

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



Accélération(eur?) laser-plasma d'électrons (EuPRAXIA)

Un grand merci à Brigitte Cros (LPGP) et à la collaboration EuPRAXIA à qui j'ai emprunté un grand nombre de transparents



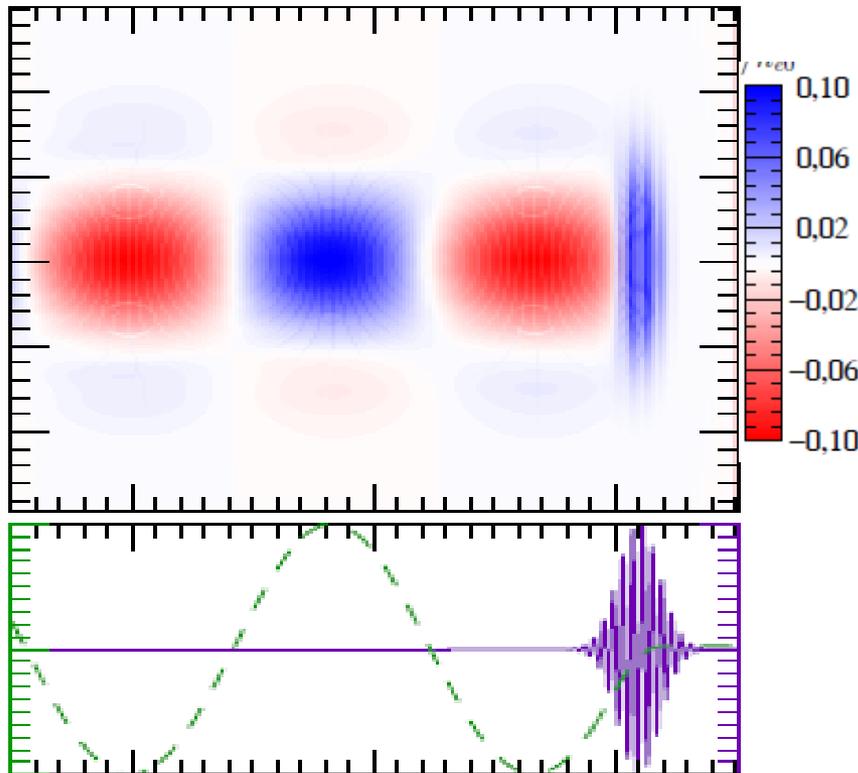
Antoine CHANCE

Journée P2I-PHOM
20 juin 2019

- Etat de l'art (non exhaustif) de l'accélération laser-plasma (ALP) pour les électrons

- Contexte national et international des projets et collaborations

- Projet EuPRAXIA



a_0 : potentiel normalisé

$$a_0^2 \sim 0,73 [\lambda(\mu\text{m})]^2 I_0 (10^{18} \text{W/cm}^2)$$

$a_0 \sim 1$, régime quasi-linéaire

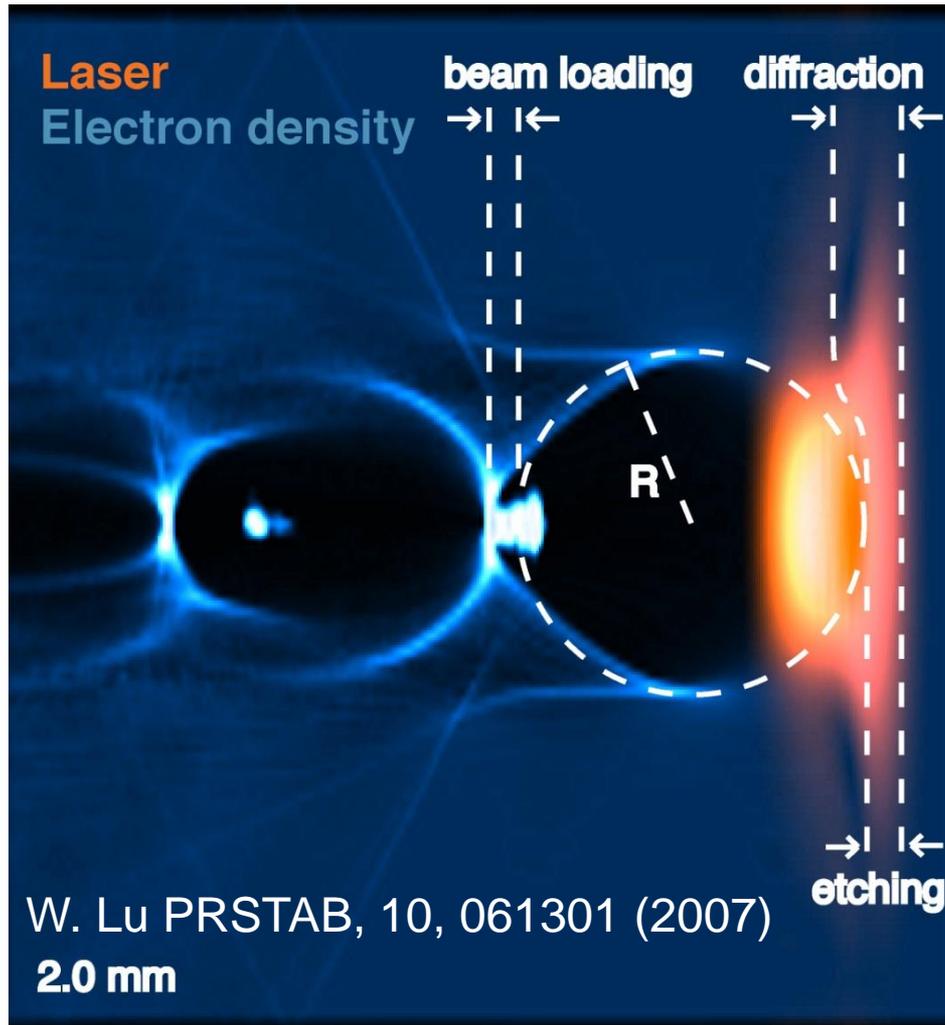
($I_0 = 2 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$, $\lambda = 0,8 \mu\text{m}$)

- Un champ accélérateur élevé est créé dans le sillage d'un laser intense
- **Il faut injecter des électrons produits par une source externe**
- Structure accélératrice sinus: $\lambda_p \sim 10\text{-}100 \mu\text{m}$
- Champ accélérateur: 1-100 GV/m

$$E_z [\text{GV/m}] \sim 96 (n_0 [10^{18} \text{cm}^{-3}])^{1/2} dn_0/n_0$$

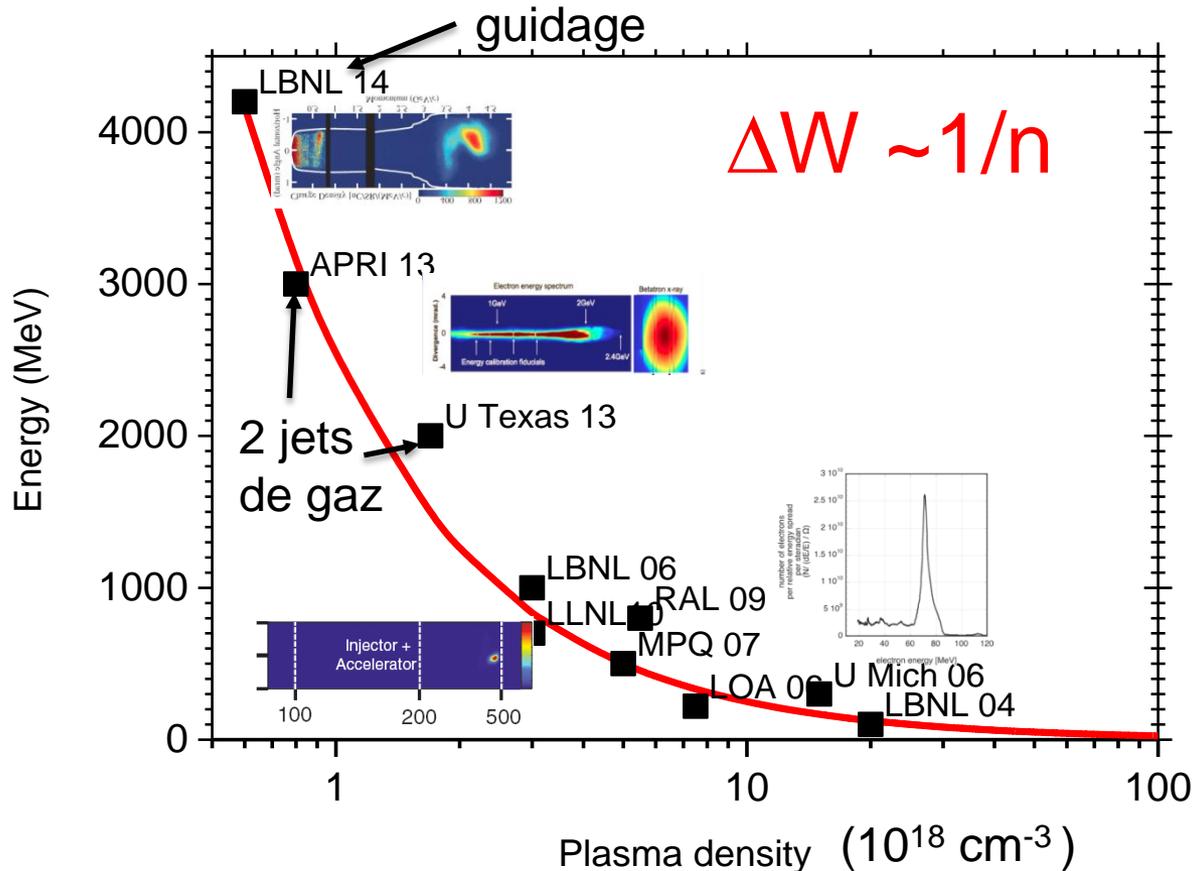
$$E_z [\text{GV/m}] = 1.35 I_{\text{max}} [10^{18} \text{ W cm}^{-2}] (\lambda [\mu\text{m}])^2 / \tau [\text{ps}]$$

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



$$a_0 > 2$$

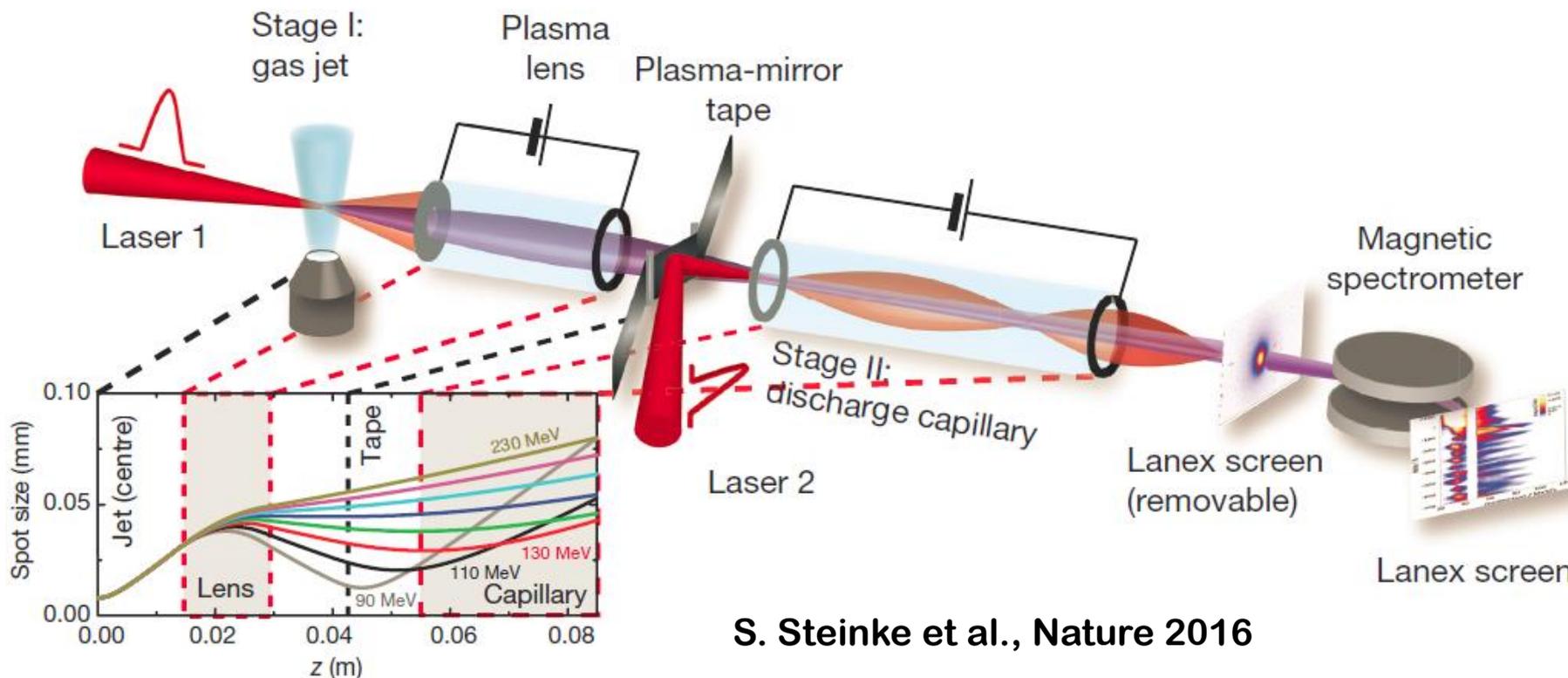
- Compression et auto-focalisation de l'impulsion
- Expulsion des électrons: création d'une bulle (ions)
- Electrons auto-injectés à l'arrière de la bulle par les champs accélérateurs et focalisants
- Electrons injectés modifient l'arrière de la bulle (beam loading)
- Génération de rayonnement bêtatron



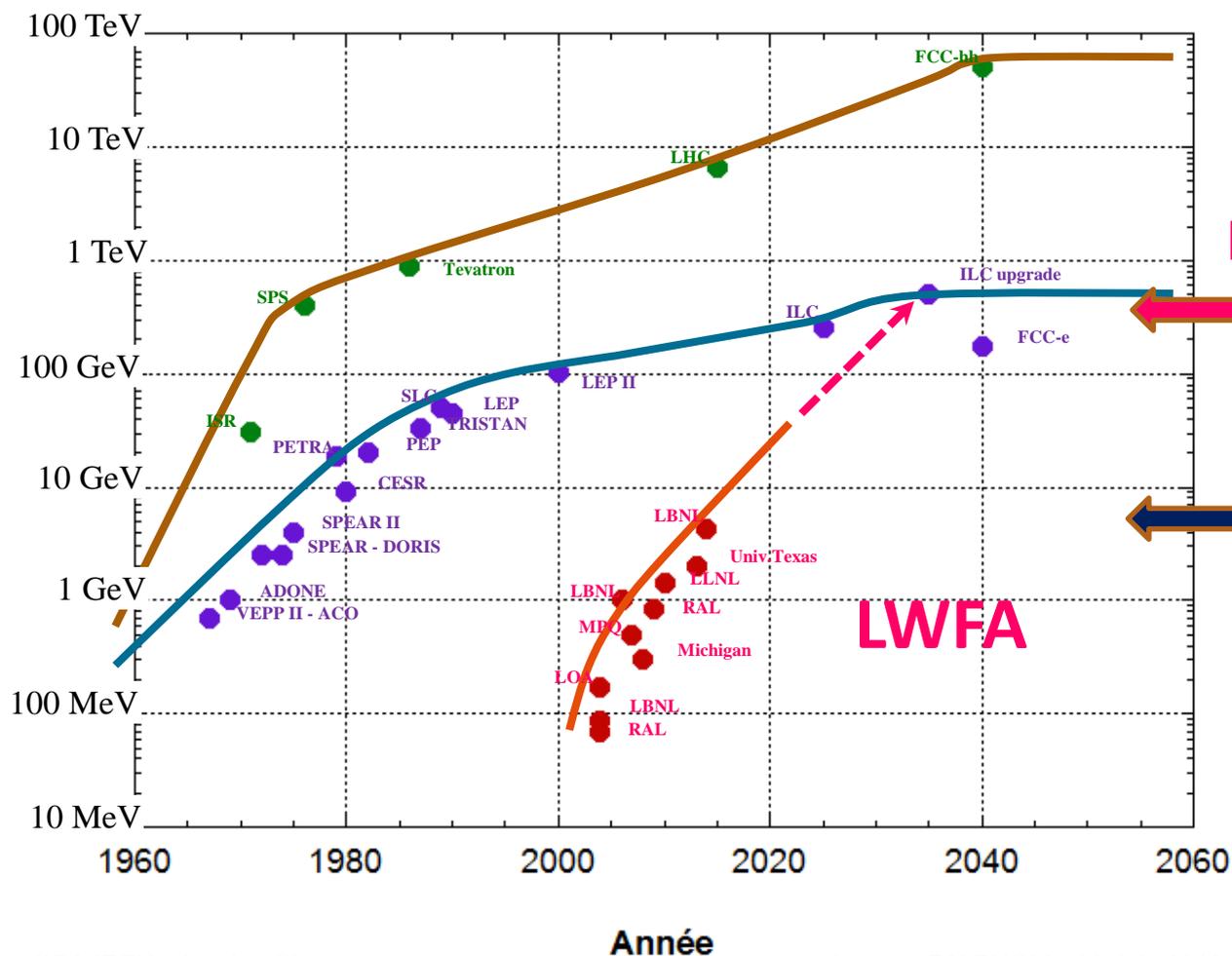
- Régime non linéaire avec injection d'électrons du plasma
- Energies au-dessus du GeV obtenues avec des lasers PW.
- Limitations longueur accélération:
 - Déphasage onde laser/électrons
 - Déplétion laser
 - Transport laser

Energie finale augmente pour des densités de plasma plus basses
 A faible densité, l'auto-injection s'arrête, une puissance laser additionnelle ou une injection externe doivent être utilisées

- Résultats préliminaires d'accélération multi-étages tout plasma au LBNL
- Résultats prometteurs et illustrent les défis à relever



Les progrès de l'ALP encouragent les applications



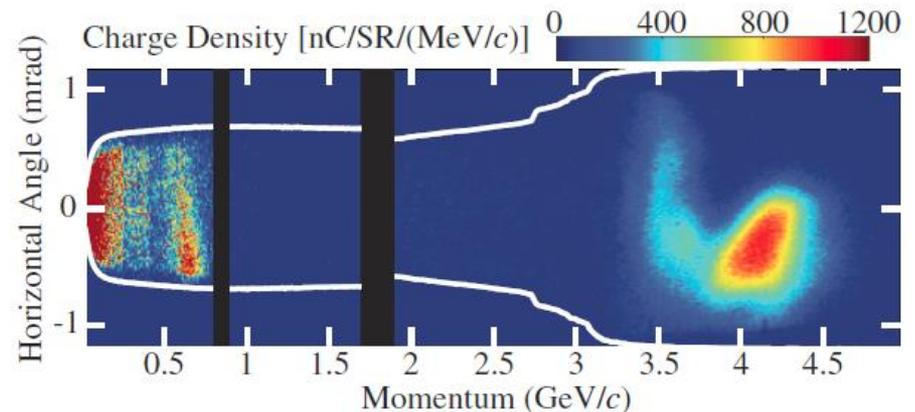
Potentiel
Pour collisionneurs
haute énergie

LEL compact,
accélérateurs
médicaux e-

LWFA

- Les accélérateurs laser plasma sont des sources d'électrons et de rayonnement (THz, X, gamma)
 - Accélérateurs Compacts 4.2 GeV, 9 cm, laser 300 TW
 - Paquets de courte durée (~ 10 fs)
- Gradients accélérateurs élevés ~ 100 GV/m démontrés
- Accord avec les modèles théoriques
- Propriétés des électrons dépendent beaucoup des mécanismes d'injection dans l'onde de plasma
- Etudes contrôle et stabilisation en cours

Leemans et al. PRL 2014



Jusque maintenant les projets sont axés validations de principe de l'accélération laser-plasma (**Bas TRL**)

Objectifs futurs: passer au TRL supérieur avec des réalisations de prototype d'accélérateur:

Définition d'un accélérateur:

- Equipement produisant un faisceau de particules accélérées (ions ou électrons):
 - avec un **ensemble de paramètres prédéfinis** (énergie, charge, durée des paquets, émittance...)
 - de manière **récurrente** (fréquence de répétition min de l'ordre du Hz, durée de fonctionnement min de quelques heures/jour) et **reproductible**,
 - **Utilisable** (transport, focalisation,...) pour une **application** scientifique ou industrielle définie

Ces efforts se structurent autour:

- d'installations de grande taille ou dans des labos accélérateurs (ex LBNL, DESY, INFN),
- de regroupements d'installations pilotés par des financeurs nationaux (ex Helmholtz, STFC) ou Européens (ex Eupraxia)
- de groupes de travail ou de réseaux (ex ALEGRO, Euronnac)

PRINCIPALES INSTALLATIONS DE RECHERCHE ALP EN EUROPE



Presentation ALEGRO Workshop | Ralph Assmann | 26 MAR 2018

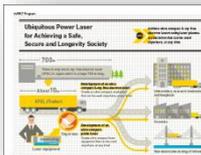


USA: consensus pour une recherche accélérateurs à la frontière en énergie orientée physique des particules (PP) pilotée par le DOE

Europe:

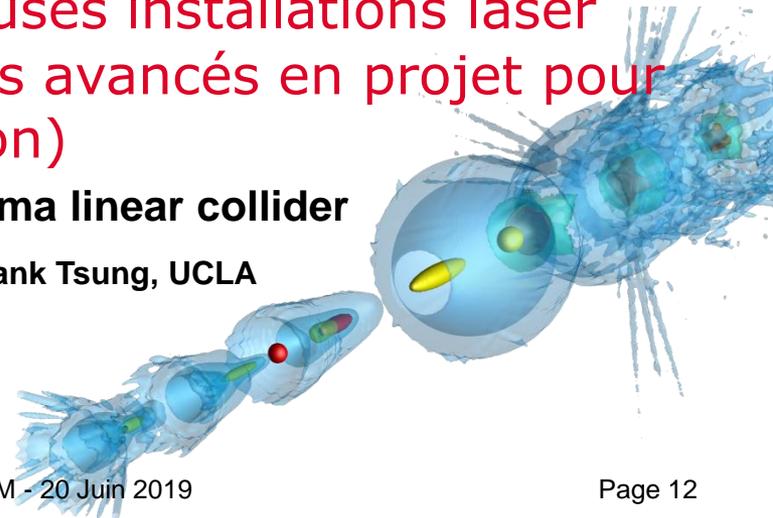
- projets accélérateurs en préparation et collaborations liées aux financements européens,
- réflexion stratégie à long terme menée dans le contexte de la maj de la stratégie européenne de PP

Asie: construction de nombreuses installations laser (Chine, Corée), et accélérateurs avancés en projet pour sources de rayonnement (Japon)



e-e+ plasma linear collider

Image by Frank Tsung, UCLA

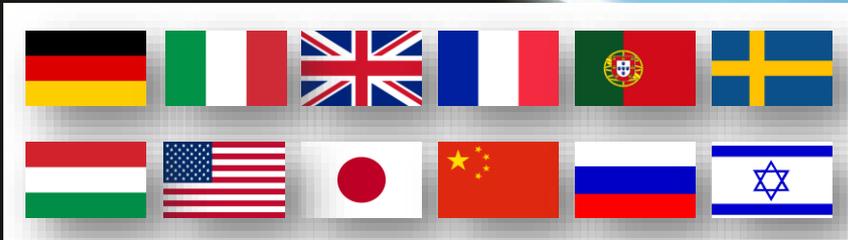


- **Les équipes françaises ont été pionnières** dans la démonstration de nombreux concepts d'ALP avec la participation de nombreux laboratoires de P2I-PHOM.
- Cet effort s'est appuyé sur le **dynamisme du développement laser** en France et **plusieurs installations**.
- Le passage concepts-machine est fortement soutenu par certains pays (ex USA, Allemagne)
- Comment la communauté française va-t-elle participer à ces efforts?
 - ⇒ Besoin de structurer ces efforts.
 - ⇒ **Création du groupe de recherche APPEL début 2019.**

- **Regrouper** la communauté française en capacité de contribuer aux R&D ayant pour finalité la mise au point de futurs accélérateurs utilisant l'accélération laser plasma ;
 - 60 permanents,
 - 15 entités CNRS ou CEA
- **Rendre plus visible** la communauté française autour de cette thématique ;
- **Mettre en place une structure de coordination** des efforts expérimentaux nationaux et de la participation aux projets internationaux.
 - **5 axes: Concepts d'accélération, Conception de futures machines, Modélisation et simulation, Activité expérimentale, Identification d'applications**
- **Contribuer aux réflexions stratégiques** pour la définition d'une feuille de route nationale sur cette thématique ;
 - Proposition de projets accélérateurs à moyen et long terme
 - **Réflexions autour de la participation française à EuPRAXIA**

EUROPEAN
PLASMA RESEARCH
ACCELERATOR WITH
EXCELLENCE IN
APPLICATIONS

EuPRAXIA



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 653782.

EuPRAXIA est une étude conceptuelle pour un accélérateur plasma d'électrons de 5 GeV

- Projet européen H2020 mené par DESY, 16 bénéficiaires et 25 partenaires
- Conceptual Design Report: 31 Octobre 2019

1. Résoudre le problème de la **qualité**. Démontrer les premières **applications** de la **technologie accélérateur**
2. Démontrer les bénéfices en **performance, taille ou coût** versus technologie établie RF pour certaines applications

Note: EuPRAXIA est initialement **basse puissance** et **bas rendement à la prise**

- Schéma de référence (**10 Hz vers 100 Hz**): puissance moyenne 10s of Watt avec e.g. énergie pulse de 1 mJ/photon dans un pulse LEL → **plus haut taux de répétition permet haute qualité** avec rétroaction. (voir e.g. améliorations en stabilité du laser à LUX (A. Maier, UHH)).
- Soutenir l'expertise en laser (**industrie et laboratoires**) pour améliorer le taux de repetition et l'efficacité (e.g. lasers à base de fibres avec 30 % efficacité, IZEST, LLNL approach, ELI, ...) → feuille de route laser vers des lasers de puissance à haute efficacité

PRESENT EXPERIMENTS

Demonstrating
100 GV/m routinely

Demonstrating **GeV** electron
beams

Demonstrating basic quality



EuPRAXIA INFRASTRUCTURE

Engineering a high
quality, compact plasma
accelerator

5 GeV electron beam for
the **2020's**

Demonstrating user
readiness

Pilot users from FEL,
HEP, medicine, ...

PRODUCTION FACILITIES

Plasma-based **linear
collider** in **2040's**

Plasma-based **FEL** in
2030's

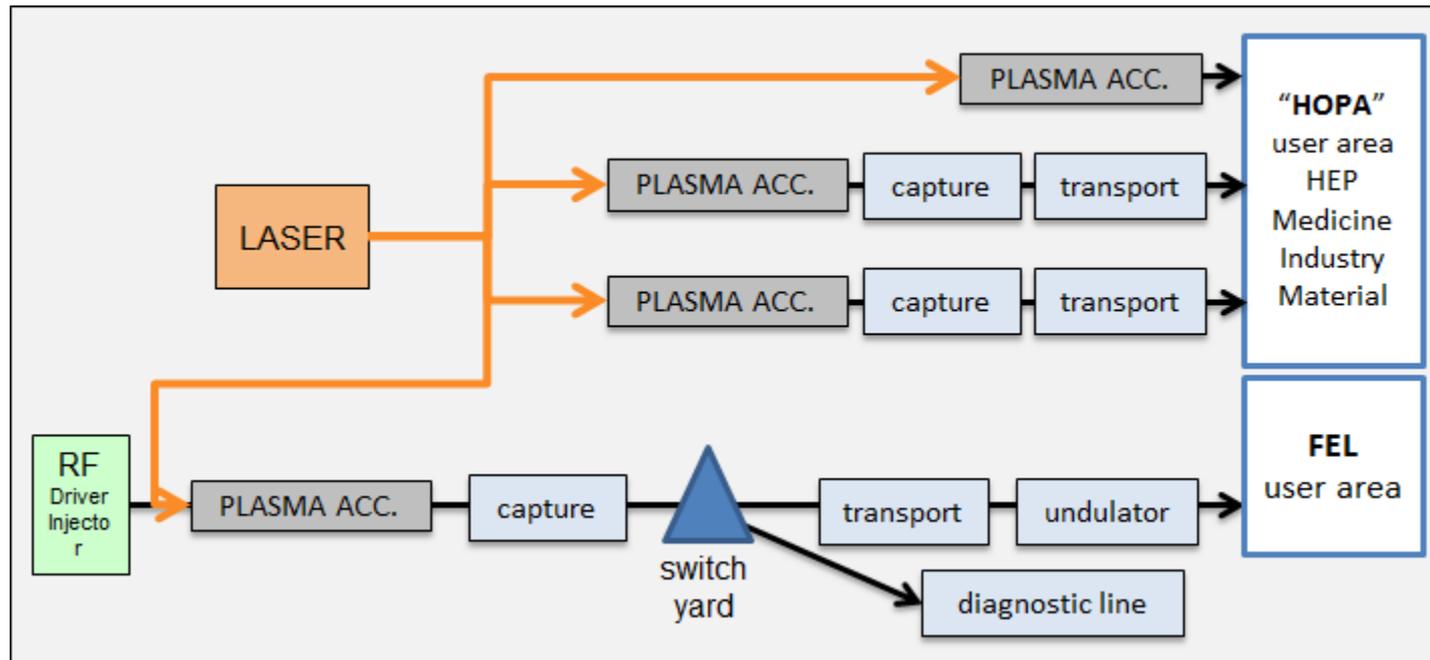
Medical, industrial
applications soon



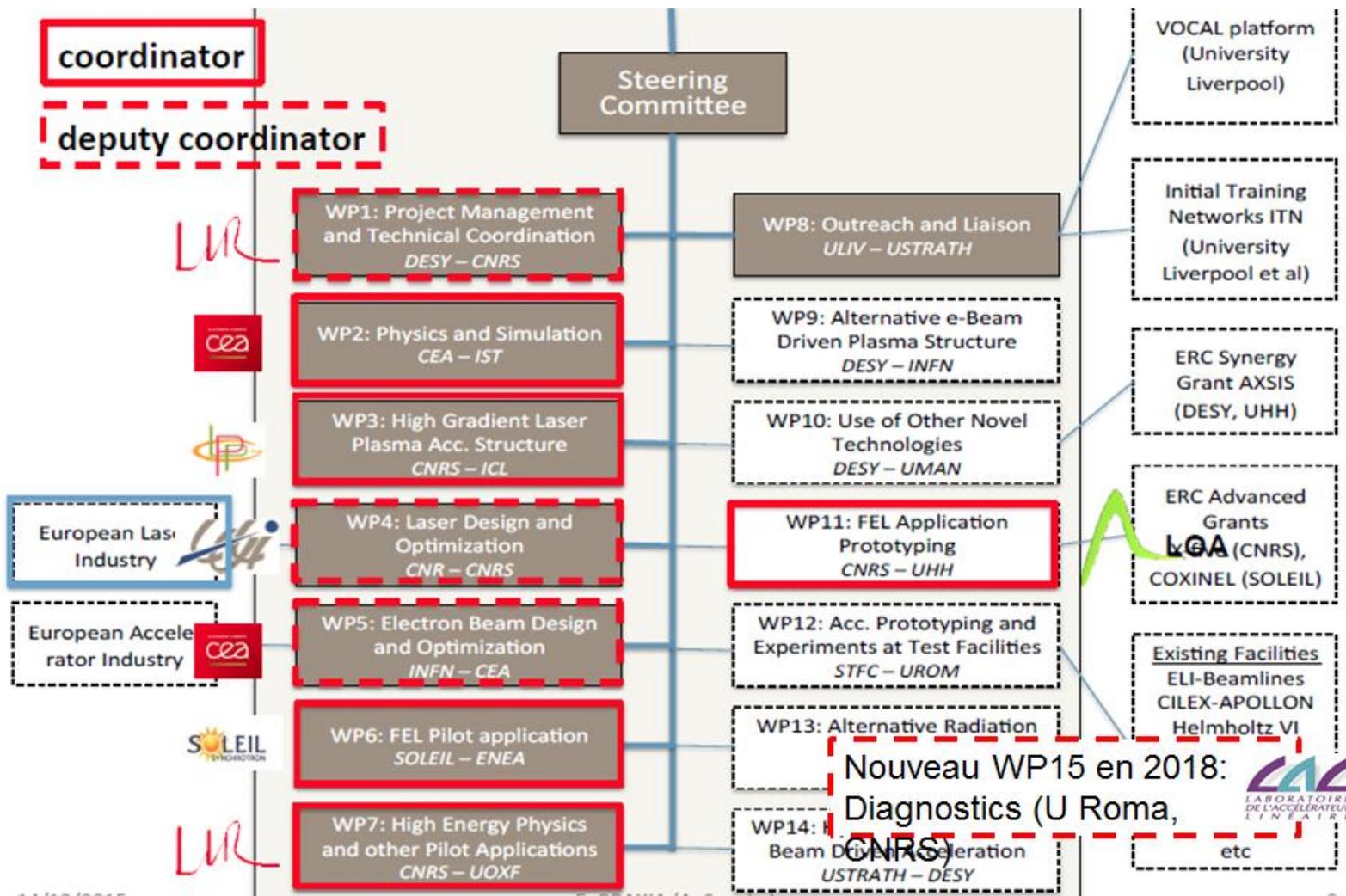
This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 653782.

UN AVANTAGE DES ACCÉLÉRATEURS PLASMA:

Pulses laser distribués vers de “petits” accélérateurs plasma pour piloter beaucoup d’applications!



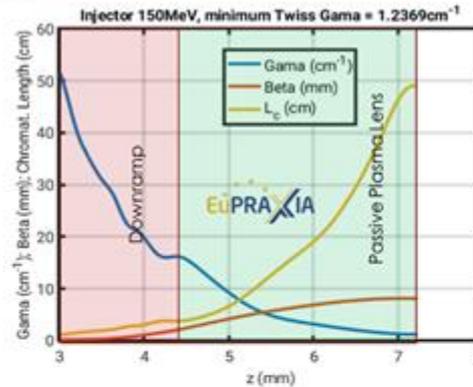
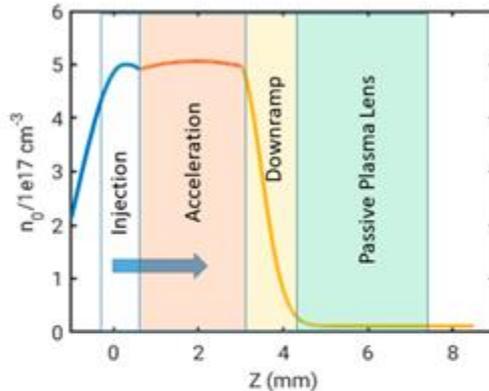
This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 653782. 



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 653782.

Phi Nghiem et al (WP2)

150 MeV



γ : 5000 m⁻¹ (plateau) → 1700 m⁻¹ (downramp) → 130 m⁻¹ (plasma lens)

Rule: γ must be reduced between the plateau and the transfer line

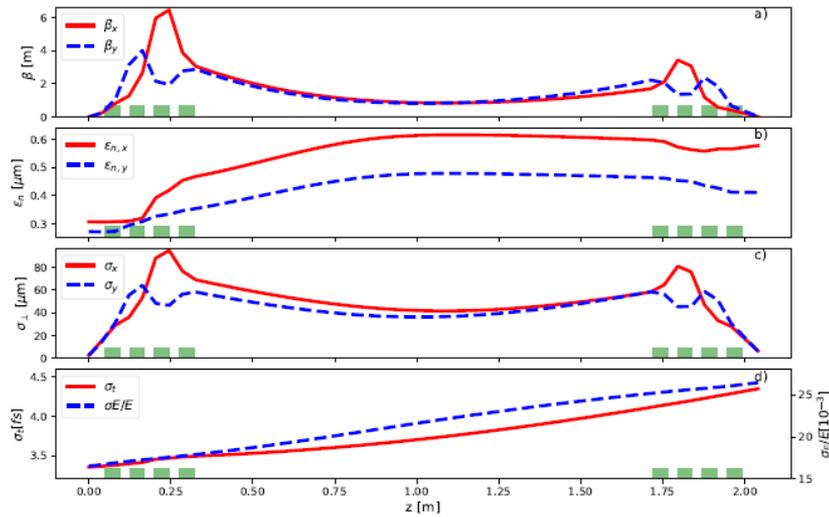


If not, whatever done elsewhere → emittance explosion at plasma exit

Stratégie recommandée:

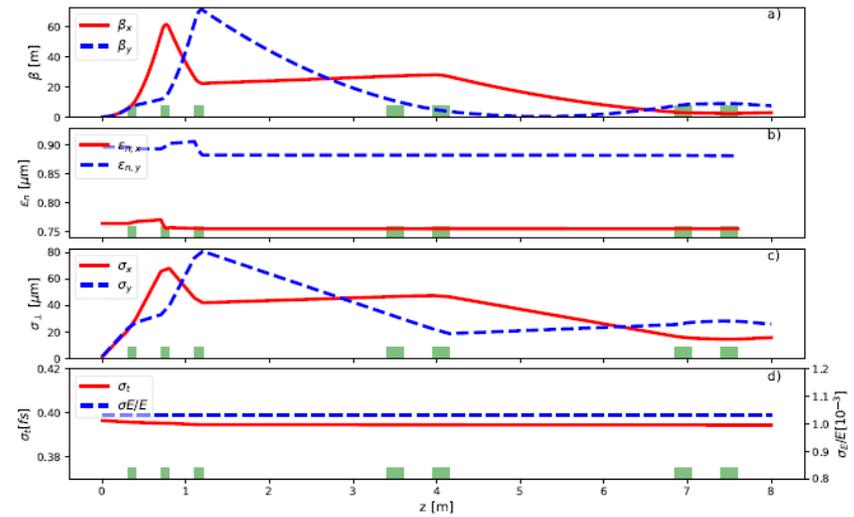
1. Minimiser l'émittance et la dispersion en énergie dans la partie accélératrice
2. Minimiser le paramètre de Twiss γ (carré de la divergence angulaire sur émittance RMS) dans la rampe du plasma
3. Minimiser le chromatisme de la ligne de transfert

150 MeV

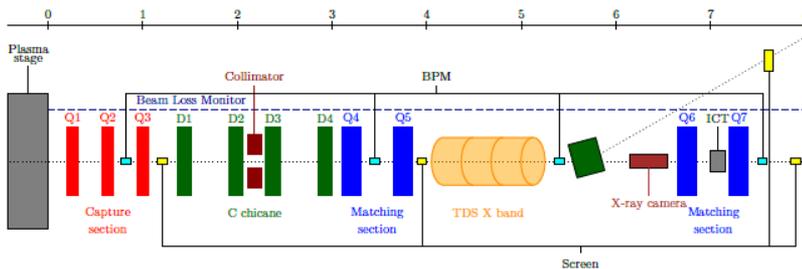


5 GeV

Onduleurs



Succès seulement si beaucoup de disciplines marchent de concert:
Simulations plasma, physique plasma (profil du plasma), physique et transport laser, dynamique faisceau, diagnostics, optimisation du LEL,...



Produce a credible laser design to meet project specifications for a PW-class system, with **demanding high average power** (>1 kW, ideally 10 kW)

Laser 1 : 150 MeV injector → **7J, 100 Hz, 25 fs**

Laser 2 : 1 GeV injector → **30J, 100 Hz, 30 fs**

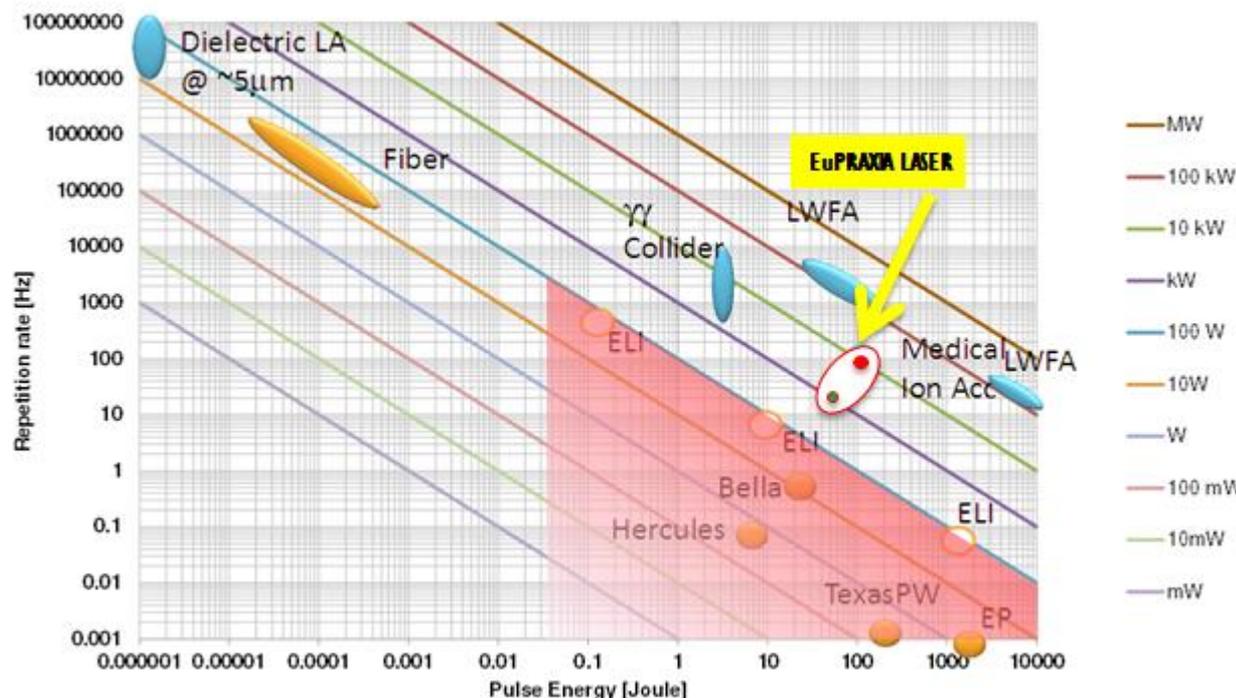
Laser 3 : 5 GeV accelerator → **100J, 100 Hz, <100 fs**

Major effort required to fill the gap between **existing** and **required** laser technology

2

A système laser de classe PW **demandant une haute puissance laser moyenne** (>6 kW, ideally 10 kW)

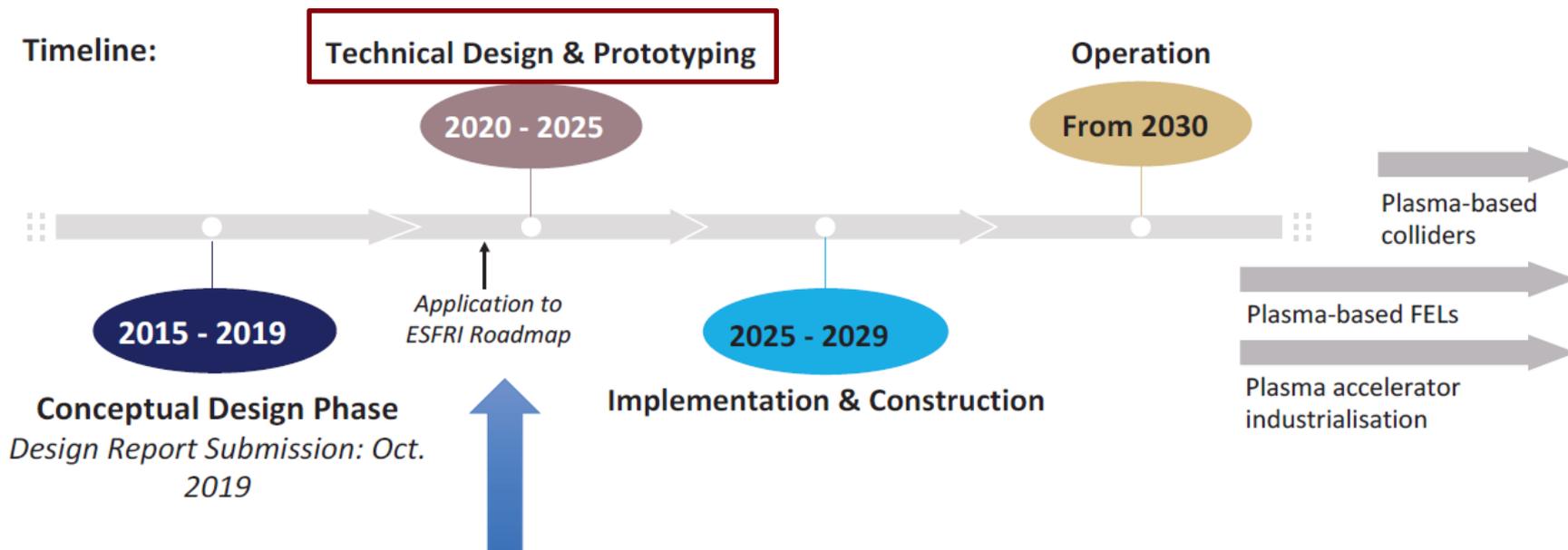
R&D laser requise vers les hautes efficacités



The laser d'EuPRAXIA **PW-kW** est, à tous égards, un système unique.

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 653782.





La phase de conception se finit.

Application prochaine à la feuille de route ESFRI.

2 sites (DESY accélération laser-plasma et INFN pour accélération plasma 2 faisceaux)

Organisation de la phase suivante en clusters de recherche.

2020-2025: possibilité d'une contribution française avec un prototype EuPRAXIA
Réflexions en cours au sein du GdR APPEL

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 653782. 

- Concurrence internationale pour démontrer qu'un accélérateur laser-plasma est possible.
- Le projet EuPRAXIA est un consortium européen qui cherche à répondre à plusieurs questions clés:
 - Contrôler et adapter les paramètres du faisceau d'électrons à l'entrée et à la sortie du plasma:
 - **taille** du faisceau $\sim 1\mu\text{m}$
 - **durée** des paquets qq fs pour minimiser largeur énergie
 - **Stabilité** synchronisation des électrons dans l'OP pour la stabilité en énergie et la largeur spectrale
 - **Charge** (beam loading) pour compenser l'élargissement en énergie
 - Démontrer une qualité de faisceau industrielle
 - Démontrer que le faisceau est utilisable dans la gamme 1 à 5 GeV
 - 2 sites candidats (DESY et INFN) avec application sur feuille de route ESFRI
 - CDR: 31/10/2019 pour opération en 2030
- Le projet EuPRAXIA est également une opportunité pour fédérer la communauté française et aller vers un prototype d'accélérateur laser-plasma.

RÉSUMÉ: UN PONT ENTRE DEUX COMMUNAUTÉS

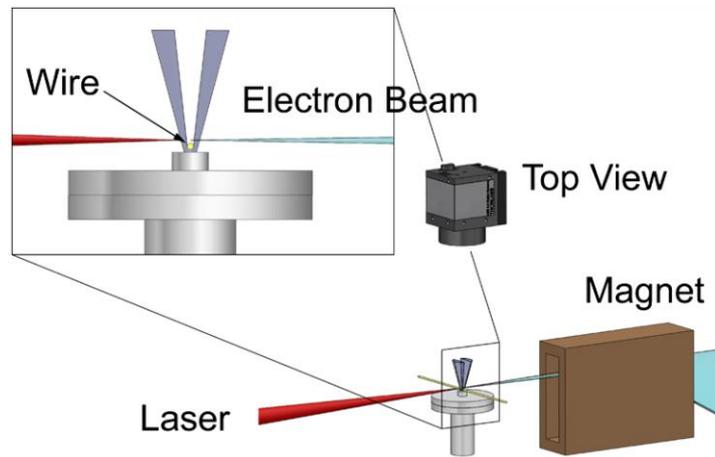
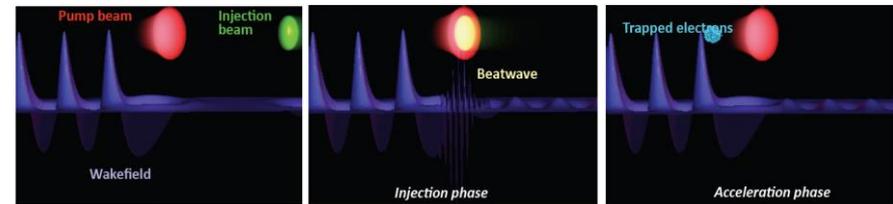


Merci de votre attention !



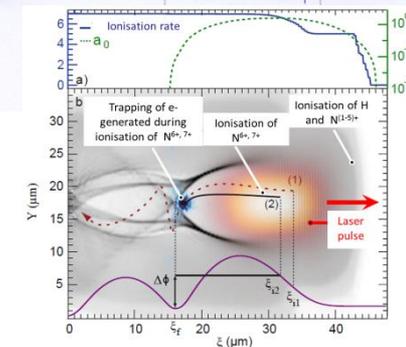
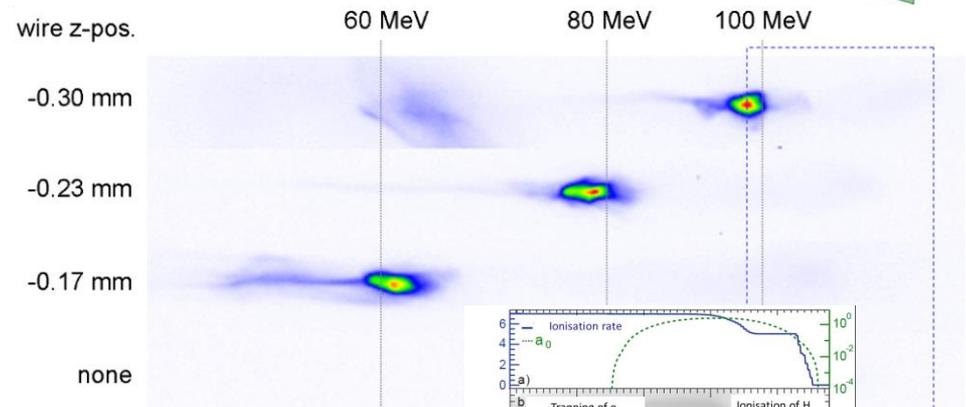
Colliding pulse

- J. Faure *et al.*, Nature (2006)
- C. Rechatin *et al.*, PRL (2009)



Gradient injection

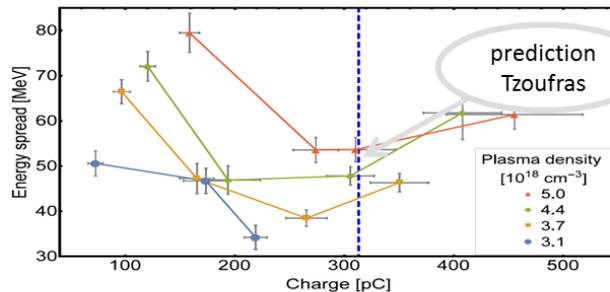
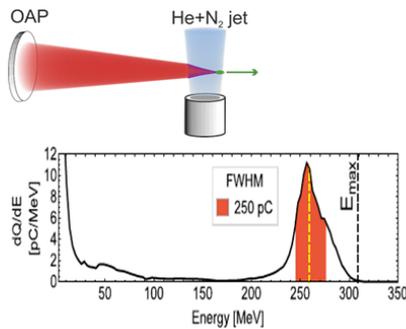
M. Burza *et al.* PRSTAB (2013)



Ionisation induced injection

Jurjen Couperus, et al. HZDR

High peak currents from a beam loaded nC-class LWFA

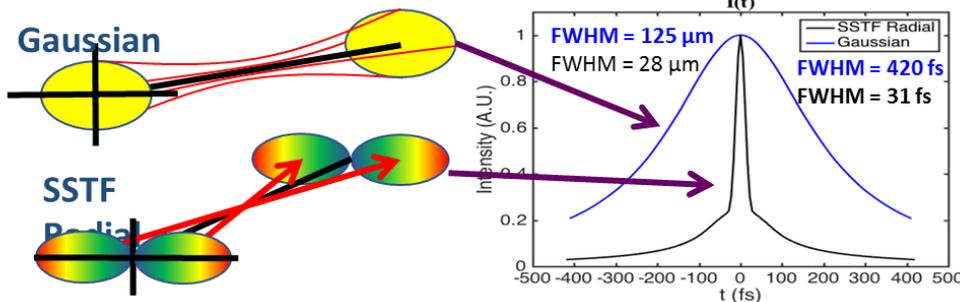


J.P. Couperus *et al.* Nat. Commun. **8**, 487 (2017)

- Ionization of inner shell electrons near peak of laser provides robust injection
- Control of the injected charge up to 0.5 nC (FWHM) @ N2%; COTR bunch length
- Optimum loading:
 - minimum energy spread
 - @ 300 pC, ~ 15 fs up to 20 kA,
 - 15% relative energy spread

Jimmy Holloway, et al. Oxford

Two-pulse ionisation injection with space-time focused pulses



- SSTF constrains high-intensity region of injector pulse in space and time
- Original 2Pll scheme yielded:
 - $\epsilon_N = 2$ mm mrad, $\Delta E/E = 2\%$.
- SSTF scheme yields:
 - $\epsilon_N = 0.17$ mm mrad,
 - $\Delta E/E = 0.5\%$

Andreas Maier, et al. Hamburg

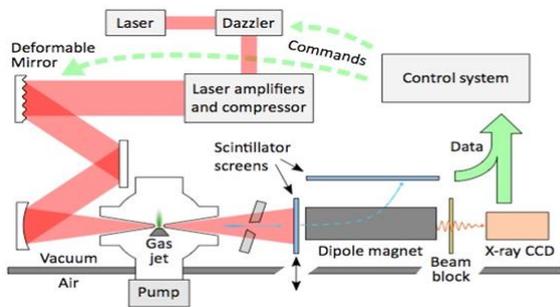
LUX – A laser-plasma-driven undulator beamline



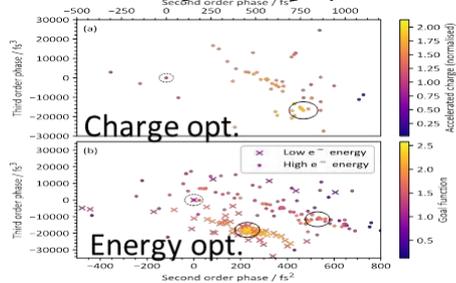
- Challenge: stable operation of a LPA
- Findings:
 - continuous operation of an LPA with high statistics
 - enables detailed machine studies
- Future work: stabilization and feedback loops

Alec Thomas, et al. U. Michigan

Laser wakefield acceleration with active feedback at 10TW



Dazzler settings during optimization



- High rep-rate – precision of science and quality of beams
- Feedback routines optimise laser wakefield accelerator performance
- Full spatio-temporal control of the laser pulse
- Genetic algorithm, Nelder-Mead used
- Importance to next generation >10 Hz lasers and applications including HEP

High-energy, ultrashort electron beams		
Energy	[GeV]	1 – 5
Energy spread	[%]	0.1 – 5
Beam duration	[fs]	3 – 35
Beam charge / no. of electrons	[pC / -]	5 – 1000 / 3×10^7 – 6×10^9
Typical transverse beam size*	[μm]	2 – 100
Repetition rate	[Hz]	1 – 100
Ultrashort Free-Electron Laser radiation pulses		
Wavelength	[nm]	0.15 – 10
No. of photons per pulse	[-]	10^{10} – 10^{12}
Pulse duration	[fs]	3 – 35
Bandwidth	[%]	0.1 – 0.9
Three main high power laser systems		
Wavelength	[nm]	800
Energy on target	[J]	5 – 100
Pulse duration	[fs]	20 – 120
Repetition rate	[Hz]	20 – 100

* with a normalised transverse beam emittance of 0.5 – 1.5 μm

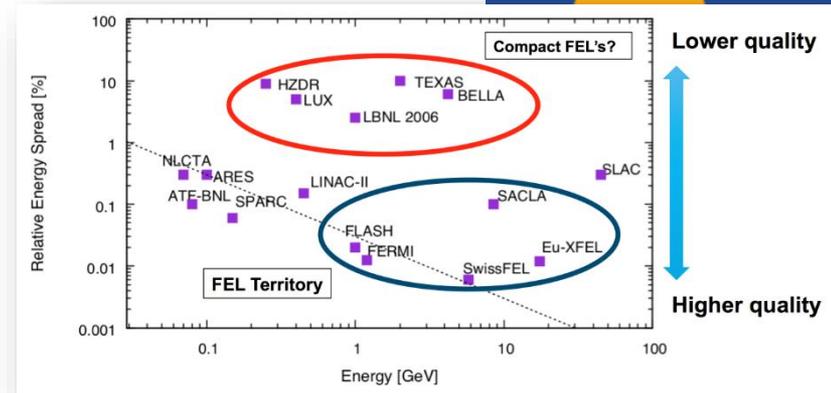
Note that the table above is not self-consistent and to-date only preliminary. More detailed lists are available upon request.

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 653782.



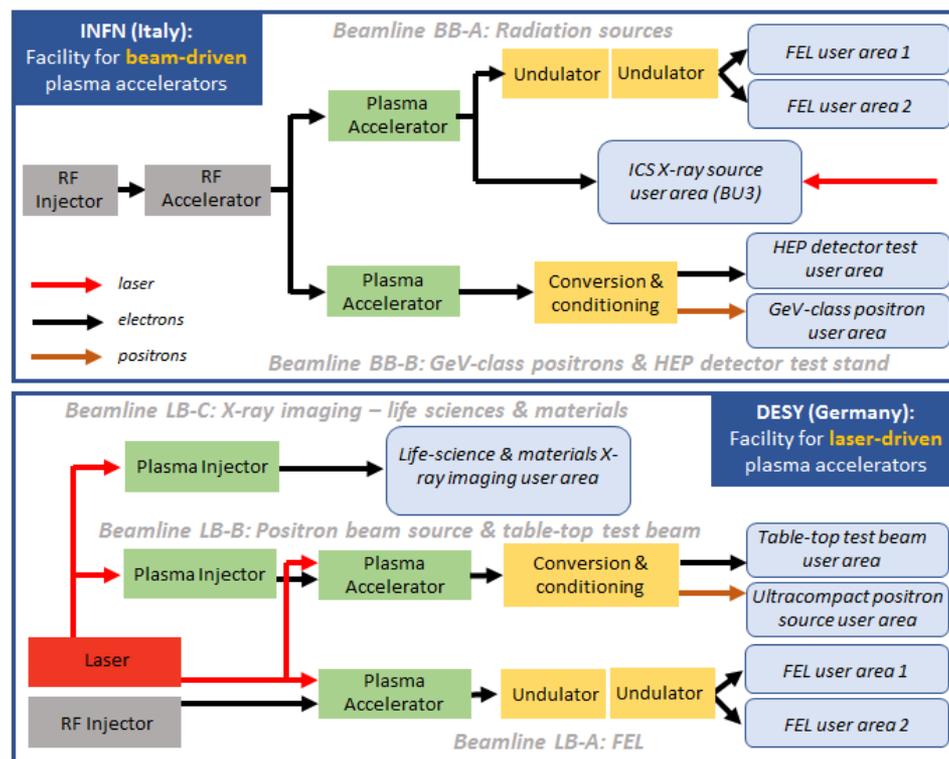
Interdisciplinary – combining excellence

- A **technically convincing concept is critically important**. We must explain why we can build a usable plasma accelerator.
- Components of EuPRAXIA concept:
 - **High brilliance photo injectors**, both photocathode and plasma based
 - State of the art **matching and beam transport**, based on RF accelerator high tech
 - Latest and new **instrumentation** for electron beam, laser, plasma
 - An outstanding **laser program** to move to the next level with industry
 - **X band RF technology** for building compact beam drivers
 - Complete **theory and simulation** capabilities with predictive capability
 - Several paths to **minimize correlated energy spread** (beam loading, plasma modulation, sub-fs bunches, compensation)
 - Understanding of **uncorrelated energy spread**
 - New concept to **suppress timing jitter** (e- beam to laser) to sub-fs
 - Ideas on **7/7 24h** operation (multiple laser operation)
 - Versatile concept of parallel plasma accelerators feeding parallel user lines but keeping central powering scheme
 - A hybrid scheme offering potentially much better brilliance



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 653782.

	DESY	INFN
Phase 1	<ul style="list-style-type: none"> ✓ FEL beamline to 1 GeV + user area 1 ✓ Ultracompact positron source beamline + positron user area 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ FEL beamline to 1 GeV + user area 1 ✓ GeV-class positrons beamline + positron user area
Phase 2	<ul style="list-style-type: none"> ✓ X-ray imaging beamline + user area ✓ Table-top test beams user area ✓ FEL user area 2 ✓ FEL to 5 GeV 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ICS source beamline + user area ✓ HEP detector tests user area ✓ FEL user area 2 ✓ FEL to 5 GeV
Phase 3	<ul style="list-style-type: none"> ✓ High-field physics beamline / user area ✓ Other future developments 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Medical imaging beamline / user area ✓ Other future developments



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 653782.

16 Participants

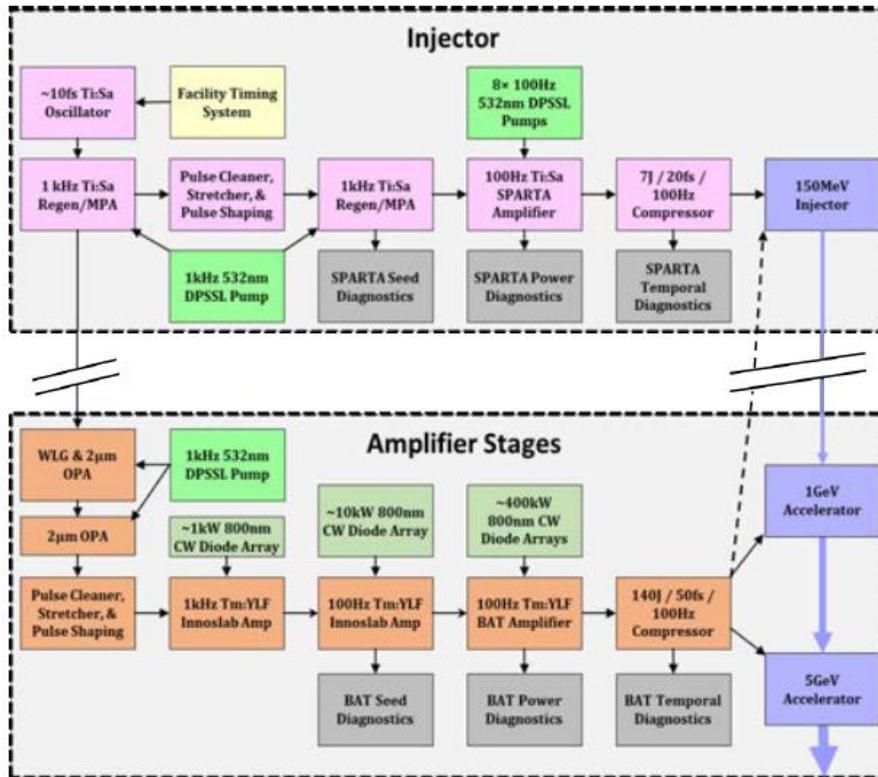


25 Associated Partners

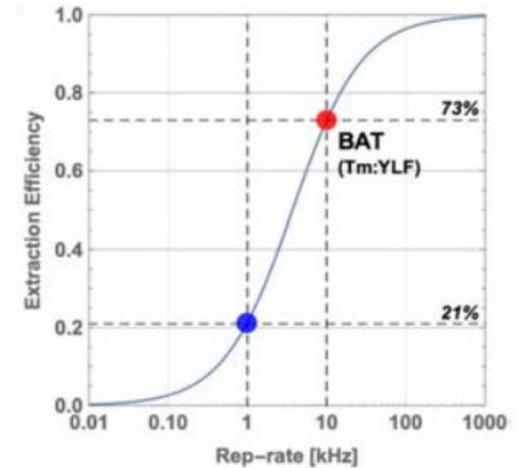
(as of December 2018)



Tm:YLF: Big-Aperture-Thulium Laser (BAT*)



Laser system designed to deliver 7J/30fs/230TW at 100Hz: average power of this system = 700W



- Central wavelength at 1.9 μm,
- Pulse duration potentially as short as 50 fs
- WPE very high for >10 kHz (<5% at 100 Hz)
- Issues remain for LWFA at 1.9 μm

(*) Lawrence Livermore National Laboratory