

Présentation de l'Axe 4 Accélération laser-plasma et nouveaux concepts

B. Cros et E. d'Humières



• Comment accélérer une particule avec un laser ?

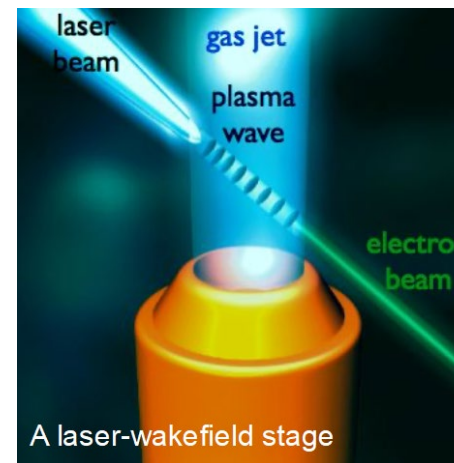
- **Dans le vide** : laser intense, électron relativiste, brisure d'adiabaticité (miroir, ionisation, champ magnétique...)
- **Dans un plasma** : séparations de charge, ondes plasmas

• Quels lasers ?

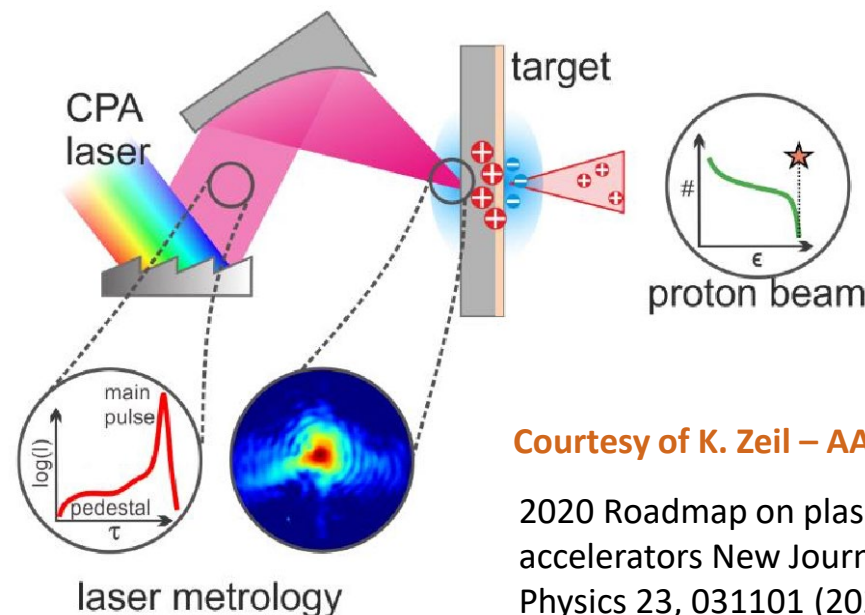
- **Lasers courts (< ps) et intenses (> 10^{18} W/cm²)**, en général $\lambda=800$ nm ou ~ 1050 nm, focalisation sur une tache avec une taille de ~ 10 microns.

• Quels plasmas ?

- **Plasmas souseuses** (< densité critique = $1.1 \cdot 10^{21}$ cm⁻³ pour $\lambda=1$ μ m) pour accélérer des électrons par sillage laser
- **Plasmas surdenses** (> densité critique) pour accélérer des ions par expansion d'un plasma chaud (TNSA) ou par pression de rayonnement (RPA)



Courtesy of A. Huebl – AAC2022



Courtesy of K. Zeil – AAC2022

2020 Roadmap on plasma accelerators New Journal of Physics 23, 031101 (2021)

- **Thématiques de l'axe 4**
- **Equipes impliquées**
- **Accélération d'ions par laser et applications**
- **Accélérations d'électrons par laser et applications**

• Accélération d'électrons par laser

- Accélération par sillage laser
- Optimisation des performances
- Fiabilisation des performances
- EUPRAXIA
- Applications (radiographie, FEL, FlashRT...)



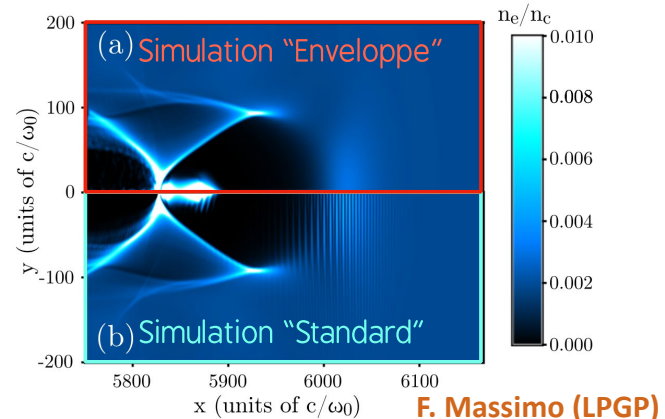
Suite GDR APPEL, vers des accélérateurs LP

• Accélération d'ions par laser

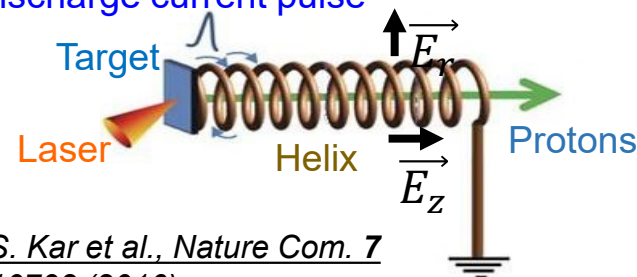
- Etudes des mécanismes de base avec des cibles solides, des cibles gazeuses
- Cibles avancées (cryo, nanostructures, micro-solénoïdes...)
- Opération à haut taux de répétition
- Applications (radiographie, chauffage isochoire, sources de neutrons, production de radio-isotopes...)

• Nouveaux concepts

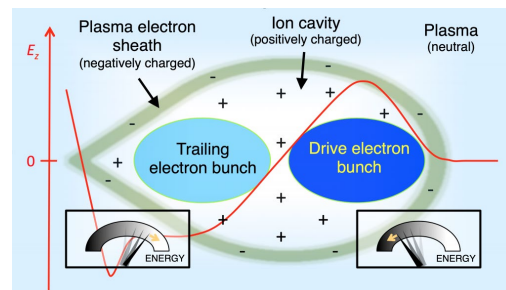
- Accélération faisceau - plasma
- Accélération sous vide par laser dans des diélectriques



Discharge current pulse



S. Kar et al., *Nature Com.* **7**
10792 (2016)



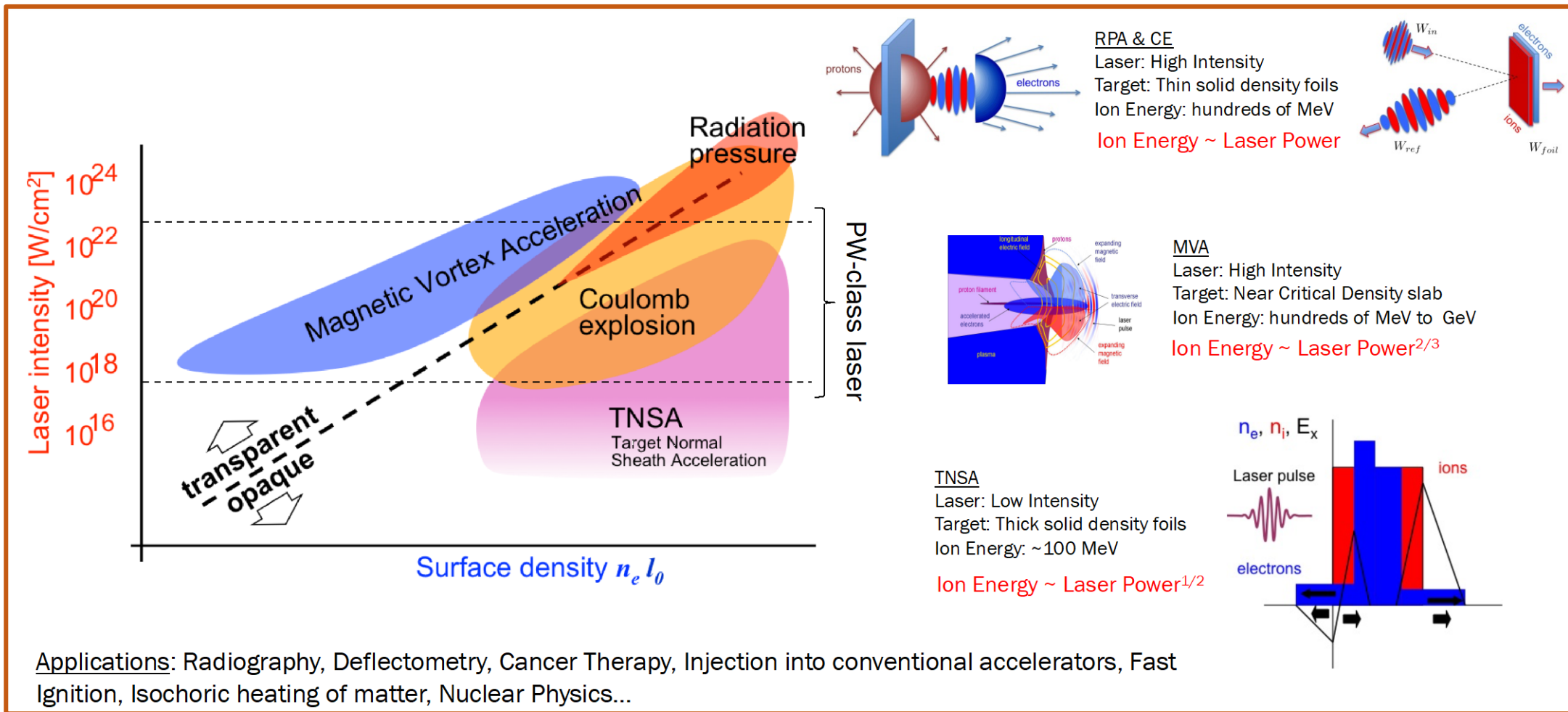
S. Corde (LOA)



C. Bruni (IJCLAB)

- CEA/DAM
- CELIA
- IJCLAB
- IRFU
- LLR
- LOA
- LP2IB
- LPGP
- LULI
- LYDIL





Applications: Radiography, Deflectometry, Cancer Therapy, Injection into conventional accelerators, Fast Ignition, Isochoric heating of matter, Nuclear Physics...

Courtesy of S. S. Bulanov – AAC2022

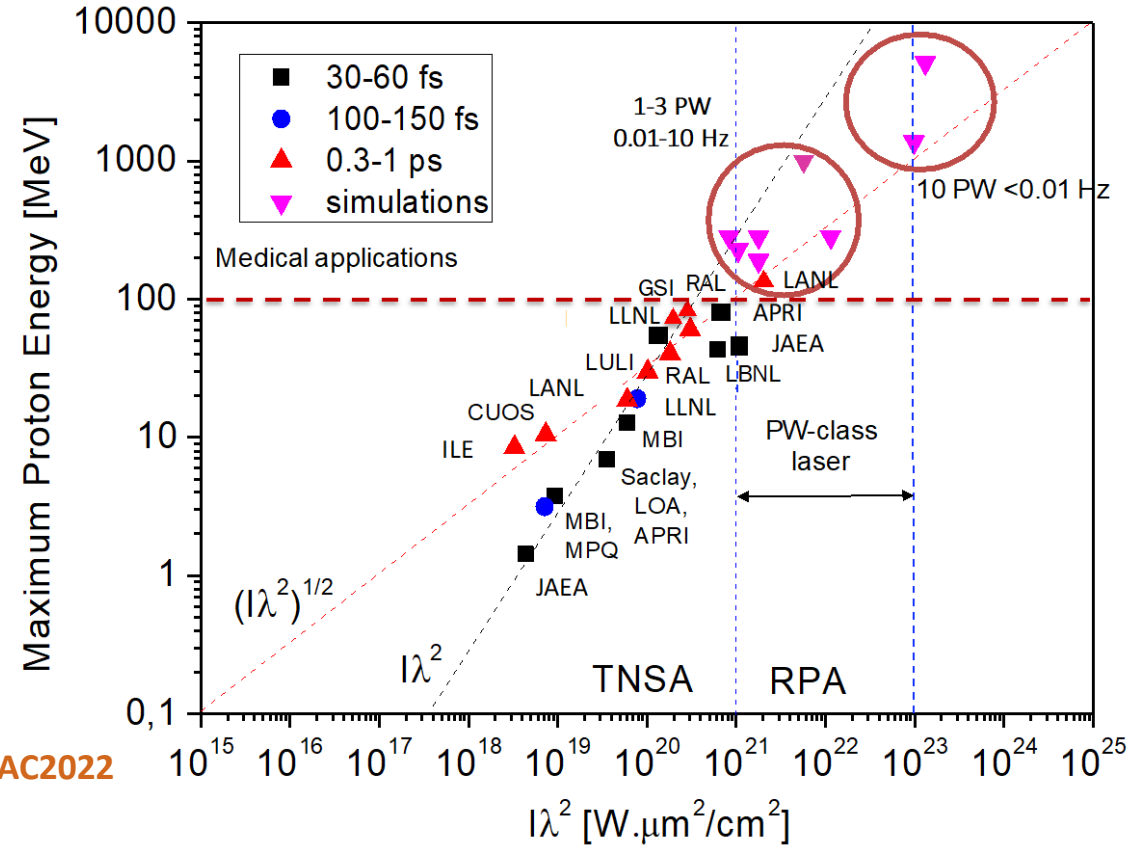
- Des avancées importantes ont été obtenues depuis 5 ans

TNSA

- $\sim 10^{12-14}$ protons > MeV par tir
- Divergence du faisceau de protons : $5^\circ-20^\circ$ en fonction de l'énergie

Energie maximale

Protons > 100 MeV mesurés au HZDR en 2022, à ELI-NP et au SULF en 2023



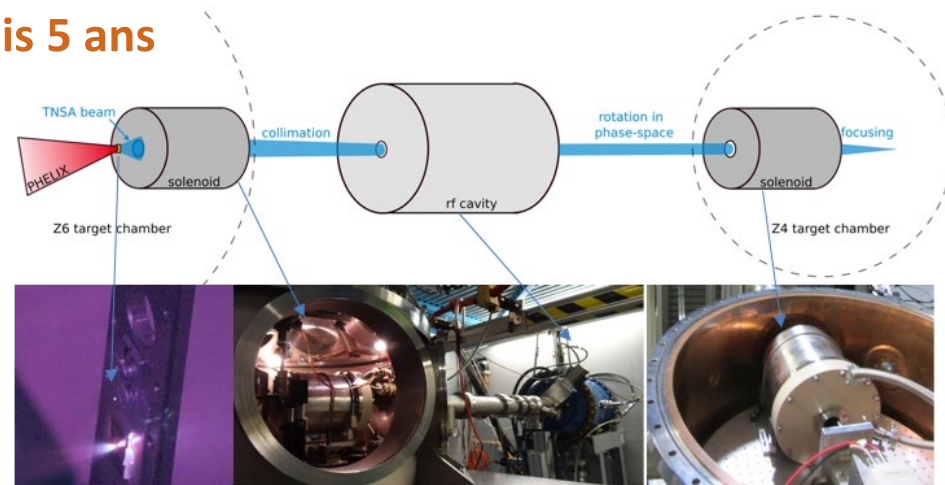
Courtesy of S. S. Bulanov – AAC2022

- Des avancées importantes ont été obtenues depuis 5 ans

Transport de faisceaux

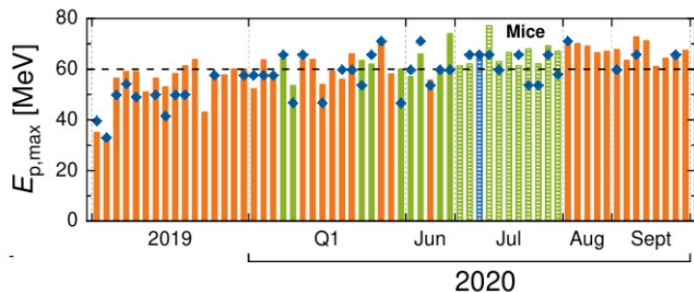
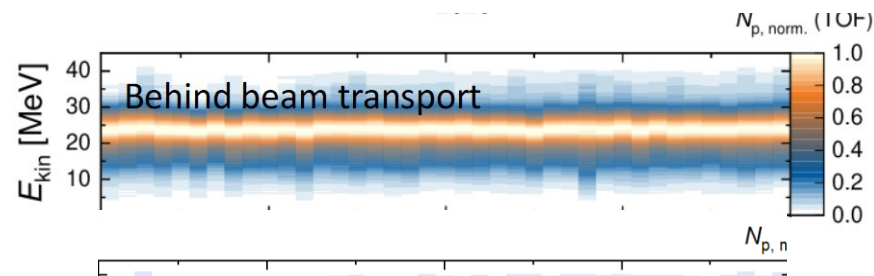
Projet LIGHT à GSI (Laser Ion Generation, Handling and Transport)

S. Busold et al., PR-STAB 16, 101302 (2013)
D. Jahn et al., NIMA, 10.1016/j.nima.2018.02.026 (2018)



Fonctionnement en cadence, reproductible, irradiation de souris

HZDR, Allemagne, T. Ziegler et al., Sci Rep 11 (2021); F.-E. Brack et al., Sci Rep 10 (2020), F. Kroll et al. Nature Physics (2022)

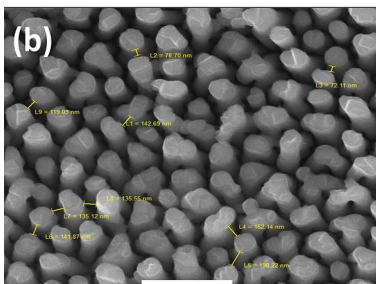



- Des avancées importantes ont été obtenues depuis 5 ans

Progrès sur les cibles

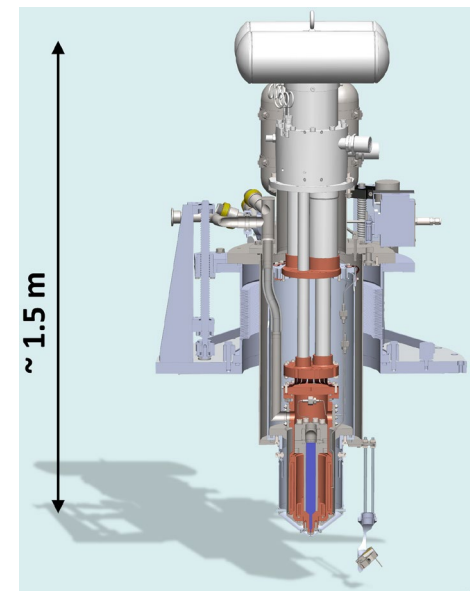
Cibles nanostructurées

S. Vallières et al. Sci. Rep. 2021

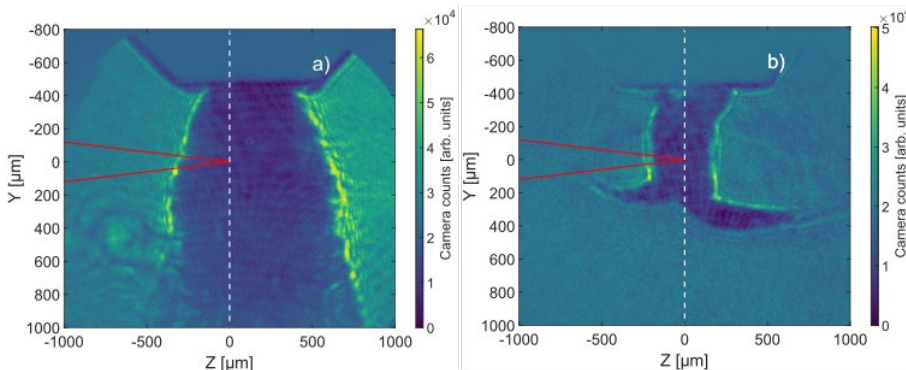
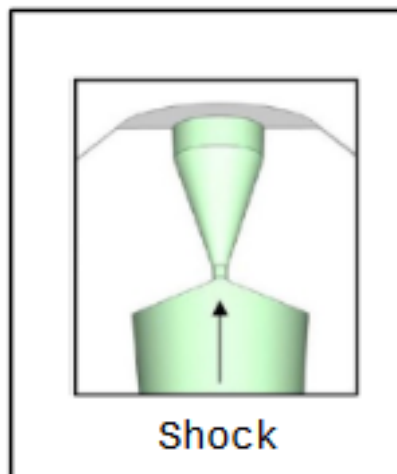


Cibles cryogéniques

CEA-Grenoble/IRIG/DSBT



Jets de gaz denses, modification du profil de densité par un laser secondaire



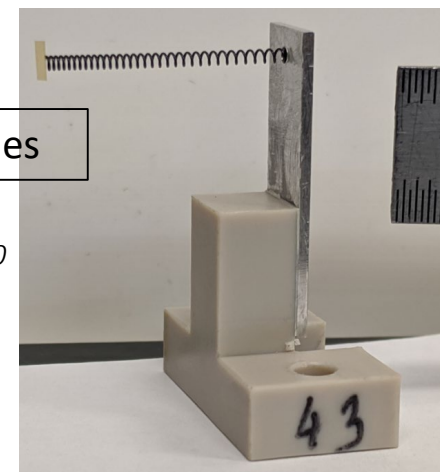
Publications en cours de revue

J. R. Marquès et al., *Matter & Radi. at Extr.* (2023)

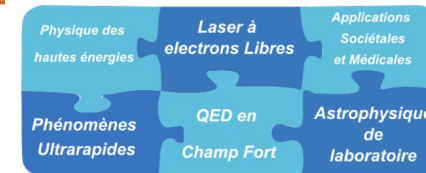
A. Maitrallain et al., *Jour. Plasma Phys.* (2023)

Micro-solénoïdes

M. Bardon et al. *PPCF* 2020

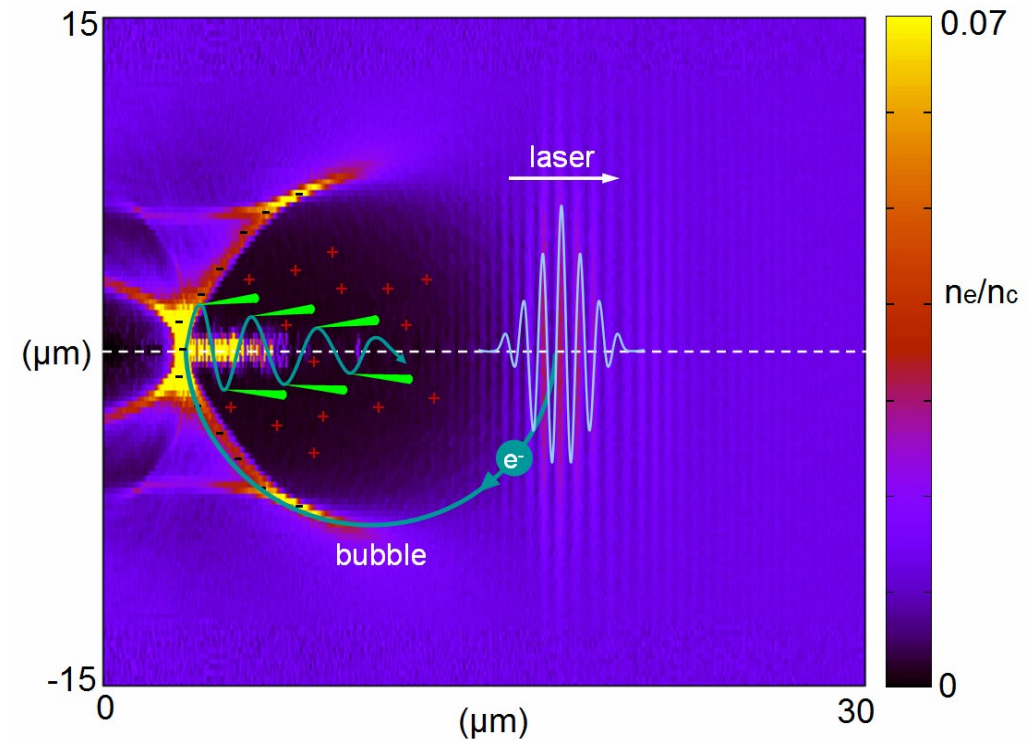
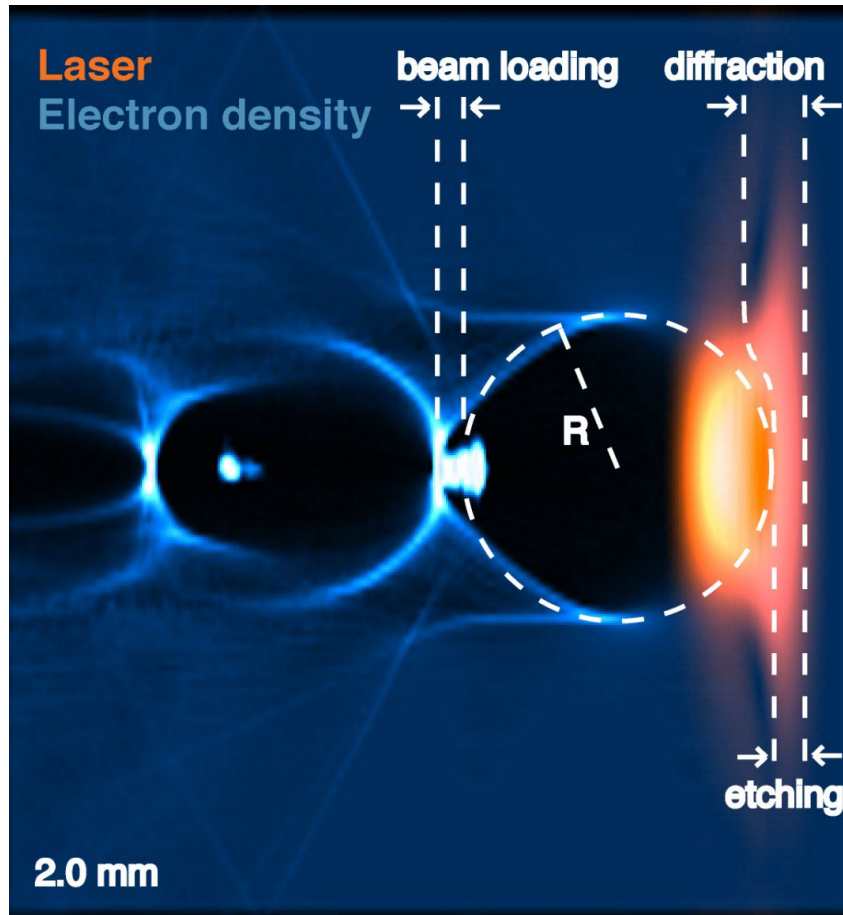


- **Les groupes français couvrent un large éventail de compétences et sont actifs sur de nombreux aspects clés de l'accélération d'ions par laser**
 - **Développement de codes** de simulation adaptés (**SMILEI, CALDER**)
 - **Etudes expérimentales** de sources d'ions par ALP avec des paramètres et des objectifs multiples sur les installations laser françaises et européennes
 - **Mise aux point de nouvelles cibles et de diagnostics adaptés à la haute cadence**
 - **Avancées vers des applications prometteuses** (neutrons, radio-isotopes, ...)
 - **Développement et caractérisation de lasers spécifiques** (académiques et industriels)
 - **Projets:** GENESIS, EUROPA
 - **Installations fr:** APOLLON, Salle Jaune, UHI100, ECLIPSE
 - + de nombreuses installations Européennes permettant de réaliser des études (ELI, GEMINI, VEGA, DRACO,)



- **Enjeux : Développer des accélérateurs pour des applications spécifiques :**
 - Des installations dédiées pour progresser sur la répétabilité et la fiabilité
 - Démonstrations d'applications (lignes fournissant des faisceaux d'ions)
- **Verrous organisationnels :**
 - Les projets français sur l'accélération d'ions sont de taille réduite en comparaison de ceux de nos voisins européens
- **Verrous scientifiques et techniques à lever :**
 - Stabilité et qualité des faisceaux laser et montée en cadence
 - Stabilité et qualité des cibles et montée en cadence
 - Simulations PIC 3D réalistes
 - Maîtrise et qualité des sources d'ions plasma

Un plasma est un milieu accélérateur mais aussi une source d'électrons et de rayonnement

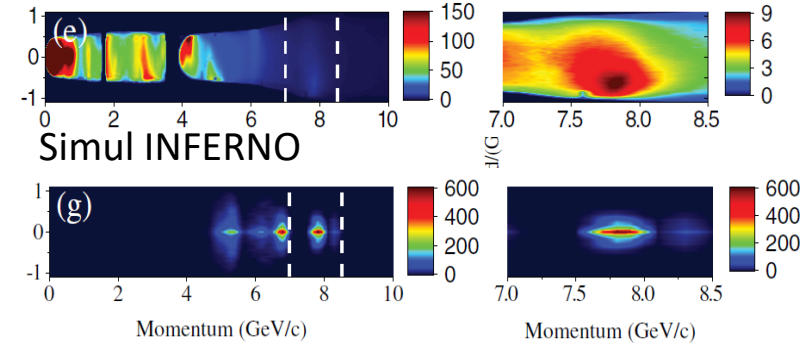
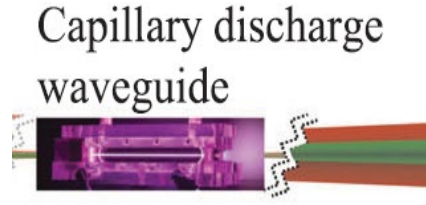


- Des avancées importantes ont été obtenues depuis 5 ans

Module accélérateur 10GeV

LBNL, guidage, contrôle plasmas longs

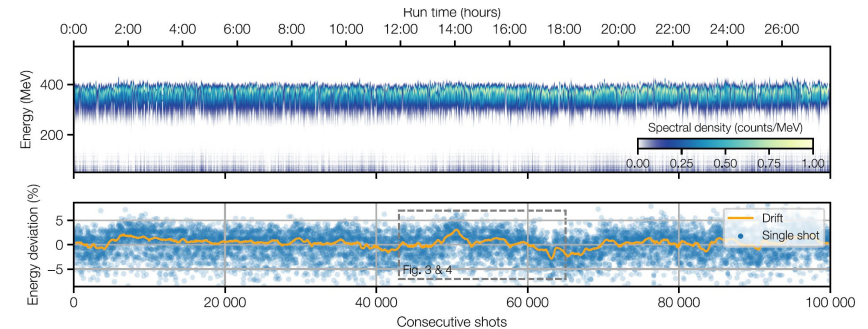
PRL 122, 084801 (2019)



Fonctionnement en cadence pendant 24h, reproductible

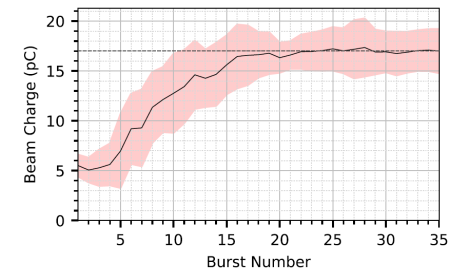
DESY, LUX Laser plasma accelerator:

PRX 10, 031039 (2020)

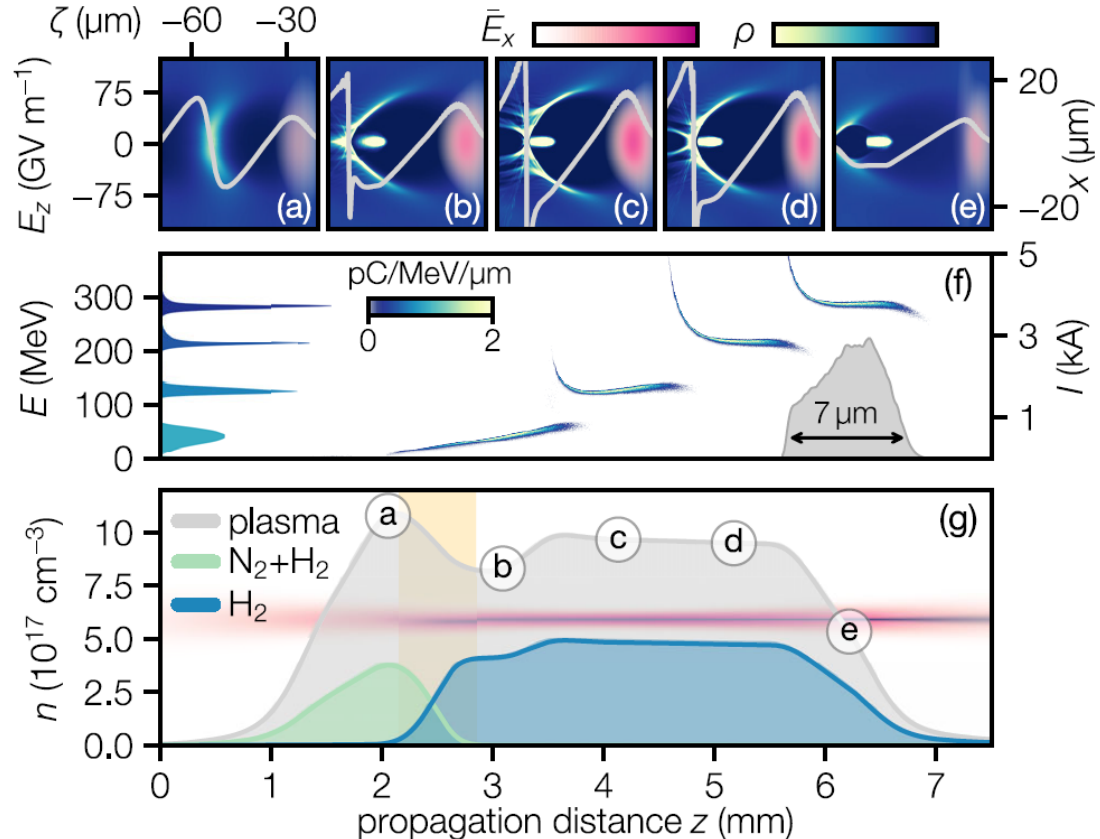
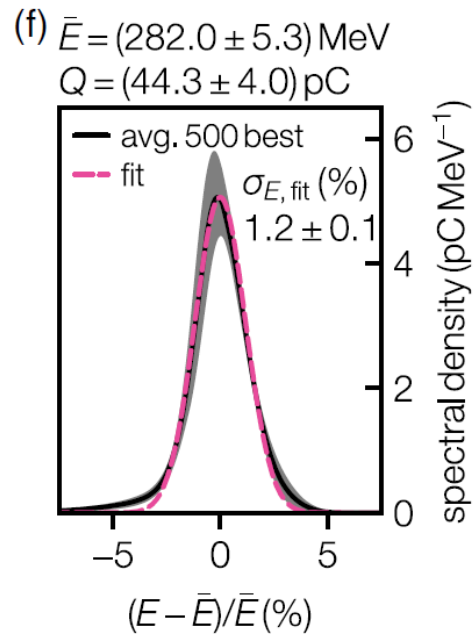


Automatisation de l'optimisation par Intelligence Artificielle

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



- L'optimisation du faisceau d'électrons par IA pour un jeu de paramètres a été démontrée en simulations et expérimentalement
- Un excellent accord est obtenu entre l'expérience et la simulation



PRL 126, 174801 (2021)

- **Les groupes français couvrent un large éventail de compétences et sont actifs sur de nombreux aspects clés des accélérateurs plasma**
 - Développement de codes de simulation adaptés à l'ALP (**SMILEI, WARP, CALDER**)
 - Simulations de composants (injecteurs, étages plasma, transport et mise en forme des faisceaux)
 - Simulation de systèmes (multi-étages)
 - Etudes expérimentales de sources d'électrons par ALP avec des paramètres et des objectifs multiples sur les installations laser françaises et européennes
 - Mise aux point de plasmas pour les accélérateurs
 - Développement et caractérisation de lasers spécifiques (académiques et industriels)
- **Implication dans de nombreux consortia**
 - Projets: EARLI, LAPLACE, PALLAS, COXINEL, EuPRAXIA, AWAKE
 - Groupes d'étude: ALEGRO, ESPP plasma
 - Installations fr: APOLLON, UHI100
 - + de nombreuses installations Européennes
 - permettant de réaliser des études (ELI, GEMINI, LLC, DRACO,

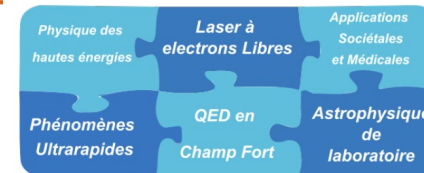
EuPRAXIA A New European High-Tech Research Facility
Delivering Frontier Science

1 Building a facility with very high field plasma accelerators, driven by lasers or beams
1 – 100 GV/m accelerating field
Shrink down the facility size

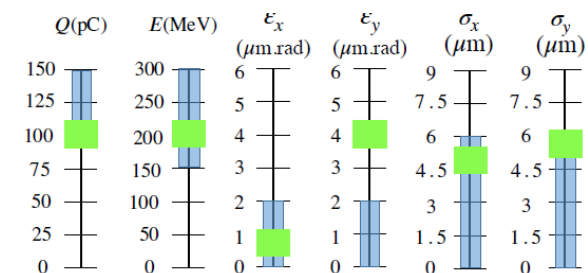
2 Producing particle and photon pulses to support several urgent and timely science cases
Enable frontier science in new regions and parameter regimes

Experimental techniques and topology of samples
Coherent imaging
X-ray absorption spectroscopy
Raman spectroscopy
Photo-fragmentation of molecules

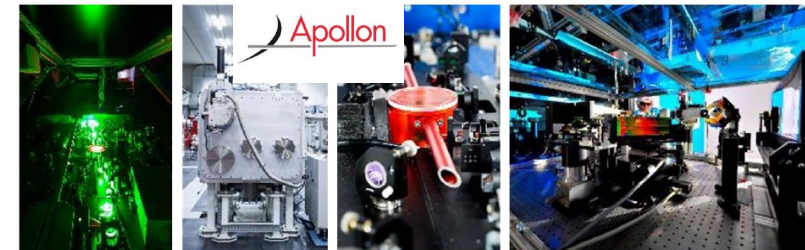
GDR APPEL - EuPRAXIA-PP - 23.01.23



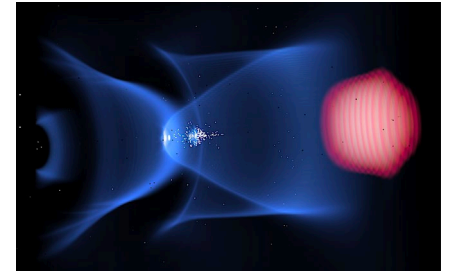
- **Développer des accélérateurs pour des applications spécifiques:**
 - Des installations dédiées pour progresser sur la répétabilité et la fiabilité
 - Démonstrations d'applications (lignes fournissant des faisceaux d'électrons)
- **Trouver des ressources pour participer au programme de travail international autour des collisionneurs plasma (mission IN2P3)**
 - Conception d'un modèle préliminaire de collisionneur
 - Conception des éléments constitutifs:
 - Injecteurs (electrons et positrons, polarisation de spin,...)
 - Etages accélérateurs
 - Transport de faisceaux et focalisation finale
 - Sources de puissance (laser et faisceaux)
 - Etudes expérimentales des concepts accélérateurs dans les plasmas pompés par faisceaux laser/electron/proton
 - Concepts pour relever des défis de R&D : haute cadence (plasma, laser, couplage entre étages)



- **Trouver un cadre et des moyens adéquats pour les développements accélérateurs**
 - Le **calendrier et l'envergure des projets** sont très dépendants de moyens qui ne sont pas bien maîtrisés au niveau des projets. Quels investissements des tutelles, financier et RH, dans les projets accélérateurs plasma?
 - **Le fonctionnement des installations laser existantes n'est pas adapté** aux besoins pour le développement d'accélérateurs
 - critères et mode d'accès,
 - organisation en projets indépendants, manque de ressources.
 - Proposer des projets pluriannuels ?(Apollon).



- **Stabilité et qualité des faisceaux laser**
 - Reproductibilité et fonctionnement 24/24, sur des longues durées
 - Montée en cadence
- **Stabilité et qualité des plasmas,**
 - Reproductibilité et fonctionnement 24/24, sur des longues durées
 - Montée en cadence
- **Maîtrise et qualité des sources d'électrons plasma (charge, emittance et finesse spectrale)**
 - Choix des mécanismes physiques et des paramètres de fonctionnement
 - Faisabilité expérimentale
- **Couplage et transport des faisceaux entre étages (montée en énergie et maîtrise de la qualité des faisceaux d'électrons)**
 - Identifier des solutions compactes qui permettent de préserver un fort gradient moyen



- **Faire connaître la thématique**
- **Initier des discussions et des actions conjointes rassemblant différentes expertises pour lever des verrous**
- **Faire croître les compétences et les ressources autour de projets existants ou nouveaux**
- **Contribuer à la formation de nouvelles générations de physiciens des accélérateurs**



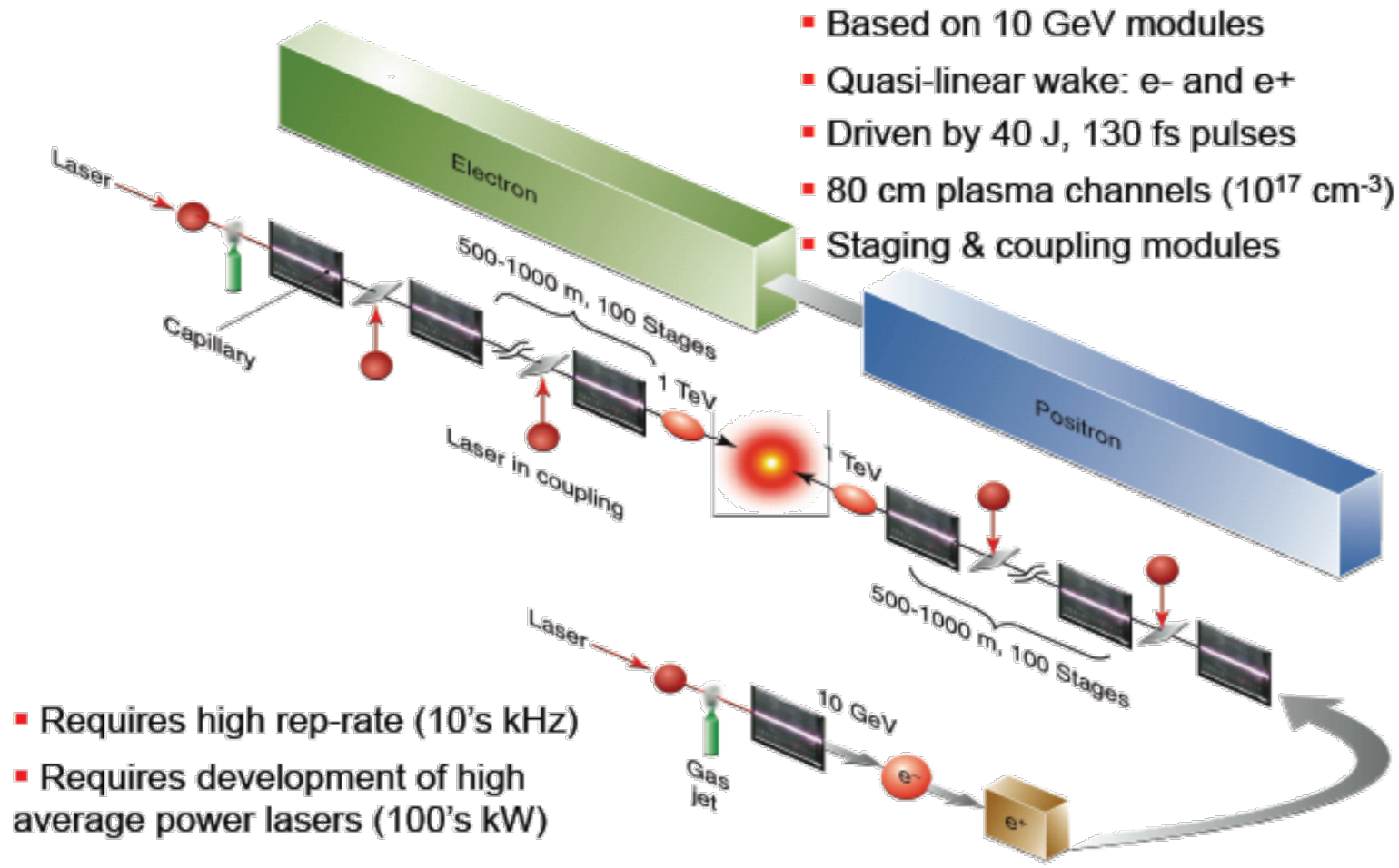
- **Questions/suggestions pour le GDR pour lancer le travail en commun**
 - **Echange d'informations** (séminaires, tutoriel sur des sujets de l'axe ouverts à l'ensemble du GdR)
 - **Visite d'installations**
 - Initier des actions communes: IA pour accélérateurs, simulations, développement durable
- **Pour les ions**
 - **Diagnostics, nouvelles cibles, transport de faisceaux** : outils et techniques en commun ?
- **Pour les électrons**
 - **Diagnostics**: les diagnostics électrons existants, développés pour les accélérateurs conventionnels, sont-ils suffisants? Faut-il développer des dispositifs spécifiques?
 - **Conception d'accélérateurs** (principe de conception d'une machine complexe, systèmes de contrôle et de stabilisation,...): comment mettre à profit l'expertise existante pour les accélérateurs plasma?

Compléments pour discussion

B. Cros et E. d'Humières



Schéma de collisionneur laser plasma proposé en 2009



- Based on 10 GeV modules
- Quasi-linear wake: e- and e+
- Driven by 40 J, 130 fs pulses
- 80 cm plasma channels (10^{17} cm^{-3})
- Staging & coupling modules

- Requires high rep-rate (10's kHz)
- Requires development of high average power lasers (100's kW)

Leemans & Esarey, Physics Today, March 2009