
Contribution aux exercices de prospective nationale 2020-2030

Accélérateurs et instrumentation associée

PROTOTYPE ACCELERATEUR LASER-PLASMA

Auteurs principaux

Nom : Cassou Kevin pour l'équipe Accélérateurs Laser et Applications (FLUO) et GALOP du LLR

Affiliation : FLUO, CNRS/IN2P3, Université Paris Saclay

Email et coordonnées : cassou@lal.in2p3.fr

Co-auteurs et partenaires

LLR, LOA, Amplitudes, LPGP

Contribution à rédiger en français ou en anglais et à envoyer à PROSP2020-GT07-COPIL-L@IN2P3.FR avant le **1^{er} novembre 2019**

1. Informations générales

Titre : Prototyping accelerator Laser-plasma test facility

Acronyme : PALAS (*prototype Accelerator Laser-Plasma*)

Summary: *Laser-plasma acceleration is one of the promising paths for designing future particle accelerators. Numerous spectacular demonstrations in terms of high accelerating gradients and compactness have been made over the last twenty years. However, the transition to an accelerator designed as a machine requires the removal of many technological bottlenecks. In this sense, the European program EUPRAXIA aims at prototyping a 5 GeV laser-plasma accelerator to inject a free electron laser (FEL) by 2026. We propose here a project for the realization of a laser-plasma accelerator test facility to prototype a compact electron accelerator generating an electron beams with a low energy spread (<5%), 1GeV peak energy, 30pC charge, 1.mm.mrad normalized emittance at a moderate repetition rate. The aim is to obtain control and stability properties comparable to conventional accelerators. The PALAS accelerator test facility will be devoted to advanced technological development of plasma targetry, laser control, beam transport and compact beam diagnostics.*

Préciser le domaine de recherche (plusieurs choix possibles)

- *Physique des accélérateurs (nouveaux concepts machines, optique et dynamique des faisceaux...)*
- *Sources de particules (électrons, positrons, muons, protons, ions lourds stables, ions radioactifs...) et cibles associées*
- *Accélération plasma (électrons, ions...) et interaction lasers/faisceaux*
- *Diagnostics faisceau, instrumentation et contrôle intelligent*

Préciser la motivation principale visée par la contribution :

- *Accélérateurs pour la physique des particules*
- *Accélérateurs pour les sources de lumière ou de neutrons*
- *Accélérateurs pour les applications sociétales (santé, énergie, industrie...)*

2. Description des objectifs scientifiques et techniques

L'accélération laser-plasma est une des techniques d'accélération à fort gradient les plus prometteuses malgré des limitations comme la charge des faisceaux produits, la cadence de fonctionnement et le rendement énergétique. L'application aux accélérateurs pour la physique des hautes énergies reste un objectif à très long terme. Les conceptions préliminaires d'accélérateurs laser-plasma de très haute énergie [1,2] reposant sur les connaissances actuelles et l'hypothèse d'un développement réussi des lasers de haute intensité (>50 TW) à très haute cadence (>10 kHz) donnent des luminosités inférieures de 4-5 ordres de grandeurs au schéma conventionnel pour des collisionneurs e^+/e^- [3] ou e^-/p tel que LHeC [4]. Un certain nombre de verrous technologiques restent à lever dont les innovations résultantes pourraient permettre de réduire les coûts des futurs accélérateurs pour les sources de lumières et sources d'électrons compactes en considérant des conceptions hybrides combinant les technologies RF et plasma. Nous proposons ici la création d'une plate-forme de recherche et développement d'accélérateur laser-plasma conçue comme une « accelerator test facility ». Cette facilité accélérateur, PALAS, permettra d'opérer la transition de l'expérience de démonstration à la réalisation d'un accélérateur laser-plasma (ALP) prototype avec l'innovation technologique nécessaire. Le projet s'articule autour des axes stratégiques de recherche et développement suivants :

- Contrôle du pilote laser
- Développement de cible plasma ou « section accélératrice plasma »
- Manipulation et contrôle du faisceau d'électrons

Ces développements ne sont pas possibles sans le support d'un code de simulations (PIC) ouvert et performant comme SMILEI et doivent s'accompagner d'un programme d'amélioration de ces codes pour l'optimisation des structures plasmas [5]. Par ailleurs, les enjeux de la prochaine décennie pour les ALP est le développement de lasers pilotes fonctionnant à des taux de répétitions d'au moins 1kHz, avec une énergie d'au moins 1 Joule en une durée de quelques dizaines de femtosecondes. Les lasers CPA à saphir dopé au Titane (TiSa) restent les candidats les plus prometteurs car, compte tenu de l'état de l'art actuel dans le domaine des très hautes intensités, ils font porter l'essentiel de l'effort de recherche et développement sur la gestion de la thermique et la conception de lasers de pompe à forte efficacité énergétique fonctionnant à cadences élevées (kHz). Ces avancées doivent être supporté par les industriels laser. Indépendamment de ces développements et sur la base de la technologie Ti :Sa éprouvée, un contrôle du laser optimisé pour piloter un ALP peut être développé à des taux de répétition intermédiaires (10Hz) assurant l'accumulation de données suffisantes et la mise en place de boucles de rétroaction. Une approche machine est ici nécessaire avec un contrôle commande à l'état de l'art associé à des diagnostics innovants et l'implémentation de techniques de *machine learning* ou d'intelligence artificiel [6]. Nous proposons de renforcer le partenariat industriel existant avec la société Amplitude et la création d'un laboratoire commun sur les aspects de contrôles avancés pour l'ALP. Sur la base de ces trois piliers, les objectifs scientifiques et techniques sont les décrits ci-dessous.

- **Laser et accélérateur** : maximisation de la disponibilité du laser par une automatisation de la chaîne et le développement de boucle de rétroaction permettant à l'ALP d'atteindre des performances de stabilité comparables aux accélérateurs conventionnels à température ambiante. Le développement de

diagnostics laser permettant le contrôle avancé des propriétés spatiales et temporelles des impulsions laser. Optimisation du couplage et de la réjection du laser pilote à la section plasma.

- **Cibles plasma** : la maîtrise de la distribution de densité électronique est un axe essentiel pour améliorer la qualité des faisceaux produits par les ALPs. Le contrôle de l'injection des électrons du plasma [7] et de l'émittance du faisceau d'électrons accélérés [8] dépend de la maîtrise des modulations du profil longitudinal (de densité du plasma ?). D'un autre côté, l'extension de longueur efficace d'accélération pour accéder à des énergies > 1 GeV [9] repose sur le contrôle dynamique du profil transverse de la densité électronique du plasma pour le guidage du laser pilote sur des longueurs supérieures à quelques cm. Un concept original intégrant la cellule accélératrice plasma comme un élément de la ligne faisceau, et non comme une cible placée dans une enceinte d'interaction, sera développé grâce notamment aux nouvelles techniques de fabrication additives métalliques maîtrisées au FLUO.
- **Transport et diagnostics de faisceau d'électrons** : La capture du faisceau d'électrons en sortie de section accélératrice laser plasma, est fortement conditionnée par sa divergence. Nous étudierons de nouveaux schémas, basés sur l'adaptation et le contrôle du profil de densité longitudinal du plasma via la géométrie de la cible, afin de contrôler la divergence du faisceau [10] et l'espace de phase [11].

Les objectifs scientifiques et techniques du projet revêtent trois aspects principaux, qui se décomposent en 3 phases :

1. Développement et opération d'un injecteur laser-plasma stable et contrôlé de 150-200 MeV, 30pC, dispersion énergie $< 5\%$ et émittance de 1 mm.mrad à 10Hz.
2. Étude du transport, de la manipulation et guidage dans le sillage laser du faisceau d'électrons sur des longueurs de plasma de plusieurs centimètres
3. Développement et opération d'un accélérateur laser-plasma comprenant 2 étages et délivrant un faisceau de >1 GeV, 10-30pC, dispersion énergie $< 5\%$ et émittance de 1mm.mrad à 1Hz.

La France, et particulièrement la région Ile de France a longtemps été pionnière dans le domaine de l'accélération laser-plasma avec d'une part la réalisation de nombreuses expériences de démonstration par les équipes du Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA) et d'autre part les industriels Amplitudes et Thalès qui réalisent la plupart des lasers ultra-intenses utilisés pour ces études dans plusieurs laboratoires de recherche dans le monde. Ce projet ne peut se faire sans une contribution ouverte à toute la communauté concernée. Il sera donc mené en collaboration avec les laboratoires LLR, CEA, LPGP et LOA. Le projet PALAS est notamment complémentaire du projet LAPLACE porté par le LOA, Soleil et l'institut Curie en partenariat avec Thales. LAPLACE est principalement axé sur l'amélioration du courant moyen des accélérateurs laser-plasma avec le développement de sources d'électrons ultra courtes et de rayonnement à haute cadence ; il ambitionne également la démonstration d'un laser à électron libre injecté par un faisceau d'électrons produit par un ALP.

Le projet PALAS s'inscrit dans le cadre du projet européen EuPRAXIA [12] et pourra participer à l'effort collaboratif Européen pour le développement de la technologie laser-plasma pour les futurs accélérateurs d'électrons en tant que centre d'excellence pour le prototypage d'un injecteur laser plasma et du couplage de deux sections accélératrices plasmas.

3. Développements associés, calendrier et budget indicatifs

Le projet PALAS repose actuellement sur l'installation laser EXALT du laboratoire FLUO. L'installation de recherche EXALT se compose du laser pilote Ti:Sa CPA 40 TW fonctionnant à 10Hz de la plateforme LASERIX combiné à un photo-injecteur installé dans une zone radio-protégée de 67m². La première phase du projet prévoit le déploiement de l'injecteur laser-plasma à 150-200 MeV dans la zone radio-protégée actuelle. Elle est complétée par des campagnes expérimentales sur CILEX-LFA/APPOLON afin d'explorer des régimes à plus forte densité spectrale de charge et test de guidage à haute énergie. Dans un deuxième temps le projet PALAS prévoit le déploiement d'un deuxième étage plasma pour accélérer les électrons jusqu'à une énergie supérieure à 1GeV. Cet étape intègre un upgrade du laser pilote pour produire un faisceau laser supplémentaire de 350 TW à 1 Hz. La machine prototype PALAS serait alors déployée dans une salle radio-protégée rénovée de 250m² du laboratoire FLUO.

Calendrier et budget

Phase 1 (2020-2023) : développement injecteur laser-plasma (LPI) 150-200 MeV. – coût opération 150 k€/an. Pour la phase 1, le budget infrastructure est de 150k€, 850k€ matériel et 450k€ CCD. Le coût total du projet en phase 1 est de 3570 k€, dont 1920 k€ (in-kind)

2020 – développement cible plasma / rénovation zone radio protégée / installation compresseur laser, mise en forme laser et ligne faisceau.

2021 – premier faisceau e- / développement contrôle avancée et optimisation stabilité.

2022 – optimisation du LPI à 10Hz / manipulation faisceau et optimisation réjection laser pilote – test guidage et étude conceptuelle PALAS @ 1GeV

2023 – optimisation LPI et ligne de transfert pour couplage à un deuxième étage plasma – étude technique PALAS @ 1GeV

2024 – réception bâtiment rénové et déplacement EXALT, LPI et ligne de transfert

Phase 2 (2023-2027) : développement accélérateur multi-étage >1GeV – coût opération 250 k€/an. Pour la phase 2, le budget infrastructure (CPER) est de 2.72 M€ avec engagement des travaux en 2022. Le budget équipement pour la phase 2 est de 6 M€ dont 3M€ (in-kind)

2025 – commissioning PALAS @ 200 MeV et installation deuxième étage

2026-2027 – optimisation injection 2^e étage et démonstration accélération stable.

4. Impact

Une ouverture et transition vers les technologies laser et plasma pour le développement d'accélérateur compact à fort gradient s'opèrent depuis quelques années dans les plus grands laboratoires accélérateurs, CERN, DESY, INFN etc. La mise en place d'une plate-forme ouverte de R&D accélérateur laser-plasma dans l'environnement spécifique du campus Paris-Saclay et du bassin environnant de haute technologie photonique permettra de renforcer l'innovation au niveau national et de maintenir la compétitivité à l'international. La France ne pourra avoir un impact significatif et efficace sans la création d'un projet accélérateur fédérateur avec fonctionnement ouvert à toute la communauté et s'inscrivant dans une dynamique Européenne soutenue par les plus grands laboratoires accélérateur tel qu'EuPRAXIA.

Le développement d'un accélérateur laser-plasma délivrant un faisceau d'électron d'énergie > 1 GeV, >30pC, <5%, 1 mm.mrad avec une stabilité comparable aux accélérateurs RF à fort gradient constituera un achèvement majeur pour la communauté

Références

- [1] Advanced LinEar collider study GROUp (ALEGRO) - P. Muggli and B. Cros, ALEGRO Workshop, CERN courier 2017, ICFA Advanced and Novel Accelerators (ANA) - <https://arxiv.org/pdf/1901.10370.pdf> (2019)
- [2] G. Xia et al. *Nucl. Instrum. Meth. A* 740 (2014), pp. 173–179. doi: 10.1016/j.nima.2013.11.006.
- [3] V. Lebedev, A. Burov, and S. Nagaitsev, in Reviews of Accelerator science and technology, World Scientific, vol. 9, (2016); arXiv:1608.02498 (2016), F. Zimmerman, IPAC2017, Possible limits of plasma linear colliders, TUPAB110 (2017)
- [4] W. Leemans, White Paper of the ICFA-ICUIL Joint Task Force—High Power Laser Technology for Accelerators, http://icfa-bd.kek.jp/WhitePaper_final.pdf
- [5] Smilei team contributions aux prospectives GT calcul et simulation
- [6] [A. Gonoskov, et al., *Sci Rep*, vol. 9, no. 1, p. 7043, Dec. (2019) ; A. Edelen et al., “Opportunities in Machine Learning for Particle Accelerators,” *arXiv:1811.03172 [physics]*, Nov. 2018.
- [7] J. Faure, “Plasma Injection Schemes for Laser–Plasma Accelerators,” *CERN Yellow Reports*, p. 143 Pages, Feb. 2016.
- [8] S. K. Barber et al, *Phys. Rev. Lett.* 119, 104801 (2017)
- [9] R. J. Shalloo et al, *arXiv:1902.05596 [physics]*, Feb. 2019.
- [10] I. Dornmair, et al. *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 18 (2015) 041302.
- [11] R. Brinkmann et al *Phys. Rev. Lett.* 118 (2017).
- [12] Conceptual Design Report, EuPRAXIA (2019)