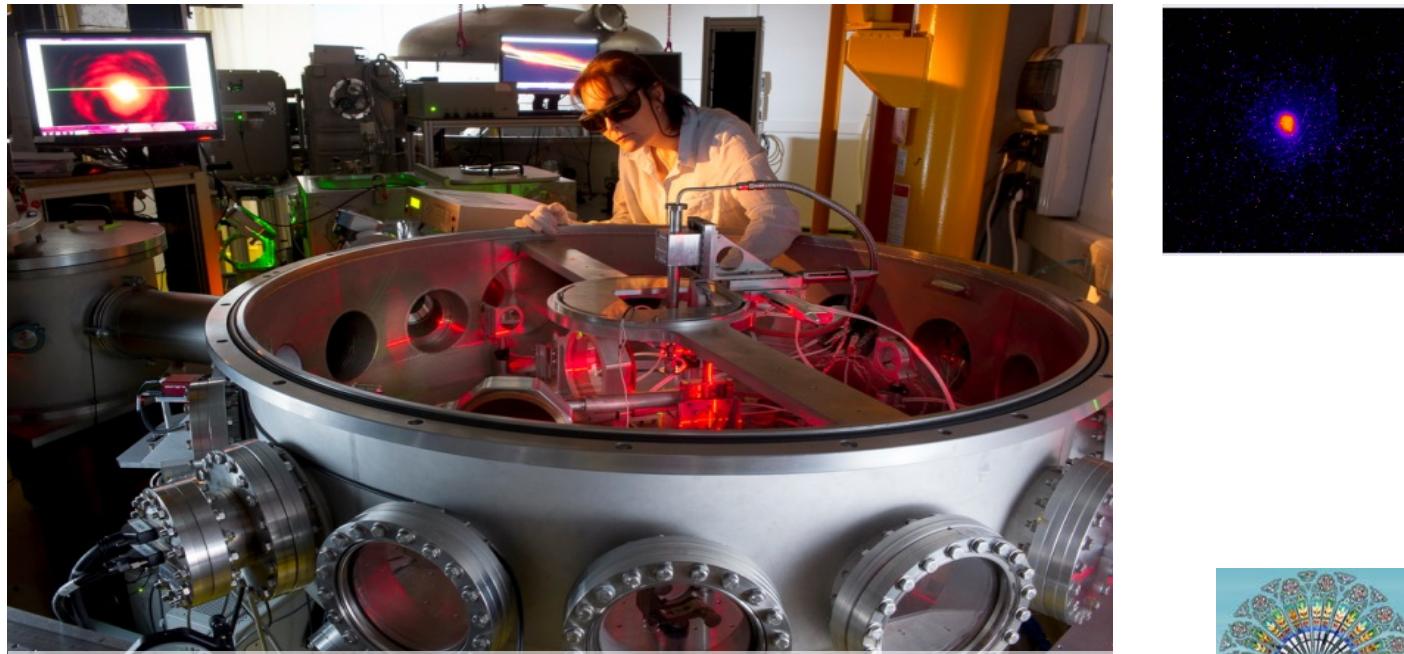


Des résultats prometteurs obtenus sur l'installation UHI100



→ Etude de la source d'électrons

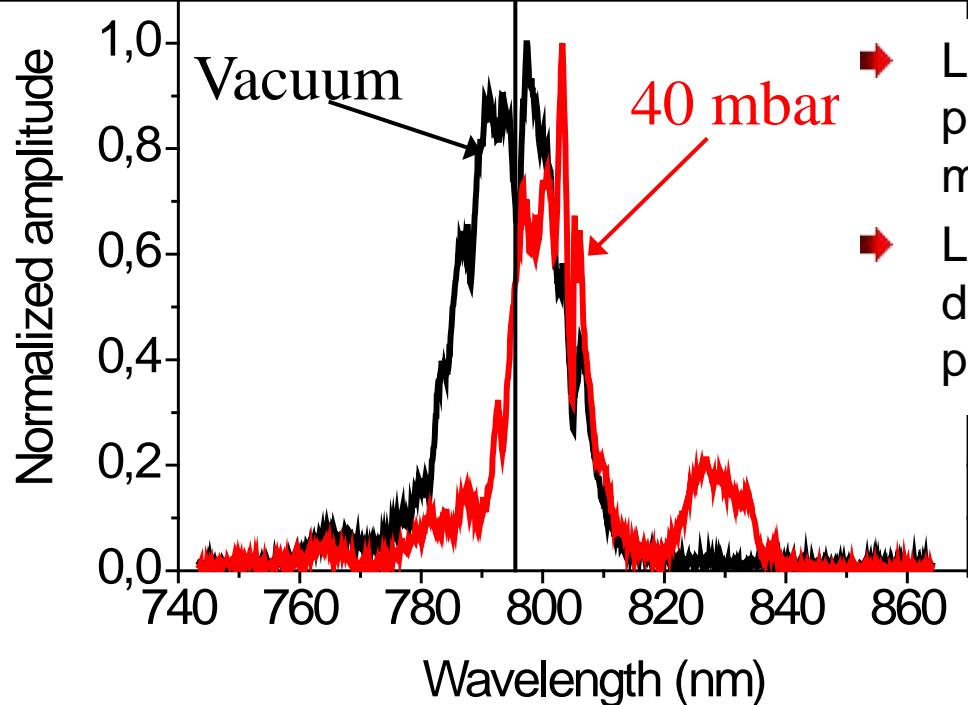
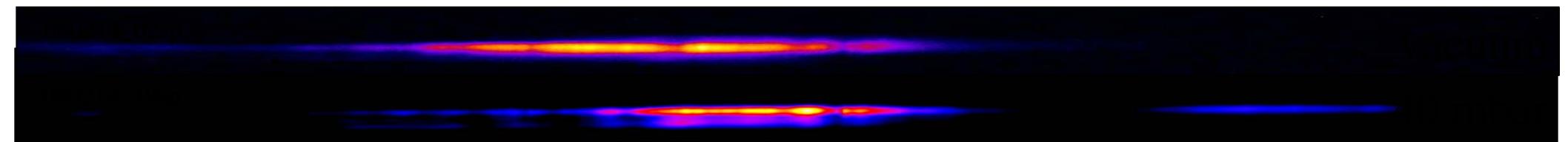
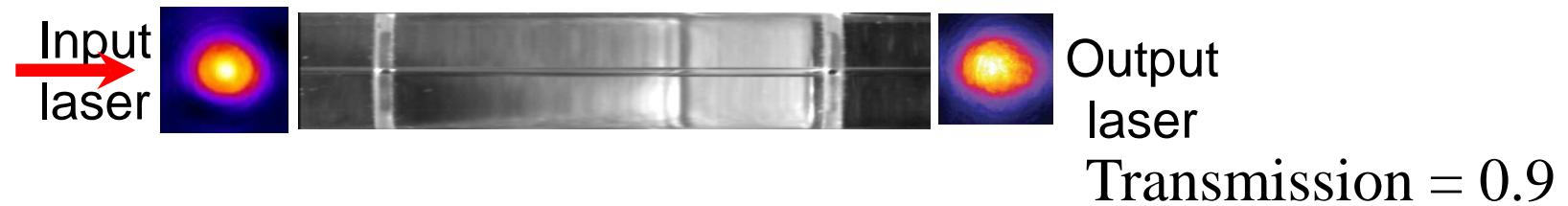
- ✿ Schéma d'injection par ionisation
- ✿ Simulations avec le code "PIC WARP"
- ✿ Experiences dans une cellule de gaz avec l'installation UHI100 (CEA Saclay) et au LLC (Lund)



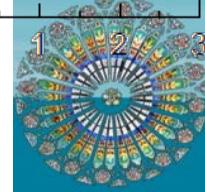
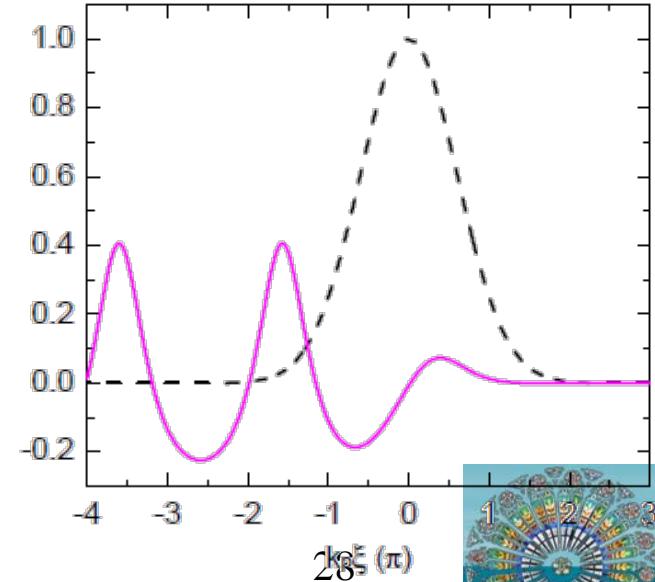
L'excitation d'une onde plasma sur une grande distance mesurée par décalage spectral



Input: $I_{max} = 6.1 \cdot 10^{17} \text{ W/cm}^2$, $R_{cap} = 75 \mu\text{m}$, $L = 71.8 \text{ mm}$,



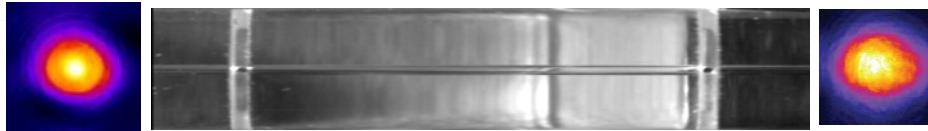
- La variation de densité pendant l'impulsion modifie l'indice optique
- Le spectre transmis est décalé vers le rouge par l'onde de plasma



La comparaison avec les simulations permet de déduire l'amplitude du champ accélérateur

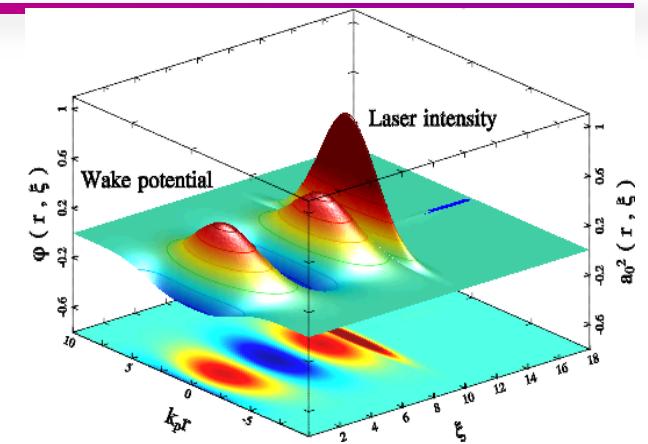
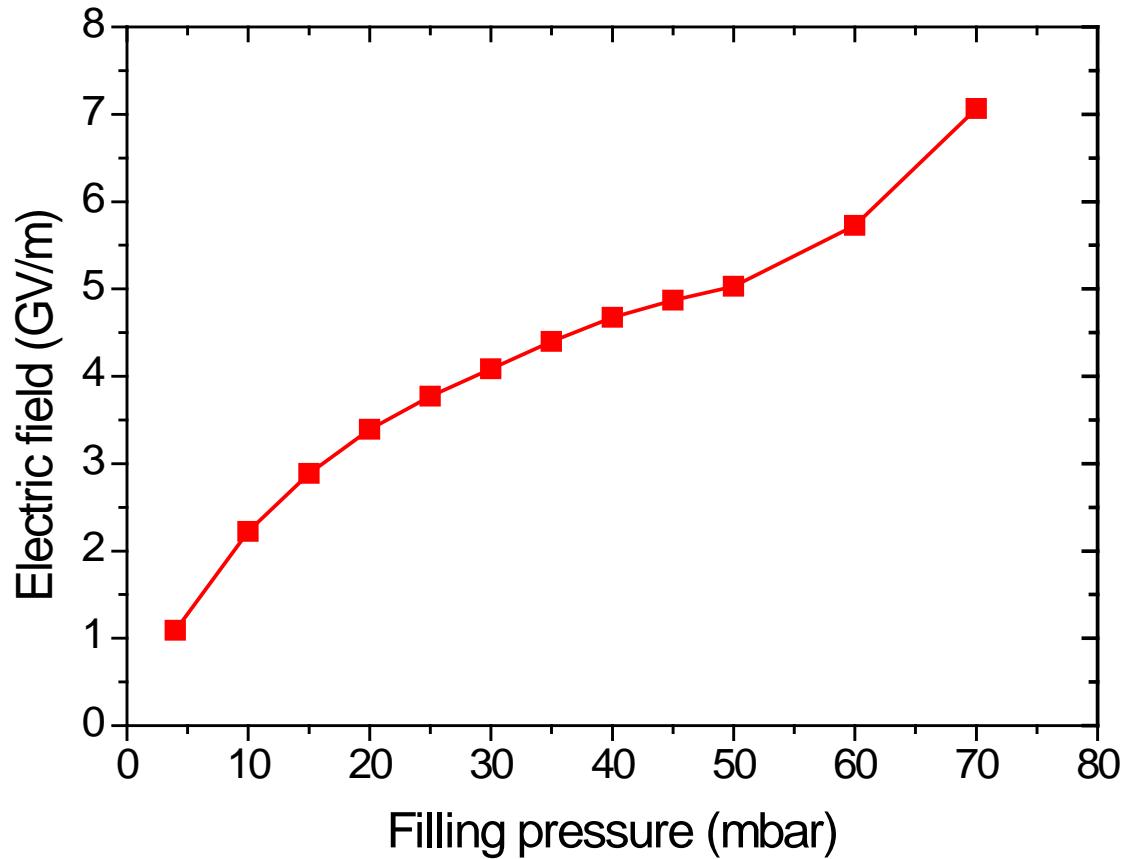


Input
laser



Output
laser

Capillary tube $R_{cap} \sim 50 \mu\text{m}$, $L = 8 \text{ cm}$, filled with hydrogen
Laser intensity $\sim 10^{17} \text{ W/cm}^2 - 4 \text{ TW}$

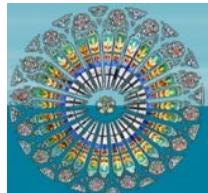


- Champ accélérateur dans la gamme (1-10 GV/m) sur une distance de 8 cm
- Mesure par diagnostic optique en excellent accord avec les simulations

Wojda et al. Phys. Rev. E 80, 066403 (2009)

Andreev et al. New J. Phys. 12 (2010) 045024.

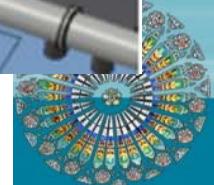
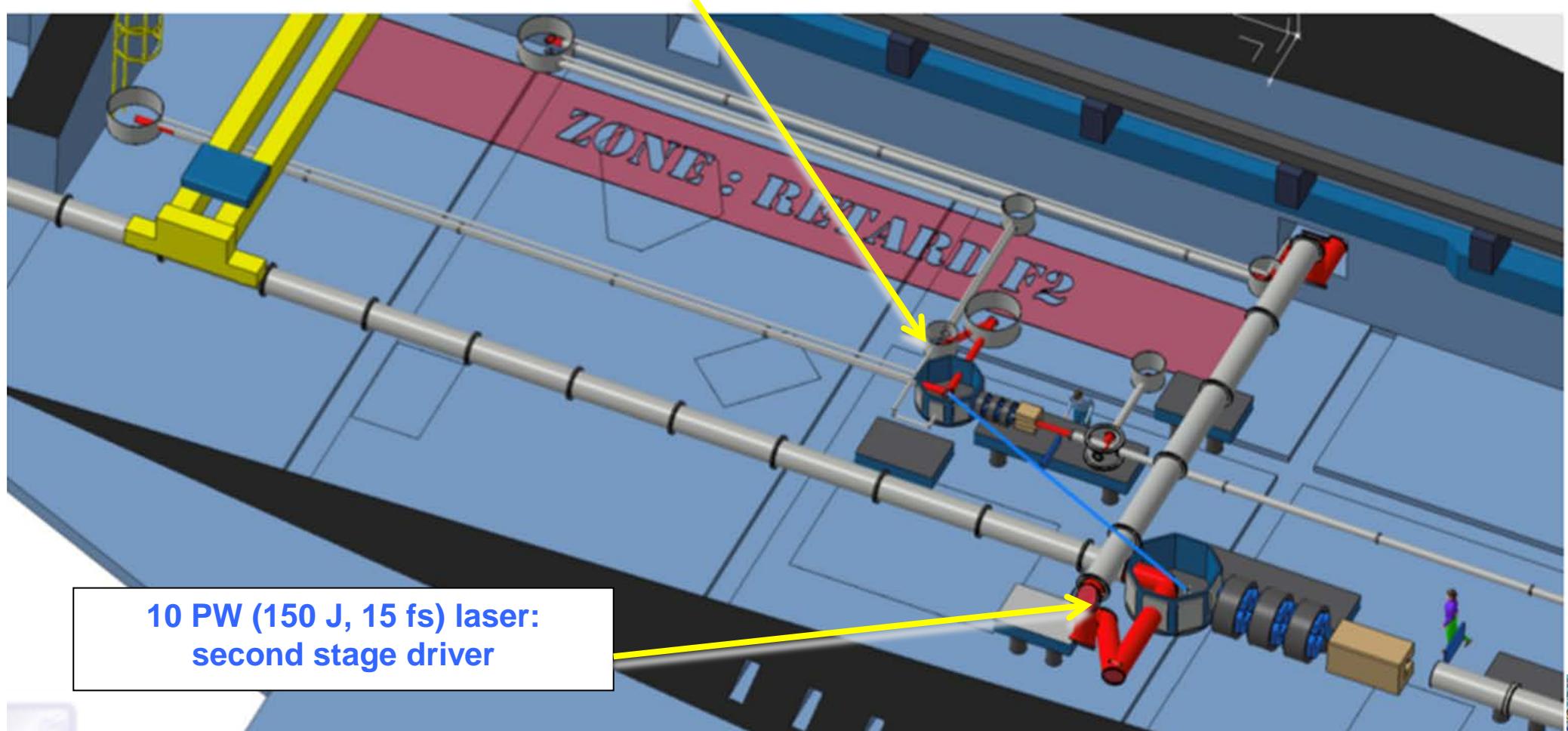
Les différents éléments vont être intégrés pour tester l'ALP à deux étages sur l'installation Apollon



Deux zones expérimentales pour tester l'injection externe sur l'installation Apollon



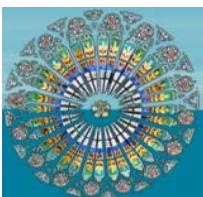
1 PW (15 J, 15 fs) laser:
first stage driver



Conclusion



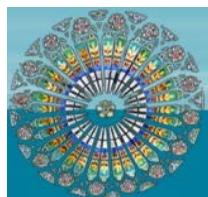
- ▶ L'ALP produit des paquets d'électrons de courte durée jusqu'à des énergies de quelques GeV
- ▶ La montée en énergie passe par des étages multiples, à basse densité plasma
- ▶ L'ALP a un fort potentiel de développement lié à celui des systèmes laser
- ▶ Recherches très actives en France et au niveau international
- ▶ Au niveau Français, un programme ambitieux est en cours de développement sur le Plateau de Saclay



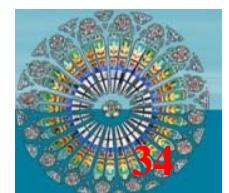
Contributions



- ➡ **CILEX:** A. Specka¹, B. Cros², P. Monot³, T. Audet², A. Beck¹, M. Bougeard³, C. Bruni⁴, A-M. Cauchois¹, A. Chancé⁵, N. Delerue⁴, O. Delferrière⁵, F. Desforges², S. Dobosz Dufrénoy³, M. Grech⁶, J. Ju², P. Lee², A. Maitrallain³, J.R. Marquès⁶, Ph. Martin³, G. Maynard², P. Monot, A. Mosnier⁵, P. Mora⁷, B. S. Paradkar², J. Schwindling⁵, K. Ta Phuoc⁸, T. Vinatier⁴, P. Audebert⁶, F. Amiranoff⁶
- ➡ ¹ LLR, ² LPGP, ³ LIDyL, ⁴ LAL, ⁵ SACM, ⁶ LULI, ⁷CPhT, ⁸ LOA
- ➡ IHED (Russie): N.E. Andreev, M. Veysman
- ➡ LBNL (USA): J-L Vay, R. Lehe
- ➡ LLC (Suède): M. Hansson,, G. Genoud, F Wojda (also Ipgp), M Burza, K Svensson, O Lundh, A Persson, C.G Wahlström



Remerciements



Congrès SFP2015 Strasbourg, B. Cros, 27 août