



SGCN

Secrétariat général du Comité national



COMITE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

CONSEIL SCIENTIFIQUE DE L'INSTITUT NATIONAL DE PHYSIQUE NUCLEAIRE ET DE PHYSIQUE DES PARTICULES (IN2P3)

Réunion plénière du
mardi 9 février et mercredi 10 février 2021
par VISIOCONFERENCE

Accélération d'électrons par laser-plasma

motivation, physique, applications

de l'accélération à l'accélérateur: EuPRAXIA

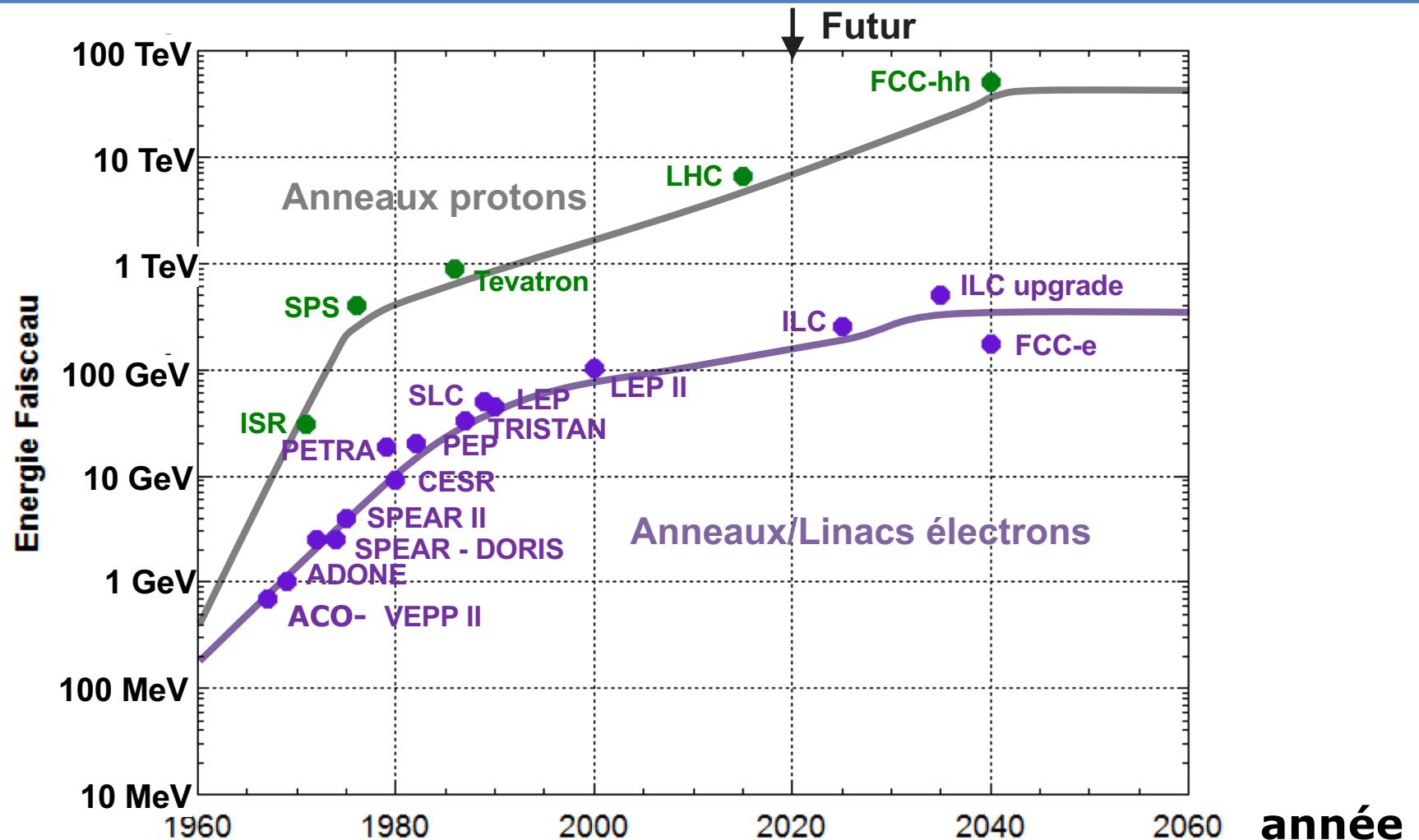
activités en France et à l'IN2P3

Arnd Specka, LLR, École polytechnique, Palaiseau

Remerciements:

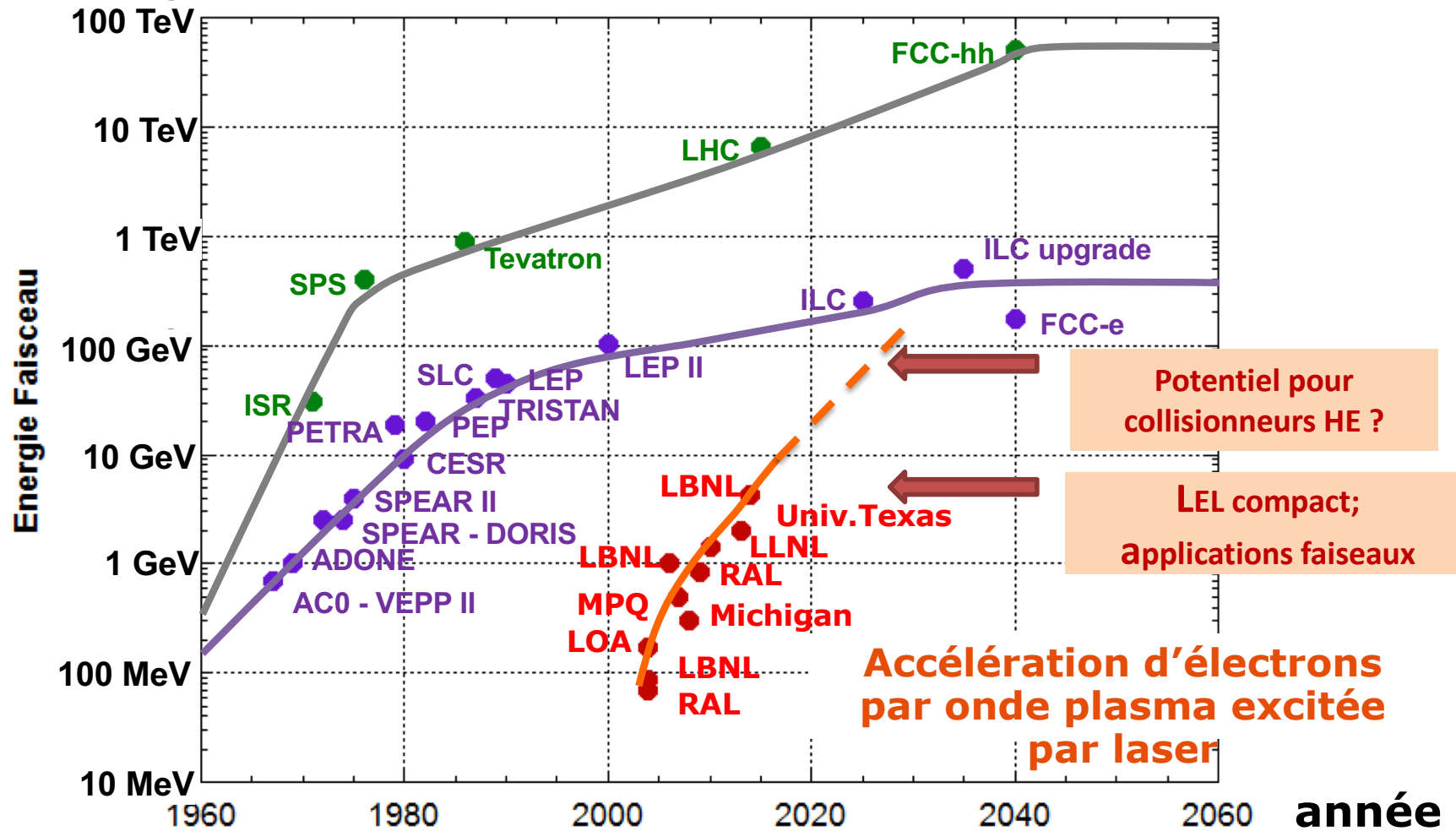
Ralph Aßman, Patrick Audebert, Arnaud Beck, Kevin Cassou, Antoine Cauchois, Antoine Chancé, Brigitte Cros, Marie-Emmanuelle Couprie, Nicolas Delerue, Ali Fahad, Adrien Leblanc, Ali Mahjoub, Francesco Massimo, François Mathieu, Phi Nghiem, Julien Prudent, Sandrine Dobosz, Pascale Monot, Medhi Tarisien, Cédric Thaury, and tout ceux que j'ai pu oublier (mes excuses)

Motivation: Evolution de l'énergie vs des collisionneurs e^+/e^- et p/p



- croissance en énergie → machines de plus en plus grandes
- longueur des LINACs déterminée par le gradient accélérateur

Evolution des énergies obtenues en accélération laser-plasma



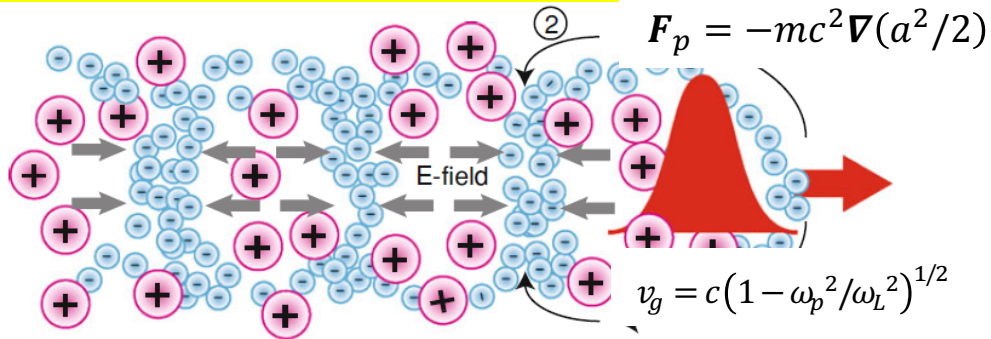
- gradients en ALP 10 à 100 fois supérieurs aux LINAC RF
- évolution des énergies maximales plus rapide

$$W = q \times E \times L$$

Plasma wave driven by strong electric fields (1979)

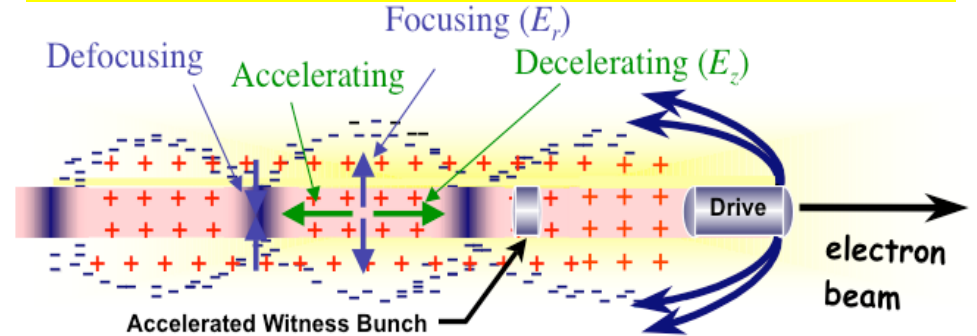
laser field (vector potential a)

T. Tajima & J.M. Dawson, *Phys. Rev. Letter* 43, 267 (1979)



particle beam field

P. Chen & J.M. Dawson, *AIP Conf Proc* 130, 201 (1985)



1-D linear theory: plasma wave = forced electron density oscillation

1-D linear approximation $a^2 \ll 1$

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

$$\xi = z - ct$$

1-D linear approximation $n_b/n_0 \ll 1$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + k_p^2 \right) \frac{\delta n}{n_0} = \underbrace{-k_p^2 \frac{n_b}{n_0}}_{\text{space charge force}}$$

Advanced and Novel Acceleration Techniques

- acceleration of electrons (and positrons)

drive beam	plasma medium	accelerating structure
e+/e-beam	plasma wakefield acceleration (PWFA*) *) PWFA: historical misnomer SLAC, DESY, FRASCATI	dielectric structured wakefield acceleration (DSWFA)
proton beam	seeded self-modulation AWAKE@CERN	
laser beam	laser wakefield acceleration (LWFA) ALMOST EVERYWHERE	dielectric laser acceleration (DLA)

- laser plasma acceleration of protons (and ions)

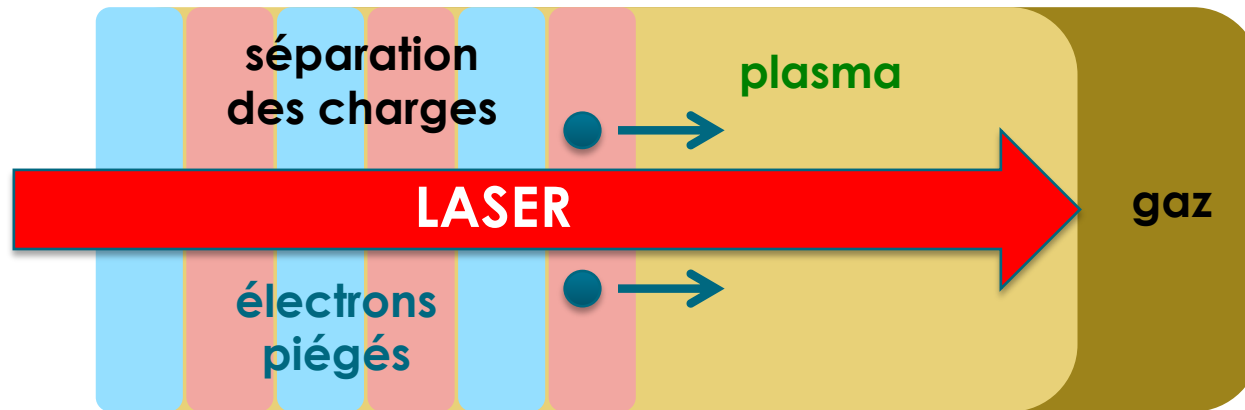
Chirped Pulse Amplification democratized LWFA



Laser wakefield acceleration experiments are “easy” if you have the laser.

Principe physique d'accélération laser de particules ALP: électrons

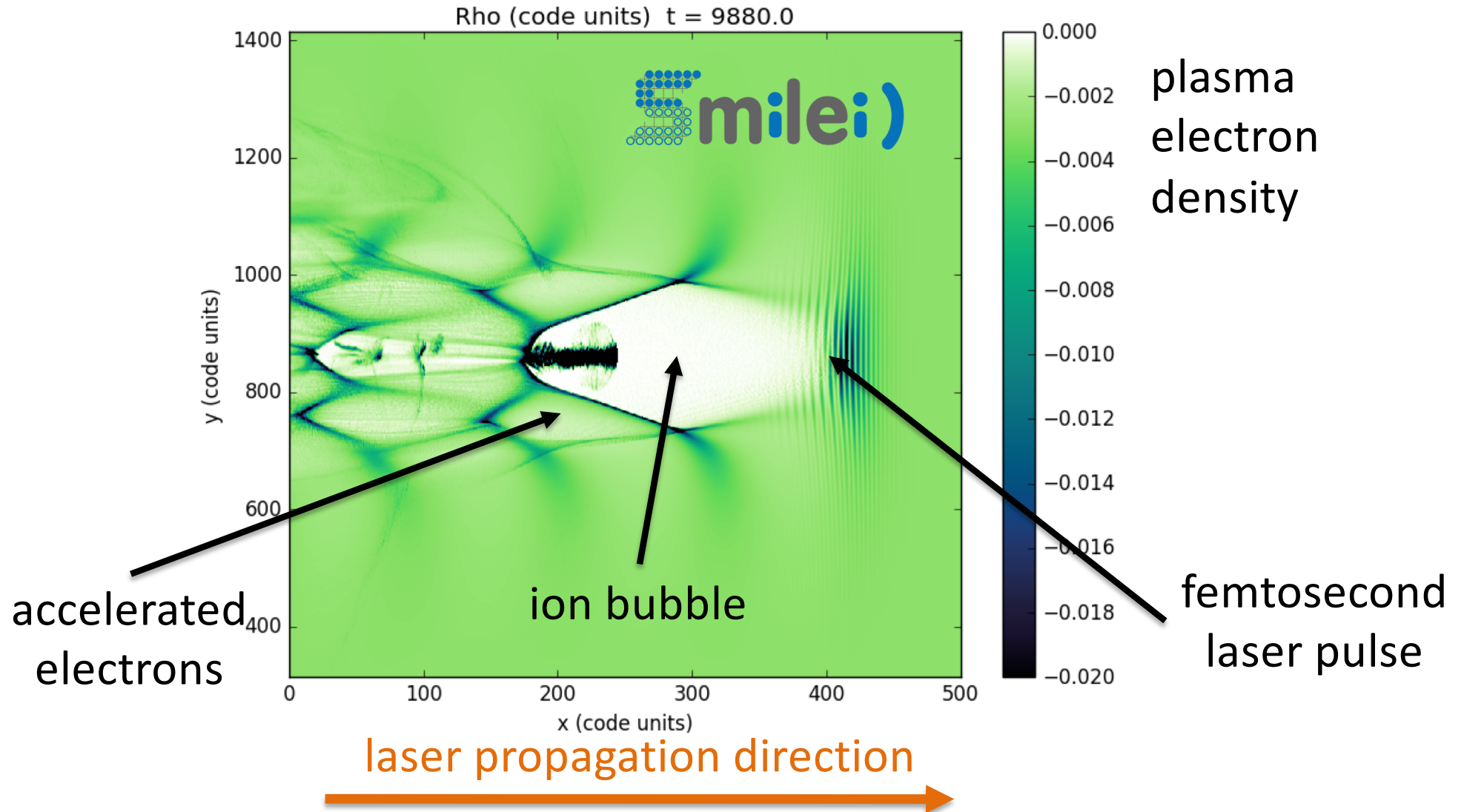
- laser de puissance à impulsion courtes: >50TW, 20-100fs, >1 J, focalisé



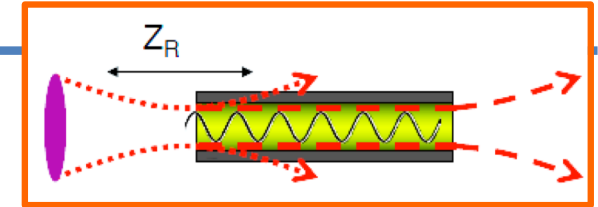
- accélération d'électrons: *laser wakefield acceleration* (LWFA)
 - cible gazeuse (plasma sous-dense)
densité électronique: $n_e \sim 10^{16} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
 - ionisation par effet de champ
 - séparation des charges => onde plasma: $\lambda_p \sim 300\mu\text{m} - 10\mu\text{m}$
 - $v_{\text{PH}}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

Simulation of laser plasma acceleration in blowout regime

J. Derouillat et al., Comput. Phys. Commun. 222, 351-373 (2018)



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*)**

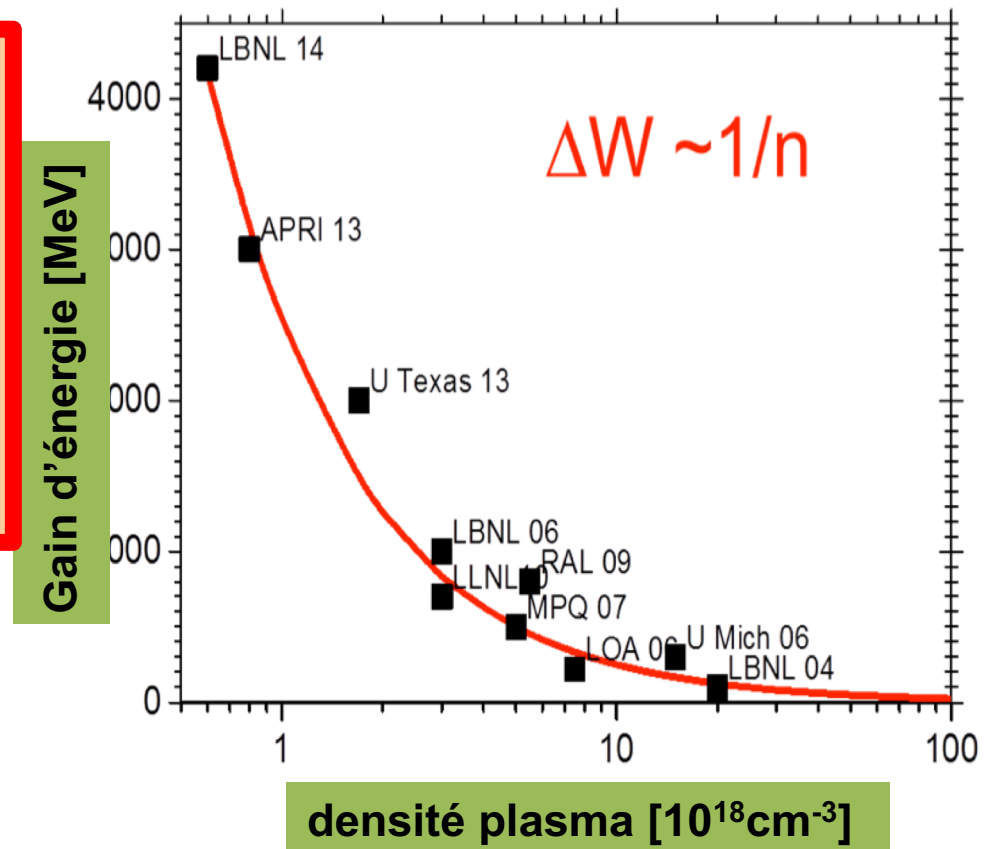
$$L_{deplete} \propto \lambda_p^3 / \lambda_L^2 \propto n_0^{-3/2}$$

- **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



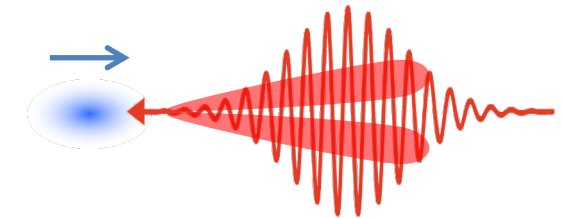
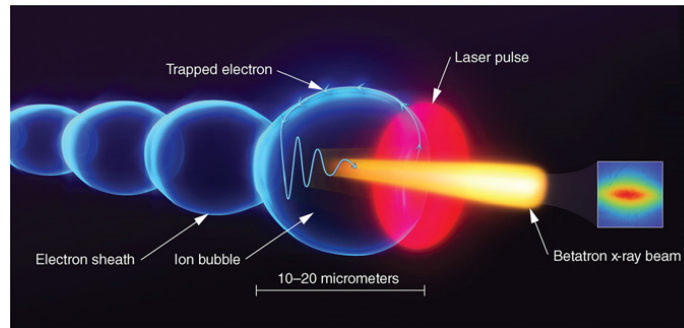
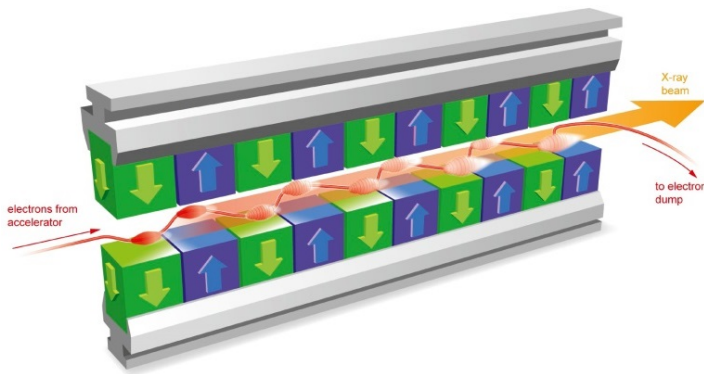
Main driving application: Compact X-ray sources

Relativistic electron beam +

magnetic undulator

plasma undulator

laser beam



SASE FEL
100's eV - keV

"Betatron" radiation
1 keV - 10's keV

Compton backscatter
10's keV - MeV

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

S. Corde et al, Reviews of Modern Physics, Vol 85 (2013)
S. Kneip et al, Nature Physics Vol 6 December 2010

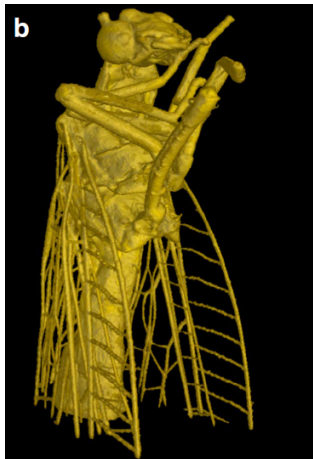
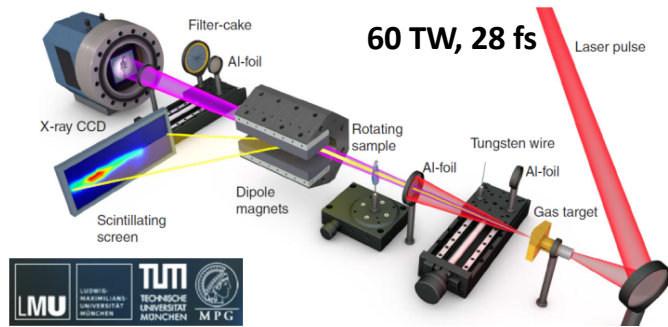
Conseil scientifique IN2P3 09-10/11/2021

09/11/202

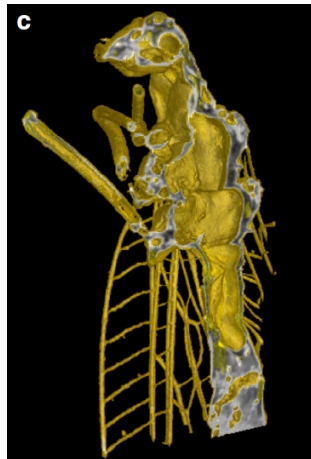
1

Applications pour sources de rayonnement

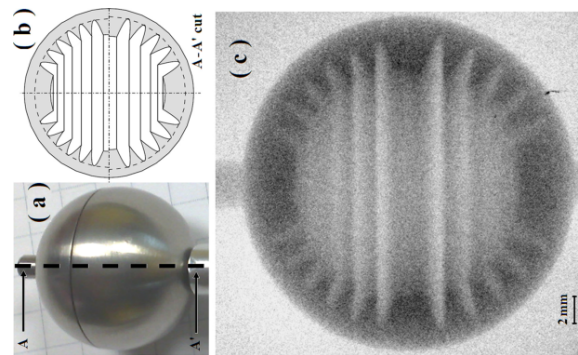
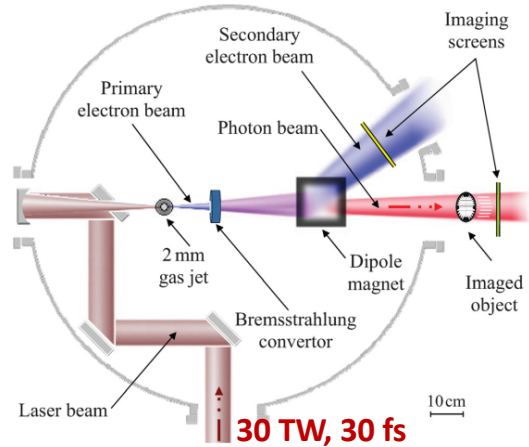
Microtomographie en contraste de phase - betatron



J. Wenz et al, Nature Communications 2015



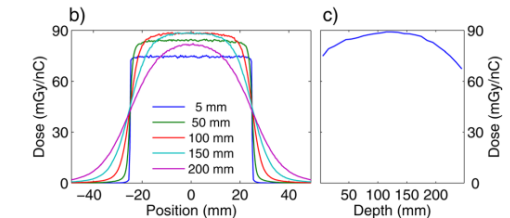
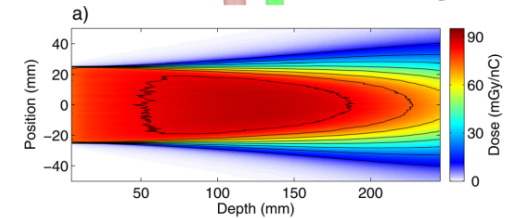
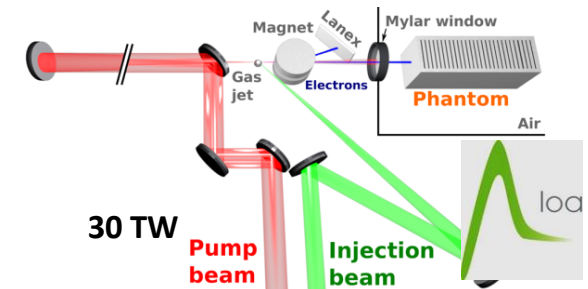
Radiographie par rayons X de freinage



Resolution $\sim 30\mu\text{m}$

Ben-Ismaïl et al, Appl. Phys. Letters 98, 264101 (2011)

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

State of the art of laser wakefield acceleration experiments (2020)

Property	State of the art value [*]	Laser driver	Reference	Remarks
Energy	3 GeV ($\pm 15\%$, $\sim 50\text{pC}$) 7.8 GeV ($\pm 5\%$, $\sim 5\text{pC}$)	26J/30fs/30um 31J/30fs/60um	Kim (2017) - GIST Gonsalvez (2019) - LBNL	In single stage
Energy spread	1% (@ 10pC, 200MeV) 5-30% (@50-3GeV) 5%-100% (@ 400MeV, 80pC) 0.4%-20% (@ 300-350MeV, $\sim 10\text{pC}$)	1.1J/35fs/20um 1-5J/20- 50fs/15-30um 2-5J/30fs/30um 2-3J/33fs/32um	Rechatin (2009) - LOA Many references (2010-2018) Mirzaie (2015) Shangai MOE Wang(2016) Shangai MOE	Still one order from FEL application requiring 0.1%
Normalized transverse emittance	$\sim 0.1 \pi \text{ mm.mrad}$ (@250MeV, $\sim 15\text{pc}$) $\sim 0.01 \pi \text{ mm.mrad}$ (@200MeV-600MeV)	1.5J/30fs/20um	Weingartner (2012) - MPQ Qin (2018) - Shangai MOE	Measurement at the resolution limit
Bunch length	5-10 um	1.1J/35fs/20um	Lundh (2011) - LOA Kaluzza(2014) - Jena Heigholt(2015) - UMu	Measurement at the resolution limit
Charge	$\sim 300 \text{ pC}$ (@ 300-350MeV, 12-17%) >1nC (@ 330 MeV >15%-)	2.5J/40fs/20um 10J/40fs/>25um	Couperus (2017) - Jena Götzfried(2020) - LMU	Beam loading
Repeatability	2.4%E, 11%Q (@1Hz, 368MeV, 25pC) 4%-11% E, 23%Q (@1kHz, 2.5MeV, 3pC)	2J/42fs/25um 10mJ/25fs/6um	Maier (2020) - DESY/UHH Rovige (2020) - LOA	
Repetition rate	$\sim 1 \text{ Hz}$ @ >1 GeV $\sim 1 \text{ kHz}$ @ 1-3 MeV	>25J/30fs/>30um $\sim \text{mJ}/ <25\text{fs}$ /6um	Kim (2017) - GIST, Gonzalves (2019) He (2015)- UMi, Salehi(2017) - UMd Guenot (2017) - LOA	Limited by laser

Table courtesy of K. Cassou

State of the art of the art of laser wakefield acceleration experiments (2020)

Property	State of the art value [*]	Laser driver	Reference
Energy	3 GeV ($\pm 15\%$, $\sim 50\text{pC}$) 7.8 GeV ($\pm 5\%$, $\sim 5\text{pC}$)	26J/30fs/30um 31J/30fs/60um	Kim (2017) - GIST Gonzalves (2019) - UMi, Salehi(2017) - UMi, Guenot (2017) - LOA
Energy spread	1% (@ 10pC, 200MeV) 5-30% (@50-3GeV) 5%-100% (@ 400MeV, 80pC) 0.4%-20% (@ 300-350MeV, $\sim 10\text{pC}$)	1.1J/35fs/20um 1-5J/20-50fs/20um	Qin (2018) - Shanghai MOE Weingartner (2012) - MPQ Qin (2018) - Shanghai MOE
Normalized transverse emittance	$\sim 0.1 \pi \text{ mm.mrad}$ (@250MeV, $\sim 10\text{pC}$) $\sim 0.01 \pi \text{ mm.mrad}$ (@200MeV, $\sim 10\text{pC}$)	1.1J/35fs/20um	Weingartner (2012) - MPQ Qin (2018) - Shanghai MOE
Bunch length	5-10 um	1.1J/35fs/20um	Lundh (2011) - LOA Kaluzna(2014) - Jena Heigholt(2015) - UMu
Charge	$\sim 10\text{pC}$ (@250MeV, 12-17%) $\sim 10\text{pC}$ (@200MeV, $>15\%$)	2.5J/40fs/20um 10J/40fs/ $>25\mu\text{m}$	Couperus (2017) - Jena Götzfried(2020) - LMU
Repetition rate	$\sim 1\text{Hz}$ (@1Hz, 368MeV, 25pC) $\sim 1\text{kHz}$ (@1kHz, 2.5MeV, 3pC)	2J/42fs/25um 10mJ/25fs/6um	Maier (2020) - DESY/UHH Rovige (2020) - LOA
Repetition rate	$\sim 1 \text{ Hz}$ @ $>1 \text{ GeV}$ $\sim 1 \text{ kHz}$ @ 1-3 MeV	$>25\text{J}/30\text{fs}/>30\mu\text{m}$ $\sim \text{mJ}/<25\text{fs}/6\mu\text{m}$	Kim (2017) - GIST, Gonzalves (2019) He (2015)- UMi, Salehi(2017) - UMi, Guenot (2017) - LOA

1. Aucune experience réalise toutes ces valeurs au même temps.
2. Qualité de faisceau: contrôle du mécanisme d'injection!

Progrès récents

Module accélérateur 10GeV

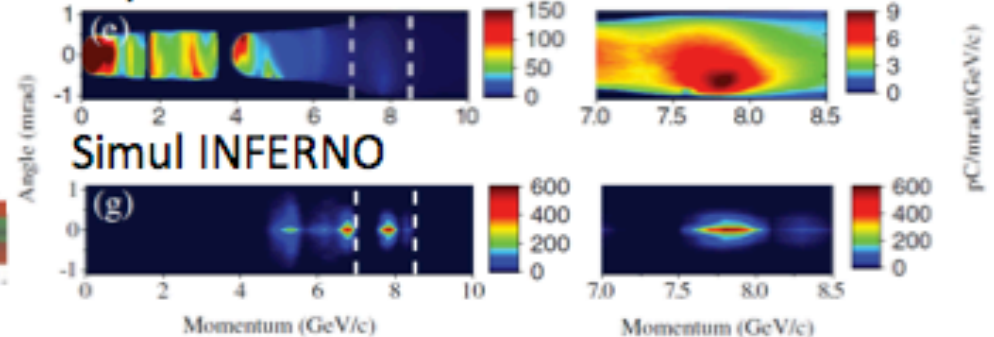
LBNL, guidage,
contrôle plasmas longs

Capillary discharge
waveguide

PRL 122, 084801 (2019)

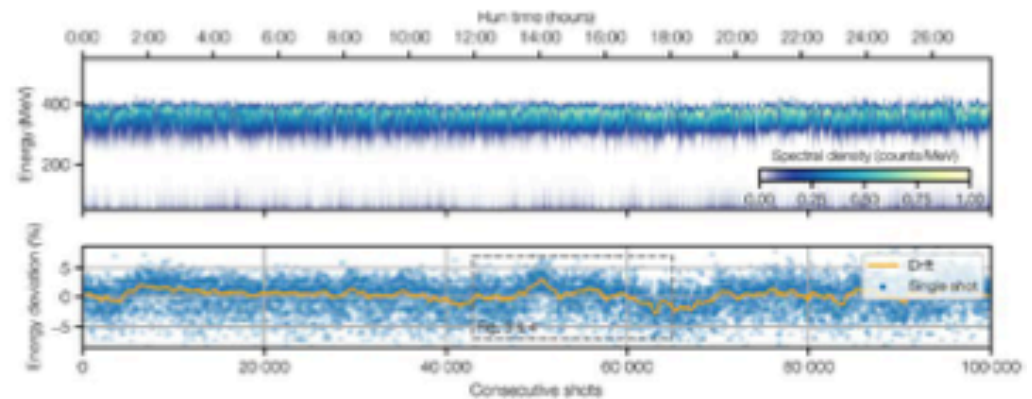


Expérience



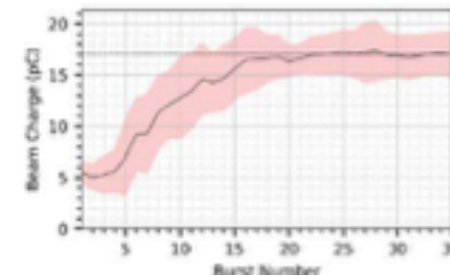
Fonctionnement en cadence pendant 24h, reproductible

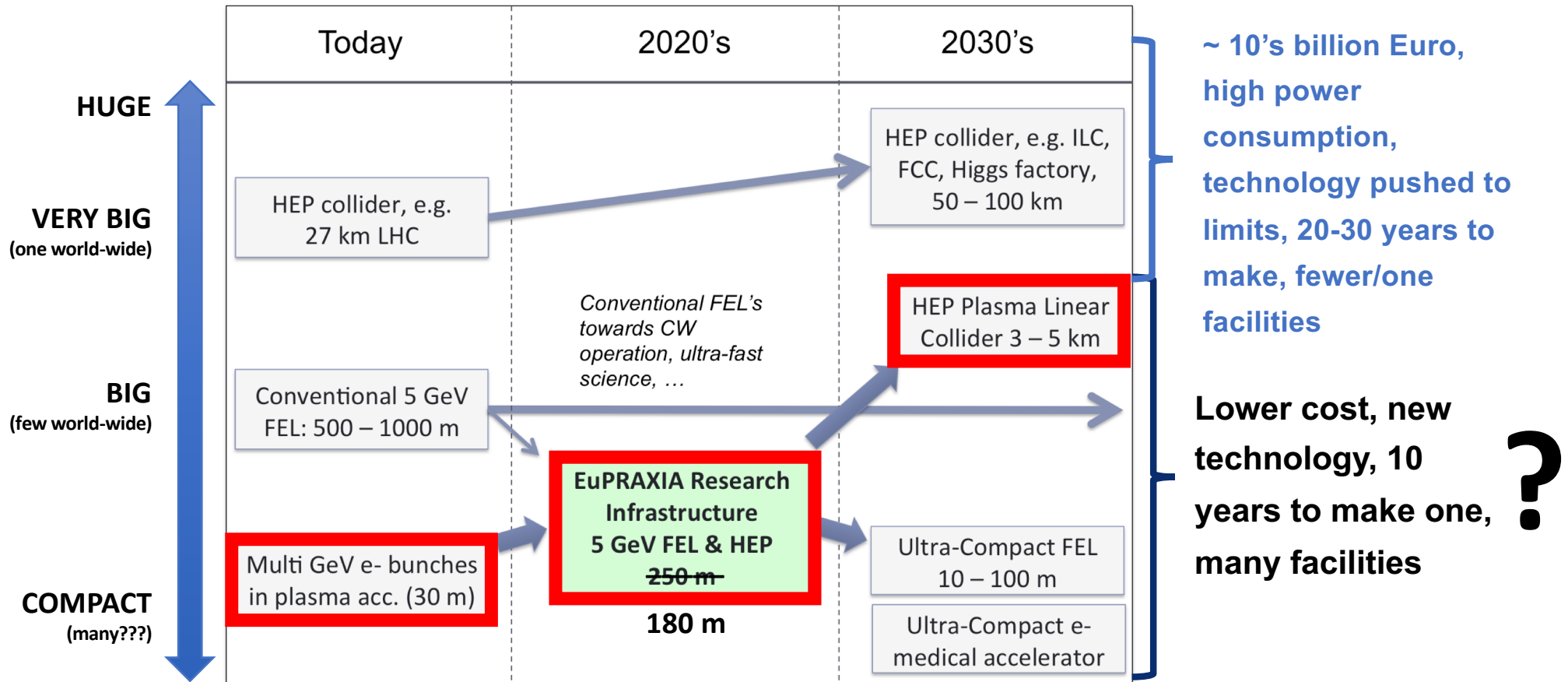
DESY, LUX Laser plasma accelerator:
PRX 10, 031039 (2020)



Automatisation de l'optimisation par Intelligence Artificielle

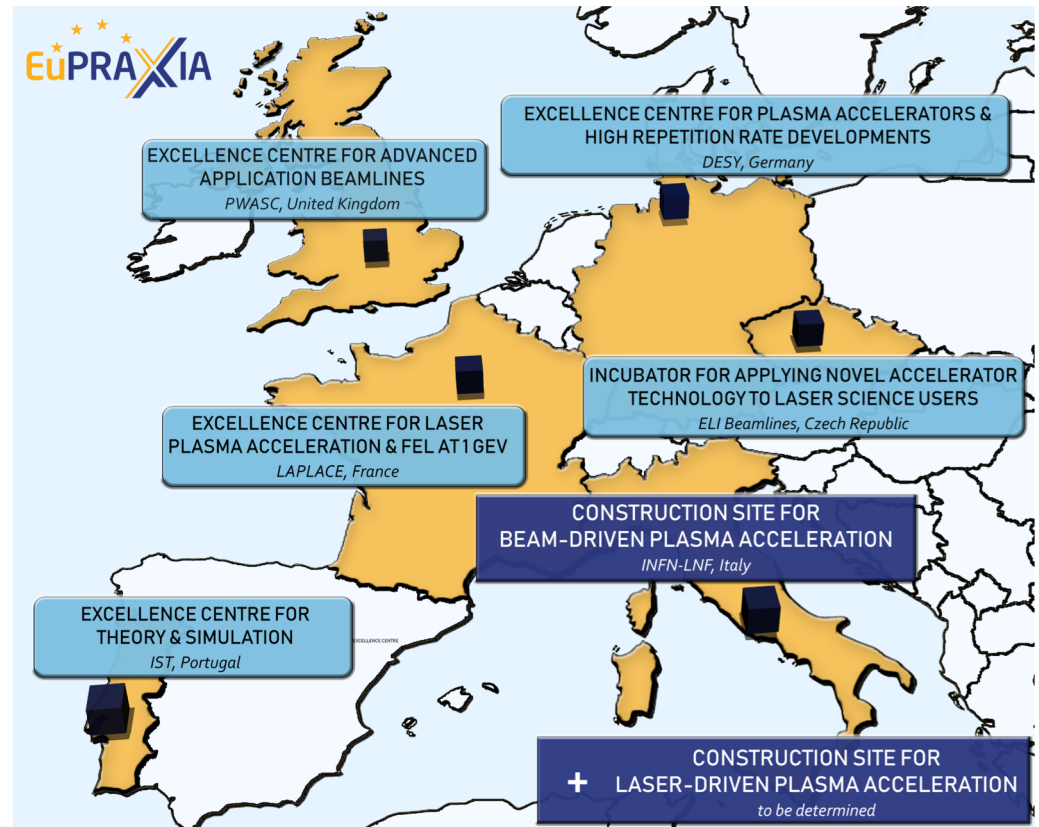
JAI, UK consortium and DESY et CLF UKRI,
Shaloo et al, Nat comm (2020) 11:6355 |





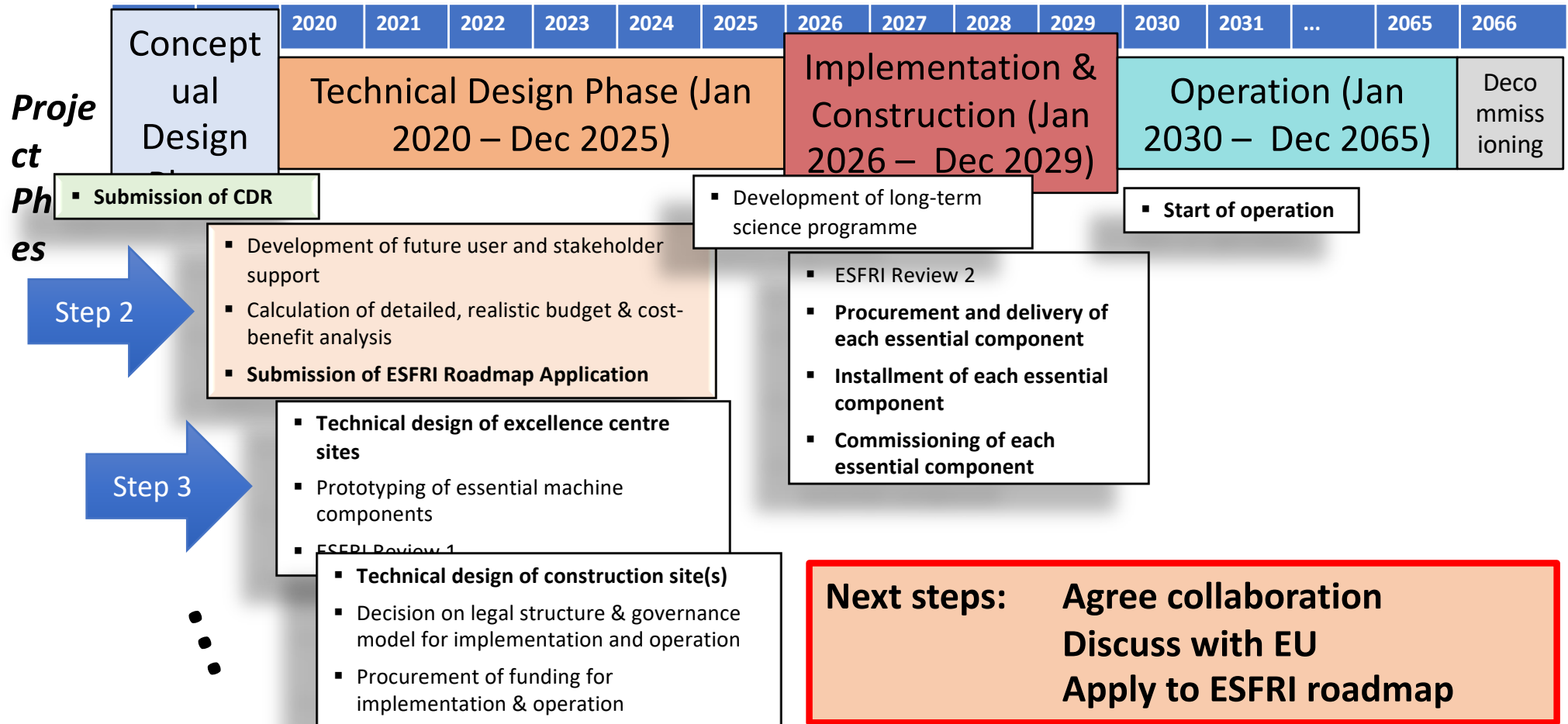
... and Builds a European Distributed Facility

- ➔ 1. Lean overall **EuPRAXIA management**
- ➔ 2. **Ten clusters:** Collaborations of institutes on specific problems, developing solutions, technical designs, driving developments with EuPRAXIA generated funding → **expertise of all labs required - opportunities**
- ➔ 3. **Five excellence centers** at existing facilities: Using pre-investment, support tests, prototyping, production with EuPRAXIA generated funding (F, UK, D, P, ELI)
- ➔ 4. **One or two construction sites** at existing facilities with EuPRAXIA generated funding:
 - **Beam-driven** at Frascati/INFN (Italy).
 - **Laser-driven** at CLF/STFC (UK), CNR/Frascati/INFN (Italy) or ELI-Beamlines.




➔ **Position Europe as a Leader in the Global Context**

Main Project Milestones & Deliverables



ALP electrons : Contexte Français


IN2P3

- IJCLAB < LASERIX
 - Installation PALLAS
 - R&D Cible plasma (cellule)
 - Diagnostics faisceau (durée)
- LLR 
 - Expériences sur APOLLON
 - Diagnostics faisceau (spectro)
 - Simulation (SMILEI)
- CENBG
 - Accélération d'ions à partir de cibles gazeuses (APOLLON +..)




SOLEIL

Expérience COXINEL (LEL)

CEA

- LIDYL (IRAMIS): <UHI100 
 - Expériences sur APOLLON et UH100
- DACM (IRFU)
 - Dynamique de faisceau , simulations

INP

- LOA (ENSTA): <Salle jaune, LaplaceHC 
- LULI (EP):  Apollon 
- LPGP:
 - Expériences sur APOLLON et UH100
 - R&D cellule de gaz

Des nombreuses collaborations en cours et passés

IN2P3

• IJCLAB < LASERIX

- Installation PALLAS
- R&D Cible plasma (cellule)
- Diagnostics faisceau (durée)

• LLR

- Expériences sur APOLLON
- Diagnostics faisceau (spectro)
- Simulation (SMILEI)

• CENBG

- Accélération d'ions à partir de cibles gazeuses (APOLLON +..)

SOLEIL

Expérience COXINEL (LEL)

CEA

• LIDYL (IRAMIS): <UHI100

- Expériences sur APOLLON et UH100
- DACM (IRFU)
 - Dynamique de faisceau , simulations

INP

• LOA (ENSTA): <Salle jaune, LaplaceHC

• LULI (EP): Apollon

• LPGP:

- Expériences sur APOLLON et UH100
- R&D cellule de gaz

GDR “APPEL” depuis 2019 (B.Cros & N.Delerue)



<http://gdr-appel.fr/>

- Conjoint: IN2P3 et INP: Échanges scientifique entre membres de communautés avec pratiques très différentes
- Définir: Contribution EuPRAXIA
- De l'interaction laser-plasma aux accélérateurs
- Accélération électrons ET ions
- **2021: feuille de route nationale - ES**
 - Lancement FDR:28-I-2021
 - Redaction été 2021
- Panorama des projets futurs
 - LOA: LAPLACE “haute énergie” et “haute cadence” – CPER
 - IJCLAB: PALLAS – PACIFICS
 - LULI: APOLLON phase multi-PW (5-10PW)
 - IRAMIS: installation de UHI100 à l’Orme des M.

GdR APPEL: une feuille de route?

→ Exercices de prospective nationale en physique nucléaire, physique des particules et astroparticules

- o <https://prospectives2020.in2p3.fr/>
- o Rapport GT7 ‘Accélérateurs’ publié 3 juin 2020
- o Rapport final attendu fin 2021

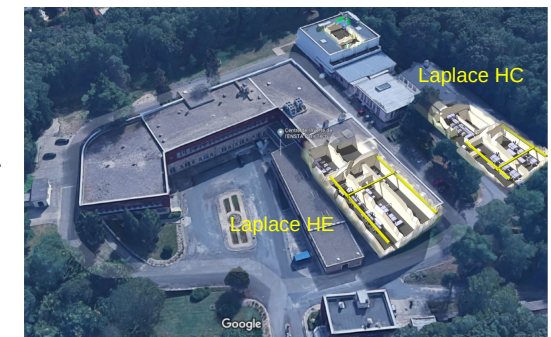
JL Biarrotte

→ European strategy for particle physics update

- o Publié 19 juin 2020
- o Mandat du Conseil du CERN donné au LDG pour développer une roadmap R&D accélérateur d’ici fin 2021
- o 5 expert panels mis en place (dont panel ‘plasma’, avec 5 FR et 4 CNRS tbc)
 - Magnets: P. Vedrine (IRFU) / L. Garcia-Tabares Rodriguez (CIEMAT)
 - Plasma: R. Assmann (DESY) / E. Gschwendtner (CERN)
 - Muons: D. Schulte (CERN) / M. Palmer (BNL)
 - ERL: M. Klein (Liverpool) / A. Hutton (JLAB)
 - RF: S. Bousson (IJCLab) / H. Weise (DESY)

→ Snowmass process aux US, 2020-22

- o <https://snowmass21.org/>

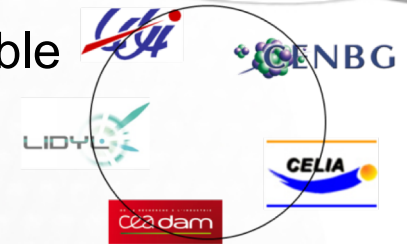


ALP-ions (CENBG): ALP-ions à partir d'un jet de gaz surcritique

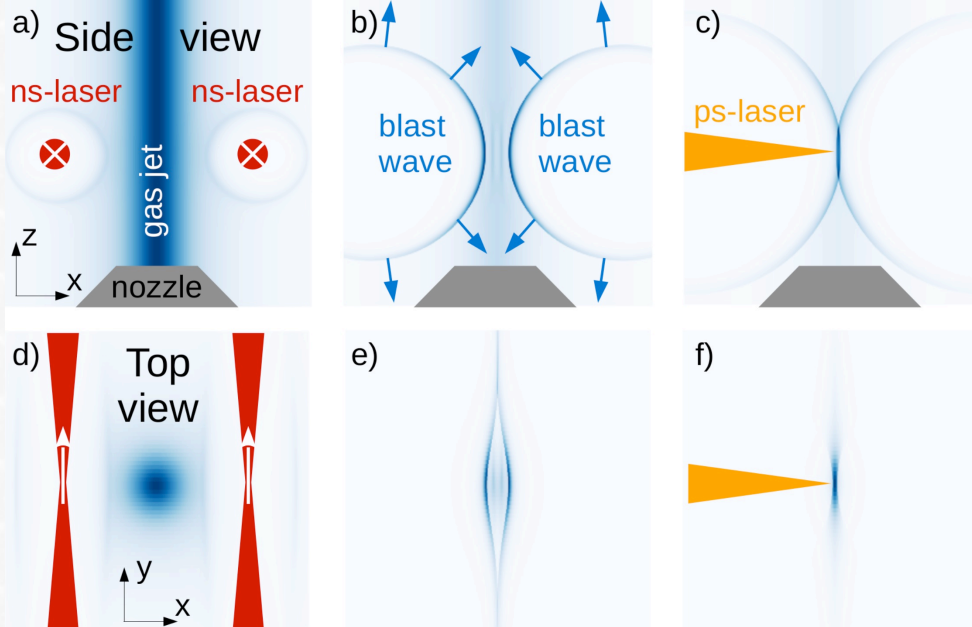
Slide: Medhi TARISIEN (CENBG)

Plasma tailoring : pour sculpter les profils de densité de la cible

→ Contrôle des mécanismes d'accélération

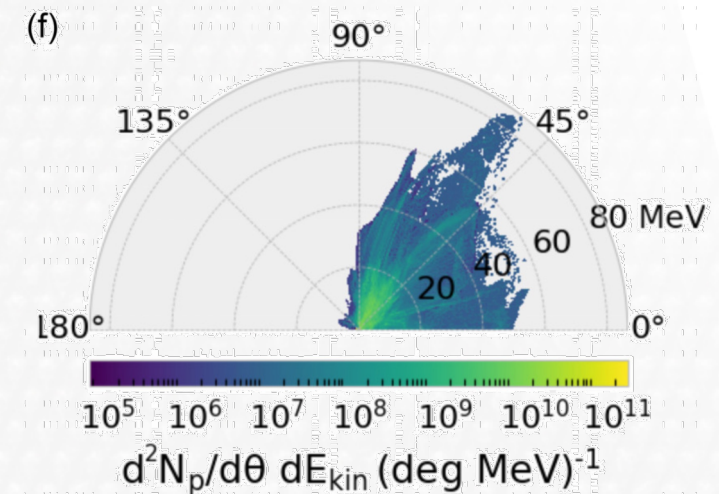


Simulations hydrodynamiques FCI2 (CEA-DAM)



Simulations PIC SMILEI (CELIA)

Thèse J. Bonvalet



“Over-critical sharp-gradient plasma slab produced by the collision of laser-induced blast-waves in a gas jet: Application to high-energy proton acceleration”

J.-R. Marques, et al. , **Phys Plasma**, 28, issue 2, (février 2021)

- Manip novembre 2020 PHELIX
→ Résultats très encourageants
- Manip avril 2021 PICO2000

Masterprojet IN2P3 ALPe (≥ 2016)

• Axes principales

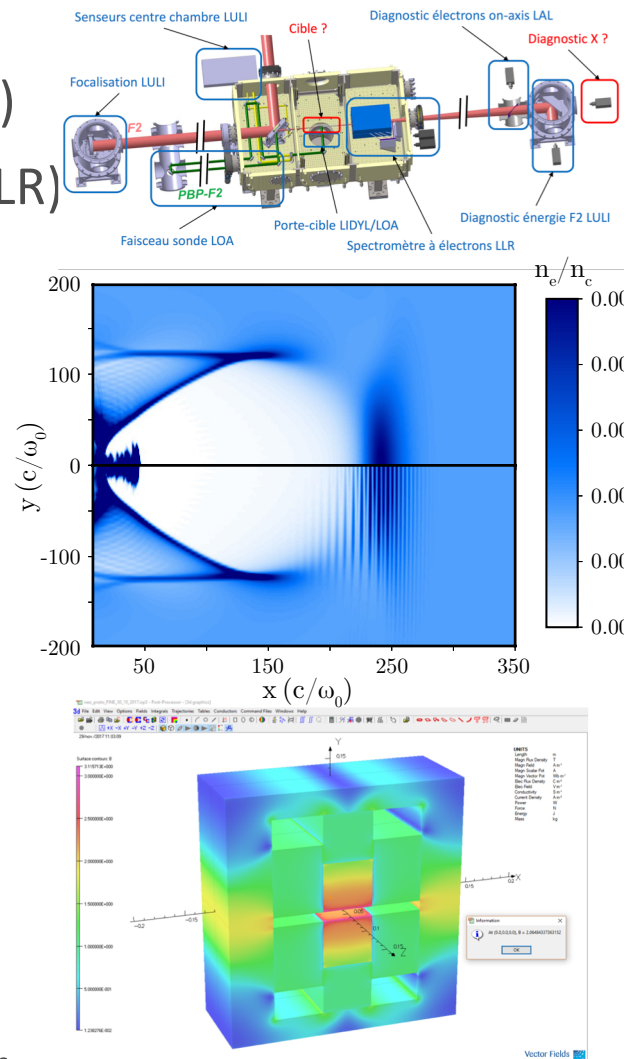
- Préparation des expériences sur APOLLON (LLR, IJCLAB)
- Développement code plasma particle-in-cell SMILEI (LLR)
- Diagnostics paquets courts ETALON (IJCLAB)

• Réalisations

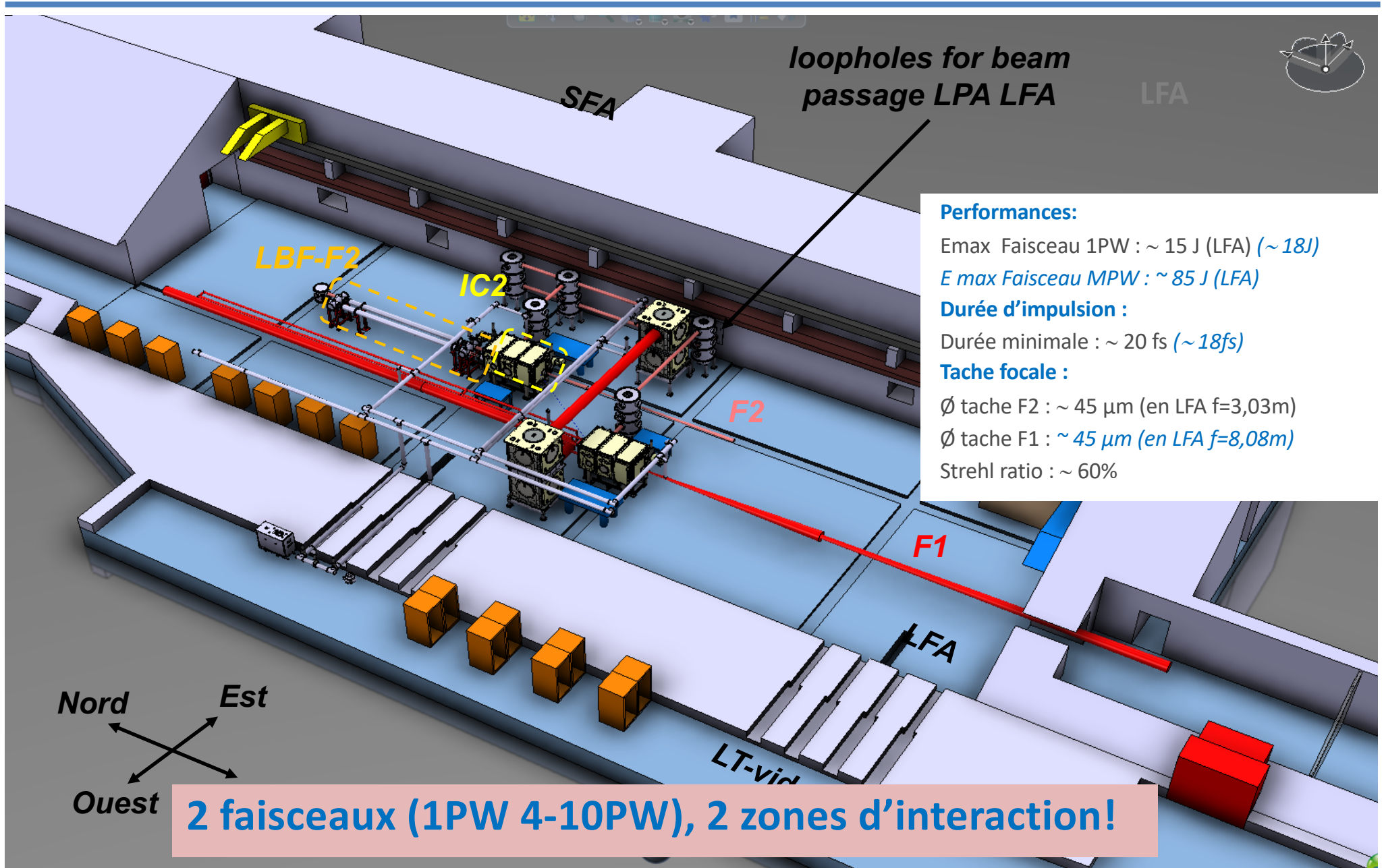
- Spectrometres magnétique pour APOLLON
- Détecteur d'électrons hors vide et sous vide
- Cluster de calcul pour prototypage SMILEI (HPC) ng)
- Code SMILEI: schémas innovants, envelope, AM, PML
- Premiers experience sur APOLLON (commissioning)


• Avenir

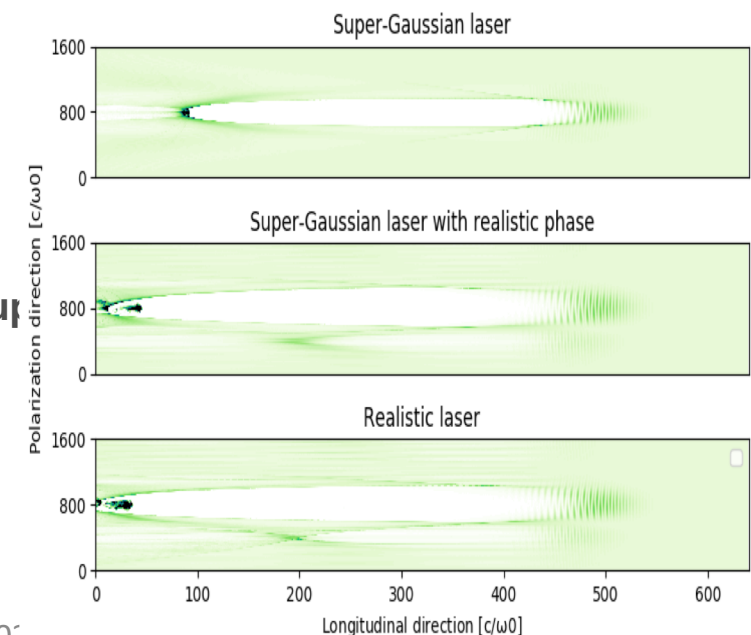
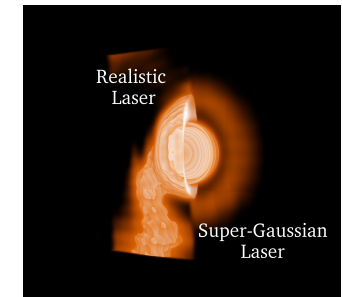
- **Accélération e sur APOLLON 1PW et multi-PW**
- **Developpement spectrometer imageur pour caractérisation faisceau**



APPOLLON laser: Long Focal Area (electron acceleration)



- Collaboration Open Source:  LLR, LULI, Maison de la Simulation
- Méthode SDMD pour optimisation des communications et couplage avec solveur spectral
(Derouillat & Beck Journal of Physics: Conference Series 1596, 2020)
- Modèle d'enveloppe cartésien => speed-up ~ 5x
(Massimo et. al. , PPCF 2019)
- Modèle d'enveloppe en AM => speed-up ~ 100x
(Massimo et. al., Journal of Physics: Conference Series 1596, 2020)
- Inclusion de l'ionisation en modèle d'enveloppe
(Massimo et. al., PRE 2020, in press)
- Solveur spectral modes azimutaux AM
(Thèse I. Zemzemi)
- Modélisation de laser réalistes (APOLLON)
- Développements en cours:
 - **perfectly matched layer (boundary conditions->speedup)**
 - **Laser modelisation laser en AM (exploitation)**
 - **GPU (nécessite soutien fort à la MdS)**

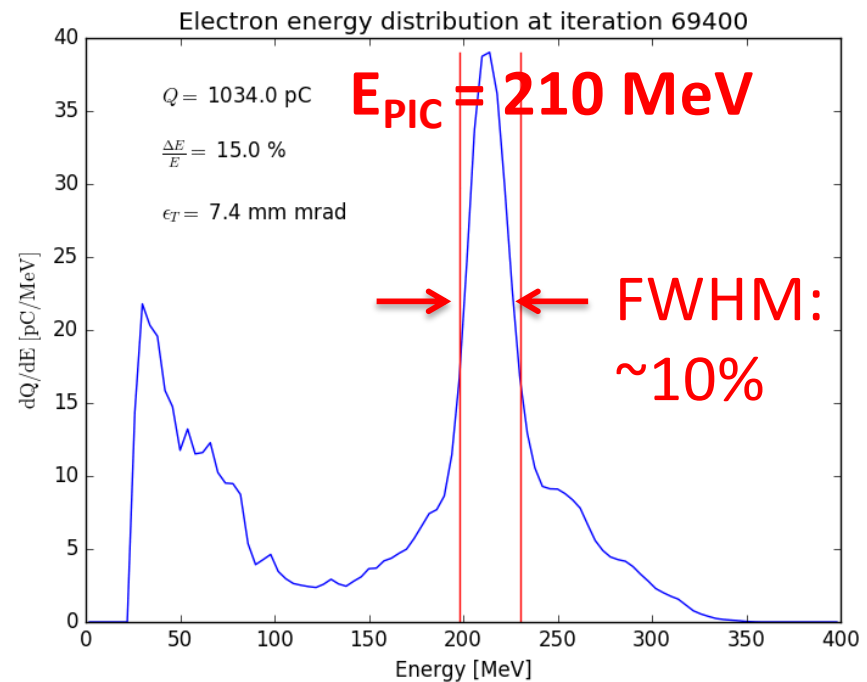
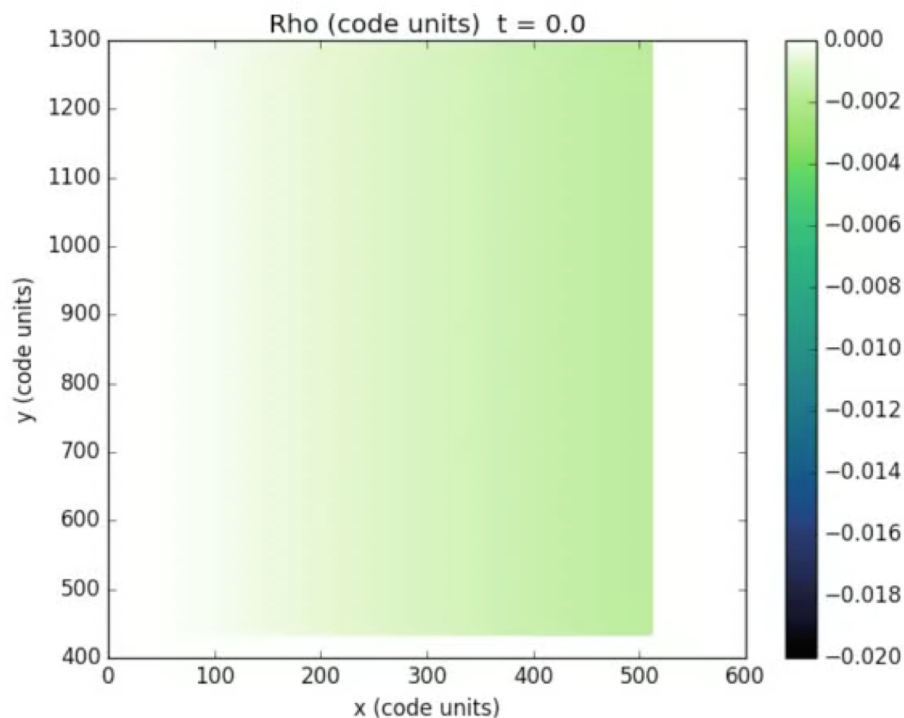


3D PIC Simulation of unguided, unassisted acceleration in a ~ 1 mm thick gas jet \rightarrow high yield plasma injector with (1PW)

\rightarrow relevant for upcoming campaign on APOLLON LFA: April 2021

- plasma e^- density
- comoving window
- laser moves to the right

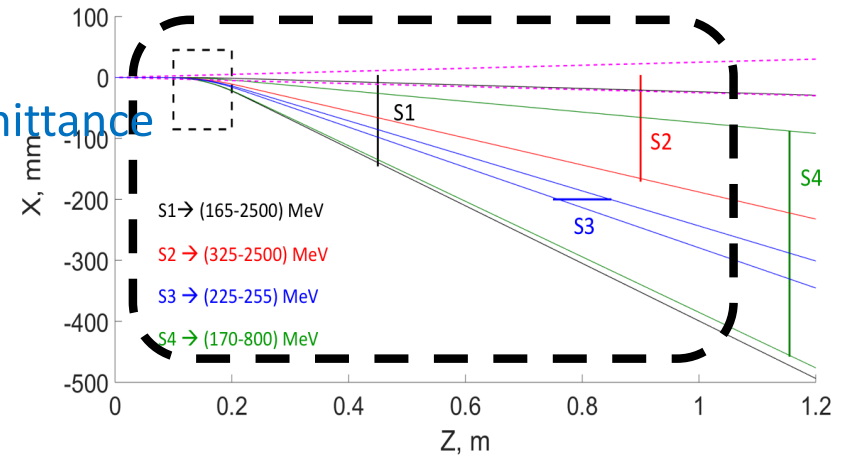
electron acceleration:
1nC at ~ 200 MeV ex plasma



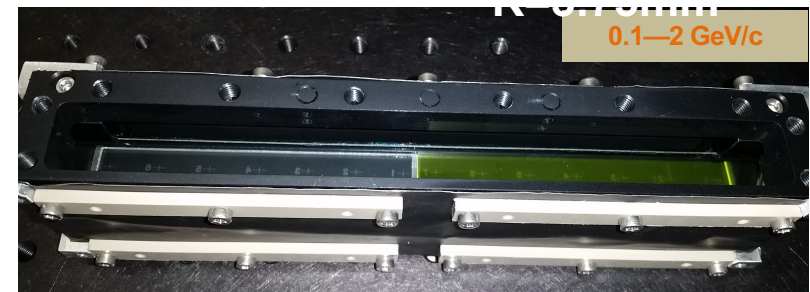
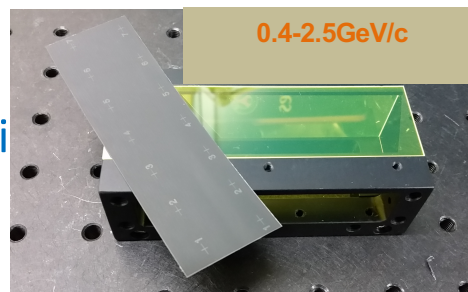
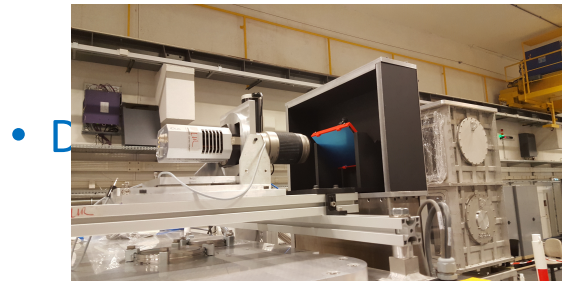
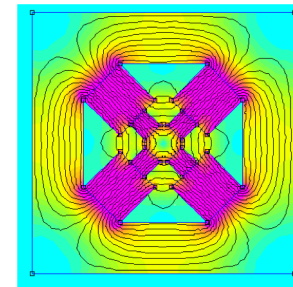
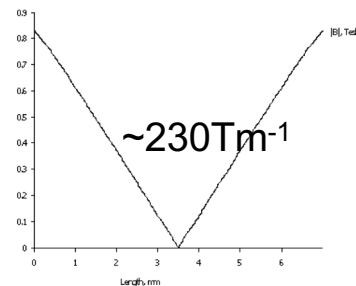
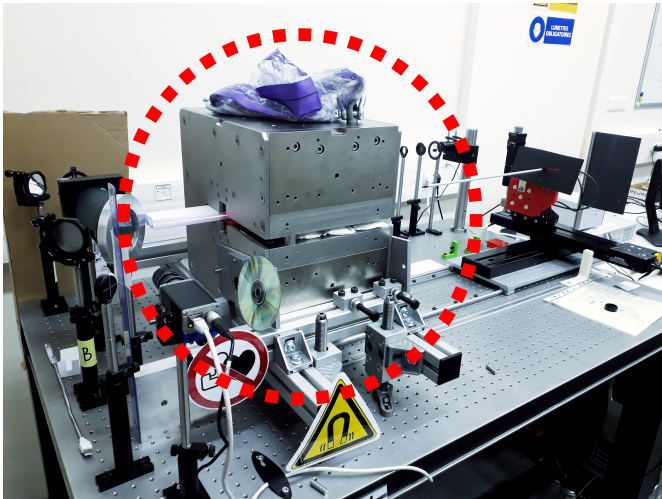
MP ALPe Diagnostics d'électrons: aimants et détecteurs



- APOLLON, UHI100, LOA, PALLAS?
- Mesure spectre d'énergie, charge, divergence, emittance
- Développement aimants permanents
> 2 dipôles compacts: 0.21Tm 0.42Tm

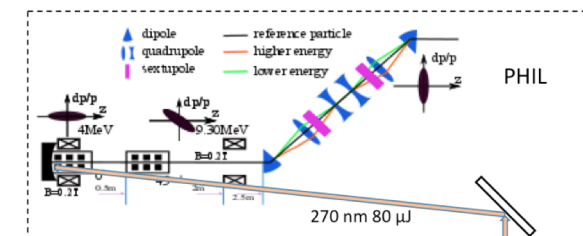
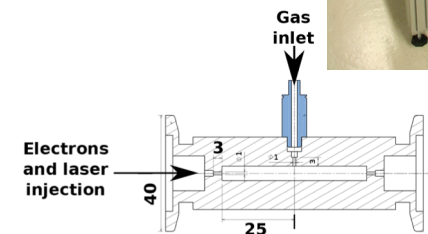
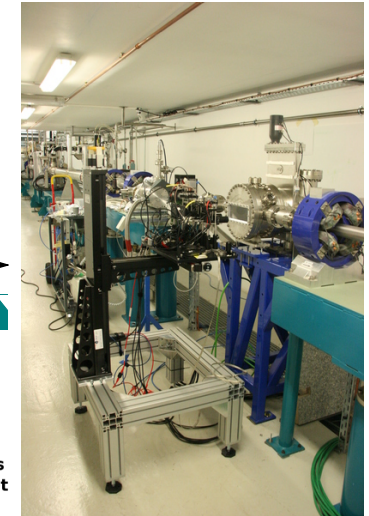
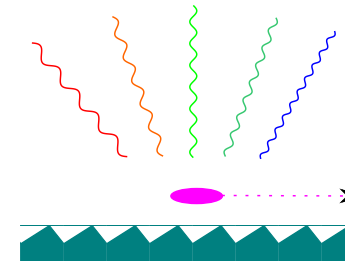
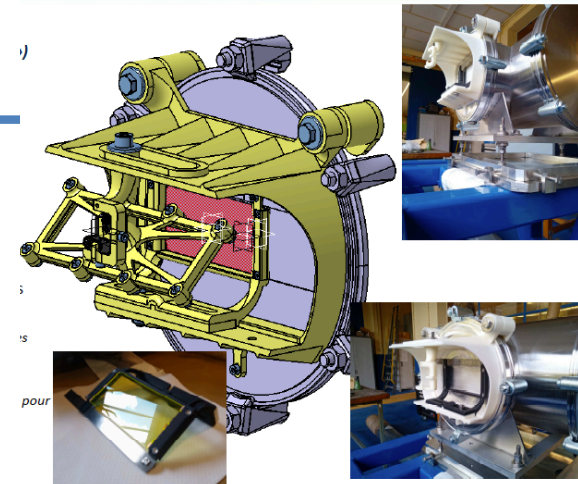


> quadripôles compacts (doublet, triplet)



MP ALP-e Activités à l'IJCLab

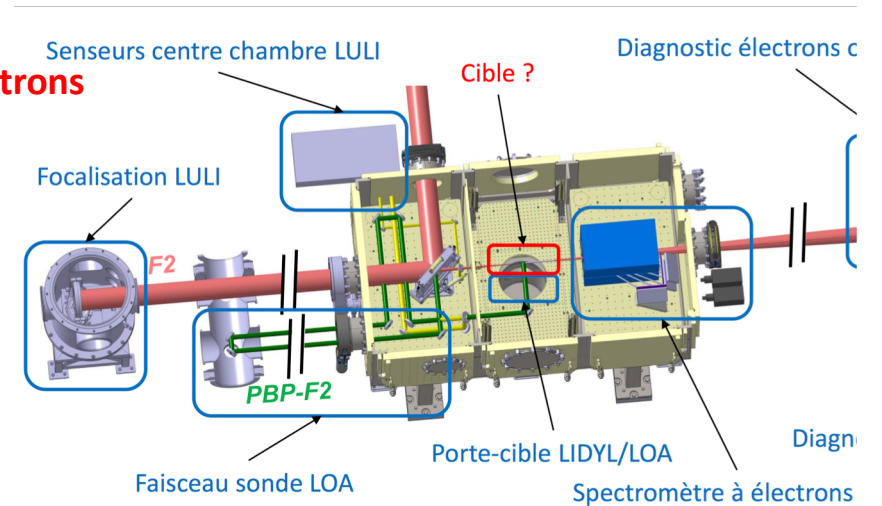
- APOLLON:
 - Mesure en ligne directe de la charge sur APOLLON.
 - Participation aux expériences de qualification.
- Mesures de paquets courts:
 - Utilisation de rayonnement cohérent (Smith-Purcell) pour mesurer des paquets ultra-courts (sub-ps).
 - Expériences à SOLEIL, Frascati et Orsay (CLIO).
 - Financement par une subvention de l'ANR.
- Étude d'une cellule plasma:
 - Mise au point d'une cellule permettant de créer une pression de gaz augmentant linéairement.
 - Permettant une accélération plasma en régime linéaire.
 - Demande de financement ANR acceptée en 2019.
- Etudes de la focalisation pour l'accélération laser-plasma:
 - Thèse de doctorat (Ke Wang) 2016-2019
 - Système magnétique de focalisation d'un faisceau d'électrons dans un petit volume pour ALP 2 étages.



Première campagne sur APOLLON (“de qualification”)



- Équipe expérimentale
 - APOLLON (LULI) : laser, vide, infrastructure +++
 - **LLR(X): 1 dipôle 1, spectromètre et 4 détecteurs d'électrons**
 - LOA(ENSTA): interférométrie plasma + buses
 - LIDYL(IRAMIS): gaz target exploitation
- Long focal area $f=3\text{m}$, 15J beam
- 12-27 nov. 2020
- Objectifs principaux: techniques!
 - Rodage des procédures laser journalières
 - Validation des la radioprotection
 - Démonstration de répétabilité du laser
 - Rodage interfaçage laser-experience
 - Synchronisation. EMP



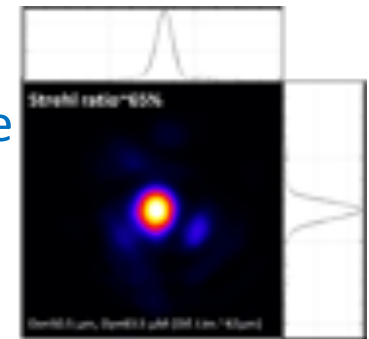
Vue de l'extérieur de la zone expérimentale



Dipôle et détecteurs sous vide

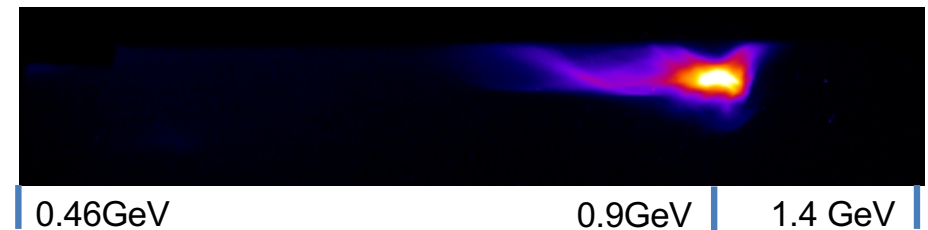
Première campagne sur APOLLON en LFA

- ~800 tirs à 1 par minute (>50% at 12J sur cible) (5 jours utiles)
- Laser: Montée progressive de 6 à 12J, 22 fs, « Strehl » ~60% sur cible
- Observation d'électrons accélérés en régime NL presque immédiat!
Sur détecteur large bande (air), et basse et haute E (vide)



Laser spot on target

- ΔE large, E fluctuant, angle du faisceau, oscillations
- Exemple de spectre sur le dét. sous vide.
écran YAG haute E (0.5-1.5GeV):
~950MeV sur <10mm (fréquemment)








- Dépouillement des données en cours, qualité des données (DQ) disparate
- Scans de densité du plasma, chirp du laser:
- Identification et résolution de nombreux problèmes techniques:
alignement, synchronisation, protection EMP, motorisation, DAQ et ControleComm,
cohabitation, modifications "à la volée", radioprotection, diagnostics laser tir à tir

Défis du futur pour l'ALPe: applications (sélection personnelle)

- Qualité et reproductibilité des paramètres du faisceau d'électrons selon l'application visée
 - e.g. faisceau secondaires (e.g. e^+): charge, énergie
 - e.g. laser à électrons libre: dispersion énergie, émittance
 - e.g. sources et imagerie X: charge, durée
- Développement et fiabilisation des applications qui
 - tirent profit des propriétés uniques (courant crête, durée paquet)
 - ne sont pas pénalisées par le faible rendement énergétique du laser
 - bénéficient de la compacité (et du moindre coût?)
- Transition vers un régime "machine": cadence
 - human learning -> **simulations massives** -> physique
 - machine learning -> développement **diagnostics faisceau e et laser**

ALP electrons à l'IN2P3: CONCLUSIONS

- IN2P3: Acteur reconnu, national et international: GDR, 
- Equipes=Eléments structurants apportant une démarche "projet" 
- ALPe: collaboration ds/ expériences exploratoires « scientifiques » 
- PALLAS: R&D ciblé avec une démarche « ingénieur » 
- Fertilisation et valorisation mutuelle:
simulations, diagnostics, cellule plasma 
- Développements techniques possible grâce à un soutien de l'IN2P3 fort et continue
aux équipes