

R&D accélérateurs laser-plasma à l'IN2P3

Fazia Hannachi (CENBG), Nicolas Delerue (LAL), David Garzella (pour le LAL), Arnd Specka (LLR)

Organisation de ce document

Ce document présente les différentes activités et projets de R&D en accélération de particules par laser et plasma en cours à l'IN2P3. Dans un premier temps les enjeux scientifiques communs, les principes de physique et le contexte national et international seront présentés. L'intérêt de cette activité pour l'IN2P3 et les synergies potentielles sont également exposés dans cette partie.

Par la suite, quatre sections distinctes détailleront les projets des trois unités, actuellement actives dans cette discipline: le LLR, le CENBG et le LAL.

- GALOP (LLR): **G**roupe d'**A**ccélération par **L**aser et **O**ndes **P**lasma
- ENL (CENBG): **E**xcitations **N**ucléaires par **L**aser
- ESCULAP (LAL): **E**lectrons **C**oUrts Pour **L'**Accélération **P**lasma
- ETALON (LAL): **M**esure de paquets courts de particules chargées

Chacune de ces parties évoquera les enjeux scientifiques spécifiques, les détails du projet, le calendrier, l'état de l'art, les ressources humaines et financières disponibles et nécessaires, l'articulation avec d'autres projets et collaborations et les réalisations techniques envisagées. Une dernière section pointera les synergies potentielles entre ces activités, et les perspectives d'avenir.

Résumé

L'accélération de particules par des ondes plasma, et notamment celles créées par laser, est un domaine nouveau, très en amont de la R&D accélérateur. Ce domaine a connu des avancées remarquables lors de la dernière décennie et a engendré la floraison d'une multitude de projets expérimentaux partout dans le monde. Leur réalisation a été rendue possible par la démocratisation des lasers infrarouges, de haute puissance ($>10^{14}$ W) et ultra-courts ($<10^{-13}$ fs). En extrapolant cette évolution, il est vraisemblable que dans la prochaine décennie les progrès de l'accélération laser-plasma seront dominés par les lasers Petawatt et multi-Petawatt dont le laser APOLLON de CILEX, en France.

Par des mécanismes et dans des régimes plasma très différents il est aujourd'hui possible d'accélérer des électrons, des positrons, des protons et des ions légers à des énergies relativistes et ultra-relativistes sur des distances très petites et de créer des paquets de particules très brefs ($<10^{-14}$ s). A des horizons temporels différents, ces recherches visent des applications multiples comme les sources de lumière X, les accélérateurs et collisionneurs compacts, la radiothérapie et la physique nucléaire, pour n'en citer que quelques uns.

A présent, trois laboratoires de l'IN2P3 conduisent des activités de R&D expérimentale dans ce domaine (CENBG, LAL, LLR) et envisagent de les développer davantage auprès d'installations existantes ou futures. Les équipes de ces laboratoires sont impliquées dans des collaborations pluridisciplinaires nationales ou internationales et sont également intégrées voire parties prenantes dans des réseaux européens et dans des projets de plus grande envergure comme par exemple l'étude de design EuPRAXIA. Au sein du CNRS, la nature pluridisciplinaire de la R&D autour de cette thématique conduit à une fécondation mutuelle entre les communautés scientifiques traditionnellement dans le périmètre de l'IN2P3 (accélérateurs, particules, nucléaire) et celles de l'INP (lasers, plasmas, matière).

A ce stade, la participation de ces labos « pionniers » de l'IN2P3 dans la R&D d'accélération laser-plasma requiert des moyens humains, financiers et techniques relativement modestes, d'une part parce que l'instrument le plus onéreux (laser) est en général financé par d'autres moyens, de l'autre parce que les dispositifs expérimentaux sont comparativement simples.

Le groupe GALOP au LLR se concentre sur l'accélération d'électrons à haut gradient dans des plasmas sous-denses sur CILEX. Le programme expérimental de cette installation comprend l'étude l'accélération d'électrons du plasma en régime non-linéaire sur les deux faisceaux Petawatt ainsi qu'une première expérience à deux étages avec un injecteur et un booster tout optique afin d'atteindre des énergies dépassant 10 GeV. A ce titre, le LLR participe à des campagnes préparatoires et à la simulation de l'accélération, notamment de par sa contribution au développement du code plasma SMILEI.

L'équipe ENL du CENBG vise l'utilisation des faisceaux de protons et d'ions générés par laser pour l'étude des excitations et désexcitations des états nucléaires à durée de vie très courte dans un plasma. Afin d'améliorer et d'optimiser les propriétés des faisceaux d'ions produits par laser, encore insuffisants à présent, cette équipe conduit déjà des campagnes expérimentales de production d'ions sur les grands lasers existants. Ces campagnes préparent aussi les programmes de recherche sur CILEX et sur ELI-NP (Roumanie) auxquels le CENBG participera.

Le LAL se propose de poursuivre une approche alternative en mettant à profit sa compétence technique dans des photo-injecteurs (PHIL) et la présence du laser 100TW LASERIX (Université Paris-Sud) dans ses locaux. Le but est de créer une installation de test pour des paquets d'électrons courts, ESCULAP, en injectant un faisceau de 10MeV dans une onde plasma quasi-linéaire créée par ce laser. A moyen terme, cette installation a vocation à devenir une plateforme d'accélération laser-plasma et envisage une augmentation d'énergie d'injection et de la puissance laser. Ce groupe compte pouvoir contribuer ainsi au programme expérimental de CILEX dont le LAL est partenaire.

Le LAL poursuit également une R&D de diagnostic non-destructif de la mesure de durée de paquets de particules ultra-courts (ETALON) qui est d'un intérêt général pour les programmes cités ci-dessous et au delà de leur périmètre. Depuis quelques années déjà, le LAL a conduit des expériences de mesure de durée par rayonnement Smith-Purcell auprès de différentes installations, notamment au SLAC, et a affirmé sa compétence dans cette technique.

Enjeux scientifiques de l'accélération de particules par laser

Parmi les nouvelles technologies d'accélération de particules, l'utilisation d'ondes plasma excitées par des impulsions laser promet les gradients les plus élevés dépassant de plusieurs ordres de grandeur ce qui est réalisable à présent avec des cavités radio-fréquence (RF). Cette technique a été proposée en 1979 et réalisée pour la première fois dans les années 1990 par trois équipes dont une française comprenant le LLR [Ami1994].

Depuis, cette discipline a connu des progrès considérables avec l'avènement des lasers à impulsions ultracourtes (<100 fs) qui ont permis de réaliser des percées majeures. L'obtention de spectres d'électrons accélérés quasiment mono-énergétiques a notamment marqué un pas vers une éventuelle exploitation de ces techniques [Fau2004]. L'accélération directionnelle de protons à des énergies de plusieurs MeV en face arrière de cibles métalliques ou de plastique de quelques micromètres d'épaisseurs irradiées par des lasers de haute intensité a été observée au début des années 2000 [Cla2000, Mak2000, Sna2000]. Ces résultats ont suscité depuis un effort de recherche important en vue de comprendre et de contrôler les mécanismes d'accélération sous-jacents.

Aujourd'hui, l'accélération de particules par ondes plasma est un axe important de recherche et développement des grands laboratoires d'accélérateurs de particules dans le monde mais aussi dans des laboratoires universitaires Parmi eux (liste non-exhaustive):

- au SLAC avec FACET (2011): accélération d' e^- et e^+ par onde plasma excitée par faisceau e^- et e^+
- au DESY avec LAOLA (2014) et SINBAD (2016)
- au CERN avec AWAKE au SPS (2016): accélération par o. p. excitée par faisceau de protons
- au RAL avec VULCAN et ASTRA-GEMINI: accélération d'électrons et d'ions par laser
- au LBL avec le laser BELLA (2014): accélération d'électrons par o. p. excitée par faisceau laser
- Extreme Light Infrastructure (ELI): Nuclear Physics (Roumanie), Beam-Lines (Rep. Tcheque)

Une liste globale plus détaillée des activités laser-plasma se trouve sur le site du panel *Advanced and Novel Accelerators* de l'ICFA. L'enjeu principal à long terme dans le domaine des hautes énergies est de démontrer la faisabilité d'un collisionneur électrons-positrons avec des énergies dans le centre de masse au-delà du Tera-électron-volt (TeV). Pour cela, de nombreux défis restent à relever: au niveau des

technologies laser (amélioration des faibles taux de répétition, des faibles rendements de puissance « de la prise murale au faisceau »,...), au niveau de la physique de l'interaction laser plasma (production et accélération de faisceaux de bonne qualité).

L'ébauche d'une feuille de route vers un collisionneur plasma élaborée lors du récent *Plasma Collider Workshop* au LBL illustre les étapes à franchir et met en perspective les efforts coordonnés dans le monde (Fig. 1). Notons que la possible utilisation dans des sources de lumière de 5ème génération des paquets d'électrons ultra-courts, à fort courant crête produit des accélérateurs plasma compacts constitue une motivation forte du présent investissement de ce champ de R&D.

Plasma Roadmap for HEP - Example, based on personal view of a few persons

Drafted January 2016, Plasma LC Workshop at LBNL

As a start of discussion, not an end point of discussion. Cannot be used as an official roadmap, should trigger discussions and thoughts. Requires input, discussion, iteration, refinement, ... To be complemented by detailed R&D roadmaps from WG's. Based on discussions and input from R. Assmann, B. Cros, A. Specka, E. Geschwendtner, P. Muggli.

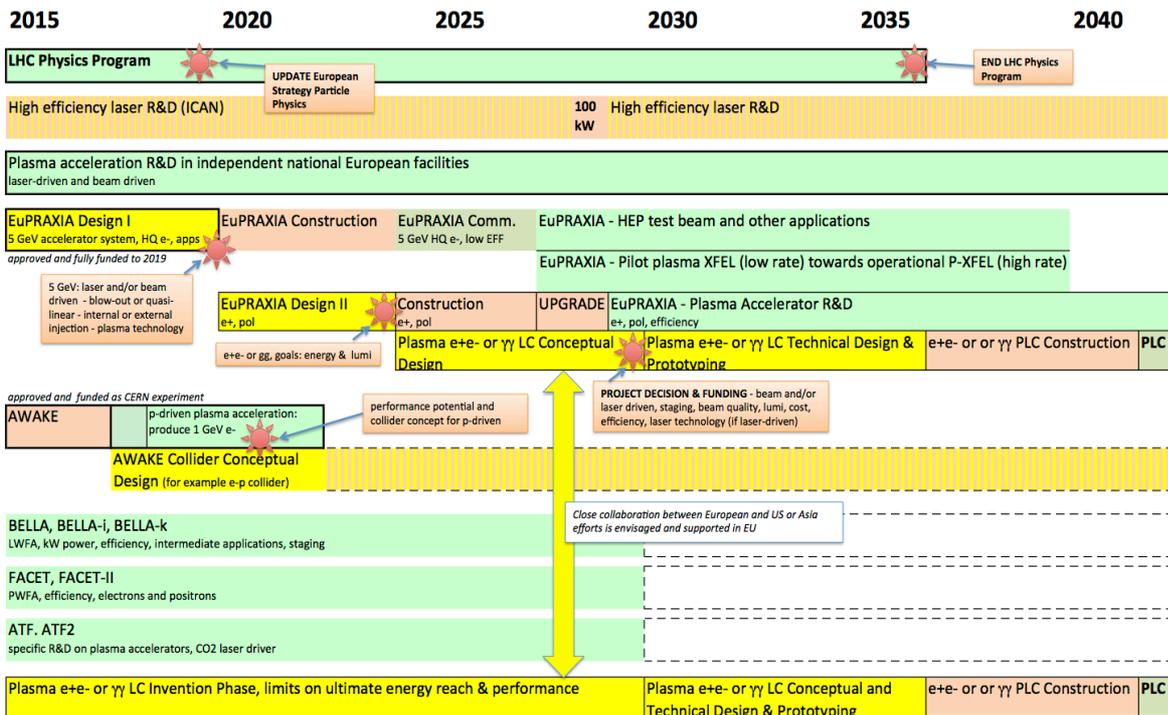


Figure 1: Ebauche d'une feuille de route vers un collisionneur plasma élaborée lors du "Plasma Collider Workshop" au LBL (Berkeley, 6-8.01.2016). Il s'agit d'un exemple basé sur la vue d'un groupe de personnes visant à déclencher une réflexion et une étude approfondies

A plus basse énergie, l'enjeu principal est le développement des accélérateurs d'électrons et d'ions du futur plus compacts, moins contraignants au niveau de la radioprotection,...pour les études de physique en laboratoire et pour les applications médicales (production d'isotopes, radiothérapie, hadronthérapie).

Principes physiques de l'accélération d'électrons par laser

L'accélération par plasma vise à dépasser la limitation du gradient accélérateur des cavités radiofréquences – de l'ordre de 50 MeV/m – en mettant à profit des champs électriques très élevés dans des ondes plasma. Dans l'accélération par sillage laser (*laser wakefield acceleration*, LWFA), la séparation spatiale des charges dans une onde plasma est induite par des impulsions laser ultra-brèves de quelques dizaines de femto-secondes et d'une puissance crête supérieure à environ 50 TW [Esa2009]. Alternativement, l'onde plasma peut être excitée par des paquets d'électrons très courts (FACET, SLAC, DESY, FRASCATI) ou par un faisceau de protons (AWAKE).

La plupart des expériences d'accélération par plasma utilisent le LWFA et sont conceptuellement très simples: Un faisceau laser femtoseconde ultra-intense est focalisé dans un gaz qui est ionisé immédiatement. L'impulsion laser se propage dans le plasma sous-critique et excite une onde plasma de vitesse de phase relativiste dans son sillage capable d'accélérer des électrons - relativistes également.

En LWFA on distingue deux régimes, le régime quasi-linéaire et le régime fortement non-linéaire [Mal2005]. Le régime linéaire se distingue par une séparation des charges longitudinale obtenue avec

des tâches focales relativement grandes et par un gradient accélérateur de quelques centaines de MeV/m à des dizaines de GeV/m. Le gradient dépend de la densité et de l'amplitude de l'excitation plasma. Des électrons relativistes injectés avec la bonne phase dans le plasma sont accélérés et aussi focalisés transversalement par le champ électrique de l'onde.

Dans le régime fortement non-linéaire appelé aussi régime de la bulle, ou encore régime du *blow-out (cavitation)*, l'impulsion laser est plus fortement focalisée et expulse les électrons du plasma: Une bulle quasiment sphérique d'ions immobiles est formée et se déplace dans le sillage du laser. Dans ce régime, les électrons du plasma même peuvent être happés par le champ électrostatique à symétrie centrale et seront accélérés et focalisés. La plupart des résultats emblématiques des dernières années ont été obtenus dans ce régime qui présente des gradients de plusieurs dizaines de GeV/m. Le processus d'injection peut être contrôlé par un deuxième laser, par ionisation ponctuelle d'atomes gaz avec un nombre d'électrons plus élevés que l'espèce majoritaire, ou encore par le contrôle de la variation longitudinale de la densité du gaz.

L'énergie finale dépend de la longueur d'accélération qui est limitée in fine soit par le déphasage soit par la déplétion de l'impulsion laser. En absence de guidage du laser, sa divergence limite davantage la longueur d'accélération. Le guidage dans un capillaire avec décharge a permis à l'équipe du LBL d'accélérer $4 \cdot 10^7$ électrons du plasma de 0 à 4.2 GeV sur 9cm (gradient 47 GV/m, $\Delta E/E=6\%$) avec le laser BELLA (1PW).

Il est à noter que le progrès vers des énergies plus élevées nécessite un plasma de moins en moins dense car la vitesse de phase de l'onde plasma est au premier ordre identique à la vitesse de groupe de l'impulsion laser dans le milieu (Fig. 2). L'accélération sur des longueurs de plus en plus longues est accompagnée par l'emploi d'optiques focalisantes à longueur d'onde de plus en plus grandes. Dans un hypothétique collisionneur laser-plasma il sera nécessaire de procéder à une accélération en étages (*staging*) pour répondre aux problèmes de déphasage et de déplétion du faisceau laser.

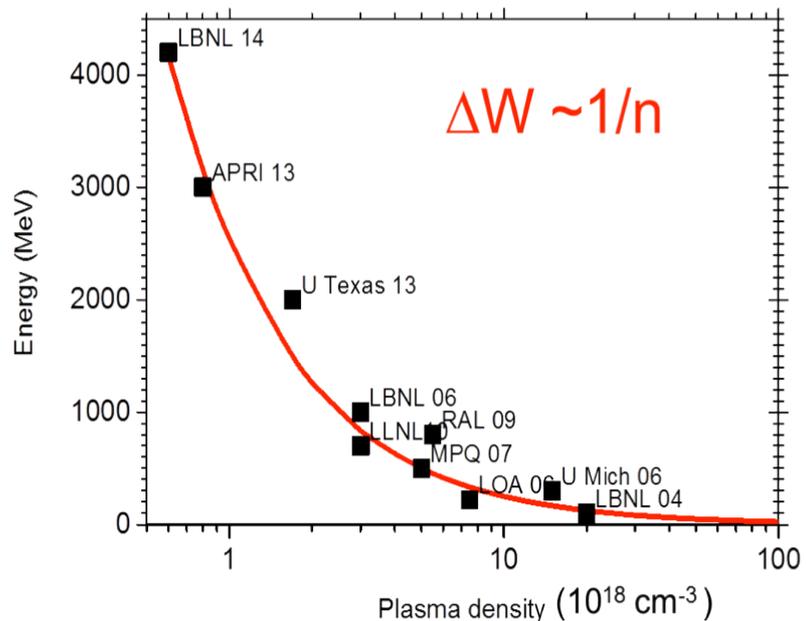


Figure 2: Variation de l'énergie finale avec la densité électronique du plasma.

Sous l'effet du champ électrique transversal et focalisant les électrons effectuent des oscillations bêtatronique à très courte longueur d'onde dans le plasma ce qui donne lieu à l'émission de rayon X intenses et brèves. Ce «rayonnement bêtatron» est déjà exploité comme diagnostics de l'onde plasma [Cor2011] ainsi que pour des applications de radiographie.

Principes physiques de l'accélération d'ions par laser

L'accélération des ions par laser est communément réalisée par l'irradiation d'une cible mince avec un laser ultra-court, fortement focalisé, à des intensités dépassant 10^{19} W/cm^2 . Le principal mécanisme d'accélération d'ions connu est le *Target Normal Sheath Acceleration* (TNSA) dans lequel les ions présents à la surface de cibles solides sont mis en mouvement par les champs électriques (TV/m) induits par les déplacements dans et hors de la cible des électrons accélérés dans le plasma [Wil2001]. L'intensité de ces champs décroît au fur et à mesure de l'accélération des protons (ions) hors de la cible ce qui donne à ces derniers une distribution en énergie continue (exponentielle décroissante) jusqu'à une énergie maximale.

Les protons (ions) sont émis dans des cônes de 30 à 45 degrés d'ouverture angulaire, leur énergie maximale ne dépasse pas la cinquantaine de MeV avec des lasers de classe petawatt [Mac2013, Bor2014] et le nombre total de protons accélérés sur toute la gamme en énergie du spectre est au maximum de l'ordre de 10^{12-13} par tir. L'énergie maximale des protons accélérés par TNSA dépend non seulement de l'énergie contenue dans le pulse laser mais aussi de la durée d'impulsion et de l'épaisseur des cibles utilisées (quelques nm à 10s de µm). Elle atteint presque la centaine de MeV pour les protons et quelques dizaines de MeV pour les ions légers.

Projets et réseaux français, européens et internationaux

Cette section se borne à présenter les projets et réseaux dans lesquels des équipes de l'IN2P3 sont impliqués.

CILEX/APOLLON: Un laser multi-petawatt

La France possède plusieurs grandes installations de lasers de puissance qui dépendent de l'INP du CNRS, du CEA et des établissements d'enseignement supérieur.

Le projet français le plus important est CILEX (*Centre Interdisciplinaire de Lumière Extrême*), un grand instrument de recherche installé sur le site de l'Orme des Merisiers (CEA), issu de l'ancien projet ILE (financé par un CPER) et augmenté d'un «équipement d'excellence» (EQUIPEX 15M€) associant 11 partenaires dont deux laboratoires de l'IN2P3 (LLR et LAL).

L'outil central de CILEX est le laser de puissance, ultra-intense APOLLON (*chirped pulse amplification*, Titane-Saphir, taux de répétition 1/min) avec ses deux faisceaux principaux F1 et F2 dont les caractéristiques maximales sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Faisceau	F1	F2	F3	F4
Energie maximale	150J (60J ^{*)}	15J	<200J	0.2J
Durée d'impulsion	15fs – 1ps	15fs -1ps	1ns	<20fs
Puissance crête max.	10PW(4PW)	1PW	–	10TW
Diamètre [mm]	400	140	–	100

^{*)} Dans la phase de démarrage (2018-2019) l'énergie de F1 sera limitée à 60J.

Les faisceaux sont distribués dans deux salles d'expériences distinctes, dites "de courte focale" (*short focal area*, SFA) et "de longue focale" (*long focal area*, LFA), toutes les deux radioprotégées et équipées de l'infrastructure de base, comme les enceintes à vide expérimentales, les optiques de transport et de focalisation des faisceaux lasers, et des systèmes d'alignement et de diagnostic pour les lasers et les particules chargées) résidents. L'implantation du laser et l'aménagement des salles d'expériences à l'Orme des Merisiers est actuellement en cours, la mise en service est prévue mi-2017.

Dans la SFA, des expériences avec les faisceaux fortement focalisés (intensité maximale $> 10^{22} \text{Wcm}^{-2}$) principalement sur des cibles solides viseront à accélérer des ions à des énergies relativistes et créer des impulsions rayons X intenses ultra-courts. Les deux faisceaux F1 et F2 sont focalisés dans une même enceinte expérimentale qui garantit une grande versatilité de configurations.

La thématique d'accélération d'électrons sera étudiée dans la LFA qui abritera deux enceintes distinctes pour les faisceaux F1 (PETULA) et F2 (LOLA). Cette configuration permettra de disposer de deux lignes de faisceau laser avec deux stations expérimentales indépendantes, mais aussi de réaliser l'accélération à deux étages avec transport magnétique des électrons de l'injecteur (station F2, régime non-linéaire, auto-injection) au booster (station F1, régime linéaire) à partir de 2019. Une autre thématique adressée dans la LFA est l'étude du rayonnement X produit lors de l'accélération et la conception de sources de rayons X compactes.

APOLLON entrera en phase de *pre-commissioning* début 2017, les premiers tirs de F2 dans les salles d'expériences sont prévus à partir de mi-2017. Le *commissioning* en fonctionnement multi-petawatt (F1 et F2) est prévu en 2018. Le schéma de fonctionnement prévoit des campagnes de 4 semaines dont deux semaines de tirs, en alternance dans chacune des salles pour un fonctionnement utilisateur de 28 semaines par an. Le temps de faisceau est attribué par l'installation sur avis d'un comité de programme et d'un comité technique. La politique d'attribution de temps de faisceaux au programme "blanc" et au programme "thématiques propres" est en cours d'élaboration.

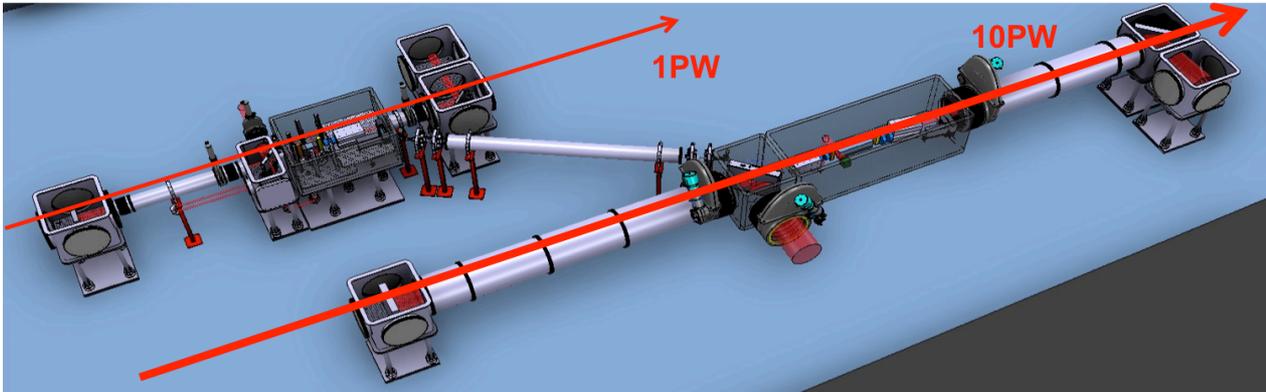


Figure 3: Implémentation des deux stations expérimentales pour les faisceaux F2 et F1 dans la LFA de CILEX.

DACTOMUS

Afin de préparer les expériences d'accélération d'électrons sur CILEX les laboratoires de l'IN2P3 travaillant sur la thématique (LLR et LAL), ont formé la collaboration DACTOMUS, avec d'autres acteurs locaux de la thématique (LPGP, CEA/IRFU, CEA/LIDYL), et dont le but est de tester la re-focalisation d'un paquet d'électron produit par LWFA afin de démontrer qu'un tel paquet peut être injecté dans un deuxième étage d'accélération. DACTOMUS montre la complémentarité des compétences entre les physiciens accélérateurs et les physiciens des lasers et des plasmas.

Cette collaboration a reçu plusieurs financements dont un de 50k€ du labex P2IO pour mettre en œuvre un triplet de quadripôles permanents destinés à cette re-focalisation. Ce triplet a été testé en 2015 sur le laser UHI100 (Saclay) avec des résultats intéressants même si la tâche focale obtenue n'était pas aussi petite que attendue d'après les simulations. Des travaux d'analyse sont en cours pour mieux comprendre les résultats de 2015 et deux nouvelles campagnes sont prévues en 2016.

ELI-NP

Avec ELI, les lasers de haute puissance entreront dans de nouveaux domaines de puissance et d'intensité: 10 PW et $> 10^{23} \text{ W / cm}^2$. Le développement de sources de rayonnement laser est l'objectif principal du pilier ELI-Beamlines de ELI, tandis qu'à ELI-NP les études mettront l'accent sur la physique nucléaire, la Physique des Hauts Champs électromagnétiques et la QED. Le système ELI-NP est composé de 2 chaînes d'amplification parallèles (longueur d'onde $\sim 800 \text{ nm}$, durée d'impulsion de $\sim 25\text{fs}$, contraste de pré-impulsion de $1 : 10^{12}$, rapport de Strehl de 0,7). Chaque bras possède trois choix de sorties :

- 10 PW avec un taux de répétition de 1 impulsion par minute
- 1 PW à 1 Hz
- 100 TW à 10 Hz

De plus un faisceau gamma très intense ($\sim 10^{13} \text{ } \gamma/\text{s}$, $\sim 0.1 \%$ *bandwidth*), avec $E_\gamma > 19 \text{ MeV}$, sera obtenu par diffusion Compton incohérente d'un rayonnement laser avec un faisceau d'électrons produit par un linac ($E_e > 700 \text{ MeV}$). Ce faisceau sera utilisable seul ou en conjonction avec les deux faisceaux lasers multi-petawatts ou avec deux faisceaux de particules accélérés par laser. Une telle combinaison de faisceaux est unique au monde en ouvrant notamment la possibilité d'études de physique avec des faisceaux et des cibles instables. Les premiers faisceaux d'ELI-NP sont prévus à partir de 2018.

Réseaux et programmes européens: EuCARD, EuroNNAC, EAAC, ARIES

Les programmes européens *Enhanced European Coordination for Accelerator Research & Development* EuCARD (FP7, 2009-2013) et EUCARD2 (H2020, 2013-2017) ont, dès leur création, intégré des JRA (joint research activities) sur l'accélération des particules par laser et plasma.

Le réseau EuroNNAC (*European Network on Novel ACcelerators*) créée au sein d'EuCARD a eu pour mission de fournir une plateforme d'échange et de coopération des acteurs européens dans le domaine des nouvelles techniques d'accélération bien au-delà de l'accélération laser-plasma. Ce réseau a lancé une série de colloques biennaux sur le modèle très réussi du *Workshop AAC* (aux Etats-Unis) afin d'unir la communauté en Europe sans pour autant exclure les acteurs internationaux. Deux colloques EAAC (*European Advanced Accelerator Concepts*) ont été organisés par l'INFN, le DESY et le CNRS sur l'île d'Elbe en 2013 (145 participants) et en 2015 (257 participants), le troisième est prévu en 2017. Ce colloque donne lieu à la publication d'actes avec comité de lecture (NIM-A special issue).

Le programme ARIES (H2020, Research and Innovation Action, 2017-2021) déposé récemment fait une place encore plus large à l'accélération par laser en consacrant un *workpackage* entier (8.5% de la subvention UE) à cette thématique. Deux tâches sont en lien direct avec le programme de CILEX (optimisation de l'injecteur et transport pour l'accélération à deux étages). ARIES continuera et amplifiera également le réseau (network activity) d'EuroNNAC.

EuPRAXIA – European Plasma Research Accelerator with EXcellence in Applications

Conformément à sa mission et fort de son succès, le réseau EuroNNAC2 a réussi à forger une collaboration européenne pour la proposition d'une installation de recherche dédiée aux accélérateurs plasma et leur applications. Le projet EuPRAXIA, préparé au sein d'EuroNNAC et financé par l'UE (H2020 Development of Research Infrastructures, 3M€, 2015-2019), a pour objectif de mener l'étude conceptuelle d'un accélérateur laser-plasma pour servir des applications directes des faisceaux produits et/ou comme source de lumière de 5ème génération. Une telle installation sera le pas intermédiaire vers un véritable accélérateur plasma puisque – en affichant la mission de servir aussi des applications – l'accent est mis sur la fiabilisation et l'optimisation de cette technique. Ce projet fédère 16 laboratoires et instituts de 5 états membres de l'UE et 17 partenaires associés internationaux. La très forte présence de la France (CNRS:LLR, LOA, LPGP, LULI) - CEA: SACM- SOLEIL) et son implication se situe à tous les niveaux de responsabilité. Un workshop de lancement aura lieu en juillet 2016 à Pise (Italie) pour préciser le cahier des charges, les paramètres visés, et les applications probables.

L'intérêt et les perspectives pour l'IN2P3

En s'investissant dans les projets pluridisciplinaires de l'accélération de particules par laser, les équipes de l'IN2P3 jouent un véritable rôle de tête de pont dans une discipline en plein essor. Leur intégration dans des programmes de recherche nationaux et internationaux dépasse la simple veille technologique car ils apportent leur culture de la mesure quantifiée par les outils statistiques et des collaborations durables à une communauté scientifique dominée par la primauté du résultat emblématique et de la diversification thématique.

Ce rôle de pionnier demande à présent un effort très limité à l'échelle de l'institut et largement partagé au niveau des investissements avec d'autres instituts du CNRS (INP, INSIS). L'apport de savoir faire en techniques de détection des particules et nucléaire amplifie le potentiel scientifique des installations existantes ou futures. De ce fait, il existe une réelle opportunité de participation d'autres laboratoires de l'IN2P3 par la valorisation des compétences existantes.

La présence de l'IN2P3 permet l'acquisition et le partage de compétences techniques (lasers, plasmas, calcul parallèle, mesure sub-pico-seconde) et une ouverture scientifique sur des thématiques à forte valeur ajoutée (interaction laser-plasma, sources de lumière, physique nucléaire dans des conditions extrêmes).

S'associer au sein de l'IN2P3 à des grandes installations génère une synergie en ce qui concerne le soutien technique pour la proposition et conduite de campagnes d'expériences et sur l'appui coordonné des demandes d'accès aux installations.

Cependant, l'intérêt accru que les grands centres d'accélérateurs (CERN, DESY, SLAC) portent à l'accélération par ondes plasma - qu'elles soient excitées par laser ou par d'autres moyens - doit interroger l'IN2P3 sur l'adéquation et l'emploi des moyens déployés pour jouer un rôle de premier rôle dans cette évolution.

Accélération plasma d'électrons à des énergies ultra-relativistes (LLR)

Enjeux scientifiques

Les objectifs scientifiques du GALOP (Groupe d'Accélération par Laser et Onde Plasma) du LLR sont orientés vers une application de l'accélération laser-plasma à la physique des hautes énergies que ce soit dans la perspective d'un collisionneur ou dans le but d'une exploitation – plus accessible – pour des faisceaux test. En découplant la question de la technologie laser de la problématique propre de la production et de l'accélération de faisceaux de bonne qualité, on sépare le volet purement technologique de la physique sous-jacente.

Dans ce contexte général, le LLR joue un rôle important dans un domaine en pleine éclosion, à travers sa participation dans les projets expérimentaux en cours et de part de son implication dans la coordination technique de la LFA du projet [CILEX](#) et dans l'étude de conception européenne [EuPRAXIA](#), dans le réseau EuroNNAC et le futur programme H2020 ARIES.

Projet

Le projet à moyen terme de GALOP se décline en quatre volets connexes dont la participation dans le programme d'accélération d'électrons dans CILEX occupe la place centrale:

- Expériences LWFA à un étage et à deux étages sur CILEX-APOLLON
- Expériences LWFA à un étage sur des lasers intenses de classe 100TW
- Simulation de LWFA en vue de dimensionnement et de l'analyse des expériences
- Applications HEP des faisceaux issus d'un accélérateur plasma en lien avec EuPRAXIA

L'investissement dans la phase de conception et de construction de la LFA de CILEX constitue un atout dans l'accomplissement du programme scientifique car il a permis de donner à la configuration l'inflexion nécessaire à des expériences d'accélération d'électrons.

Expériences LWFA à un étage et à deux étages sur CILEX-APOLLON

Dans le programme d'accélération d'électrons de CILEX le LLR contribuera principalement sur le volet instrumental de la caractérisation des faisceaux d'électrons en termes d'énergie, divergence, émittance. A partir de l'arrivée des faisceaux laser fin 2017 (F2, 1PW) et courant 2018 (F1, 2–4PW, 10PW à terme), ce programme se décline en plusieurs étapes: D'abord nous conduirons en collaboration avec les laboratoires partenaires de CILEX des expériences exploratoires dans le régime non-linéaire (avec auto-injection). Différentes techniques de contrôle de l'injection des électrons (ionisation des mélanges, rampe décroissante en densité) seront testées afin d'optimiser les paramètres de l'injecteur. Par la suite, la préparation et la démonstration de l'accélération en deux étages constitueront l'activité majeure en collaboration notamment avec l'IRFU/SACM, l'IRFU/LIDYL, le LULI et le LPGP. Le détail du planning prévisionnel de l'exploitation de la LFA de CILEX tel qu'il a été présenté au SAC 2015 (*scientific advisory committee*) est montré dans le tableau 2 (en prenant compte le décalage de 12 mois de l'arrivée du F2 dans la LFA dû au retard dans la livraison des lasers de pompe d'APOLLON.)

A l'avenir, l'activité principale du LLR portera sur:

- la finalisation du design des enceintes expérimentales
- la coordination technique de la LFA de CILEX et l'animation du groupe de travail
- le développement des diagnostics des faisceaux électrons à savoir d'un spectromètre compact à large-bande en impulsion, à imagerie ainsi que des méthodes de déconvolution associées
- le développement de mesure de l'espace des phases transversal (émittance) du faisceau issu de l'injecteur par des méthodes directes (*pepper-pot*)

RUN	2017				2018				2019				2020				2021			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Installation																				
Diags e																				
LOLA exfoc1 /2																				
LOLA injector																				
Synchro e																				
Transport e																				
PETULA guide																				
LOLA & PETULA 2 stages																				
TOTAL runs/year	-	-	-	-	1	-	-	-	3	-	-	-	5	-	-	-	6	-	-	-

Figure 4: *Planning prévisionnel de l'exploitation de la LFA de CILEX décalé de 12 mois par rapport à celui présenté au SAC en 2015.*

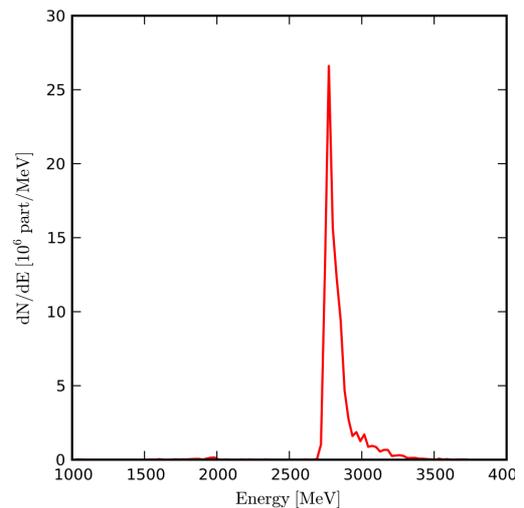


Figure 5: *Spectre en énergie d'électrons simulé avec CALDER-CIRC pour un faisceau 0,6PW après 20mm de propagation dans un plasma homogène.*

Expériences LWFA à un étage sur des lasers intenses disponibles

Durant la phase préparatoire de CILEX et même durant l'exploitation il est prévu de tester des concepts d'expériences et des instruments (sources plasma, diagnostics) sur des installations laser de plus petite taille mais à plus haute cadence de tir. Cette démarche est adoptée par toutes les équipes de la discipline et permettra de constituer des collaborations durables avec une répartition des tâches selon les compétences de chaque partenaire. Le LLR contribuera à la suite de DACTOMUS sur le laser UHI100 du LIDyL, notamment en 2016 à travers une campagne de tests de quadripôles permanents ultra-compactes déjà existants au LLR. Par la suite, il est envisagé de développer des techniques de caractérisation des faisceaux plus évoluées comme par exemple la mesure de l'émittance transverse.

A l'avenir, l'activité principale du LLR dans ce volet portera sur:

- les tests des quadripôles existants compacts sur UHI100
- l'évaluation de la possibilité de mesure de l'émittance transverse sur UHI100

Simulation de LWFA en vue de dimensionnement et de l'analyse des expériences

Avec l'arrivée d'un ingénieur de recherche en calcul intensif (Arnaud Beck, A.B.) en 2013, le groupe GALOP a enfin commencé à se doter d'une autonomie dans la simulation de plasma. De formation physicien des plasmas numéricien, A.B. a mis en place au LLR la modélisation des premières expériences sur CILEX par des codes PIC (*particle-in-cell*) et quasi-statiques existants. Sur ce sujet, il a également co-encadré deux stages d'étudiants polytechniciens. Les codes de simulation d'interaction laser-plasma sont de par leur nature fortement parallélisés ce qui a nécessité la mise en place d'un cluster parallèle (Jolly Jumper), financé sur plusieurs années principalement par la dotation de l'IN2P3. La figure 4 montre une simulation CALDER-CIRC (code PIC à symétrie axiale) de l'accélération d'électrons dans le régime non-linéaire avec auto-injection dans un plasma homogène (sans guidage, $n_e = 8.6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) par une impulsion laser de 25 fs et 0.6 PW ce qui correspond faisceau F2 d'Apollon légèrement plus long par rapport aux performances nominales. On observe l'injection propre et l'accélération de $2 \cdot 10^7$ électrons (300pC) à une énergie proche de 3 GeV avec une faible dispersion en énergie (3%).

De plus, il est un des développeurs principaux du nouveau code PIC SMILEI (open-source, orienté objet) dont la version 2.0 a été rendu public en 2015. Cette collaboration entre le LULI, le LLR, la Maison de la Simulation et l'IDRIS vise faire de SMILEI l'outil de simulation standard pour toute l'installation CILEX. A.B a notamment implémenté l'équilibrage de charge CPU dans ce code parallélisé, aspect particulièrement important dans la simulation performante de la LWFA où les nombres de pseudo-particules varient fortement d'une cellule à l'autre.

A l'avenir, l'activité principale du LLR dans ce volet portera sur

- l'étude systématique des expériences LWFA à une et à deux étages dans CILEX et dans campagnes préparatoires en vue de la préparation et de l'analyse des données
- l'implémentation de la symétrie axiale dans SMILEI ce qui un sujet de l'ANR STILEX dont il est co-dépositaire et qui fera l'objet d'une thèse de doctorat.

Applications HEP des faisceaux issus d'un accélérateurs plasma en lien avec EuPRAXIA

Dans l'étude de design EuPRAXIA, et outre la fonction de coordinateur adjoint (A.S.) du projet, le LLR a la charge de la coordination du lot de travail "applications HEP et autres" (A.S.). L'objectif est d'identifier un nombre restreint d'applications pouvant bénéficier des propriétés particulières d'un faisceau d'électrons de quelques GeV issu d'un tel accélérateur. Notamment, l'utilisation comme faisceau test pour le développement (et éventuellement la calibration) des détecteurs de particules et de leur instrumentation associé est un exemple particulièrement en synergie avec les thématiques de l'IN2P3. Un workshop EuPRAXIA sur les applications est prévu en octobre 2016 à l'Ecole polytechnique afin de recueillir les besoins en faisceau test des équipes entre autres dans les laboratoires de l'IN2P3 qui travaillent sur le développement des détecteurs.

A l'avenir, l'activité principale du LLR dans ce volet portera sur

- l'étude de la faisabilité de simulation d'une gerbe électromagnétique par un paquet d'électrons LWFA après conditionnement par une ligne de transport magnétique
- l'étude de la faisabilité d'une mesure calorimétrique de l'énergie d'un paquet
- l'animation et coordination du groupe de travail "applications HEP" (WP7 d'EuPRAXIA)

Genèse et calendrier

Fort de son implication historique dans une des toutes premières expériences d'accélération laser-plasma (ALP) à l'Ecole polytechnique en 1990-1996 sur le *beat-wave* et *wakefield* [Ami1994], le LLR a redémarré cette activité sous l'encouragement de l'IN2P3 en 2006 avec un effectif très réduit.

Dans la période 2008–2011, le LLR à collaboré principalement avec le groupe SPL du LOA (ENSTA) sur des expériences d'accélération en régime bulle avec injection contrôlée par laser, avec le laser dit «de la salle jaune». La contribution originale était la conception et réalisation d'un spectromètre magnétique à imagerie (doublement focalisant) qui a permis de mettre en évidence la faible dispersion en impulsion des électrons (<1% à 190 MeV/c) [Rec2009]. D'autres campagnes ont permis de valoriser cet instrument et d'améliorer sa performance.

Le LLR est impliqué depuis 2008 dans le projet français CILEX, d'abord en contribuant sur la conception du système de contrôle/commande et de l'acquisition des données (ingénieur informatique). Le LLR a notamment impulsé l'utilisation du système TANGO dans tout le projet.

En 2012, A.S. a été nommé coordinateur de la LFA de CILEX. Cette charge consiste en la conception de la configuration de base permettant l'exploitation pour des expérience d'accélération d'électrons tout en ménageant la flexibilité nécessaire pour accommoder une variété d'expériences, notamment en mode *research facility*. Dans cet fonction, A.S. anime un groupe de travail composé de membres partenaires de CILEX (LULI, LPGP, CEA/LIDyL, IRFU/SACM, Synchrotron SOLEIL, LAL) qui participeront au programme «électrons».

Sur le volet technique, le service mécanique du LLR a également pris en charge la conception des enceintes expérimentales (pour les deux faisceaux F1 et F2). Cette conception est proche de sa conclusion, les appels d'offres devant être publiées à la mi 2016.

Le groupe GALOP a présenté son activité à 6 reprises au conseil scientifique du LLR, en 2006 pour le démarrage de l'activité, en 2008 et en 2010 pour les campagnes au LOA, en 2011 pour une contribution technique sur CILEX (réseau de contrôle commande), en 2013 pour la coordination et la conception de l'installation dans la salle longue focale (LFA) de CILEX et en 2014 pour la participation à EuPRAXIA.

De 2013 à 2015, l'activité de conception de LFA a été évaluée à trois reprises par le TAC (*technical advisory committee*) de CILEX. Ce comité international composé d'experts extérieurs a validé les choix techniques élaboré par le groupe de travail LFA, tout en soulignant le faible effectif du groupe.

Le LLR participe également à des expériences préparatoires (DACTOMUS). Les aimants de la ligne de transport ont été caractérisés sur un banc de mesure pour les aimants permanents compacts développés auparavant dans le but d'acquérir la compétence de métrologie des spectromètres qui est

centrale dans la conception mais aussi dans l'analyse des données. L'application d'une méthode rigoureuse propre à l'IN2P3 constitue un vrai atout lorsque l'on vise des études systématiques de l'accélération plasma.

Le LLR a été acteur dans la construction du réseau EuroNNAC (Henri Videau), au sein de EuCARD (2009-2013), puis dans sa continuation EuroNNAC2 (A.S.) au sein d'EuCARD2 (2013-2017). Ce réseau s'est défini comme mission de fédérer de la communauté européenne (voire internationale) autour d'un projet européenne d'accélérateur plasma pour la recherche. Le financement par l'UE de l'étude conceptuelle EuPRAXIA (2015-2019) dont Arnd Specka est le coordinateur adjoint est l'aboutissement d'un effort collectif. Le rôle important joué par la France est aussi le résultat de la forte visibilité des équipes françaises ainsi que du potentiel de CILEX.

État de l'art

Dans les prochaines années, le laser APOLLON de CILEX sera le seul laser disposant de deux salles d'expériences et de deux faisceaux et dont un à terme possédant l'énergie et la puissance nécessaire pour démontrer une accélération à des énergies au delà de 10 GeV. Bien que le but du programme expérimental n'est pas l'expérience «*golden shot*», repousser la barrière d'énergie est un élément de communication non-négligeable qui facilitera l'exploration systématique de la LWFA dans les deux régimes. Le principal risque est le cumul des retards du projet dû au sous-effectif chronique et la complexité de l'installation. Notons que la récente découverte de la sous-performance des lasers de pompe n'impactera ni à court ni à moyen terme le programme de la LFA puisque l'accélération d'électrons nécessite une intensité maximale moindre que par exemple l'accélération des ions (adaptation de la taille de la tache focale).

L'accélération à deux étages avec ligne de transport est conditionnée par la nécessité de contrôler le faisceau incident et sortant. Le projet CILEX se distingue par la configuration injecteur-accélérateur «tout-plasma» qui permettra aussi d'étudier des nombreux problèmes techniques posés par la nécessité de *staging*, l'accélération en plusieurs étages familière des LINACs RF.

Ressources et moyens

Ressources humaines: En 2016 sont ou seront engagés sur l'activité laser-plasma au LLR:

- 1 CR permanent (Arnd Specka): 80%
- 1 IR informatique permanent (Arnaud Beck) : 80%
- 1 IE mécanique permanent (Antoine Cauchois): 20%
- 1 IR mécanique, CDD jusqu'à fin 2016 (Julien Prudent): 100% (entièrement financé par l'EQUIPEX)
- 1 CDD chercheur (postdoc, 2a): à recruter en 2016 (thématique CILEX, IN2P3)
- 1 CDD chercheur (postdoc, 2a): à recruter en 2016 (financement EuPRAXIA, WP7: applications HEP et autres, en partage avec U Oxford (UK))

Note: Au LAL, 1 CR permanent (Nicolas Delerue, LAL) contribue à 10% au projet CILEX LFA.

Dans les années à venir, il est primordial que le groupe GALOP dispose des moyens pour tirer profit de son investissement technique dans la phase de construction de CILEX. Pour cela il est indispensable de procéder au recrutement d'au moins un chercheur (CR) permanent dans les deux ans. Ceci permettra également de partager les responsabilités qui sont actuellement concentrées sur une personne (A.S.). Aussi, il faut un soutien technique pour mener à bien les développements techniques pour et l'installation des instruments sur CILEX et les lasers intenses disponibles. Pour cela, il faut une participation pérenne d'un AI (50%) et d'un IE ou IR (50%) en instrumentation avec accent sur la conception mécanique et opto-mécanique.

Ressources financières : Le budget global de CILEX est 20M€ pour la phase construction (15M€) et fonctionnement (5M€) dont 2,1M€ pour les infrastructures de la zone expérimentale LFA. Ces ressources sont gérées par le projet, les dépenses afférentes aux développements sont soumises à autorisation par le projet. La participation de l'IN2P3 au projet CILEX n'est pas financière mais seulement sous forme de moyen de personnel.

- S.E. GALOP (IN2P3): 38000€ (overhead LLR soustrait)
- EuPRAXIA (UE, INFRADEV): 120000€ (overhead CNRS soustrait, overhead LLR non soustrait)
- EuroNNAC2 (UE, networking activity): 36000€ (overhead LLR soustrait)

- Demandes en cours:
- ARIES (UE, H2020, 2017-2021): 117000€ (overhead CNRS et LLR non soustrait)

Réalisations techniques

La dotation de l'IN2P3 des années 2008 à 2013 permis d'acquérir une partie des équipements généraliste (matériel optique et opto-mécanique, caméras CCD à grande dynamique, matériel électronique, alimentations) et de réaliser deux bancs de mesures magnétiques. Ce matériel qui confère déjà une certaine autonomie dans la proposition d'expériences sera à compléter en vu des expériences futures.

Pour les expériences sur CILEX/APOLLON et sur lasers existants (UHI100) nous envisageons les réalisations techniques suivantes dans les prochaines années:

- enceintes d'interaction: en sous-traitance y compris le dossier de fabrication, financé par CILEX
- spectromètre magnétique et ligne de transport (en forte collaboration avec l'IRFU/SACM pour les parties dynamique des faisceaux et magnétisme), sous-traitance de la fabrication
- évolution des deux bancs de mesures magnétiques existants (sonde Hall et fils vibrant) en interne
- moniteurs de profil de faisceau et détecteurs optiques de spectrographes (écran scintillant et caméra) étude en interne, sous-traitance de la fabrication
- prototype rudimentaire d'un calorimètre de faisceau (interne)

Auto-analyse SWOT

Forces

- L'expertise du LLR dans la conception des diagnostics des électrons accélérés, des dispositifs auxiliaires et des outils d'analyse des données
- L'expertise dans l'utilisation et dans le développement des codes de simulation plasma (PIC)
- La capacité à dialoguer au sein d'un programme pluridisciplinaire avec "laseristes" et "plasmiciens"
- La position centrale dans la partie LFA du projet CILEX
- La volonté affichée de la direction de CILEX de favoriser un programme de R&D durable sur l'accélération d'électrons

Faiblesses

- La faible cadence de tir du laser APOLLON limitera les études de fiabilisation nécessitant une statistique importante.
- Le faible effectif actuel du groupe GALOP du LLR conduit à une concentration des beaucoup responsabilités sur une seule personne et limite le temps disponible pour le travail de R&D.
- La moindre légitimité dans la physique des plasmas et des lasers.

Opportunités

- Une bonne visibilité et intégration dans les réseaux et projets européens (EuroNNAC, EuPRAXIA) qui donne accès à des financements complémentaires (dont environ 2a de postdoc en 2016-2019).
- Valorisation des techniques de détection et d'analyse nouvelles (dans la communauté laser-plasma).
- Ouverture vers des développements techniques pertinentes mais de taille accessible au LLR
- Collaborations établis avec des partenaires locaux avec des lasers de puissance (centrales de proximité)
- Le démarrage du programme d'accélération d'électrons ce CILEX n'est pas mis en danger par une énergie réduite des impulsions laser.

Menaces

- L'accès aux groupes techniques du LLR a été réduit au cours des dernières années à cause de l'effectif fortement diminué notamment dans le service mécanique.
- La charge croissante des responsabilités administratives dans des multiples projets dus au mode de financement diminue le temps disponible pour la recherche.
- Le groupe rencontre des difficultés de recrutement de jeunes chercheurs compétents dans le domaine à cause d'une forte compétition nationale et internationale dans la discipline.
- L'attribution des moyens par le projet CILEX pour la conception et la réalisation technique de la LFA est limitée par les sous-effectifs du projet ainsi que

- Le retard accumulé par le projet CILEX menacera à terme la position dominante de CILEX avec la disponibilité d'autres lasers multi-Petawatt.
- Le fonctionnement de CILEX en infrastructure de recherche peut menacer l'accès privilégié au temps laser.

ENL: Excitations Nucléaires par Laser (CENBG)

Enjeux scientifiques

Notre groupe étudie depuis 2002 des modes d'excitation et de désexcitation originaux (ou rares) du noyau liés au couplage noyau - cortège électronique dans les plasmas chauds et denses [site web CENBG]. Ces plasmas sont des milieux caractérisés par des degrés d'ionisation et des températures élevées (plusieurs centaines de eV) et où règnent des champs électriques et magnétiques élevés (plusieurs milliards de V/m et plusieurs centaines de Teslas). Ces dernières années ont été dédiées au dimensionnement d'expériences sur les futures installations multi-pétawatt de haute cadence, comme APOLLON en France ou ELI-Nuclear Physics en Roumanie [thèses M Comet et D Denis-Petit, Univ Bordeaux 2014].

Ces programmes théoriques et expérimentaux sont menés dans le cadre de collaborations interdisciplinaires nationales et internationales. Les expériences prévues de mesures de taux d'excitation et de réactions nucléaires en milieu plasma nécessiteront de faire interagir un faisceau intense de particules de haute énergie avec une cible plasma de très courte durée de vie (échelle de la ns). A ce jour les accélérateurs de particules traditionnels n'ont pas les caractéristiques requises en termes de flux de particules et de synchronisme avec des cibles plasma. Les lasers ultra-intenses produisent des particules de haute énergie en grande quantité qui peuvent être synchronisés avec une impulsion laser générant le plasma et ouvrent ainsi la porte aux études expérimentales en environnements extrêmes (hautes températures et hauts champs). Cependant, les faisceaux de protons et d'ions produits dans l'accélération laser plasma n'ont pas encore les qualités requises par les expériences. Il est indispensable d'optimiser le nombre, l'énergie et la variété des ions accélérés en vue de produire les noyaux d'intérêt avec des statistiques suffisantes. Ceci passe par l'investigation de nouveaux scénarios d'accélération et l'étude détaillée de tous les paramètres de l'interaction laser matière.

Le principal mécanisme d'accélération d'ions connu à partir de cibles solides (CH, Al ... de quelques μm) est le TNSA mais il existe d'autres processus d'accélération d'ions avec des cibles de faibles dimensions plus complexes à mettre en oeuvre et à renouveler à chaque tir laser [Bor2014]. Le protocole requis s'il est couramment réalisé sur les lasers monocoups (cadence < 1 tir/ 30 min) n'est pas adapté aux tirs lasers à haute cadence (cadence > 1 tir/min).

Dans ce cas, des cibles sous forme de jets de gaz semblent très prometteuses et la mise en route future de lasers à haut taux de répétition a ainsi initié les recherches autour de l'accélération d'ions à partir de jets de gaz denses. Plusieurs modes d'accélération volumiques dans des cibles de jets de gaz de très haute pression sont prédits. Dans ces modes le laser peut pénétrer profondément dans le volume cible et induire des déplacements d'électrons. Ces derniers sont capables d'accélérer de grandes quantités d'ions à des vitesses plus élevées que celles observées dans le TNSA (*'hole boring'* ou *shock acceleration*).

Des études théoriques pionnières sont menées par nos collaborateurs du CELIA (UMR5107 - Université de Bordeaux / CEA / CNRS) pour définir les paramètres de l'interaction qui permettent d'optimiser l'énergie et le nombre d'ions accélérés. La figure 5 résulte de simulations PIC à 2 dimensions dans lesquelles une impulsion laser ($E=600\text{J}$, durée= 700ps , $I=5 \cdot 10^{20} \text{ w/cm}^2$, focalisée sur une tache focale de $6\mu\text{m}$ de diamètre) est envoyée sur un jet de gaz (Hydrogène) parallélépipédique ($160 \times 160 \times 500 \mu\text{m}^3$). Elle représente l'espace de phase des protons à différents instants après l'arrivée du laser sur la cible.

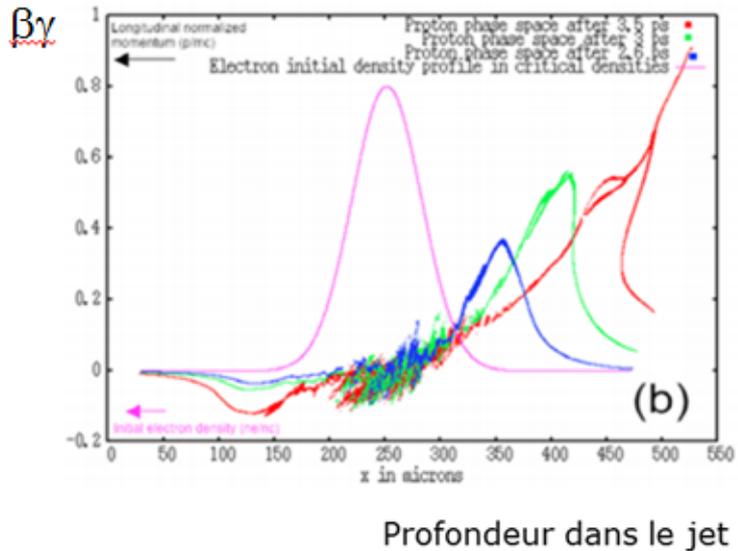


Figure 6 : Simulations PIC 2D de l'évolution de l'espace des phases de protons accélérés dans un jet de gaz par un laser

La courbe violette représente la densité électronique du jet de gaz à l'instant initial en unités de densité critique ($n_c = 1,1 \cdot 10^{21} / \lambda^2 (\mu\text{m})$). A $t=3,5$ ps après le début de la simulation, les protons atteignent leur énergie maximale (courbe rouge) de l'ordre de 328 MeV [Hum2013].

Les données expérimentales sont encore rares, les premiers résultats publiés ont été obtenus aux USA avec un laser CO2 et rapportent des spectres de protons avec une énergie moyenne de l'ordre du MeV et une dispersion de $\sim 5\%$ [Pal 2011].

Projet

L'objectif principal du projet est de trouver les conditions laser et de jet de gaz qui permettent l'accélération de paquets d'ions intenses dans les gammes d'énergie de la physique nucléaire (quelques MeV par nucléon) à haut taux de répétition. Pour cela nous proposons dans le cadre d'une collaboration CENBG, LULI, CELIA et l'IFIN-HH Roumanie de tester les prédictions de simulations Particle In Cell développées par l'équipe de V Tikhonchuk du CELIA (CNRS-CEA-Univ Bdx) dans lesquelles des protons et des ions sont accélérés par chocs non collisionnels à partir de jets de gaz denses, présentant des gradients de densités structurés par des buses de dimensions micrométriques [Hum2015]. Les différents paramètres de l'interaction (énergie laser, durée d'impulsion, densité et gradient de densité de la cible, ...) seront dans un premier temps optimisés dans les conditions expérimentales accessibles auprès des lasers mono-coups existants (proposition d'expérience sur le laser PHELIX/GSI en 2016). A moyen terme, ces études seront menées de façon plus exhaustive avec les lasers à haut taux de répétition APOLLON en IDF et CETAL/ ELI en Roumanie.

Ce projet comporte plusieurs volets en cours de réalisation : L'optimisation des simulations PIC en tenant compte des caractéristiques réelles des lasers utilisés et des cibles gazeuses (CELIA), la mise au point de jets de gaz supersoniques et denses, de dimensions micrométriques (LULI-CENBG), la mise au point de diagnostics adéquats pour mesurer les propriétés des faisceaux d'ions produits (IFIN-HH et CENBG).

Production scientifique attendue: papiers dans revues à comité de lecture, présentations dans conférences internationales, formation d'étudiants à la recherche.

Expertise unique au sein de l'IN2P3 sur l'accélération d'ions par laser dans la gamme d'énergie MeV - 100 MeV.

Genèse et calendrier

Depuis le début de nos activités au CENBG, nous avons adopté une stratégie de recherche basée en partie sur la caractérisation et l'optimisation de faisceaux de particules énergétiques produites lors de l'interaction laser intense - matière. Le groupe a ainsi participé à de nombreuses études d'optimisation de flux de particules de différentes natures (photons, électrons, protons) dans des gammes d'énergie allant typiquement de la centaine de keV à quelques dizaines de MeV d'intérêt pour produire des

noyaux dans des états excités via des mécanismes d'excitation ou de réactions nucléaires. Ces travaux ainsi que ceux d'instrumentation associés ont donné lieu à une quinzaine de publications dans des revues à comité de lecture et à l'encadrement de 3 thèses de doctorats dans le groupe [site web CENBG]. Ils ont fait l'objet de diverses évaluations au sein du conseil scientifique du CENBG et de deux comités HCERES, les conclusions étant à chaque fois positives à la fois sur les travaux accomplis et les projets à venir.

Ressources et moyens

Le seul laboratoire de l'IN2P3 impliqué dans l'accélération d'ions par laser est le CENBG via les thématiques scientifiques du groupe Excitations Nucléaires par Laser (ENL). Le personnel du laboratoire engagé dans cette thématique scientifique par laser comprend au 1er mai 2016 :

1 Chercheur : F.Hannachi

3 Enseignant chercheurs : F. Gobet, M.Tarisien, M. Versteegen

1 CDD 2 ans in2p3 en cours de recrutement , 2016-2018

Du personnel ITA des services du CENBG : Sébastien Leblanc (service instrumentation), Arnaud Tizon et Abdel Rebi (service électronique), et le soutien du service Mécanique

Nous bénéficions du soutien en missions du LIA Franco-Roumain COSMA et des accords de collaboration IN2P3/IFIN-HH. Ce soutien est très important car il permet de consolider notre collaboration avec les équipes de l'IFIN-HH qui sont en charge de la construction et de l'exploitation de la facilité européenne ELI-NP.

L'Europe soutient aussi indirectement nos thématiques via le réseau LASERLAB qui prend en charge une partie des frais de missions lorsque nous faisons une expérience sur un laser européen (jusqu'à 3-4 missions prises en charge par laserlab au GSI-PHELIX). En France, environ 5k€ de budget sont alloués par expérience au LULI.

Pour l'avenir proche (2017-2019) nous demanderons une demie allocation de thèse en cofinancement avec la Région aquitaine, ainsi que le recrutement d'un CR sur nos thématiques.

Réalisations techniques

Nous désirons utiliser l'émission gamma d'échantillons d'activation à vie courte pour caractériser in situ les paquets d'ions produits à chaque tir. Jusqu'ici la faible cadence de tir des lasers laissait le temps d'utiliser des techniques d'activation d'échantillons aux durées de vie de quelques minutes pour mesurer après chaque tir, hors de la chambre, la distribution absolue en énergie des faisceaux de particules accélérés. Cette technique ex-situ a été mise en œuvre avec l'instrument NATALIE développé avec le soutien de l'ANR et de la région Aquitaine [Tar2011].

A l'heure actuelle il est impossible de mesurer l'émission gamma de radio-isotopes créés par laser ayant des temps de vie inférieurs à quelques millisecondes [Neg2015]. En effet, le pulse laser produit une grande quantité d'X et un scintillateur classique couplé à un photomultiplicateur (PMT) est soumis à un dépôt d'énergie qui le sature et le laisse inopérant pendant quelques millisecondes. Nous avons le projet d'utiliser un scintillateur rapide LaBr3 couplé une Hybrid Photo Diode (HPD). La HPD possède une dynamique de détection 4 à 5 ordres de grandeur supérieure à celle du PMT. Pour être sûr de la réponse linéaire du photodétecteur même en régime très perturbé, une LED de référence sera incorporée dans le détecteur. Par ailleurs, pour mesurer ces décroissances radioactives de quelques centaines de nanosecondes (jusqu'à quelques centaines de microsecondes), tous les signaux issus du détecteur après le tir laser doivent être digitalisés pour être traités offline. De nouvelles cartes de numérisation 14 bits pouvant atteindre 4 Gs/s sont désormais disponibles dans le commerce et pourront être utilisées. Elles sont développées par la collaboration nTOF, et sont actuellement en test au CERN.

Auto-analyse SWOT

Forces

- Capacité à mettre en œuvre un programme pluridisciplinaire qui rassemble des compétences en physique nucléaire, atomique, plasma et en instrumentation
- Liens forts déjà établis avec la communauté laser-plasma (INP)

Faiblesses

Les lasers de haute intensité ont des taux de répétition trop faibles pour permettre les développements de détecteurs et les études quantitatives et systématiques des paramètres de l'interaction laser-plasma.

Opportunités

Les installations laser de haute cadence vont rendre enfin possible ces études en augmentant sensiblement le nombre de tirs accessibles à la communauté.

Menaces

- un ratio EC/C = 3/1 dans le groupe qui rend difficiles les expériences de longue durée à l'étranger. Ceci rend d'autant plus indispensable la présence continue de doctorants/ post doctorants dans le groupe.
- le temps de plus en plus important dévolu à la recherche de financements.

ESCULAP: ElectronS CoUrts Pour L'Accélération Plasma (LAL)

Enjeux scientifiques

- Le LAL dispose d'un photoinjecteur (PHIL) à la pointe qui est en cours d'amélioration pour fournir des paquets courts (~200fs) à une énergie de 10 MeV.
- Le laser de puissance LASERIX (100TW) de l'Université Paris-Sud a récemment été installé à proximité de ce photoinjecteur.
- But : Intégration des deux plateformes permettant des nouvelles expériences, dont des expériences d'accélération laser-plasma avec injection externe.
- Possibilité de tester de nombreuses configurations de manipulation de faisceaux (optique ou particules).
- Synergies dans les mêmes locaux entre des chercheurs et enseignants-chercheurs issus de trois communautés (lasers, plasmas et accélérateurs) avec une plateforme à disposition pour tester les idées.
- Objectif n°1: étudier, dans le cadre des accélérateurs RF, la génération, la mise en forme et le transport de paquets d'électrons courts ; physique des paquets à haute densité d'énergie, mise en forme laser
- Objectif n°2 : Injecter des électrons dans un plasma et les accélérer à plus de 100 MeV. Etudier la dynamique d'électrons injectés dans un plasma (lentille plasma, adaptation du faisceau...). Etudier les différents régimes de fonctionnement (transition linéaire vers non linéaire). Synchronisation et superposition des faisceaux (électrons et laser).
- Formation d'étudiants (une dizaine d'étudiants par an formés à cette triple compétence).

Projet

Les premiers résultats de caractérisation de paquets courts sont attendus avant fin 2016. Les premières mesures avec le faisceau à pleine énergie de Laserix sont attendues d'ici 2 ans. Nous espérons que l'ensemble de la plateforme sera pleinement opérationnelle d'ici 5 ans (le calendrier de mise en opération dépendra d'autres projets avec lesquels certaines ressources seront partagées dont ThomX et PRAE).

La vocation d'ESCULAP, à travers la maîtrise de paquets d'électrons ultracourts et délivrant des courants crête élevés, ainsi que celle des paramètres d'optimisation de l'accélération plasma, est de développer des nouvelles solutions d'accélération d'électrons, ainsi que de nouveaux moyens de caractérisation de ces derniers, et d'amorcer des réflexions quant à l'utilisation de ces paquets. Une des conséquences immédiates de l'existence d'ESCULAP et de la maîtrise des techniques associées, sera aussi de pouvoir répondre à des problématiques de conception, de réalisation et de caractérisation qui sont communes avec CILEX-APOLLON, mais avec une différente approche.

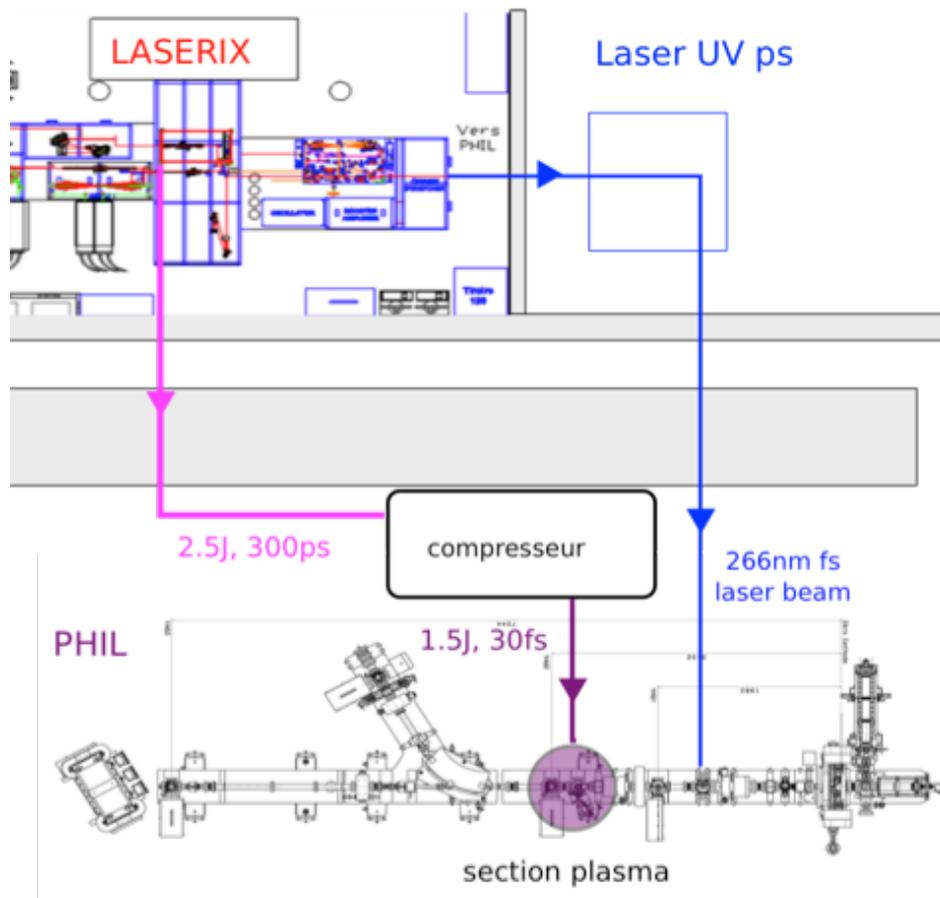


Figure 7: Le laser LASERIX et le photoinjecteur PHIL combinés permettront l'accélération dans un plasma des électrons provenant de PHIL.

Il s'agira donc très probablement, même si ce n'est pas le propos de ce document, d'envisager ESCULAP comme d'une infrastructure ouverte à des très fortes collaborations, et à son utilisation dans divers domaines de R&D. Les résultats ultimes obtenus sur ESCULAP permettront aussi d'alimenter la réflexion pour l'extension en énergie du photoinjecteur, pour la porter autour de 30 MeV, et des impulsions laser de LASERIX, avec un ultérieur étage d'amplification permettant d'atteindre le 20 Joules par impulsion laser.

Ce projet apporte dans les locaux de l'un des laboratoires de l'IN2P3 toutes les compétences techniques nécessaires aux expériences d'accélération laser plasma. Cela permettra donc de former les ingénieurs et techniciens le souhaitant à ces techniques (alignement laser, diagnostics, plasma...). Ce qui leur permettra de se préparer en interne à d'éventuelles expériences sur d'autres sites.

Genèse et calendrier

Étapes réalisées :

2014 : Déménagement de LASERIX au LAL.

2015 : Premier électrons sur PHIL produits grâce à LASERIX

À venir :

2016 : Première caractérisation des paquets courts d'électrons ; premières expériences de synchronisation; adaptation des diagnostics.

Fin 2017/2018 : Première onde plasma dans PHIL.

État de l'art

Le projet ESCULAP entend se situer dans la continuité de la réflexion portée depuis les années 1990 autour de la possibilité d'injecter et accélérer des paquets d'électrons issus d'un photo injecteur dans une onde de sillage plasma créée soit par un laser intense, soit par un paquet « témoin » de forte densité de charge. Jusqu'à un passé récent, cette idée s'était heurtée aux limites technologiques, au manque de

moyens mis en jeu et aux choix stratégiques faits par les communautés lasers et accélérateurs. Plus récemment, les forts progrès technologiques obtenus dans les deux domaines ont porté à l'émergence, au niveau européen et international, de projets et/ou d'installations visant à promouvoir de plus en plus des programmes de R&D combinant un accélérateur conventionnel et de lasers ultrarapides et/ou puissants. On pourra citer donc les installations combinant le laser FLAME et l'injecteur de SPARC à Frascati en Italie, opérationnelle, le projet d'installation de R&D VELA/CLARA à Daresbury, Royaume Uni, ou encore, les projets REGAE et SINBAD de DESY/PITZ à Hambourg (Allemagne).

ESLAP peut donc, en combinant deux installations comme PHIL et LASERIX, créer en France un pôle unique d'envergure nationale, pouvant amener de la valeur ajoutée en termes non seulement d'installations, mais aussi des compétences très fortes et un environnement d'excellence en Physique d'Accélérateurs ET Physique des Lasers de puissance ET Physique des Plasmas.

De plus, le LAL et, en moindre mesure, le LIDYL, ont déjà des liens de collaborations et de contacts forts avec les installations citées ci-dessus. A titre d'exemple, un consortium avait déjà été créé en partie lors d'une demande FET-OPEN adressée à la Commission Européenne en 2015, demande qui sera rééditée en début 2017.

Ressources et moyens

Ressources humaines : De façon générale, les ressources humaines principales seront fournies par le LAL (CNRS-IN2P3), le LPGP (CNRS-INSIS), le CLUPS-LUMAT (UPSUD).

Le tableau ci-dessous montre la répartition en ETP pour le personnel déjà identifié comme partie prenante du projet.

Nom	Affiliation	Fract.
Christelle Bruni	LAL	0,3
Nicolas Delerue	LAL	0,15
David Garzella	LIDYL	0,2
Olivier Guilbaud	LPGP	0,3
Kevin Cassou	LAL	0,15
Stéphane Jenzer	LAL	0,7
Sophie Kazamias	LPGP	0,3
Pierre Lepercq	LAL	0,15
Bruno Lucas	LPGP	0,4
Gilles Maynard	LPGP	0,25
Moana Pittman	CLUPS	0,3
Julien Demailly	LPGP	0,3
Elsa Baynard	CLUPS	0,3

L'impact du projet pourrait être renforcé par le recrutement de jeunes collaborateurs, expérimentateur ou théoricien, au niveau CR2 ou IR2 ayant déjà travaillé dans ces domaines.

Une position post-doctorale de 24 moi, qui débutera le 1^{er} Juillet 2016, a été financée par le LABEX P2IO. Un doctorant commencera sa thèse dans le groupe en Octobre 2016 et au cours du projet, il est envisagé de recruter au moins un autre chercheur postdoctoral et deux étudiants en thèse, grâce notamment aux liens privilégiés avec le M2 « Grands Instruments ». Leur financement se fera à travers les Ecoles doctorales, les moyens de cotutelle avec des universités étrangères ou par le biais de réseaux ou contrats financés par le programme européen H2020.

Ressources financières : Le budget final pour le projet ESLAP sera arrêté au moment de l'édition de l'APD, en Février 2017. Le matériel déjà disponible au sein des équipes permet d'envisager une première expérience avec un coût inférieur à 250k€ (les équipes ont déjà démontré leur capacité à obtenir des financements extérieurs sur d'autres projets : 2 ANR, plus de 5 subventions Labex,...).

Il semble prématuré pouvoir préjuger des besoins du projet jusqu'aux termes des réalisations techniques majeures (consolidation de l'installation à 10 MeV avec une chambre de test pour l'interaction plasma). Pour l'année 2016 et part de l'année 2017, la majeure partie du budget nécessaire pour l'accomplissement des objectifs définis sera supporté par le projet DRUM (LABEX P2IO), porté par

C. Bruni, qui finance une partie de l'équipement, à hauteur de 66 k€ et une subvention de 48k€ a été obtenu du LAL pour les travaux de synchronisation et la mise au point de diagnostics.

Réalisations techniques

Dans le cadre du projet ESCULAP, des réalisations techniques majeures, demandant des compétences spécifiques intégrées à l'équipe projet, sont envisagées, comme prérequis pour l'amélioration de la qualité des faisceaux issus de PHIL et de LASERIX :

- La conception, la réalisation et l'installation d'un booster permettant d'étendre l'énergie des électrons jusqu'à 10 MeV ;
- Exploiter le signal de l'oscillateur de LASERIX comme pilote pour permettre la synchronisation entre PHIL et LASERIX, et ainsi promouvoir un programme d'études sur les problèmes de synchronisation et stabilité relative des faisceaux laser et d'électrons ;
- La mise en forme spatiotemporelle des impulsions laser utilisées dans le processus de photoémission permettra d'améliorer la qualité du faisceau d'électrons et de contrôler des paramètres clés, comme l'émittance et la charge, ainsi que la durée.

La réussite de ces réalisations techniques et la poursuite efficace du programme scientifique nous amènerait donc au deuxième but du projet, à savoir l'obtention d'une « nouvelle » installation naissant des deux susmentionnées, ESCULAP.

Auto-analyse SWOT (facultative)

Forces

- 2 installations de pointe sur le même site
- 3 communautés dans les mêmes locaux sur le même projet
- La somme des membres de l'équipe a collaboré avec l'ensemble des acteurs français et la plupart des acteurs européens du domaine (accélération laser-plasma).
- Contacts forts avec la communauté grâce au M2 Grands Instrument où l'équipe est fortement impliquée.
- CNRS et Université collaborent sur le même projet.

Faiblesses

- Une partie de l'équipe sera impliquée dans le démarrage de ThomX et donc indisponible une partie de 2017.
- Locaux exigus

Opportunités

- Rapprochement avec le LOA (participation avec des expériences communes)

ETALON: Mesure longitudinale de profils de paquets d'électrons (LAL)

Enjeux scientifiques et Projet

Le projet ETALON (Emittance Transverse And LONGitudinal) vise à mesurer la distribution longitudinale de paquets de particules relativistes en un seul tir. Il utilise pour cela le rayonnement cohérent émis lorsque ces particules chargées passent devant un réseau de diffraction (rayonnement de Smith-Purcell). C'est l'une des rares méthodes à être potentiellement à la fois non destructrice et fonctionnant sur un seul tir.

Cette méthode est importante pour les accélérateurs à champ de sillage où la reproductibilité tir à tir est faible mais aussi dans les accélérateurs (et collisionneurs) classiques car certains phénomènes de dynamique du faisceau dépendent de l'intensité crête du faisceau (parfois quadratiquement) et un bon contrôle en est nécessaire. C'est le cas par exemple de l'ESS qui a besoin de contrôler la longueur de ses paquets de protons sans pouvoir se permettre l'utilisation de diagnostics destructifs.

Nous avons déjà démontré la validité de l'approche mais il faut encore valider le fonctionnement en mode tir unique, une expérience est en cours d'installation pour cela. Une extension des mesures à des faisceaux plus compliqués pourrait être envisagée (en particulier la modulation de profil à charge constante, faisceaux de type AWAKE) mais demandera une expérience bien contrôlée sur une ligne de

tests (par exemple en collaboration avec PIZ à DESY-Zeuthen ou directement avec AWAKE). Une expérience est aussi prévue sur UHI-100 (CEA) dans le cadre de la collaboration DACTOMUS en préparation de CILEX.

La production scientifique finale du projet sera des moniteurs de profile longitudinal adaptés au besoin des accélérateurs avec lesquels nous collaborons. Ces moniteurs sont/seront documentés par des publications.

Genèse et calendrier

Le projet est né à l'Université d'Oxford dans les années 2000 sous l'initiative de George Doucas. La participation de l'IN2P3 (LAL) a commencé avec le recrutement au LAL de Nicolas Delerue en 2010. De 2012 à 2015 ce projet a été financé par une ANR jeune chercheur qui a permis la participation à des expériences au SLAC sur FACET et la mise au point de moniteurs pour le synchrotron SOLEIL et les accélérateurs CLIO (LCP Orsay) et SPARC (INFN Frascati). Les expériences à FACET ont permis de valider la méthode y compris pour des faisceaux d'une cinquantaine de femto-secondes de durée.

Le moniteur à SOLEIL est utilisé pour affiner le modèle théorique. Ceux de CLIO et SPARC sont des prototypes qui permettront de tenter des mesures en un seul tir. CLIO a l'avantage de la proximité et donc de permettre plus de tests de configuration. Celui de Frascati a l'avantage d'être sur une ligne instrumentée avec des techniques complémentaires et donc de permettre des comparaisons.

Le projet a été financé par l'Université Paris-Sud (AAP Attractivité) et l'ANR. Il est passé en conseil scientifique du LAL en janvier 2012.

Depuis 2011 : 3 publications, ~15 contributions en conférences (dont 2 présentations invitées).

État de l'art

Les détecteurs utilisant le rayonnement cohérent de transition sont plus avancés en terme d'utilisation et de compréhension mais avec une sensibilité moindre. D'autres méthodes sont aussi fortement utilisées (cavités déflectrices, échantillonnage électro-optique,...) mais sont nettement plus coûteux.

L'Université d'Oxford travaille aussi sur les moniteurs utilisant le rayonnement de Smith-Purcell mais depuis l'arrêt de E-203 ils n'ont plus d'expérience installée.

Ressources et moyens

Ressources humaines : 1 laboratoire impliqué (LAL) avec 1 chercheur, Nicolas Delerue (25%) et 1 ingénieur, Stéphane Jenzer (75%). Une post-doc, Joanna Barros (100%) financée par l'ANR a terminé son contrat en novembre 2015.

Ressources financières : Les moniteurs en place ont été financés grâce à l'aide de l'Université Paris-Sud et de l'ANR. Leur évolution vers un mode tir seul coûtera 5-10k€ chacun plus 5k€ de missions pour celui de Frascati. Il est prévu de faire ces deux évolutions en 2017.

La construction d'un nouveau moniteur pour CILEX ou l'ESS ou pour l'étude des modulations de faisceau coûterait entre 50k€ et 100k€ et nécessiterait le renfort scientifique d'un doctorant.

Réalisations techniques

Le passage en mode tir unique est envisagé pour 2017 (effort technique en 2016 et 2017) et devrait être faisable avec le support technique actuel.

La construction d'un nouveau moniteur pourrait être effectuée à moyens techniques constants ou légèrement renforcés suivant le calendrier et les spécifications. Pour un moniteur orienté faibles charges (CILEX, Faisceaux modulés,...) un soutien technique en électronique (25% IR pendant 6 mois) pourrait-être nécessaire.

Auto-analyse SWOT (facultative)

Forces : 3 moniteurs installés dont un qui produit des données déjà publiables et un second qui devrait l'être avant la fin de l'été. Données très intéressantes prises sur E-203 (SLAC) à publier prochainement.

Faiblesse : Taille de l'équipe ce qui demandera une forte réduction des activités pendant le démarrage de ThomX (mais cela ne mettra pas en danger les objectifs scientifiques du projet). Pas de support en électronique.

Opportunités : {Sous réserve d'accord de la direction du LAL et d'obtention de financements} Intérêt de la part de groupes expérimentaux pour d'autres moniteurs (ESS,...). Participation à CILEX. Mesure de paquets modulés à charge constante (avancée phénoménologique).

Un stagiaire, Vitalii Hodnevych, qui a déjà travaillé (et publié) sur le projet sera en M2 l'an prochain et souhaiterait faire une thèse dans le groupe.

Menaces : Concurrence du groupe anglais [2 personnes] (mais a priori ils sont sur d'autres projets que nous et nous sommes en collaboration sur certaines publications).

Liste des publications du groupe: <https://groups.lal.in2p3.fr/etalon/publications>

Références

- [Ami1995] F. Amiranoff et al., Phys. Rev. Lett. 74, 5220 (1995)
- [Fau2004] J. Faure et al., Nature 431, 541-544 (2004)
- [Mal2005] V. Malka et al., Nature Physics 4, (2005)
- [Esa2009] E. Esarey, C. B. Schroeder, and W. P. Leemans, Rev. Mod. Phys. 81. (2009)
- [Lee2014] W. Leemans et al., Phys. Rev. Lett. 113, (2014) 245002, et références citées
- [Rec2009] C. Rechatin et al., Phys.Rev.Lett. 102 (2009) 164801, et références citées
- [Cor2011] S. Corde et al., Phys.Rev.Lett. 107 (2011) 215004, et références citées
- [Bec2013] A. Beck et al., Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. A (2013), 1
- [Bec2016] A. Beck et al., Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. A (2016), 10.1016/j.nima.2016.03.112
- [Bor2014] M. Borghesi NIMA 740 (2014)6-9 et références citées
- [Hum2013] E. d'Humières et al., Plasma Physics and Controlled Fusion 55, 124025 (2013)
- E. d'Humières et al., Phys. Plasmas 20, 023103 (2013)
- [Hum 2015] E. D'Humières et al, 42 EPS conf on plasma Physics 2015 et références citées
- [Mac2013] A. Macchi et al, Rev Mod Phys 85 (2013) et références citées
- [Neg2015] F. Negoita et al. AIP Conference Proceedings 1645, 228 (2015)
- [Pal2011] C. Palmer et al, Phys Rev Lett 106 (2011) 014801
- [Tar2011] M. Tarisien et al. Rev.Sci.Instr. 82, 023302 (2011)
- [Wil2001] S.C. Wilks et al, Phys of Plasma 8 (2001) 542

Pour plus d'informations

Installations

- Laser APOLLON: <https://portail.polytechnique.edu/luli/cilex-apollo/cilex>
- Projet CILEX: <https://portail.polytechnique.edu/luli/cilex-apollo/apollo>
<http://cilexsaclay.fr>
- ELI-NP: <http://www.eli-np.ro/>
- Site de l'ICFA ANA: <http://www.lpgp.u-psud.fr/icfaana/aa-research-activities>
- Projet de code plasma SMILEI: <http://www.maisondelasimulation.fr/projects/Smilei/html/>

Projets européen

- EuCARD2: <http://eucard2.web.cern.ch/>
- EuroNNAC: <http://www.euronnac.eu/>
- EAAC2015: <https://agenda.infn.it/conferenceDisplay.py?confId=8146>
- ARIES submitted proposal: sur demande auprès d'A.S.
- EuPRAXIA: <http://www.eupraxia-project.eu/>
- EuPRAXIA submitted proposal: sur demande auprès d'A.S

MOOCS

Pour une introduction pédagogique à la physique des accélérateurs plasma, deux MOOCS disponibles sur le site FUN (France Université Numérique) de l'Université Paris-Saclay dans le cours "[Des particules aux étoiles](https://www.fun-mooc.fr/courses/ParisSaclay/71001/session01/info)". [<https://www.fun-mooc.fr/courses/ParisSaclay/71001/session01/info>]

- [Accélération laser -plasma \(10'\)](#)
- [Accélération par champ de sillage et accélération laser-plasma d'ions \(5'\)](#)