

Journées accélérateurs ROSCOFF 2015

Accélération laser plasma d'électrons avec CILEX

Arnd Specka

Laboratoire Leprince-Ringuet
Ecole Polytechnique / IN2P3

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, P. Lee², A. Maitrallain³, J.R. Marquès⁶, Ph. Martin³, G. Maynard², A. Mosnier⁵, P. Mora⁷, B. S. Paradkar², J. Schwindling⁵, K. Ta Phuoc⁸, J. Prudent, T. Vinatier⁴, P. Audebert⁶, F. Amiranoff⁶

¹ LLR, Ecole Polytechnique, CNRS, Palaiseau France

² LPGP, CNRS, Université Paris Sud, Orsay, France

³ LIDyL, CEA, IRAMIS, Centre de Saclay, France.

⁴ LAL, CNRS, Université Paris Sud, Orsay, France

⁵ SACM, CEA, IRFU, Centre de Saclay, France.

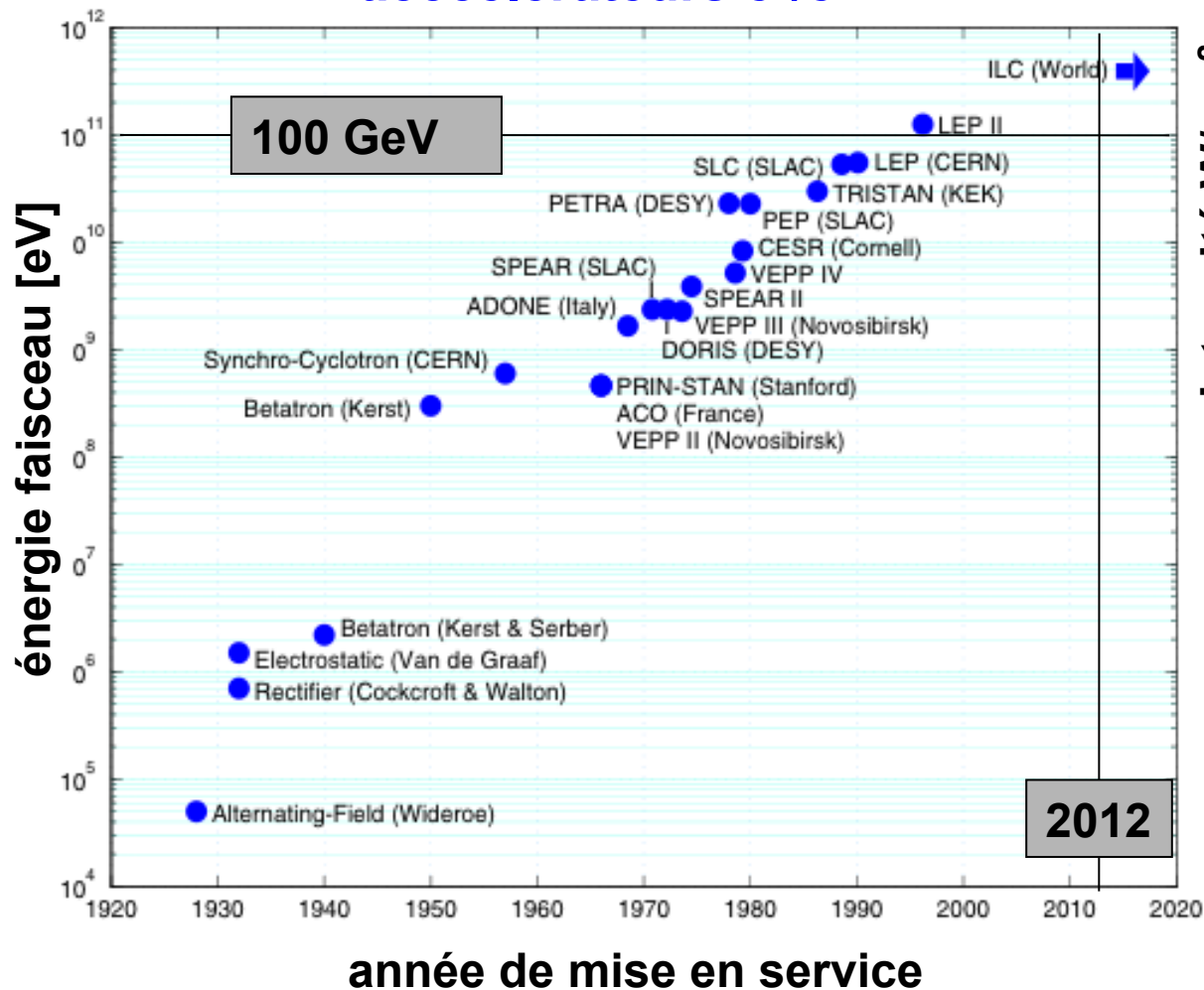
⁶ LULI, Ecole Polytechnique, CNRS, CEA, UPMC, Palaiseau, France

⁷ CPhT, Ecole-Polytechnique, CNRS, Palaiseau, France.

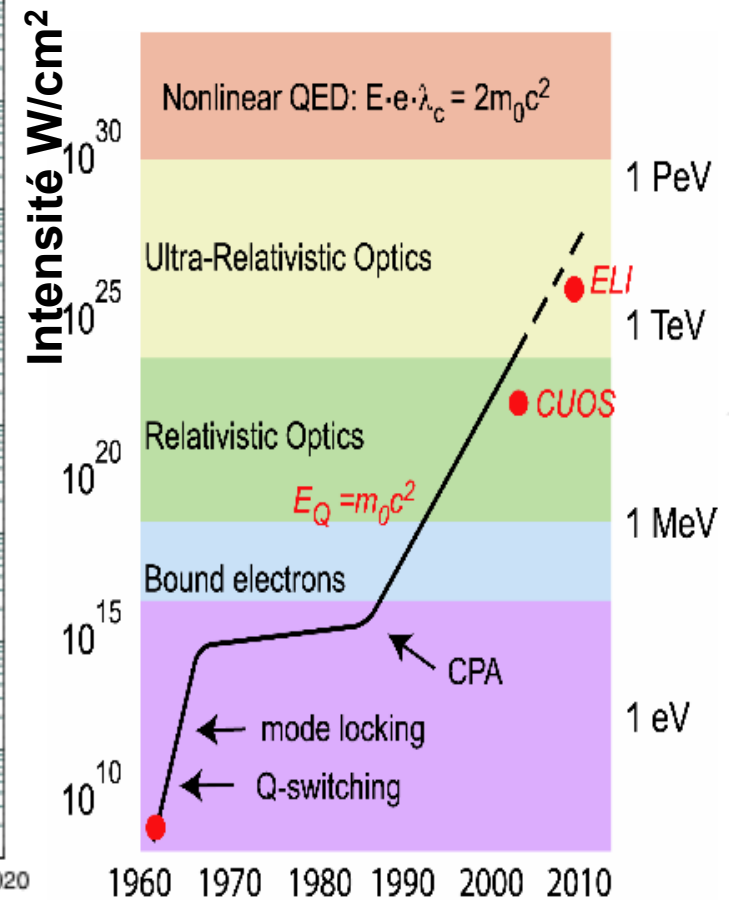
⁸ LOA, ENSTA, Ecole-Polytechnique, CNRS, Palaiseau, France.

Le futur d'aujourd'hui est le passé de demain

accélérateurs e-/e+



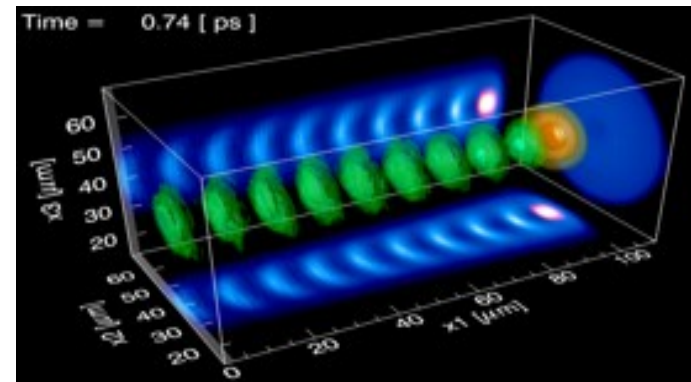
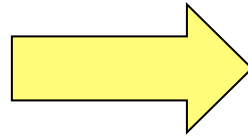
LASERS



- énergie = gradient × longueur → machines de plus en plus longues
- progression en énergie → rupture technologique

Accélération d'électrons par sillage laser haut gradient (LWFA)

→ diminuer la taille des «structures accélératrices



$$E_z < 100 \text{ MV/m}$$

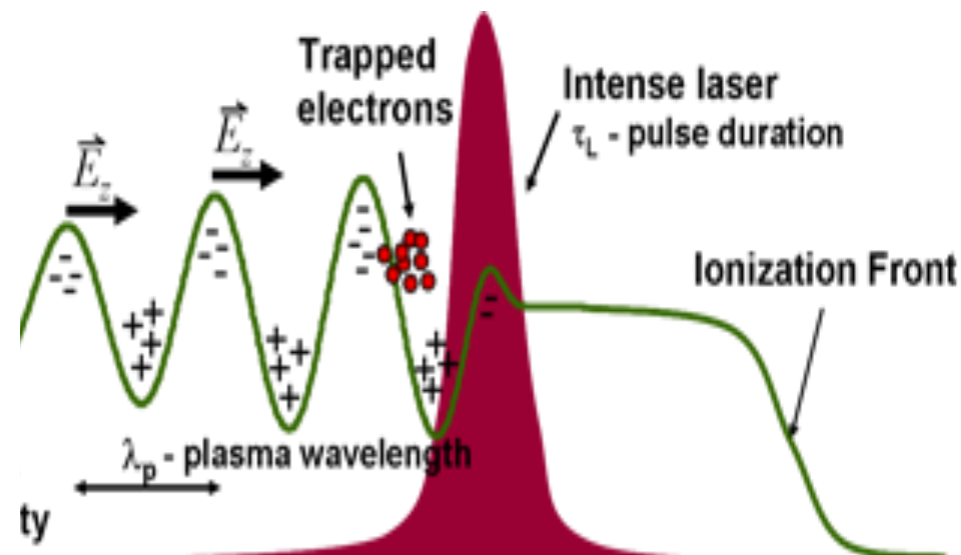
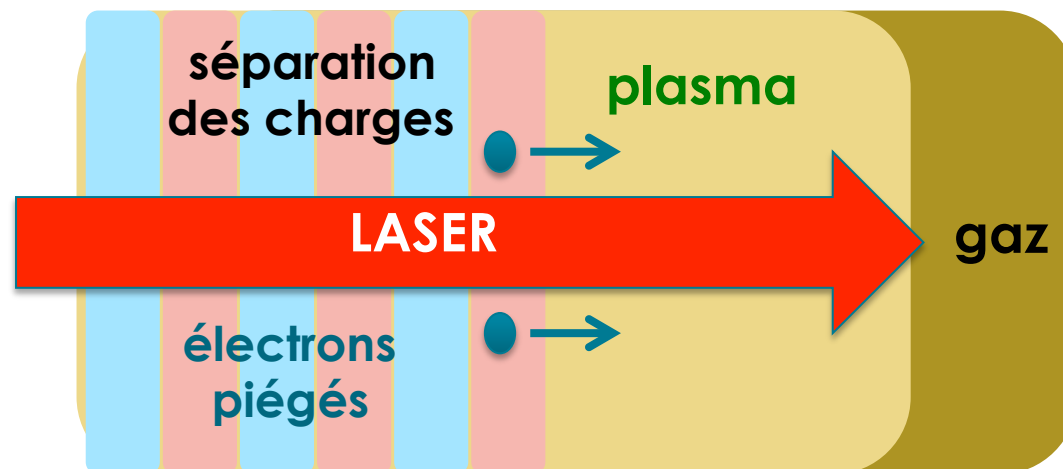
$$E_z = m_e c \omega_p / e \approx 100 \text{ GV/m}$$

- à présent: avec lasers TiSaph O(100TW, 30fs)
- accélération d'électrons de 0 à O(200MeV), voire qqs GeV
- dispersion en E: qqs pourcent
- charges de bunchs: 10-100pC
- emittance (RMS normalisée) O(mm.mrad)

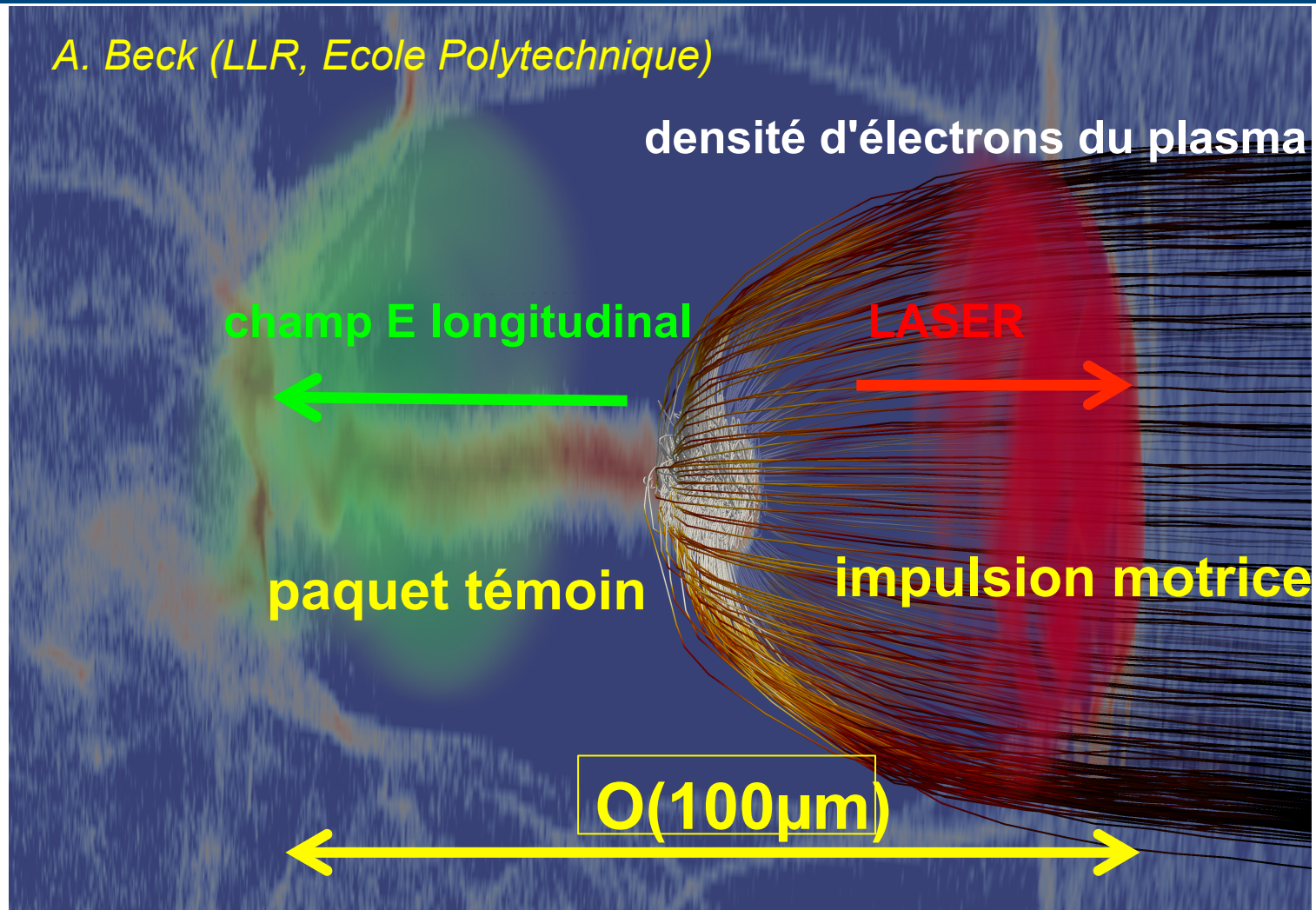
Principe de l'accélération par onde plasma

- ionisation: gaz \rightarrow plasma
- déplacement des électrons par l'impulsion laser
- séparation des charges: onde plasma (electrons)
- piégeage des électrons du plasma dans l'onde
- accélération et focalisation des électrons
- v_{PH} (onde) = v_G (laser)

- déphasage
- déplétion du laser



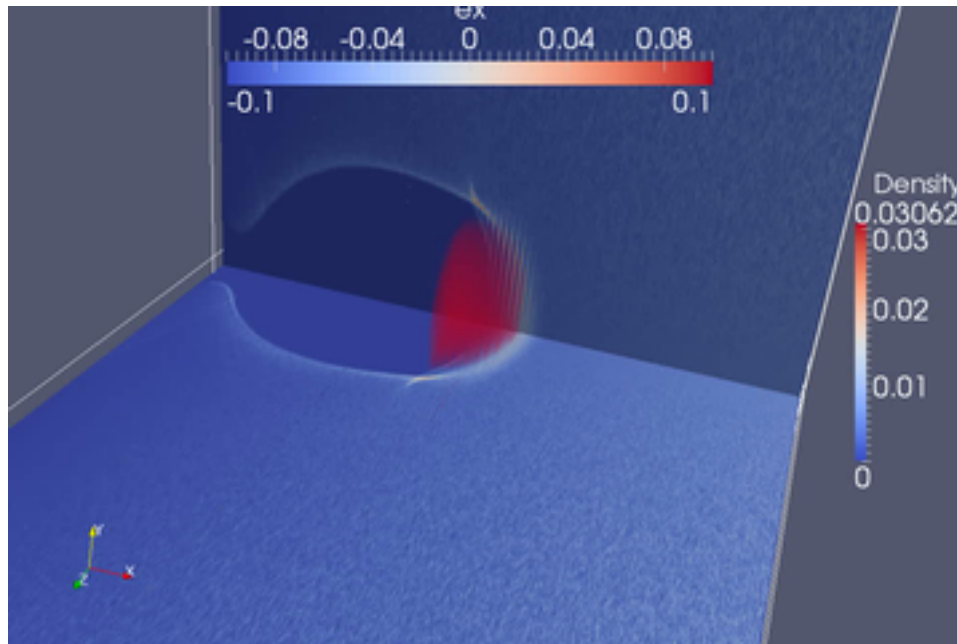
Simulation de l'accélération laser (régime du laser APOLLON)



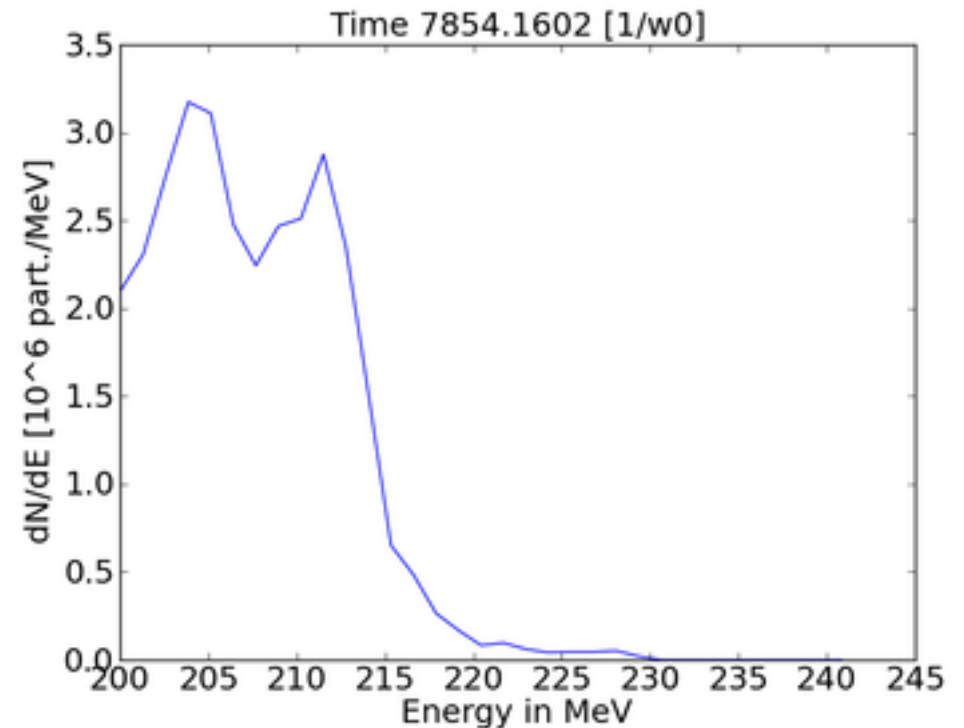
- impulsion laser (fs), Petawatt: Berkeley, Corée, CILEX,...
- paquet d'électrons (ou positrons) très court: SLAC, DESY, Frascati
- paquet de protons: CERN (AWAKE)

Simulation of 600TW 25fs selfinjection & acceleration (CILEX startup)

propagation of laser pulse
in co-moving window (18mm)
bubble shrinkage and expansion



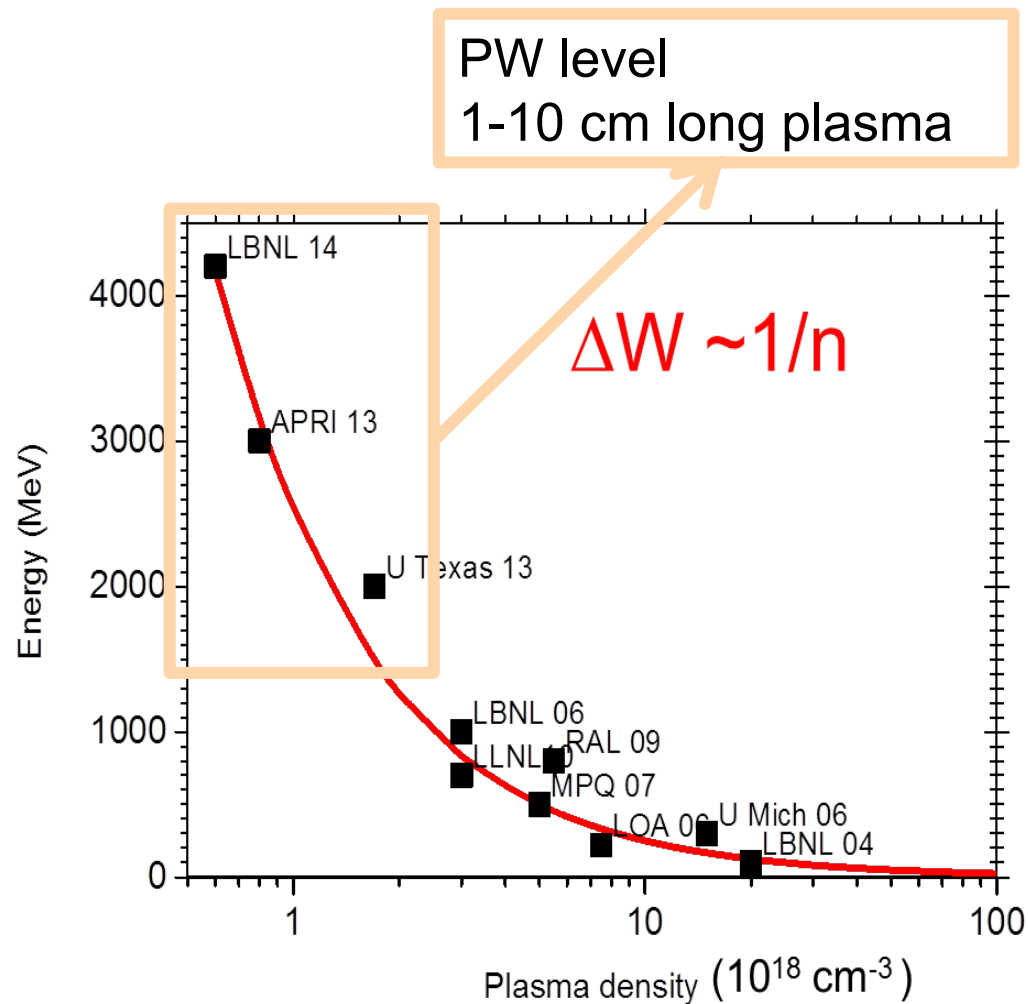
evolution of energy spectrum



stable acceleration over long distances -> choice of regime
narrow electron spectrum with O(3GeV) energy gain over O(20mm)

A. Beck (LLR, Ecole Polytechnique)

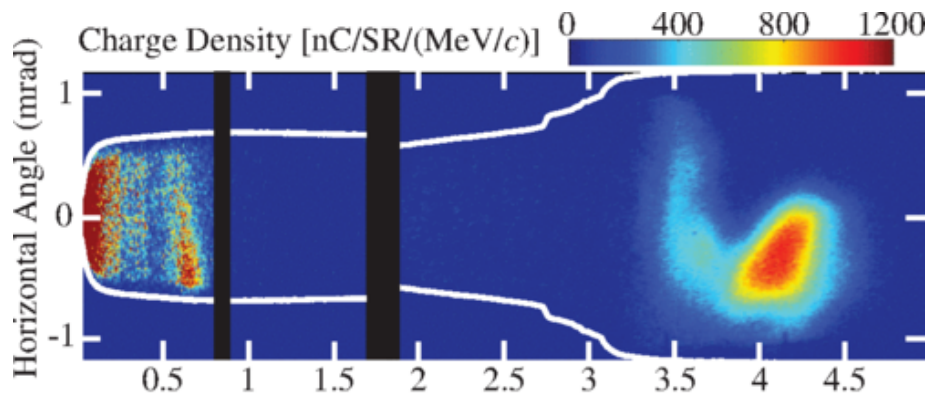
Explorer la dépendance entre l'énergie des électrons, la densité du plasma et la puissance laser



Diminuer la densité conduit à une plus forte énergie des électrons, pour une puissance laser plus élevée et un plasma plus long

LWFA world record 2014 : ~4GeV in 9cm (LBL, USA)

- previous world record 2012 : ~2GeV in 7cm (U Texas Austin)



**1 Petawatt (10^{15} W) laser
BELLA (Amplitude), 1Hz
ici: 300TW P crête
plasma: d'H₂($n_e=7 \times 10^{17}$ cm⁻³)**

W. Leemans et al., Phys. Rev. Lett **113 245002 (2014)**

(12 signataires, tous Berkeley)

- $\langle E \rangle = 4.2$ GeV,
- autoinjection, 6 pico-coulomb ($\sim 4 \cdot 10^7$ électrons)
- dispersion RMS en impulsion : $\Delta p/p = 6\%$
- guidage par décharge plasma, $L = 9$ cm
- sensibilité au profil radial du laser observé et confirmé par simulation

Résumé de l'état de l'art de l'accélération d'électrons par laser

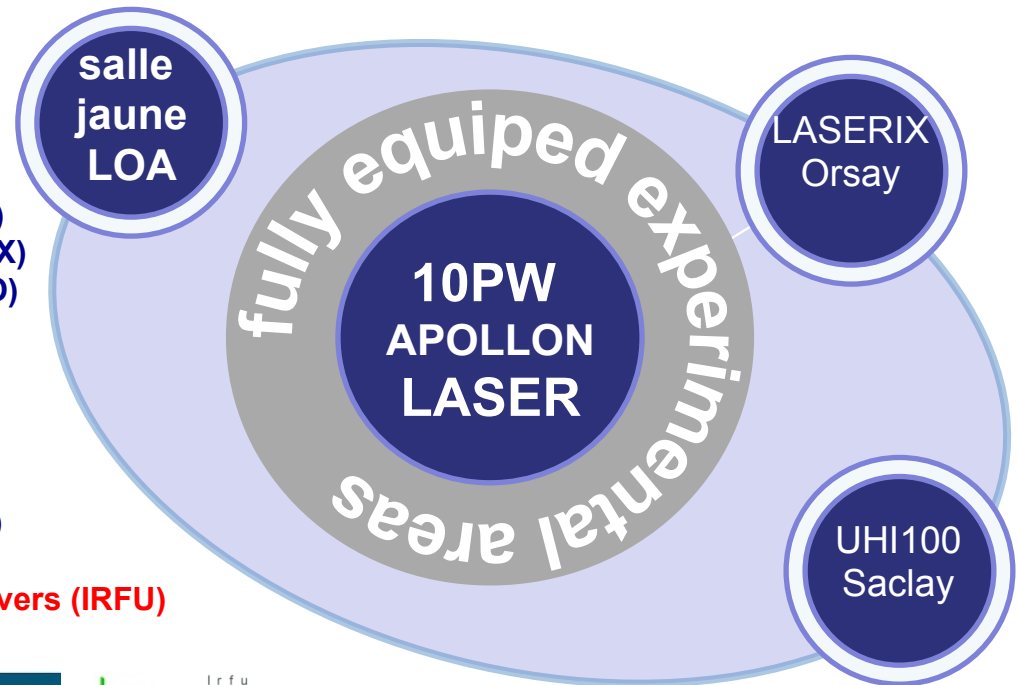
- **compact**
- **amélioration de la stabilité et de la reproductibilité des faisceaux**
- **amélioration de la qualité des faisceaux**
- **faible longueur d'accélération** -> **guidage (pistes)**
- **faible taux de répétition des lasers** -> **innovation laser (ICAN)**
- **faible efficacité énergétique des laser** -> **innovation laser (ICAN)**

**étudier, améliorer et optimiser les différentes techniques d'accélération
en vue de leur domaine d'application (ph. hautes E, photon science)
et démontrer leur faisabilité
sans se préoccuper des limitations dues aux lasers actuels**

Centre Interdisciplinaire de Lumière EXtreme: CILEX

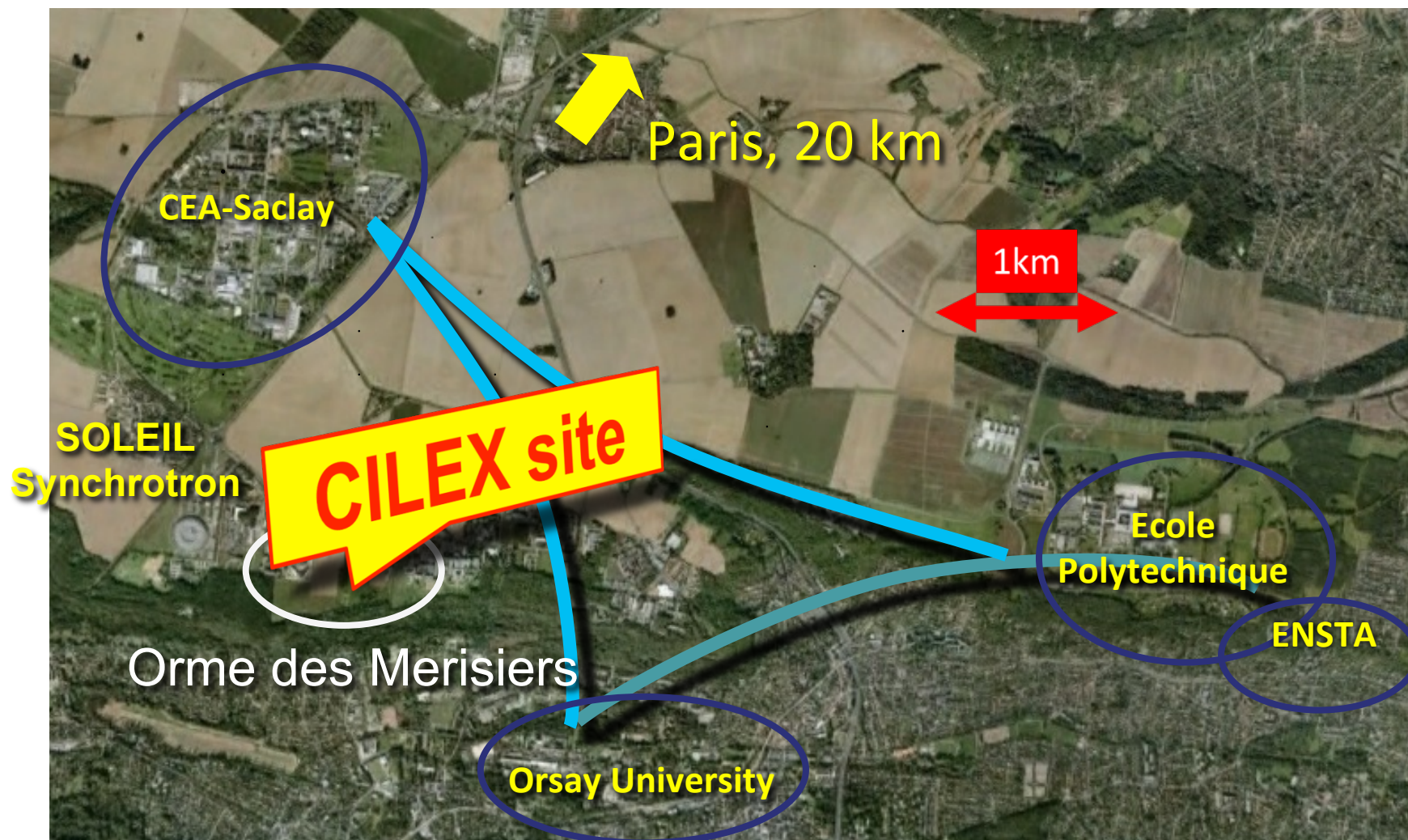
- CILEX: nom d'un EQUIPEX (15M€+5M€)
dont le LLR est partenaire
- CILEX: nom d'un Centre Laser
associant 12 laboratoires:

Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas (LPGP)
Fédération Lumière Matière Fédération (LUMAT-LASERIX)
Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique (LCFIO)
Laboratoire de l'accélérateur linéaire (LAL)
Synchrotron Soleil
Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA)
Laboratoire Leprince-Ringuet (LLR)
Centre de Physique Théorique (CPht)
Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses (LULI)
Institut Rayonnement Matière de Saclay (IRAMIS)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'univers (IRFU)
DSM Saclay



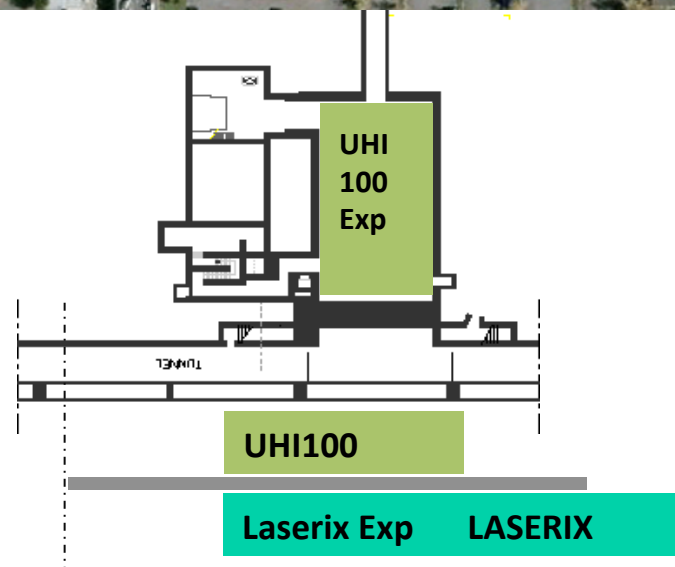
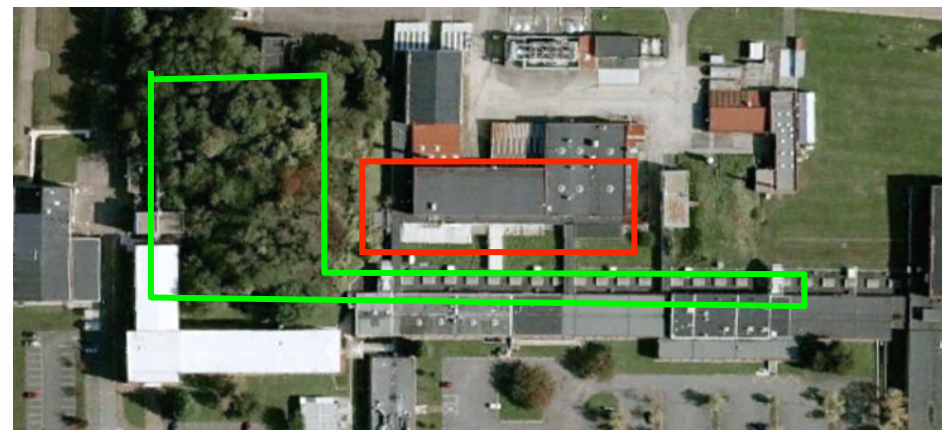
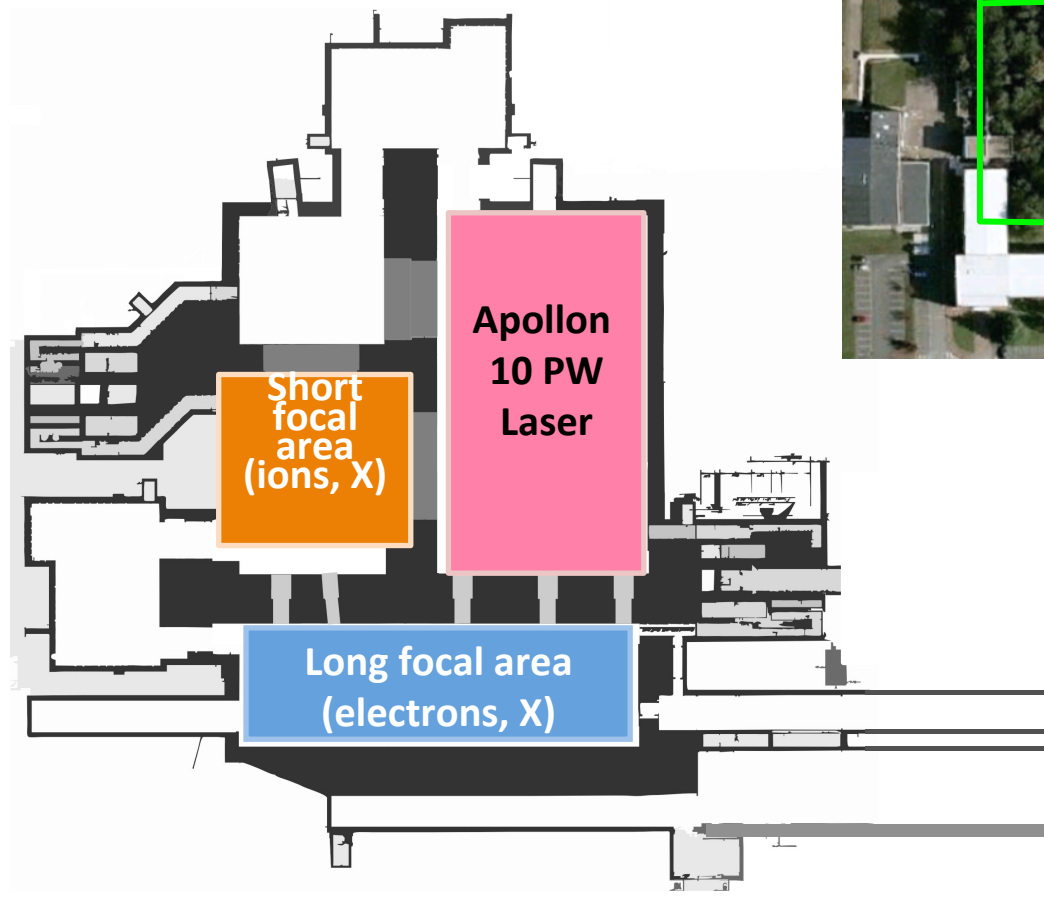
CILEX = LASER APOLLON (15M€) + Rehabilitation bâtim't+
infrastructures expérimentales + centrales de proximité (15M€)

Centres laser haute puissance / courte durée sur le plateau

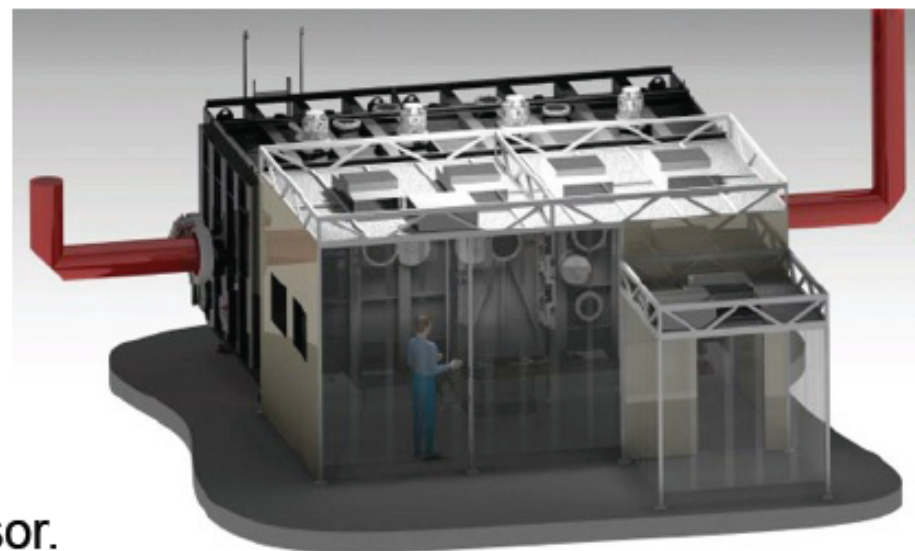
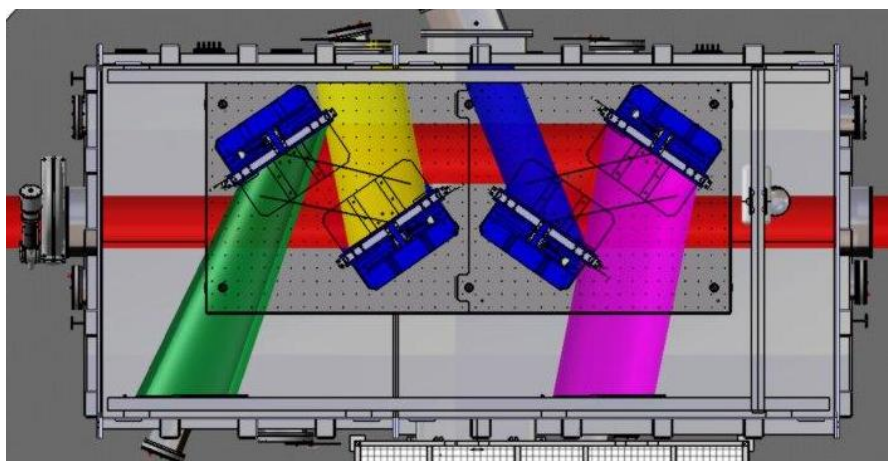
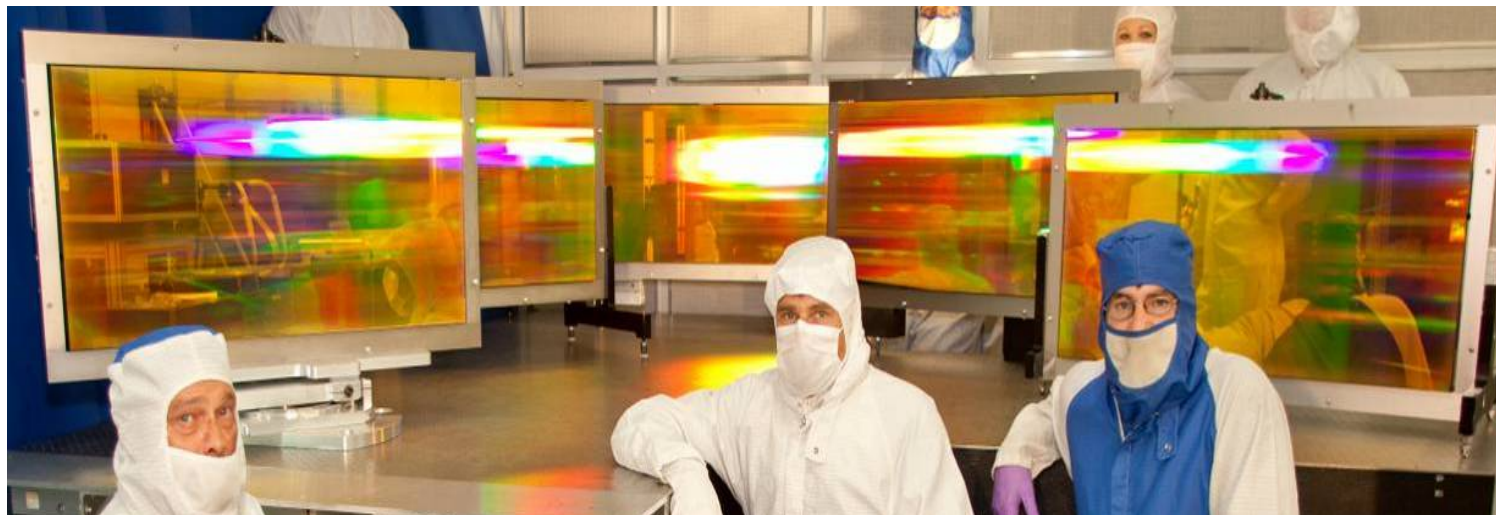


Site de « l'Orme des Merisiers » (à côté du synchrotron SOLEIL)

- ❑ bâtiment de l'ancien ALS (déclassé en 2006)
- ❑ rénovation jusqu'à début 2015 (selon calendrier): 5000m² total
- ❑ **2 zones expérimentales souterraines radio-protégés**

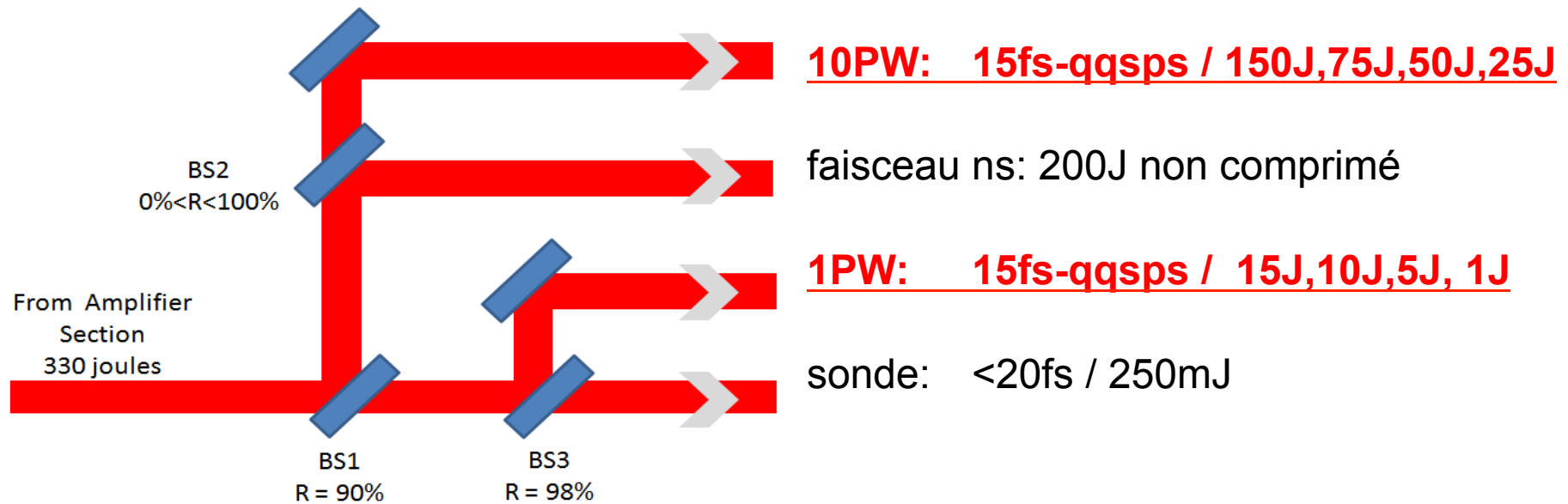


Pulse compression: four 900x450 cm² diffraction gratings in vacuum



Les faisceaux laser d'APOLLON

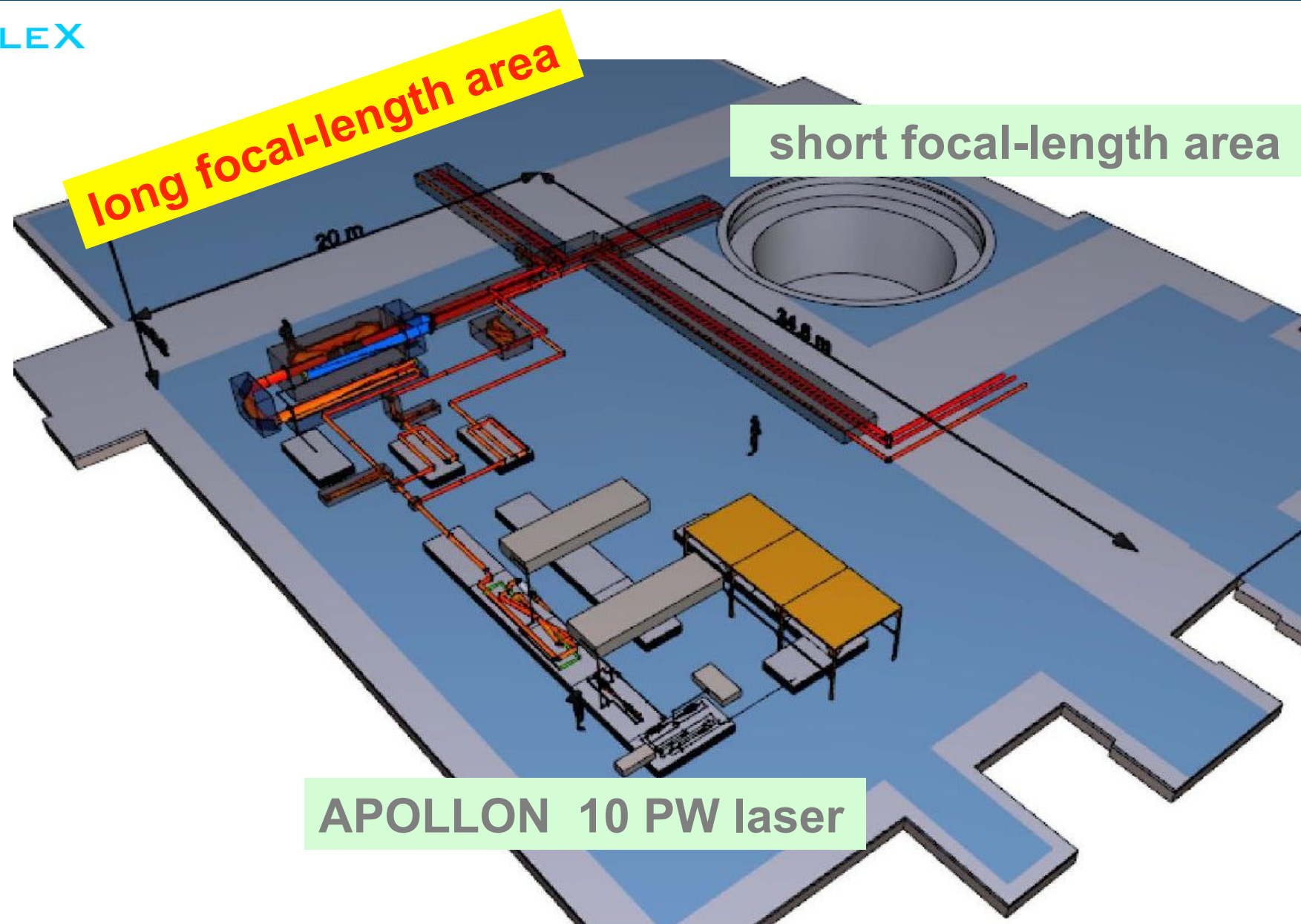
- 4 faisceaux indépendents, énergies variables (par pas)



- Stabilité du pointé (angle)
- Synchronisation des faisceaux
- «haute» cadence : 1 tir/min

Accélération Laser-Plasma dans CILEX: La salle longue focale

CILEX



CILEX scientific case: Scientific Goals for Long focus Area

for the 1st two years of CILEX operation as in "Scientific Case" document (2013)

○ *Validate the specifications of the PW laser beam through the mechanism of laser plasma acceleration in the bubble regime -> exploration of parameter space of bubble-regime (a_0 , τ , n_p , P)*

➤ $I_0 \geq 10^{20}$ W/cm² O(1-5GeV)

➤ homogeneous target(s): gas cell or gas jet, O(10^{18} – 10^{19} cm⁻³) H₂ or He

➤ F2 beam (15 J 25J, ~~15 – 200 fs~~ 20fs, Ø=140 mm)

○ *Develop a two-stage laser plasma accelerator – injector and accelerator*

➤ injector = F2 beam (15 J, 15 – 200 fs, Ø=140 mm)

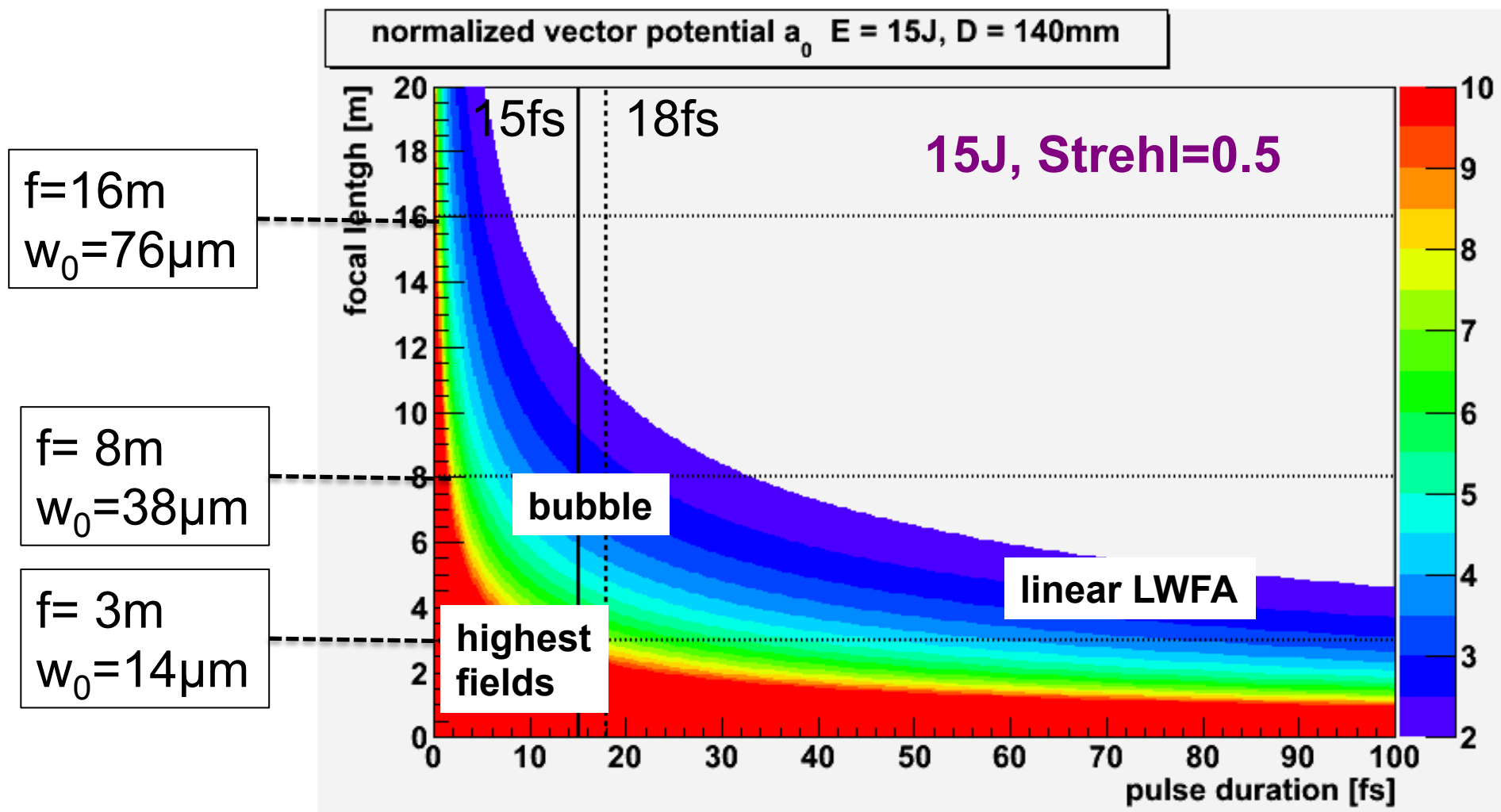
homogeneous target(s): gas cell or gas jet, O(10^{18} – 10^{19} cm⁻³) H₂ or He with ionization injection

➤ accelerator = F1 beam(15 J-75J, 15 fs – 1 ps, Ø=400 mm)

gas cell, gas filled capillary (up to 1 meter!) , O(10^{17} – 10^{19} cm⁻³) H₂ or He

CILEX has "intensity redundancy"

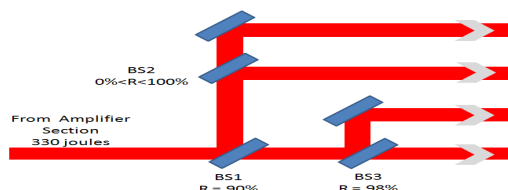
- experimental scenarios for F2 (Ø140)
- 3m focal length: $a_0 < 7$, $n_e \sim 4 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ($k_P w_0 \sim 2\sqrt{a_0}$)



Scaling laws of wakefield acceleration

Courtesy of Xavier Davoine

Faisceau « 1 péta-Watt»

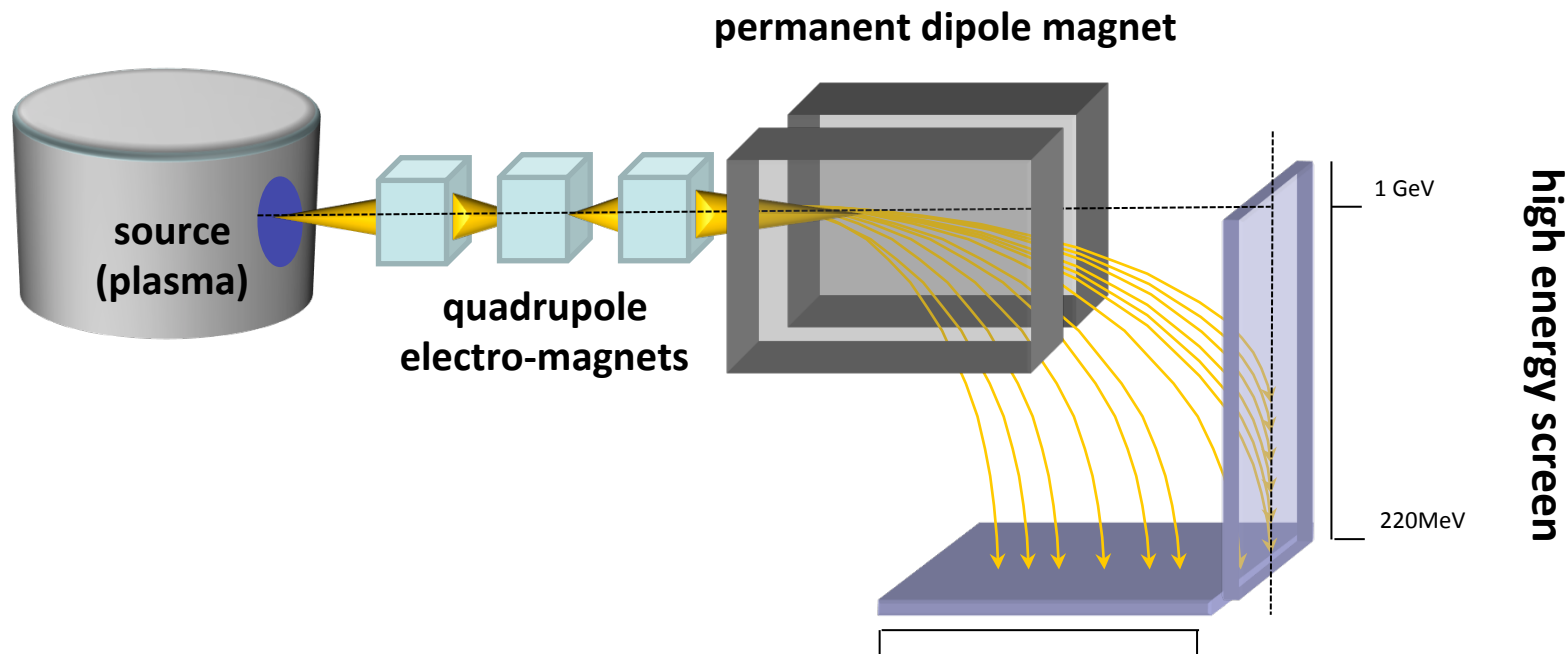


Faisceau « 5 péta-Watt»

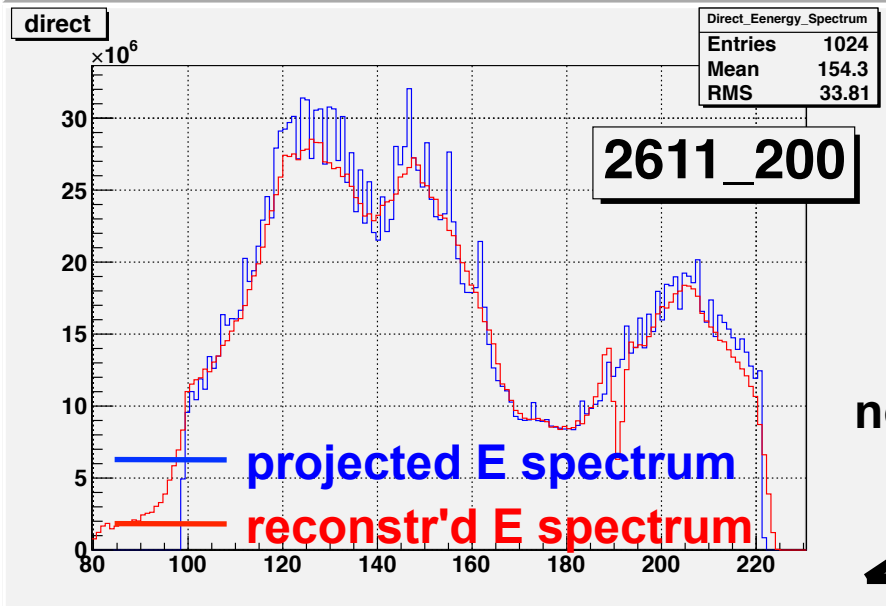
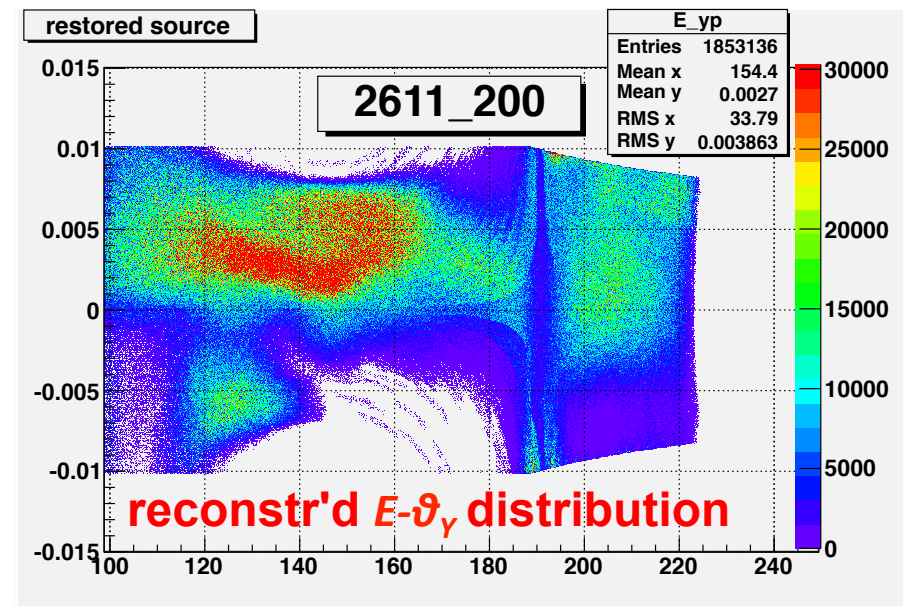
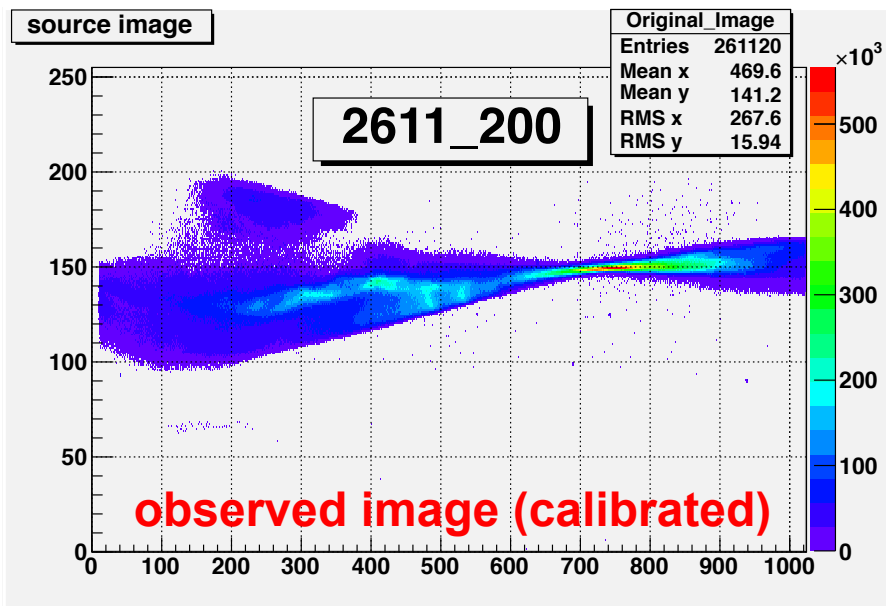
F2 – 15 J		F1 – 75 J	
Short pulse High Charge	Long pulse High Energy	Short pulse High Charge	Long pulse High Energy
<ul style="list-style-type: none"> $\tau_0 = 15$ fs $w_0 = 6.4$ μm $a_0 = 26$ $P_0 = 1$ PW $n_e = 1.3 \times 10^{19}$ cm^{-3} 	<ul style="list-style-type: none"> $\tau_0 = 40$ fs $w_0 = 25.5$ μm $a_0 = 4$ $P_0 = 350$ TW $n_e = 7 \times 10^{17}$ cm^{-3} 	<ul style="list-style-type: none"> $\tau_0 = 15$ fs $w_0 = 6.4$ μm $a_0 = 58$ $P_0 = 4.7$ PW $n_e = 2.8 \times 10^{19}$ cm^{-3} 	<ul style="list-style-type: none"> $\tau_0 = 68$ fs $w_0 = 43$ μm $a_0 = 4$ $P_0 = 1$ PW $n_e = 2.5 \times 10^{17}$ cm^{-3}
<ul style="list-style-type: none"> $E = 0.65$ GeV $Q = 4.3$ nC $L_{\text{acc}} = 0.7$ mm 	<ul style="list-style-type: none"> $E = 3.5$ GeV $Q = 0.7$ nC $L_{\text{acc}} = 3.2$ cm 	<ul style="list-style-type: none"> $E = 1.45$ GeV $Q = 10$ nC $L_{\text{acc}} = 0.7$ mm 	<ul style="list-style-type: none"> $E = 10$ GeV $Q = 1.3$ nC $L_{\text{acc}} = 15$ cm

electron beam diagnostics (EBD)

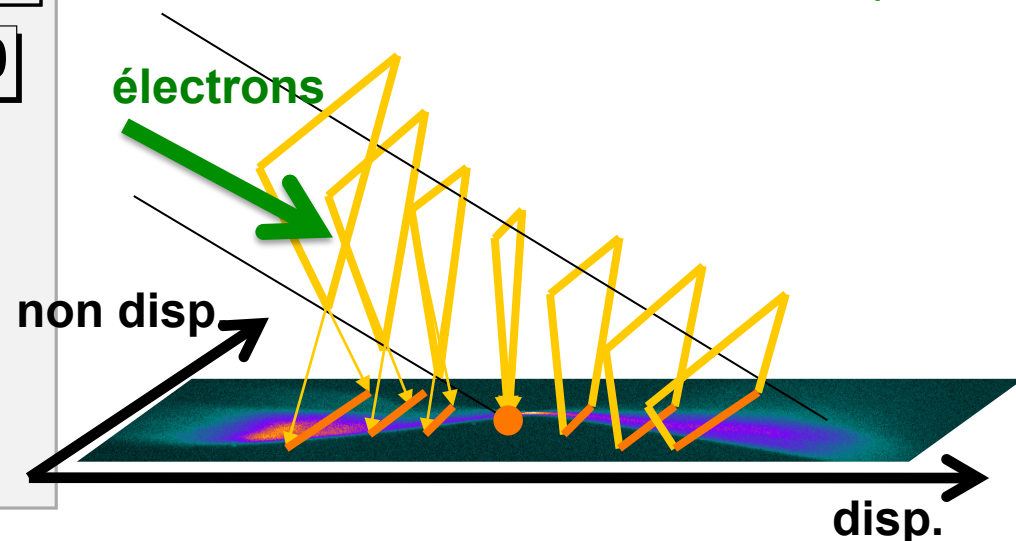
- baseline design: electron energy measurement
- imaging electron spectrometer (Q²D or Q³D)
 - limit effect of e-beam divergence and pointing fluctuations
 - > smaller apertures, higher fields & gradients, better S/N ratio
- aperture of magnets limited by laser divergence on exit
 - reduce distance between plasma exit and first magnet
 - in-vacuum magnets (most probably permanent)
- optical electron detection (phosphor or scintillator screen)



From images to histograms: reconstruction of $E-\theta_y$ distribution of e^-



V. Seredov, A. Specka



for the 1st two years of CILEX operation as in "Scientific Case" document (2013)

○ *Validate the specifications of the PW laser beam through the mechanism of laser plasma acceleration in the bubble regime -> exploration of parameter space of bubble-regime (a_0 , τ , n_P , P)*

➤ $I_0 \geq 10^{20}$ W/cm² O(1-5GeV)

➤ homogeneous target(s): gas cell or gas jet, O(10^{18} – 10^{19} cm⁻³) H₂ or He

➤ F2 beam (15 J 25J, 15–200 fs 20fs, Ø=140 mm)

○ ***Develop a two-stage laser plasma accelerator – injector and accelerator***

➤ injector = F2 beam (15 J, 15 – 200 fs, Ø=140 mm)
homogeneous target(s): gas cell or gas jet, O(10^{18} – 10^{19} cm⁻³) H₂ or He
with ionization injection

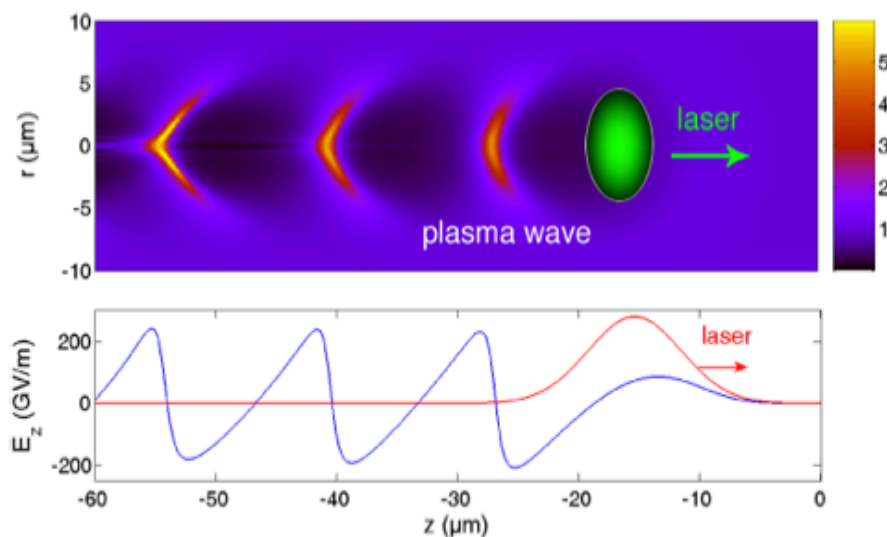
➤ accelerator = F1 beam(15 J-75J, 15 fs – 1 ps, Ø=400 mm)
gas cell, gas filled capillary (up to 1 meter!) , O(10^{17} – 10^{19} cm⁻³) H₂ or He

Phase 2 (>2017): accélération multi-étage « tout-optique»

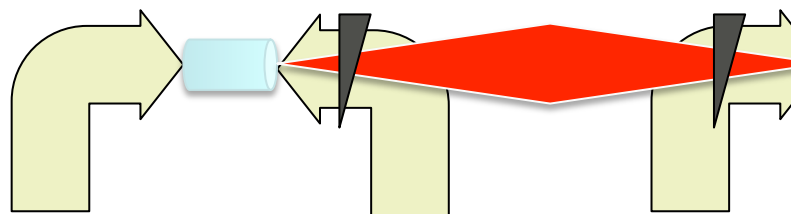
régime non-linear «bulle»

deferlement -> e⁻ blowout

champ acc. max., focalisat^o au pic du champ



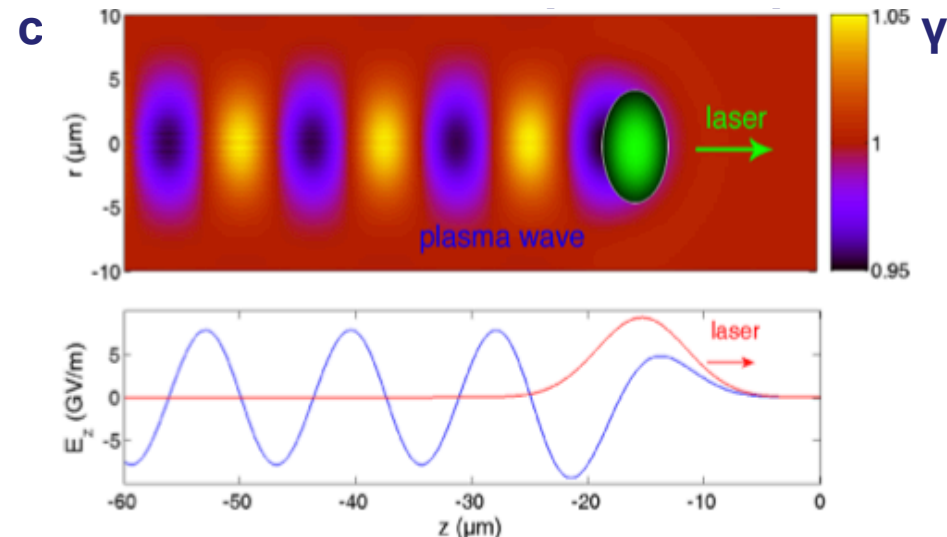
LWFA e⁻ transp. +diagn.



regime quasi-lineaire :

laser intensities (Wm⁻²) plus petits

ampl. onde plasma plus faible, champ acc. moindre

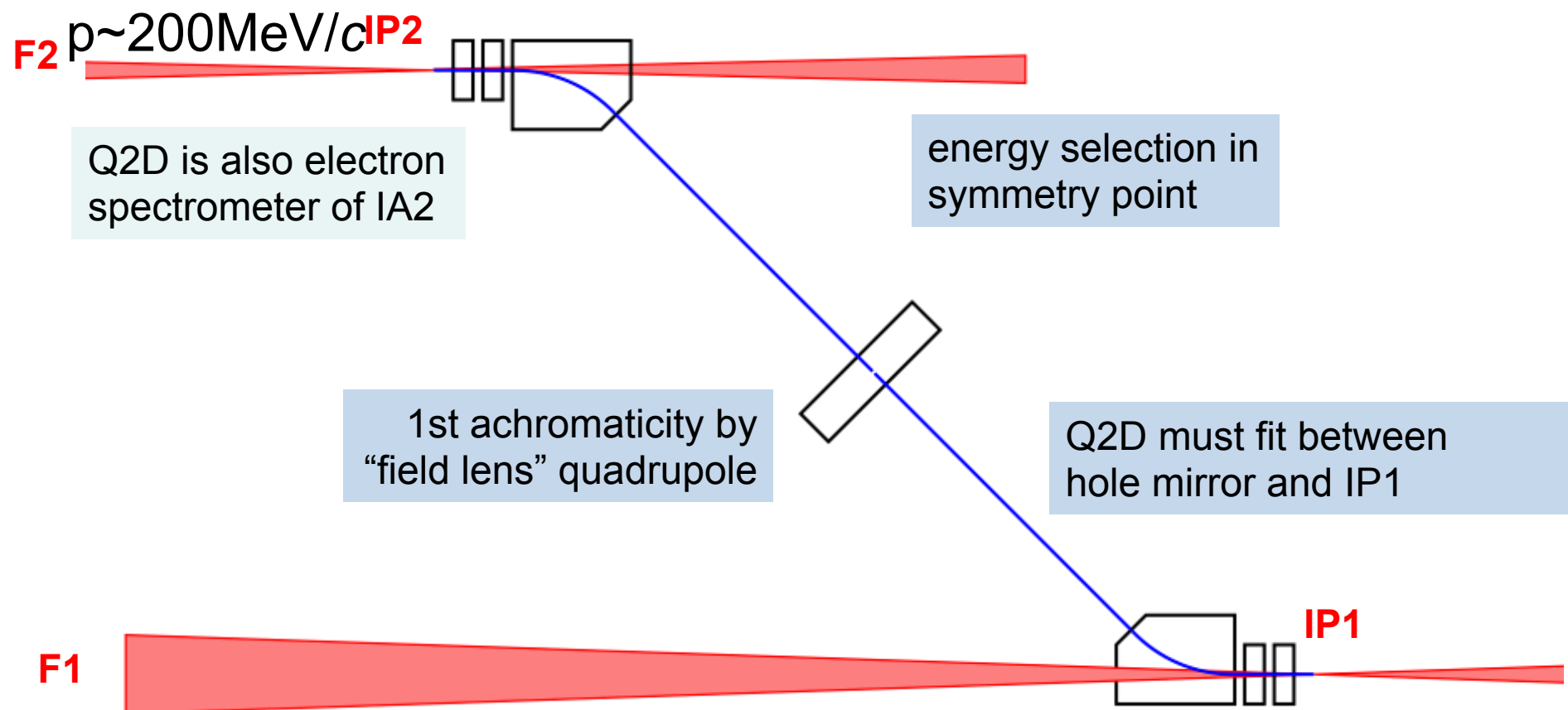


LWFA e⁻ diagn. e⁻ dump

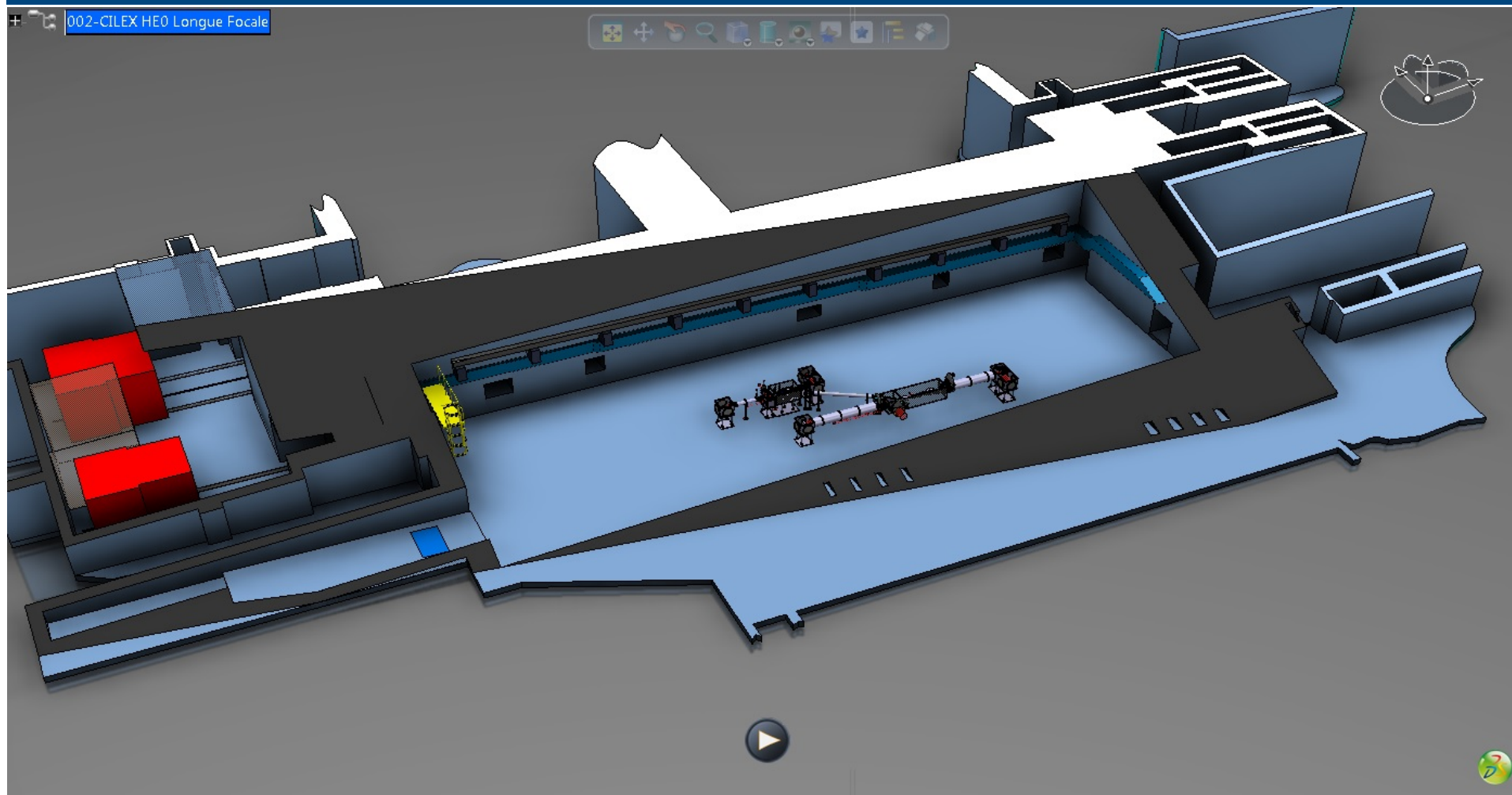


electron beam transfer line (ETL)

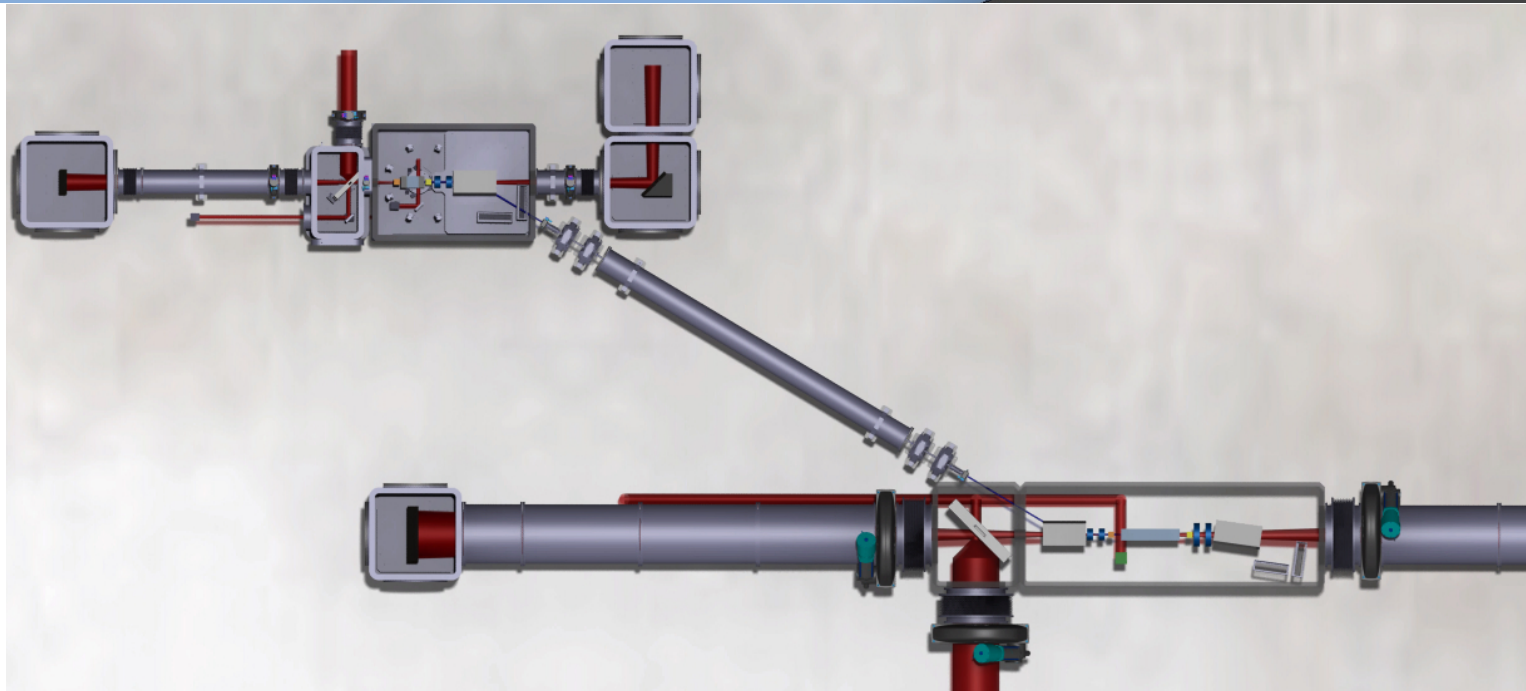
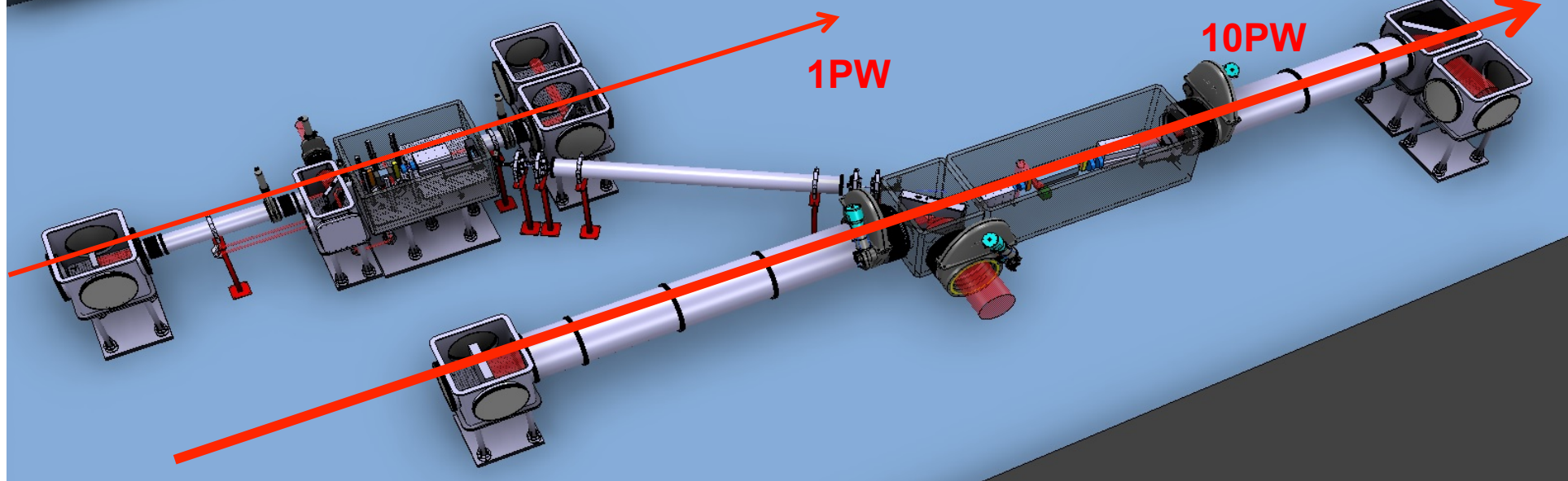
- design choice: F2 plasma exit and F1 plasma entry stay fixed
- stigmatic focusing needed to mitigate pointing fluctuations
- in vacuum, permanent magnets: fixed momentum
- ad-hoc assumption: length=6m & offset=3m => OK for



Implantation dans la salle longue focale



Implantation: deux stations expérimentales (pour les 2 faisceaux)



- L'installation CILEX avec son laser Apollon fonctionnera comme « **acceleration test facility** » et sera ouvert aux collaborations dès son démarrage en 2016
- CILEX/APOLLON étudiera l'accélération laser-plasma (LPA) d'électron à partir de 2017
 - 2017-2018: expériences avec 2 faisceau séparés: exploration du régime fortement non-linéaire (bulle) optimisation de l'étage injecteur
 - 2019-2020: expériences d'accélération 2 étages couplage injecteur – boosteur
- opportunité unique d'explorer toutes les régimes LPA ainsi que la création de rayonnement.
- démonstration multi-étage: étape incontournable vers une application LPA aux accélérateur haute énergie.