

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

Brigitte CROS

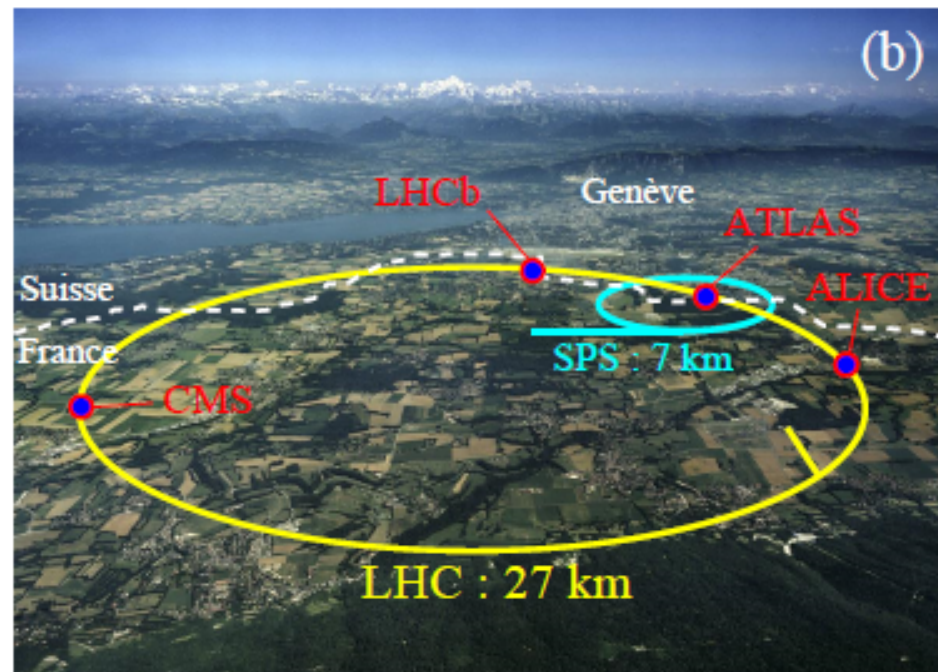
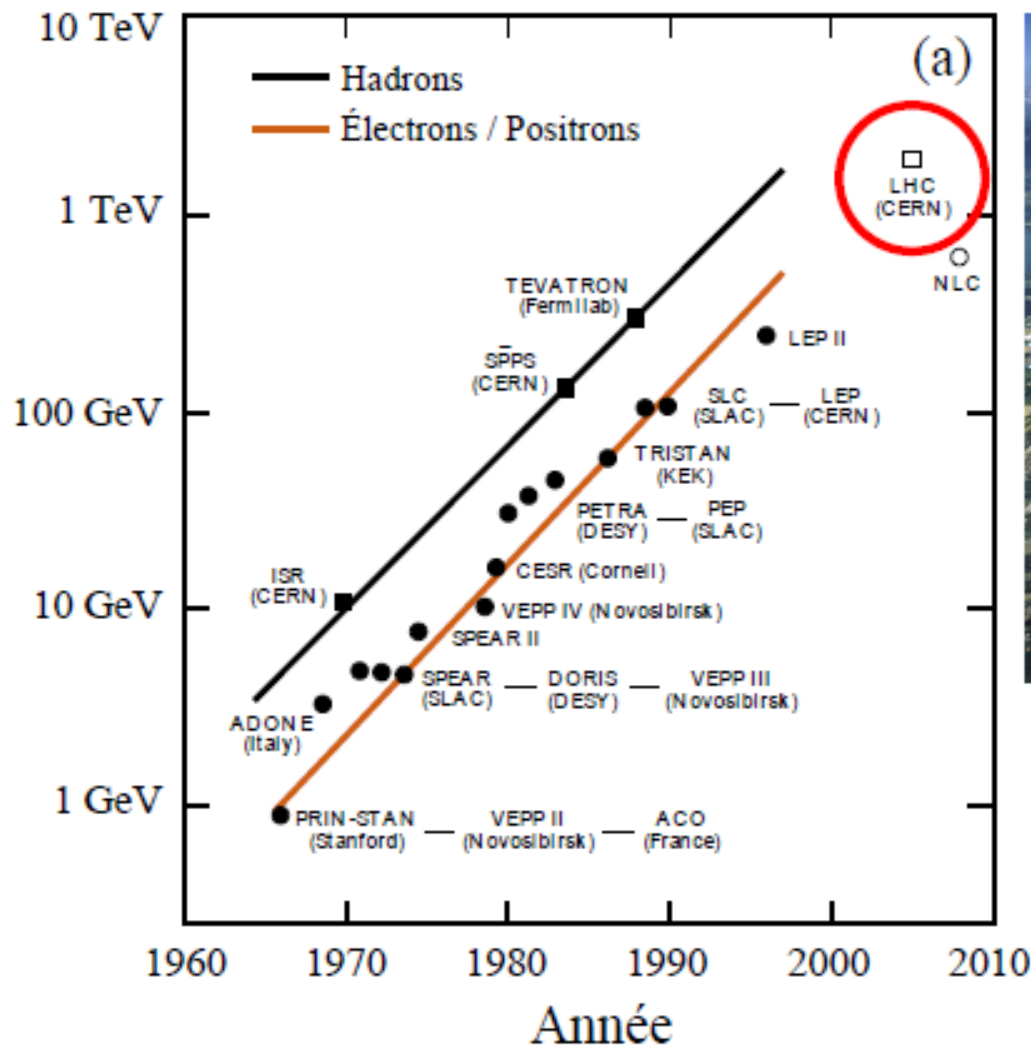
Laboratoire de **Physique** des **Gaz** et des **Plasmas**, UMR 8578
CNRS- Université Paris Sud - Orsay

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



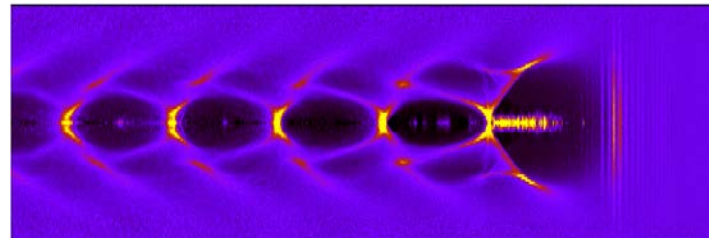
- ➔ L'échelle d'un collisionneur e-e+ au TeV est de l'ordre de 100 km pour un champ maximum $< 50 \text{ MV/m}$ avec la technologie actuelle

Echelles cavités:

$\sim 10 \text{ cm}$



$\sim 10 \mu\text{m}$



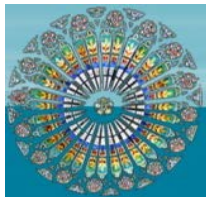
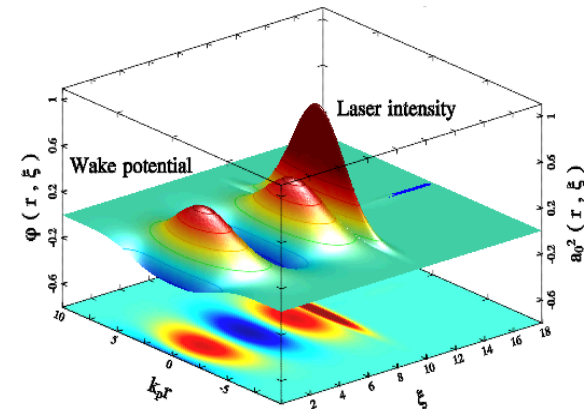
- ➔ L'accélération laser plasma produit des champs accélérateurs dans la gamme 1-100 GV/m:
- ➔ **Les propriétés de l'ALP attirent l'attention d'une large communauté, depuis les premiers électrons au GeV en 2006**



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



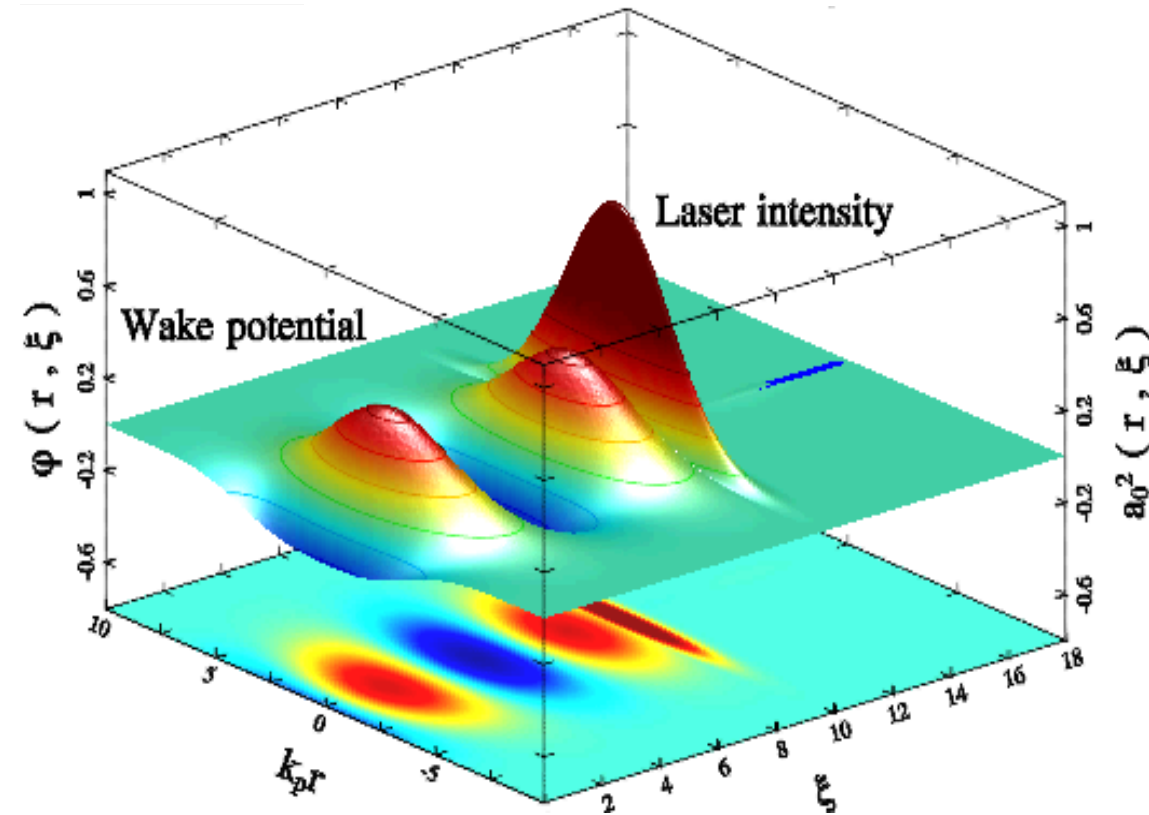
Principe du sillage



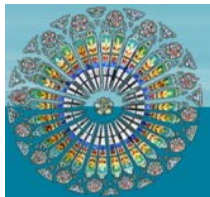
- ➡ Pour l'accélération laser plasma, on focalise un laser intense dans un plasma



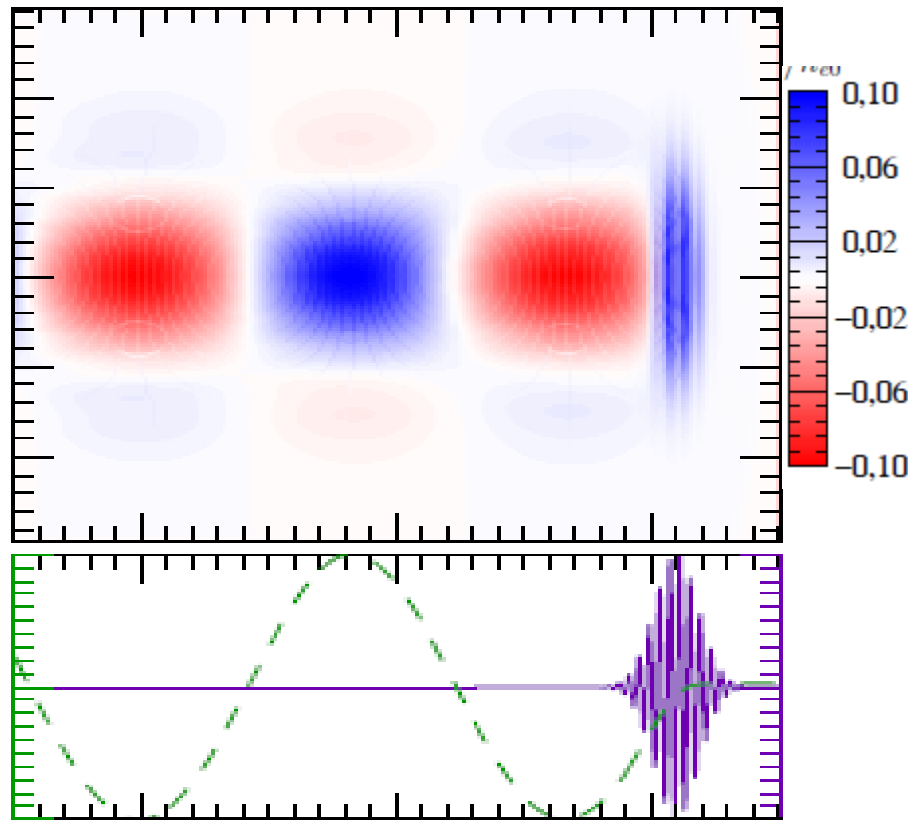
Un champ accélérateur élevé est créé dans le sillage d'un laser intense



- ➡ Force Pondéromotrice \sim gradient d'énergie laser



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

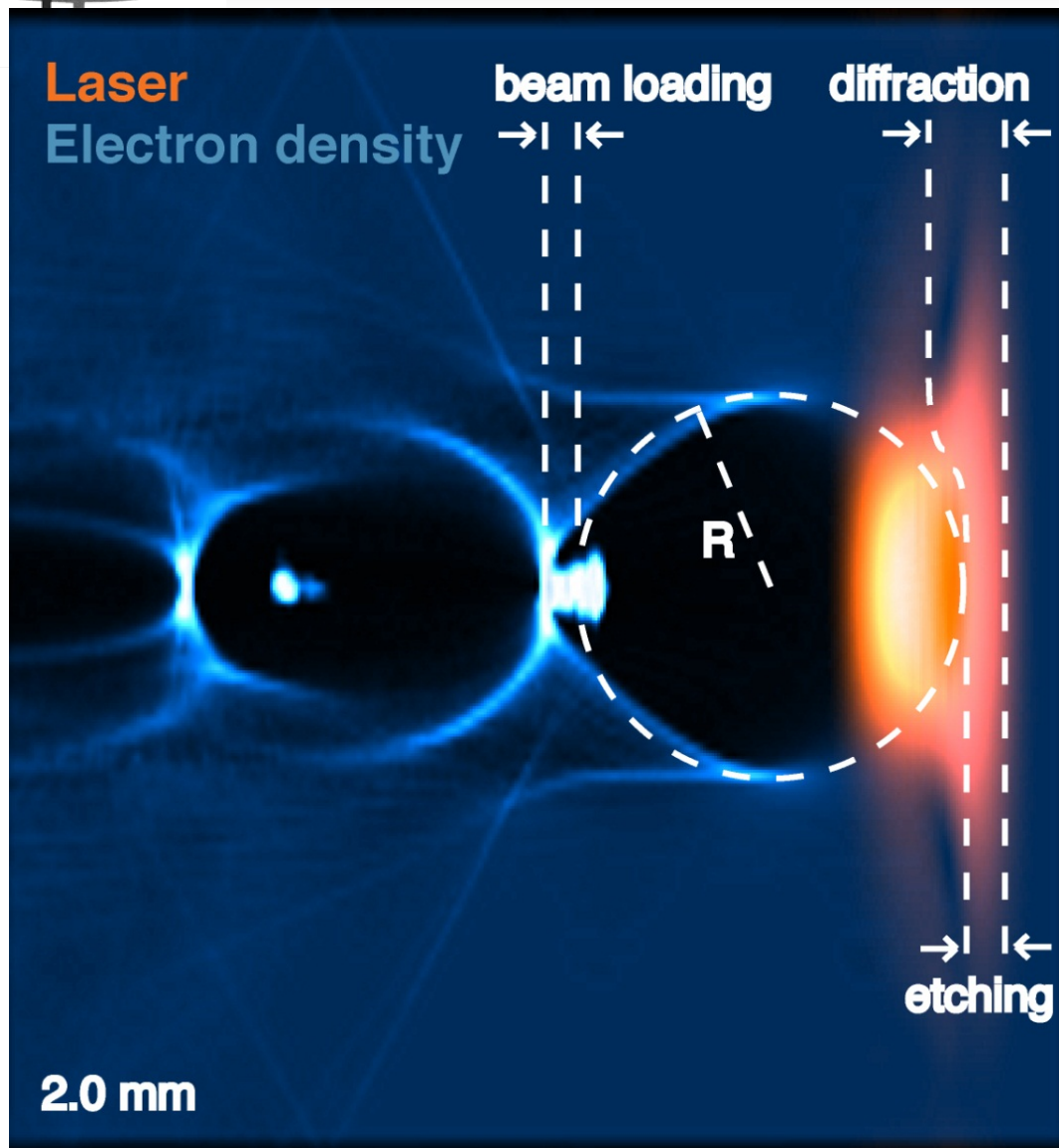


- ➔ Force Pondéromotrice \sim gradient d'énergie laser
- ➔ Structure accélératrice sinus: $\lambda_p \sim 10-100 \mu\text{m}$
- ➔ Champ accélérateur: 1-100 GV/m
- ➔ Champ normalisé $a_0 \sim 1$, régime quasi-linéaire
- ➔ Il faut injecter des électrons produits par une source externe

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

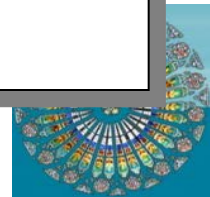


Le régime non linéaire conduit à l'auto-injection d'électrons du plasma



$$a_0 > 2$$

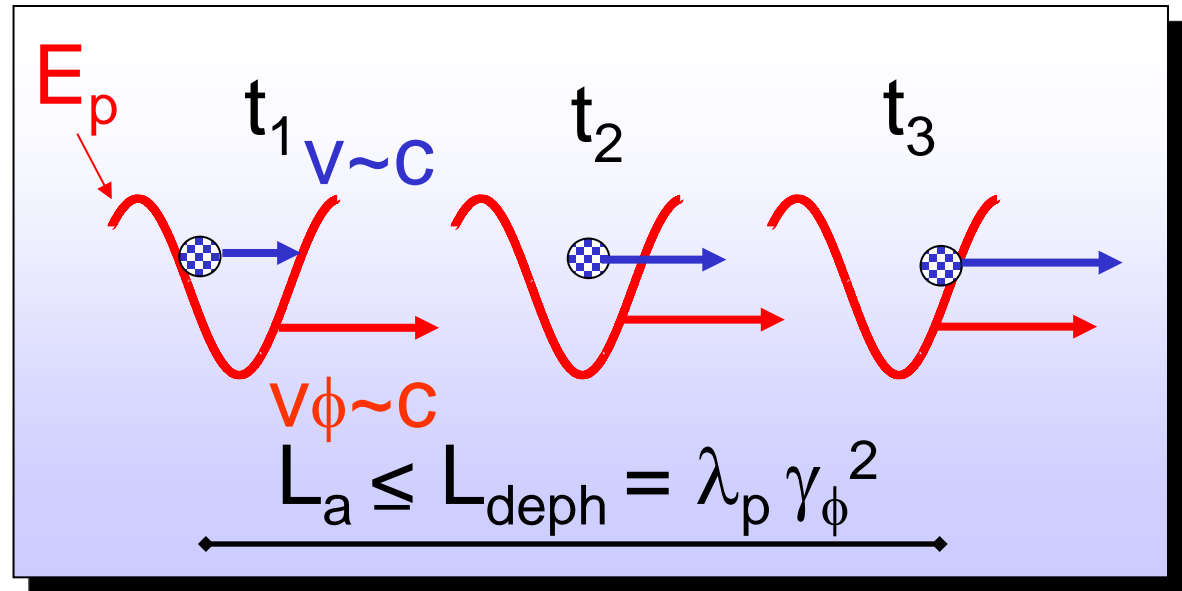
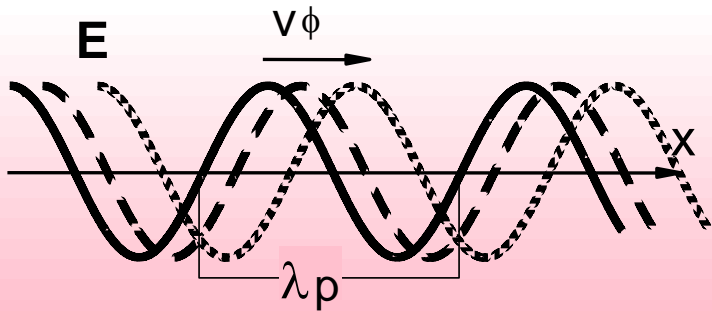
- Compression et auto-focalisation de l'impulsion
- Expulsion des électrons: création d'une bulle (ions)
- Electrons auto-injectés à l'arrière de la bulle par les champs accélérateurs et focalisants
- Electrons injectés modifient l'arrière de la bulle (beam loading)
- Génération de rayonnement bêtatron



Gain d'énergie optimisé sur la longueur de déphasage



- Onde plasma relativiste:
vitesse de phase \sim 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
ΔW_{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

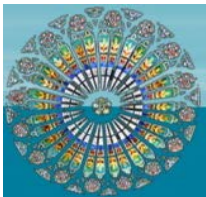
✿ La longueur de déphasage: $L_{\text{deph}} \propto 1/n_e^{3/2}$

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

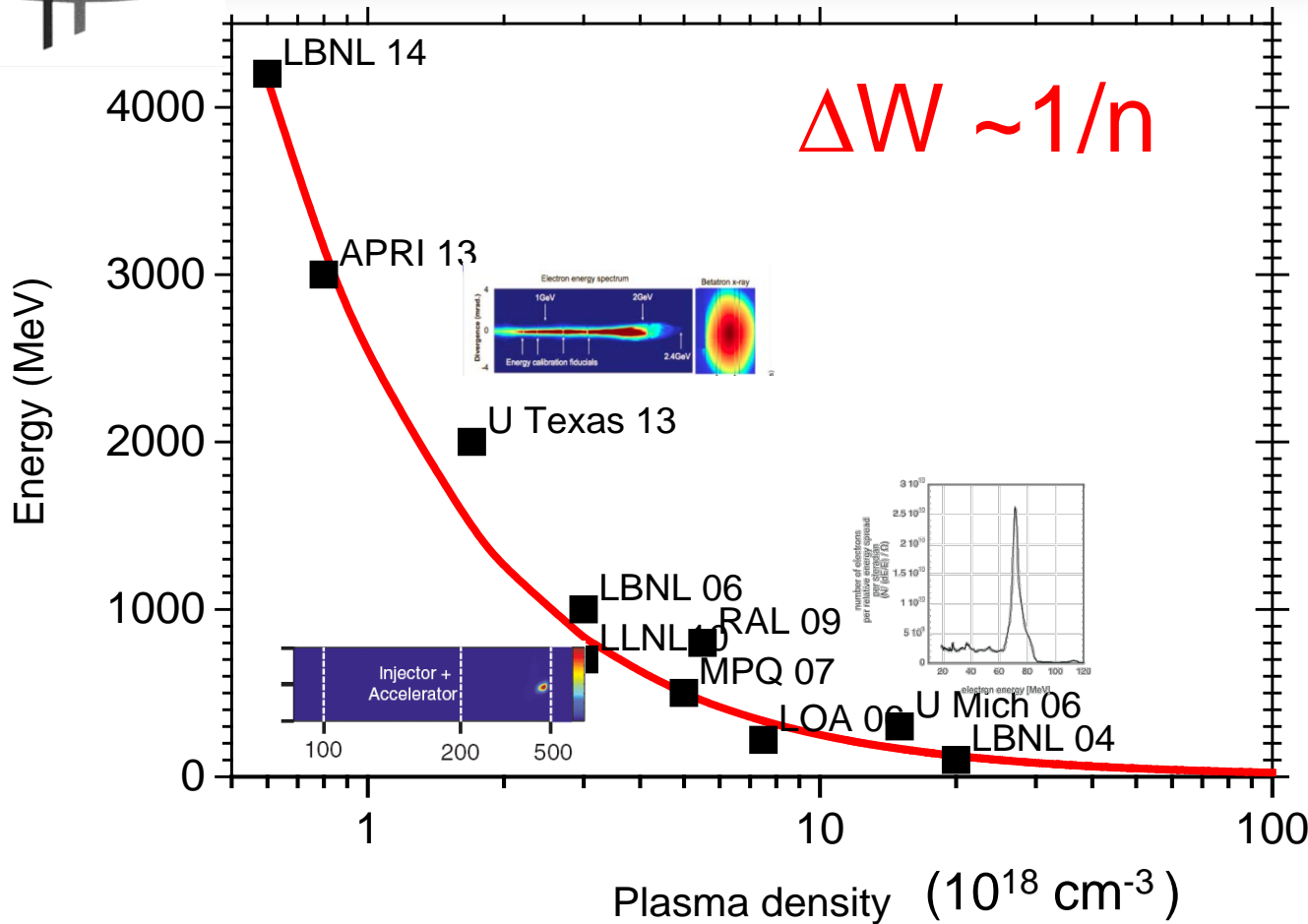
➡ Optimum $L_{\text{deph}} \sim L_{\text{am}}$ et $a_0 \sim 1$, $E_p \propto n_e^{1/2}$

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

➡ **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

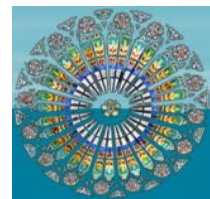


Résultats en régime non linéaire avec auto-injection des électrons du plasma

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



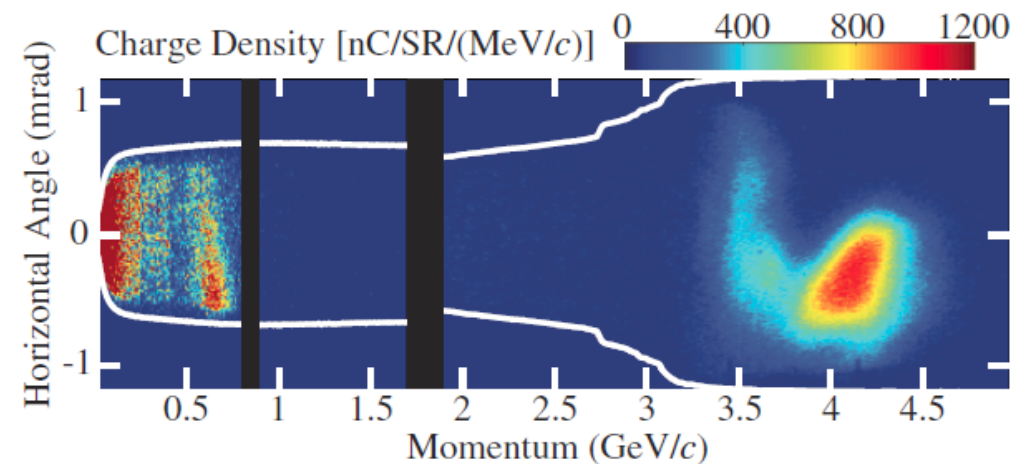
➔ Les accélérateurs laser plasma sont des sources d'électrons et de rayonnement (THz, X, gamma)

✿ Accélérateurs **Compacts**

4.2 GeV, 9 cm, 300 TW laser

✿ Paquets de courte durée (~10 fs)

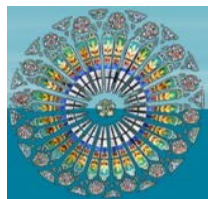
Leemans et al. PRL 2014



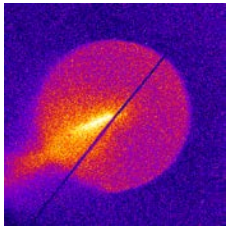
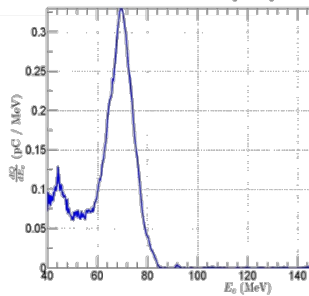
➔ Gradients accélérateurs élevés ~100 GV/m démontrés

➔ 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



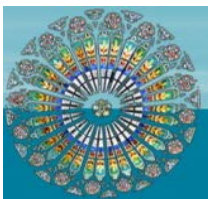
➔ **Objectifs:** contrôler les propriétés des faisceaux accélérés et augmenter leur énergie

- ✿ 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**

- ✿ Fiabiliser 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

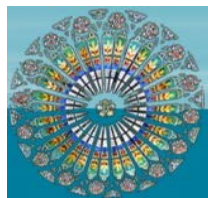
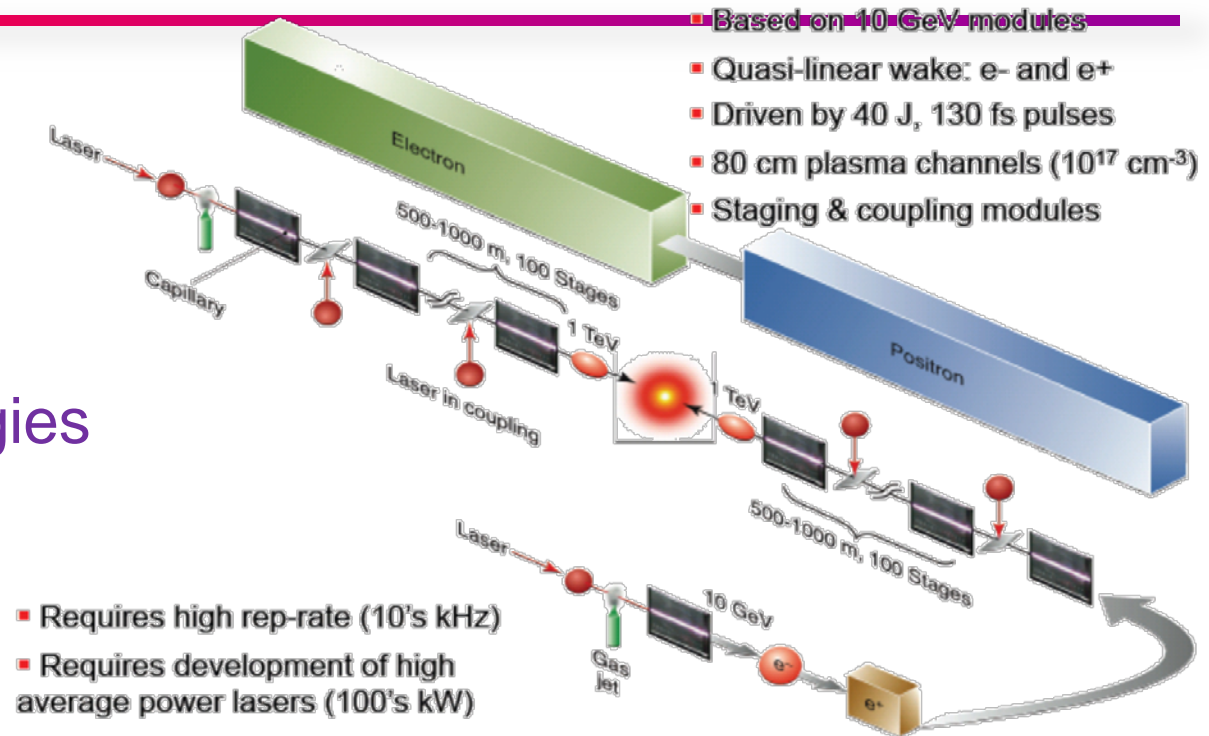


➔ Accélérateurs pour la physique des hautes énergies

- ✿ Etages ~10 GeV

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

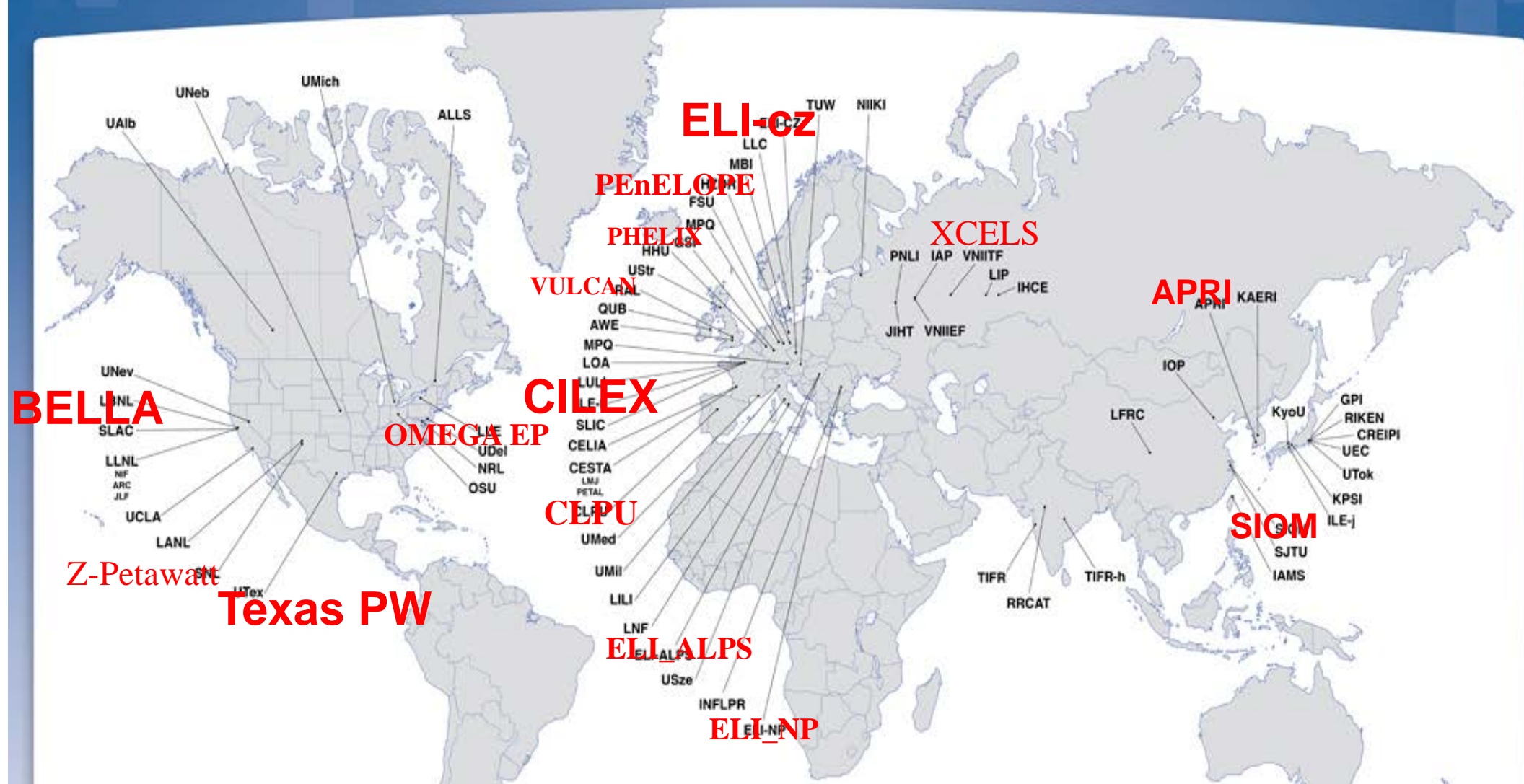
- ✿ Faisceau pour LEL de courte longueur d'onde
- ✿ Production de positrons
- ✿ Interaction Particules-photons, génération de rayonnement multi-MeV (gamma rays)



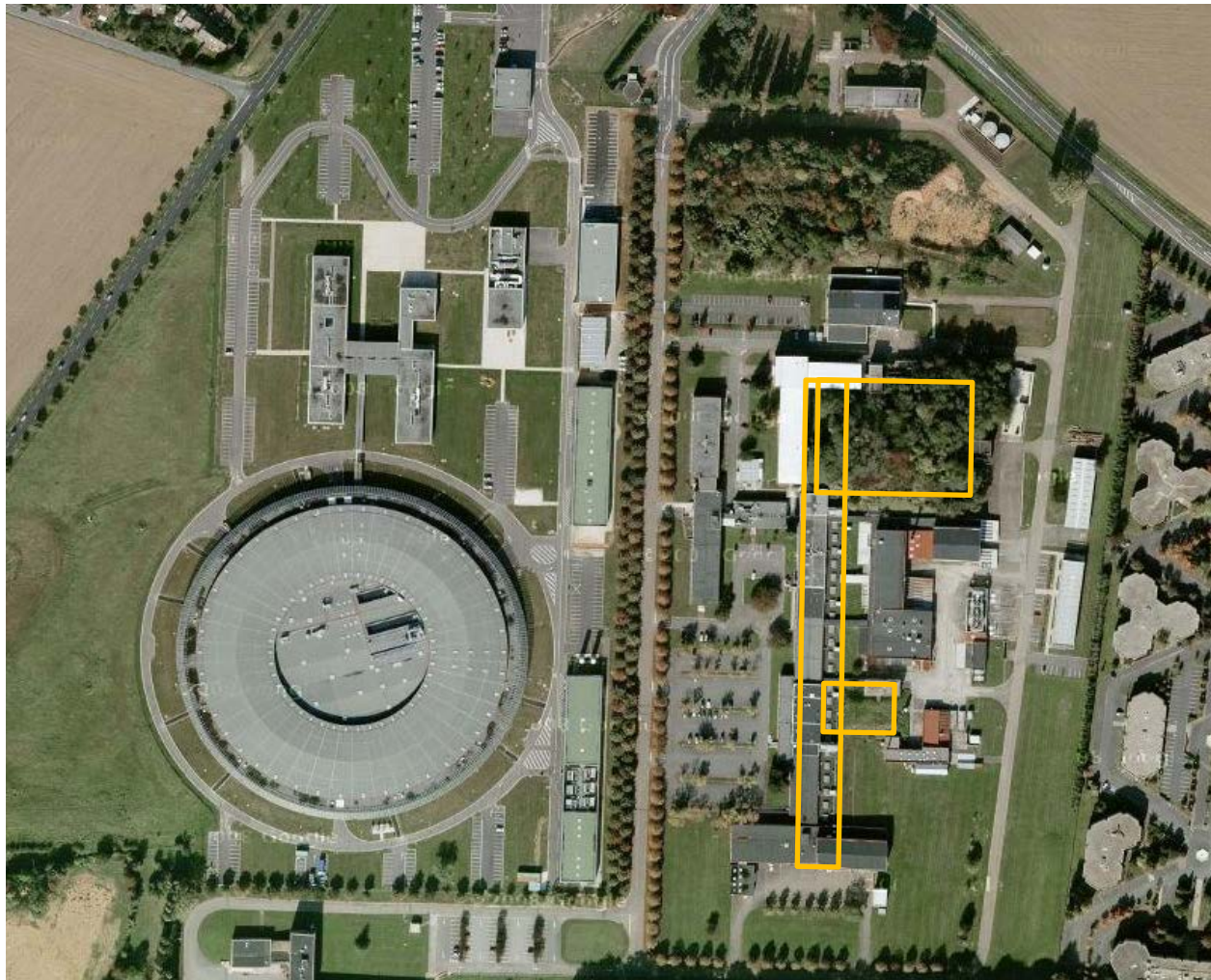
Plusieurs installations laser PW en développement au niveau mondial



ICUIL World Map of Ultrahigh Intensity Laser Capabilities



Centre Interdisciplinaire Lumière Extrême



Laser Multi-PW
APOLLON 10PW

Installation multi-faisceaux
1 PW + probe + ns

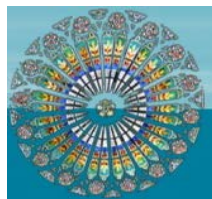
Zones expérimentales dédiées

Installations satellites
UHI100, LASERIX

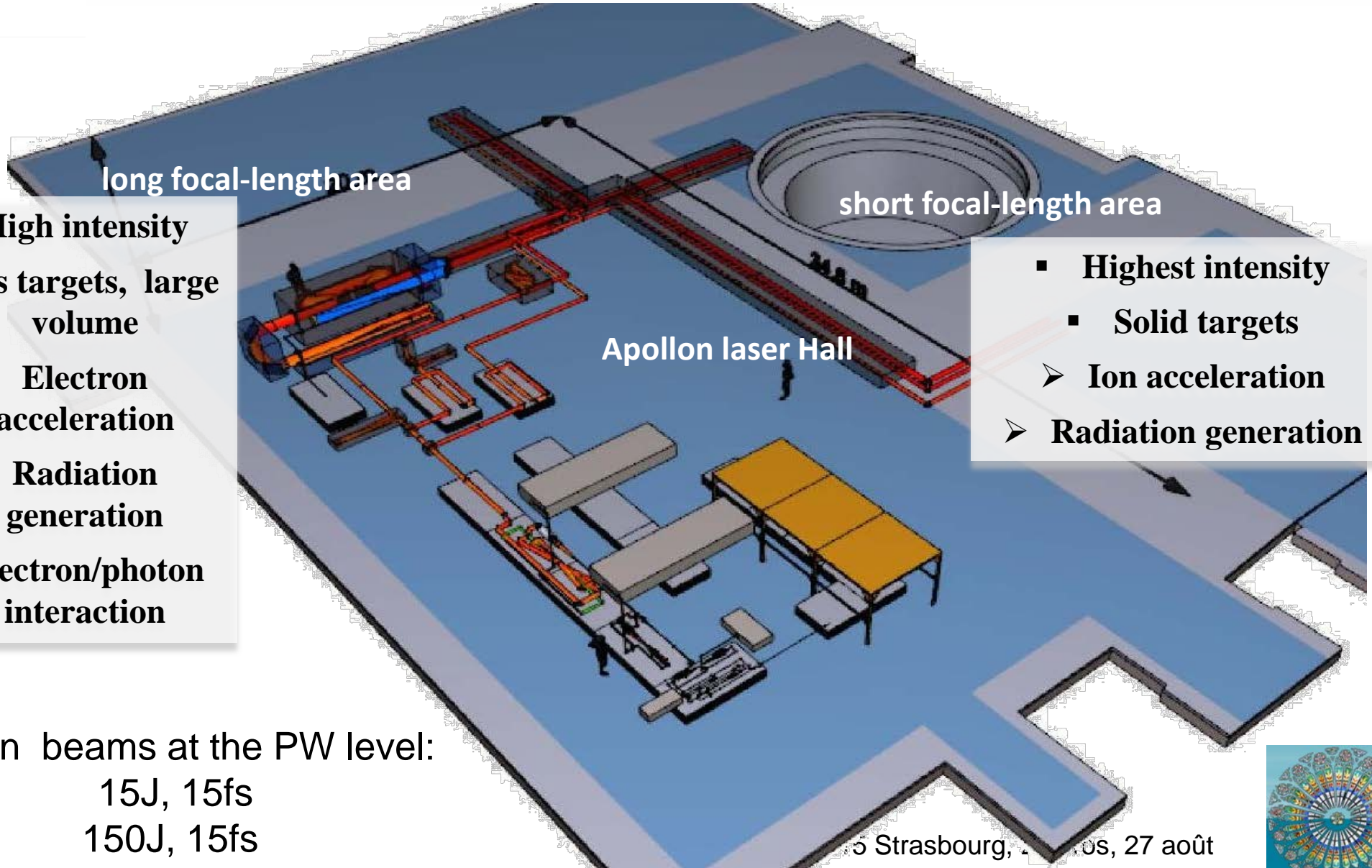
Programme multi-disciplinaire

Formation de scientifiques et
d'ingénieurs

Accueil des utilisateurs



Vue d'ensemble de l'installation laser Apollon



long focal-length area

short focal-length area

Apollon laser Hall

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

- Highest intensity
- Solid targets
 - Ion acceleration
 - Radiation generation

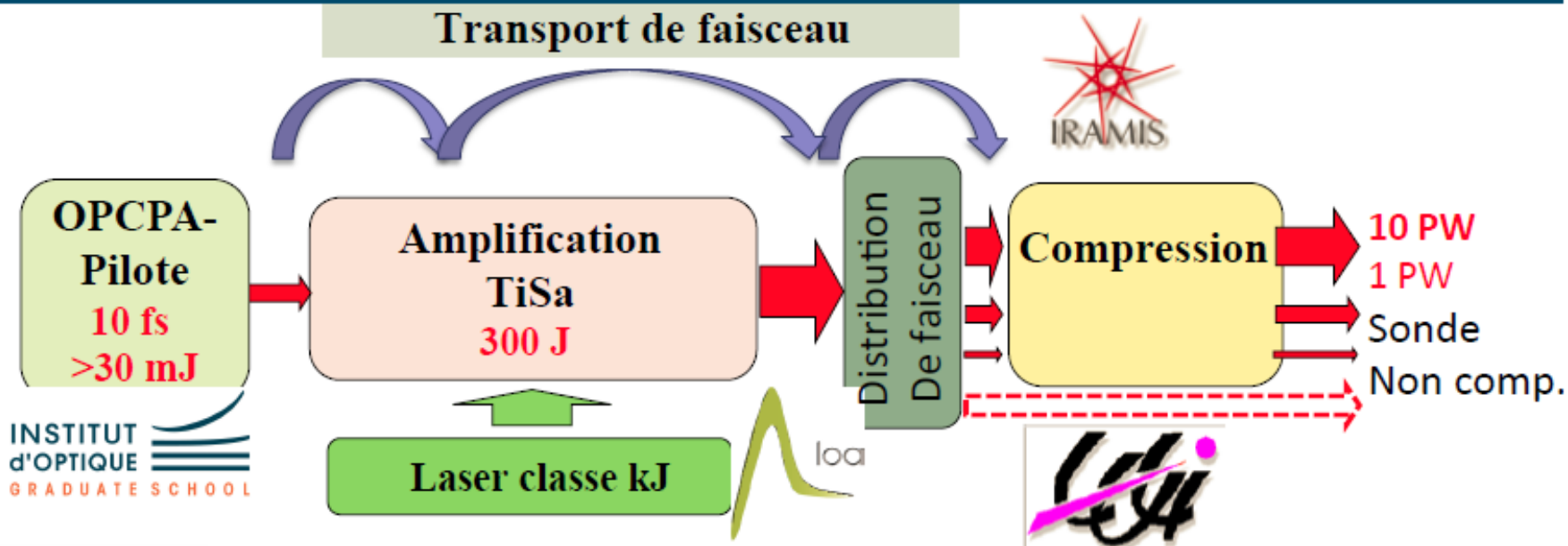
2 main beams at the PW level:
15J, 15fs
150J, 15fs



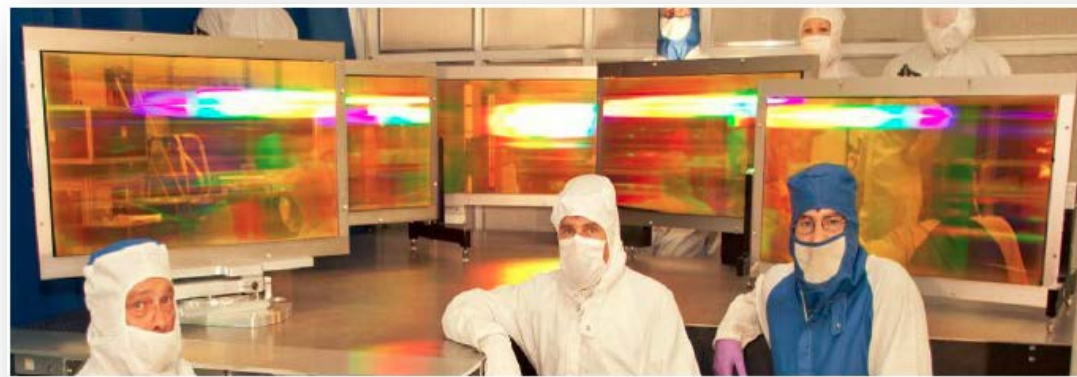
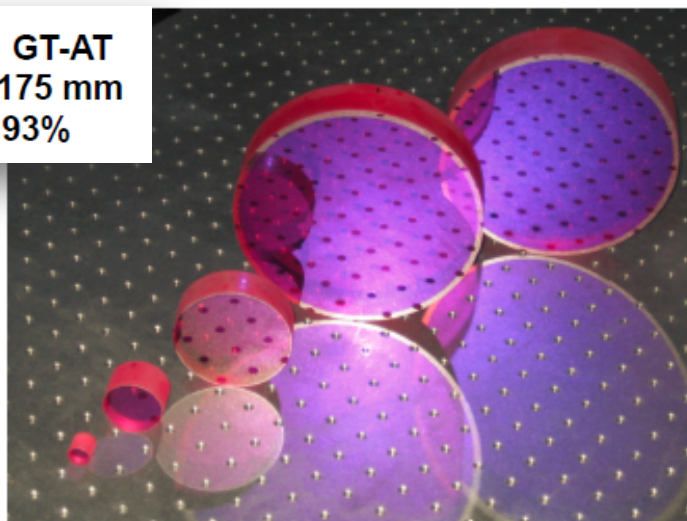
Une installation laser de pointe, construite par un consortium de recherche



Apollon 10 PW



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



Objectifs de l'ALP dans le cadre de CILEX

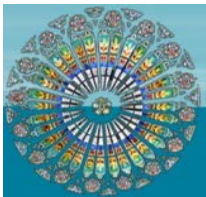


➤ Développer un ALP à deux étages

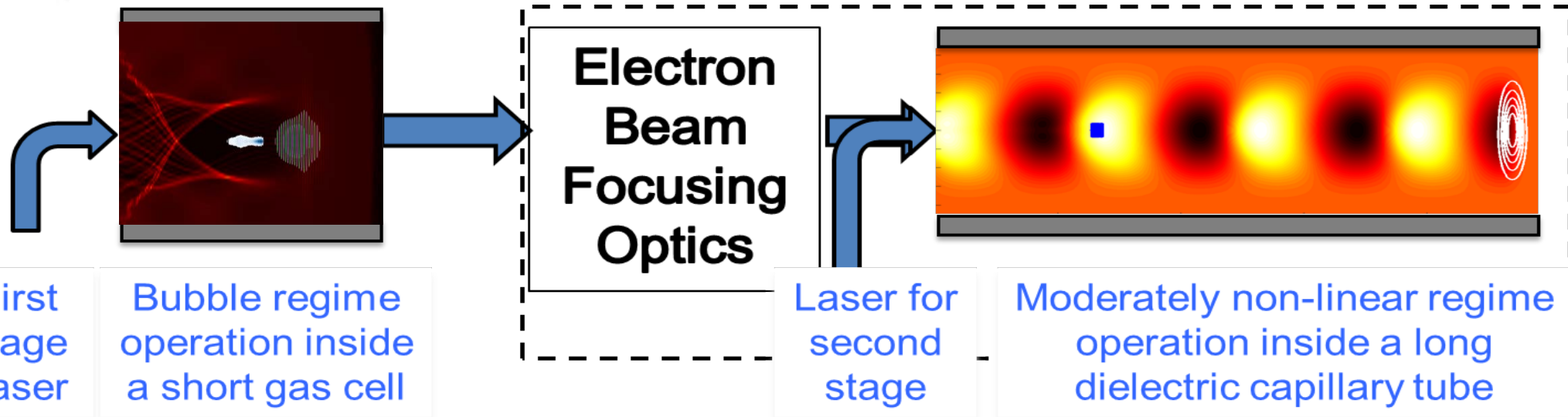
Installation de test pour l'accélération d'électrons et prototype pour les études à venir sur l'accélération laser plasma multi-étages (MUST_LPA)

➤ Etude des processus fondamentaux

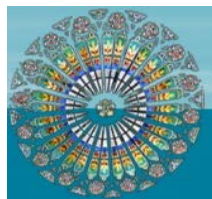
- Validité des lois d'échelle pour l'accélération à ultra-haute intensité laser
- Production et accélération de positrons
- Génération de rayonnement (betatron, injection dans un onduleur, diffusion Compton et Thomson)



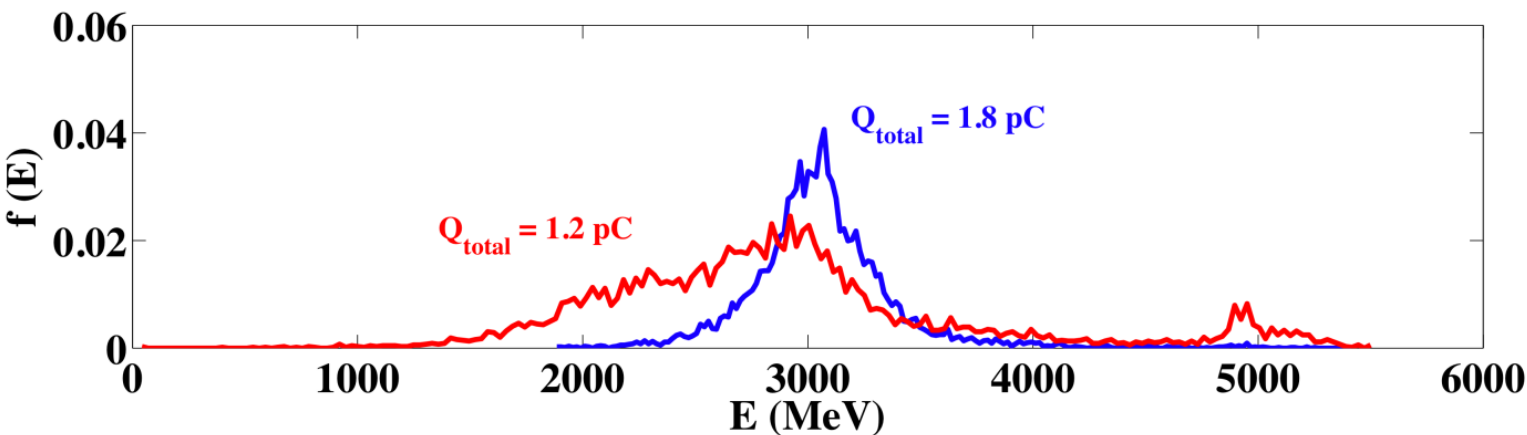
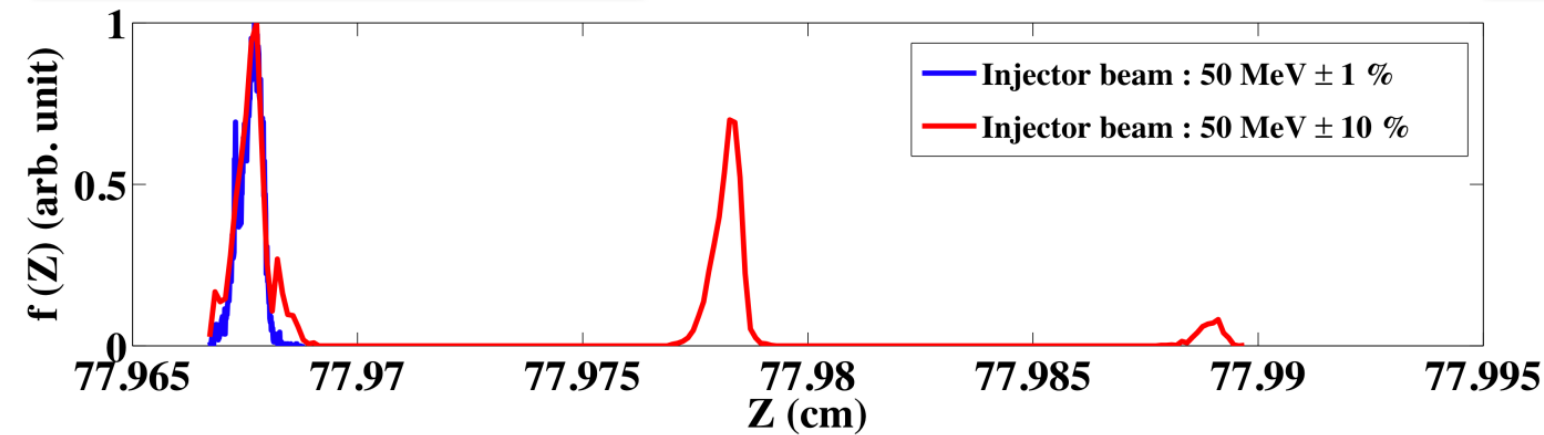
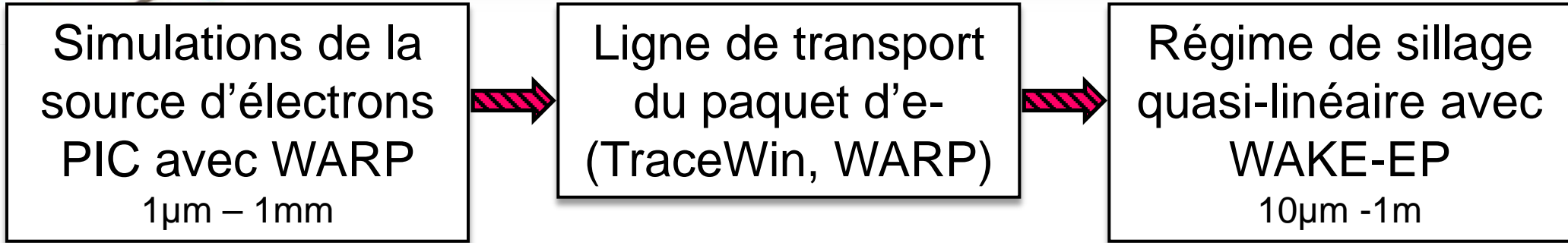
Une installation pour tester le couplage entre 2 étages laser plasma



- ➡ 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



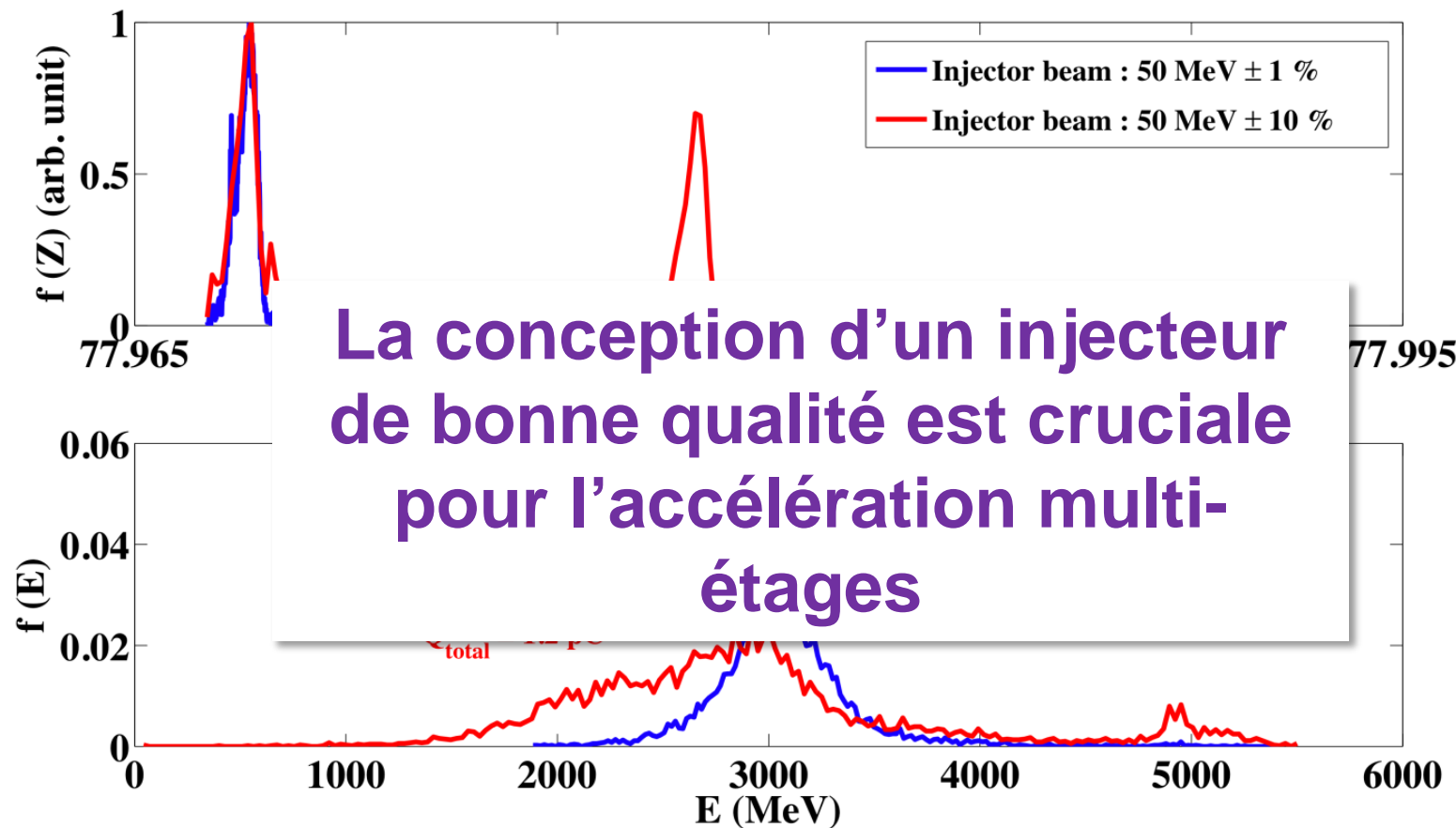
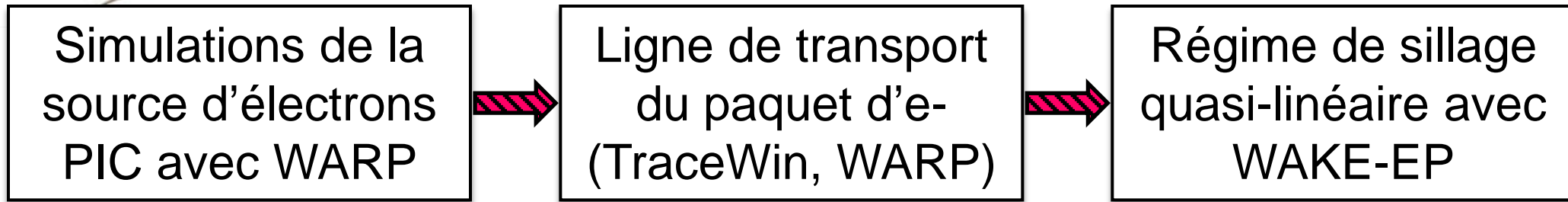
Laser :
 $a_0 = 1.42$
 $T(\text{FWHM}) = 40$ fs,
 $W_0 = 100$ μ m

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

Ligne transport= 1 m



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



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

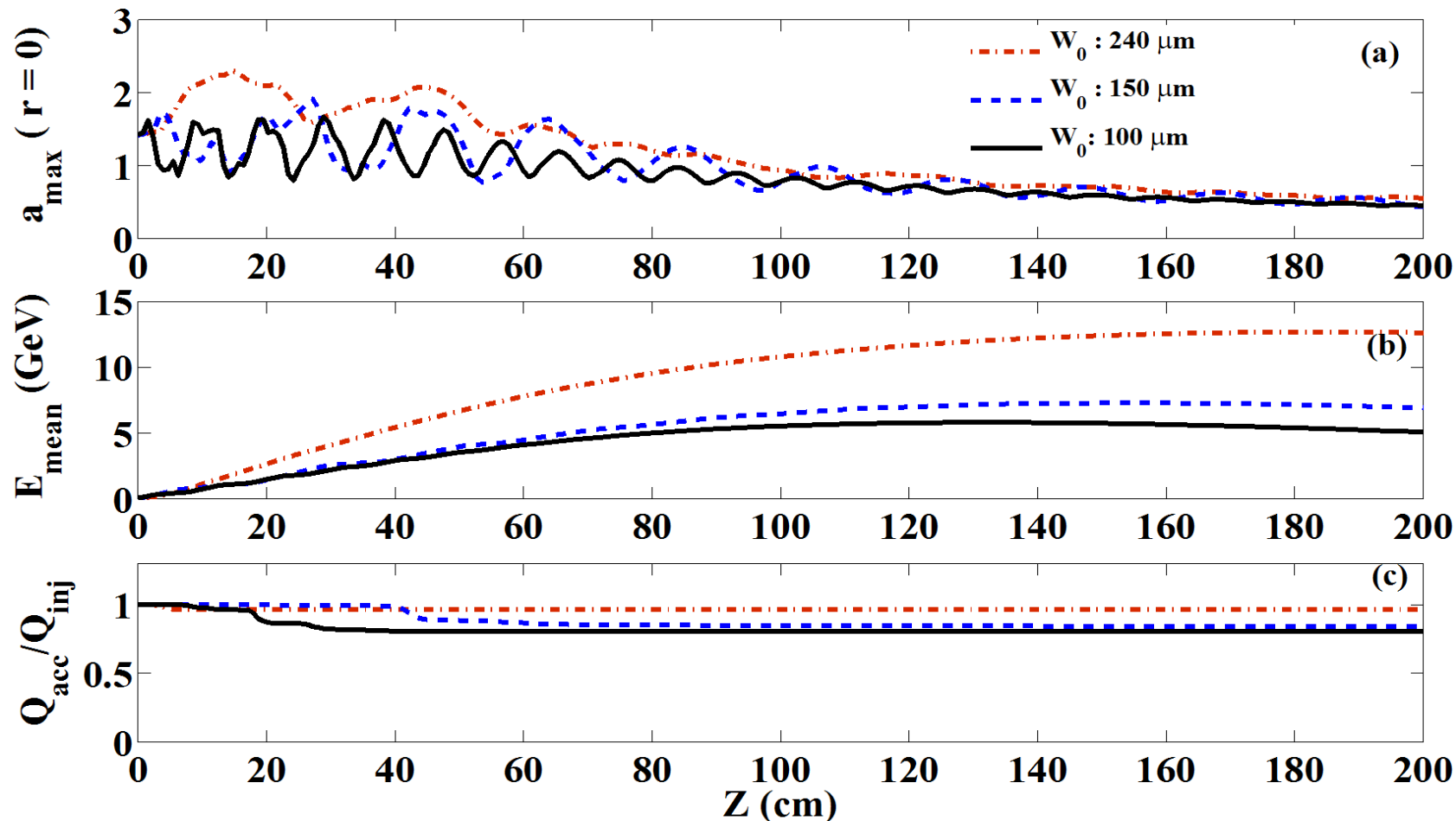
Densité plasma
 $= 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

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)



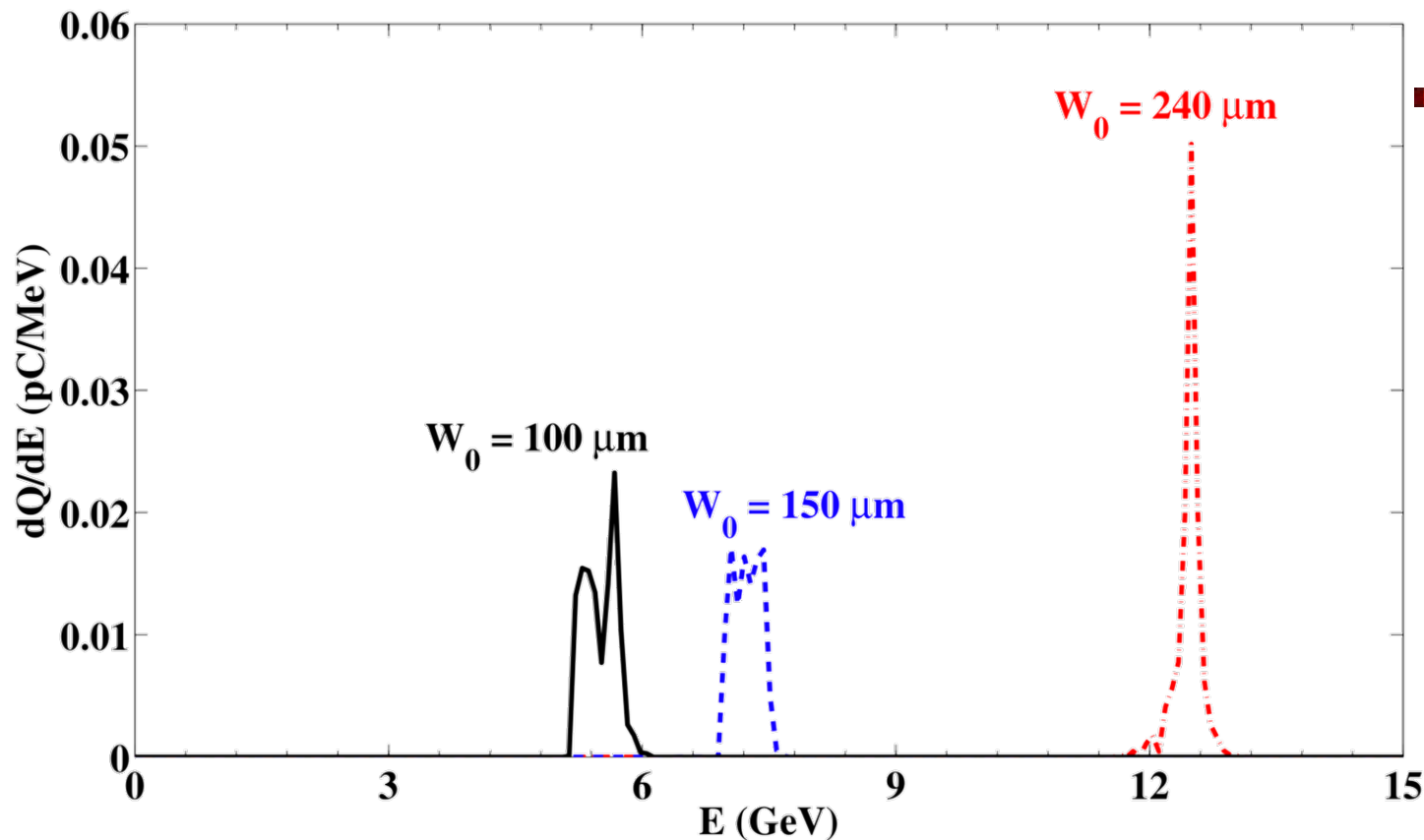
Influence de la
taille
transverse du
faisceau laser



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



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

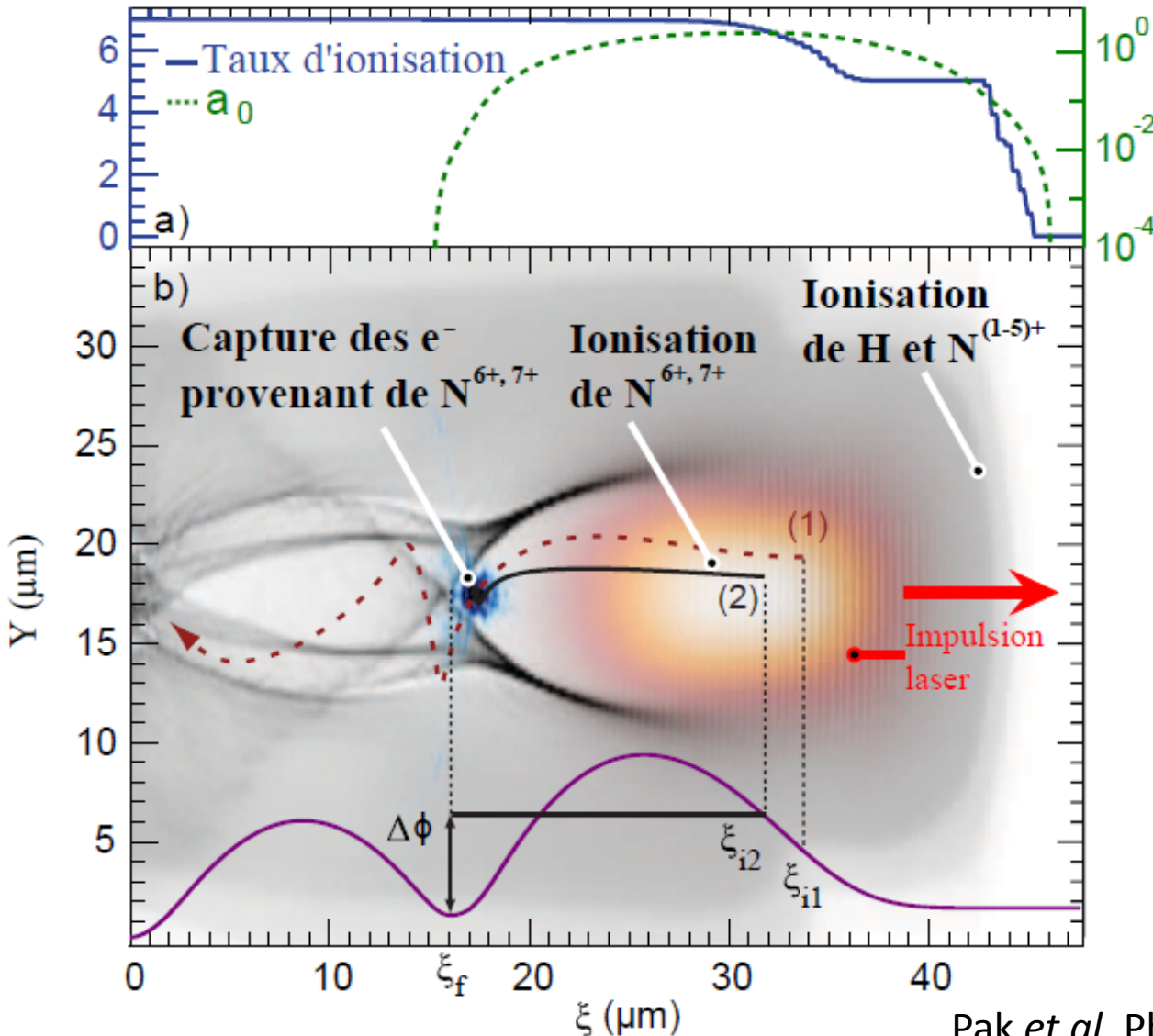


► Faisceau avec une dispersion en énergie $< 5\%$ obtenu après 1.5 m d'accélération

$a_0=1.4$; 40 fs
(30J, 65J, 165J)

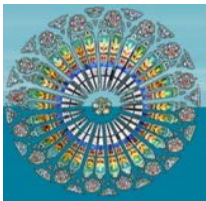


L'injection induite par ionisation permet d'augmenter la charge accélérée



➤ 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

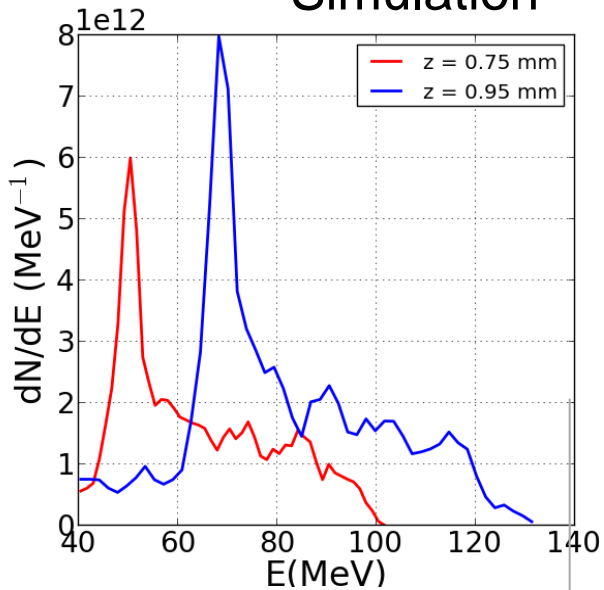
- Seuil d'injection abaissé par rapport à l'auto-injection
- Moment transverse réduit
- Charge accélérée plus élevée
- Pas de modification du sillage



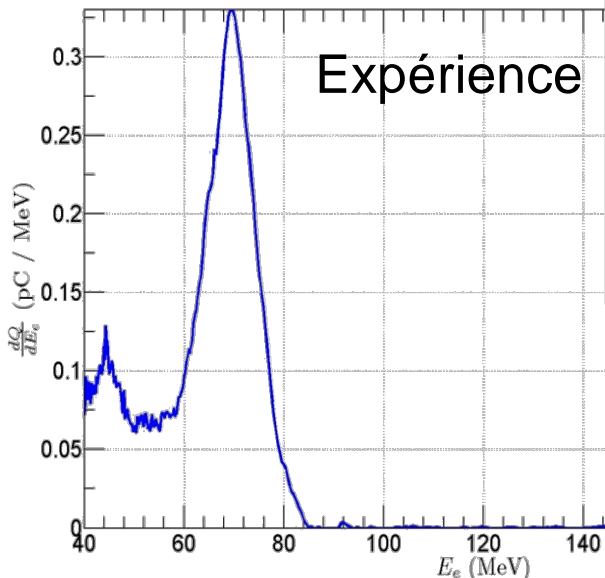
Des résultats prometteurs obtenus sur l'installation UHI100



Simulation

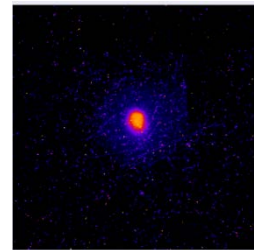
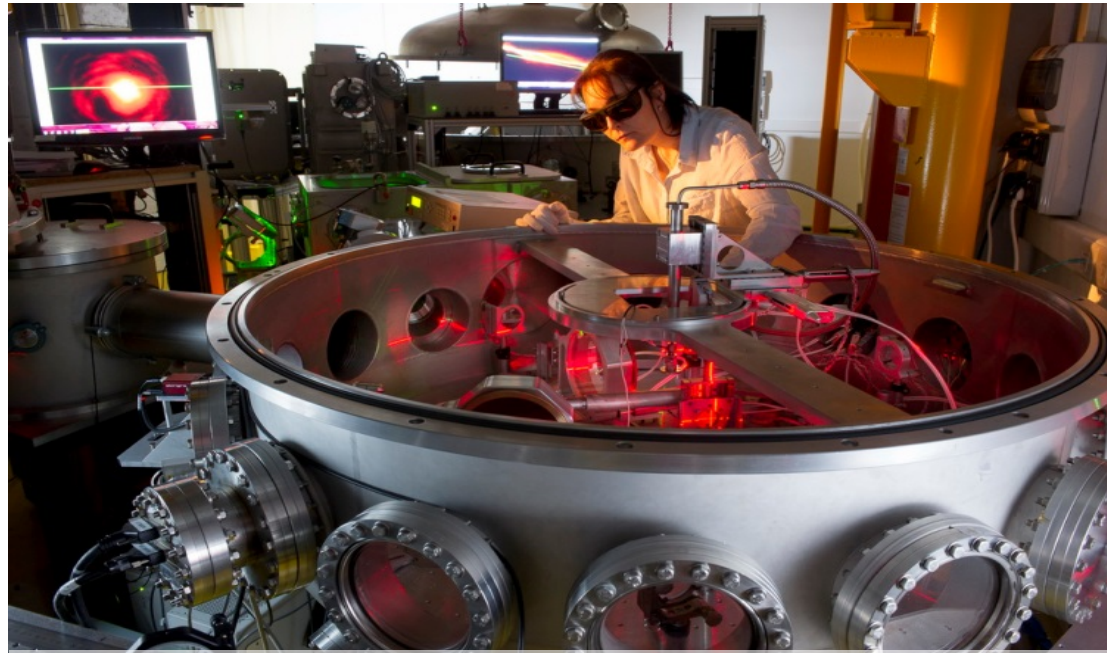


Expérience



Etude de la source d'électrons

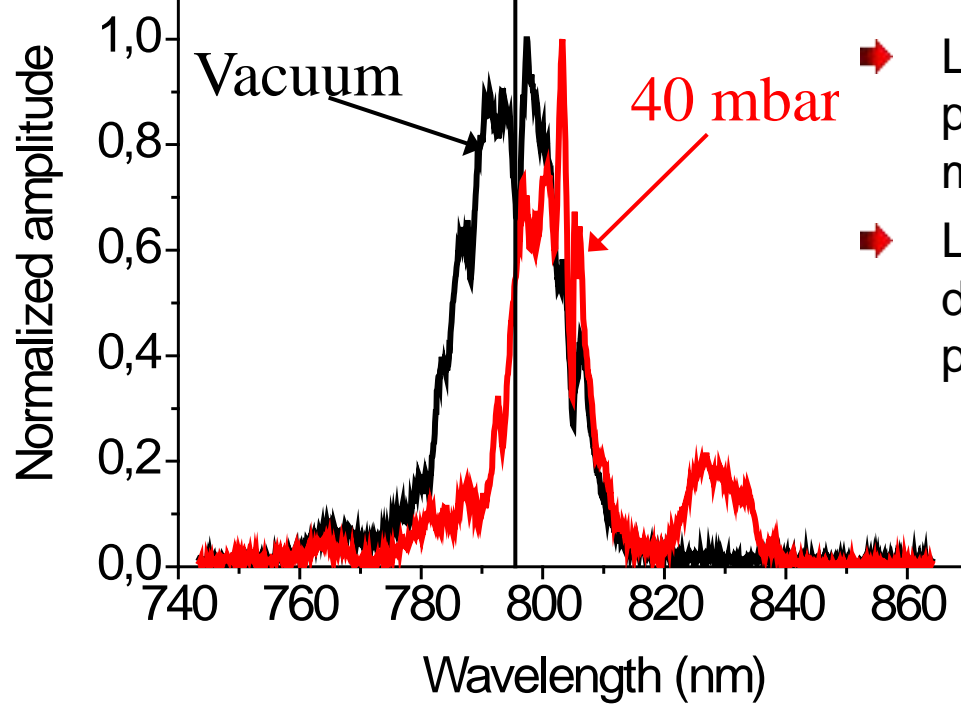
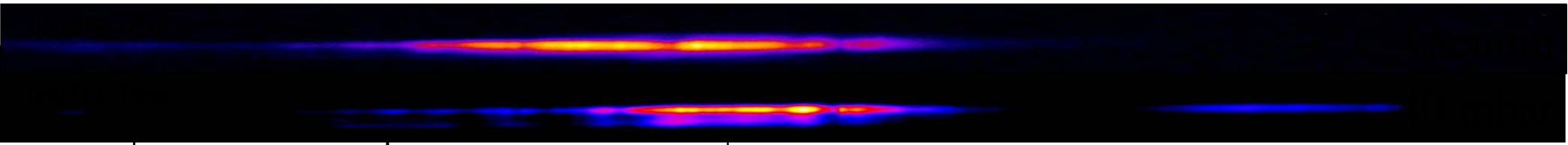
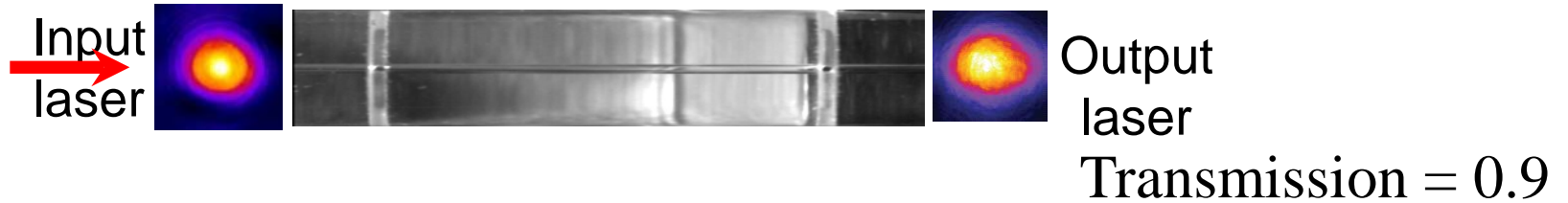
- Schéma d'injection par ionisation
- Simulations avec le code "PIC WARP"
- Expériences dans une cellule de gaz avec l'installation UHI100 (CEA Saclay) et au LLC (Lund)



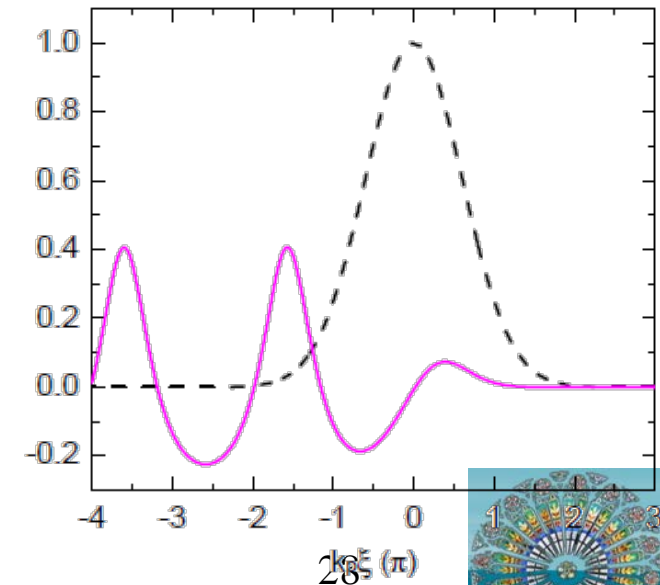
L'excitation d'une onde plasma sur une grande distance mesurée par décalage spectral



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



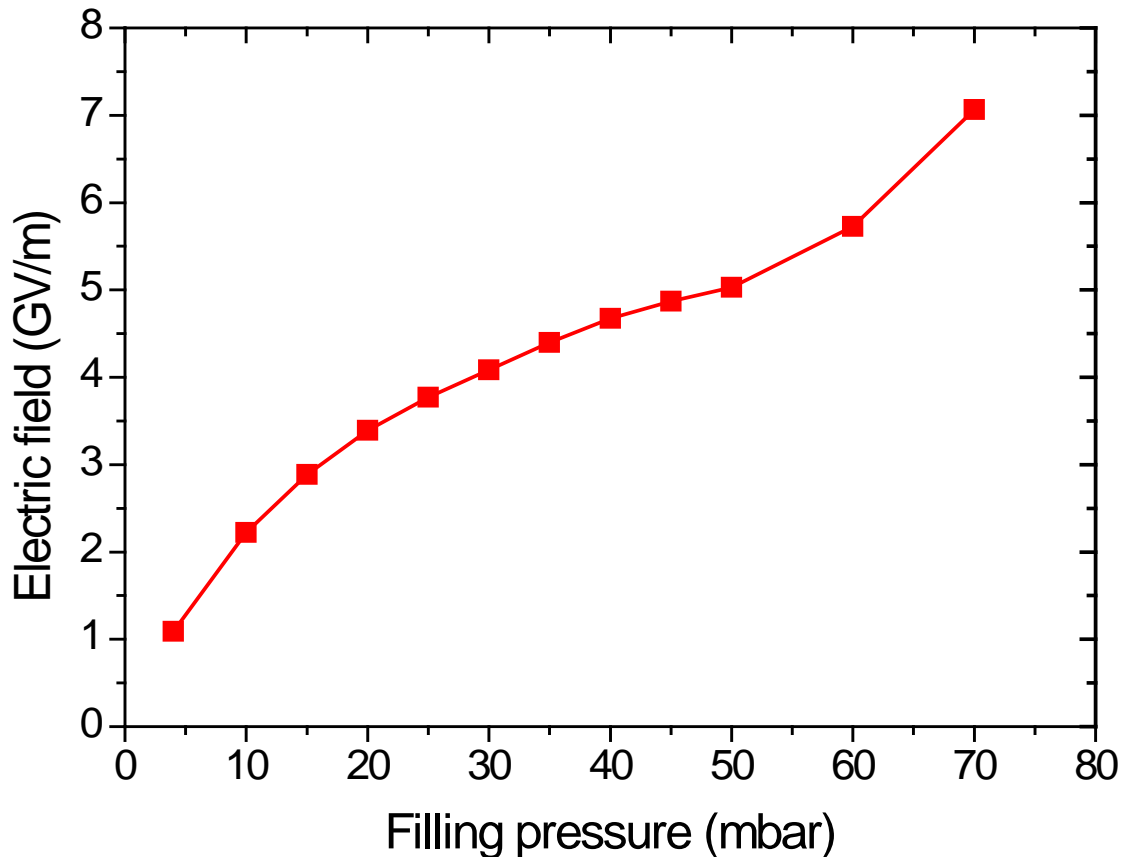
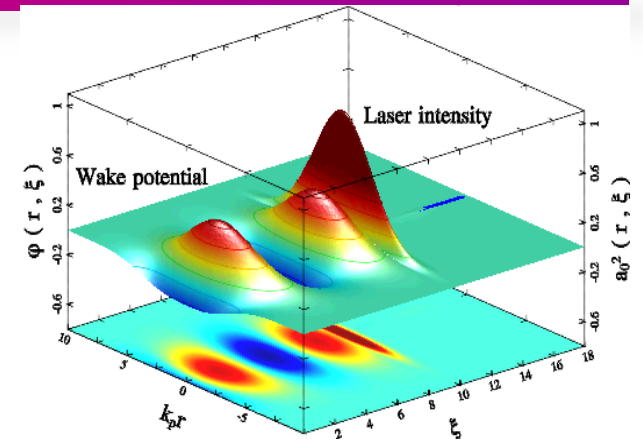
- ➔ La variation de densité pendant l'impulsion modifie l'indice optique
- ➔ Le spectre transmis est décalé vers le rouge par l'onde de plasma



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



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

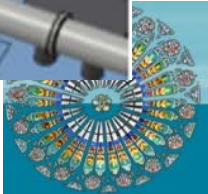
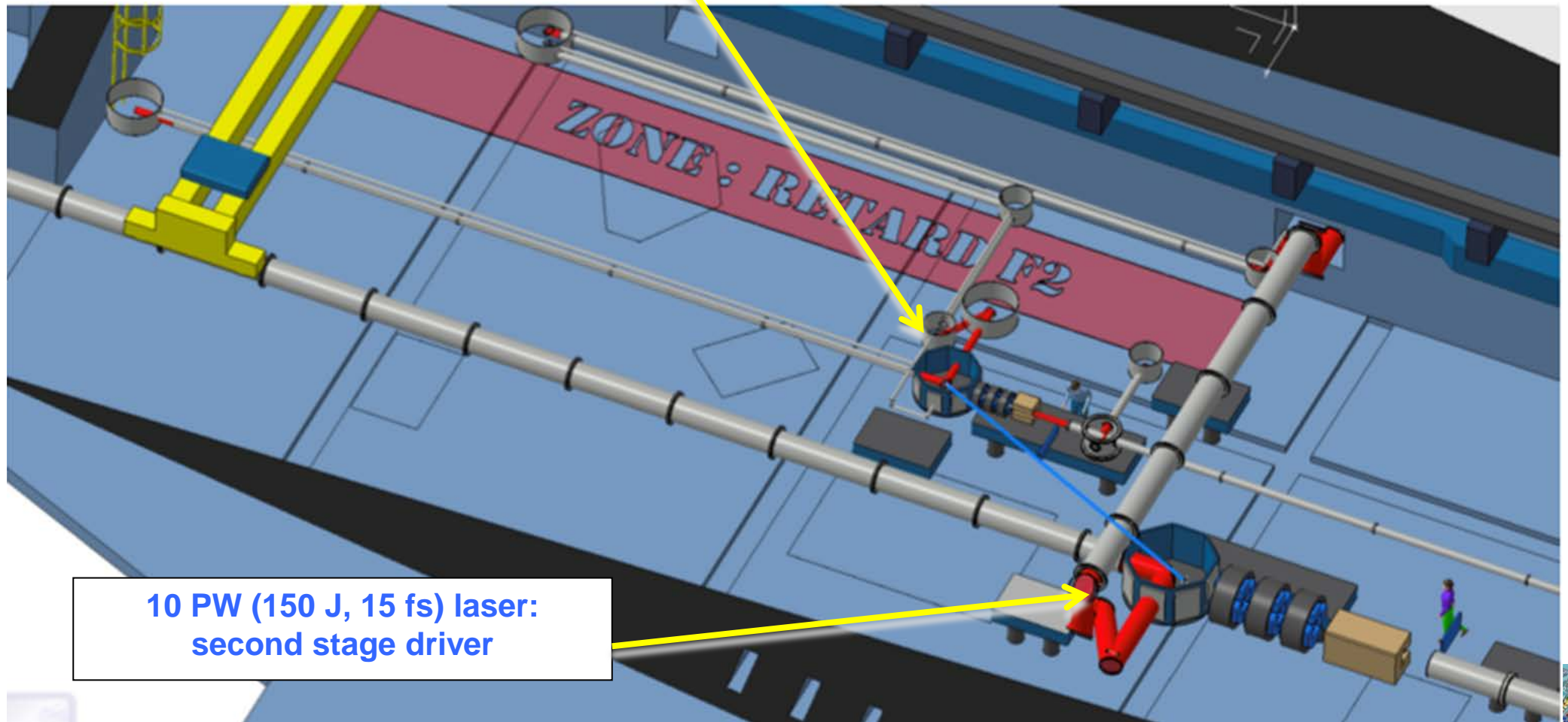


Deux zones expérimentales pour tester l'injection externe sur l'installation Apollon



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

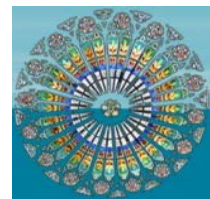
10 PW (150 J, 15 fs) laser:
second stage driver



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 Dufrenoy³, 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, ⁷ CPhT, 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

