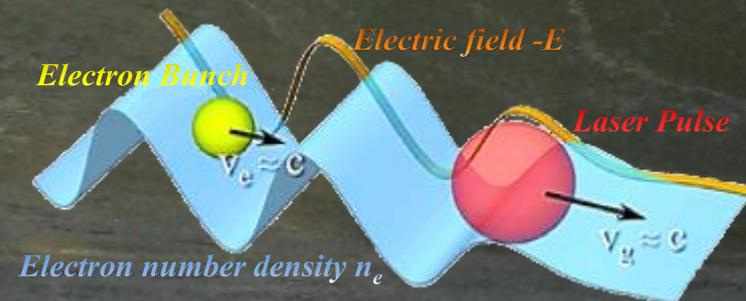
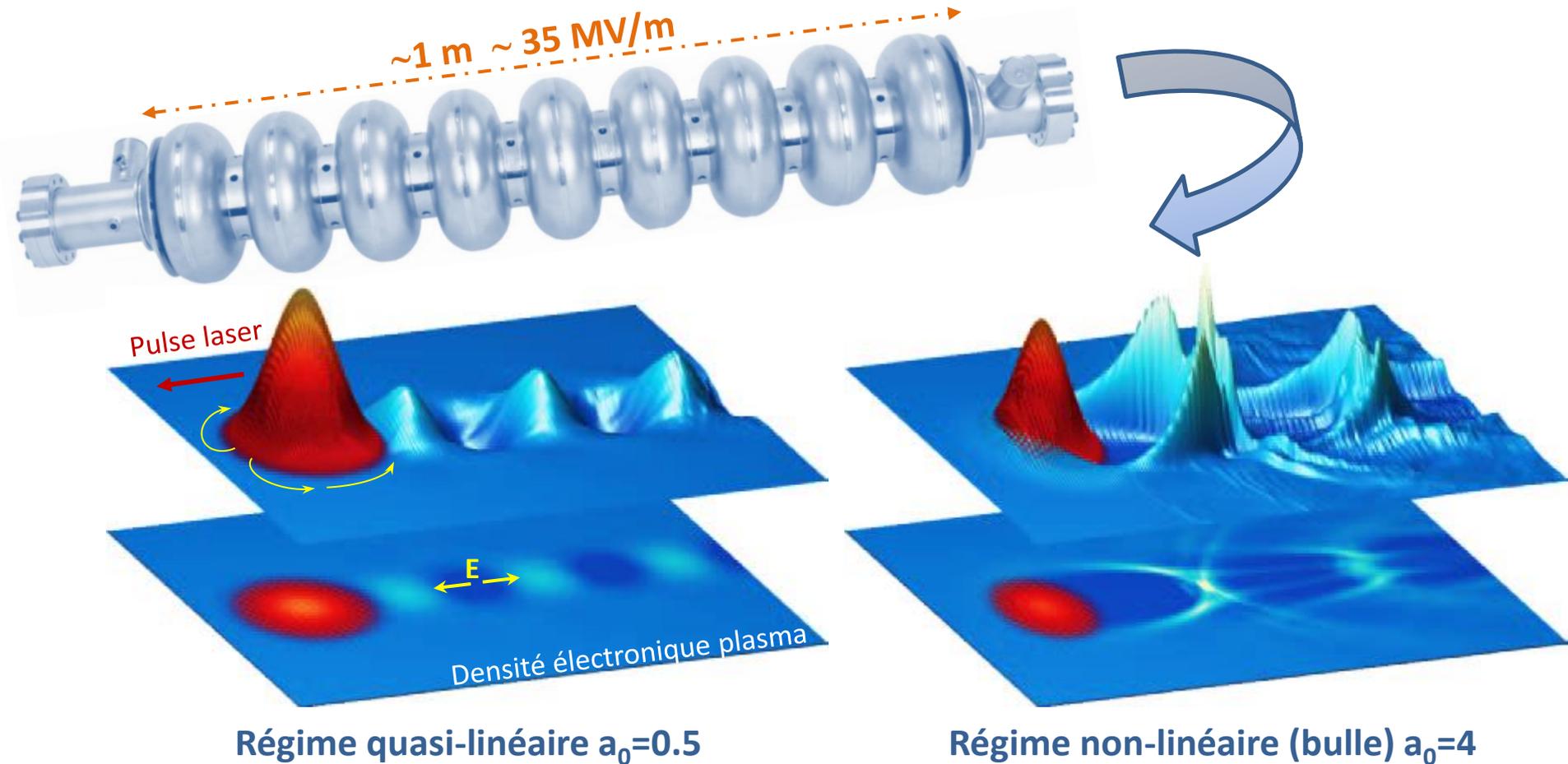




- ❑ Introduction accélération plasma
- ❑ Applications
  - ❖ collisionneurs linéaires
  - ❖ sources de rayonnement
- ❑ Les laboratoires de recherche en Europe
- ❑ Injection et qualité des faisceaux
- ❑ CILEX-APOLLON, EuPRAXIA



# Les enjeux



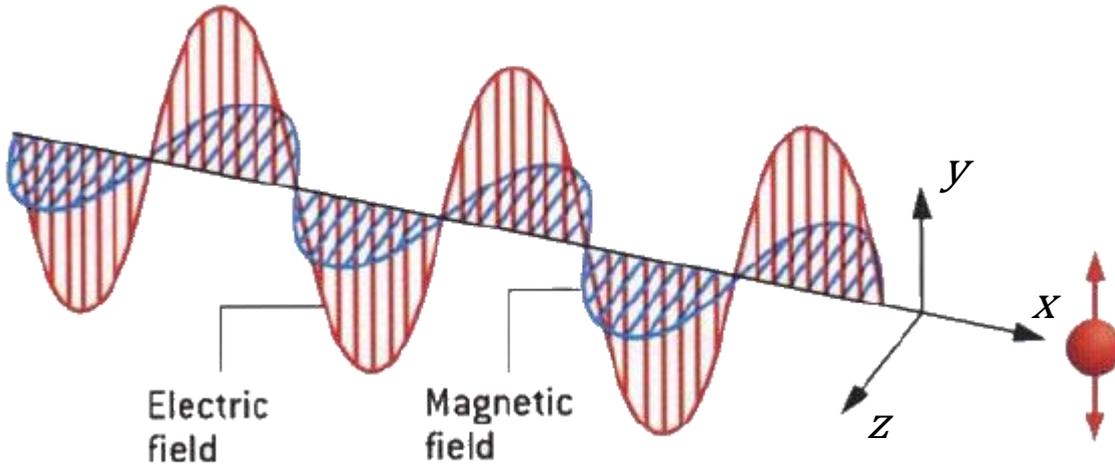
Onde plasma excitée par **laser** (forces pondéromotrices) ou par **faisceau** (forces coulombiennes)

Force pondéromotrice  $F_p = -mc^2 \nabla(a^2/2)$     Potentiel vecteur normalisé  $a_0 = \frac{eA}{mc} = 0.854 \sqrt{I_0 [10^{18} \text{ W/cm}^2]} \cdot \lambda_{[\mu\text{m}]}$

$$\lambda_p \approx \mathbf{33 \mu m} / \sqrt{n_0 (10^{18} \text{ cm}^{-3})}$$

$$E_{WB} \approx \mathbf{96 \text{ GV/m}} \cdot \sqrt{n_0 (10^{18} \text{ cm}^{-3})}$$

# impulsion laser

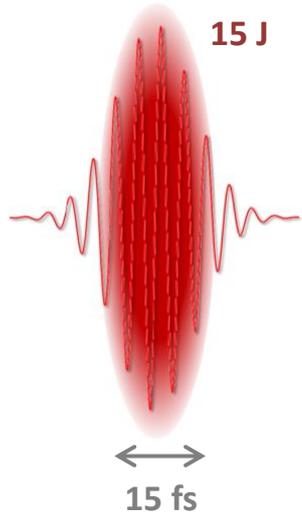


Champ laser défini par le potentiel vecteur  $A$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \Phi \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

Potentiel vecteur normalisé

$$a = \frac{|eA|}{m_0 c} = \frac{|eE|}{m_0 c \omega_L} = 0.854 \lambda_L \sqrt{I_L (\text{W/cm}^2)}$$



- Laser Ti:Sa  $\lambda_L = 800 \text{ nm}$
- Puissance crête 1 PW
- Pulse : Energie 15 J ( $6 \times 10^{19}$  photons) durée 15 fs
- focalisé dans une tache  $50 \mu\text{m}$
- Intensity  $10^{20} \text{ W/cm}^2 \Rightarrow$  électrons relativistes
- Champs électriques de 27 TV/m magnétiques de 91560 Tesla

## ***Théorème Lawson–Woodward***

*pas de gain d'énergie pour une particule interagissant directement avec un champ laser !*

$$\Delta U = e \int_{-\infty}^{\infty} E_z dz = 0$$

# Force pondéromotrice

Pseudo-force qui provient du mouvement moyenné des électrons dans le champ e.m.

Equation du mouvement (force de Lorentz)  $\frac{dp}{dt} = \frac{\partial p}{\partial t} + v \cdot \nabla p = -e(E + v \times B)$

Cas non-relativiste  $|v| \ll c$  1<sup>er</sup> ordre on néglige B

$$m \frac{\partial v_1}{\partial t} = -eE = e \frac{\partial A}{\partial t} \Rightarrow v_1 = \frac{e}{m} A = c a$$

Oscillations transverses des e- au passage du champ laser

Champ magnétique 1<sup>er</sup> ordre  $\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \Rightarrow B_1 = -\frac{m}{e} \nabla \times v_1$

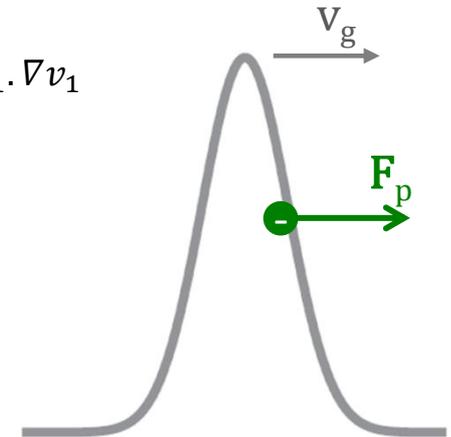
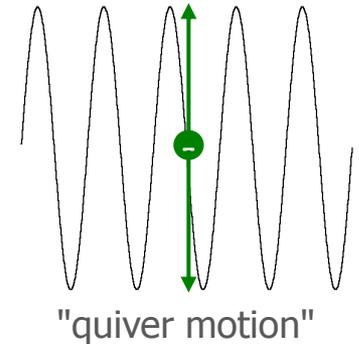
composante 2<sup>ème</sup> ordre Force de Lorentz  $p = p_1 + p_2$

$$\frac{\partial p_2}{\partial t} = -\frac{\partial p_1}{\partial t} - v_1 \cdot \nabla p_1 - e(E + v_1 \times B_2) = -m[v_1 \cdot \nabla v_1 + v_1 \times \nabla \times v_1]$$

$$\frac{\partial p_2}{\partial t} = -\frac{1}{2} m \nabla v_1^2 = -m c^2 \nabla a^2 / 2 \quad \text{Identité} \quad v_1 \times \nabla \times v_1 = \frac{1}{2} \nabla v_1^2 - v_1 \cdot \nabla v_1$$

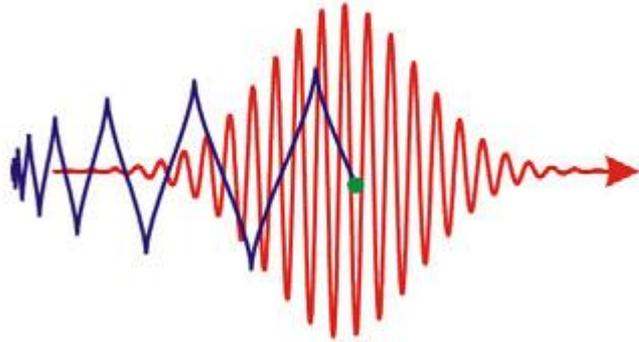
moyennage sur 1 cycle laser

$$a = a_0 \cos(\omega_L t - kx) \quad \mathbf{F}_p = \frac{\partial \langle p_2 \rangle}{\partial t} = -\frac{m c^2 \nabla \langle a^2 \rangle}{2} = -\frac{m c^2 \nabla a_0^2}{4}$$

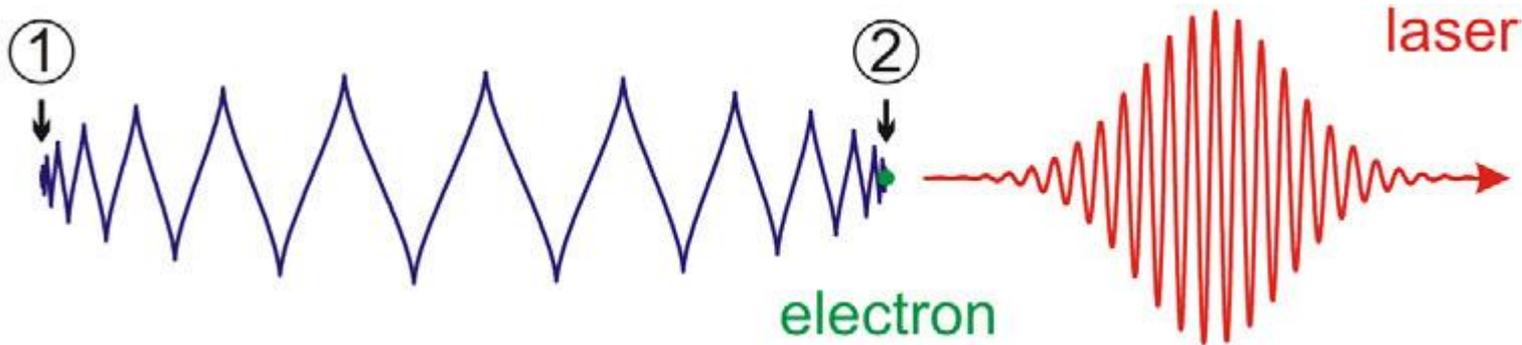


# Gain d'énergie dans le vide

## Pulse laser dépassant un électron initialement au repos



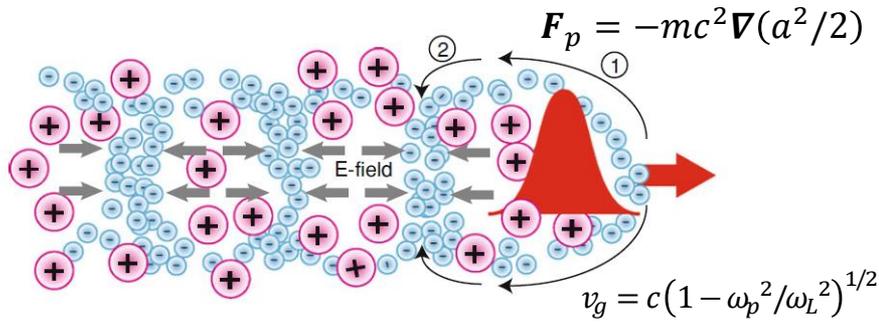
- Durant l'interaction avec l'intensité montante du laser: électron accéléré vers l'avant via la force pondéromotrice



- mais au passage du front arrière : électron décéléré
- re-transférant son énergie au laser et revient au repos

# Excitation d'onde plasma

## Champ laser



Approximation linéaire 1-D  $a^2 \ll 1$   $\xi = z - ct$

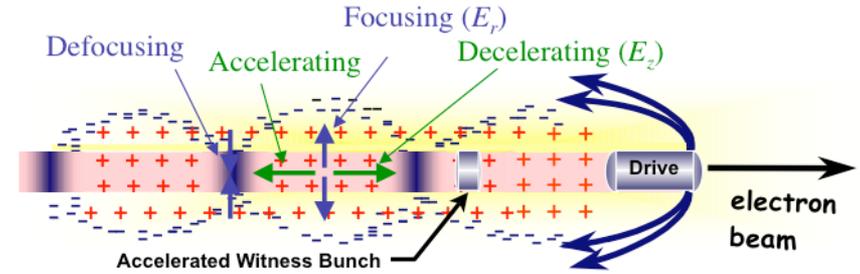
$$\underbrace{\left( \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + k_p^2 \right)}_{\text{Onde plasma}} \frac{\delta n}{n_0} = \underbrace{\nabla^2 \frac{a^2(\xi)}{2}}_{\text{Force pondéromotrice}}$$

oscillation forcée de densité

1. La force pondéromotrice (gradient de l'intensité laser) repousse les e- de l'axe et crée une séparation de charge entre les ions et les e- du plasma
2. La force de rappel initie une oscillation locale de densité de fréquence  $\omega_p = (4\pi e^2 n_0 / m_e)^{1/2}$

nombre d'onde  $k_p = \omega_p / c$

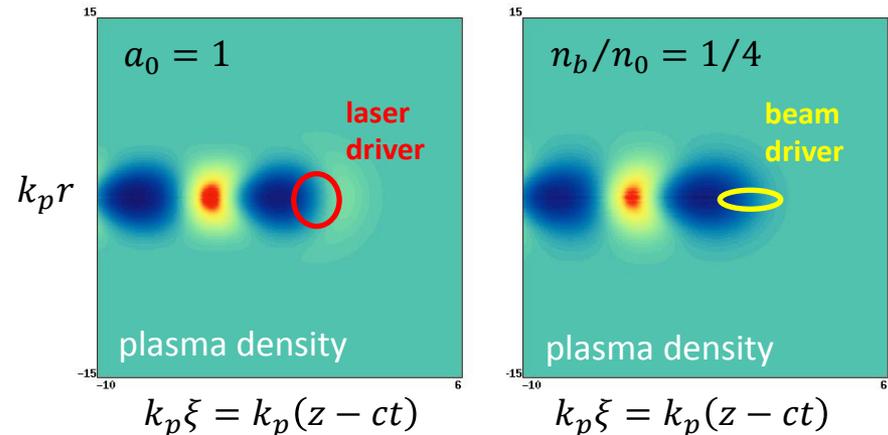
## Champ faisceau



Approximation linéaire 1-D  $n_b/n_0 \ll 1$

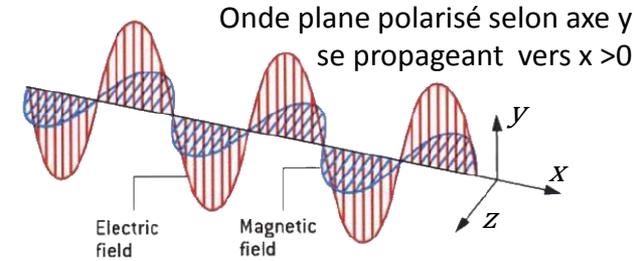
$$\left( \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + k_p^2 \right) \frac{\delta n}{n_0} = -k_p^2 \frac{n_b}{n_0}$$

Force de charge d'espace



# Théorie 1D et approximation quasi-statique

- Grandeurs normalisées impulsion laser  $Potential\ vector\ a = \frac{eA}{m_0c}$   
*Vitesse de groupe*  $\beta_g = \frac{v_g}{c} = (1 - \omega_p^2/\omega_L^2)^{1/2}$   $\gamma_g = (1 - \beta_g^2)^{-1/2}$
- Potentiel scalaire normalisé  $\phi_0 = \frac{e\Phi}{m_0c^2}$



## Equation de Lorentz du mouvement des électrons

- moment transverse  $\gamma\beta_y = a_0$
- Moment longitudinal  $\frac{d}{dt}(\gamma\beta_x) = c \left( \frac{\partial\phi_0}{\partial x} - \frac{1}{2\gamma} \frac{\partial a^2}{\partial x} \right)$

## Equation de continuité

$$\frac{\partial n}{\partial t} + c \frac{\partial}{\partial x}(n\beta_x) = 0$$

## Equation d'onde e.m.

*jauge de Coulomb*  $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$

## Equation de poisson

$$\nabla^2 \phi_0 = \frac{\partial^2 \phi_0}{\partial x^2} = k_p^2 \delta n/n_0$$

Transformation dans le référentiel se déplaçant à la vitesse de groupe du laser

$$\xi = x - v_g t, \quad \tau = t$$

$$\Rightarrow \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \xi}, \quad \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \tau} - v_g \frac{\partial}{\partial \xi} \cong -v_g \frac{\partial}{\partial \xi}$$

Approximation quasi-statique  
 l'enveloppe du pulse laser n'évolue pratiquement pas pendant le temps de transit

$$\frac{\partial^2 \phi_0}{\partial \xi^2} = k_p^2 \gamma_g^2 \left\{ \frac{\beta_g(1 + \phi_0)}{[(1 + \phi_0)^2 - \gamma_g^{-2}(1 + a^2)]^{1/2}} - 1 \right\}$$

$v_g \rightarrow c$

$$\frac{\partial^2 \phi_0}{\partial \xi^2} = \frac{1}{2} k_p^2 \left[ \frac{1 + a^2}{(1 + \phi_0)^2} - 1 \right]$$

$a_0 < 1$

Equation différentielle NL pour le potentiel scalaire

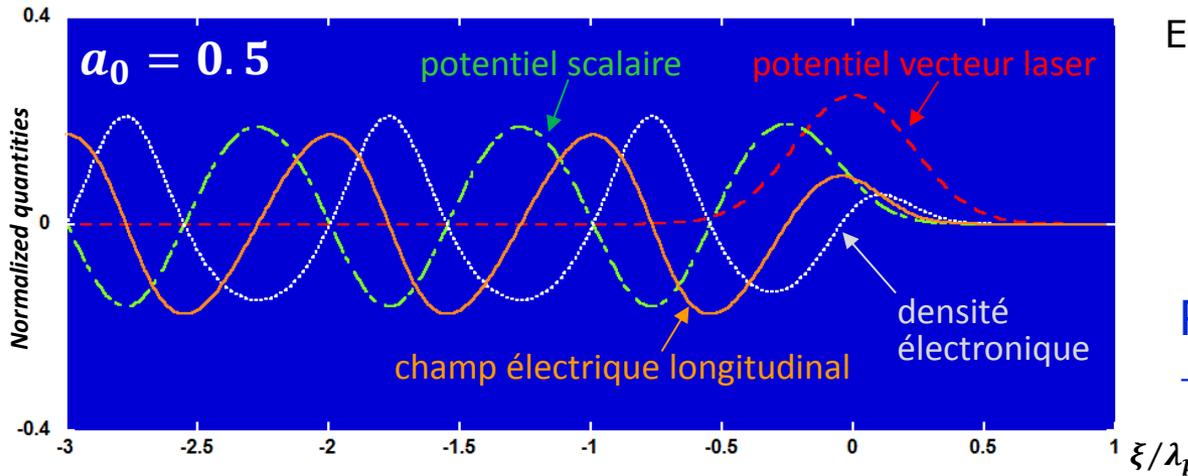
$$\frac{\partial^2 \phi_0}{\partial \xi^2} + k_p^2 \phi_0 = k_p^2 \frac{a^2(\xi)}{2}$$

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + k_p^2 \right) \frac{\delta n}{n_0} = k_p^2 \frac{\nabla^2 a^2(\xi)}{2}$$

formalisme P. Gibbon

Equation oscillateur harmonique excité par la force pondémotrice

# Solutions numériques théorie 1D

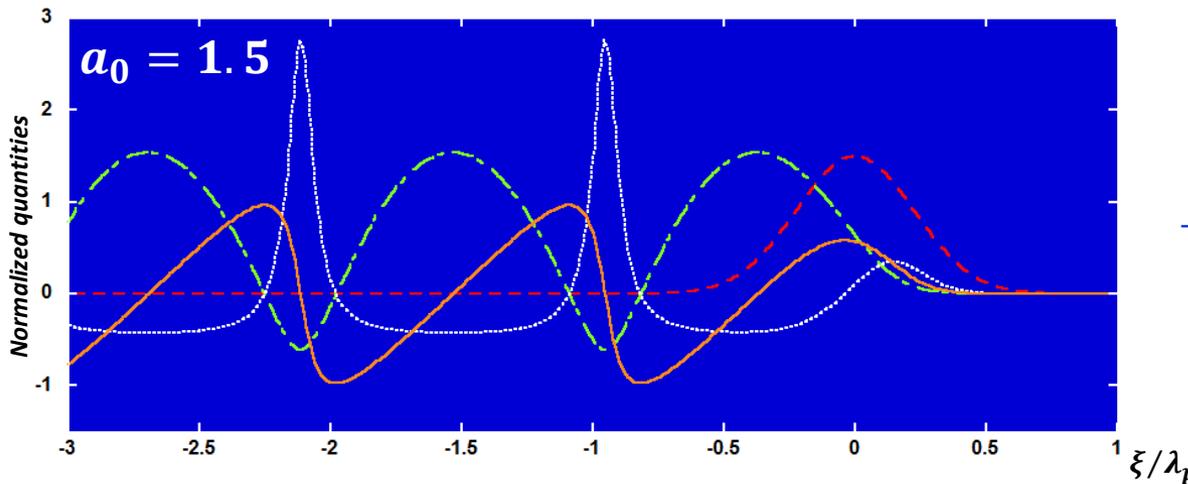


Enveloppe gaussienne de l'impulsion laser

$$a(\xi) = a_0 \exp(-\xi^2/2\sigma_L^2)$$

$$FWHM = 2\sqrt{2 \text{Log} 2} \sigma_L \quad n_0 = 10^{19} \text{cm}^{-3}$$

Régime linéaire  
→ solutions sinusoidales



→ dent de scie  
période onde plasma s'allonge

## Champ maximum que peut supporter un plasma ? (champ de déferlement)

Hypothèse: en régime linéaire tous les e- oscillent à  $\omega_p$  Equation de poisson  $\nabla \cdot E = en_0/\epsilon_0 = \frac{\partial E}{\partial \xi} = \omega_p/cE_0$

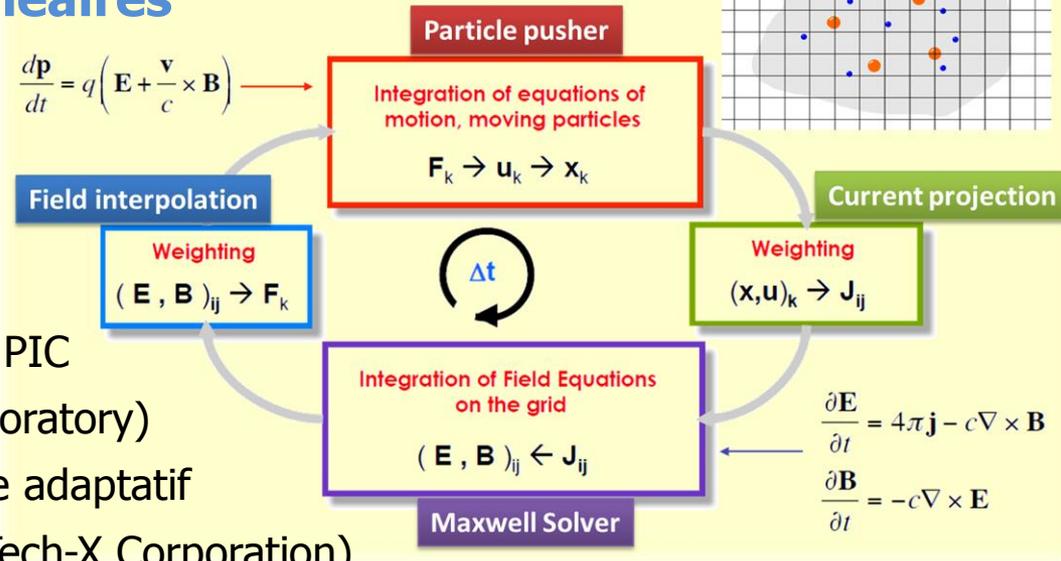
⇒  $E_0 = m_0 c \omega_p / e$  (300 GV/m pour  $10^{18} \text{cm}^{-3}$ ) pour 1D relativiste  $E_{WB} = \sqrt{2}(\gamma_p - 1)^{1/2} E_0$  peut être  $> E_0$

# Simulations 3D

❑ Physique non linéaire  $\Rightarrow$  Codes 3D PIC parallélisés

❑ Outils de simulation non linéaires

- Calder (CEA/DAM)
- OSIRIS (UCLA)
- PIconGPU (HZDR)
- VPIC (Los Alamos)
- VLPL (Dusseldorf University) 1D PIC
- turboWAVE (Naval Research Laboratory)
- PSC (Munich University) maillage adaptatif
- Vorpal (University of Colorado, Tech-X Corporation)
- UPIC-EMMA (UCLA) solveur spectral, Lorentz transformation
- INFERNO (LBNL) 2D PIC + modèle d'enveloppe pour le laser
- **WARP** (LBNL) 3D PIC + moving window + boosted frame: Lorentz transformation
- SMILEI (Maison de la Simulation, LULI) PIC open-source en développement, orienté interaction laser intense / matière



❑ Tests et debugging sur cluster pour les sources (20.6 GHz 256 noeuds)

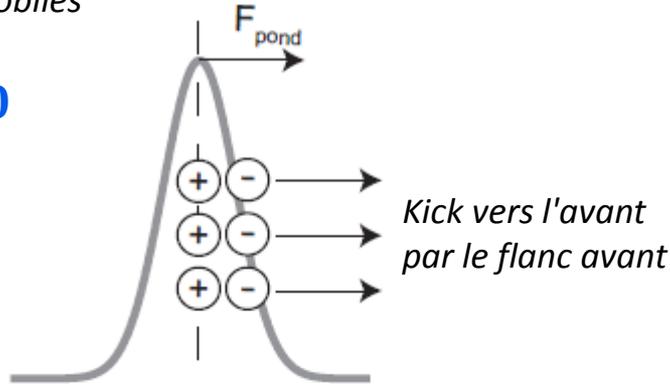
❑ Puis runs complets au CCRT du CEA/DIF

# Résonance - Régime de la bulle

## "Résonance"

ions immobiles

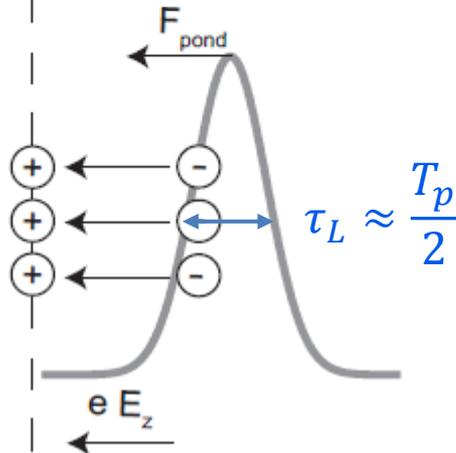
$t = 0$



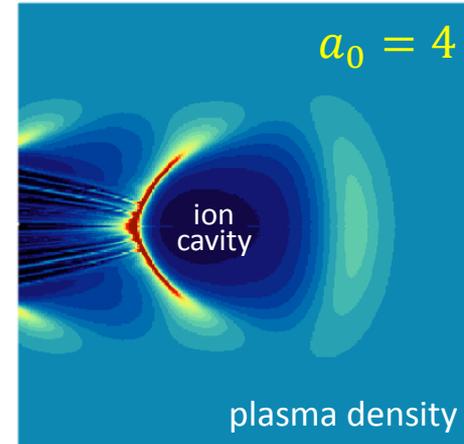
amplitude maximale quand  
durée du pulse  $\approx \frac{1}{2}$  période plasma

$t = \frac{T_p}{2}$

Kick vers l'arrière par le flanc arrière

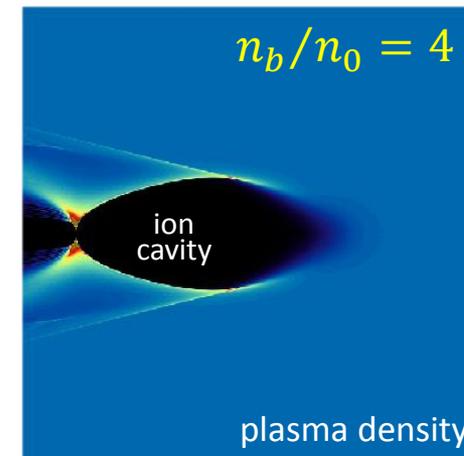


## Régime (non-linéaire) de la bulle



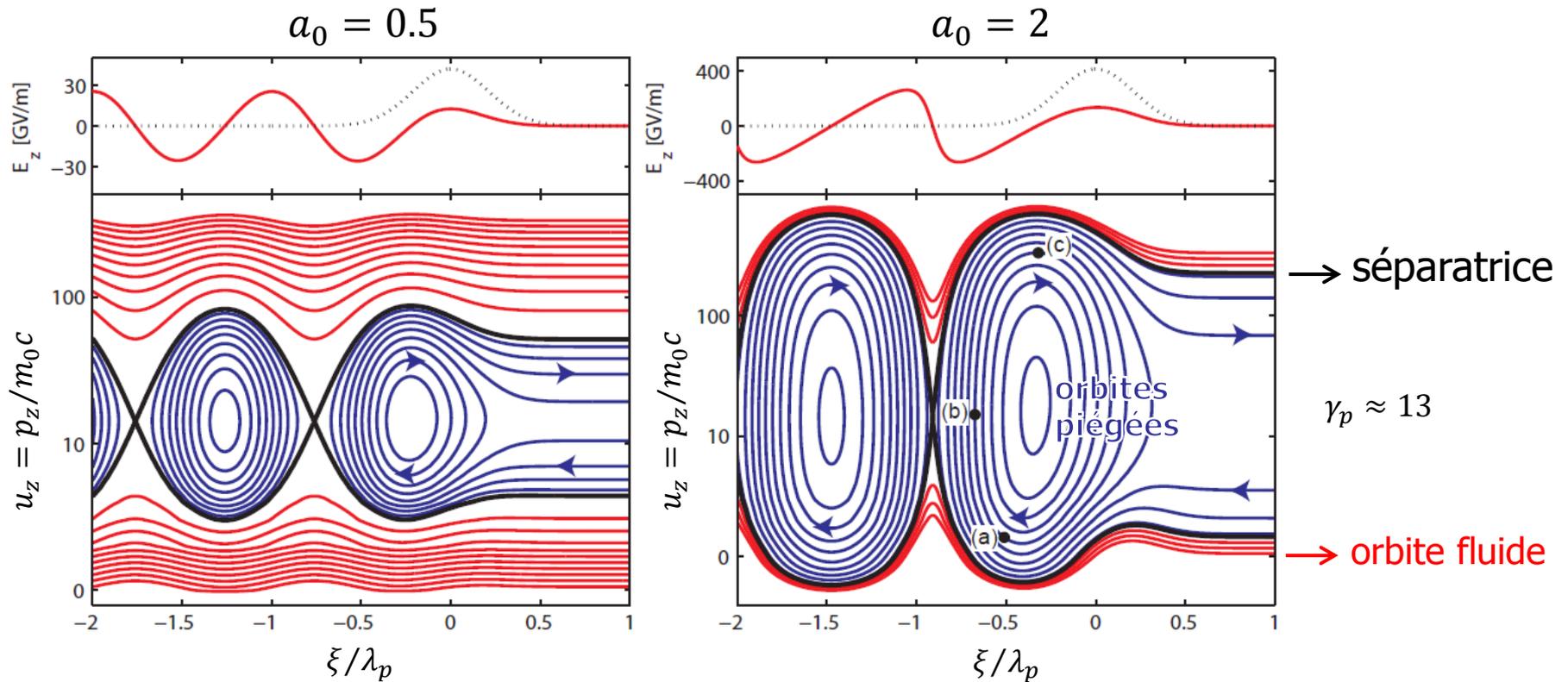
driver =  
laser

force pondéromotrice du laser > force de rappel  
de charge d'espace des ions du plasma  
tous les électrons du plasma sont expulsés  
 $\Rightarrow$  champs linéaires



driver =  
faisceau  $e^-$

# Trajectoires – plan de phase longitudinal



Dynamique longitudinale décrite par l'hamiltonien  $\mathcal{H}(u_z, \xi) = \sqrt{1 + a_0^2/2 + u_z^2} - \beta_p u_z - \phi(\xi)$

Moment particule test dans le potentiel de l'onde  $u_z(\xi) = \beta_p \gamma_p^2 (H_c + \phi(\xi)) \pm \gamma_p \sqrt{\gamma_p^2 (H_c + \phi(\xi))^2 - (1 + a_0^2/2)}$

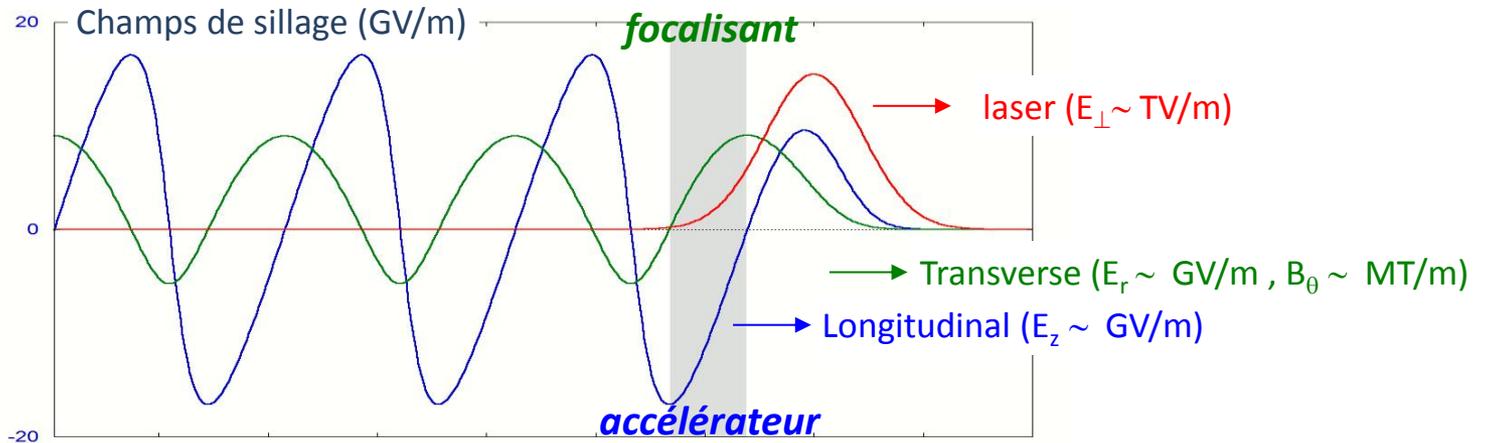
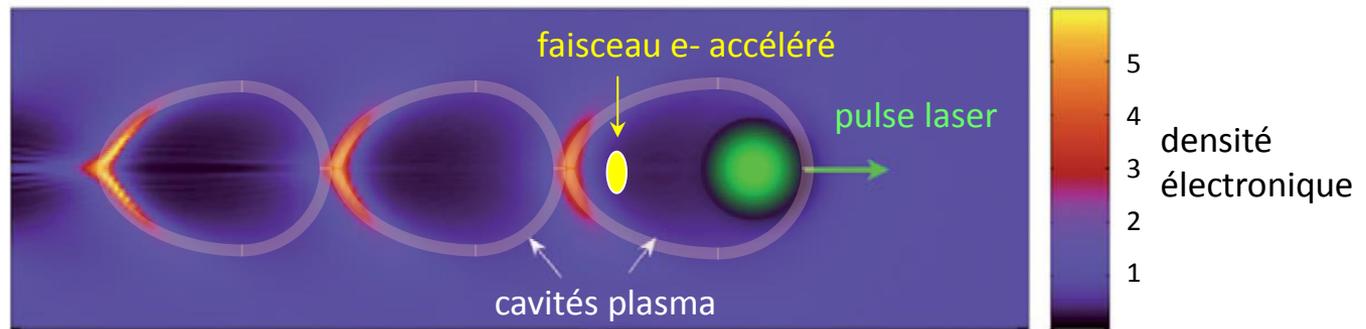
- Orbite fluide : e- initialement au repos
- Orbites piégées (e- avec moment initial) : accélérés, atteignent une énergie max et éventuellement décélérés

# Accélération - Focalisation

## □ Faisceau d'électrons dans la région de phase

- du champ accélérateur  $W_z = E_z$
- du champ focalisant  $W_{\perp} = E_r - cB_{\theta}$

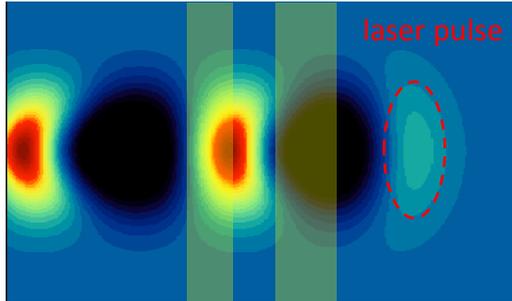
*Relation Panofsky-Wenzel*  
 $\partial W_z / \partial r = \partial W_{\perp} / \partial \xi$



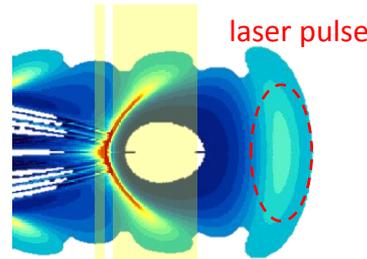
# Région de phase utile

Région à la fois accélératrice et focalisante

Régime quasi-linéaire  $a_0 \sim 1$

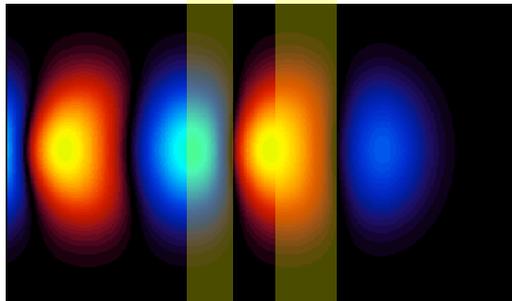


Régime non linéaire  $a_0 \geq 4$

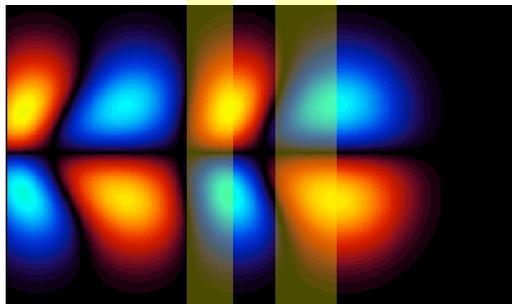
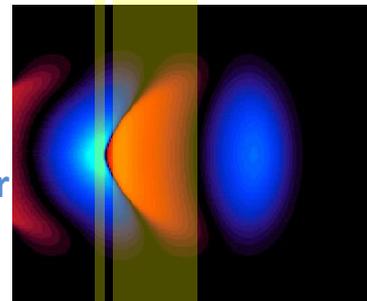


densité

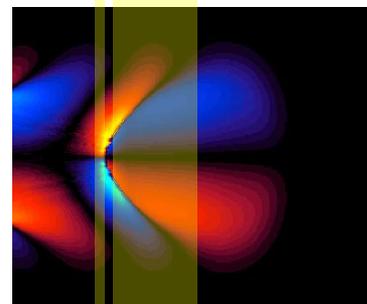
laser pulse



champ  
accélérateur



champ  
radial



e+ e-

e+ e-

□ Régime linéaire

Régions quasi-symétriques

□ Régime de la bulle

Régions très asymétriques

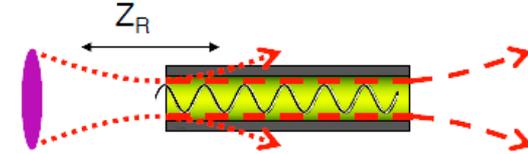
Focalisante pour les e-

Défocalisante pour les e+

# Limitations en gain d'énergie

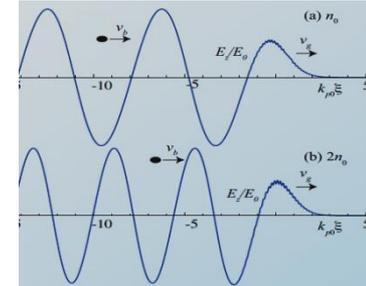
❑ **Diffraction** du laser  $\sim$  longueur de Rayleigh

- Remède : auto-focalisation, guidage par capillaire, ...



❑ **Déphasage** faisceau - onde plasma ( $v_p < v_{e-}$ )  $L_{max} \propto n_0^{-3/2}$

- Remède : rampe de densité  $> 0$   $n_0 \nearrow \Rightarrow \lambda_p \searrow$



❑ **Epuisement** du laser (depletion)  $L_{deplete} \propto \lambda_p^3 / \lambda_L^2 \propto n_0^{-3/2}$

- Perte d'énergie dans l'excitation d'onde plasma

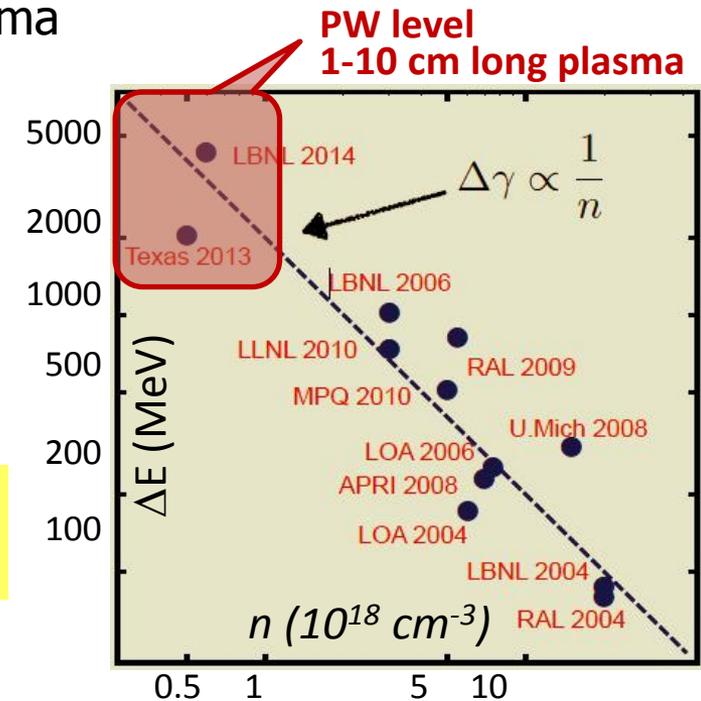
❖ Gradient accélérateur  $G \sim E_0 = mc\omega_p / e \propto \sqrt{n_0}$

❖ Gain d'énergie  $W = G \times L_{acc} \propto 1/n_0$

❖ Puissance crête laser  $P_{laser} \propto 1/n_0$



Pour augmenter le gain d'énergie (pour un étage)  
Baisser la densité et augmenter la puissance laser

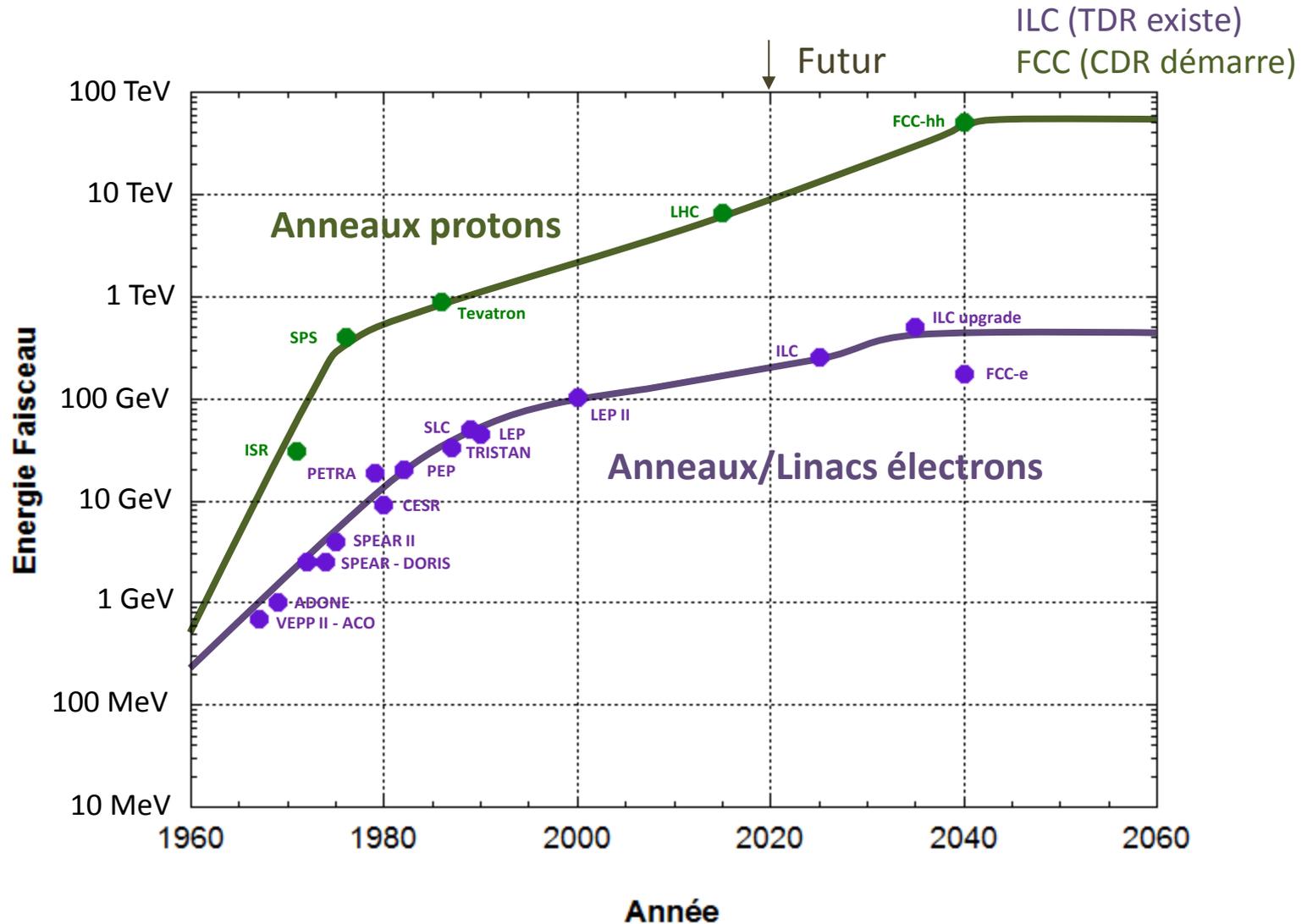


---

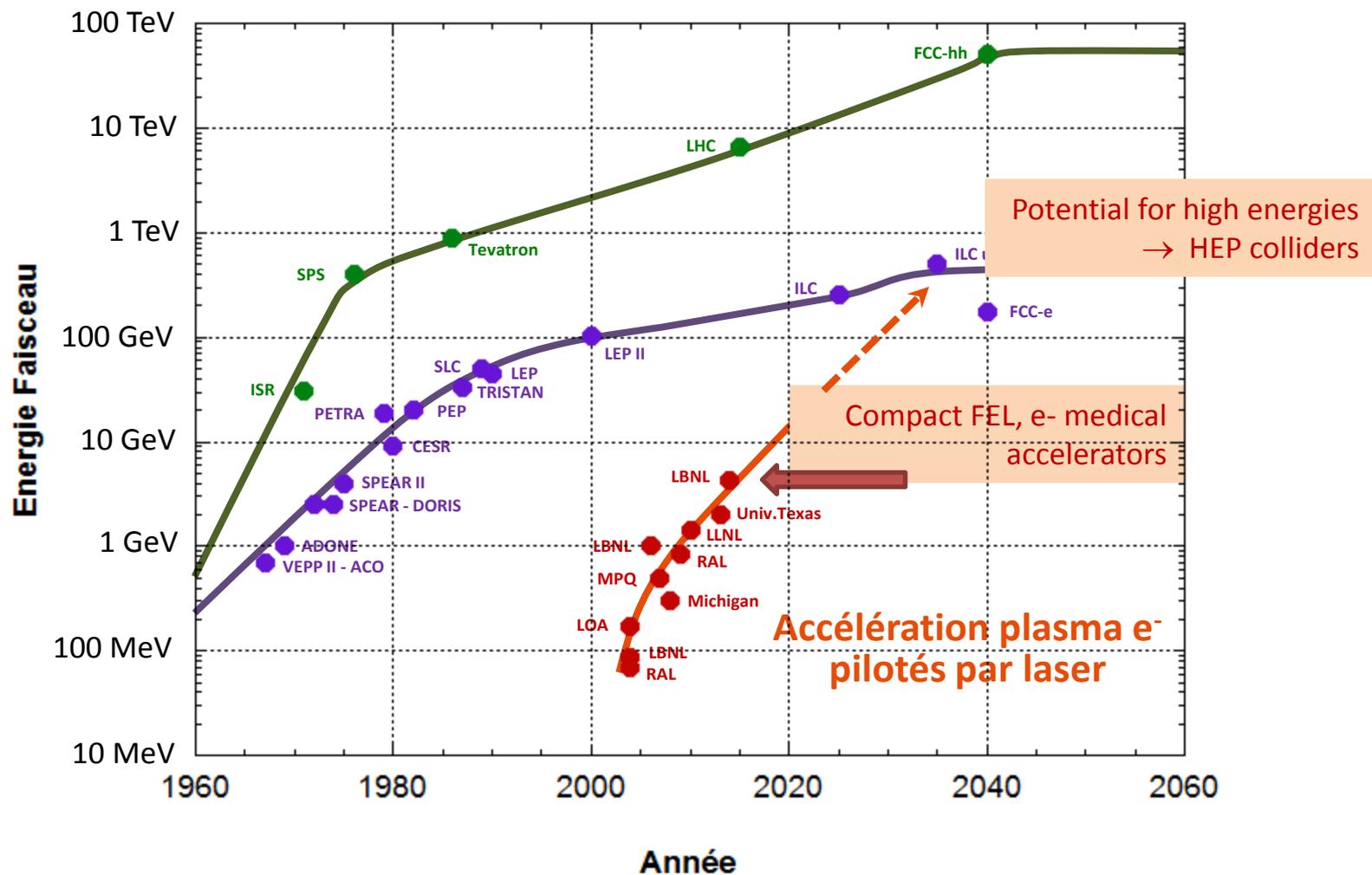
# **Applications long-terme**

# **Collisionneurs linéaires**

# Graphe de Livingston



# Livingston avec accélération plasma



# LWFA – Record en énergie

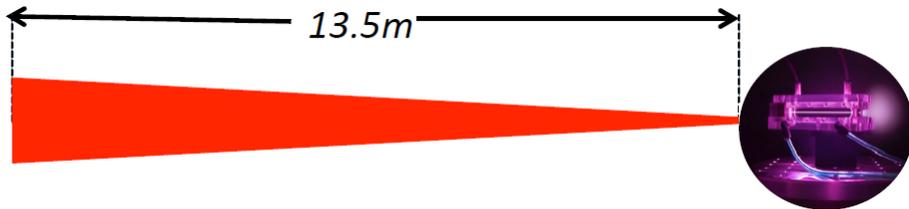


**BELLA (BERkeley Lab Laser Accelerator)**

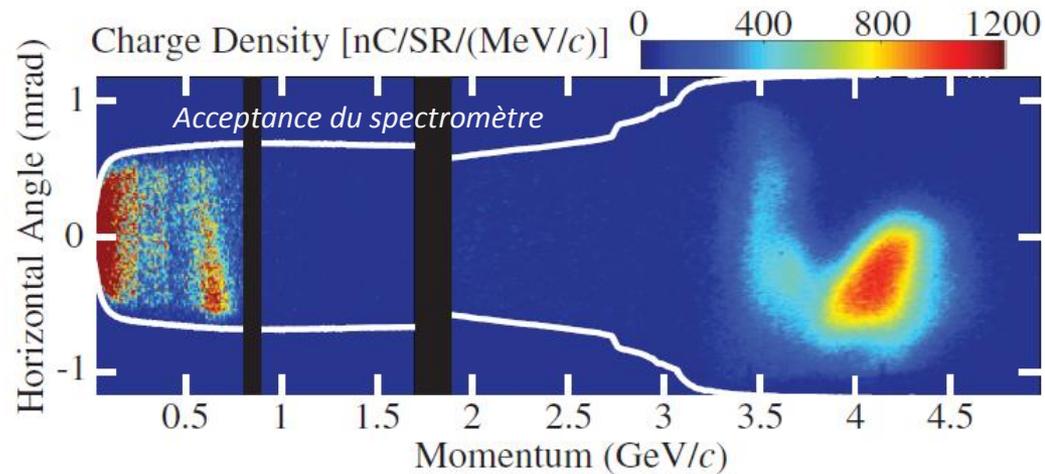
PetaWatt Laser

$U > 42 \text{ J}$   $\tau \sim 30 \text{ fs}$  @1Hz

~ 55 micron spot



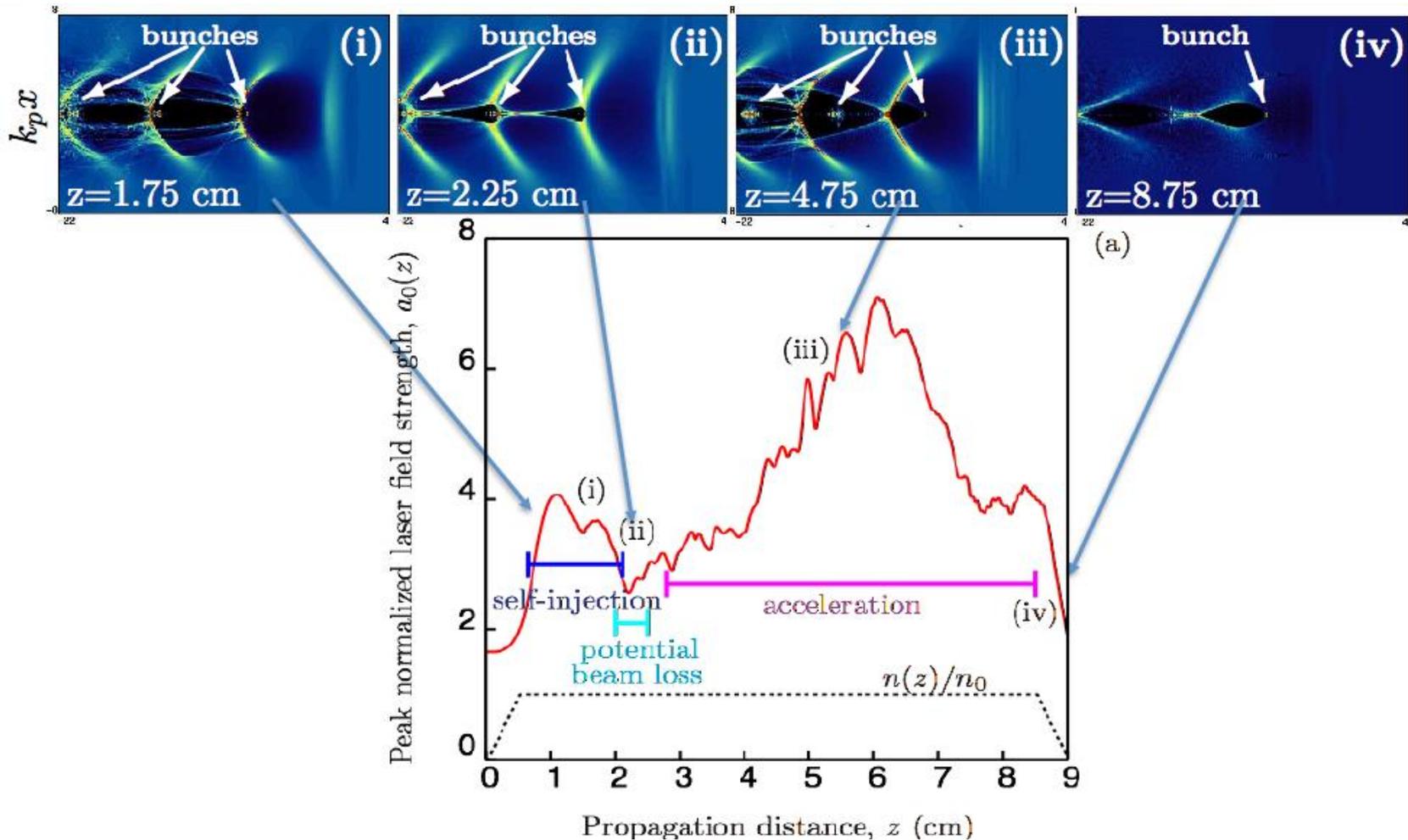
W.P. Leemans et al, PRL 113, 245002 (2014)



	Exp.	Sim.
Energy	4.25 GeV	4.5 GeV
$\Delta E/E$	5%	3.2%
Charge	~20 pC	23 pC
Divergence	0.3 mrad	0.6 mrad

Structure = capillaire de 9 cm  
 densité plasma  $n_0 \sim 6-7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$   
 Puissance crête laser = 300 TW

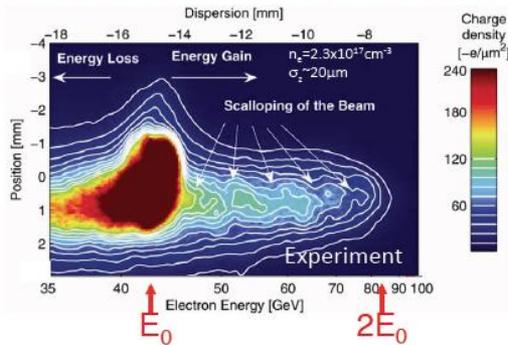
# Auto-injection et accélération



Régime d'auto-focalisation et auto-injection  $\Rightarrow$  stabilité médiocre

# PWFA – FACET (SLAC)

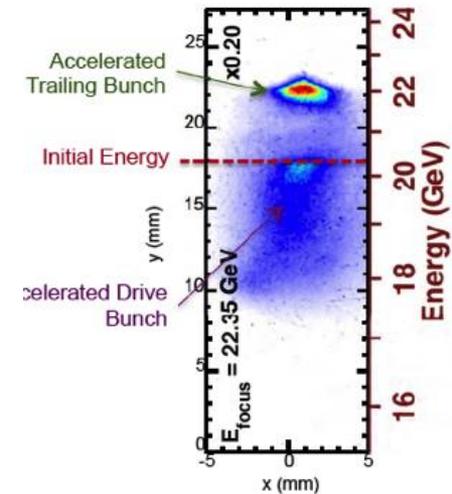
Blumenfeld, Nature 445, 741 (2007)



42 => 84 GeV in 85cm! 50 GeV/m



M. Litos et al, Nature 515, 92 (Nov 2014)



■ Cellule plasma: vapeur de lithium ionisé par laser

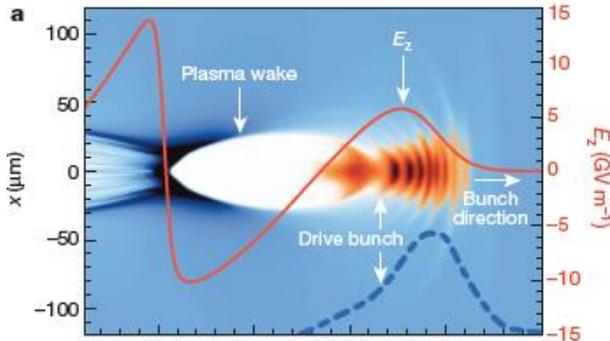
- Longueur 36 cm, densité  $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\lambda_p = 200 \text{ μm}$

■ Bunches pilote (D) et témoin (W):

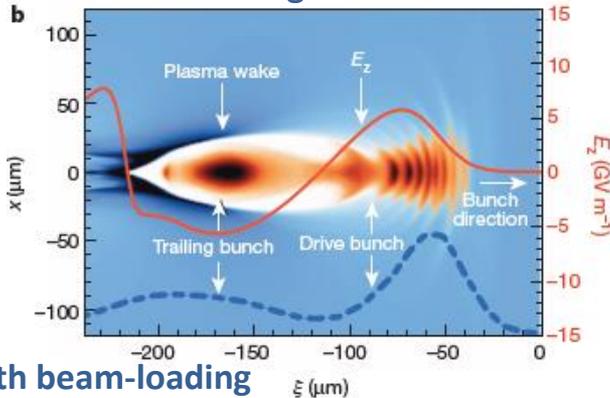
- 20.35 GeV, D et W séparés par  $160 \text{ μm}$
- 1.02 nC (D), 0.78 nC (W)

■ Resultat

- Gain en énergie = 1.6 GeV  $\Rightarrow$  4.4 GV/m
- Rendement Total  $\langle 29.1\% \rangle$  avec un maximum de 50%
- Dispersion en énergie finale 0.7 % (2% moyen)



without beam-loading

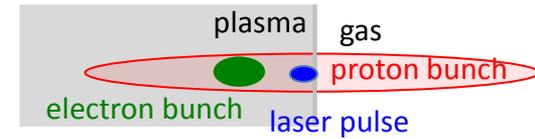


with beam-loading

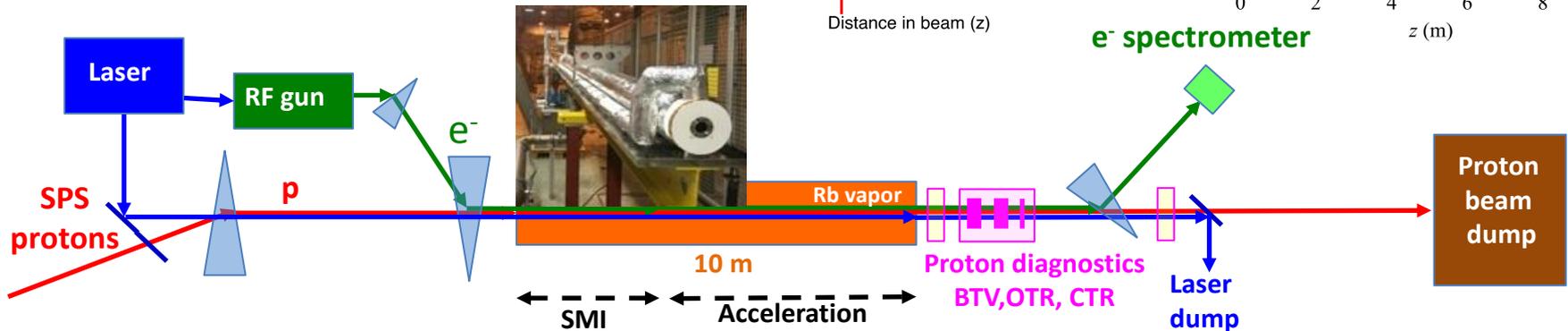
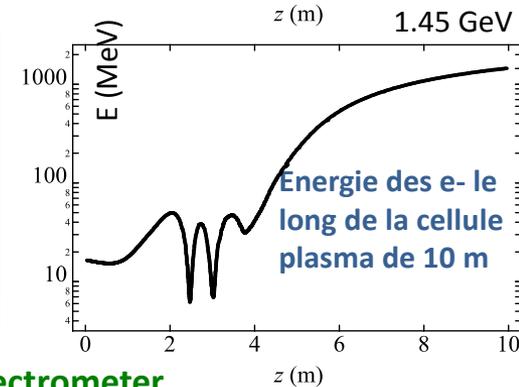
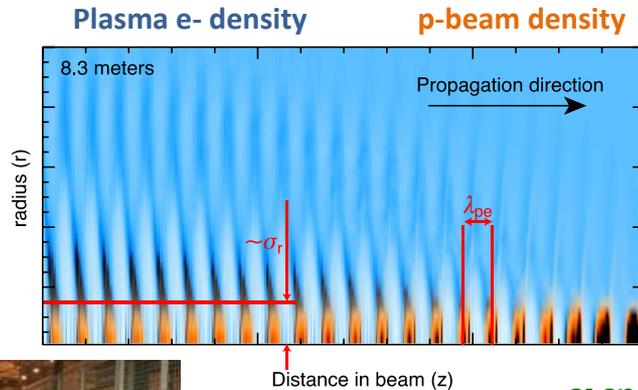
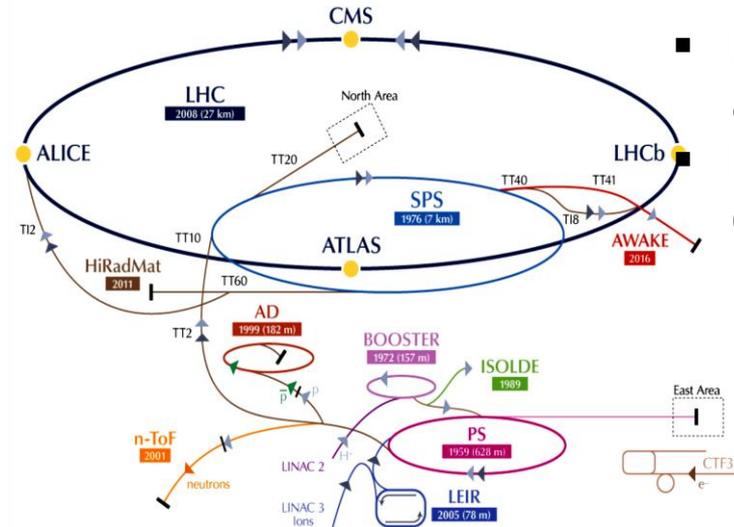
# PWFA – AWAKE (CERN)

- ❑ **Faisceau e-** comme pilote < 100 J (10 nC, 10 GeV)  
→ plusieurs étages nécessaires

- ❑ **Faisceau p** : 19 kJ pour  $3 \times 10^{11}$  particules @ 400 GeV/c



- Expérience AWAKE dans l'installation CNGS avec le faisceau de protons du SPS long de 400 ps  
Basé sur l'instabilité d'auto-modulation, excitant les champs de sillage de façon résonante

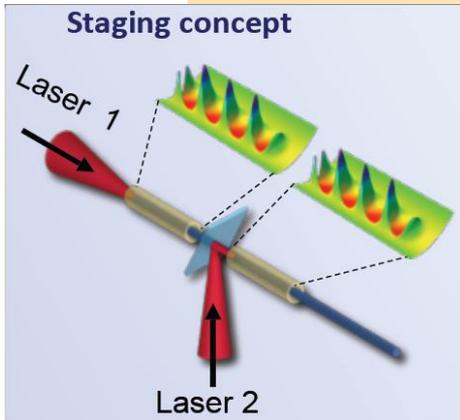
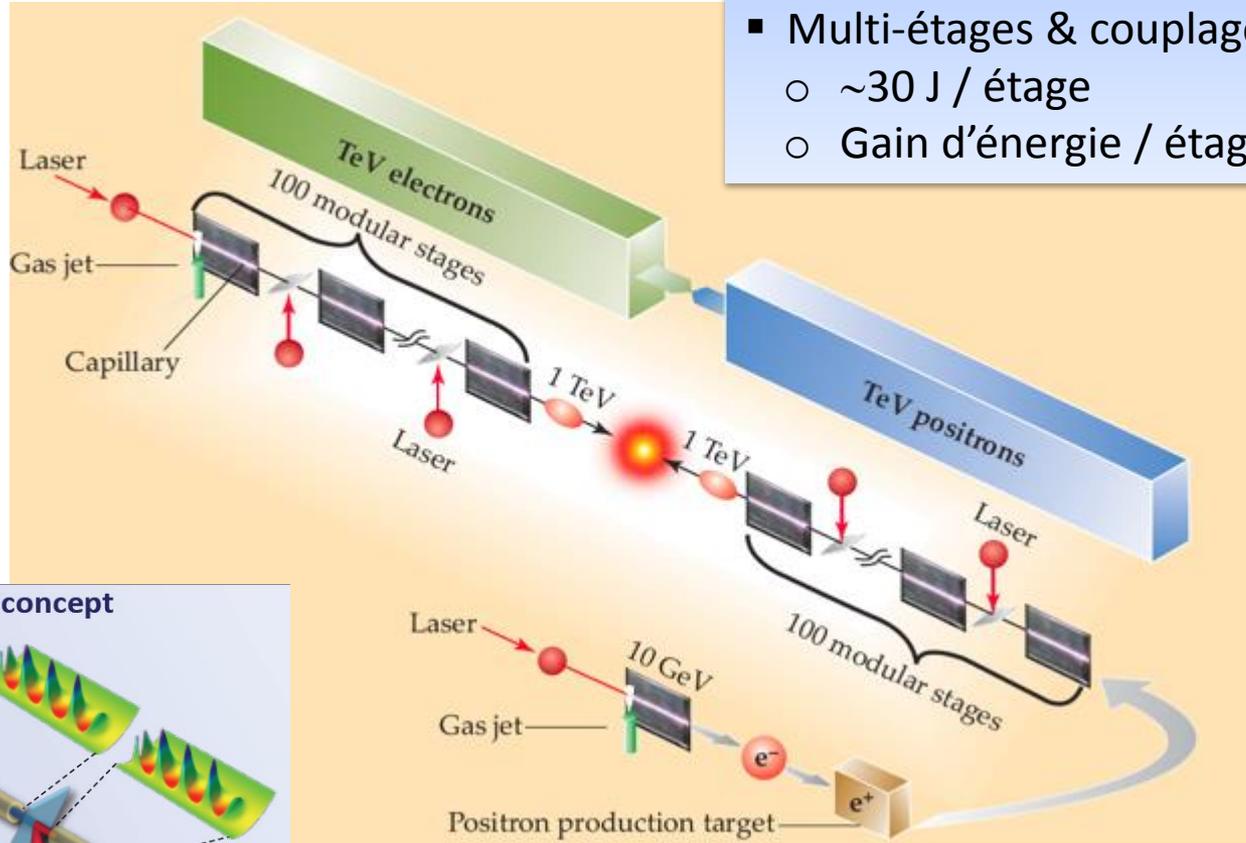


# Vision pour un collisionneur futur basé sur LPA

Accélération e-/e+ à 1 TeV en qq 100s mètres

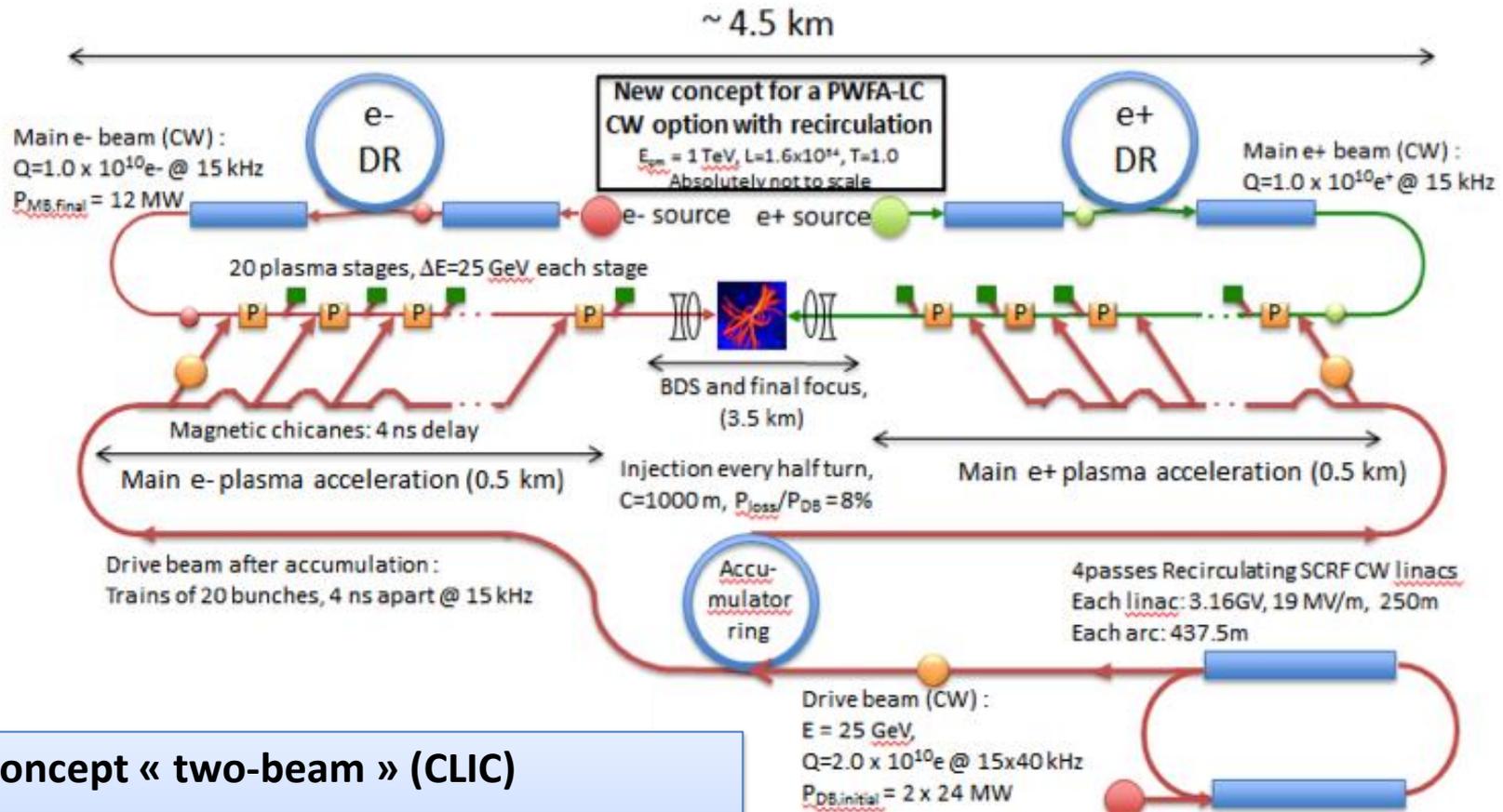
Leemans & Esarey, *Physics Today* 2009

- Densité plasma :  $n_0 \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
- Onde plasma quasi-linéaire ( $a \sim 1$ ): e- and e+
- Multi-étages & couplage laser :
  - $\sim 30 \text{ J / étage}$
  - Gain d'énergie / étage  $\sim 10 \text{ GeV sur } \sim 1 \text{ m}$



**Technologie laser à développer**  
Taux de répétition élevée (10's kHz)  
Puissance moyenne élevée (100's kW)  
Rendement élevé (10's de %)

# Version LPA piloté par faisceau 25 GeV



## Concept « two-beam » (CLIC)

- 20 étages plasma pour 2 x 500 GeV
- Plasma:  $L = 3.3 \text{ m}, n_0 = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
- Bunch pilote  $N = 2.10^{10}, \sigma_z = 30 \mu\text{m}$

SLAC-PUB-15426  
[arXiv:1308.1145](https://arxiv.org/abs/1308.1145)

## A Beam Driven Plasma-Wakefield Linear Collider: From Higgs Factory to Multi-TeV

Summarized for CSS2013

E. Adli, J.P. Delahaye, S.J. Gessner, M.J. Hogan, T. Raubenheimer (SLAC)  
 W. An, C. Joshi, W. Mori (UCLA)

---

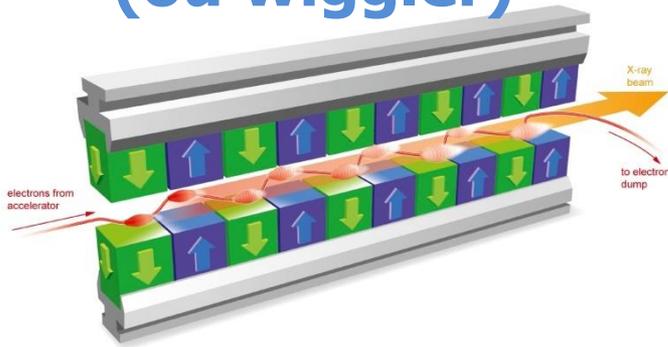
# **Applications court-terme**

# **Sources de rayonnement**

# Sources de Rayonnement X

Faisceau électrons relativistes +

champ onduleur  
(ou wiggler)

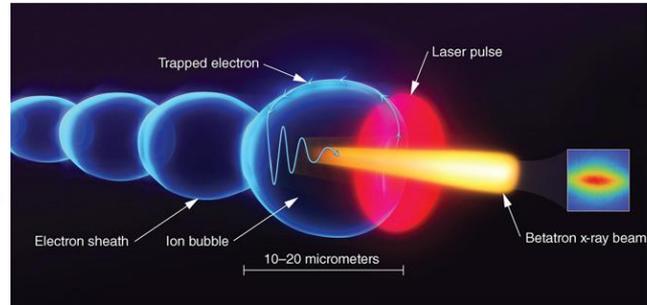


rayonnement onduleur  
laser e- libres (FEL)  
100's eV - keV

$$\lambda_u \sim 1 \text{ cm}$$

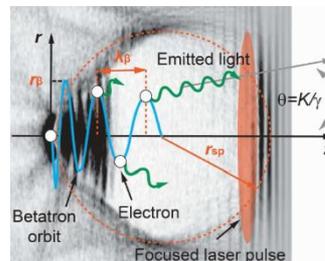
$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left( 1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2 \theta^2 \right)$$

champs plasma

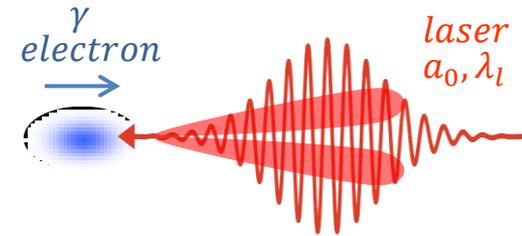


Rayonnement betatron  
keV – 10's keV

$$\lambda_\beta \sim 500 \mu\text{m}$$



champs laser



Retro-diffusion Compton  
10's keV - MeV

$$\lambda_l \sim 1 \mu\text{m}$$

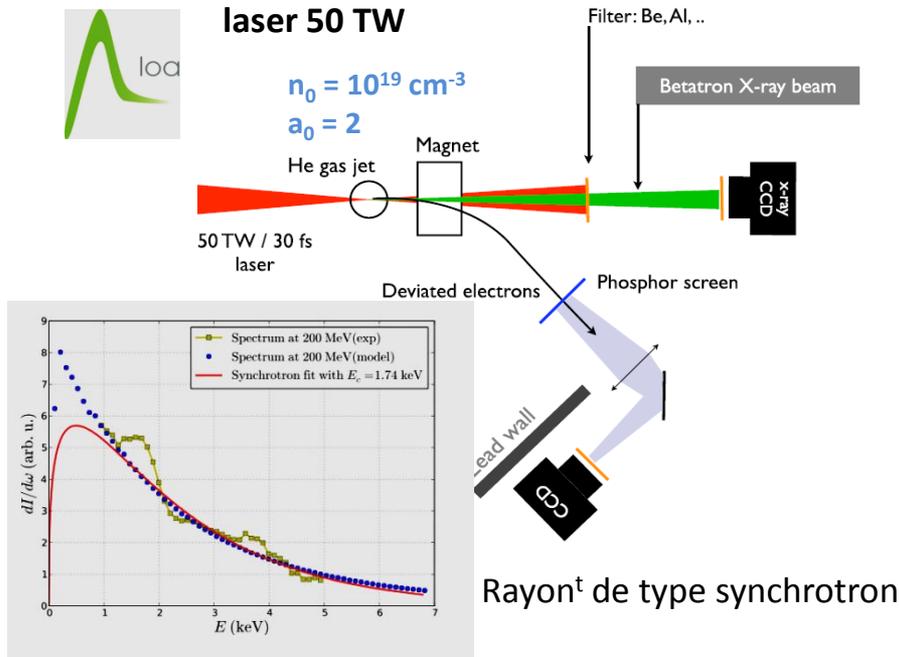
$$\lambda = \frac{\lambda_l}{4\gamma^2} \left( 1 + \frac{a_0^2}{2} + \gamma^2 \theta^2 \right)$$

# Production de rayonnement (1)

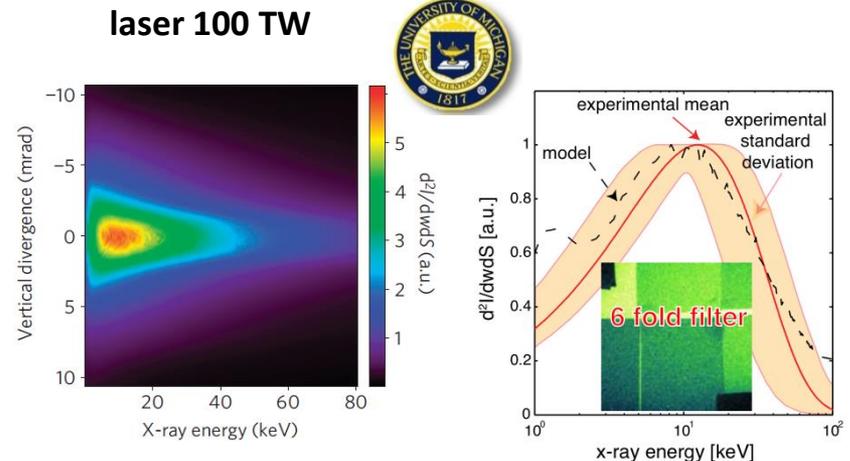
## ☐ Sources betatron → source fs, X durs

- Electrons piégés à l'arrière du sillage soumis aux forces longitudinales (accélération) et transverses ⇒ oscillations betatrons  $\lambda_\beta \sim \frac{1}{\gamma} \frac{1}{\omega_p} \approx 100 \mu\text{m}$   $r_\beta \sim \mu\text{m}$
- rayonnement X large bande de 1-10 keV  $E_c[\text{keV}] = 10^{-5} \gamma^2 n_0 [10^{18} \text{cm}^{-3}] r_\beta [\mu\text{m}]$
- Impulsions brèves < 10 fs → exp. pompe-sonde résolues en temps
- Taille de la source 1-2  $\mu\text{m}$  → imagerie en contraste de phase

S. Corde et al, *Reviews of Modern Physics*, Vol 85 (2013)



S. Kneip et al, *Nature Physics* Vol 6 December 2010

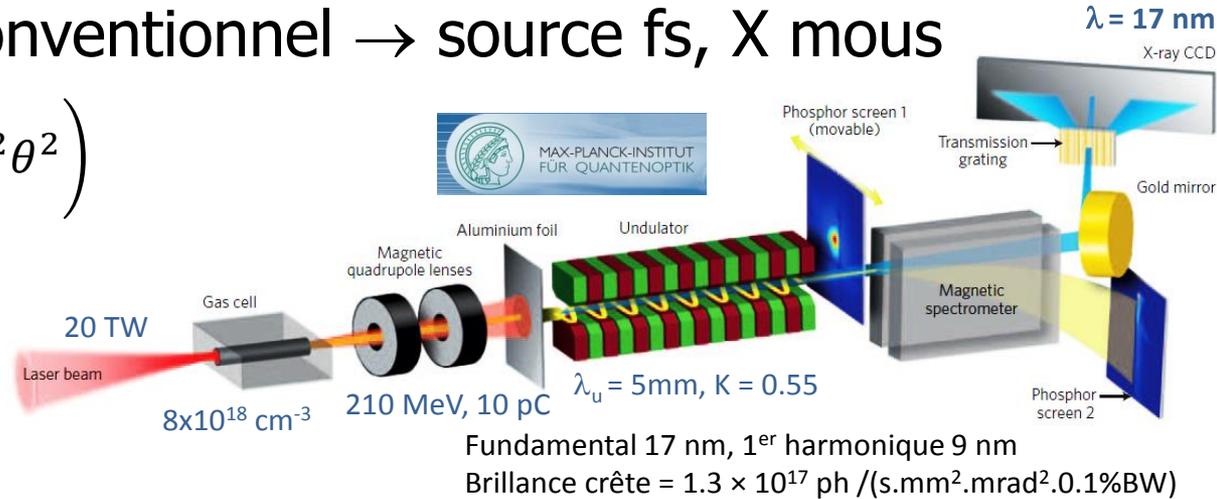
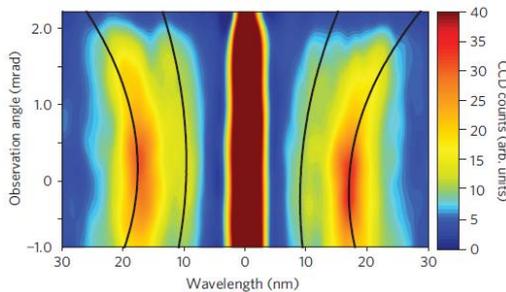


Spectre betatron émis (faisceau e- 250 MeV)  
 Pic d'émission à 10 keV  
 Brilliance =  $1 \times 10^{22}$  ph/(s.mm<sup>2</sup>mrad<sup>2</sup>.0.1%BW)

# Production de rayonnement (2)

□ Source wiggler conventionnel → source fs, X mous

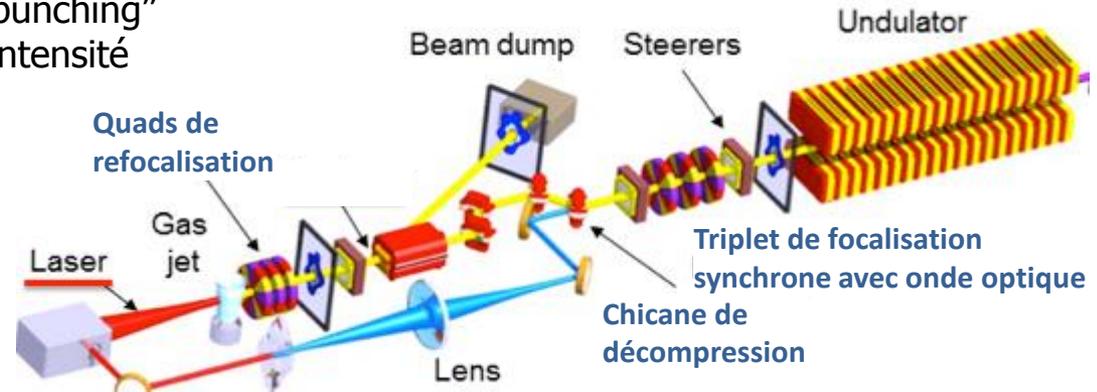
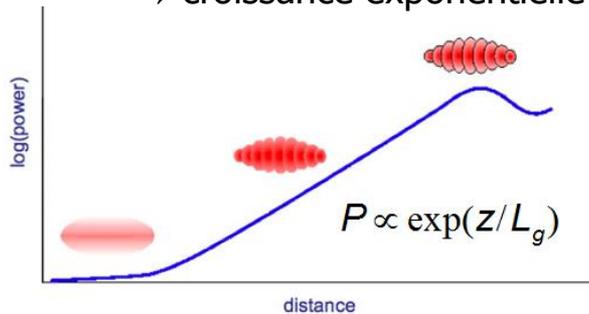
$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2n\gamma^2} \left( 1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2 \theta^2 \right)$$



*M. Fuchs et al, Nature Physics, Vol 5, November 2009*

□ Laser à électron libre (FEL)

- Feedback positif entre paquet d'électrons et rayonnement généré à la traversée de l'onduleur  
 → modulation de densité "microbunching"  
 → croissance exponentielle de l'intensité



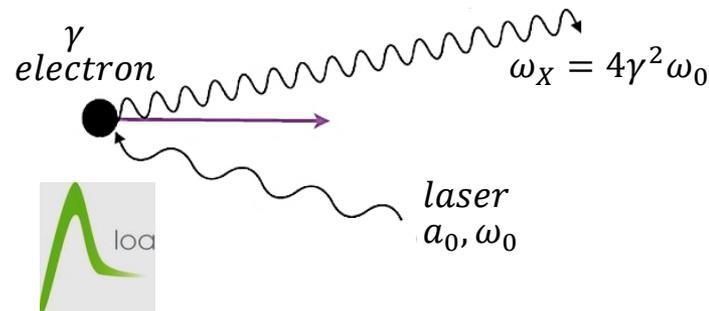
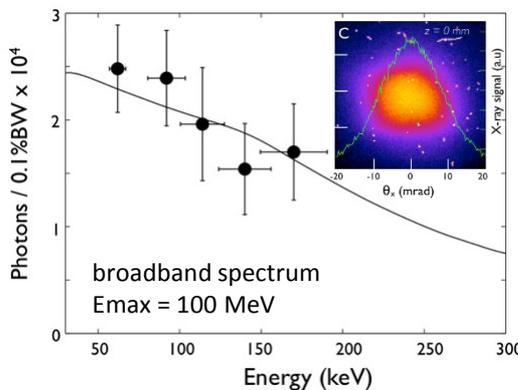
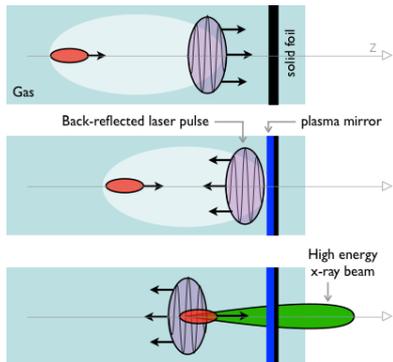
- mais fortes exigences sur la qualité de faisceau  
 $\epsilon_n \sim 1 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{mrad}, \sigma_E/E \sim 0.01 \%$

**Démonstrateur** dans X-VUV  
 COXINEL + X-FIVE

# Production de rayonnement (3)

## ☐ Sources Compton → sources $\gamma$ compactes

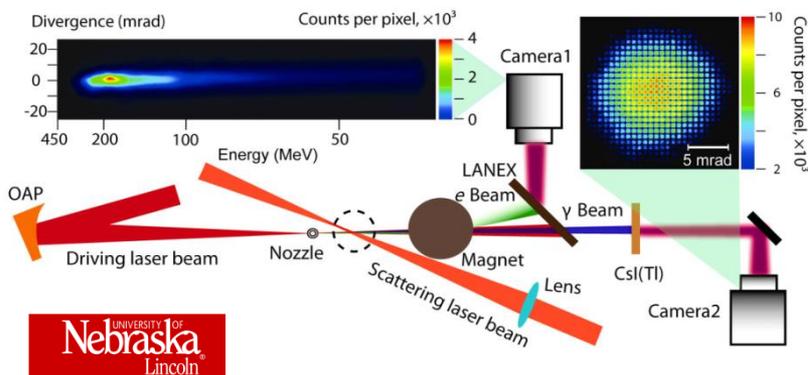
- Un seul pulse laser



K. Ta Phuoc et al,  
*Nature Photonics* 6 (2012)

$2 \times 10^4$  ph/0.1%BW @ 100 keV  
Brilliance =  $10^{21}$  @100 keV

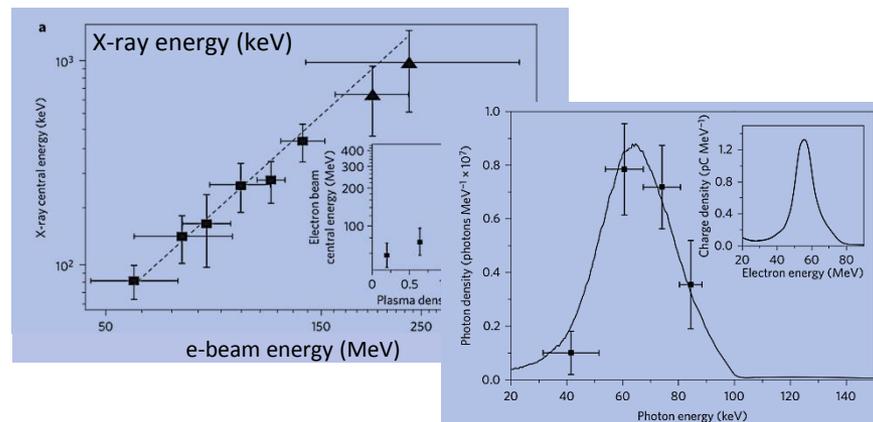
- Deux pulses laser



S. Chen et al, *Phys. Rev. Lett.* (2013)

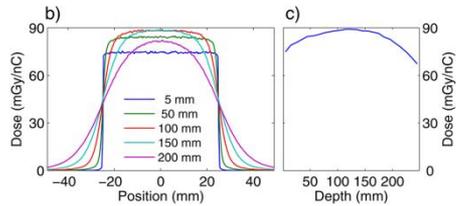
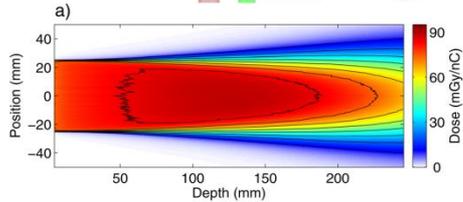
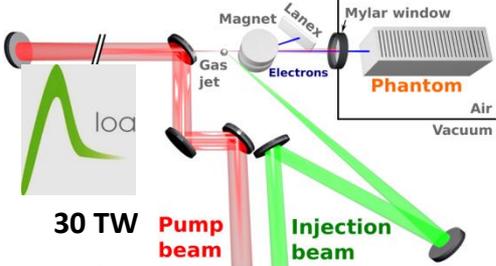
N.D. Powers, *Nature Photonics*, Vol. 8 (2014)

## Photons $\sim$ MeV avec spectre étroit

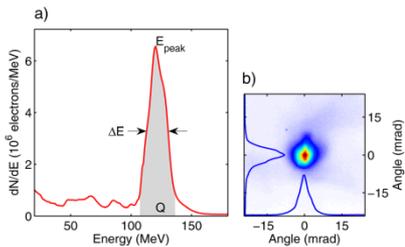


# Applications

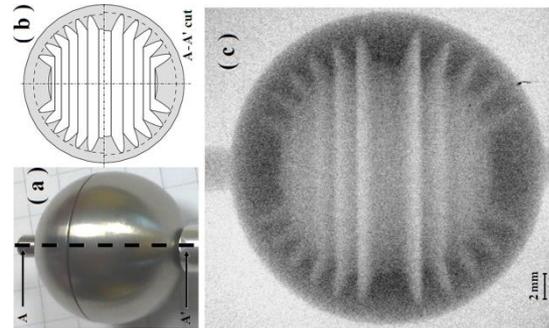
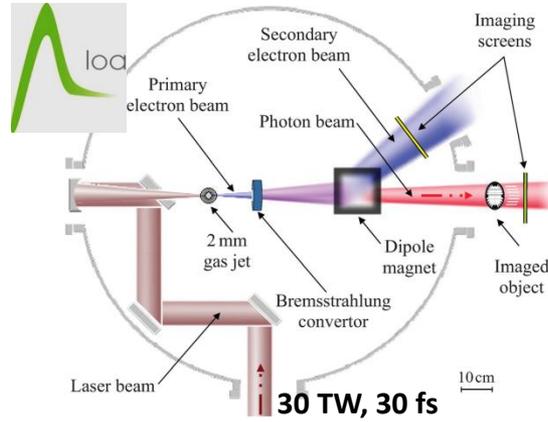
## Radiothérapie avec faisceau d'électrons



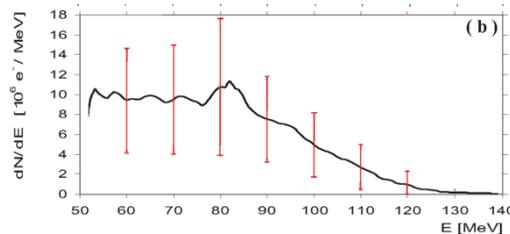
30 pC  $\rightarrow$  3 mGy / tir  
 Laser 10 Hz  $\rightarrow$  dose 2Gy en 1 mn  
*O. Lundh et al,*  
*Med. Phys. 39 (6), June 2012*



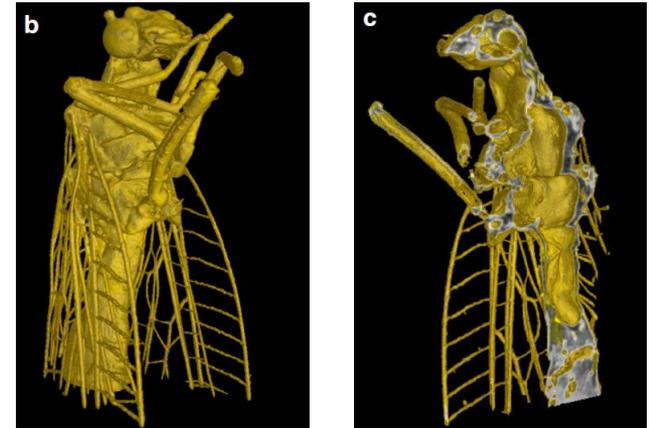
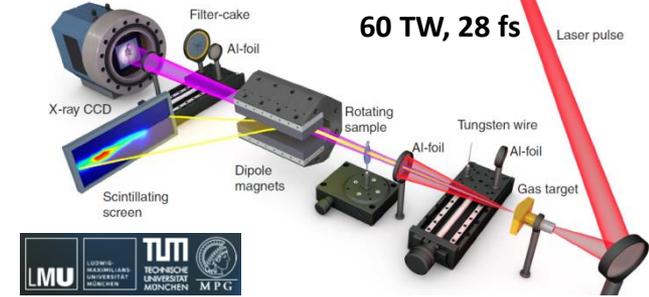
## Radiographie par rayon<sup>t</sup> bremsstrahlung



Resolution  $\sim 30\mu\text{m}$   
*Ben-Ismaïl et al,*  
*Appl. Phys. Letters 98, 264101 (2011)*

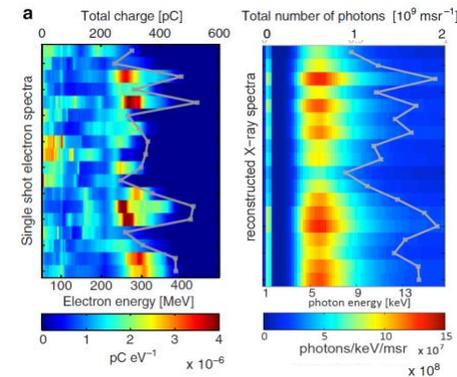


## Microtomographie en contraste de phase - betatron



*J. Wenz et al, Nature Communications 2015*

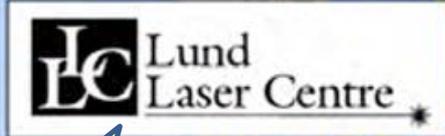
- spectre X  $\sim 5.5 \text{ keV}$
- source  $\sim 1.8 \mu\text{m}$
- Brilliance  $\sim 2 \times 10^{22}$



---

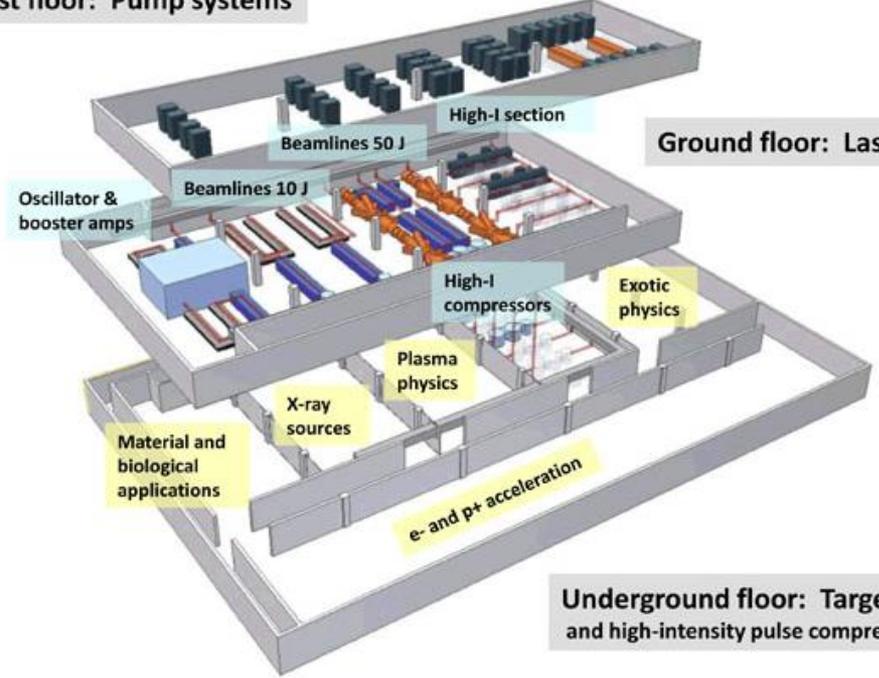
# Laboratoires de recherche En Europe

Facility	Lieu	Laser	Objectifs
CILEX-Apollon + satellites	Paris-Saclay	1 PW + 5-10 PW 15 fs 1 shot/mn	SLF: R&D sur accélération plasma (faisabilité et fiabilité)



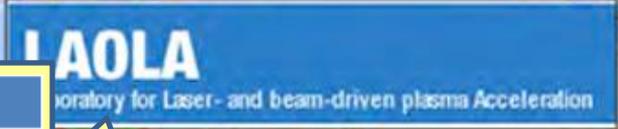
Facility	Lieu	Laser	Objectifs
ELI Beamlines	République tchèque	1-10 PW 10-150 fs 0.1 Hz	LWFA (1 GeV à 100 GeV) ; nouvelles techniques pour imagerie médicale et diagnostics, radiothérapie, Optiques X, etc

1st floor: Pump systems



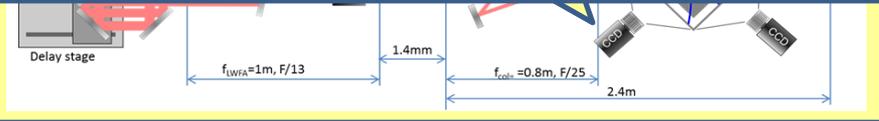
Ground floor: Lasers

Underground floor: Target areas and high-intensity pulse compression



paration à AWAKE  
rne, injection  
eV, ...

to use plasma  
scalability  
beam quality, FEL?  
ESY, Uni HH



---

# **Injection et qualité des faisceaux**

# Injection

## □ Préférable de découpler le mécanisme d'injection du mécanisme d'accélération

- ajustement indépendant des paramètres, stabilité, contrôle

## □ Importance de l'injecteur

- Détermine les performances de l'accélérateur : charge, dispersion en énergie, emittance

## □ Injection externe

- Bonne définition des faisceaux délivrés par les injecteurs conventionnels
- Difficultés: injection d'un paquet court  $< \lambda_p/4 \sim 10\mu\text{m}$  (30 fs)  
*remède : injection d'un paquet plus long, auto-comprimé et accéléré dans la champ de sillage mais limité à de faibles charges (1-2 pC)*
- Synchronisation entre laser et faisceau injecté

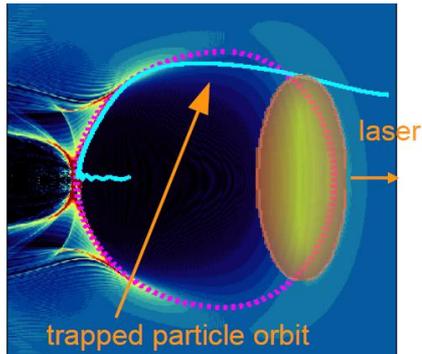
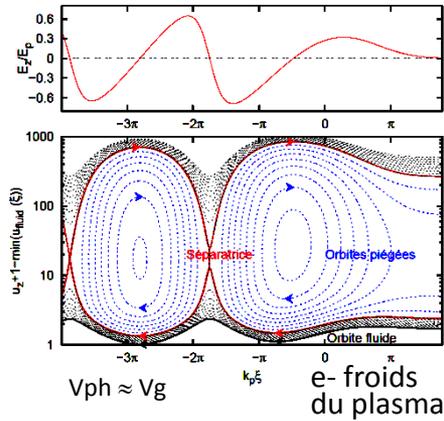
## □ Injection interne

- Différents mécanismes plus ou moins complexes à mettre en œuvre
- Difficultés: charges élevées  $> 100$  pC, faible dispersion en énergie

# Injection interne (1)

## Auto-injection

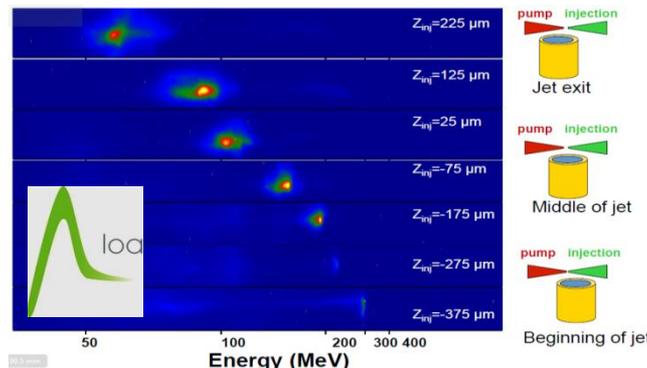
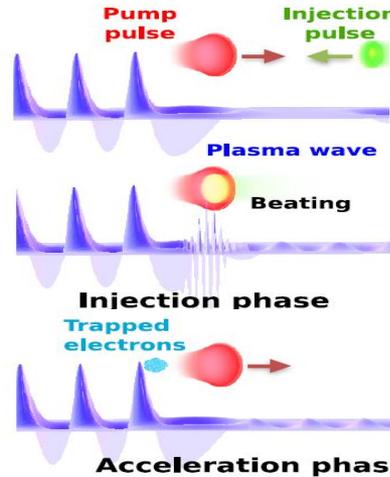
champ de sillage élevé pour capturer les électrons froids du plasma



- Injection sur l'axe ou hors-axe
  - Régime non-linéaire
  - Auto-focalisation
- ⇒ difficile à contrôler

## Injection optique par collision de pulses laser

pulse principal: excitation d'onde plasma sous seuil d'auto-injection  
 pulse d'injection contre-propagatif: génère un battement avec le pulse → déclenche l'injection

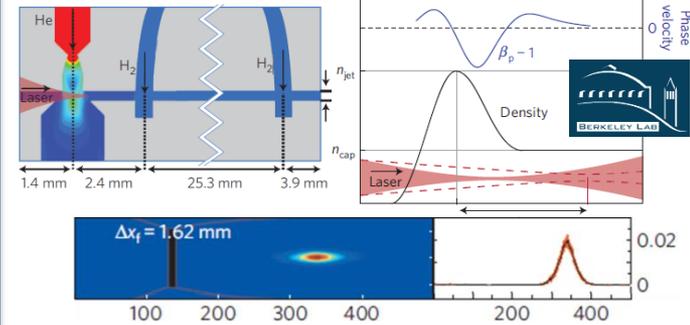


Faure et al, Nature 444 (2006)

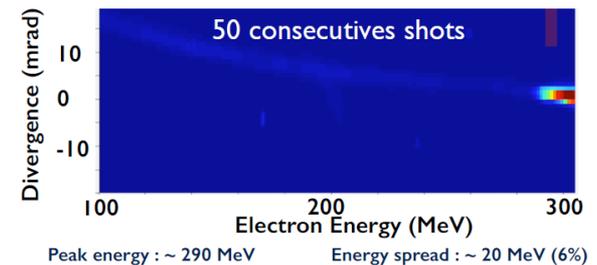
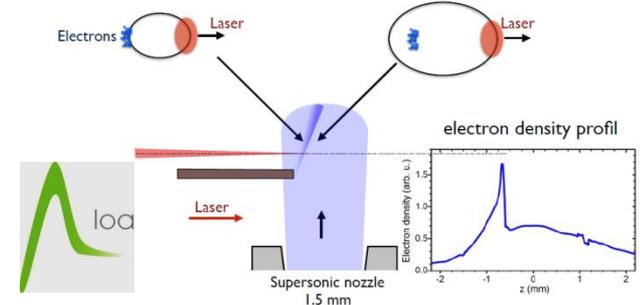
## Gradient de densité < 0

- **gradient doux**  $L_{grad} \gg \lambda_p$   
 → ralentit les champs de sillage

A.J. Gonsalves et al, Nature Physics (2011)



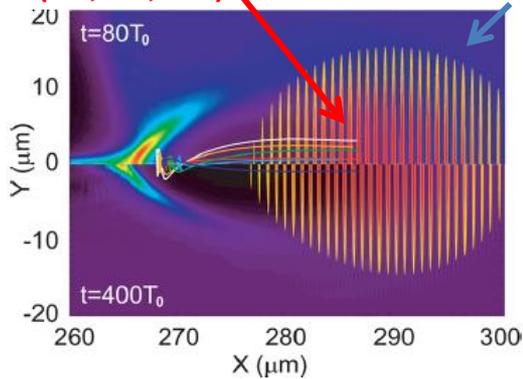
- **gradient raide**  $L_{grad} \leq \lambda_p$   
 → augmente la taille de la bulle  
 place les e- à la bonne phase



# Injection interne (2)

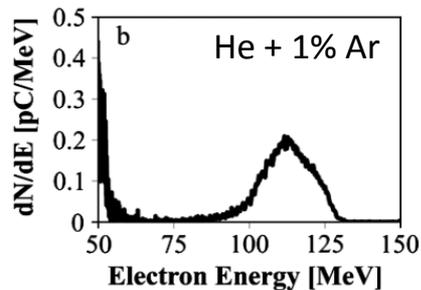
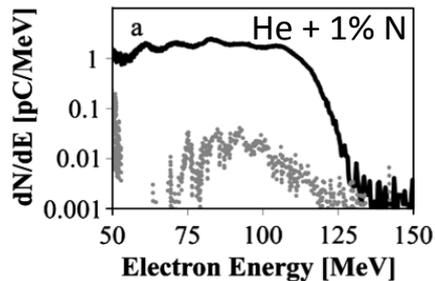
## Injection par ionisation

e- des couches profondes de N ( $N^{5+}$ ,  $N^{6+}$ ,  $N^{7+}$ )  
 e- des He ionisés et des couches externes de N



### Mélange gaz He + N (ou Kr)

Ionisation des couches profondes d'éléments lourds (N,Kr,Ar) au pic de l'intensité laser  
 → e- injectés à la bonne phase pour être capturés  
 Permet l'injection de paquets e- de charge élevée  
 > 100's pC mais grande dispersion en énergie



McGuffey et al., Phys. Rev. Lett. 104 (2010)

## Remèdes pour réduire la dispersion

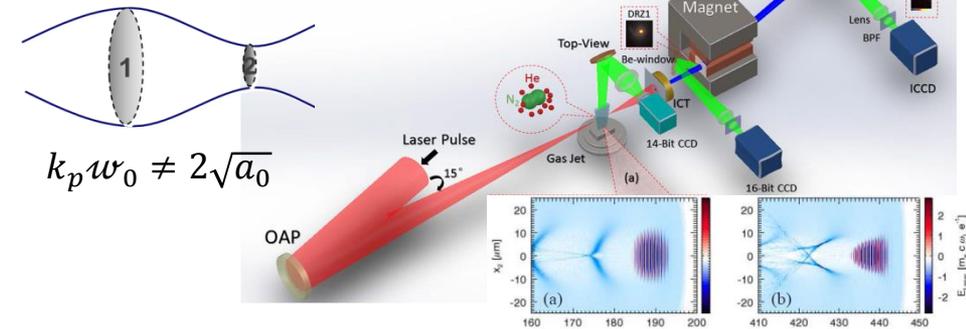
- Combinaison : injection par saut de densité assisté par ionisation (LOA)

C. Thaury et al, Nature Scientific Reports (2015)

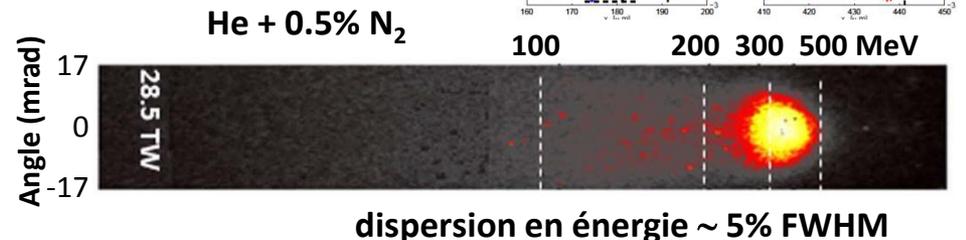
- Injection par ionisation auto-tronquée

M. Mirzaie et al, Nature Scientific Reports (2015)

Faisceau laser désadapté à l'entrée



→ Déformation de la bulle  
 Injection puis suppression



# Injection externe (1)

## □ 1<sup>ère</sup> injection externe au LULI

- Sillage par battement d'ondes  $E_z \sim 1$  GV/m
- Faisceau injecté 3 MeV  $\rightarrow$  4.5 MeV

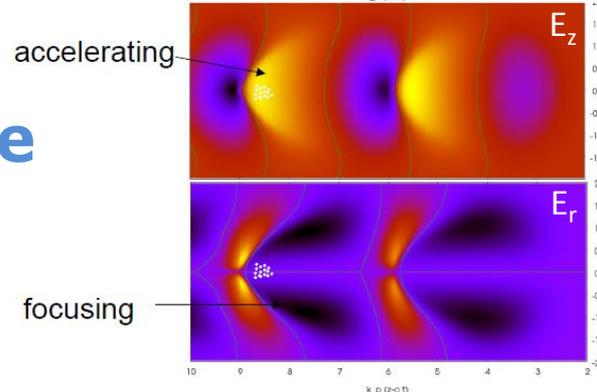
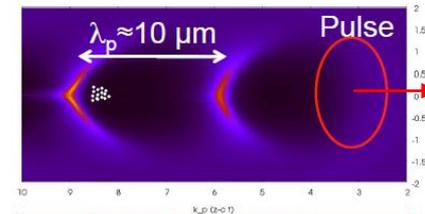
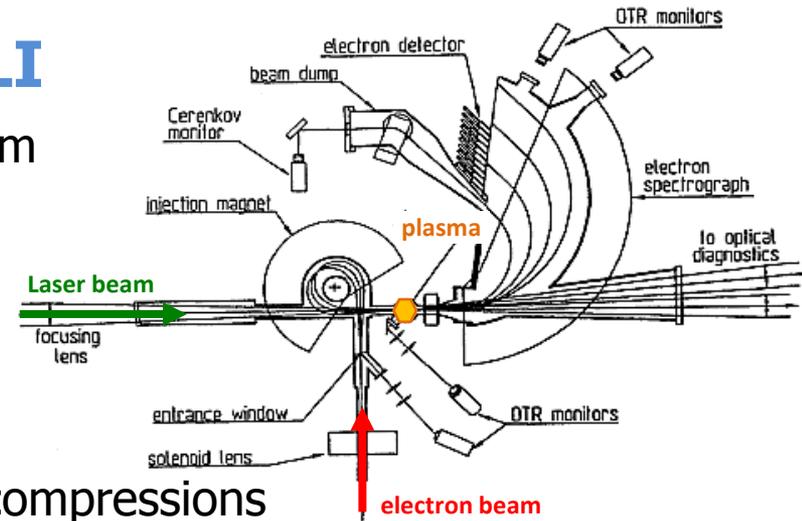
*F. Amiranoff et al, Phys. Rev. Lett. 81, 9950 (1998)*

## □ Difficultés

- Injecter un paquet court  $\sim 10$  fs  $< \lambda_p$   
 $\Rightarrow$  accélérateurs performants avec des compressions
- Remède: auto-compression d'un paquet long injecté mais limité à 1-2 pC
- Adapter le faisceau injecté aux paramètres de Twiss du plasma pour éviter une dilution d'emittance
- Synchroniser le faisceau injecté et le laser (qq fs)

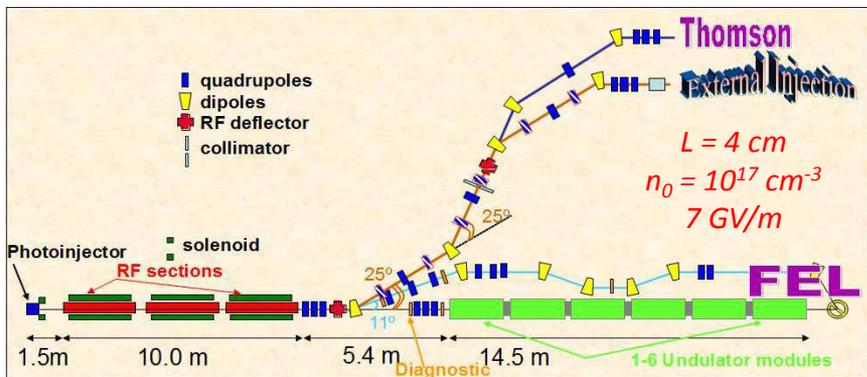
## □ Installations avec injection externe

- SPARC\_LAB (Frascati, Italie)
- REGAE (DESY, Allemagne)
- SINBAD (DESY, Allemagne)

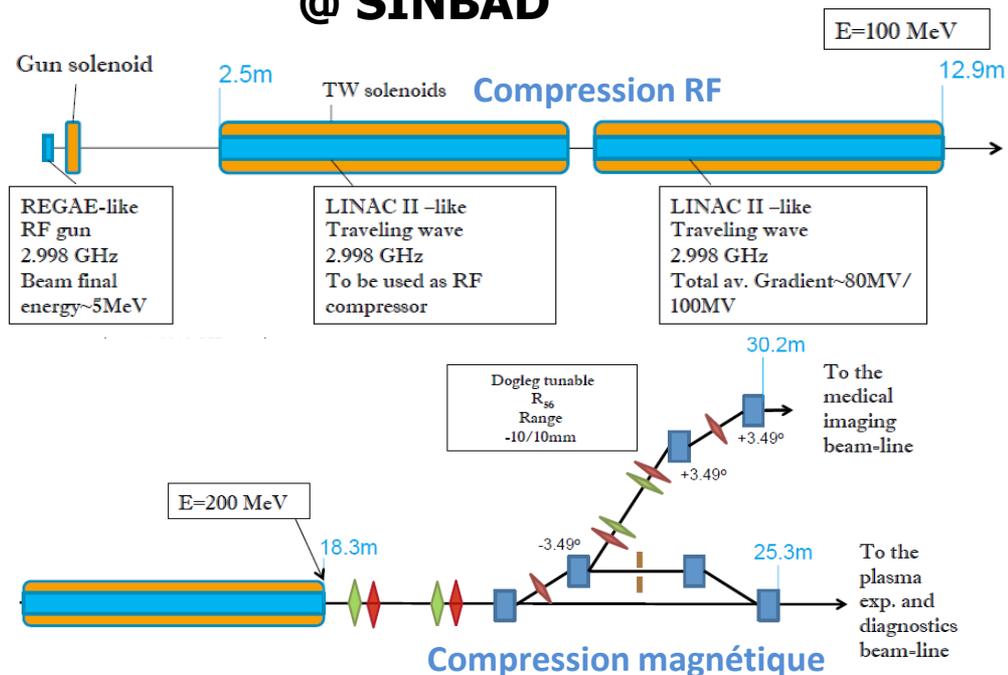


# Injection externe (2)

## @ SPARC\_LAB



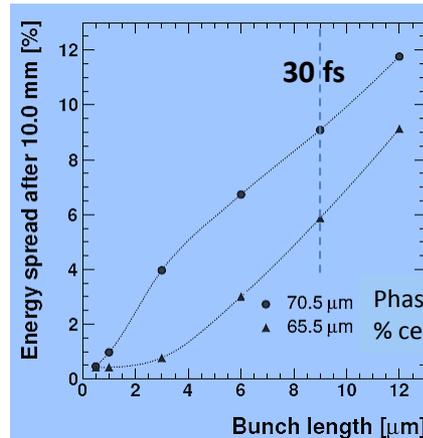
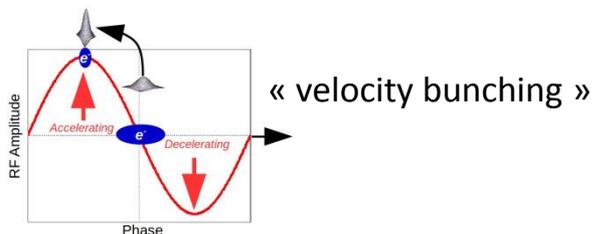
## @ SINBAD



$Q_b = 20 \text{ pC}$

	Cathode	Linac end	Dogleg end	Gas cell	Capillary
Energy (MeV)		80	80	120	630
Emitn (mm.mrad)		0.23	2.7	4.5	3.5
Bunchlength rms (fs)	300	70	30	4.5	3.5

Compression RF      Compression magnétique



Dispersion en énergie  
 d'un paquet injecté avec une  
 dispersion initiale de 0.1 %  
 après 10 mm de propagation  
 dans le plasma

# Dynamique faisceau transverse

## □ Adaptation du faisceau d'électrons

- Pour chacun des plans (x,y) : distribution du faisceau caractérisée par les 2<sup>èmes</sup> moments et l'emittance  $\epsilon_{rms}$

$$\langle x^2 \rangle = \beta \epsilon_{rms} \quad \langle xx' \rangle = -\alpha \epsilon_{rms} \quad \langle x'^2 \rangle = \gamma \epsilon_{rms}$$

**taille faisceau**  $\sqrt{\beta \epsilon}$     **divergence**  $\sqrt{\gamma \epsilon}$

- Dans la structure plasma : électrons soumis aux forces de focalisation  $k_\beta \Rightarrow$  oscillations betatrons

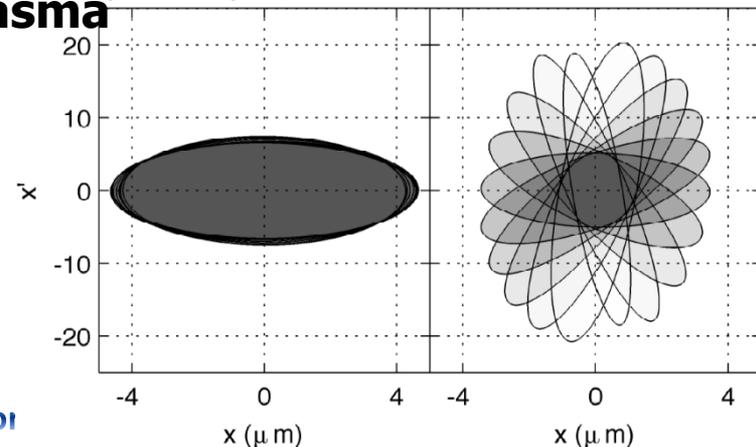
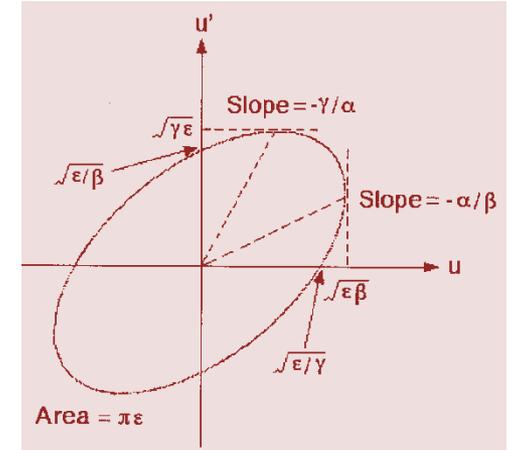
$$\sigma'' + k_\beta^2 \sigma = \epsilon^2 / \sigma^3 \quad k_\beta^2 = \frac{e}{\gamma_r m_e c^2} \frac{\partial [E_r - c B_\theta]}{\partial r}$$

*sans charge d'espace, sans accélération*

paramètres de Twiss correspondants

$$\beta_m = \frac{1}{k_\beta} = \frac{c}{\omega_\beta} = \frac{1}{\gamma_m} \quad \alpha_m = 0$$

- **Si faisceau externe non adapté au plasma**  
 $\Rightarrow$  **décohérence du faisceau**
- Cause: dispersion en fréquence betatron ou en énergie entre les différentes tranches longitudinales du faisceau



# Paramètres faisceau accélérateurs plasma

## □ Exemple

*densité*  $n_0 = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \Rightarrow \lambda_p = 105.6 \mu\text{m}$   
*potentiel vecteur normalisé*  $a_0 = 0.8$   
*waist*  $w_0 = 50 \mu\text{m}$

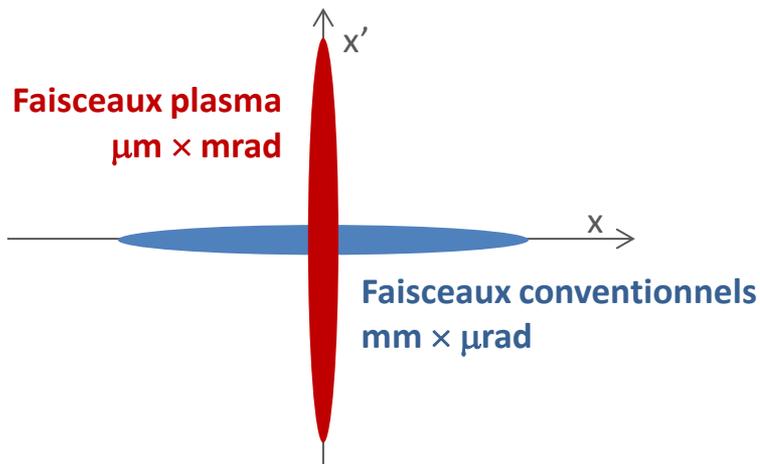
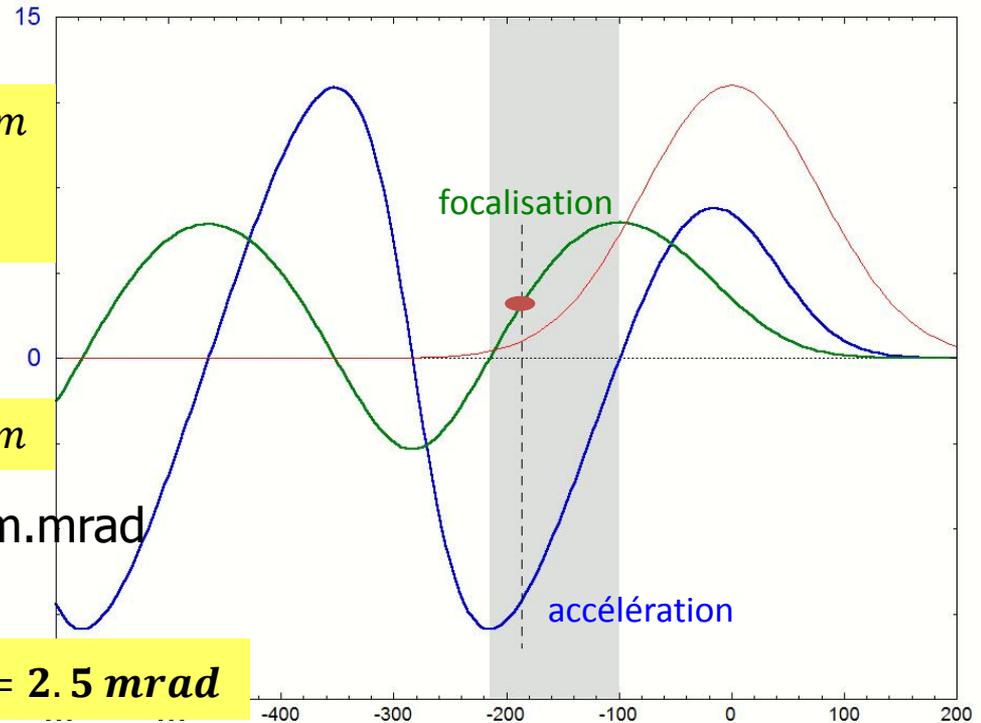
Paquet d'électrons placé dans la région accélération et focalisation

$E_z \sim 10 \text{ GV/m}$   $E_r \sim 2.4 \text{ GV/m}$  @  $r = 25 \mu\text{m}$

Faisceau 100 MeV, emittance  $1 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$

$\Rightarrow k_\beta = 1250$   $\beta_m = 0.8 \text{ mm}$

**taille  $\sqrt{\beta \epsilon} = 2 \mu\text{m}$  divergence  $\sqrt{\gamma \epsilon} = 2.5 \text{ mrad}$**

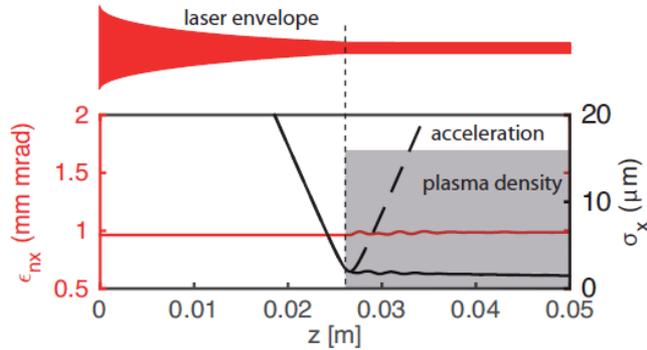


grande divergence + grande dispersion en énergie\*  
 $\Rightarrow$  exigences sévères sur les optiques faisceau + forte croissance d'emittance dans le drift après le plasma

\*causes: accélération hors crête, glissement de phase entre laser et électrons, remplissage sur une large extension en phase pendant l'injection

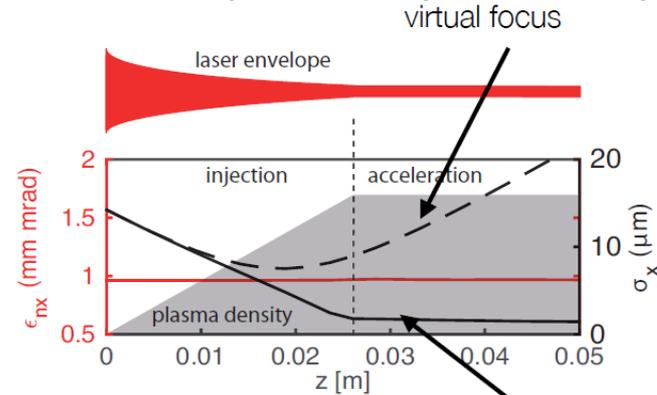
# Remède : transition douce ( $n_0, a_0$ ) entre plasma et vide

## Injection externe: SPARC-LAB, REGAE, SINBAD, ...



### Adaptation sans transition

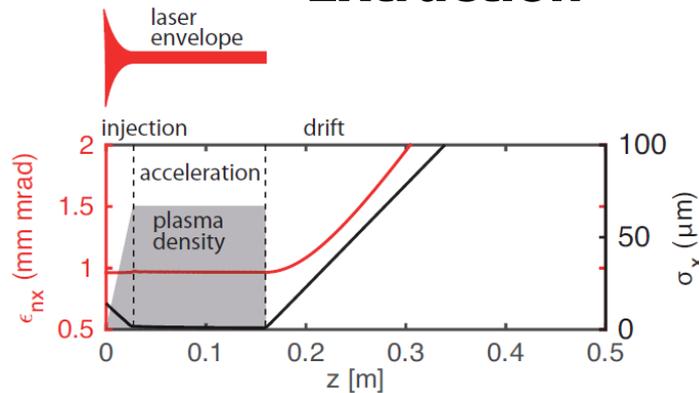
Optique difficile à réaliser ( $\beta \sim 0.8\text{mm}$ )  
Très sensible au jitter de position



### Adaptation avec transition

Paramètres relâchés ( $\beta \sim 12\text{mm}$ )  
Faisceau capturé sur la pente montante

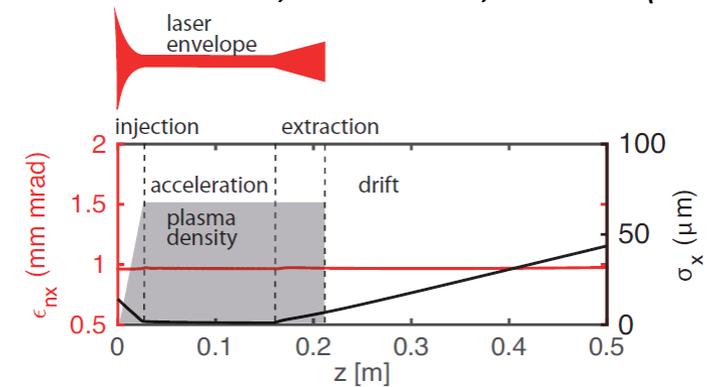
## Extraction



### Transition plasma/vide abrupte

Grande divergence, augmentation emittance

*I. Dornmair et al, PRSTAB 18, 041302 (2015)*

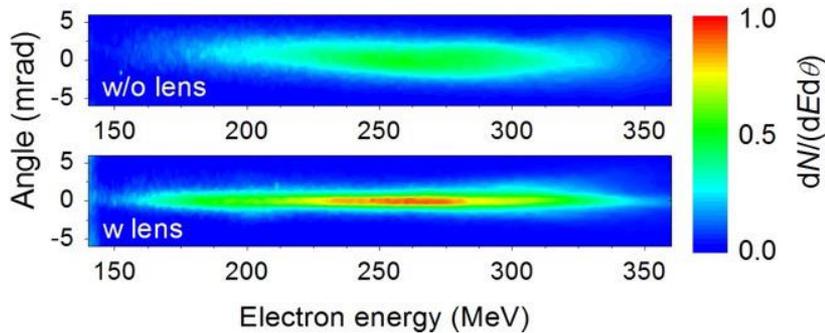
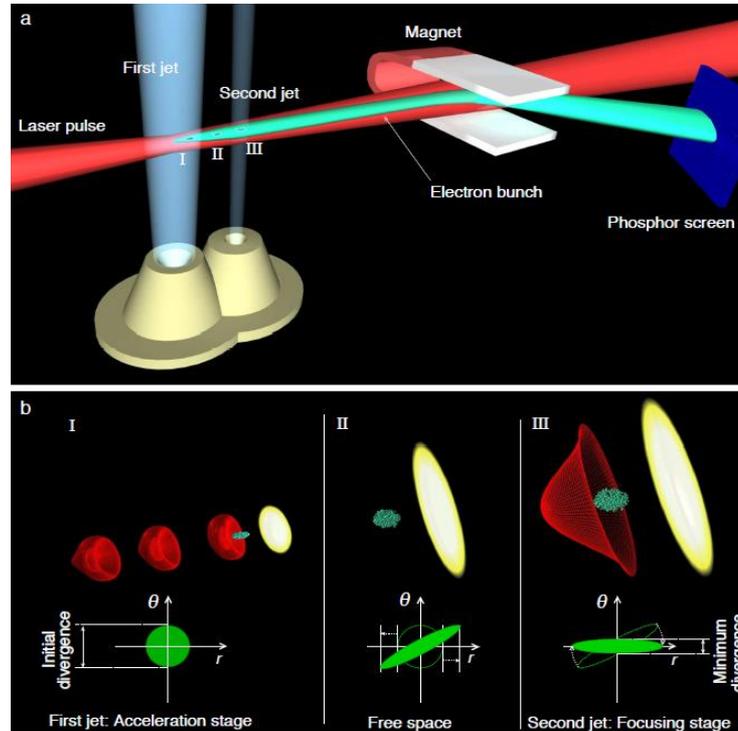


### Réduction douce des champs focalisants

Faible divergence, emittance  $\sim$  constante

# Lentille laser plasma

- Faisceau accéléré dans le 1er jet
- étiré dans le drift
- focalisé dans le 2ème jet



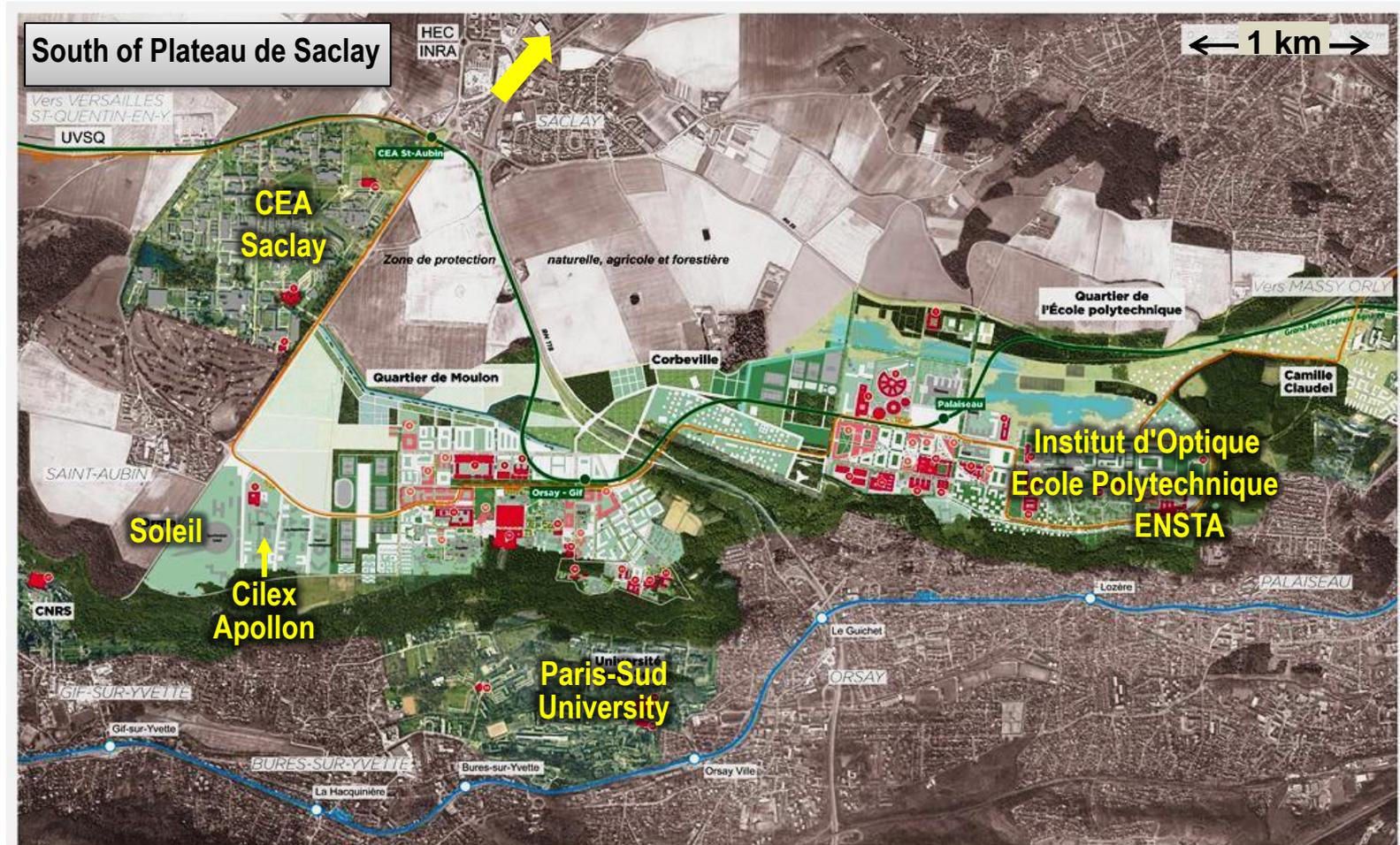
Après optimisation distance et densité  
 → **réduction divergence  $\sim 2.6 \pm 0.7$**

# CILEX-APOLLON



# Projet CILEX-APOLLON

- centre interdisciplinaire CILEX en construction sur le "Plateau de Saclay"
- lasers multi-PW APOLLON → physique à des densités de puissance non explorées
- des centrales de proximité pour des programmes pluridisciplinaires
- utilisé par la suite comme une installation avec utilisateurs "user-facility"



# APOLLON laser beams

## ❑ Haute intensité laser

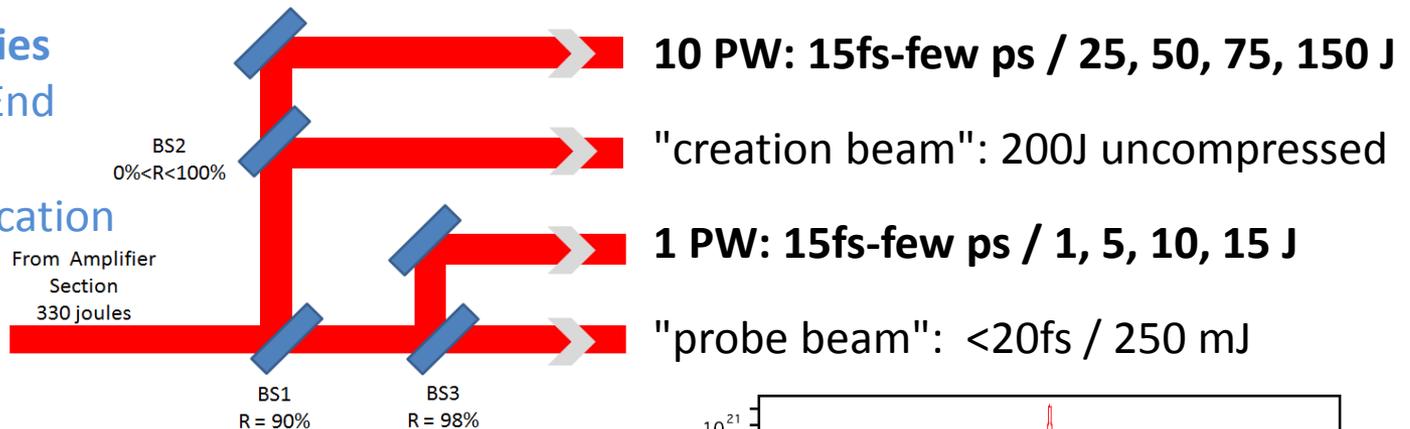
- $I > 10^{22} \text{ W/cm}^2 \Rightarrow$  vecteur potentiel  $a_0 = 0.85 \lambda_{(\mu\text{m})} \sqrt{I_{(10^{18}\text{W/cm}^2)}} > 100$

## ❑ Multi faisceaux: 4 faisceaux independants, énergies variables par pas

- Pour des expériences pompe-sonde et de l'acceleration laser multi-étages

### Laser technologies

- OPCA Front End
- Ti:Sapphire power amplification



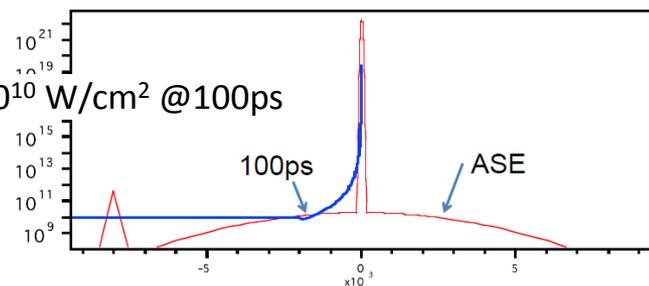
## ❑ Contraste élevé

incoherent contrast  $I < 10^{10} \text{ W/cm}^2 @ 100\text{ps}$

## ❑ Taux de répétition: 1 shot / mn

## ❑ Fiabilité et stabilité

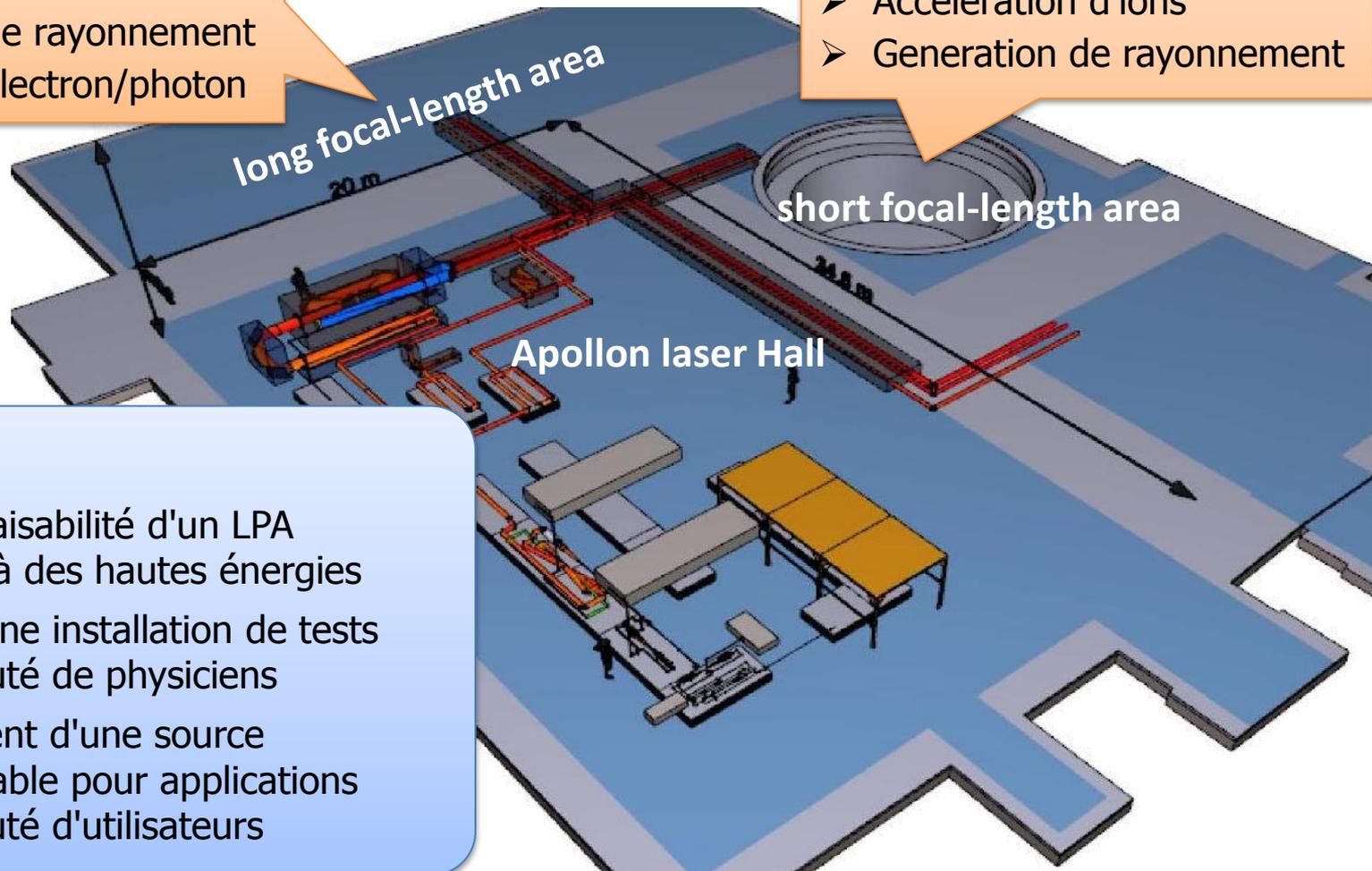
- Stabilité de pointé: alignement sur cible = 1 tache focale en absolu
- Synchronisation faisceaux (lignes à retard): 30% durée du pulse (10% par la suite)



# Objectifs

- Haute intensité
- Cibles gazeuses
- Accélération d'électrons
- Génération de rayonnement
- Interaction électron/photon

- Haute intensité
- Cibles solides
- Accélération d'ions
- Génération de rayonnement



## Objectives

- Etude de la faisabilité d'un LPA extrapolable à des hautes énergies
- Réalisation d'une installation de tests  
→ communauté de physiciens
- Développement d'une source d'électrons fiable pour applications  
→ communauté d'utilisateurs

# Plan de développement

## ☐ PHASE 1: 2013-2016

### **Conception des expériences in Long Focal-length Area (LFA)**

- R&D amont sur des installations satellites (LOA, UHI100)
- Etude technique du dispositif expérimental (CILEX)
- Approvisionnement et mise en oeuvre des équipements en LFA

## ☐ PHASE 2: 2017-2018

### **Commissioning du 1<sup>st</sup> faisceau PW et de l'installation via le mécanisme de LPA dans le régime non linéaire**

- Comparaison aux lois d'échelle et expériences exploratoires
  - énergie en fonction de la densité de plasma et puissance laser
  - mécanismes d'injection variés (shock injection, assisté par ionization)
- Optimisation de l'injecteur
  - Pour fournir des paquets d'électrons  $\sim 100$  pC dans la gamme 50-300 MeV
  - Avec faible dispersion en énergie ( $\leq 10\%$ ) divergence ( $\leq 10$  mrad)

## ☐ PHASE 3: 2019-2021

### **Developpement d'un LPA à deux étages (Injecteur/accélérateur)**

- transport faisceau, focalisation, synchronisation, et injection dans une onde plasma sur une longue distance

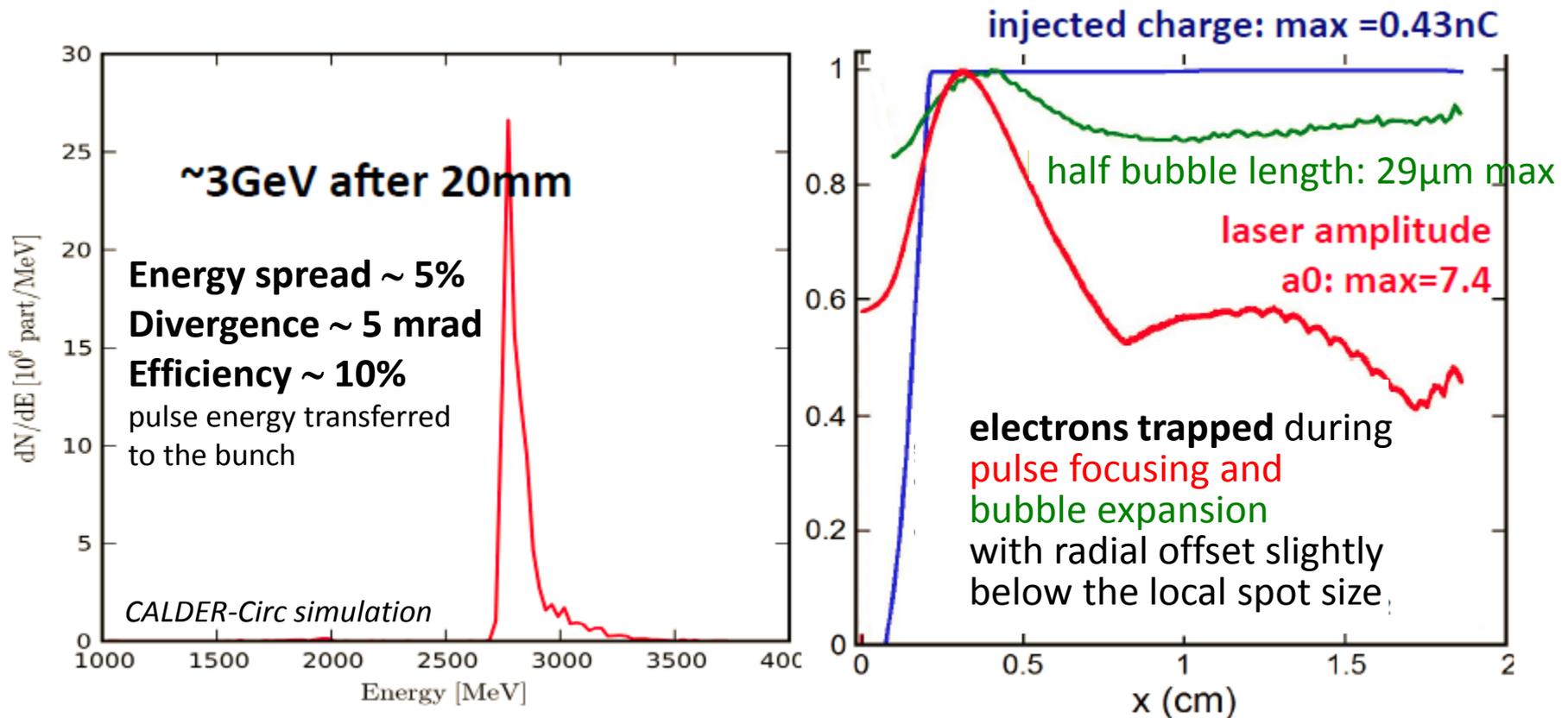
# Exemple de 1<sup>ère</sup> expérience simple étage

- Paramètres pour accélération dans le régime de la bulle avec auto-injection d'e<sup>-</sup> et auto-focalisation
- Faisceau quasi-monoénergétique 100 pC énergie jusqu'à 3 GeV après ~20 mm d'accélération

$$P = 0.6 \text{ PW} \quad \tau_L = 25 \text{ fs} \quad a_0 = 4.3$$

$$I_0 = 4 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2 \text{ at focus}$$

$$r_0 = 30 \mu\text{m} \quad n_0 = 8.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

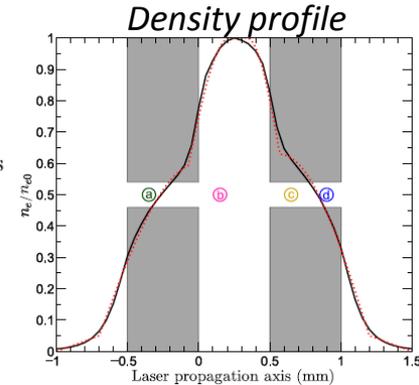
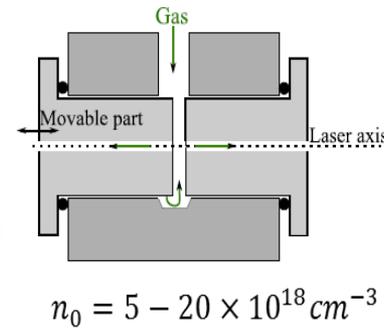
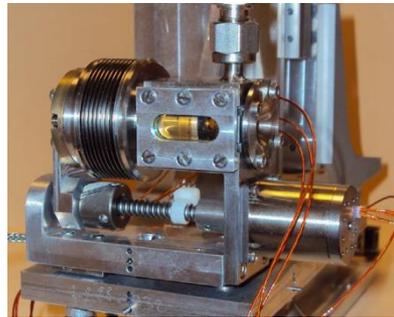
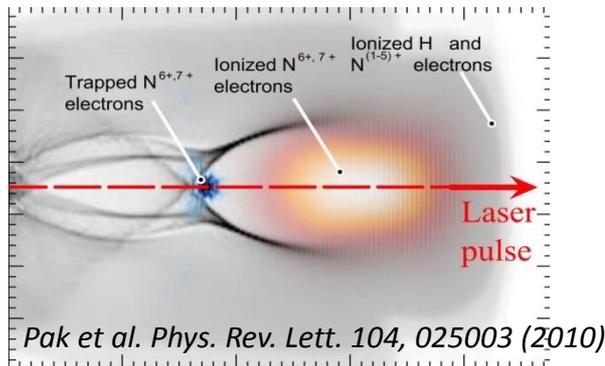


A. Beck et al., NIM A 740 (2014)

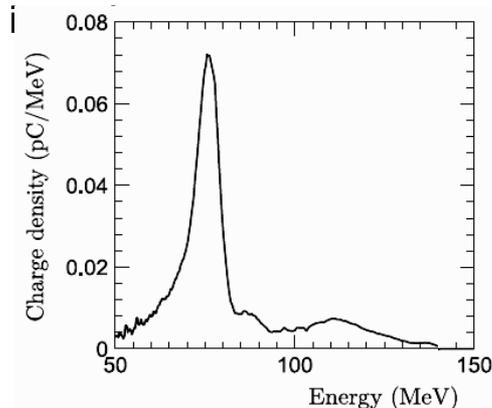
# R&D amont sur l'Injecteur

## □ ELISA - Electron Injector for compact Staged high energy Accelerator

- Expériences @ LCC facility (Lund) and @ UHI100 facility (CEA Saclay)
- Cellule Gaz (meilleure stabilité que jet gaz) de longueur variable (<10mm)
- Injection par Ionization → mélange de gaz ( $H_2 \sim 1\% N_2$ )



Ionisation et capture des e- des couches internes d'atomes Z élevé (azote) au pic de l'intensité laser



Ex. experimental result @UHI100

$E_p = 76 \text{ MeV}$ ,  $\Delta E/E = 10\%$

$L_{\text{cell}} = 1.5 \text{ mm}$ ,  $n_0 = 1.2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

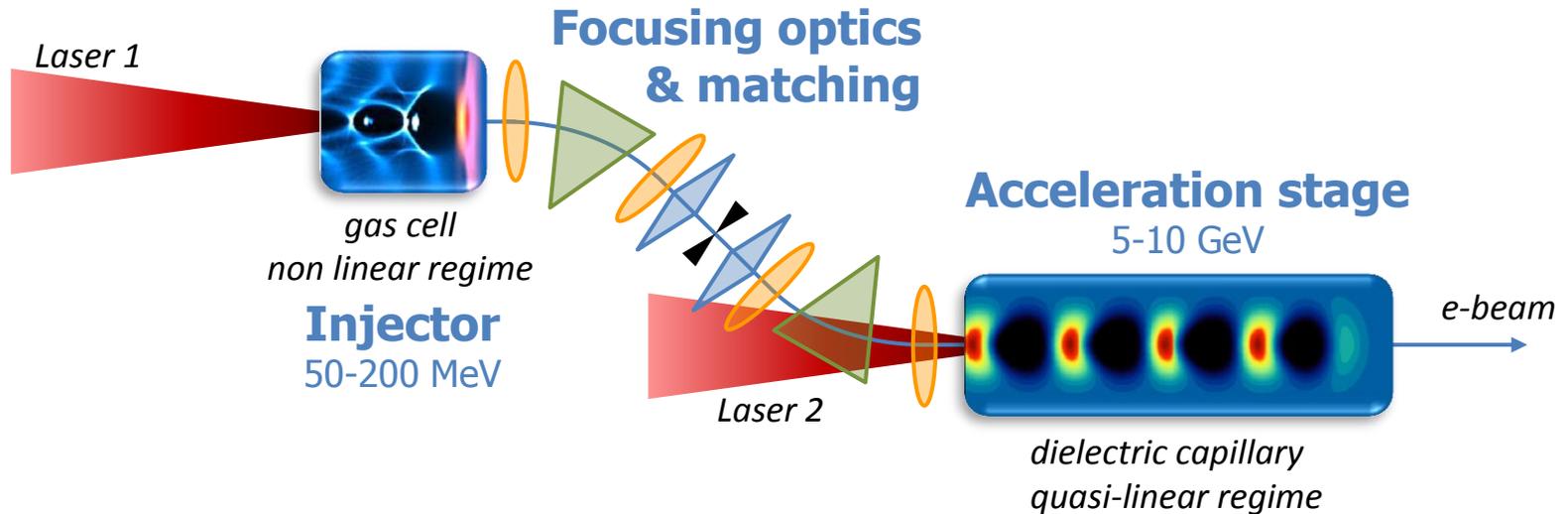
*R.L. Audet et al. (Jan. 2016)  
 Nucl. Inst. & Meth. Phys. Res. A*



# Accélération 2 étapes

## Préparation de l'accélération 2-stage : réalisations des équipements pour

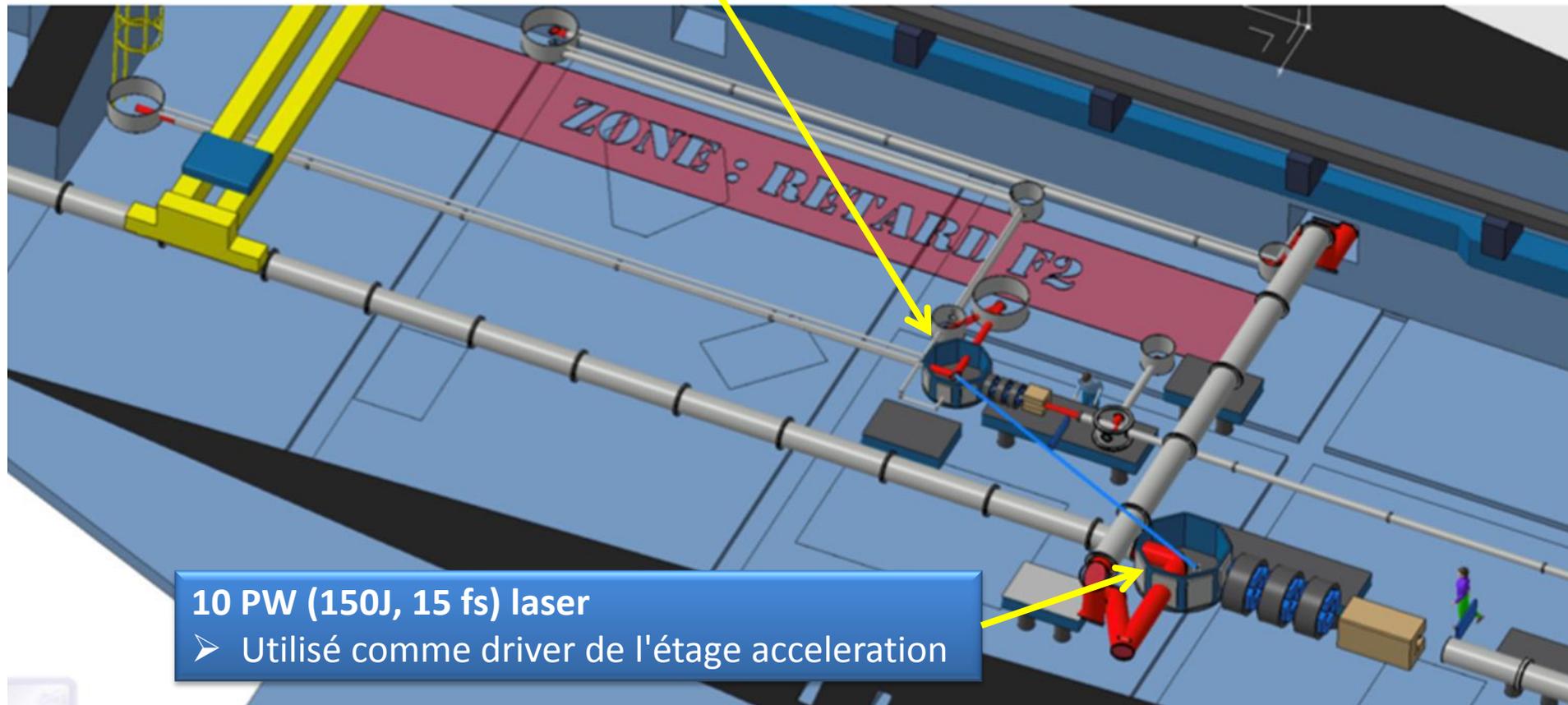
- caractériser les paquets d'électrons (distributions spatiales et en énergie)
- Synchroniser les paquets d'électrons et le faisceau laser
- transporter et adapter le faisceau d'électrons au 2<sup>ème</sup> étage
- guider le faisceau laser sur de grandes distances (0.1-1 m)



# Aire expérimentale

## 1 PW (15J, 15 fs) laser

- Utilisé en premier comme driver pour injection et accélération dans un seul étage avec différentes cibles
- puis comme driver pour un injecteur optimisé

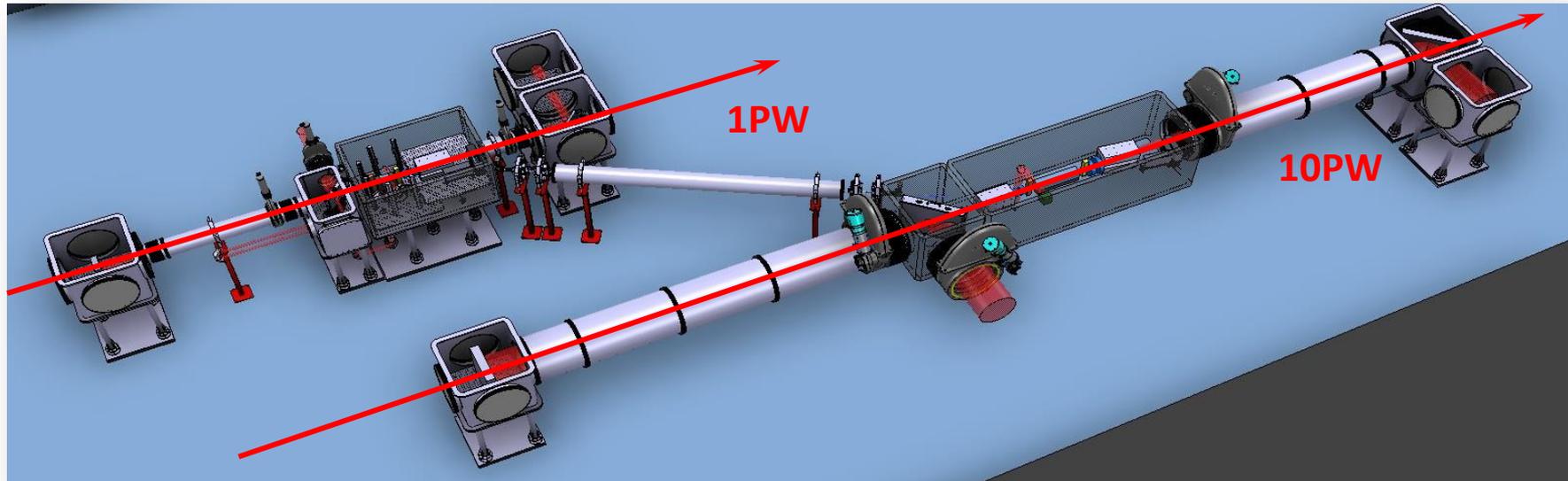


## 10 PW (150J, 15 fs) laser

- Utilisé comme driver de l'étage accélération

# Baseline design

## □ 2 aires expérimentales IA1 (10 PW) and IA2 (1 PW)



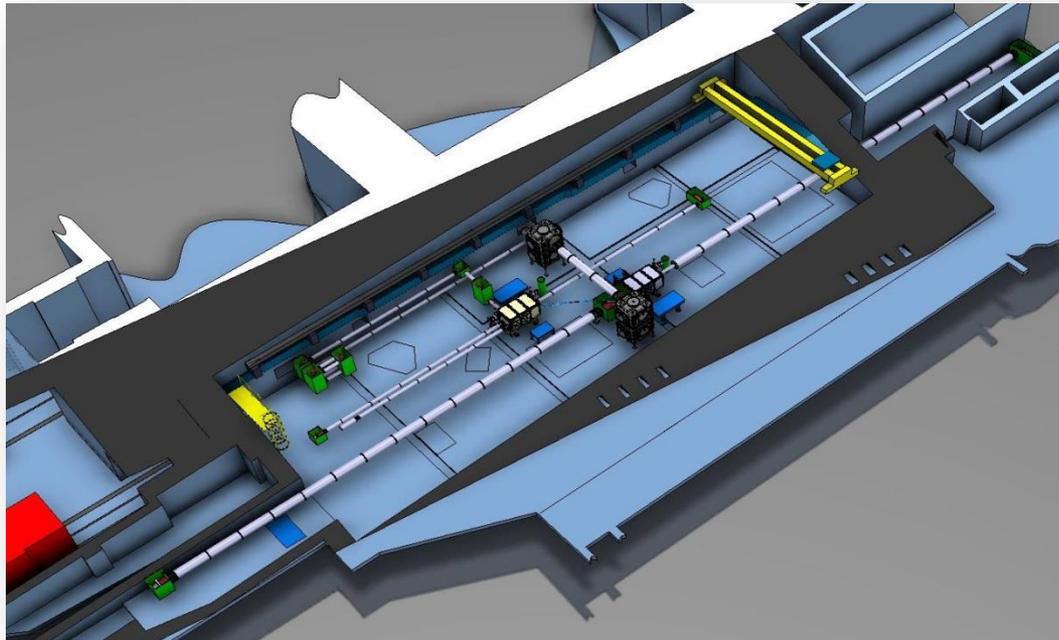
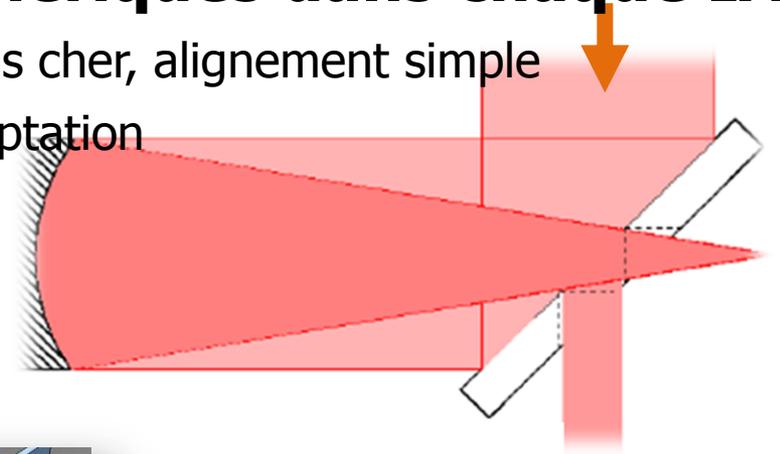
## □ Pour chaque zone d'interaction

- transport laser jusqu'au système de focalisation, avec système vide
- Deux miroirs de focalisation de longueurs focales différentes
- chambres d'interaction sous vide
- Instrumentation cible (jet/cell+target platform+feed)
- Spectromètres pour e<sup>-</sup> (Q2D or Q3D):
- 1 ligne de transport e<sup>-</sup> IP2->IP1 à une énergie fixée

# Laser beam transport

## □ Focalisation avec miroirs sphériques dans chaque IA

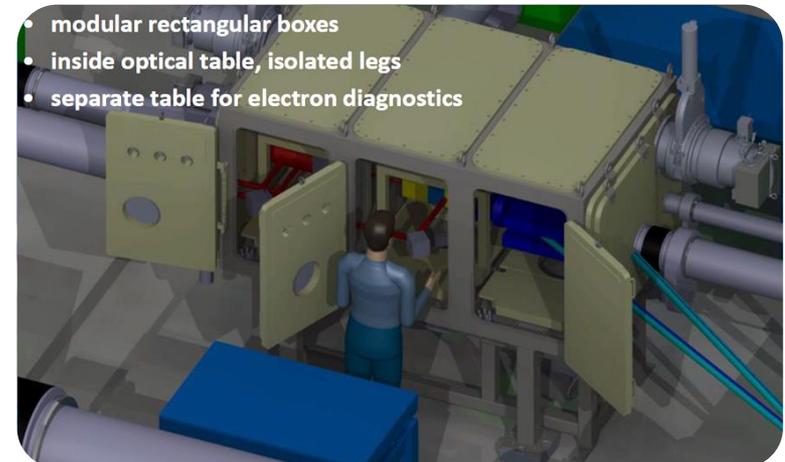
- Plutôt que des paraboles hors axe: moins cher, alignement simple
- Différentes Longueurs focale :  $I_0 w_0$  adaptation  
F1 (10 PW,  $\varnothing$  400 mm) 8m, 16m, 32 m  
F2 ( 1 PW,  $\varnothing$  140 mm) 3m, 8m, 14 m
- Utilisation du faisceau  
issu du miroir percé pour diagnostics



Implantation générale  
(plus grande focale)

# Résumé LFA

- ❑ Programme court et moyen termes pour l'accélération d'électrons avec lasers multi-PW
- ❑ Installation ouverte aux contributions scientifique & techniques
  - 2 zones d'interaction indépendantes, longueur focale variable :  $I_0 \ w_0$
  - Chambres à vide modulaires, diagnostics résidents & système d'alignment
- ❑ Configuration flexible & accès ouvert aux utilisateurs intern.
  - Adaptation à des configurations externes, cibles et diagnostics
  - Possibilité d'expériences orientées application avec electrons, gamma, X-rays
- ❑ Forte synergie avec Desig Study EuPRAXIA !



dans la mythologie grecque, Eupraxia était l'incarnation du **bien-être**, en médecine, le terme Eupraxia désigne la capacité normale d'effectuer des **mouvements coordonnés**

**16 bénéficiaires de 5 Etats membres EU  
plus 18 partenaires associés**

# EuPRAXIA



# Fait marquant IRFU

05 novembre 2015

## Démarrage du projet européen EuPRAXIA pour un accélérateur plasma piloté par laser



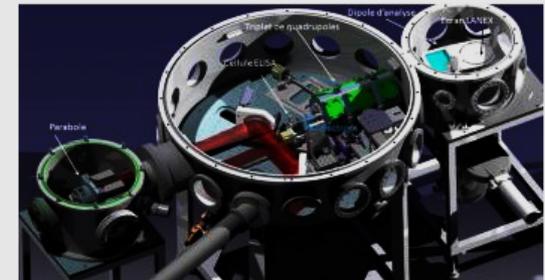
En s'impliquant fortement dans le projet européen EuPRAXIA (European Plasma Research Accelerator with eXcellence In Applications), le CEA, le CNRS et SOLEIL confirment leur engagement dans les nouvelles techniques d'accélération plasma piloté par laser. D'ici à la fin 2019, EuPRAXIA produira un rapport d'étude de conception sur le premier accélérateur plasma mondial de 5 GeV, desservant des aires expérimentales dédiées et avec la qualité de faisceau requise par les utilisateurs. Fort de son expérience en conception de systèmes d'accélération, en dynamique de faisceaux et de sa contribution à l'expérience d'accélération plasma dans le cadre de CILEX (Centre Interdisciplinaire Lumière Extrême) l'Institut de Recherche dans les Lois Fondamentales de l'Univers (IRFU) est fortement impliqué dans la simulation, le transport et la manipulation du faisceau d'électrons.

### Objectifs du projet EuPRAXIA

L'Union européenne soutient le développement d'un nouvel accélérateur de particules plasma piloté par laser avec trois millions d'euros du programme Horizon 2020. Le projet EuPRAXIA (European Plasma Research Accelerator with eXcellence In Applications) produira une étude de conception pour un accélérateur de recherche plasma européen orienté vers les applications de nouvelle technologie. L'accélération plasma a pour ambition de diminuer drastiquement à la fois les coûts et la taille des accélérateurs de particules pour la science, les applications médicales et industrielles.

L'étude portera sur **la technologie d'accélérateur, les systèmes laser, la dynamique de faisceau et les boucles de rétro-action pour améliorer la qualité des faisceaux accélérés dans les structures plasma.**

Deux aires pour utilisateurs seront développées pour un laser à électron libre novateur, la physique de haute énergie et d'autres applications. Un scénario de mise en œuvre sera proposé, incluant une étude comparative de sites possibles en Europe, une estimation de coût et un schéma de construction distribuée pour l'installation sur un site central. En tant que nouvelle grande infrastructure de recherche, EuPRAXIA placera l'Europe au tout premier rang de développement d'accélérateurs plasma pilotés par les lasers les plus puissants du monde de l'industrie européenne dans les années 2020.



*Vue de l'expérience ELISA, précurseur de l'accélération LASER, piloté par le laser UHI 100 de l'Iramis/Lidyl (collaboration LPGP-IRFU-LIDyL-LLR-LAL)  
Credit: CEA/LIDyL*

# Objectifs



**EUROPEAN  
PLASMA RESEARCH  
ACCELERATOR WITH  
EXCELLENCE IN  
APPLICATIONS**

**DESIGNING THE FUTURE**  
The EuPRAXIA Consortium is preparing a conceptual design for the world's first multi-GeV plasma-based accelerator with industrial beam quality and dedicated user areas.

**ADVANCED TECHNOLOGIES**  
EuPRAXIA joins novel acceleration schemes with modern lasers, the latest correction technologies and large-scale user areas. The consortium offers unique training opportunities for researchers in a multidisciplinary field.

**OPENING NEW HORIZONS**  
The project will bridge the gap between successful proof-of-principle experiments and ground-breaking, ultra-compact accelerators.  
With a smaller size and improved efficiency, plasma-based technologies have the potential to revolutionize the world of particle accelerators multiplying their applications to medicine, industry and fundamental science.

**INTERNATIONAL COLLABORATION**  
EuPRAXIA brings together a consortium of 16 laboratories and universities from 5 EU member states. The project, coordinated by DESY, is funded by the EU's Horizon 2020 programme.  
The consortium holds open international events to strengthen collaborations, to connect to interested users from FEL's, high-energy physics, medicine and industry, and to assess the development of the project.

**CONTACT US:**  
**Project Coordination**  
Dr. Ralph Assmann,  
DESY (Coordinator)  
Dr. Arnd Specka,  
CNRS/IN2P3 (Deputy)

**Primary Coordinator Contact**  
Mrs. Ruth Mundt, DESY  
eupraxia-admin@desy.de

**Media Enquiries**  
Prof. Dr. Carsten P. Welsch,  
Cockcroft Institute/Univ. of Liverpool  
carsten.welsch@cockcroft.ac.uk

[www.eupraxia-project.eu](http://www.eupraxia-project.eu)

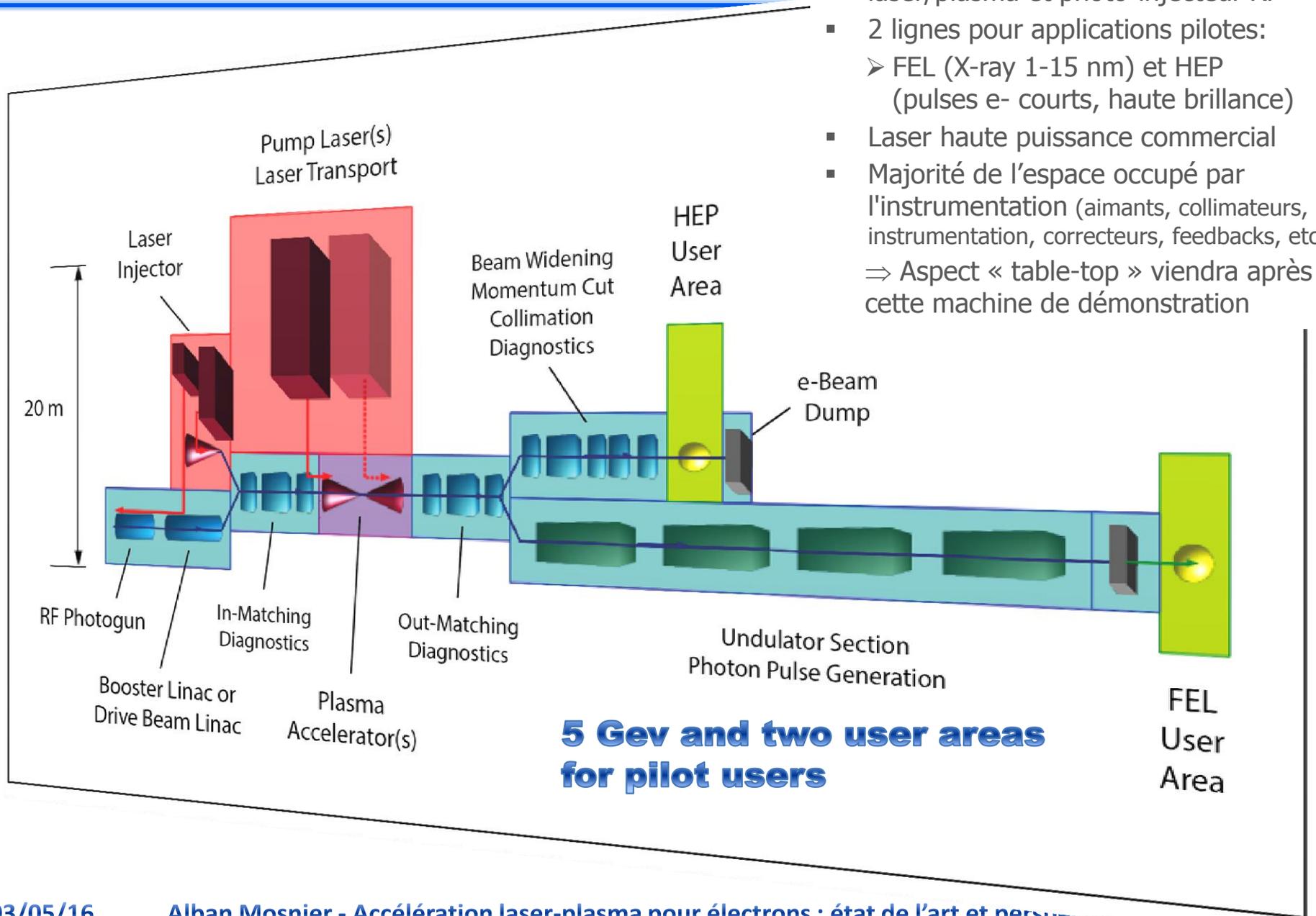
The project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 101019718. The information contained herein is confidential and intended solely for the individual named. Its disclosure to other parties is not permitted.

- ❑ Concevoir, proposer et réaliser une installation "accélérateur d'électrons par laser-plasma" européenne, pour la recherche et les applications
- ❑ Fédérer la communauté Eu LPA et le financement autour d'un projet collaboratif (à la HEP/Acc)
- ❑ Les étapes :
  1. conceptual design study "**EuPRAXIA**"
  2. se placer sur la **roadmap ESFRI**
  3. processus de décision et recherche de financement, construire l'installation

# MOTIVATIONS

- ❑ La prochaine étape (2020-30): vers un projet EU de taille intermédiaire (nombreux projets nationaux de petite taille)
- ❑ L'Europe est leader dans plusieurs domaines de R&D LPA (lasers, sources plasma, théorie)
- ❑ Records mondiaux US obtenus avec technologie EU
- ❑ Valoriser l'expertise des installations existantes
- ❑ Focaliser sur les applications potentielles (déficit actuel)

# CONCEPT



- 2 types d'injecteur : laser/plasma et photo-injecteur RF
- 2 lignes pour applications pilotes:
  - FEL (X-ray 1-15 nm) et HEP (pulses e- courts, haute brillance)
- Laser haute puissance commercial
- Majorité de l'espace occupé par l'instrumentation (aimants, collimateurs, instrumentation, correcteurs, feedbacks, etc)  
⇒ Aspect « table-top » viendra après cette machine de démonstration

# Structure projet

- ❑ 16 bénéficiaires de 5 Etats membres (G, F, UK, I, P) et 18 partenaires associés
- ❑ Financement EU: 3 M€ ~ 42 h.a (postdocs, PhD) +missions soit 10 ETP scientifiques sur 4 ans dédiés à EuPRAXIA
- ❑ Encadrement, contributions WP ~ 81 h.a in-kind
- ❑ Répartition de la part française (30% du total)

▪ CNRS (LPGP,LULI,LLR,LOA)	527 k€
▪ CEA	263 k€
▪ SOLEIL	132 k€
	-----
Total	922 k€



## □ **Financement limité** (3 M€ sur 4 ans)

- Premier pas pour apparaître sur la feuille de route de l'ESFRI
- Après, un projet d'accélérateur plasma ~ 200 M€ peut être envisagé

## □ **Installation dédiée à 2 utilisateurs pilotes**

- X-ray FEL ultra-compact avec large gamme d'applications et exploitant les paramètres uniques de faisceaux d'électrons issus d'accélérateurs plasma
- Source d'électron multi-GeV ultra-compacte pour des tests de détecteurs HEP

## □ **Mise en œuvre: Principe = financement partiel**

- nombre limité de Workpackages sont inclus officiellement (doivent fournir le reporting) et pour lesquels un financement EU est demandé
- les WPs extérieurs sont utilisés pour montrer l'effort global

## □ **Focus sur accélération plasma piloté par laser** ⇒ **package cohérent**

- laisse cependant ouvert à d'autres options (ex: pilotage par faisceau de particules, schéma hybride, ...)

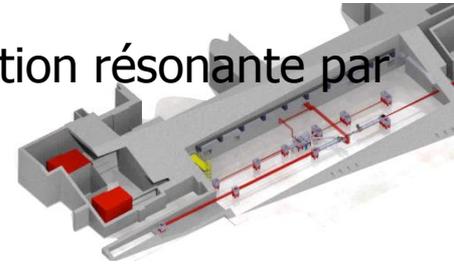
# CONCLUSIONS

## □ Efforts mondiaux importants pour accélération plasma

- Potentiel en énergie démontré
- Effort porté désormais vers la production de faisceaux de qualité, stables, utilisables pour des applications
- Différentes configurations testées piloté par laser ou faisceau, injection interne/externe, excitation résonante par paquets/pulses laser multiples, etc

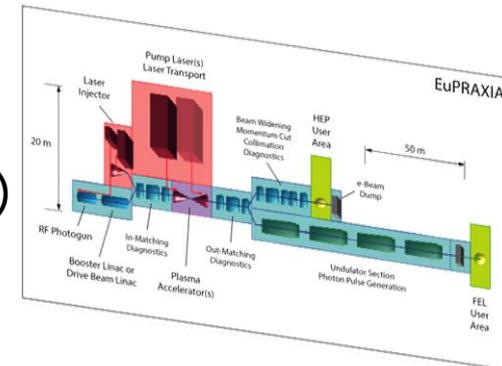
## □ Installation Apollon-Cilex

- démonstrateur d'accélération plasma e- avec laser forte puissance
- R&D structures plasma (jet de gaz, capillaire) injection interne, étage unique, schéma 2-étages avec caractérisation des faisceaux extraits



## □ EuPRAXIA

- Design study européen pour accélérateur jusqu'à 5 GeV
- 2 applications pilotes (Faisceau test pour détecteurs, FEL)
- Première étape pour figurer sur la liste ESFRI
- Site de l'Orme : candidat potentiel ?



# END

---