



Tourniquet LLR Section 01
Date:05-07/11/18

Groupe: GALOP

Groupe d'Accélération par Laser et Ondes Plasma

Bilan 2014-2018

Accélération d'électrons laser-plasma

Objectif: rendre les accélérateurs du 21 siècle plus petits, moins chers, et/ou plus puissants → **augmenter le gradient (MeV/m) par un facteur 10 –100** (par rapp. à RF)

LLR 2018: 6 FTE (Scientists+Engineers), 2 permanents (CNRS)



CILEX/APOLLON (*first light* en 2018):
accélération d'électrons avec des lasers petawatt

- coordination & design: salle longue focale (e^- , X)
- développement de diagnostics de faisceau e^-



developpement de simulation plasma innovante (V4.0)

- code particle-in-cell SMILEI (version 4.0: nov2018)
- collaboration: LLR, LULI, Maison de la Simulation, LPP



préparer le futur des accélérateurs dans programmes UE

- EuPRAXIA (H2020, future infrastructures, 2015–2019)
design study d'un EU plasma research acc. → ESFRI 2022
- ARIES (H2020 Integrating activity, 2017–2021)
JRA very high gradient acceleration techniques
ICFA working group on advanced & novel accelerators

Composition actuelle du groupe

- 2 permanents :
 - Arnd SPECKA (CR), Arnaud BECK(IR)
- 1 doctorant :
 - Imene ZEMZEMI (actuellement pendant 6 mois au LBNL)
 - Directeur de thèse: Arnaud BECK
 - soutenance prévue en 2020
 - simulation PIC d'accélération laser-plasma en géométrie cylindrique et avec solveurs spectraux
- 2 postdocs :
 - Martin KHOJOYAN (postdoc IN2P3; dec. '16–nov. '18)
 - Conception spectromètre à électrons pour CILEX
 - Francesco MASSIMO (postdoc P2IO; oct. '17–sept. '19)
 - simulation Start-to-End pour CILEX
- soutien technique:
 - Lorenzo Bernardi (IR informatique): – avr. '19 ~40%
 - Julien Prudent (IR mécanique) CDD projet CILEX ~40% (<)
 - Antoine Cauchois (IR mécanique): –2019 ~20%

Evolution récente

- départ Martin KHOJOYAN à l'issue de son contrat
- prise de fonction de Julien Prudent comme ingénieur de salle sur CILEX-APOLLON -> disponibilité fortement réduite

Organisation-fonctionnement du groupe

- Développement du code PIC¹⁾ open-source SMILEI (AB,IZ,FM)
 - **aspects HPC²⁾: parallélisme massif asynchrone, vectorisation adaptative**
 - **méthodes numériques: modes azimutaux, modèle d'enveloppe, solveurs spectraux**
- Simulation de futures expériences sur CILEX³⁾-APOLLON, EuPRAXIA⁴⁾ (AB,FM)
 - **optimisation d'injecteurs et accélération mono-étage**
 - **simulation start-to-end d'accélération deux étages**

1) particle in cell

2) High performance computing : calcul haute performance

3) Centre Interdisciplinaire de la Lumière EXtrême (Equipex)

4) European Plasma Research Accelerator with eXcellence In Applications (H2020:Development of research Infrastructures)

Organisation-fonctionnement du groupe(2)

- préparation des expériences sur grande installation laser de haute puissance **CILEX-APOLLON** en salle longue focale
 - **coordination premières expériences (AS)**
 - **conception des enceintes d'interaction (AC, JP,AS)**
 - **conception du spectromètre à électrons (AC,JP,LB,MK,AS)**
 - **expériences préparatoires sur laser 100TW (2016–17) DACTOMUS¹⁾ : test prototype spectromètre miniaturisé**
- **préparer un avenir probable (2015–19): EuPRAXIA**
 - **étude conceptuelle future installation dédiée à l'ALP e– (AS)**
 - **prospective applications HEP (hors collisionneur)**
- **R&D accélérateur en amont (2017–21): ARIES²⁾**
 - **ARIES: coordination WP "haut gradient" (AS)**
 - **2 des 4 tâches sont en lien avec CILEX (AS,MK)**

¹⁾ Diagnostic And Compact beam Transport fOr MUltiStaged laser plasma accelerators (P2IO)

²⁾ Accelerator Research and Innovation for European Science and Society (H2020: Integrating Activity)

Faits marquants récents

- réussite du «grand challenge» GENCI¹⁾ (10 millions d'heures)
 - validation du modèle d'enveloppe dans SMILEI dans une simulation d'accélération à 2 étages
 - vidéo: <http://www.genci.fr/fr/node/951#>
- succès du 1^{er} SMILEI workshop (nov. 2017):
 - 30 participants (guichet fermé)
 - moitié des participants: internationaux
- Smilei v.4 release (nov. 2018)
 - Inclut tous les outils pour l'étude LWFA²⁾ sur un longue distance et avec potentielle injection externe
 - correction Poisson relativiste, modèle d'enveloppe, géométrie cylindrique

1) Grand Equipement National de Calcul Intensif

2) Laser WakeField Acceleration: accélération par sillage laser

Faits marquants (2)

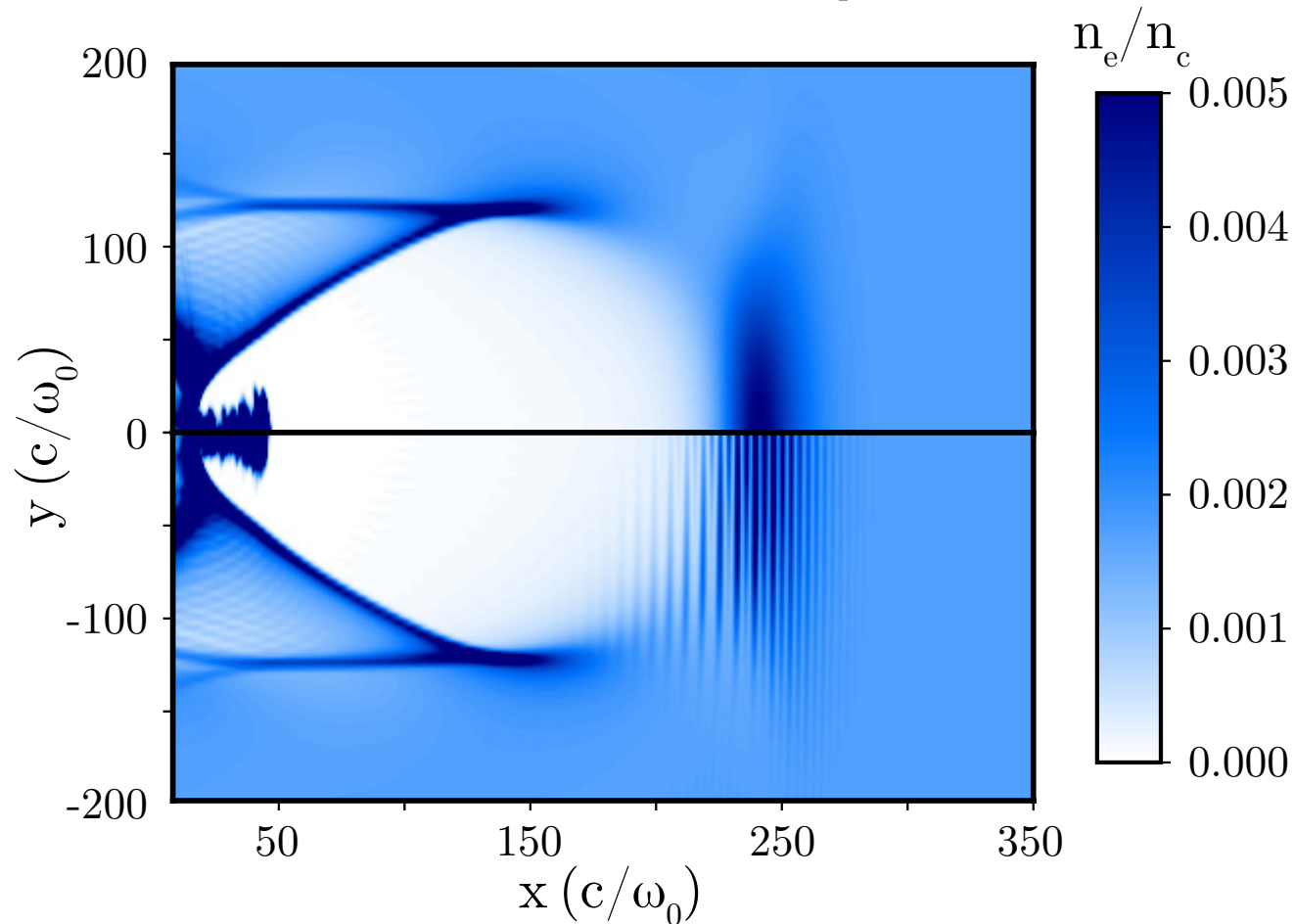
- Préparation des premières expériences de validation sur CILEX-APOLLON (prévues fin 2018/début 2019)
 - Enceintes expérimentales IC1 et IC2 pour la salle longue focale (conception et étude LLR) livrés et installés
 - Conception et fabrication d'un dipôle permanent de 2.1 T (L=100mm) compatible ultra-vidé comme prototype exploitable pour le spectromètre.
 - Conception d'un dipôle 1.7T (L=250mm) pour le spectromètre de haute énergie, livraison prévu nov '18.
- Réseaux et projets européens:
 - création du GDR APPEL¹⁾
 - EuPRAXIA: dernière année, rédaction du CDR
 - ARIES: premier livrable (conception ligne de transport)

¹⁾Accélérateurs Plasma Pompés par Laser

Production Scientifique


- Analyses de Physique -

- validation du modèle d'enveloppe dans  (milei)
 - Haut: modèle d'enveloppe (force pondéromotrice)
 - Bas: simulation détaillée du champs EM du laser



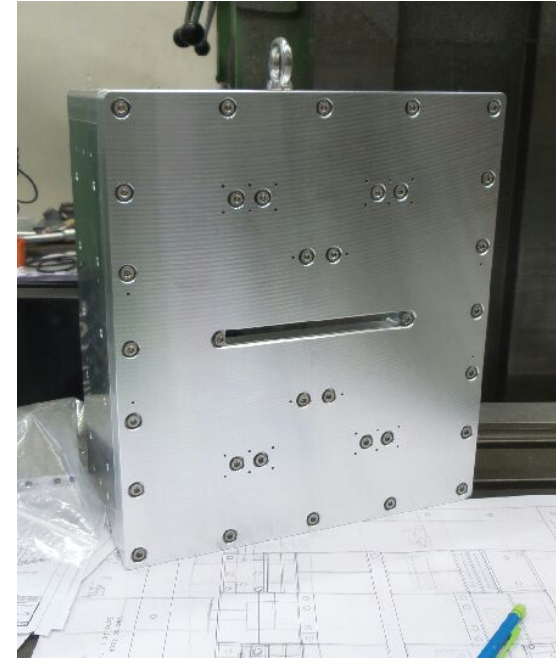
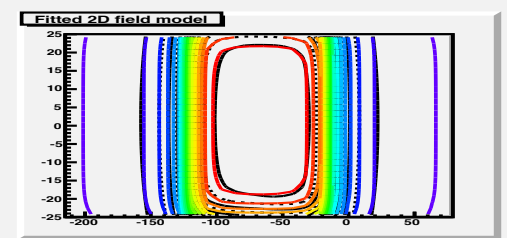
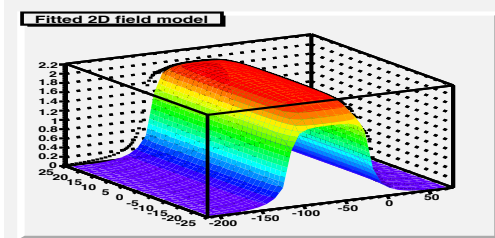
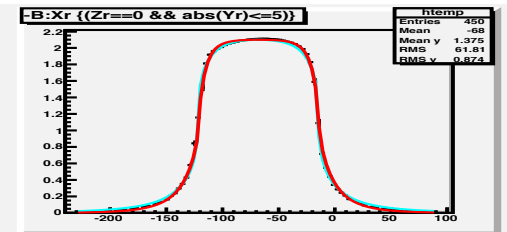
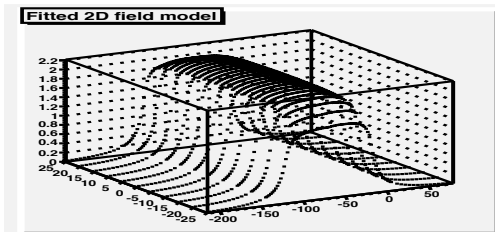
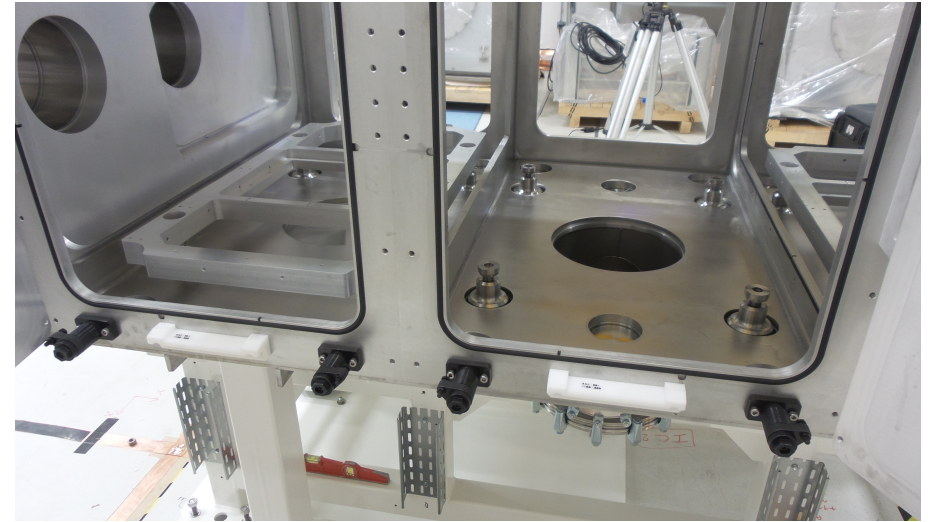
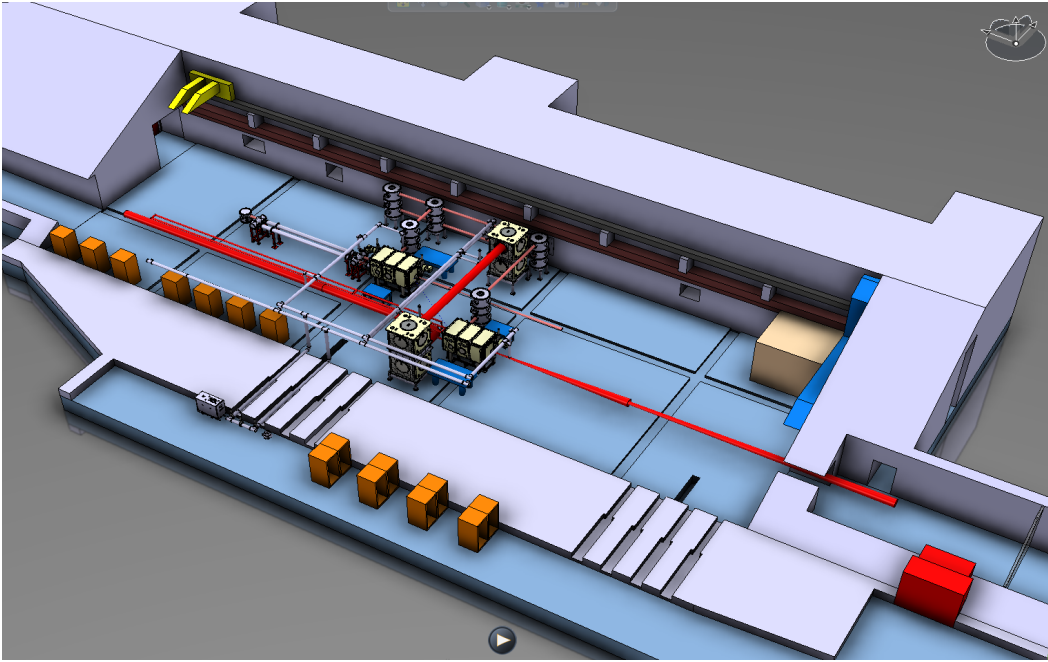
Production Scientifique

- Contributions techniques -

- responsabilité majeure dans la création et l'évolution de  (AB = 1 des 5 collaborateurs principaux permanents)
- *layout* de la Salle Longue Focale (LFA) de CILEX
- Coordination de la conception des enceintes expérimentales de CILEX-LFA
- réalisation d'un banc de cartographie d'aimants compacts
- cartographie des aimants quadripolaires et dipolaires du CEA réalisé pour DACTOMUS sur laser UHI100 à Saclay
- calcul & réalisation aimant dipolaire 2.1T compact & cartographie
- réalisation spectromètre a focalisation variable (DACTOMUS2)
- conception des détecteurs d'électrons (en cours)

Production Scientifique

- Contributions techniques -



Production scientifique

Bilan des Publications 2014-2018 du groupe GALOP

- *Physical processes at work in sub-30 fs, PW laser pulse-driven plasma accelerators: Towards GeV electron acceleration experiments at CILEX facility*, A. Beck et al., Nucl.Instrum.Meth. A740 (2014) 67-73.
- *Transport line for a multi-staged laser-plasma acceleration: DACTOMUS*, A. Chancé et al., Nucl.Instrum.Meth. A740 (2014) 158-164.
- *Development of an Injector and a Magnetic Transfer Line in the Framework of Cilex*, Antoine Chancé et al.. 10.18429/JACoW-IPAC2016-WEPMY004.
- *Load management strategy for Particle-In-Cell simulations in high energy particle acceleration*, A. Beck et al., Nucl.Instrum.Meth. A829 (2016) 418-421.
- *Layout considerations for a future electron plasma research accelerator facility EuPRAXIA*, P.A. Walker et al., Nucl.Instrum.Meth.
- *HORIZON 2020 EuPRAXIA Design Study*, P.A. Walker et al., J.Phys.Conf.Ser. 874 (2017) 012029.
- *Electron Injector for Multi-Stage Laser-Driven Plasma Accelerators*, Brigitte Cros et al., 10.18429/JACoW-IPAC2017-WEPVA001
- *SMILEI: a collaborative, open-source, multi-purpose particle-in-cell code for plasma simulation*, J. Derouillat et al., Comput. Phys. Commun. 222, 351-373 (2018)
- *Adaptive SIMD optimizations in particle-in-cell codes with fine-grain particle sorting*, A. Beck et al., <https://arxiv.org/abs/1810.03949>
- *Efficient Modeling Of Laser Wakefield Acceleration Through the PIC Code SMILEI In CILEX Project*, F. Massimo, ICAP 2018 Proceedings, JACoW

Visibilité et rayonnement

- présentations à des conférences et séminaires : * Présentations plénières
 - 2015: 2nd European Advanced Accelerator Workshop, Elba, Italie (A. Beck)
* Journées accélérateurs IN2P3, Roscoff, France (A. Specka)
 - 2016: * Plasma Collider Workshop, Berkeley, USA (A. Specka , **invité**)
convener du working groupe laser plasma acceleration
* Forum ILP, Oleron, France (A. Beck, **invité**)
* APOLLON FIRE 1st Users' meeting, Synchrotron SOLEIL (A. Specka)
 - 2017: * ANAR workshop, CERN (A. Specka)
convener du working groupe laser plasma acceleration
* 3rd European Advanced Accelerator Workshop, Elba, Italie (A. Beck)
convener du working groupe simulation & computing
* ICFA Seminar 2017, Ottawa, Canada (A. Specka, **invité**)
 - 2018: IBIC, Shanghai, China (M. Khojoyan)
ICAP, KeyWest, USA (F. Massimo, M. Khojoyan)
- Highlights récents:
 - réussite du «grand challenge» à la «une» de la HP GENCI en oct18
- Accueil de la réunions de la collaboration
 - 1st steering committee EuPRAXIA, Ecole Polytechnique, 1j, fév 2016
 - Workshop on Pilot Applications of Electron Plasma Accelerators (PAEPA), Ecole Polytechnique, 3j, oct. 2016
 - 1st EuPRAXIA week, Ecole Polytechnique, 4j,m nov 2016

Responsabilités (2014-2018)

- Comité de Pilotage de CILEX–APOLLON (France, A.S.2013–)
- GDR « APPEL » (France, 2018–)
 - axe «expériences» et comité création (A.S.)
 - axe «simulation» (A.B.)
- membre du **SPS Council** (CERN , A.S., 2014–16)
- membre du comité d'organisation du **EAAC** (biennal) (A.S.)
- membre du steering Board d'EuroNNAC (H2020, A.S.)
- deputy coordinator de **EuPRAXIA** (H2020, A.S., 2015–19)
- coordinator of JRA WP18 in **ARIES** (H2020, A.S., 2017–21)

Responsabilités administratives et d'enseignement

- Enseignements:
 - A.S.: professeur chargé de cours à l'École polytechnique (77h) cours magistraux, TD, encadrement stage, MOOC master PHENIICS
 - A.B.: encadrement de 2 projets de recherches en laboratoire (X)
 - F.M.: vacataire IUT d'Orsay
- Implications dans la vie de l'Université:
 - référent du département de physique pour le bachelor de l'X
- Implications au niveau national:
 - responsable du master projet ALP-e de l'IN2P3 (A.S, 2016–)
- Implications dans la vie du laboratoire:
 - membre élu du Conseil Scientifique du LLR (A.S., 2014)
- Demandes et gestion de supports financiers spécifiques:
 - P2IO (DACTOMUS, POSTDOC)
 - H2020 (EuPRAXIA, ARIES)
 - Allocation GENCI (équivalent appel 2018 = ~230k€/an coût calcul)

Evolution du groupe à venir

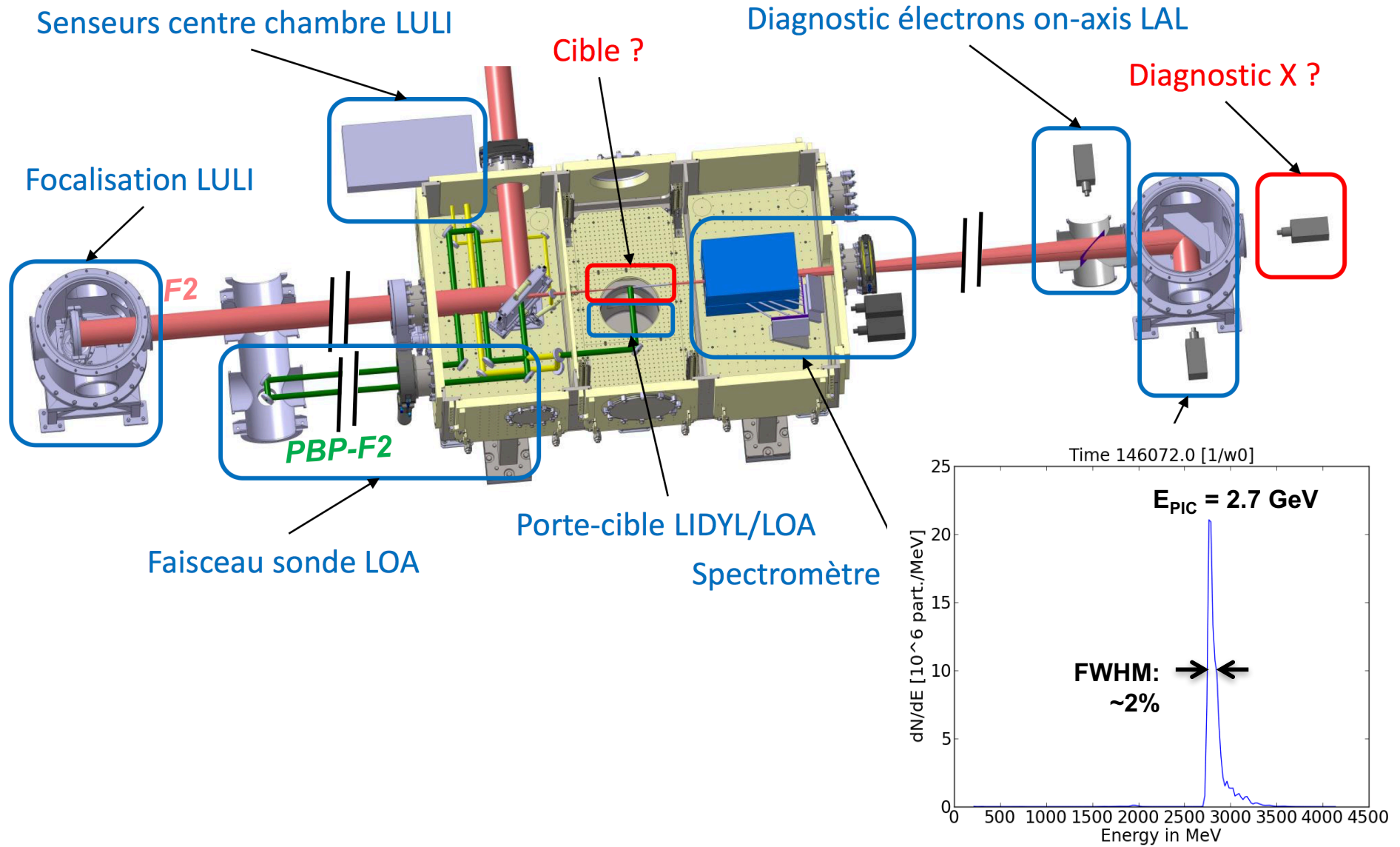
(FTE estimés)

- départ MK (fin nov. 2018) (-1 h.a en 2019)
- départ FM probable (2019) (- 1 h.a en 2019)
- recrutement de 1 postdocs ou CDD chercheur a partir de début 2019 (+2 h.a 2019-2020)
- recrutement d'un IR mécanique en cours (+2 h.a 2019-2020)

Projet scientifique

1. Expériences LWFA à 1 étage et à 2 étages sur CILEX-APOLLON
 - **2018-2020: campagnes sur APOLLON 1PW:** (coll^o: LOA, LPGP, CEA)
 - caractérisation des faisceaux d'e⁻ (énergie, divergence, émittance),
 - optimisation injecteur, applications (collaboration: LOA, LPGP, CEA)
 - **2019-2021: campagnes sur APOLLON multi-PW:** (coll^o: LOA, LPGP, CEA)
 - caractérisation des faisceaux d'e⁻ (énergie, divergence, émittance),
 - applications (collaboration: LOA, LPGP, CEA)
 - **2018-2023: préparation et la démonstration de l'accélération 2 étages (collaboration LPGP, CEA) <- ARIES**
2. Expériences LWFA à un étage sur lasers intenses disponibles
 - **test et validation des nouveaux diagnostics**
3. Simulation de LWFA: dimensionner et analyser des expériences
 - **decomposition azimutale, enveloppe -> scans possibles**
4. Participation dans la *design study* EuPRAXIA et possibles suite

premieres experiences sur CILEX-APOLLON



Auto analyse du groupe

- Points forts:

- Expertise dans la conception des diagnostics des électrons accélérés et des outils d'analyse des données
- Expertise dans l'utilisation et dans le développement des codes de simulation plasma
- Compétence acquise en design magnétique et prototypage
- Capacité à dialoguer au sein d'un programme pluridisciplinaire avec "laseristes" et "plasmiciens"

- Opportunités:

- La volonté affichée de la direction de CILEX de favoriser un programme de R&D durable sur l'accélération d'électrons
- Une bonne visibilité et intégration dans les réseaux et projets européens (EuroNNAC, EuPRAXIA, ARIES)
- Valorisation des techniques de détection et d'analyse nouvelles (dans la communauté laser-plasma)

Auto analyse du groupe (2)

- Points faibles:

- **faible nombre de permanents**

- sur-concentration des responsabilités sur une seule personne
- worst case en 2019: diminution de 40% de l'équipe

- **décroissance du soutien technique au LLR**

- Risques:

- **dépendance à GENCI** pour les allocations calcul

- **faible cadence de tir du laser APOLLON (1/min)**

=> limitera études de fiabilisation (grande statistique)

- **attribution des moyens techniques par CILEX insuffisante**
(sous-effectif chronique du projet)

- **retard accumulé menacera la position dominante de CILEX**

- **Le fonctionnement en «installation utilisateur» de CILEX peut compromettre un programme collaboratif et de longue haleine.**

MATERIEL ADDITIONNEL

➤ **Collaborations locales:**

- CILEX: LULI, CEA/IRFU, CEA/IRAMIS, LAL, LPGP, LOA (ENSTA), SOLEIL
- DACTOMUS: CEA/IRAMIS, LPGP (Orsay), LAL
- LULI, CEA/IRFU, CEA/IRAMIS, LAL, LOA (ENSTA), LULI

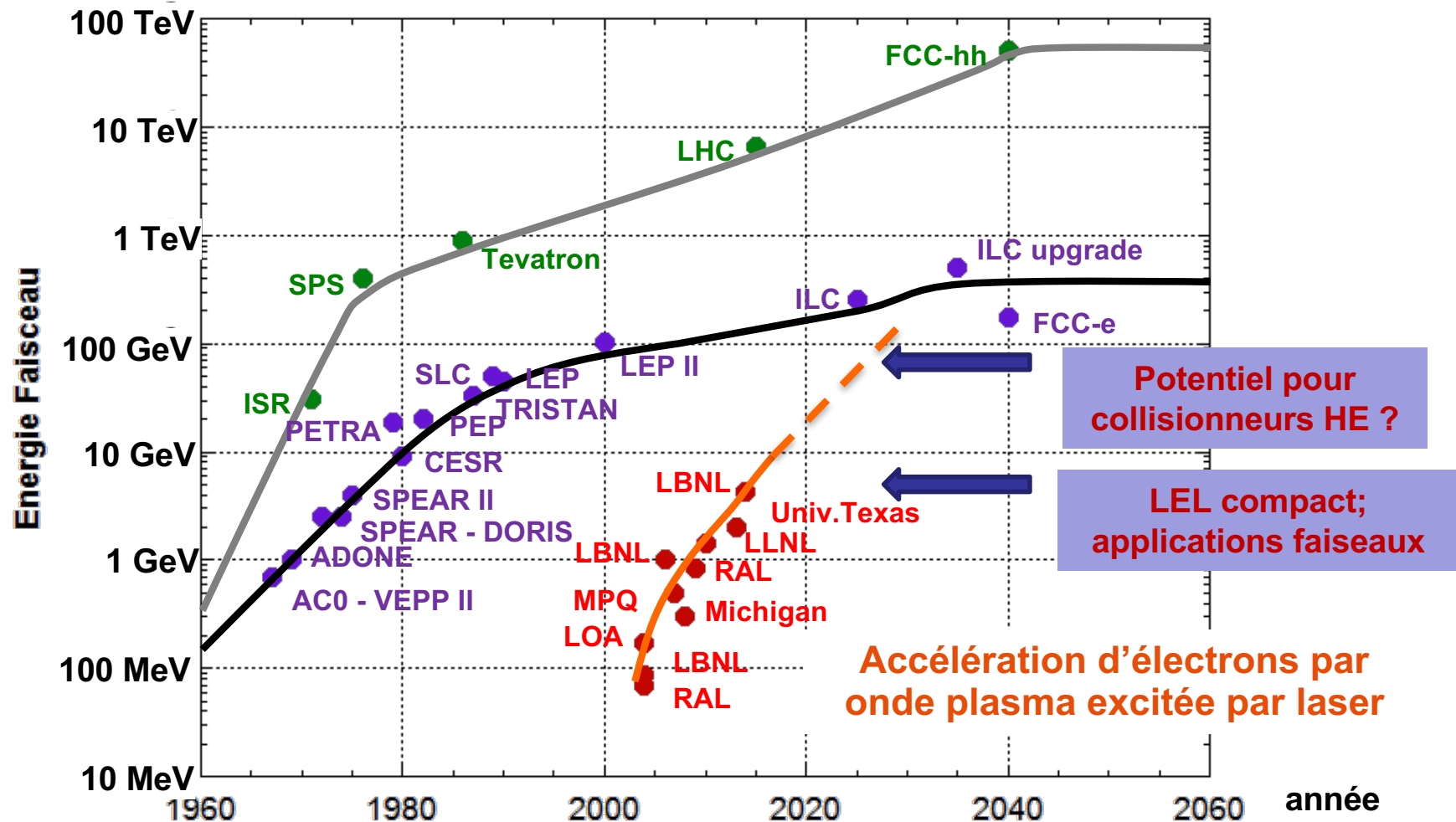
➤ **Collaborations européennes:**

- EuPRAXIA: WP HEP applications
DESY, U OXFORD, CEA/IRFU
- ARIES: WP Very High Gradient Acceleration Techniques

➤ **Stratégie internationale:**

- Berkeley Plasma collider workshop (2016)
- ANAR2017
(ICFA Advanced and Novel Accelerator for HEP Roadmap) (2017)

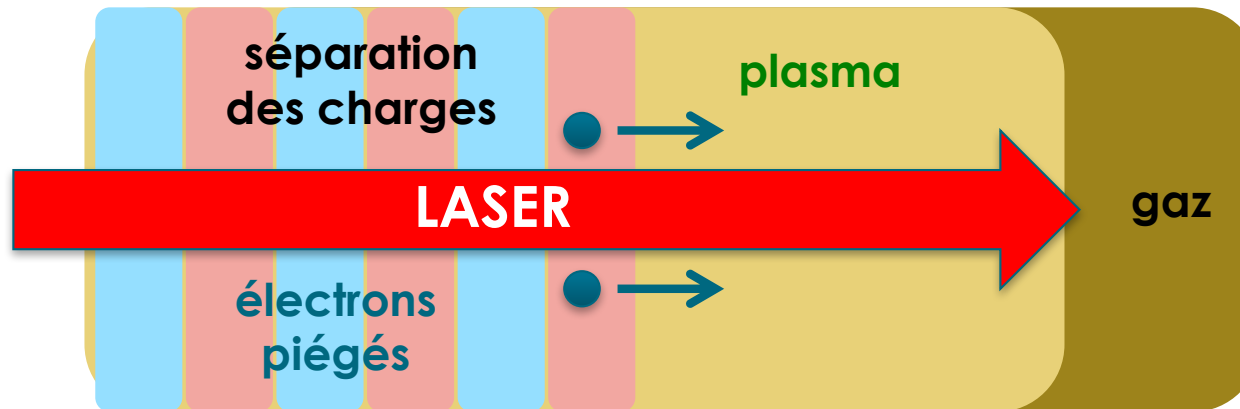
Evolution des énergies obtenues en accélération laser-plasma



- gradients en ALP 10 à 100 fois supérieurs aux LINAC RF
- évolution des énergies maximales plus rapide

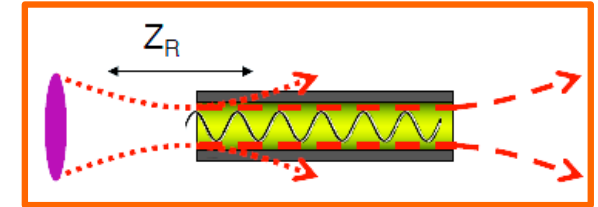
Principe physique d'accélération laser de particules ALP: électrons

- laser de puissance à impulsion courtes: >50TW, 20-100fs, >1 J, focalisé



- accélération d'électrons: *laser wakefield acceleration* (LWFA)
 - cible gazeuse (plasma sous-dense)
densité électronique: $n_e \sim 10^{16} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
 - ionisation par effet de champ
 - séparation des charges \Rightarrow onde plasma: $\lambda_p \sim 300\mu\text{m} - 10\mu\text{m}$
 - v_{PH} (onde) = v_G (laser) \Rightarrow onde relativiste

Accélération laser-plasma d'électrons : limitations



- **Diffraction du laser: longueur de Rayleigh**

- remède: (auto-focalisation), guidage par capillaire, décharge

- **Déphasage du paquet et de l'onde plasma ($\gamma_{el.} > \gamma_{onde}$)**

$$L_{max} \propto n_0^{-3/2}$$

- remède : rampe de densité d'électrons décroissante, multi-étage

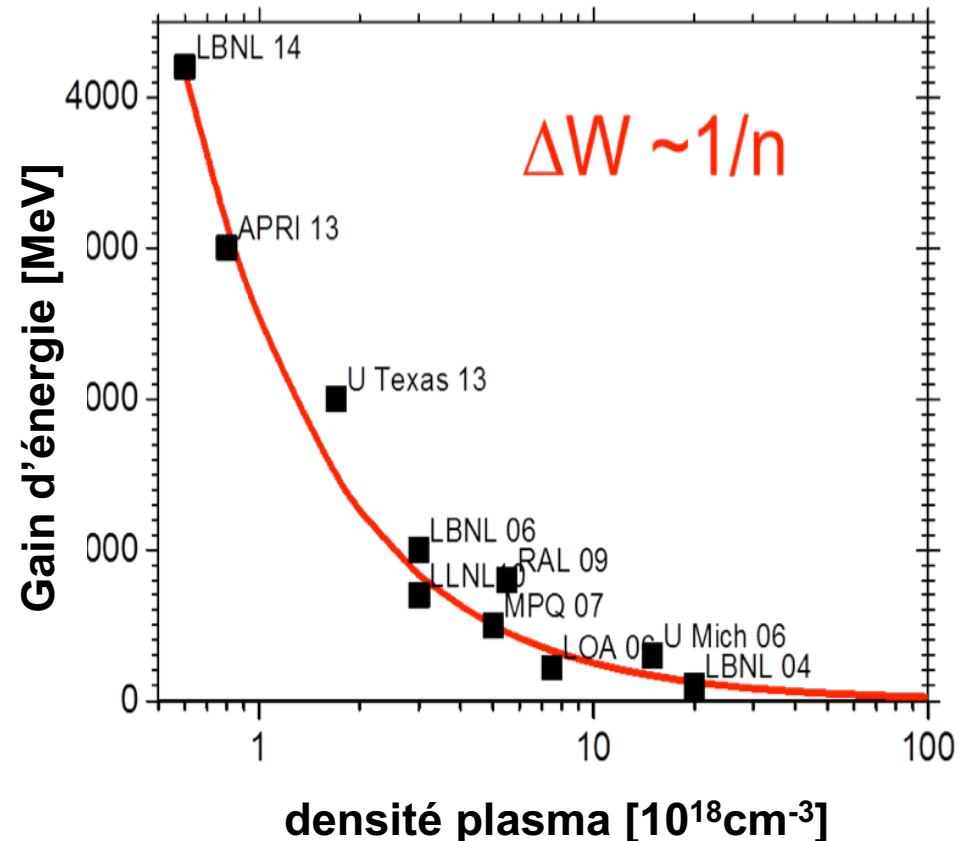
- **Epuisement du laser (*depletion*)**

$$L_{deplete} \propto \lambda_p^3 / \lambda_L^2 \propto n_0^{-3/2}$$

- **gradient acc.:** $G \sim E_0 = mc\omega_p / e \propto \sqrt{n_0}$

- **gain d'énergie:** $W = G \times L_{acc} \propto 1/n_0$

- **puissance crête laser:** $P_{laser} \propto 1/n_0$



augmenter le gain d'énergie (par étage)
=> baisser la densité plasma
et augmenter la puissance laser

Current Status of LWFA Electron Bunch Properties

Property	State of Art*	Reference	Remarks
Energy	2 GeV ($\pm 5\%$, 0.1 nC) 3 GeV ($\pm 15\%$, ~ 0.05 nC) 4 GeV ($\pm 5\%$, 0.006 nC)	Wang Kim Leemans	ICFA Workshop: Advanced and Novel Accelerators for HEP Roadmap april 2017, CERN
Energy Spread	1% (@ .01 nC, 0.2 GeV) 5-10%	Rechatin more t	
Normalized Transverse emittance	$\sim 0.1 \pi$ mm-mrad	Geddes Brunetti Platt	
Bunch Duration	\sim few fs	Kaluza (2010) – Jena (Faraday) Lundh (2011) – LOA; Heigoldt (2015) – MPQ/Oxford (OTR) Zhang (2016) – Tsinghua	
Charge	0.02 nC @ 0.19 GeV $\pm 5\%$ 0.5 nC @ 0.25 GeV $\pm 14\%$	Rechatin (2009b) – LOA Couperus (2017) - HZDR	Beam-loading achieved. FOM: $Q/\Delta E$?
Repetition Rate & Repeatability	~ 1 Hz @ > 1 GeV 1 kHz @ ~ 1 MeV	Leemans (2014) - LBNL He – UMich ('15); Salehi ('17) – UMD; Guénot ('17) -- LOA	Limited by lasers & gas targets

* No one achieves all of these simultaneously!

- Couperus, *submitted* ('17)
- Geddes, *PRL* **100**, 215004 ('08)
- He, *Nat. Comms* **6**, 7156 (2015)
- Heigoldt, *PR-STAB* **18**, 121302 ('15)
- Kaluza, *PRL* **105**, 115002 ('10)
- Kim, *PR*
- Leemans, *PRL* **113**, 245002 (2014)
- Lundh, *Nat. Phys.* **7**, 219 (2011)
- Salehi, *Opt. Lett.* **42**, 215 ('17)
- Wang, *Nat. Comms* **4**, 1988 (2013)
- Rechatin, *PRL* **103**, 194804 ('09b)

Current Status of LWFA

Summary report available (90 pages)

<http://www.lpggp.u-psud.fr/icfaana/ana-publications-2017>

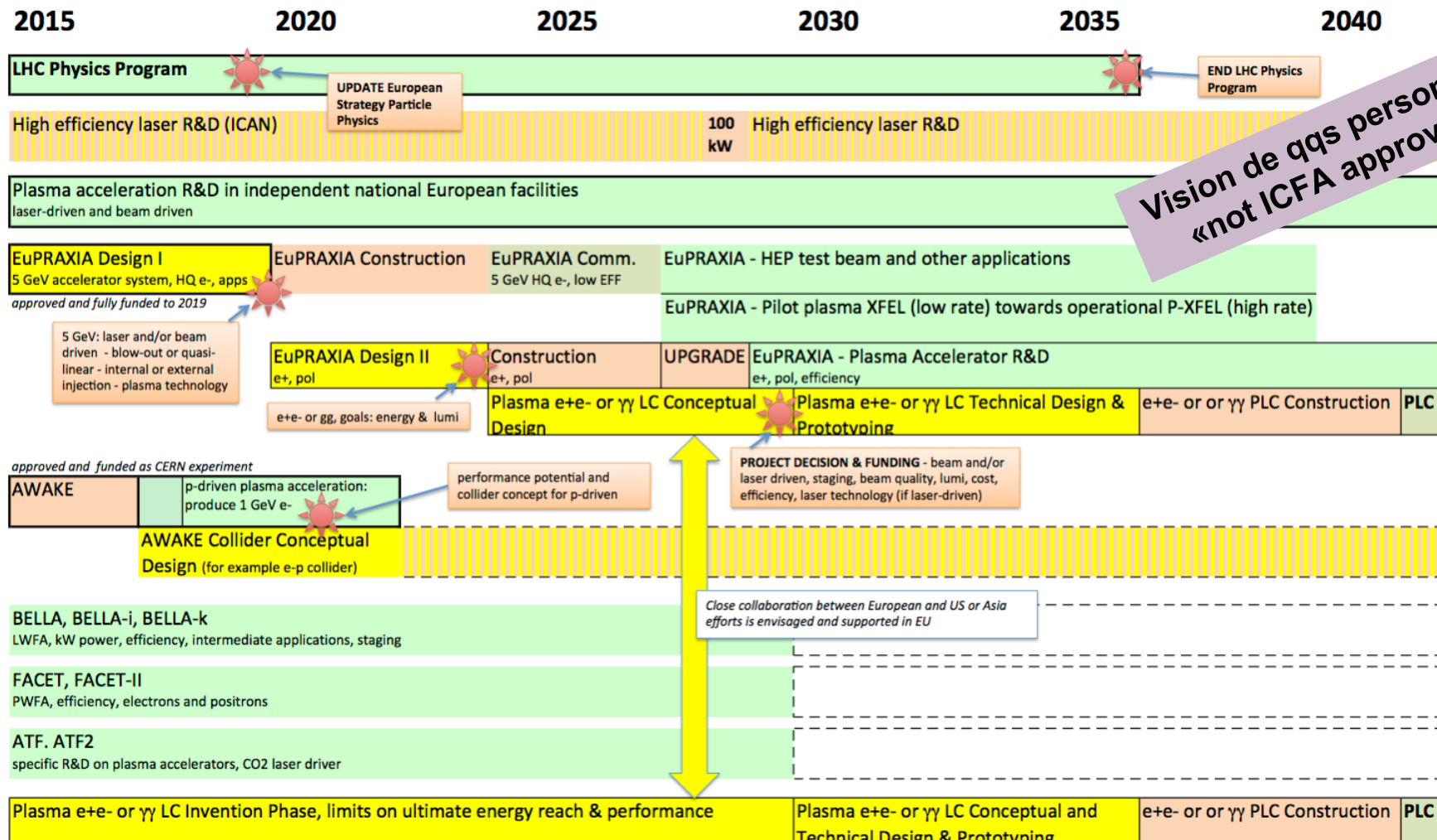
Des expériences d'accélération vers des accélérateurs

- **roadmap vers un collisionneur** [Plasma Collider WS, Berkeley, jan 2016]
- **nécessite d'une étape intermédiaire: accélérateur plasma à qqs GeV**

Plasma Roadmap for HEP - Example, based on personal view of a few persons

Drafted January 2016, Plasma LC Workshop at LBNL

As a start of discussion, not an end point of discussion. Cannot be used as an official roadmap, should trigger discussions and thoughts. Requires input, discussion, iteration, refinement, ... To be complemented by detailed R&D roadmaps from WG's. Based on discussions and input from R. Assmann, B. Cros, A. Specka, E. Geschwendtner, P. Muggli.



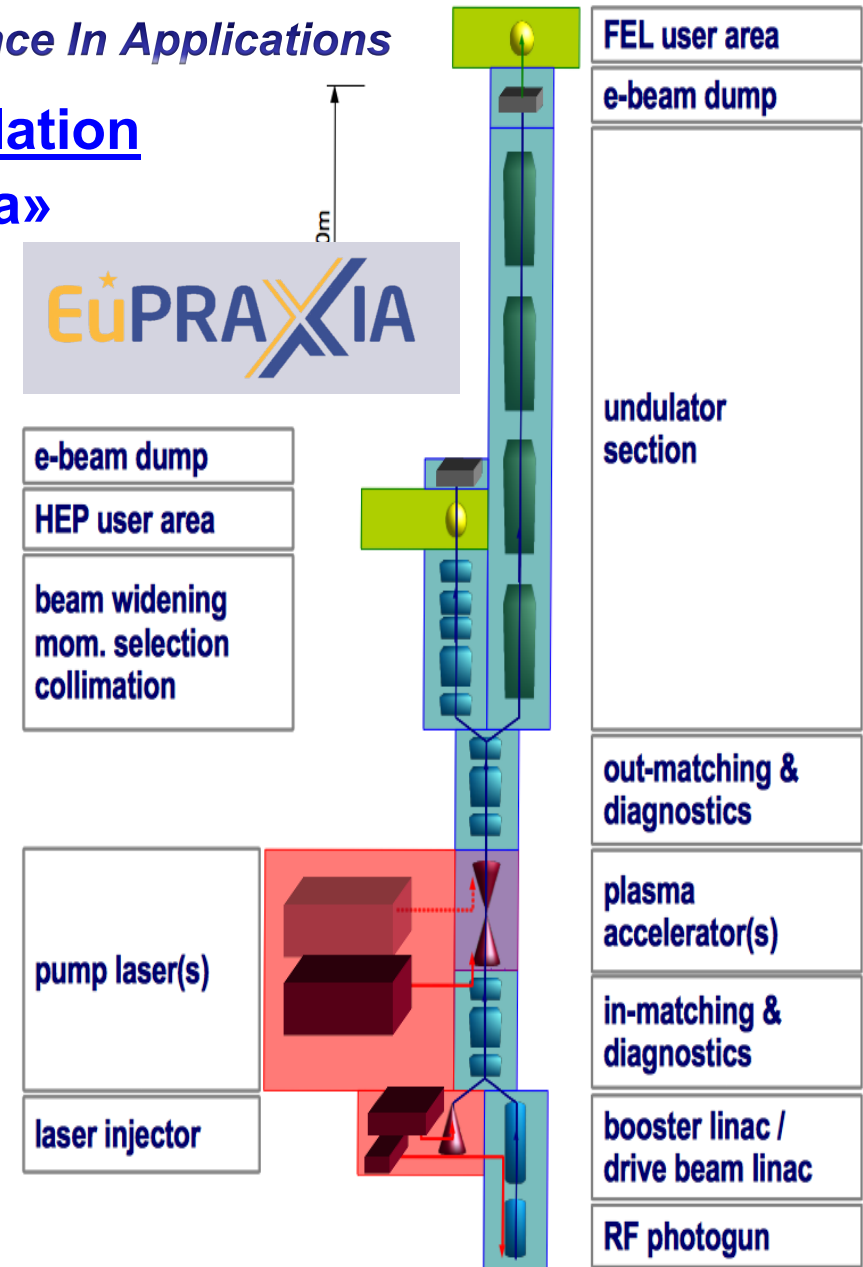
EuPRAXIA: Etude de conception d'un accélérateur plasma européen

European Plasma Research Accelerator with eXcellence In Applications

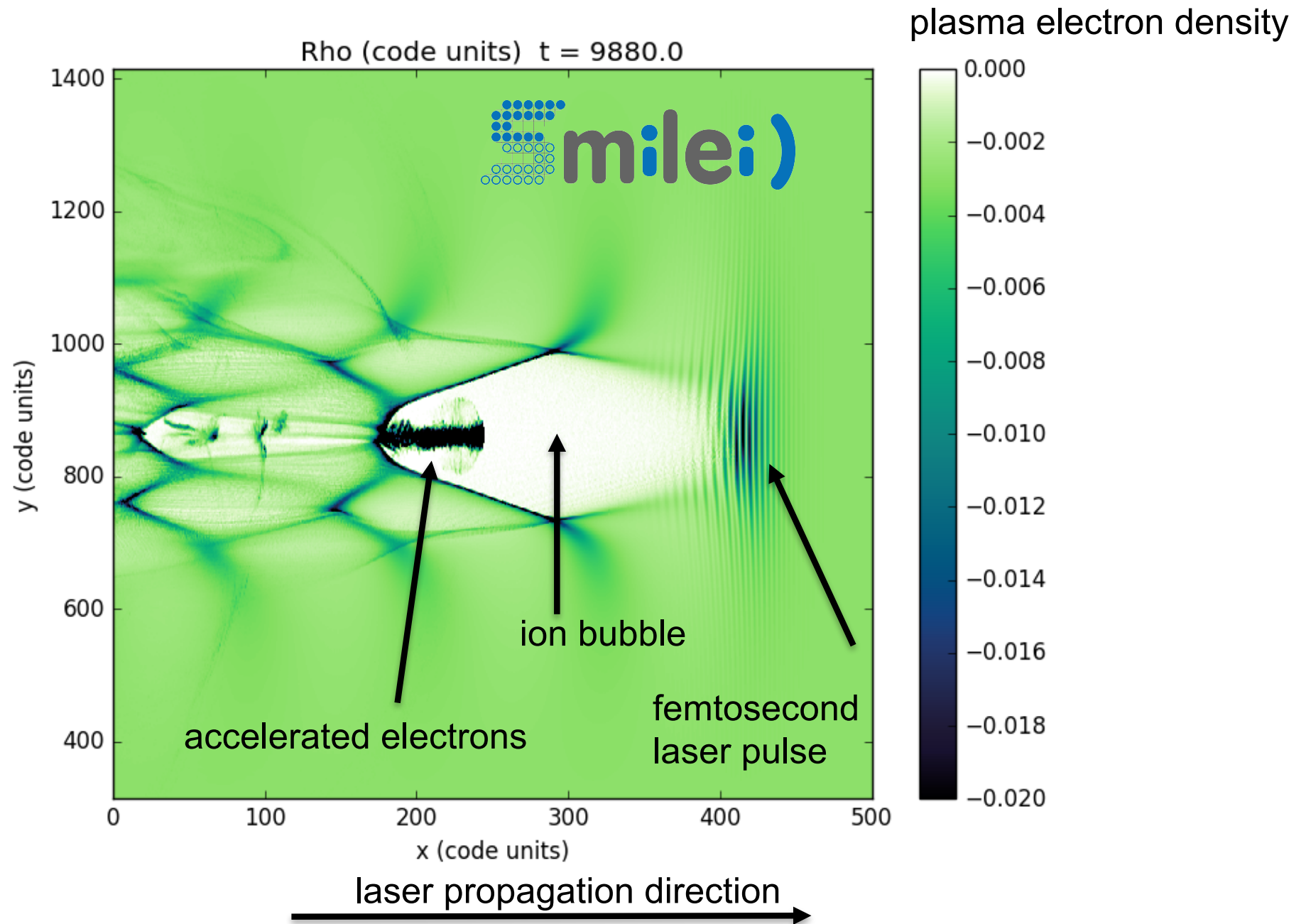
Concevoir, proposer et réaliser une installation «accélérateur d'électrons par laser-plasma» européenne, pour R&D et applications

- 2019: *conceptual design study* (3M€)
- 2020: se placer sur la ESFRI *roadmap*
- 2023: financer et construire l'installation

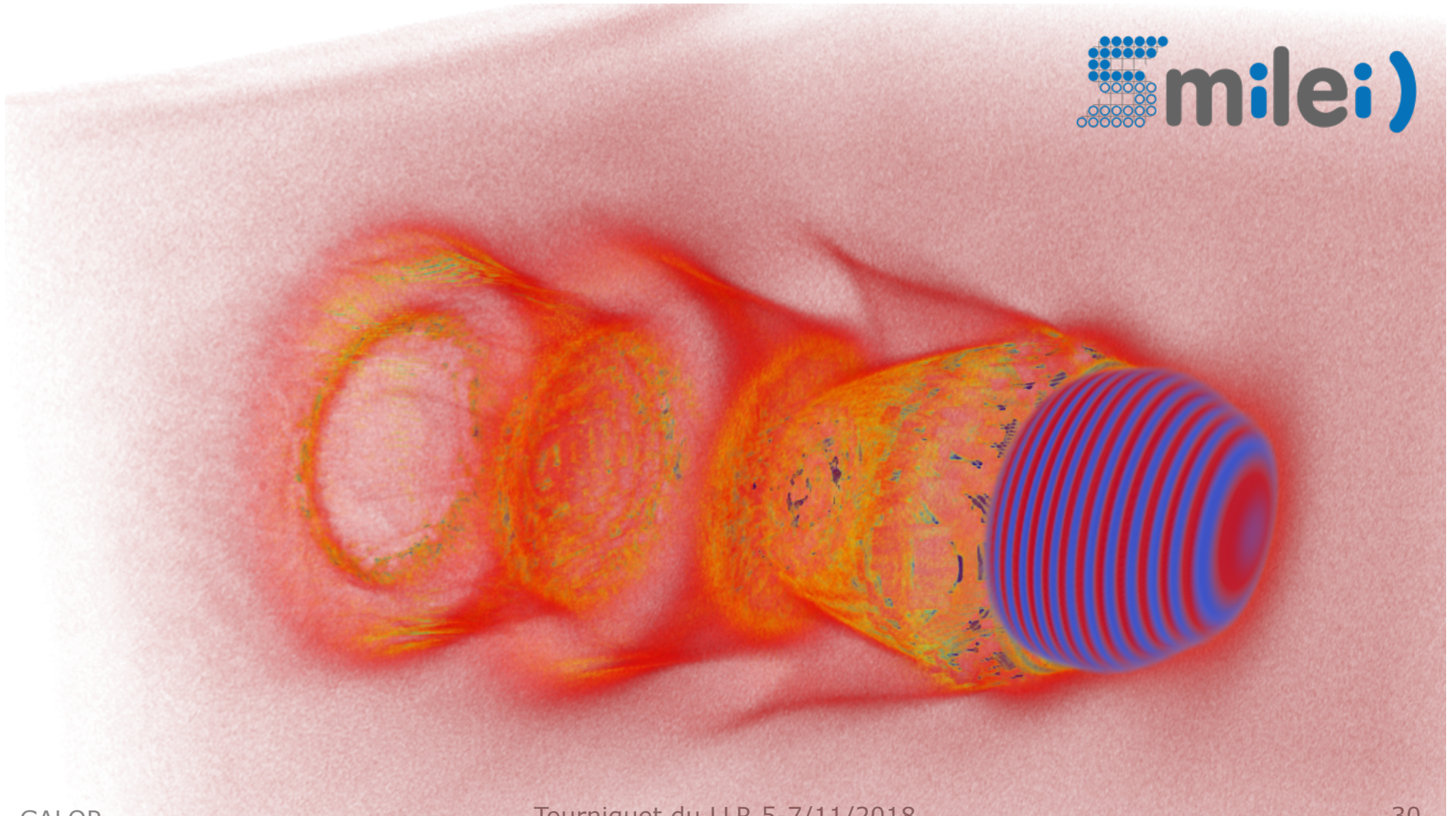
Electron beam energy	1-5 GeV
Charge per bunch	1 – 100 pC
Repetition rate	10-100 Hz
Bunch length	0.01 – 10 fs
Peak current	1 – 100 kA
Energy spread	0.1-1%
Norm. emittance	0.01 – 1 μm



Simulation of laser plasma acceleration of electrons: SMILEI



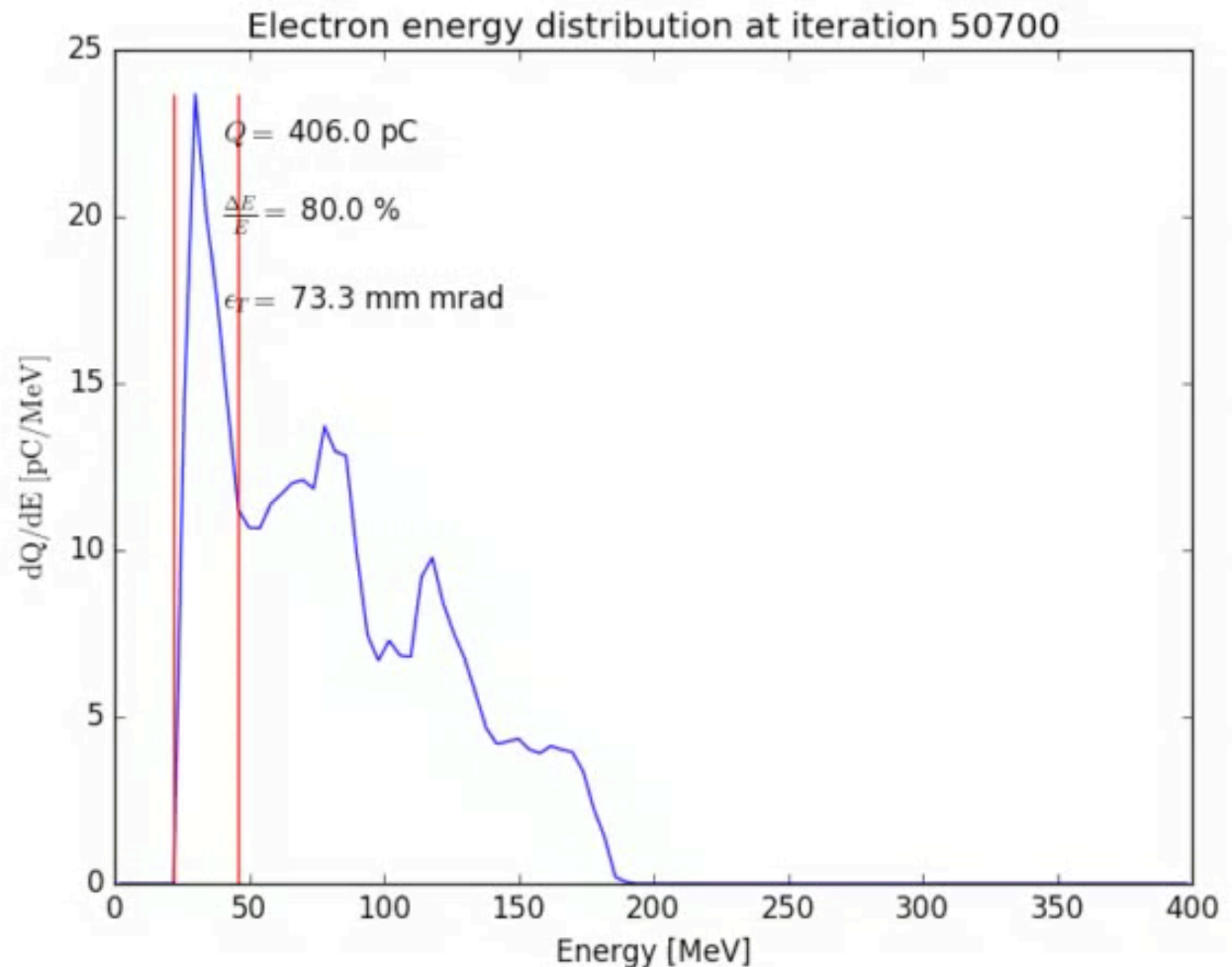
Production Scientifique - Analyses de Physique -



- 3D PIC Simulation (SMILEI code) of unguided, unassisted acceleration in O(1mm) gas jet -> high yield injector w/ F2 (1PW)



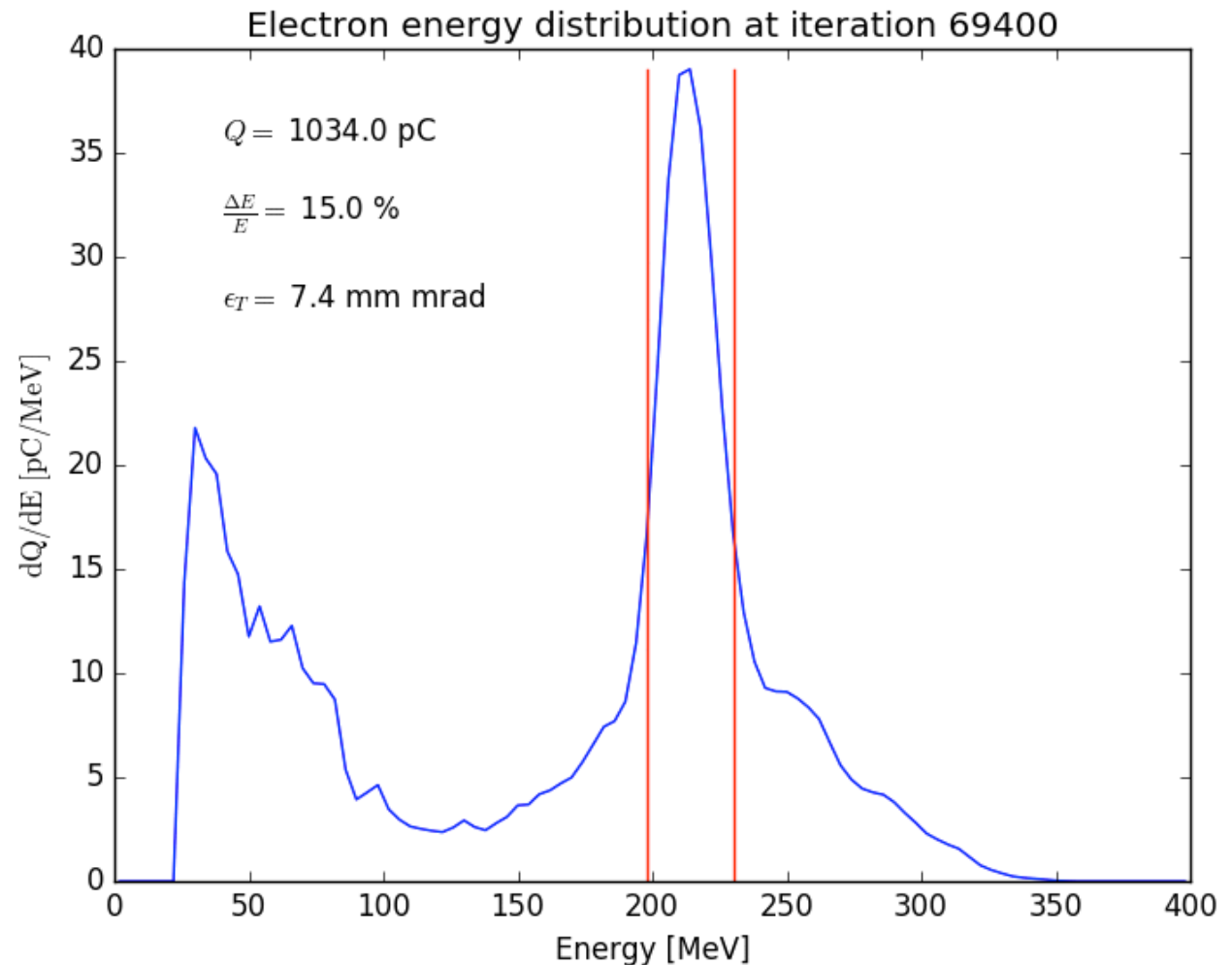
- $\lambda_0 = 0.8 \mu\text{m}$
- $a_0 = 2.56$
- $\tau_L = 20 \text{ fs}$
- $w_0 = 40 \mu\text{m}$
- $E = 7.5 \text{ J}$
- $P = 350 \text{ TW}$
- $n_0 = 5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
- $L_{\text{ramp}} = 0.1 \text{ mm}$
- $L_{\text{tot}} = 1.65 \text{ mm}$



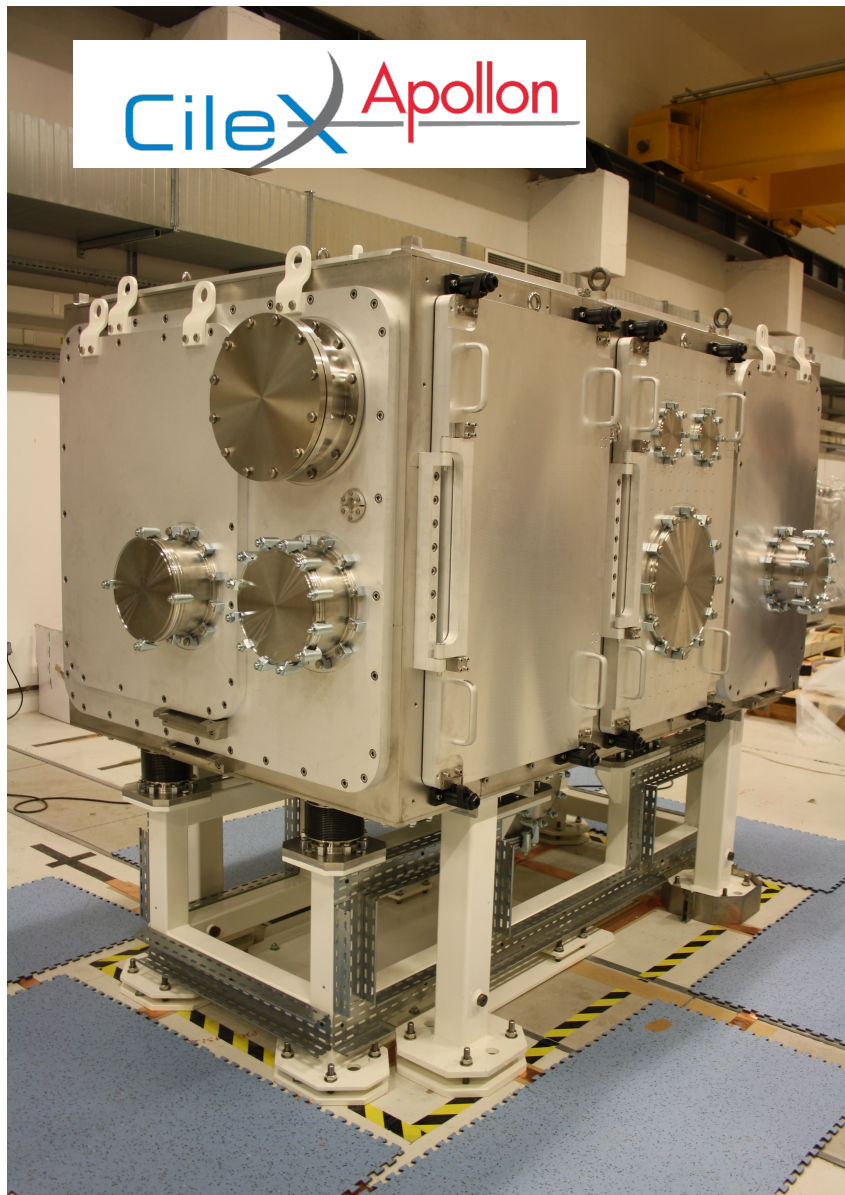
- 3D PIC Simulation (SMILEI code) of unguided, unassisted acceleration in O(1mm) gas jet -> high yield injector w/ F2 (1PW)



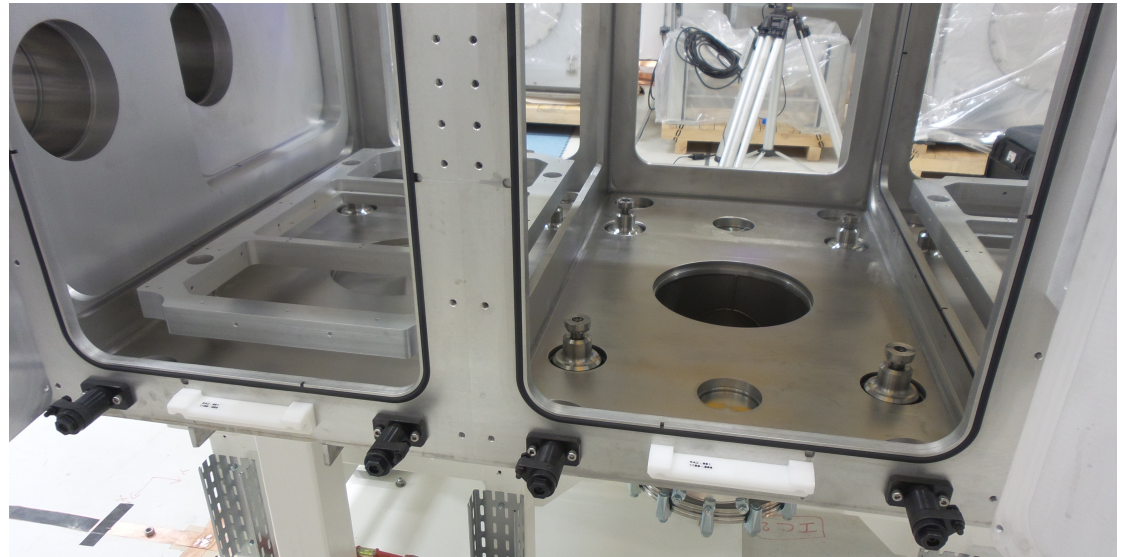
- $\lambda_0 = 0.8 \mu\text{m}$
- $a_0 = 2.56$
- $\tau_L = 20 \text{ fs}$
- $w_0 = 40 \mu\text{m}$
- $E = 7.5 \text{ J}$
- $P = 350 \text{ TW}$
- $n_0 = 5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
- $L_{\text{ramp}} = 0.1 \text{ mm}$
- $L_{\text{tot}} = 1.65 \text{ mm}$



CILEX-APOLLON: installation of interaction chambers (Aug. 2017)



interaction vacuum chamber



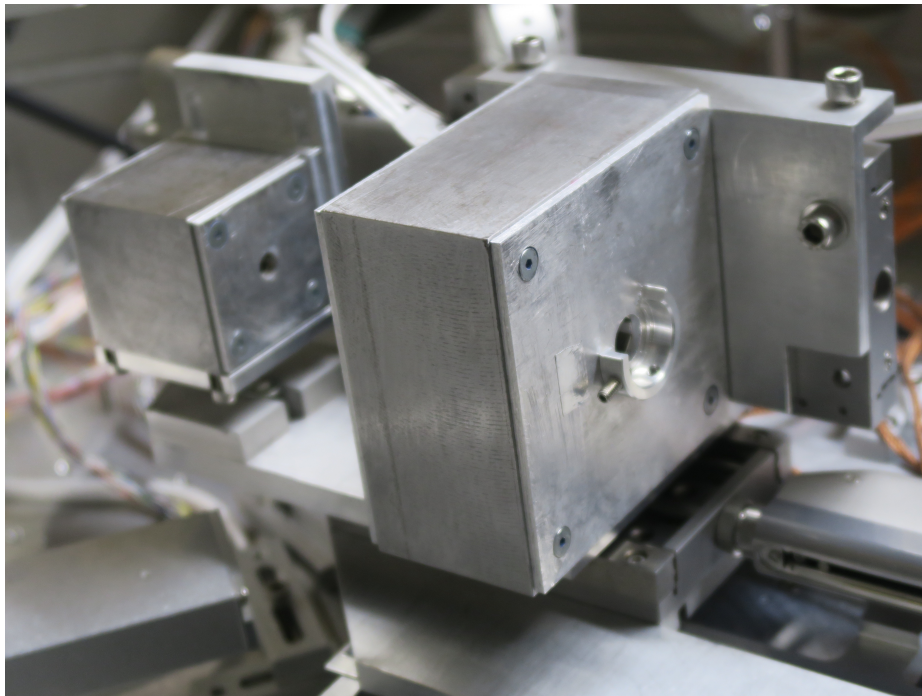
Interior of interaction vacuum chamber



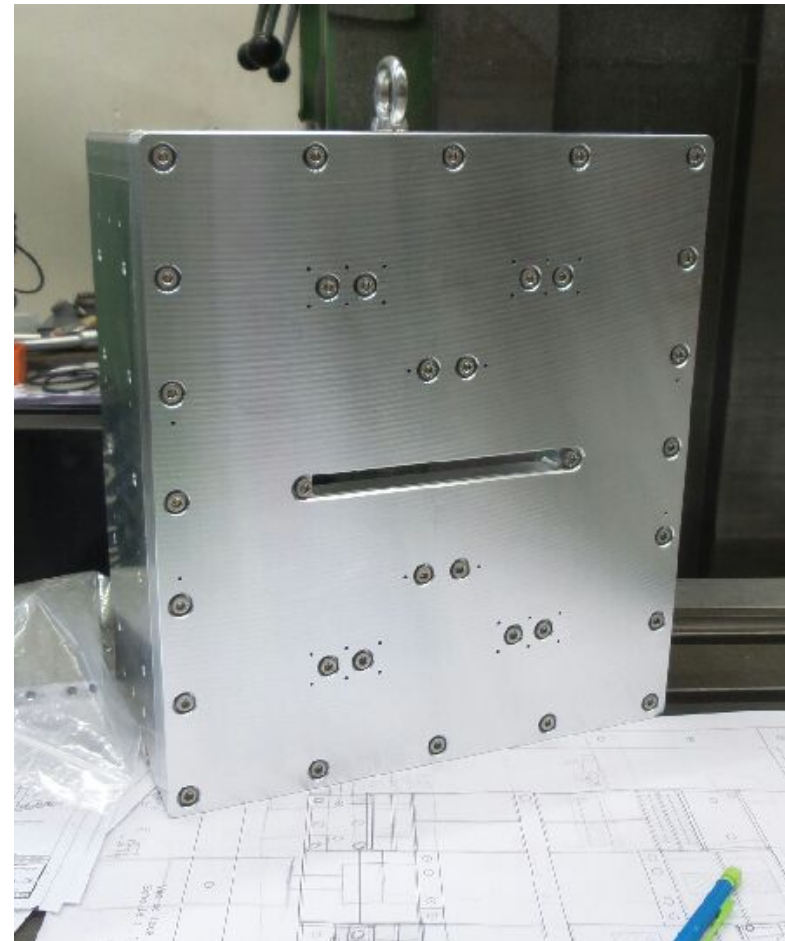
Long-focal experimental area dedicated to high-energy electron acceleration and X-ray generation

CILEX-APOLLON: compact electron diagnostics

- magnetic zoom objective
- tested on 100TW laser UHI100 (Saclay) (jan 2017)
- goal: compact electron transport



- construction of 2.1 Tesla permanent dipole magnet
- prototype being characterized
- goal: measure highest energies

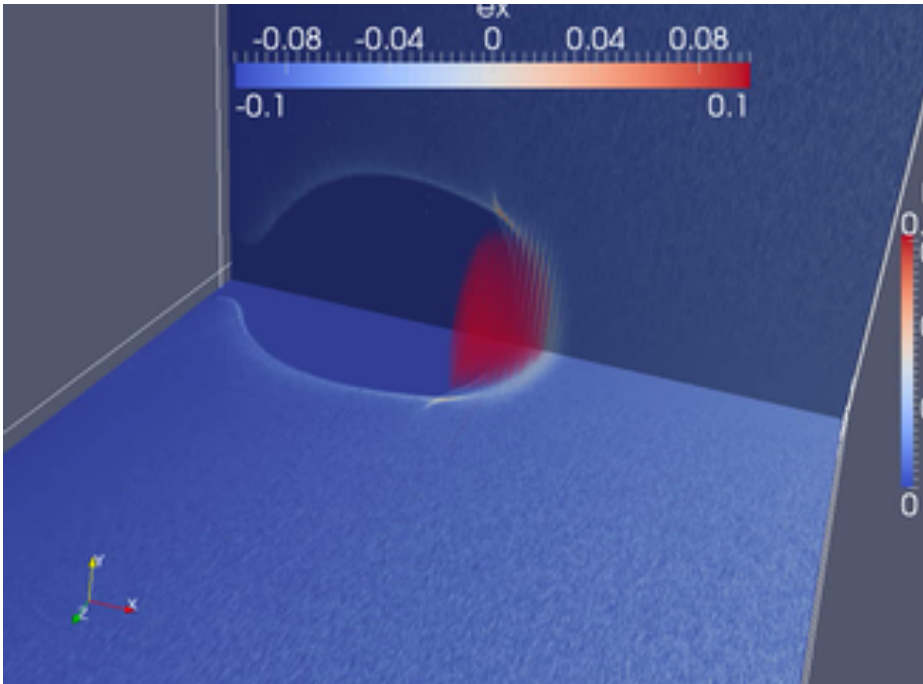


- **T1. Exploratory experiments using a single beam**
 - Validate scaling laws & commission the facility (laser parameters, experimental area)
 - Explore new regimes to produce high quality electron beams in the few GeV range
- **T2. Optimize injector (1PW):**
 - >100pC charge electron bunches in the range 50-300MeV, that can be focused at the entrance of the 2nd stage.
- **T3. Develop and implement the equipments necessary to**
 - Characterize electron bunches (energy and spatial distribution)
 - Synchronize electron bunch and laser beam
 - Transport electron bunches at the entrance of the second stage
 - Guide the laser beam over large distances (0.1-1 m)

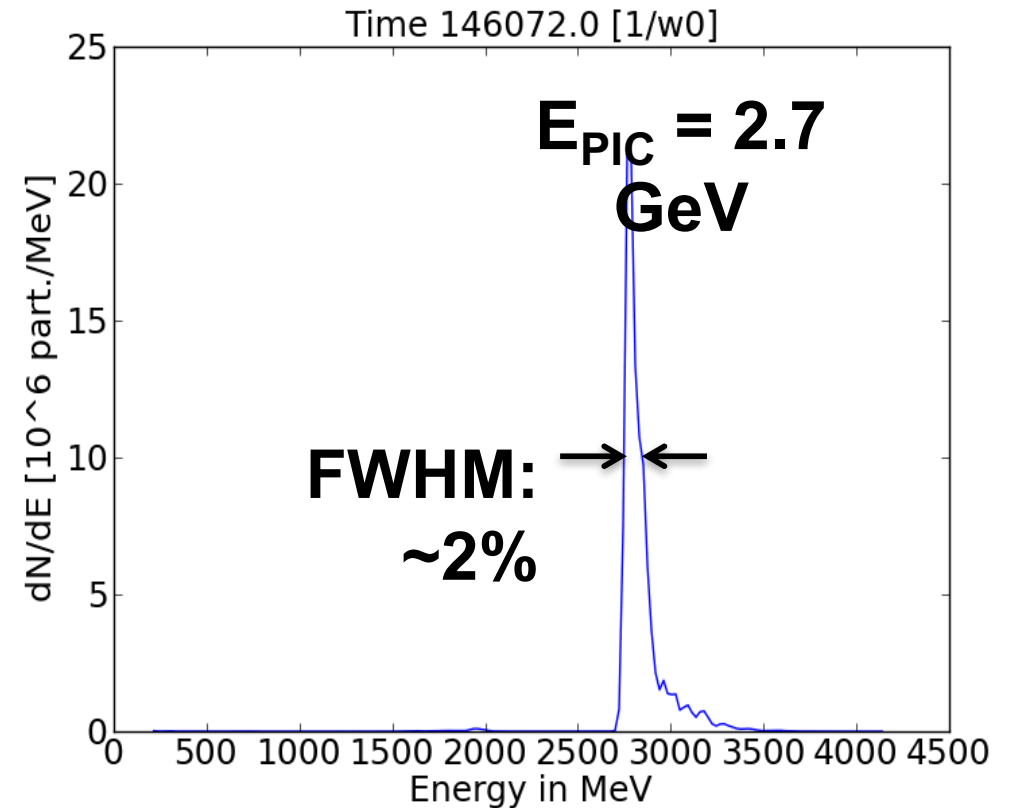
Blow-out regime LWFA : selfinjection and acceleration

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

- ❑ (CILEX/Apollon 1PW startup)
- ❑ laser: 600TW 25fs $w_0=30\mu\text{m}$
- ❑ comoving window over 18mm
- ❑ bubble shrinks, then expands

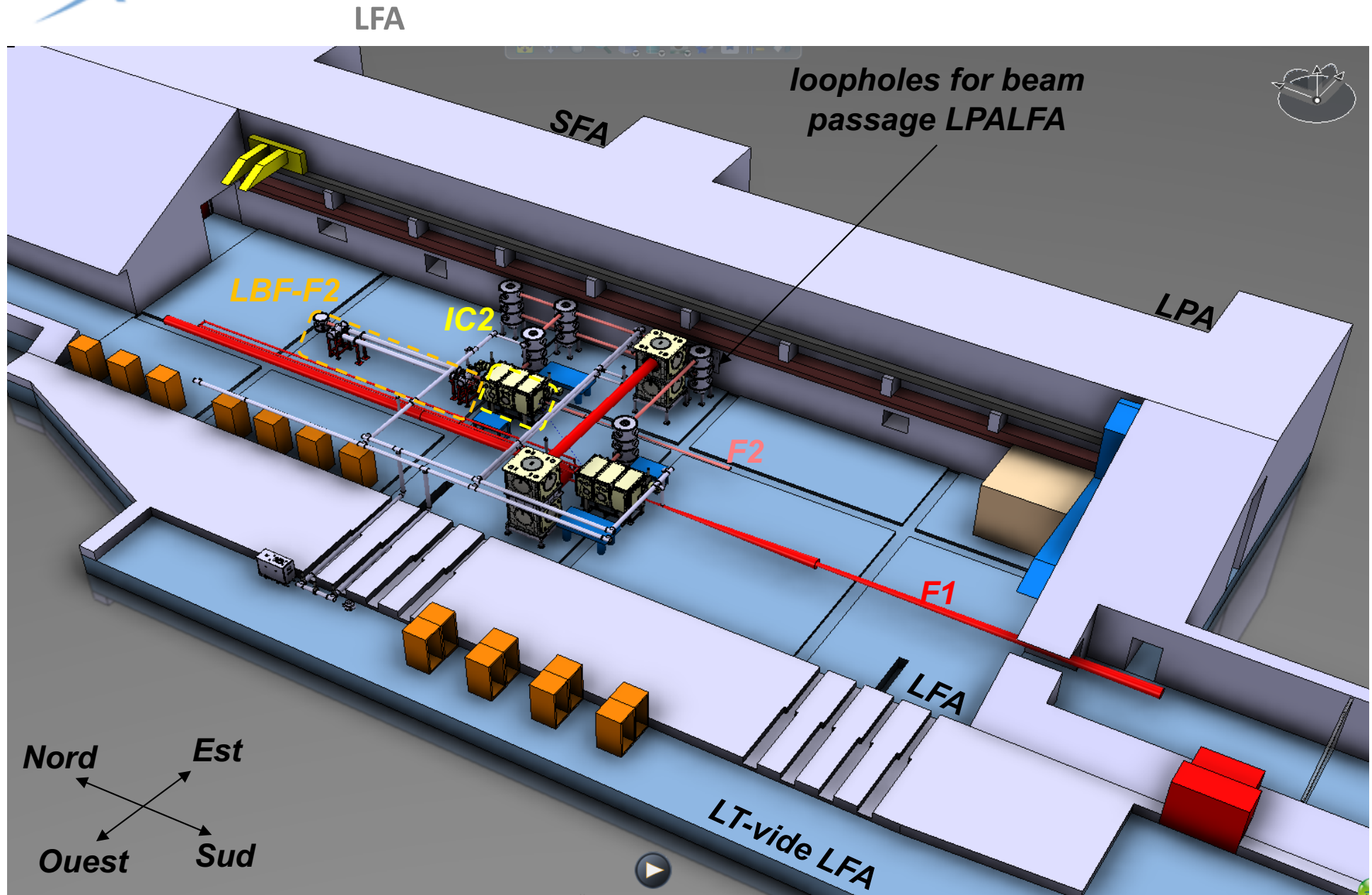


energy spectrum of self-injected electrons

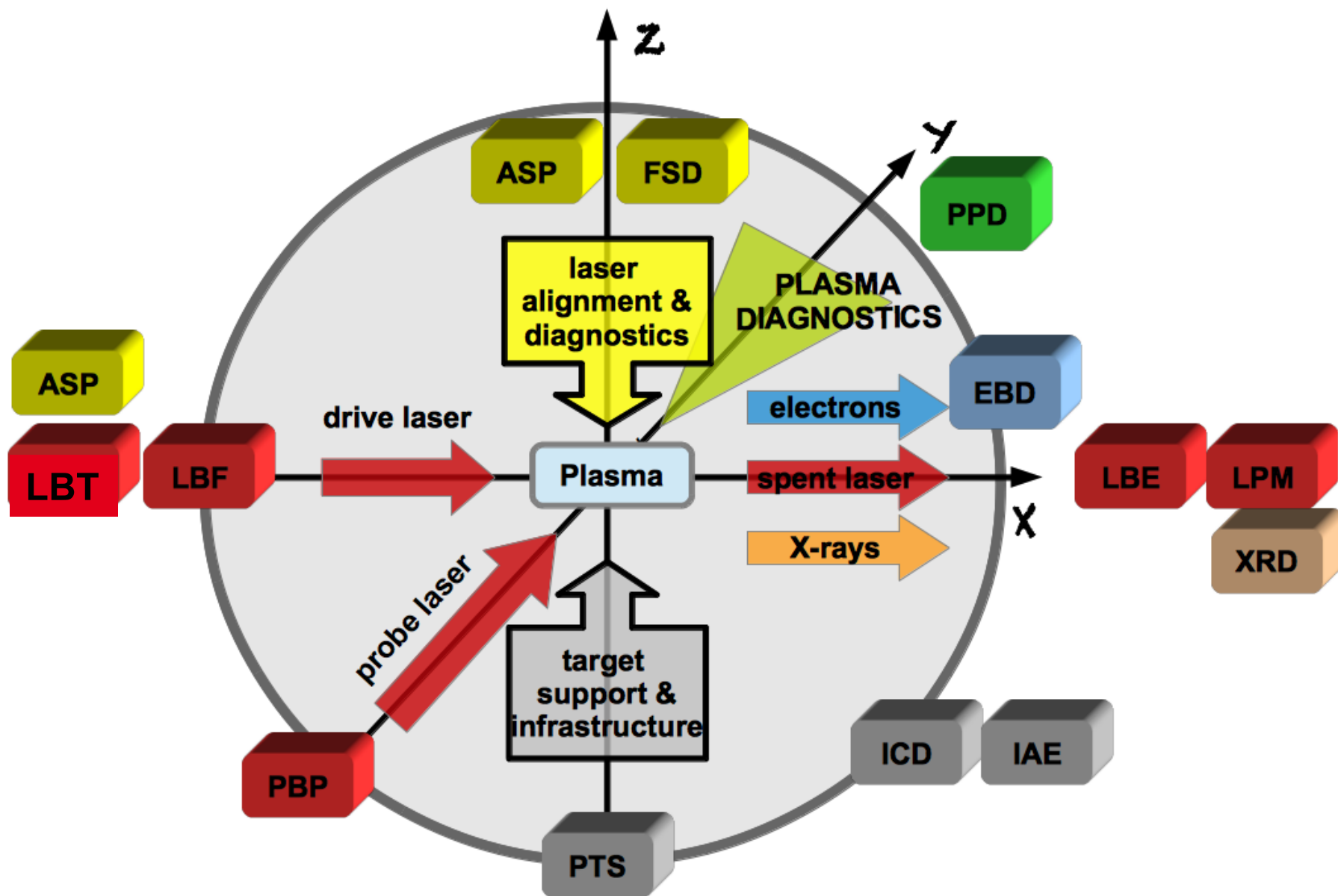


- simulation shows stable acceleration even without guiding
- peaked energy spectrum around 3GeV after $\sim 20\text{mm}$







Long Focal Area

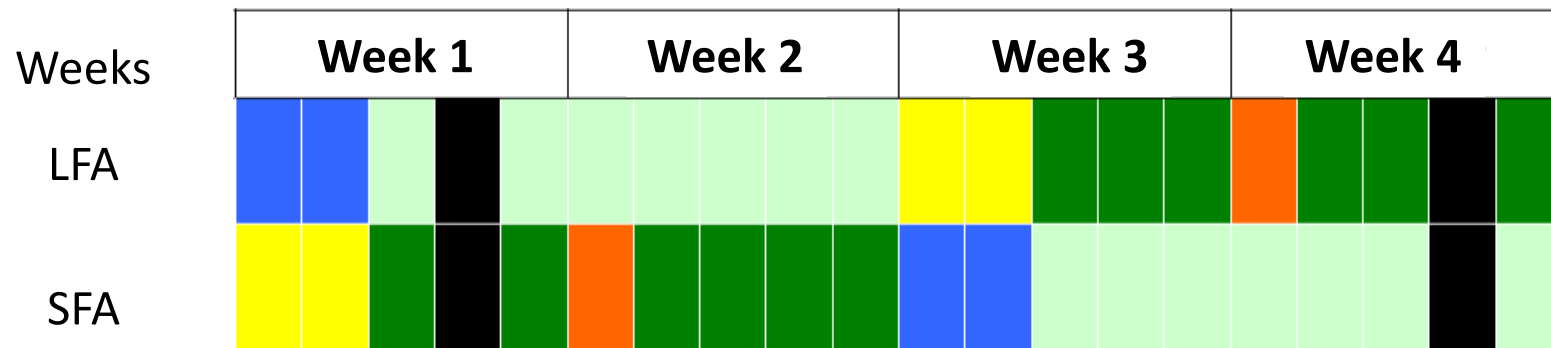


Reminder: space occupation around each IP



Campaign model on 4 weeks basis

- Each block corresponds to 1 day
- Experimental assembly without laser (**7 days**) 
- Holidays and contingency 2 days 
- Switch of laser configuration (2 days) 
- Experiences (**6 days** : 1 800 shots) 
- Laser Maintenance (1 day every 2 weeks) 
- Experimental dismantling (2 days) 



Dispositif envisagé pour les premières expériences

