

Proposition d'un projet national accélérateur laser-plasma

Table des matières

Introduction	2
Synthèse des projets en cours sur l'ALP en France	3
1. PALLAS	3
a) Objectifs et enjeux.....	3
b) Budget (2021–2025).....	3
2. LAPLACE	4
a) Objectifs et enjeux	4
b) Budget prévisionnel (2022–2027).....	4
3. Projets en cours au LPGP	5
a) Objectifs et enjeux	5
b) Budget.....	5
4. Projets en cours au CELIA	6
a) Production de rayonnement X pour la science X-ultrarapide	6
b) Développement d'une source Compton accordable à spectre étroit dans la gamme 50 - 500 keV	6
c) Étude pour des expériences de Strong Field Quantum ElectroDynamics (SF-QED)	6
5. Virtual LAPLACE	6
6. Enseignement et formations	7
Proposition d'un projet national d'accélérateur laser-plasma	8
1. Préambule	8
2. Ambition	8
3. Phase 1 : fiabilisation et applications	9
a) Ligne fiabilisation et diffusion Compton.....	9
b) Ligne radiobiologie	11
c) Ligne développement des applications industrielles et source de positrons.....	12
4. Phase 2 : Accélération multi-étages laser	13
a) Objectifs de la phase 2	13
b) Préparation de la seconde phase pendant la phase 1.....	14
c) Démonstration d'un accélérateur laser-plasma linéaire à 10 GeV.....	15
6. Impact environnemental et développement durable	15
7. Planning et ressources	16
8. Retour des laboratoires sur la proposition de projet	17
9. Conclusions	18
EuPRAXIA	19
1. EuPRAXIA Phase 1 (2025-2030)	19
2. EUPRAXIA Phase 2 et projet fédérateur ALP national	19
Références	20

Introduction

Le **GDR SCIPAC** a été sollicité en janvier 2025 par les instituts *Physique* et *Nucléaires et Particules* conjointement, qui ont exprimé les demandes suivantes :

- la **présentation d'un état des lieux des projets français actuels en Accélérateurs Laser Plasma (ALP)**, en précisant les objectifs scientifiques associés ainsi que les ressources humaines mobilisées ;

- l'**identification d'un projet fédérateur**, en définissant les objectifs scientifiques, en dressant un calendrier possible, et en évaluant les besoins humains et financiers nécessaires ;

- une **actualisation du positionnement souhaité** au sein du projet européen **EuPRAXIA**, en regard des nouvelles priorités issues de ce travail de prospective.

Suite à cette sollicitation, un groupe de travail a été formé pour mener cette réflexion. Le groupe est constitué de la directrice du GDR, des trois responsables de l'axe 4 du GDR (Accélération laser-plasma et nouveaux concepts), auxquels s'est joint un membre de chaque laboratoire CNRS travaillant sur l'accélération laser-plasma qui n'était pas encore représenté. Les laboratoires formant ce groupe sont : le CELIA, l'IJCLab, le LLR, le LOA, le LPGP, le LPSC et le LULI. Le groupe de travail s'est réuni à plusieurs reprises pour discuter de ce projet, faisant un point avec l'ensemble des chercheurs impliqués sur cette thématique dans les laboratoires entre chaque réunion. Nous avons ensuite fait un point d'étape devant l'ensemble de la communauté lors de l'atelier [GDR SCIPAC – Accélérateurs RF et plasmas : complémentarité et synergies](#), organisé du 12 au 14 mai 2025. Le **projet a reçu un accueil très positif**, et les retours de la communauté nous ont permis de le faire mûrir. Nous présentons ici le projet issu de ces discussions, qui a été circulé dans tous les laboratoires impliqués.

Rédacteurs : M. Baylac (LPSC), K. Cassou (IJCLab), E. d'Humières (CELIA), F. Massimo (LPGP), A. Specka (LLR), C. Thauray (LOA).

Octobre 2025

Synthèse des projets en cours sur l'ALP en France

1. PALLAS

Le projet de *Prototypage d'un Accélérateur Laser-Plasma ou ALP (PALLAS)* de production de faisceaux d'électrons ultra-courts de haute qualité rassemble le CNRS/IN2P3 et l'Université Paris Saclay, et est basé au laboratoire de Physique des deux infinis Irène Joliot Curie à Orsay. Il est l'une des expériences permanentes du laser haute intensité LASERIX 40TW, 1.5J, 38 fs, 10 Hz de l'Université Paris Saclay. Le projet implique les laboratoires IJClab, LLR et LP2IB. Le projet PALLAS repose sur plusieurs équipes et services du laboratoire IJClab comptabilisant jusqu'à environ **9 ETP/an** et environ **1 ETP/an** pour les autres laboratoires de l'IN2P3.

a) Objectifs et enjeux

PALLAS (*Prototypage d'un Accélérateur Laser-plasma Avancé pour Sources secondaires*) vise à démontrer la faisabilité d'un accélérateur compact laser-plasma, capable de produire des faisceaux d'électrons ultra-courts (150–200 MeV, quelques dizaines de pC à 10 Hz) de qualité, stabilité et contrôle comparables aux accélérateurs RF conventionnels. Il s'inscrit dans une dynamique de rupture technologique pour miniaturiser les accélérateurs tout en conservant des performances élevées, et vise le développement de briques technologiques pour des injecteurs laser-plasma, des accélérateurs laser-plasma multi-étages ou des sources d'électrons laser-plasma. Ces sources ouvrent des perspectives pour des applications comme l'imagerie ultrarapide, la radiobiologie ou les tests de composants. Le projet repose sur trois axes R&D ciblant les verrous technologiques majeurs :

- **Contrôle avancé du pilote laser pour garantir un faisceau laser reproductible et optimisé à 10 Hz** : stabilité de pointé laser, caractérisation laser spatiale avancée du laser au point d'interaction, fiabilisation et automatisation contrôle commande laser par apprentissage par renforcement [1]
- **Développement des cibles plasma** pour créer un profile de densité plasma stable et ajustable adaptées à la production de faisceaux d'électron de haute qualité à hautes cadences (cibles à chambres multiples, à canaux) [2,3]
- **Transport, diagnostic et optimisation du faisceau**, études du transport compact et manipulation des faisceaux pour la caractérisation avancée [4]. Développement de diagnostics, collection de données, automatisation pour optimisation bayésienne multi-objectif. Développement d'outil de modélisation de transport d'interaction des faisceaux (Geant4) [5]

En combinant ses trois axes, PALLAS vise une démonstration intégrée d'un accélérateur laser-plasma produisant un faisceau stable et de haute qualité, à des énergies et charges limitées par le laser pilote. Les premiers faisceaux d'électrons de 160 MeV, 20 pC, dE < 7%, et divergence < 1 mrad à 1 Hz ont été produits mi-2025, validant les paramètres de mise en route de la première phase du projet en réalisant une première en intégrant directement dans la ligne de faisceau une cible de type double cellule de gaz. Les personnels du projet sont très impliqués dans la formation des futur.e.s ingénieur.e.s, chercheur.e.s dans le domaine des accélérateurs, dont les ALP avec notamment le *Master Erasmus Mundus Joint Master LASCALA – Large Scale Accelerators and Lasers*, coordonné par l'Université Paris-Saclay renouvelé par la Commission européenne pour la période 2026-2030 avec un budget de 4,63 M€.

b) Budget (2021–2025)

Depuis 2021, PALLAS a bénéficié d'un **budget total de 3 M€** dont les sources sont :

- ANR via EQUIPEX+ PACIFICS : 1,3 M€
- CPER et ERM (université Paris Saclay) : 820 k€
- Projets européens (EuPRAXIA-PP et PACRI) : 460 k€
- IN2P3 : 380 k€.

L'injecteur laser-plasma PALLAS sert au développement des futures briques technologiques pour les prochains accélérateurs laser plasma vers de plus hautes cadences et une meilleure qualité de faisceau et notamment pour la phase de conception technique du site laser d'EuPRAXIA. L'exploitation de l'accélérateur PALLAS est prévue jusqu'en 2028.

2. LAPLACE

LAPLACE est un centre de recherche totalement dédié à l'accélération de particules par interaction laser-plasma. Il associe recherche et innovation pour le développement d'accélérateurs de nouvelle génération et la mise à disposition de sources intenses et ultra-brèves de faisceaux d'électrons énergétiques ou de rayons X pour des applications académiques et industrielles. Le projet est structuré autour des équipes (**20 ETP impliqués**) et des infrastructures du Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA). Il est hébergé sur le campus de l'École Polytechnique (centre de recherche de l'ENSTA-Yvette).

a) Objectifs et enjeux

LAPLACE vise à :

- **Approfondir la physique des sources laser-plasma** : nouvelles méthodes d'injection, d'accélération ou de guidage, accélération hybride laser/faisceau, étude de la physique du cycle optique, etc.
- **Développer des applications scientifiques et sociétales** : étude de l'électrodynamique (QED) en champ forts, radiobiologie, contrôle non destructif, imagerie ultra-rapide
- **Concevoir des prototypes industriels** : lasers à haute cadence, diagnostics avancés, boucles de rétroaction sources-plasma-laser, fiabilisation.

Le projet s'appuie sur l'expertise technique et scientifique du LOA et sur des partenariats forts avec l'Institut Curie et THALES [6]. Il repose sur deux plateformes expérimentales

1. **LAPLACE-HE (Haute Énergie)** : dédiée au développement de faisceaux d'électrons dans la gamme GeV, avec 5 lignes indépendantes, dont une dédiée à la radiobiologie à haute dose. Cette plateforme s'appuie sur l'installation existante de la Salle Jaune du LOA, qui bénéficiera d'un doublement à la fois de sa surface expérimentale et de l'énergie délivrée par impulsion laser, pour atteindre 6 J, 30 fs à 1 Hz.
2. **LAPLACE-HC (Haute Cadence)** : destinée à la génération de faisceaux à 100 Hz, avec un laser THALES de 1 J, 25 fs, avec pour objectif principal de faire des accélérateurs laser-plasma des sources compétitives et industrialisables. Cette installation est développée en partenariat avec la société THALES dans le cadre du laboratoire commun HERACLES. Une première étape a été franchie en 2025 avec l'installation au LOA d'un laser de 100 Hz, 200 mJ, 25 fs,

b) Budget prévisionnel (2022–2027)

Le projet repose sur un **budget total de 10,8 M€ hors contributions en nature**, principalement alloué aux infrastructures, à l'acquisition de lasers et au transport des faisceaux. La répartition budgétaire entre les deux plateformes est la suivante :

- **LAPLACE-HC** : 6,3 M€, financés par le CPER, le Labcom Thales-LOA, l'Institut Pierre Lamoure et le Plan de Relance.
- **LAPLACE-HE** : 4,5 M€, entièrement financés par le CPER.

Les premières expériences sont prévues à l'horizon 2025 pour LAPLACE-HC et 2028 pour LAPLACE-HE.

3. Projets en cours au LPGP

Au Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas (LPGP, *CNRS Ingénierie, Université Paris Saclay*), les travaux de l'équipe ITFIP sont consacrés à la conception et démonstration d'un schéma d'accélération d'électrons multi-étages. Les activités reposent sur les travaux de 2 permanents et 3 doctorants (**4 ETP pour 2025** renforcées par des doctorants et collaborateurs internationaux, notamment HZDR, LIDYL).

a) Objectifs et enjeux

Les objectifs incluent la production d'un faisceau stable et de haute qualité à haute énergie (>100 pC, $E > 10$ GeV, $\Delta E/E < 1\%$, divergence < 1 mrad). Les efforts portent actuellement sur la démonstration d'une source d'électrons adaptée à un tel schéma, la stabilisation à l'aide de méthodes de « machine learning » ou d'intelligence artificielle (ML/IA) des paramètres du faisceau, la modélisation de la formation de la distribution de gaz et de l'interaction laser-plasma, ainsi que la caractérisation de la source avec des diagnostics non destructifs.

Les avancées réalisées à ce jour incluent :

- Le développement d'une cellule plasma opérationnelle (DOCELL) pour l'injection d'électrons par ionisation contrôlée par le profil de densité électronique [7,8];
- Le développement de diagnostics et outils d'analyse adaptés au plasma et au laser (interférométrie, ombroscopie, GSA-MD [9]).

Les résultats expérimentaux obtenus en 2024 sur l'installation DRACO du HZDR correspondent à l'état de l'art international en termes de qualité de faisceau [8]: $E \sim 200$ MeV, avec 40 pC dans le pic et une divergence < 1 mrad. Des simulations détaillées (COMSOL Multiphysics, OpenFOAM, FBPIC, Smilei) ont apporté une bonne compréhension des mécanismes physiques pour reproduire finement les résultats expérimentaux.

Les prochaines étapes expérimentales portent sur :

- L'amélioration de la source pour augmenter la charge accélérée et la stabilité (nouvelle cellule, optimisation automatique),
- Le développement d'un diagnostic temporel pour les faisceaux d'électrons (modélisation et expérience),
- L'implantation de la source sur UHI100 à l'Orme des Merisiers de Saclay.

L'étude d'un système couplant une source laser plasma à un étage accélérateur laser plasma est en cours d'étude. Le couplage au second étage est envisagé à travers le développement de diagnostics d'électrons et dans le cadre du projet PACRI. La modélisation d'un étage accélérateur permettant d'accélérer des faisceaux à des énergies de l'ordre de la dizaine de GeV est en cours de démarrage avec l'étude d'un schéma de guidage laser original. Une collaboration avec le LBNL a démarré dans le cadre du groupe de travail autour du collisionneur 10 TeV [10,11], destinée à s'intensifier dans les années qui viennent.

b) Budget

Le budget de l'équipe est structuré autour des manipulations laser, des calculs numériques (au moins 1 Mh-cpu/an via le projet GENCI Virtual LAPLACE), d'un financement postdoctoral CNRS et d'un financement d'équipement ponctuel par la « Graduate School » de Physique de l'Université Paris Saclay. L'équipe est fortement impliquée dans des collaborations et réseaux au niveau national et international, notamment dans le développement du code Smilei [11,12], les projets EuPRAXIA et PACRI, le consortium ALEGRO et l'initiative internationale de conception d'un collisionneur plasma [10].

4. Projets en cours au CELIA

Les activités sur le *Laser Wake Field Acceleration* (LWFA) au CELIA portent essentiellement sur la production et les applications du rayonnement X/Gamma émis par des électrons relativistes issus de l'accélération laser plasma (**1.5 ETP, projet ANR Compton financé en 2025**).

a) Production de rayonnement X pour la science X-ultrarapide

L'installation Eclipse 4 du CELIA délivre des impulsions laser de 50 TW. L'objectif de ce premier axe est de développer une source de rayonnement X Betatron pour des applications d'absorption X femtoseconde. Il s'agira dans un premier temps de produire des faisceaux d'électrons stables dans la gamme de 100 MeV par accélération laser-plasma puis de produire du rayonnement Betatron à quelques keV. Ce schéma utilise 2 sections de plasma (2 jets de gaz) indépendantes pour optimiser indépendamment l'accélération d'électrons et la production de rayonnement X.

b) Développement d'une source Compton accordable à spectre étroit dans la gamme 50 - 500 keV

En collaboration avec le LOA, le CELIA développe un schéma de source Compton qui permettra de produire des impulsions X à spectre étroit et accordable. Ce schéma consiste à produire des faisceaux d'électrons quasi-monocinétiques puis à réduire leur divergence en utilisant une lentille plasma. La collision Compton entre ce faisceau et une impulsion laser permettra de produire des faisceaux de rayonnement X d'énergie accordable et à spectre étroit (environ 10% de l'énergie).

c) Étude pour des expériences de Strong Field Quantum ElectroDynamics (SF-QED)

Dans le cadre d'une collaboration LOA / LULI / ELI-NP, le CELIA développe un schéma de diffusion Compton qui pourrait permettre d'atteindre le régime de SF-QED. Il s'agit d'un schéma où le laser utilisé pour l'accélération laser-plasma est réfléchi vers les électrons relativistes par un miroir plasma. Un rayonnement Gamma est produit lors de cette collision. Le nouveau schéma proposé consiste à mettre en forme le plasma à la sortie de l'ALP pour auto-focaliser l'impulsion laser sur le miroir plasma. Les simulations montrent que cette méthode permettrait d'augmenter significativement l'intensité du laser (x100) au moment de la collision.

5. Virtual LAPLACE

Depuis 2018, la collaboration **Virtual LAPLACE** fédère la communauté francilienne de l'accélération laser-plasma autour de la modélisation numérique avancée. Portée par cinq laboratoires du CNRS affiliés à l'Université Paris-Saclay et à l'Institut Polytechnique de Paris, elle réunit chaque année une quinzaine de chercheurs et ingénieurs, dont environ la moitié de permanents. Son objectif est d'améliorer et de développer des outils de simulation, en particulier le code *Particle-In-Cell Smilei*, afin de soutenir et d'optimiser les expériences menées sur des infrastructures de premier plan telles qu'**Apollon**, **EuPRAXIA**, **LAPLACE** (LOA) et **PALLAS** (IJCLab), ainsi que sur d'autres installations européennes (HZDR, ELI Beamlines, Lund Laser Centre, CERN). Cette activité interdisciplinaire bénéficie d'une allocation annuelle d'un équivalent d'environ **dix millions d'heures coeurs**. Au-delà de la production de résultats scientifiques, Virtual LAPLACE joue un rôle central dans le développement collaboratif de méthodes numériques de pointe, le renforcement des synergies entre équipes et l'optimisation des ressources de calcul pour l'étude des régimes complexes d'interaction laser-plasma.

6. Enseignement et formations

La formation aux **accélérateurs en France** reste aujourd'hui un **domaine d'excellence**, mais **quantitativement limité** par rapport à d'autres pays européens. À l'échelle du master, le pays forme chaque année entre 20 et 25 étudiants spécialisés dans les accélérateurs, répartis principalement entre trois formations : le master GI/PLATO, le master LASCALA et une formation à Grenoble. Ce chiffre reste modeste face aux effectifs anglais et italiens, qui dépassent chacun la centaine d'étudiants par an, ou à la structuration plus décentralisée du dispositif allemand. Depuis 2016, le master GI a choisi de renforcer l'approche technique et de s'appuyer sur des partenaires majeurs tels que SOLEIL, dont la contribution en travaux pratiques et enseignements constitue un atout fort. Une autre orientation stratégique a été d'intégrer la seconde partie du programme JUAS comme module obligatoire dans les cursus de GI et LASCALA, ce qui représente un investissement conséquent pour les universités, notamment en termes de financement du logement des étudiants à Genève. Ce soutien, assuré jusqu'ici par Paris-Saclay et la Commission européenne, pourrait être fragilisé par les contraintes budgétaires à venir. Le master **LASCALA** illustre cependant la **réussite** de la **coopération européenne** dans le domaine. Coordinné par l'**Université Paris-Saclay**, il vient d'être renouvelé pour la **période 2026–2030** avec un financement de **4,63 millions d'euros**. Ce programme Erasmus Mundus, qui réunit les universités de Lund, La Sapienza, Salamanque et Paris-Saclay ainsi qu'un large réseau de 24 partenaires académiques et industriels prestigieux (SOLEIL, MAX IV, ELETTRA, LIGO/VIRGO, etc.), a déjà formé 84 étudiants issus de plus de 400 candidatures, dont 88 % poursuivent aujourd'hui en doctorat. Cette réussite témoigne du **rôle structurant** du programme pour la recherche européenne sur **les grands instruments scientifiques**. La France, par le biais de ses masters spécialisés et de son ancrage dans des initiatives européennes d'envergure, occupe ainsi une **position solide** mais fragile, **dépendante de soutiens** pérennes financiers des **universités et infrastructures de recherche**. Si la communauté française forme un nombre important d'étudiants de master 2, elle **peine à attirer ces talents post-doctorat** par le niveau limité d'investissement dans des projets nationaux visibles et **une faible attractivité des carrières** dans les **laboratoires nationaux** dans le domaine.

Proposition d'un projet national d'accélérateur laser-plasma

1. Préambule

Le présent projet, accompagné de sa feuille de route scientifique et technique, réunit pour la première fois l'ensemble de la communauté ALP et vise à renforcer les liens avec la communauté des accélérateurs. Consciente de la perte progressive de leadership et d'impact de la communauté au niveau international, ainsi que des ressources limitées disponibles, la communauté du GDR SCIPAC propose ici une vision ambitieuse pour redynamiser le domaine des accélérateurs compacts à forts gradients en France, fondés sur l'accélération laser-plasma, et pour favoriser l'intégration de cette technologie dans les accélérateurs du futur.

Élaboré indépendamment de toute contrainte budgétaire, institutionnelle ou géographique, ce travail s'appuie sur une seule exigence : assurer un phasage cohérent au niveau national avec les projets en cours, et au niveau européen avec l'initiative [EuPRAXIA](#).

2. Ambition

Notre volonté est de faire émerger un projet s'appuyant sur l'expertise des laboratoires français et les projets en cours, tout en fédérant l'ensemble de la communauté française de l'accélération laser-plasma. La priorité est de **développer une source d'électrons répondant aux besoins** des utilisateurs, qu'ils soient issus de **l'industrie** ou de la **recherche médicale**. Enfin, nous souhaitons qu'il soit complémentaire et puisse nourrir le projet [EUPRAXIA](#). L'ambition est également de **faire croître cette communauté, en cherchant à intégrer des acteurs issus du domaine des accélérateurs conventionnels**.

Nous avons décidé pour cela de nous attaquer à trois défis :

- i. La **fiabilisation** de l'accélération laser-plasma.
- ii. La **montée en cadence** de l'accélérateur à une fréquence ≥ 200 Hz.
- iii. La démonstration de l'**accélération multi-étage**.

Les deux premiers défis sont des étapes clés pour établir la légitimité de l'accélération laser-plasma et ouvrir la voie aux **applications sociétales** et à l'**industrialisation** de cette nouvelle technologie. Il s'agit déjà d'objectifs majeurs pour les projets LAPLACE et PALLAS. Nous allons nous appuyer sur l'expertise déjà acquise pour aller plus loin sur ces axes et avons l'ambition de démontrer ces avancées à travers plusieurs **applications pilotes**, en particulier en démontrant la pertinence de cette source pour la **radiothérapie FLASH** de traitement du cancer [13]. Nous anticipons également que ces développements permettront de nourrir la conception et la réalisation du site laser d'[EUPRAXIA](#), qui sera opéré dans sa première phase à un taux de répétition ≥ 10 Hz. Les développements effectués pour la fiabilisation seront directement transposables à [EUPRAXIA](#), et ceux visant à permettre une opération à haut taux de répétition prépareront la montée en cadence future de ce projet européen.

Le troisième axe est une étape indispensable pour démontrer le potentiel de l'accélération laser-plasma pour atteindre des énergies très élevées, au-delà de 100 GeV. La démonstration d'un **accélérateur linéaire laser-plasma délivrant des faisceaux de 10 GeV, 100 pC** est reconnue comme un **jalon majeur** par la stratégie européenne en physique des hautes énergies et le procédé équivalent américain (SnowMass). Cependant, le manque de maturité des techniques à mettre en œuvre et la taille encore modeste de la communauté laser-plasma française rendent cet objectif très risqué à moyen terme. Nous avons donc fait le choix de phaser le projet et d'aborder ce défi dans un second temps. À côté des objectifs i. et ii., la première phase vise à réduire les risques associés à ce défi, en mêlant approche expérimentale et études numériques.

3. Phase 1 : fiabilisation et applications

Lors de la première phase, l'accélérateur sera alimenté par un laser commercial Ti:Saphir d'une puissance moyenne supérieure à 300 W (1.5 J, 200 Hz) comme illustré dans la figure 1. Une des grandes forces de l'accélération laser-plasma est la compacité de la section accélératrice, qui varie de quelques millimètres à quelques dizaines de centimètres selon l'énergie. De plus, une impulsion laser peut être facilement transportée avec des pertes négligeables et sans contrainte de radioprotection. Ainsi, un seul système laser peut alimenter plusieurs lignes d'accélération indépendantes, sans surcoût significatif. Nous tirerons parti de cette capacité en alimentant avec un seul laser trois lignes indépendantes, dédiées respectivement à la mise au point d'une source de diffusion Compton et aux études de caractérisation fines du faisceau d'électrons, à l'étude du potentiel des accélérateurs laser-plasma pour la radiothérapie, et à l'exploration d'autres applications pour lesquelles l'ALP présente un atout bien identifié.

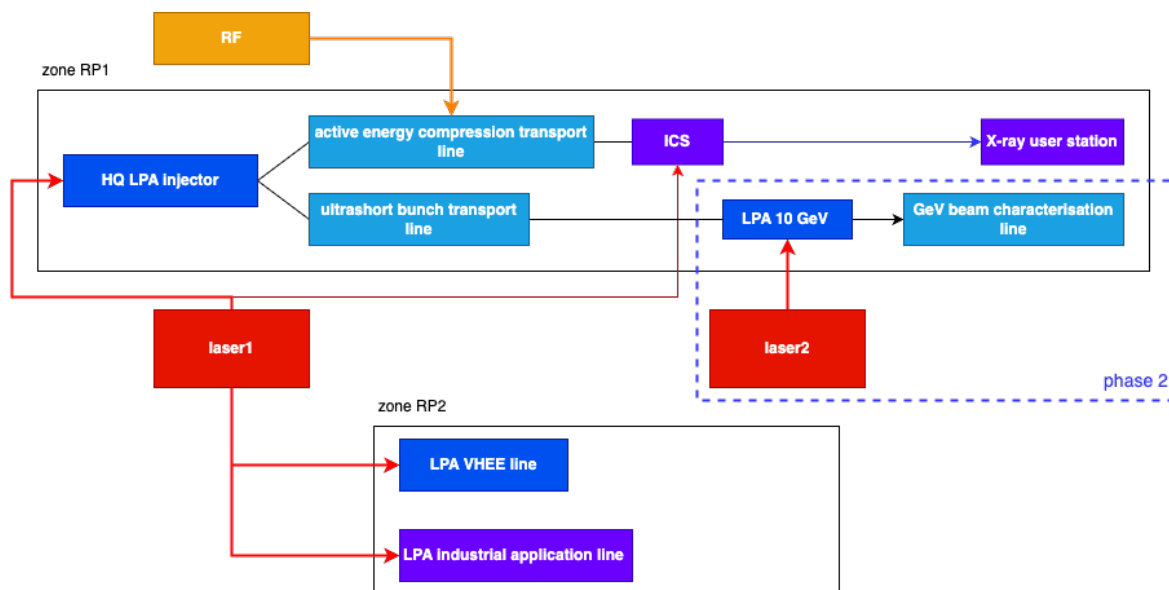


Figure 1 : Schéma du système laser **laser1** alimentant deux zones radio-protégées (RP1, RP2) simultanément hébergeant respectivement les lignes ICS avec son injecteur laser plasma haute qualité et la zone avec l'accélérateur LPA ultra compact pour la radiothérapie et la source de rayonnement X secondaire pour les applications industrielles. L'ajout de la section accélératrice laser-plasma ainsi que le laser pilote **laser2** est indiqué pour une deuxième phase du projet.

Lors des réunions du groupe de travail, nous avons également discuté du potentiel majeur de l'accélération laser-plasma pour l'étude de l'électrodynamique quantique en champs forts. C'est en effet une thématique sur laquelle plusieurs équipes françaises sont fortement impliquées, avec une visibilité internationale remarquable. Néanmoins, pour garder la cohérence globale du projet et ne pas disperser les ressources disponibles, nous avons décidé de ne pas inclure cette thématique dans le projet discuté. Nous considérons que les installations européennes ELI et l'installation Apollon permettront de mener à bien ces études à moyen terme et que les développements de lasers femtosecondes dans la gamme des 300 W permettront un gain significatif en précision pour les mesures de polarisation du vide [27].

a) Ligne fiabilisation et diffusion Compton

La première ligne vise à **démontrer**, à travers une **application pilote exigeante**, que l'accélération laser-plasma (ALP) peut produire des **faisceaux de haute qualité** avec une grande fiabilité. L'objectif est d'utiliser une source d'électrons ALP à une énergie de 200 MeV, avec une charge d'au moins 20 pC, une émittance inférieure à 1 mm.mrad, et une dispersion de l'ordre de quelques pourcents. Une section de capture commune permettra d'envoyer ce faisceau vers deux lignes distinctes : une ligne de compression en énergie pour la **source X de diffusion Compton** et une **ligne de transport de paquet d'électrons ultra courts** et caractérisation (fig. 2).

Ligne diffusion Compton source X : La source ALP est combinée avec une ligne de transport et compression en énergie permettant d'atteindre une stabilité et dispersion en énergie de l'ordre de 0,1 %. Le paquet d'électrons ainsi étiré temporellement atteint une durée de l'ordre de la picoseconde. Pour cela, nous utiliserons la technique de compression active récemment démontrée à DESY [14]. Alors que cette première démonstration a été effectuée à une cadence de 1 Hz, la ligne développée ici fonctionnera à 200 Hz, augmentant ainsi le courant moyen délivré de plus de deux ordres de grandeur.

Ce faisceau d'électrons sera ensuite focalisé par une ligne de transport adaptée pour, d'une part, sa caractérisation fine et, d'autre part, pour la réalisation d'une source de lumière par diffusion Compton. Pour cela, une partie de l'énergie délivrée par le laser sera prélevée pour former une seconde impulsion, qui sera focalisée sur le faisceau d'électrons. Grâce à la réduction de la dispersion en énergie et de la divergence du faisceau obtenues par la ligne de transport radiofréquence, le rayonnement X aura une dispersion en énergie relative inférieure à **10 % à une énergie de 1 MeV**. La source devrait délivrer **jusqu'à 10^9 photons par seconde**, ouvrant la voie à des applications innovantes d'imagerie X à haute résolution: **tomographie en absorption ou en contraste de phase d'objets denses** ou mous, avec des résolutions inférieures à 10 μm , exploration de méthodes plus avancées, comme l'**imagerie par fluorescence X** pour suivre, avec une très haute résolution temporelle, des molécules en utilisant des nanoparticules, ou l'imagerie à absorption différentielle (double seuil K) pour cartographier des éléments lourds dans des environnements complexes, répondant ainsi à des besoins médicaux ou industriels. Ces techniques d'imagerie innovantes devraient en particulier apporter des informations précieuses en science des batteries. Dans les batteries lithium, la formation de dendrites et les blocages de lithium seront étudiés ; dans les batteries plomb-acide, elles faciliteront la détection de la corrosion des grilles, des fissures et des obstructions liées aux structures Pb/PbO₂ à l'interface électrode-électrolyte.

La réalisation de cette ligne nécessitera un fort investissement de la communauté des accélérateurs conventionnels, tant pour la compression et le transport du faisceau, que pour sa caractérisation fine, la synchronisation des sources de puissance (laser, RF) et la stabilisation de la ligne.

Ligne de transport et caractérisation de paquet d'électrons ultra-courts : Cette deuxième ligne accélérateur utilisant la même source ALP que la ligne de diffusion Compton vise à étudier et optimiser le transport de faisceau d'électrons avec des paquets ultra-courts ($\sim 5 \text{ um}$) à charge élevée ($\sim 100 \text{ pC}$) pour l'accélération multi-étages. Le développement de diagnostics faisceaux transverses et temporels, à l'échelle du micromètre et de la femtoseconde, constitue une partie du défi de l'accélération laser-plasma multi-étage requérant une ligne dédiée. Cette démonstration de notre capacité à contrôler, caractériser et mettre en forme le faisceau d'électrons avec des techniques des accélérateurs conventionnels est une étape cruciale pour préparer le transport entre deux étages d'accélération lors de la phase 2 du projet.

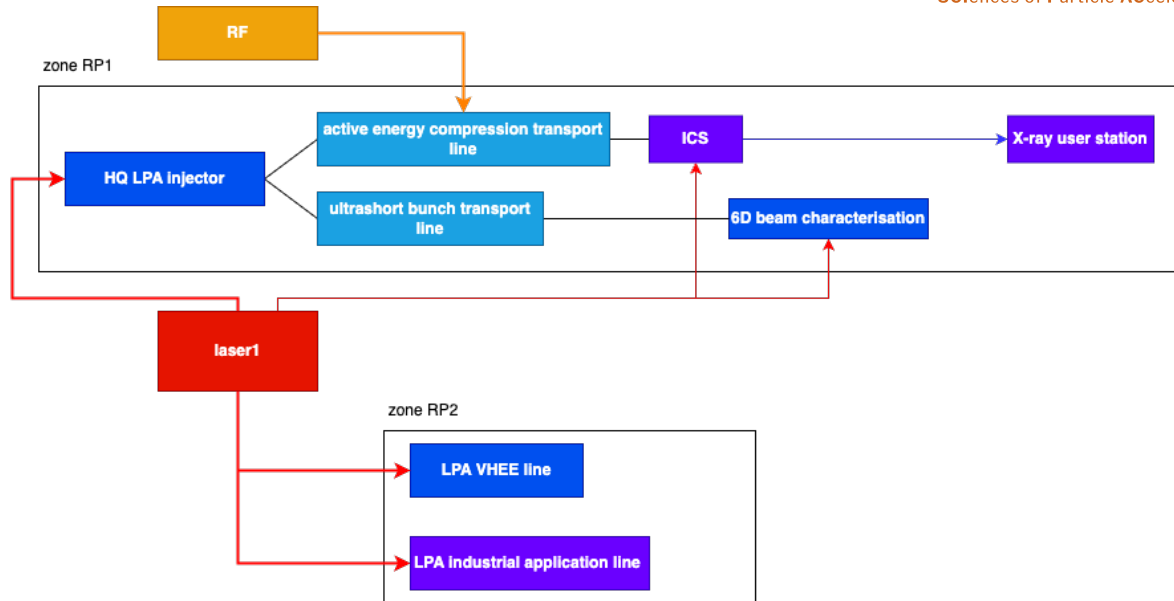


Figure 2 : schéma de principe de l'accélérateur ALP avec les deux lignes de transport : compression active pour la source X Compton et transport paquet d'électrons ultra-courts pour la caractérisation 6D du faisceau et la préparation de l'accélération à très haute énergie (voir phase 2 et figure 1).

b) Ligne radiobiologie

La seconde ligne est entièrement dédiée à la démonstration du potentiel des accélérateurs laser-plasma pour la **radiothérapie**. Les électrons à très haute énergie (*Very High Energy Electrons, VHEEs*) apparaissent comme une alternative très prometteuse pour la radiothérapie oncologique, notamment dans le **traitement des tumeurs profondes**. En effet, les électrons d'énergie comprise entre **50 et 250 MeV** possèdent un pouvoir de pénétration suffisant pour atteindre des tumeurs profondes chez l'humain. L'utilisation des VHEEs permettrait de réduire la dose délivrée aux tissus proximaux (par rapport à un traitement par photons) [15], tout en étant moins sensible aux inhomogénéités tissulaires (par rapport à un traitement par protons) [16]. Un atout majeur de l'ALP pour cette application est la compacité de la source qui pourrait être déplacée aisément autour du patient.

Selon des études préliminaires menées au LOA en collaboration avec l'**Institut Curie**, la dose nécessaire pour traiter une **masse tumorale de 1 kg à raison de 10 Gy** correspond à environ 35 000 impulsions laser d'un Joule, soit seulement **deux minutes d'irradiation** avec un système laser délivrant une puissance moyenne de 300 W. Dans la perspective d'une utilisation chez l'humain, deux **aspects essentiels restent à clarifier** : les **modalités spatiales et temporelles de délivrance de la dose**. Ils seront abordés en collaboration avec l'**institut Curie** pour confirmer la pertinence des sources laser-plasma pour cette application.

Modalités spatiales. Plusieurs stratégies sont à l'étude pour la formation du faisceau après accélération et la modalité spatiale de délivrance de la dose, en utilisant soit un faisceau de taille centimétrique, assurant une pénétration stable dans la matière, soit un faisceau focalisé en profondeur. Cette seconde approche, réalisable uniquement avec des faisceaux d'électrons, permet de concentrer la dose sur la zone cible tout en réduisant celle déposée dans les tissus sains à l'entrée et à la sortie. Ces deux stratégies nécessitent le développement d'une ligne de transport des électrons et des diagnostics adaptés.

Modalités temporelles. Un nombre croissant d'études récentes en radiobiologie et en radio-oncologie mettent en évidence l'importance de la modalité temporelle de délivrance de la dose dans la définition de la toxicité. Plus précisément, un dépôt de dose à très haut débit sur un temps très court permettrait de réduire la toxicité pour les tissus sains tout en maintenant l'effet thérapeutique. Cet effet, appelé *effet FLASH*, semble persister même lorsque l'irradiation est réalisée en plusieurs fractions. Cet aspect pourrait

constituer une véritable révolution dans les traitements anti-tumoraux. Les sources laser-plasma, qui délivrent naturellement des impulsions à très haut débit de dose, pourraient jouer un rôle essentiel dans cette révolution. Elles permettent en effet d'explorer différents protocoles de traitement avec des modalités temporelles variées, dont certaines restent inaccessibles aux techniques conventionnelles.

De plus, leur compacité inégalée élimine le besoin d'un gantry, en permettant de faire tourner la source autour du patient. **Cette compacité, combinée à un débit de dose crête ultra-élevé, constitue les deux atouts majeurs de cette technologie**, et en font une solution particulièrement prometteuse pour cette application médicale, aux enjeux de santé publique.

c) Ligne développement des applications industrielles et source de positrons

La troisième ligne se veut polyvalente en visant plusieurs applications pour lesquelles l'ALP présente un potentiel déjà bien établi, et qui sont moins exigeantes sur la qualité des faisceaux d'électrons. Certaines de ces applications ont déjà suscité l'intérêt d'industriels, et les études pourraient être menées dans le cadre de partenariats public-privé, avec une participation possible des industriels au financement du projet.

Un premier ensemble d'applications concerne la **radiographie d'objets massifs**. Il faut, comme sur la ligne Compton, une source de rayonnement X, mais dont les exigences sur les caractéristiques de source, notamment en termes de largeur de bande spectrale, sont beaucoup moins importantes. Le rayonnement X peut ainsi être produit simplement par Bremsstrahlung sur une cible très dense, comme le tantale, pour obtenir un spectre X étendu. Pour ces applications, l'ALP présente deux intérêts majeurs :

- i. Une taille de source X potentiellement inférieure à 100 μm .
- ii. Une zone accélératrice ultra-compacte et la possibilité de transporter le laser plutôt que le faisceau d'électrons pour déplacer la source X.

Le point ii. constitue un élément clé pour la radiographie industrielle, tout comme il l'était pour la radiothérapie. Il permet de faire tourner l'accélérateur autour du patient en radiothérapie, ou ici autour de l'objet, ce qui est crucial lorsque ce dernier est très volumineux. Il offre également la possibilité de positionner l'accélérateur dans des zones inaccessibles pour un LINAC. Ce dernier point est particulièrement important pour la radiographie de soudures critiques sur des cuves de réacteurs nucléaires. L'utilisation de l'ALP pourrait ainsi permettre de réduire drastiquement le temps d'inspection de ces cuves, avec des retombées économiques majeures. Toujours dans le domaine du nucléaire, la source Bremsstrahlung pourrait être utilisée pour la tomographie avec une excellente résolution des pièces de tuyauterie massives produites par fabrication additive métallique, avec là encore un enjeu économique important.

Une autre application présentant un enjeu sociétal majeur est le **contrôle du fret aux frontières**. Pour cette application, l'atout principal de l'ALP réside dans la possibilité d'utiliser une seule source laser pour alimenter successivement plusieurs dizaines d'accélérateurs laser-plasma, disposés tout autour d'un portique sous lequel passe un camion transportant un conteneur. Le contenu de ce dernier est alors imagé en trois dimensions, ce qui permet d'identifier précisément la cargaison et de détecter d'éventuels éléments prohibés. Pour ces applications industrielles, le potentiel de l'accélération laser-plasma est déjà bien établi, avec des entreprises privées qui se sont déjà rapprochées des laboratoires pour des tests ou des projets de R&D communs. Par exemple, le projet européen MULTISCAN-3D a permis de démontrer que l'ALP répond à l'ensemble des besoins de l'application de contrôle de fret. Sur ces sujets, l'objectif du projet sera de démontrer, avec nos partenaires industriels, que les accélérateurs laser-plasma ont atteint un niveau de maturité et de fiabilité suffisant pour passer à une phase d'industrialisation.

Une source ALP offre également l'opportunité de générer des faisceaux de **positrons**, aux multiples applications en sciences des matériaux, physique fondamentale et technologies médicales. Elle nécessite plusieurs étapes : focalisation du faisceau d'électrons, conversion sur une cible solide épaisse optimisée, collecte et séparation des espèces de particules, éventuellement modulation, puis re-focalisation des positrons selon les besoins. Une telle source ouvre la voie à une nouvelle génération de techniques

d'inspection non destructive, comme la **spectroscopie d'annihilation de positrons** (*Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy*, PALS). Cette technique repose sur la mesure du temps entre l'injection du positron dans le matériau et l'émission des photons d'annihilation, qui dépend de la densité électronique locale. Il s'agit d'une méthode d'analyse de résolution nanométrique pour étudier les vides, dislocations et hétérogénéités électroniques, souvent invisibles aux autres méthodes (diffraction de rayons X, microscopie électronique). Elle est utile pour étudier la micro-électronique, la corrosion des alliages métalliques et les polymères dans les batteries. L'intérêt d'une source ALP pour la PALS par rapport aux sources β^+ qui sont généralement utilisées pour cette application (par ex. Na-22) réside dans leur structure temporelle brève, précise et bien définie, qui peut être synchronisée avec d'autres diagnostics (électrons, X, gamma) générés par le même ALP. Des processus rapides comme la diffusion de défauts après irradiation pourront être sondés avec cette résolution temporelle accrue. Les positrons étant produits par le faisceau d'électrons de l'ALP, ceci permet d'une part, de maximiser leur pénétration dans l'échantillon avec des positrons énergétiques issus de la conversion d'un faisceau d'électrons ultra-relativiste et, d'autre part, de réduire l'impact radiologique grâce à la cible gazeuse de l'ALP, simplifiant grandement la radioprotection et le blindage du bruit de fond. Des applications privilégiant une forte brillance plutôt qu'un champ d'irradiation étendu sont aussi possibles grâce à une forte focalisation préalable du faisceau d'électrons.

4. Phase 2 : Accélération multi-étages laser

Des sources d'électrons de très haute énergie et de grande qualité compactes seraient un atout majeur tant pour des études fondamentales, comme celles en électrodynamique quantique en champ fort, que pour le développement d'accélérateurs de haute énergie basées sur l'ALP. La communauté de physique des particules identifie l'accélération par sillage laser-plasma (LWFA) comme l'une des technologies prometteuses à champ accélérateur élevé, et le rapport 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules recommande explicitement de renforcer cette R&D. Le gain maximum d'énergie des faisceaux d'électrons accélérés restant fondamentalement limité par l'énergie de l'impulsion laser, la conception d'accélérateurs LWFA multi-étages a été proposée, dans lequel chaque étage plasma serait alimenté par une impulsion laser distincte. Le premier étage générerait le faisceau d'électrons, qui serait ensuite accéléré dans les étages suivants, similairement aux accélérateurs conventionnels où l'accélération est étagée sur différentes cavités accélératrices RF de la machine. Sous réserve d'importants efforts de R&D notamment pour les interfaces entre les étages, l'accélération multi-étages offre la flexibilité d'ajuster les paramètres laser et plasma aux conditions optimales de chaque étage, en s'adaptant à la dynamique du faisceau.

Une première démonstration de principe d'un tel schéma à deux étages a été réalisée au LBNL (États-Unis), avec une énergie finale (**à la fin du deuxième étage**) inférieure à 300 MeV et une faible fraction (3.5%, i.e. ~ 1 pC) de la charge à la sortie du 1er étage accélérée jusqu'à la fin du deuxième étage [17]. Les recherches visent à concevoir une expérience ALP multi-étage avec une charge plus élevée, une énergie finale plus importante et une dispersion en énergie réduite. La **démonstration d'un schéma multi-étage à hautes performances, étape primordiale vers l'extension de cette technologie d'accélération**, est l'objectif de la seconde phase du projet.

a) Objectifs de la phase 2

Pour aller au-delà des résultats obtenus au LBNL, les paramètres du faisceau d'électrons visés à la sortie du deuxième étage sont les suivants : **une charge de ~ 100 pC, une énergie de ≥ 10 GeV, une émittance de l'ordre de 1 mm-mrad et une dispersion en énergie de l'ordre du pourcent**. Pour éviter une injection d'électrons du plasma du deuxième étage, l'intensité laser et la densité plasma doivent être inférieures à celles du premier étage. Le champ accélérateur et la longueur d'onde étant proportionnels

respectivement à la racine de la densité plasma et à son inverse, une densité de plasma plus faible impactera la conception du deuxième étage avec :

- La réduction des gradients accélérateurs et donc une longueur d'accélération de plusieurs dizaines de centimètres pour atteindre l'énergie visée. Un **guidage laser par technologie plasma** sera requis pour prévenir la diffraction du laser.
- Une impulsion laser plus longue et de rayon plus grand que celle du premier étage, pour s'adapter à la longueur d'onde plasma plus élevée. L'énergie du **laser** (laser2, fig1) serait donc de **l'ordre de 10 J**, ce qui limiterait, **avec les technologies actuelles**, le taux de répétition **autour de 10 Hz**.

Il est important de souligner qu'aucune étude de conception '**start-to-end**' d'un **tel schéma démonstrateur à deux étages n'existe actuellement dans la littérature**, incluant à la fois une ligne de transport compacte entre les deux étages, le couplage du second laser et la simulation de la formation du canal de guidage du second étage.

b) Préparation de la seconde phase pendant la phase 1

Afin d'atteindre ces objectifs ambitieux, un **travail préparatoire conséquent** sera engagé dès la phase 1. Cette phase initiale vise à anticiper et réduire les risques techniques et scientifiques associés à la phase 2, en se concentrant sur quatre axes principaux : l'étude de la ligne de transport, des simulations 'start-to-end', le développement de cibles plasma longues, et des tests d'accélération à 2 étages sur LAPLACE-HE.

Ligne de transport. Une étude approfondie de la ligne de transport des faisceaux sera menée. Elle vise à définir une architecture optimisée pour le diagnostic du faisceau à haute énergie et son injection dans le second étage avec une perte de charge minimale. Une caractérisation complète du faisceau en six dimensions (position, angle, énergie et corrélations) sera requise à l'issue du transport. En particulier, l'accès à l'espace longitudinal est essentiel. Cette mesure pourrait être réalisée par une interaction Compton inverse, une méthode compatible avec les énergies envisagées. Cette ligne présente un caractère original et ambitieux, notamment en raison des fortes contraintes sur la dynamique des faisceaux.

Simulations start-to-end. Un effort important sera consacré à la modélisation numérique du système complet, avec des simulations dites start-to-end couvrant tous les sous-ensembles de l'accélérateur. Une attention particulière sera portée à la modélisation du canal plasma de type HOFI (Hydrodynamic Optical-Field Ionized) [23], qui constitue une brique technologique essentielle de l'accélération. Ces simulations devront intégrer la conception des éléments magnétiques permanents nécessaires à la focalisation et au transport, ainsi qu'une collaboration étroite sur la conception et l'optimisation des lentilles plasma. Le développement de modèles précis pour les interactions complexes entre le faisceau et le canal plasma sera crucial pour prédire les performances globales du système.

Développement de cibles plasma longues. Le développement de cibles plasma de type HOFI de plus de 20 cm [24], à basse densité, sera un objectif majeur. L'enjeu est de maintenir des gradients d'accélération supérieurs à 15 GV/m sur toute la longueur du canal, tout en assurant une stabilité et une homogénéité suffisantes du plasma. Ce développement nécessitera une caractérisation fine de la densité électronique, de la géométrie du canal, et des mécanismes de guidage du faisceau laser. Des études paramétriques permettront d'optimiser la durée de vie et la reproductibilité du canal dans des conditions compatibles avec un fonctionnement à haut taux de répétition.

Tests d'accélération à deux étages sur LAPLACE-HE. Des expérimentations préliminaires seront réalisées sur la plateforme LAPLACE-HE, avec un injecteur délivrant des électrons à 150–200 MeV, 30 pC de charge et une émittance normalisée de l'ordre de 1 μm . L'objectif est de démontrer un gain d'énergie de l'ordre de 1 GeV à l'aide d'un canal HOFI de moins de 10 cm, intégré dans une ligne d'accélération compacte de moins de 2 mètres. Ces tests à une cadence de 1 Hz permettront de valider les concepts clés liés à

l'accélération multi-étage et de recueillir des données précieuses sur le comportement du faisceau injecté et accéléré dans un environnement réaliste.

c) Démonstration d'un accélérateur laser-plasma linéaire à 10 GeV

La deuxième phase de projet a pour objectif la mise en œuvre d'un démonstrateur d'accélérateur laser-plasma multi-étage visant une énergie finale de 10 GeV pour des charges de l'ordre de 100 pC. Elle s'appuie d'une part sur les résultats qui seront obtenus lors d'une première démonstration à **1 GeV et 30 pC sur LAPLACE-HE** et d'autre part sur le **développement de la source ALP de haute qualité et le transport optimisé de paquet ultra courts de la phase 1** qui permettront de valider la génération, synchronisation et le transport d'un faisceau de qualité contrôlée. L'installation de la section accélératrice laser plasma requiert l'ajout d'un laser pilote (laser2 figure 1) délivrant ≥ 16 J, 50 fs, 10 Hz. La ligne de transport et caractérisation des faisceaux ultra-courts sera upgradée avec l'ajout des dispositifs de transport et de couplage du faisceau laser de puissance vers le second étage plasma, garantissant la préservation des paramètres de faisceaux dans l'espace des phases et l'efficacité de l'injection inter-étage du pilote laser. Des **collaborations européennes devront être construites** avec les partenaires historiques du CNRS dans les développements et participant à **EuPRAXIA** autour notamment, des cavités RF chaudes à hautes cadences (INFN-Italie, DESY - Allemagne), du transport de faisceau ultra-courts (STFC-CLARA - Royaume-Uni), et des diagnostics faisceaux (PSI - Suisse). Ces partenariats seront nécessaires dès la phase 1.

Ce démonstrateur constitue une étape clé vers la réalisation d'accélérateurs compacts à haute énergie basés sur l'accélération laser-plasma multi-étages et positionne au premier plan international la France et l'Europe dans les prochaines décennies sur la construction de module accélérateur de faisceaux d'électrons à paquets ultra courts pour la physique des hautes énergies.

6. Impact environnemental et développement durable

Réduction de l'empreinte environnementale

Le développement de l'ALP s'inscrit pleinement dans les objectifs de la transition énergétique et de la réduction de l'empreinte environnementale des grandes infrastructures scientifiques. Les ALPs avec des gradients d'accélération supérieurs de trois ordres de grandeur (>100 GV/m) aux technologies RF entraînent une réduction drastique de la taille et du volume des infrastructures [25]. Le projet se basant sur des architectures laser pompés diode possédant un meilleur rendement atteignant le pour cent par rapport aux ALP existants basés sur des systèmes laser pompés-flash ayant une efficacité $\sim 10^{-4}$ [26].

Recyclabilité et mutualisation des infrastructures

Les ALP s'appuient sur des technologies hautement modulaires, favorisant la recyclabilité des composants opto-mécaniques et électroniques. La mutualisation du laser entre plusieurs lignes expérimentales (Compton, VHEE, positrons, etc.) permet la valorisation du temps de faisceau et la réduction de l'empreinte carbone par expérimentation partagée. Les lasers de nouvelle génération intégrés au projet sont conçus pour un fonctionnement continu avec un taux de disponibilité supérieur à 90 %, réduisant significativement le coût environnemental par heure d'exploitation par rapport aux systèmes laser actuels possédant des taux de disponibilité de 40 - 60%.

Ces impacts s'inscrivent dans les axes prioritaires du *Green Deal* européen et de la feuille de route nationale France 2030, qui encouragent la substitution des technologies intensives en ressources par des solutions compactes, recyclables et énergétiquement sobres.

7. Planning et ressources

Le projet s'inscrit dans la continuité directe des initiatives précédentes, PALLAS et LAPLACE-HC. Il reprend les objectifs fondamentaux tout en les portant à un niveau supérieur, en particulier en matière de puissance moyenne, de fiabilité et de potentiel applicatif, les résultats obtenus sur PALLAS et LAPLACE-HC seront ainsi pleinement valorisés.

Avec la mise en service de la nouvelle installation, les plateformes PALLAS et LAPLACE-HC seront progressivement arrêtées. Les équipes actuellement impliquées sur ces deux projets seront redéployées et pleinement intégrées à la nouvelle infrastructure.

Par ailleurs, une partie significative des équipements existants pourrait être réutilisée, sous réserve d'une évaluation de faisabilité technique menée avec les partenaires industriels, notamment pour les lasers de pompe, les étages d'amplification, les composants mécaniques, les systèmes de vide ainsi que les dispositifs de diagnostic.

Budget, tentative de chiffrage préliminaire

Éléments	Description	Coût estimé [M€]
Systèmes laser1 et laser2	Systèmes laser, compresseur estimation préliminaire des industriels	20-30
Lignes transport laser et sources électrons	Transport laser, optique, source, ALP diagnostics et instrumentation	4
Ligne transport faisceaux électrons	Éléments magnétiques, diagnostics, systèmes RF	4
Réutilisation matériel projet existant	Instrumentation, diagnostics, éléments magnétiques	2
Bâtiments et infrastructures (*)	Hall laser, zones expérimentales, radioprotection	30

(*) : Pour le bâtiment, il s'agit d'une estimation, pas de chiffrage à ce stade. Les bâtiments pour les accélérateurs ALP et les lignes faisceaux pour les stations utilisateurs représentent une surface d'environ **400 m²** pour les lasers, **150 m²** pour la zone radiobiologie et applications industrielles radio-protégées et **250 m²** pour la ligne ICS et l'accélérateur linéaire à 10 GeV laser-plasma. Les frais de fonctionnement sont estimés sur la base des taux de répétition laser considérés et une utilisation de 40 semaines par an à **1 M€ / an environ**.

Pour les phases d'études qui devront débiter au plus tôt par rapport au calendrier du projet et à son phasage avec **EuPRAXIA**, la communauté avec différents laboratoires et leurs équipes sera proactive pour la recherche de financement annexe avec l'objectif d'agréger un consortium national et européen solide autour du projet. Différents types de financement potentiel sont possibles pour la **phase préparatoire d'étude du projet** :

- ANR commun LOA, IJCLab, LLR, LPGP pour environ 0,5 M€ dépôt en 2026
- ERC synergy grant avec les collègues européens (INFN pour la lentille plasma, DESY, STFC pour le miroir plasma et la cavité RF par exemple) pour environ 3 M€.

Ressources humaines, tentative d'estimation préliminaire

Le besoin est estimé à environ 40 FTE avec une base de ressources dans les laboratoires de la communauté ALP et accélérateurs actuelle de 35 ETP ingénieur.e.s, enseignant-chercheur.se.s chercheur.se.s avec un âge moyen supérieur à 45 ans, avec plus de 85% des personnels entre 45 et 55 ans. Les principales compétences sont les suivantes : gestion de projet, ingénierie système, optique et laser, simulations plasma, beam dynamics, vide, conception mécanique, AIT, électronique, contrôle-commande et sécurité, diagnostics, radioprotection, IA, valorisation.

Échéancier estimatif

Le projet s'inscrit temporellement dans la continuité directe de LAPLACE-HC/HE et PALLAS, tout en visant une montée en puissance technologique et applicative. La planification exploite un phasage progressif, garantissant la maîtrise des risques techniques et la continuité scientifique avec les projets existants.

Phase	Période	Objectifs principaux
Consolidation	2026	Retour des tutelles, recherche de financements, organisation, confirmation du lancement des pré-études
Pré-étude / avant-projet	2027 - 2028	Études techniques, définition de l'organisation du consortium, accord consortium, élargissement partenaires. Études des sites. Lancement du projet de démonstration multi-staging 1 GeV, 1Hz en préparation phase 2
Phase 1	2029 - 2034	Accord de financement, AO, construction, commande laser1, mise en service des premières lignes
Phase 2	2033 - 2038	Commande laser phase 2, construction et installation du linac ALP 10 GeV

8. Retour des laboratoires sur la proposition de projet

Les laboratoires souhaitent que la gouvernance assure une représentativité dans les prises de décision.

Pour assurer une gouvernance équilibrée et pour garantir une continuité scientifique indépendante, le présent projet devra être opéré comme une infrastructure nationale multi-instituts, assurant la coordination entre les laboratoires CNRS, les universités partenaires et les industriels. Une gouvernance collaborative devra garantir une transparence décisionnelle et une représentativité équilibrée de la communauté, favorisant un pilotage agile et une vision à long terme.

Après des retours positifs sur la définition globale de la stratégie et du projet, le processus de collection des lettres de soutien des directions des laboratoires est en cours.

9. Conclusions

Ce projet est **indispensable** pour **rétablir le leadership français** dans le domaine de l'accélération laser-plasma, aujourd'hui **fortement menacé** par les **investissements massifs** déjà engagés en Chine, en République tchèque, en Roumanie, en Italie, en Allemagne, au Royaume-Uni et aux États-Unis, par exemple :

- **sources VHEE** : KALDERA / BEETLE [18], THE (Tuscany Health Ecosystem) [19]
- **sources compactes X/Gamma**: EuAPS [20], EPAC [21], ELI-BeamLines [22].

Il s'articule autour de trois axes principaux, visant à démontrer la capacité des accélérateurs laser-plasma à délivrer de façon fiable et à haut taux de répétition des faisceaux de qualité, à prouver l'**intérêt** de cette **technologie** pour des **applications concrètes**, et à en montrer la **maturité** suffisante pour envisager une **industrialisation**. Les résultats attendus pourraient ouvrir la voie à la commercialisation de solutions par accélérateurs laser-plasma alternatives aux machines conventionnelles et pertinentes, notamment pour le contrôle non destructif, et à plus long terme pour la radiothérapie. En intégrant des **partenaires industriels dès la phase initiale**, le projet ambitionne de répondre aux besoins spécifiques des utilisateurs et **favorise la mise en place de partenariats public-privé**.

Enfin, ce projet contribuera activement à nourrir des initiatives européennes comme **EuPRAXIA**, grâce aux développements visant à fiabiliser les sources, à préparer leur montée en cadence et en énergie, tout en renforçant la compétitivité et l'attractivité de la communauté scientifique et industrielle française sur la scène internationale.

EuPRAXIA

Les activités actuelles de la communauté ALP s'inscrivent dans la dynamique européenne **EuPRAXIA** (*European Plasma Research Accelerator with eXcellence In Applications*), infrastructure européenne inscrite sur la feuille de route ESFRI et coordonnée par l'INFN (Italie). Le projet possède deux sites de FEL EUV compact basé sur la technologie plasma : (1) le site EuPRAXIA@SPARC_lab à Frascati (INFN, Italie) où la structure accélératrice plasma permettant d'atteindre 1GeV est produite par un faisceau d'électron intense accéléré par un linac compact à l'état de l'art en bande X; (2) le site EUPRAXIA@ELI-BL à Dolni Brezany (ELI-ERIC, Czech republic) où l'injecteur et la structure accélératrice reposent sur l'accélération laser-plasma. Le choix du second site est récent (mars 2025) et le consortium d'EuPRAXIA est en train de s'organiser pour achever un *technical design report* d'ici 2027. La communauté française est surtout sollicitée par le second site.

1. EuPRAXIA Phase 1 (2025-2030)

Dans une première phase, **EuPRAXIA** vise à construire d'ici 2030 un accélérateur d'électrons laser-plasma de 1 GeV, fonctionnant à des taux de répétition intermédiaires de 10 Hz à 20 Hz et apte à alimenter un FEL-EUV compact. Les projets nationaux comme **LAPLACE** et **PALLAS** adressent des aspects cruciaux pour le déploiement de la première phase sur le site d'ELI-BL. L'étude de la montée en cadence des ALPs assurée par **LAPLACE-HC**, l'étude d'un injecteur laser-plasma à haute énergie avec guidage et de bonnes qualités de faisceau sur **LAPLACE-HE** sont des aspects clés pour **EuPRAXIA**. Le projet **PALLAS** complète les études sur les aspects de contrôle laser, contrôle commande et rétroaction avancées (IA/ML) pour les accélérateurs ALPs, l'étude de cibles innovantes et la caractérisation de faisceaux ALPs de haute qualité. Ces études sont également complétées par les expériences et collaborations européennes de la communauté ALP française (voir synthèse des projets en cours, LPGP, CELIA).

La demande d'**EuPRAXIA** pour les **centres/nœuds nationaux**, dont la France (CNRS), Allemagne (DESY), le Portugal (IST) et le Royaume-Uni (STFC), démarre maintenant sur un certain nombre de sujets pour la **phase de conception technique de la phase 1** (0.5-1 GeV, ≥ 10 Hz, 30 pC, 1 μ m) et son implémentation en 2030 pour un FEL-EUV. Les différentes équipes du CNRS notamment à travers leur participation aux différents projets européens INFRATECH liés à EuPRAXIA avec les installations **LAPLACE**, **PALLAS** participent à l'effort de R&D pour la première phase d'**EuPRAXIA**.

2. EUPRAXIA Phase 2 et projet fédérateur ALP national

Dans une deuxième phase, très ambitieuse avec l'augmentation conjointe du courant moyen et de l'énergie de l'accélérateur ALP ELI-BL qui sera portée à 5 GeV avec un taux de répétition de 50-100 Hz. Le **présent projet à l'échelle nationale** permettrait une participation active de la France avec un **centre national** plus visible pour la préparation de la deuxième phase d'**EuPRAXIA**. Les instituts tutelles des centres nationaux vont être incités à se positionner sur la participation à la phase de **conception technique de la phase 2** pour **monter en cadence** (100 Hz) et en **énergie** (5 GeV). Le présent projet offre une **opportunité unique pour la France**, le CNRS et les partenaires industriels français de **renforcer la visibilité et rattraper le retard** sur les autres pays européens, la Chine et les États-Unis en s'inscrivant dans la feuille de route des infrastructures Européennes Scientifiques (ESFRI).

Références

- [1] S. Feister, et al, High Power Laser Science and Engineering, 11, e56 (2023) : <http://dx.doi.org/10.1017/hpl.2023.49>
- [2] P. Drobnik et al, Rev. Sci. Instrum. 96, 033304 (2025) : <https://doi.org/10.1063/5.0226055>
- [3] G. Kane et al. arXiv preprint arXiv:2408.15845 (2025) : <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.15845>
- [4] C. Guyot, Optimisation of electron beam performance for high peak current laser-plasma and multi-pass energy recovery accelerators with 6D tracking start-to-end simulations, phd thesis, (2024) : <https://theses.hal.science/tel-05040487v1>
- [5] A. Sytov et al. Integration of Machine Learning-Based Plasma Acceleration Simulations into Geant4 : A Case Study with the PALLAS Experiment, arXiv preprint arXiv:2503.12154 (2025) : <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.12154>
- [6] <https://laplace-loa.fr>
- [7] L. T. Dickson et al, PRAB 2022, <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.25.101301>
- [8] T. L. Steyn et al., <https://arxiv.org/abs/2506.18047>
- [9] I. Moulanier et al., JOSA B 2023, <https://doi.org/10.1364/JOSAB.489884>; I. Moulanier et al., PoP 2023, <https://doi.org/10.1063/5.0142894>
- [10] S. Gessner et al <https://arxiv.org/abs/2503.20214>
- [11] F. Massimo et al., PPCF 2025, <https://doi.org/10.1088/1361-6587/addc97>;
- [12] G. Bouchard et al., Computer Physics Communications 315, 109737 (2025) <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2025.109737>
- [13] J. Bourhis al. Radiotherapy and Oncology 139, 11–17 (2019) <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2019.04.008>; V. Favaudon al. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.3008973> Medicine 6, 245ra93-245ra93 (2014); J. D. Wilson et al. Frontiers in Oncology 9 (2020) <https://doi.org/10.3389/fonc.2019.01563>.
- [14] P. Winkler et al., Nature 640, 907–910 (2025)
- [15] C. DesRosiers et al. Physics in Medicine and Biology 45, 1781–805 (2000) <https://doi.org/10.1088/0031-9155/45/7/306>.
- [16] A. Lagzda, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 482, 70–81 (2020) <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2020.09.008>.
- [17] S. Steinke et al., Nature 530, 190–193 (2016) <https://www.nature.com/articles/nature16525>
- [18] DESY - innovation BEETLE project - Germany (2024) : https://innovation.desy.de/news_events/e85/beetle/index_eng.html
- [19] Tuscany health ecosystem - Italy (2024) : <https://tuscanyhealthecosystem.it/en/flash-radiotherapy/>
- [20] EuPRAXIA Advanced Photon Source - EuAPS - Italy (2023): <https://euaps.infn.it/>
- [21] Extreme Photonic Application - EPAC - UK (2021): <https://www.clf.stfc.ac.uk/Pages/EPAC.aspx>
- [22] ELI Beamlines - Czech Republic (2010) : <https://www.eli-beams.eu/research/> ; Hideghéty, K., Cirrone, G.A.P., Parodi, K. et al. From ultrafast laser-generated radiation to clinical impact : a roadmap for radiobiology and cancer research at the extreme light infrastructure (ELI). Eur. Phys. J. Plus 140, 730 (2025). <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-025-06662-w>
- [23] S. Smartsev, Slava et al. Axiparabola: A Long-Focal-Depth, High-Resolution Mirror for Broadband High-Intensity Lasers, Opt Lett 44, 3414 (2019). Shaloo, et al. “Hydrodynamic Optical-Field-Ionized Plasma Channels,” Phys Rev E, 97, 053203 (2019).
- [24] A. Picksley et al, Meter-Scale Conditioned Hydrodynamic Optical-Field-Ionized Plasma Channels Phys. Rev. E 102, 53201, (2020): <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.102.053201>
- [25] Chapter 4 : High-gradient plasma and laser accelerators, R. Assman et al. CERN Yellow Reports, CERN-2022-001(2022) : <https://cds.cern.ch/record/2806277/files/document.pdf>
- Hideghéty, et al. From ultrafast laser-generated radiation to clinical impact: a roadmap for radiobiology and cancer research at the extreme light infrastructure (ELI). Eur. Phys. J. Plus 140, 730 (2025). <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-025-06662-w>
- [26] D. Völker, PETRA IV report, accelerating sustainability, (2025) https://petra4.desy.de/transfer_and_innovation/sustainability
- [27] Sarazin, et al. Refraction of light by light in vacuum. Eur. Phys. J. D 70, 13 (2016). <https://doi.org/10.1140/epjd/e2015-60428-5>