

ESCULAP : une installation pour une R&D innovante en Physique des Accélérateurs

Table des matières

Introduction	2
Contexte National et International	2
Objectifs Scientifiques	2
Deux installations Uniques => Une installation de pointe.	3
Perspectives à moyen terme	4
Installation Maitrisée et ouverte.....	4
Injecteur à 30 MeV	4
Organisation du projet	5
Organigramme.....	5
Méthodologie	5
Synergie	5
Echéancier	5
Objectifs pour l'année 2016	6
Expérience	6
Conception et Modélisation	6
Groupes de Travail	7
Réalisation d'un Booster à 10 MeV	7
Modélisation.....	7
Faisceaux Laser IR-UV et Optique	8
Conception de la Cellule Plasma	10
Diagnostics pour les faisceaux d'électrons.....	11
Synchronisation entre le laser et le paquet d'électrons.	12
Financier	13
Ressources, budget	13

Introduction

Nous présentons le projet de développement d'une infrastructure de pointe combinant, de façon unique, le PhotoInjecteur RF PHIL et l'installation laser de puissance LASERIX .

Le but ultime de ce projet est de pouvoir intégrer et consolider une nouvelle infrastructure, émanant de celles-ci, qu'on appellera ESCULAP (**E**lectron**S** **C**o**U**rts **P**our **L'**Accélération **P**lasma), afin de poursuivre des objectifs scientifiques dans le domaine des nouvelles frontières de l'accélération d'électrons. On visera plus particulièrement les très fortes densités de charge grâce à la mise en forme de paquets d'électrons ultracourts à l'échelle femtoseconde. Ces faisceaux seront produits par irradiation de la photocathode de PHIL via une fuite femtoseconde de LASERIX. On étudiera ensuite l'accélération laser plasma du paquet d'électrons produit par PHIL dans une onde de sillage produite par la pleine puissance disponible sur LASERIX.

Contexte National et International

Le projet ESCULAP se situe dans la continuité de la réflexion portée depuis les années 1990 par une partie de la communauté des physiciens des accélérateurs et des physiciens laser autour de la possibilité d'injecter des paquets d'électrons issus d'un photo injecteur dans une onde de sillage plasma créée par laser, afin de pouvoir combiner les caractéristiques optimales du faisceau issu de l'accélérateur avec les forts gradients et la durée d'impulsion femtoseconde disponibles par accélération laser plasma. Les caractéristiques visées étant une bonne émittance, une forte monochromaticité, une forte charge, le tout avec une excellente stabilité tir à tir, caractéristiques encore difficiles à atteindre par l'accélération dite « tout laser ».

Au cours du temps, cette idée s'est heurtée tout d'abord aux limites imposées par la technologie existante, au manque de moyens mis en jeu et aux choix stratégiques faits par les deux communautés. Plus récemment, le rapprochement progressif des physiciens des deux communautés et 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 des lasers ultrarapides et/ou puissants. On pourra citer ici les installations de SPARC à Frascati en Italie, opérationnelle, et de VELA/CLARA à Daresbury, Royaume Uni, ou encore, avec des objectifs diversifiés, DESY/PITZ à Hambourg et Zeuthen (Allemagne), ou ELETTRA à Trieste (Italie).

ESFULAP 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, dans une moindre mesure, le LIDYL, ont déjà des liens de collaborations et des 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 réévaluée en 2016.

Objectifs Scientifiques

Le projet ESCULAP est avant tout un projet porté par deux programmes scientifiques d'envergure, illustrés dans la fig. 1 ci-dessous : l'étude de la dynamique d'électrons relativistes en régime de fortes densités de charge et la manipulation d'un plasma à des densités de l'ordre de quelques $10^{17}/\text{cm}^3$.

La possibilité de mener ces études est liée à la présence, dans un seul lieu, de deux installations uniques et hautement performantes dans leur domaine, comme le photoinjecteur PHIL et le laser LASERIX.

Deux installations Uniques => Une installation de pointe.

Cette opportunité n'est pas, à elle seule, suffisante pour remplir les conditions nécessaires pour exploiter pleinement la combinaison de ces deux installations. Ainsi, 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 . Il s'agit de :

- 1) la conception, la réalisation et l'installation d'un booster permettant d'étendre l'énergie des électrons jusqu'à 10 MeV ;
- 2) l'exploitation du 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 ;
- 3) la mise en forme spatio-temporelle des impulsions laser utilisées dans le processus de photoémission. Cela permettra d'améliorer la qualité du faisceau d'électrons et de contrôler des paramètres clés, comme l'émittance et la charge, et la durée.

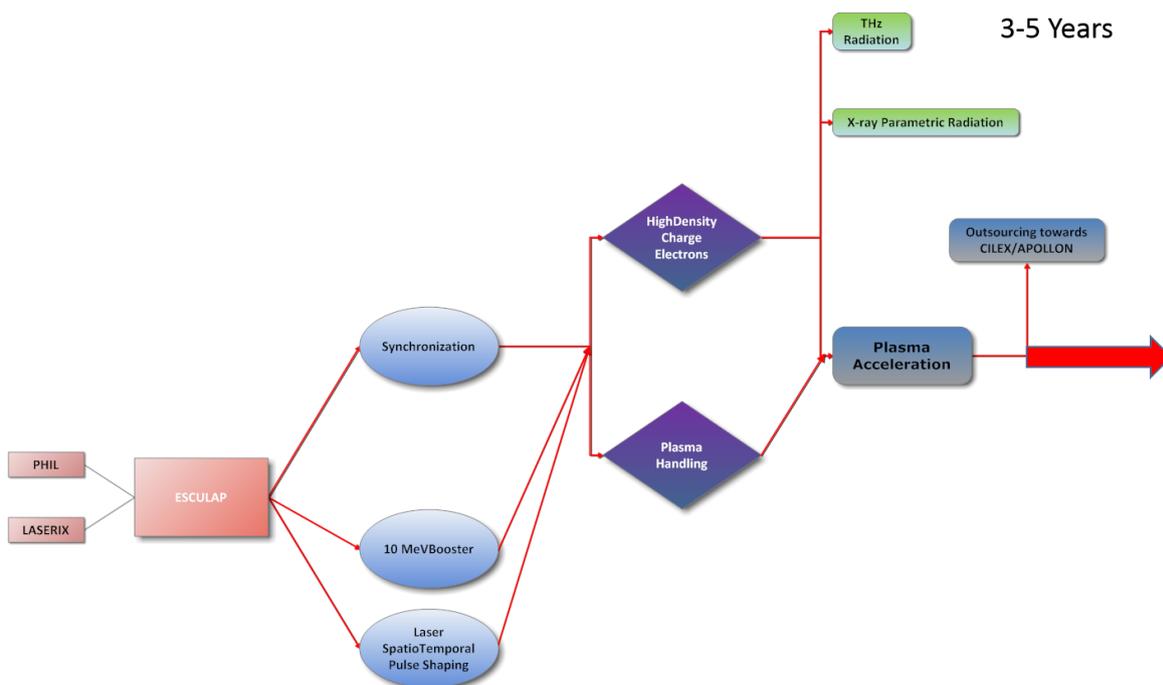


Fig. 1 : Mind map du projet ESCULAP

La réussite de ces réalisations techniques et la poursuite efficace du programme scientifique nous amènerait donc au deuxième but du projet : l'obtention d'une « nouvelle » installation naissant des deux susmentionnées, ESCULAP, dans un nouvel agencement schématisé en fig.2, faisant place à la cellule plasma et aux nouveaux outils de diagnostic.

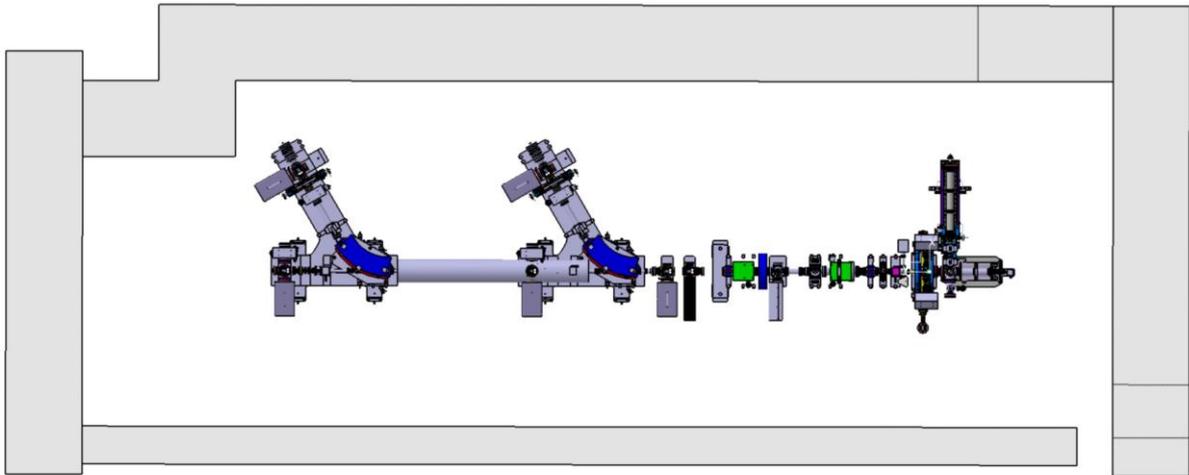


Fig. 2 : Schéma d'implantation du projet ESCULAP.

Perspectives à moyen terme

La mise en opération d'ESLAP, selon le calendrier esquissé ci-dessous et qui sera affiné à l'occasion de l'édition d'un Avant Projet Détaillé (par la suite APD), est prévue dans un horizon variable entre 3 et 5 ans, suivant les avancées obtenues dans l'année courante et selon le calendrier de mise en opération d'autres projets avec lesquels certaines ressources seront partagées (on pense notamment au projet ThomX pour l'équipe PHIL et à l'accueil LaserLab pour LASERIX).

Les objectifs scientifiques affichés et la réalisation effective des prérequis nécessaires à leur obtention permettront de disposer d'une installation modulable, fiable et contrôlée.

La vocation d'ESLAP, à travers la maîtrise de paquets d'électrons ultracourts à courants crête élevés, ainsi que celle des paramètres d'optimisation de l'accélération plasma, est de pouvoir répondre à la demande des communautés « accélérateurs » et « lasers de puissance » pour le développement de nouvelles solutions d'accélération d'électrons, ainsi que de nouveaux moyens pour les caractériser. Enfin l'existence d'ESLAP et la maîtrise des techniques originales associées permettra de contribuer de façon innovante et constructive à des problématiques de conception, de réalisation et de caractérisation qui sont utiles au consortium CILEX-APOLLON.

Installation Maitrisée et ouverte

Il s'agira donc très probablement, même si ce n'est pas le propos de ce document, d'envisager ESLAP comme une infrastructure ouverte à de très fortes collaborations à l'interface de plusieurs communautés et avec une forte composante de R&D.

Injecteur à 30 MeV

Les résultats ultimes obtenus sur ESLAP permettront aussi d'alimenter la réflexion pour l'extension en énergie du photoinjecteur autour de 30 MeV, ainsi que de l'énergie laser de LASERIX, avec l'installation du dernier étage d'amplification permettant d'atteindre 20 Joules par impulsion. Ce projet nécessitera probablement le réaménagement dans des locaux plus adaptés.

Organisation du projet

Organigramme

L'organigramme actuel montré en fig. 3 vise à créer une structure en mode projet, sous forme de coordination autour des objectifs scientifiques et stratégiques et supportée par les groupes de travail techniques et scientifiques.

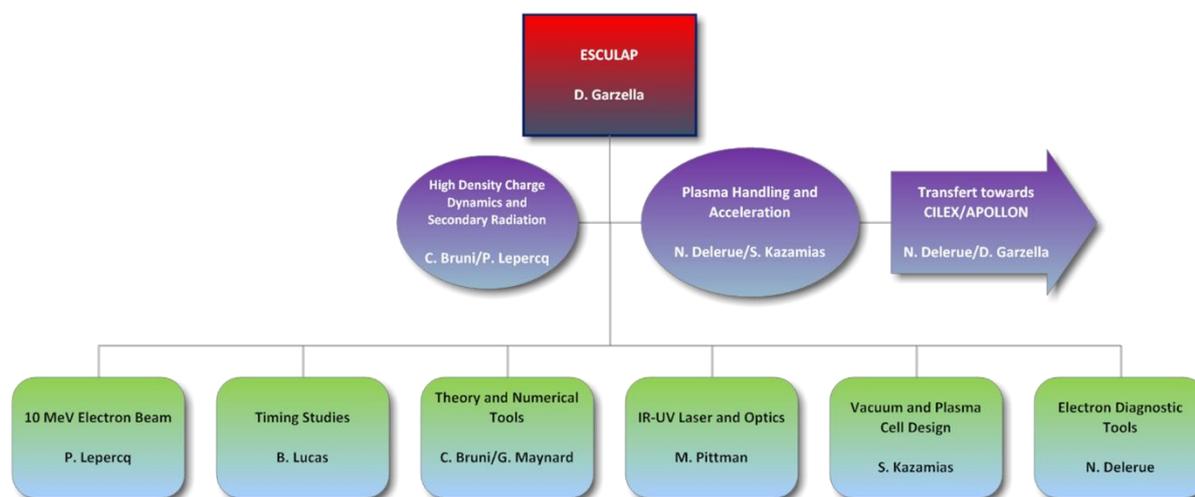


Fig. 3 : Organigramme du projet ESCULAP

Méthodologie

L'organisation en mode projet sera détaillée par les groupes de travail d'ores et déjà identifiés. On définit les objectifs intermédiaires et les tâches associées pour établir la note de cadrage. Cela alimentera la structure finale du projet et la rédaction de l'APD. Elle sera prise en charge de façon collégiale par le « bureau du projet » formé par le Coordinateur et les responsables des groupes de travail, tel que présenté dans la fig. 3.

Synergie

Les interfaces entre les différents groupes de travail seront assurées par la participation active des responsables des groupes dans des tâches pilotées par d'autres groupes. La synergie et l'intégration sont ainsi au cœur de la méthodologie du projet.

Echéancier

L'horizon de mise en œuvre d'ESCULAP est de 3 à 5 ans, et un planning détaillé sera adopté lors de l'édition de l'APD.

Cependant, il est possible d'ores et déjà d'envisager comment les objectifs majeurs seront répartis dans les 3 ans à venir.

Pour l'année 2016 les objectifs, affichés plus loin dans le document, porteront principalement sur la validation, la génération et la caractérisation de paquets ultracourts et à forte charge, dans un premier temps à une énergie de 6 MeV.

L'année 2017 verra la réalisation complète du booster qui permettra d'augmenter l'énergie de PHIL jusqu'à 10 MeV ; la consolidation, à cette énergie, de la génération et de la caractérisation des paquets

courts ; la réalisation et la mise en place d'une cellule, avec les premières expériences combinant les électrons issus de PHIL et le plasma généré par l'impulsion à 2 Joules issue de LASERIX.

Finalement, en 2018, il devrait être possible de consolider les premières expériences d'accélération plasma et la caractérisation de paquets d'électrons à très forte énergie ($\gamma > 150$)

Objectifs pour l'année 2016

Par souci de clarté, les objectifs envisagés pour l'année 2016 sont repartis selon 3 catégories principales : les objectifs demandant une réalisation expérimentale ; ceux qui s'appuient notamment sur les aspects de conception, modélisation et calcul numérique et/ou analytique ; enfin, les objectifs d'ordre administratif et stratégique. Ceux des deux premiers groupes sont ensuite détaillés par groupe de travail, avec l'affichage de la situation actuelle et l'objectif affiché avec la méthodologie pour l'atteindre.

Expérience

- Mise en forme Impulsion UV LASERIX pour la photocathode
- Caractérisation paquets d'électrons (charge, émittance, spectre)
- Expériences en mode Multiphotonique.
- Tests de la synchronisation
- Réalisation Booster 10 MeV
- Approvisionnement déphaseur
- Dispositif de mesure de durée des paquets d'électrons et du spectre.

Conception et Modélisation

- Définition de l'optique de transport des photons
- Définition de l'optique de transport des électrons
- Modélisation Cellule Plasma
- Conception de la chambre d'interaction et du profil de densité dans la cellule plasma. Modélisation mécanique fluides (Code FLUENT, SDTM LAL).
- Réflexion sur l'extension à plus Haute Energie du paquet d'électrons

Administration et stratégie

- Dépôt de la demande d'Extension de l'autorisation ASN
- TDR
- Financement extérieur (dont FET-OPEN)
- Collaborations (CILEX-APOLLON, International)

Stratégiquement, le projet et l'installation ESCULAP ont vocation à être un acteur de l'accélération dans le panorama national et européen. L'installation devra donc se doter des autorisations nécessaires à sa mise en œuvre et à sa progression en termes d'énergie et de charge. Dès que les paramètres finaux seront arrêtés, on démarrera l'instruction pour la demande d'extension à l'Autorité de Sureté Nucléaire.

Par ailleurs, l'édition d'un APD est le principal objectif stratégique pour l'année 2016. Les relations avec les autres acteurs de la communauté nationale seront extrêmement nourries, grâce aux collaborations privilégiées que l'on entend établir, notamment dans la phase d'identification de verrous scientifiques et/ou technologiques, avec les collègues du projet CILEX-APOLLON.

A l'international, on entend consolider les relations déjà existantes avec plusieurs centres européens. On peut citer, entre autres, SPARC, PITZ, Daresbury, ELETTRA et REGAE. Il est prévu que le LAL, en formant un consortium avec ces partenaires potentiels, participe au prochain appel à projet dans le cadre du programme FET-OPEN de H2020.

Groupes de Travail

Réalisation d'un Booster à 10 MeV

Cette tâche est dédiée à l'installation et au conditionnement du booster sur PHIL. Le design est déjà réalisé (voir fig.). Il est composé de 3-cellules, pour obtenir le gain en énergie le plus important possible, tout en gardant un gradient raisonnable et un champ électrique de surface réduit. Le couplage retenu est classiquement un couplage électrique au milieu de la cellule centrale, alimenté par un guide pleine section. Un gradient de 50 MV/m pourra être atteint, portant ainsi l'énergie à 9.6MeV. Le booster sera réalisé en 2016 et installé avec le canon PHIN en 2017.

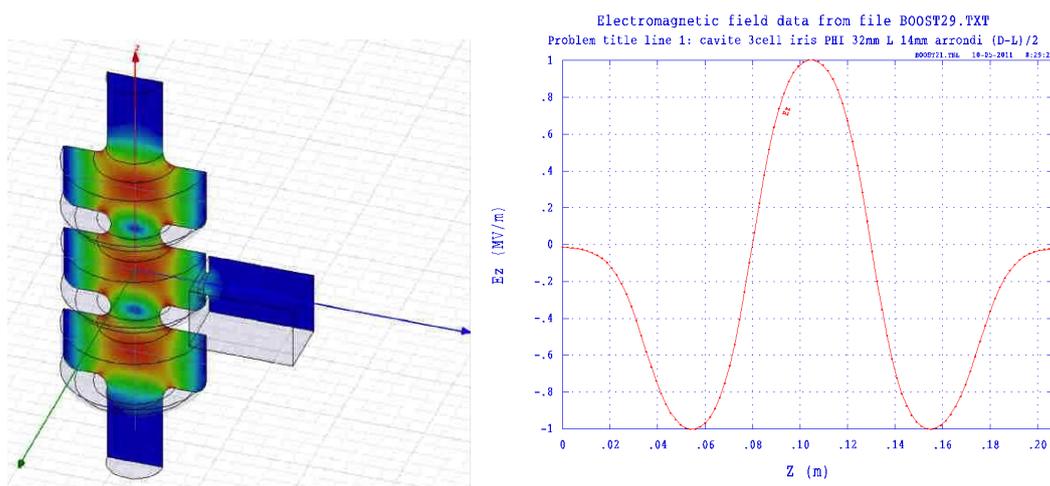


fig. 4: gauche: Schéma 3D de la distribution du champ électrique; Le champ maximum est fixé de l'ordre de 60 MV/m (3.6 MW de puissance et un champ surfacique maximum de 68.7MV/m au niveau du diaphragme. droite : image du champ électrique sur l'axe.

Le booster, les mesures de fréquence et les ajustements mécaniques seront réalisés au laboratoire.

Pour amener la puissance au booster et être capable d'ajuster indépendamment la phase du champ du booster et du canon, un déphaseur est nécessaire et sera acheté courant 2016.

Modélisation

L'objectif, à terme, est de mettre en œuvre une modélisation de type 'start-to-the end', c'est-à-dire depuis la source d'électrons jusqu'au détecteur, incluant PHIL, les lignes de transmission, la cellule plasma et le dernier étage de focalisation laser. La première étape, qui débute en 2016, sera de définir les configurations à installer pour la ligne PHIL, la cellule plasma et la focalisation du laser en vue d'optimiser le couplage entre le faisceau d'électrons et l'onde de sillage plasma.

Adaptation transverse et longitudinale des paquets d'électrons issus de PHIL pour les expériences

L'utilisation des paquets courts, issus de PHIL pour des expériences laser/plasma ou de rayonnement secondaire, nécessite l'étude du transport pour une adéquation au plus proche, en longitudinal et en transverse.

La ligne actuelle de PHIL permet d'atteindre des performances de focalisation transverse de 70 microns sans pouvoir ajuster l'espace des phases. En outre, la distance entre le dernier élément de focalisation et le point focal est réduite à 50cm pour 6 MeV, quelle que soit la charge. Une augmentation de l'énergie à 10 MeV permettrait d'augmenter cette longueur de 1 voire 2 m, facilitant l'insertion d'une expérience laser-plasma. Toutefois, des éléments limitant le diamètre peuvent être insérés juste après le dernier élément, nécessitant une refonte d'une ligne de focalisation même à 10 MeV. Cette étude doit être réalisée en prenant en compte les contraintes expérimentales qui seront directement intégrées aux modèles. Il est prévu de faire une ligne achromatique pouvant idéalement servir à la fois de ligne d'adaptation transverse, et de contrôle de l'espace des phases longitudinal.

Modélisation de la cellule plasma

Il s'agira ici dans un premier temps de fixer les principaux paramètres de la cellule, et de la focalisation du laser, en prenant en compte les contraintes expérimentales. Concernant la cellule proprement dite, une première approche analytique est possible pour traiter le domaine considéré. Ceci sera complété par l'utilisation du code numérique Wake-EP développé au LPGP (B.S. Paradkar et al, POP 20, 083120, 2013) et bien adapté au domaine d'étude. Ce code utilisera, pour les électrons incidents, directement les données en sortie de la ligne PHIL. Des résultats préliminaires ont déjà été obtenus pour des faisceaux incidents de 6 à 10 MeV. Ils montrent notamment tout l'intérêt d'atteindre 10 MeV pour augmenter la longueur d'interaction électron-plasma et obtenir ainsi des énergies supérieures à la centaine de MeV. Ces calculs nous ont également permis de définir le domaine des paramètres : une cellule gazeuse (He ou H₂) de quelques centimètres de longueur, à des pressions de l'ordre du mbar, une tache focale du laser de l'ordre de la centaine de μm de rayon, avec des intensités proches de 10^{18} W/cm². Les champs accélérateurs peuvent ainsi atteindre la centaine de MeV/cm sur quelques centimètres. Il reste à optimiser les valeurs des différents paramètres, avec comme critère d'optimisation : la charge, la distribution en énergie et l'émittance en sortie du faisceau d'électron. Le profil linéaire en densité de la cellule de gaz est également un paramètre important qu'il s'agira de maîtriser expérimentalement.

Un autre aspect concerne la focalisation du laser. La modélisation sera notamment utilisée pour analyser la faisabilité d'une focalisation par miroir plasma.

Faisceaux Laser IR-UV et Optique

Le groupe de travail "ligne de faisceau laser" est impliqué dans deux aspects du projet ESCULAP.

Génération des photoélectrons

La première partie du travail qui sera réalisée pendant l'année 2016 concernera la production de paquets courts d'électrons par irradiation femtoseconde de la photocathode de PHIL. La mise en place du dispositif est actuellement en cours, étant partiellement financé par le projet DRUM (P2IO) et avec le matériel disponible de LASERIX. Ce dispositif consiste à utiliser une fuite de 3mJ à 10Hz, étirée à 500ps qui est envoyée sur une table optique au plus près de la photocathode. Cette table optique (cf. figure 5) sera utilisée dans un premier temps pour accueillir le compresseur d'impulsions permettant

d'atteindre une durée ultime de 30fs dans l'IR (807nm), ainsi que le tripleur de fréquence qui permettra de générer les impulsions UV (269nm) avec une durée estimée à 100fs. Un système de routage amovible permettra pendant une période transitoire, par mesure de sécurité, de maintenir en fonctionnement le laser actuel de PHIL.

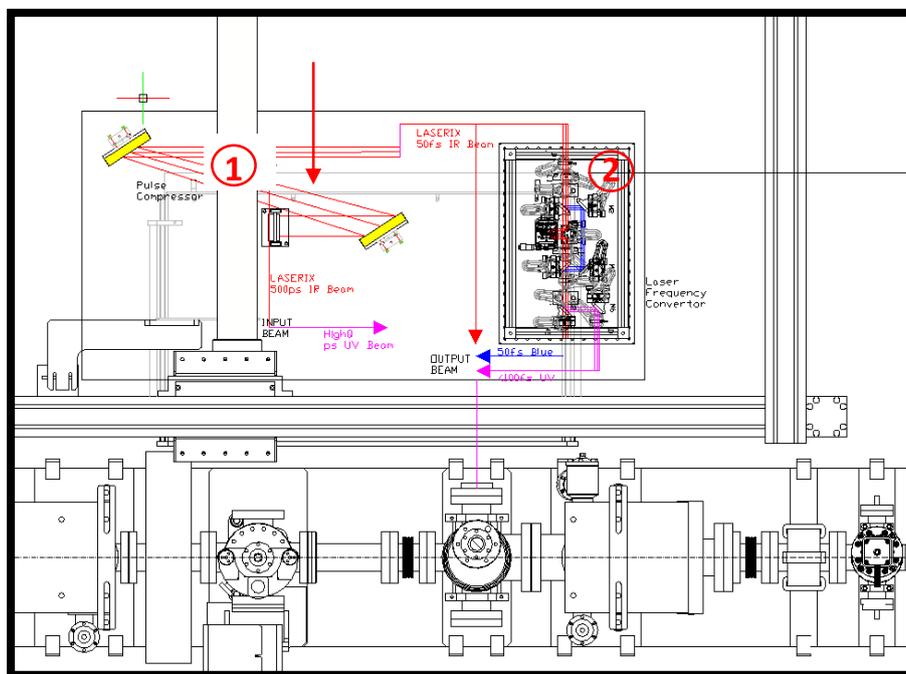


Fig. 5: Table optique de réception et de mise en forme du faisceau de LASERIX pour l'éclairage en régime ultrabref de la photocathode. Le faisceau IR étiré (500ps) provenant de LASERIX (flèche rouge) LASERIX est (1) comprimé jusqu'à 30-50fs puis envoyé sur la photocathode, ou (2) triplé en fréquence (UV) puis envoyé sur la photocathode. Un faisceau doublé (Bleu) peut aussi être utilisé.

Des travaux préliminaires ont aussi été réalisés pour asservir la fréquence RF du canon de PHIL sur l'oscillateur femtoseconde de LASERIX. Des études seront menées dans la première phase du projet (année 2016) pour mettre en forme spatialement et temporellement les impulsions ultra-brèves dans l'infra-rouge dans un premier temps. Cela nécessitera l'utilisation du modulateur acousto-optique (DAZZLER) de LASERIX pour l'aspect temporel et la mise en place d'un miroir adaptatif pour le contrôle spatial. Des études seront menées pour réaliser des fonctions plus élaborées directement dans l'UV.

Deux régimes de production des photo-électrons seront étudiés, d'abord dans l'UV avec un régime d'ionisation à un photon, puis dans l'IR en régime multiphotonique, le rendement du triplage de fréquence pour créer les photons UV étant très faible en régime d'impulsions courtes (de l'ordre de 10%). Les objectifs poursuivis dans cette partie concernent l'efficacité de production des paquets d'électrons avec des durées brèves (<100fs).

Création du plasma accélérateur

La seconde partie du travail concerne la préparation d'une ligne de lumière de haute-intensité pour créer le plasma accélérateur. Cette ligne sera issue d'une dérivation placée en fin de chaîne d'amplification laser, permettant d'envoyer des impulsions IR de 3J à 10Hz, étirées à 500ps, dans la salle PHIL pour être comprimées sous vide, à une durée ultime <40fs, au plus près de la chambre d'interaction plasma (cf. fig. 6). Le faisceau comprimé devra ensuite être injecté dans la chambre d'interaction, pour être focalisé co-linéairement au faisceau d'électrons dans la cellule plasma ; un schéma de principe purement illustratif est donné en figure 6. Le dispositif de focalisation devra produire une intensité dans la cellule de l'ordre de 10^{17} W/cm², avec une zone de Rayleigh

centimétrique et un diamètre d'éclairage de l'ordre de 100 μ m, ce qui implique l'utilisation de distances focales très importantes (environ 5m). L'étude de ce dispositif, qui devra en outre laisser libre passage au faisceau d'électrons est un travail fondamental qui sera réalisé en 2016.

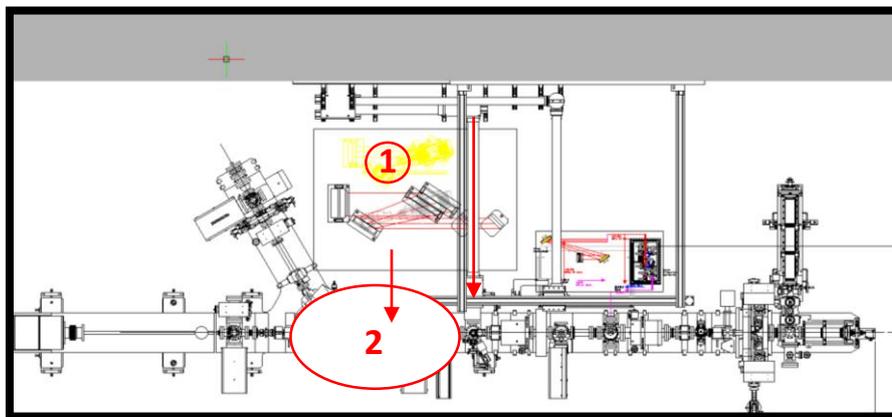


Fig. 6: Arrivée du faisceau de haute intensité au voisinage de la chambre d'interaction dans la salle PHIL. Le faisceau IR étiré (500ps) provenant de LASERIX (flèche rouge) est envoyé dans une chambre sous vide (1) pour être compressé jusqu'à 30-50fs puis dans la chambre d'interaction (2) pour être focalisé sur la cellule plasma.

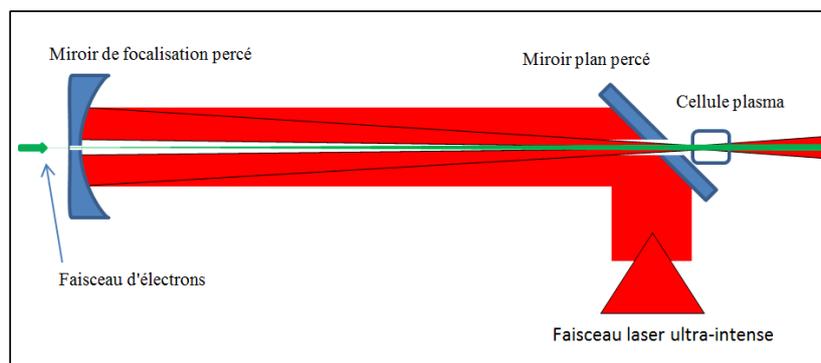


Fig. 7: Schéma de principe (purement illustratif) de la focalisation du faisceau ultra-intense sur la cellule plasma. L'optique de focalisation (de grande longueur focale), et les optiques de guidage du faisceau doivent permettre le passage du faisceau d'électrons.

Pour cette seconde partie la réalisation de la chambre sous vide du compresseur pourra être financée par LASERIX, et les composants optiques du compresseur pourront être fournis sur les stocks existants. Ces deux contributions normalement dédiées à la partie PW de LASERIX devront-être reconsidérées en cas de redéploiement ultérieur de la plateforme.

Conception de la Cellule Plasma

Pour réaliser les expériences d'accélération plasma, il est fondamental de maîtriser la valeur de la densité dans la cellule où se formera le plasma, le long du chemin du laser, pour garantir que l'interaction se fait bien dans le régime linéaire et que la longueur d'onde plasma est ajustée à la durée du paquet d'électrons. Les densités auxquelles nous allons travailler seront de l'ordre de 10^{16} à 10^{17} cm^{-3} .

Les simulations déjà effectuées montrent par ailleurs qu'il serait intéressant de concevoir une cellule dans laquelle s'établit un gradient de densité sur quelques centimètres. Dans un tel cas, la longueur d'onde du plasma augmentera au fur et à mesure de la propagation des électrons dans la cellule, ce qui permettra d'augmenter la longueur d'interaction entre l'onde plasma et les électrons au fur et à mesure que les électrons seront accélérés.

Nous allons dans un premier temps (2016) mettre au point et optimiser la forme de la cellule (diamètre, tuyères...) en simulant le profil de densité par des codes de mécanique des fluides (travail réalisé par le SDTM en collaboration avec les physiciens). Cette tâche sera menée conjointement aux simulations d'accélération laser-plasma en vue de l'optimisation de l'injection et de la mise en forme du paquet d'électrons lors de son entrée dans le plasma, avant d'atteindre la zone d'accélération à proprement parler. Cette zone ne dépassera pas le centimètre.

Les densités envisagées ne permettent pas de réaliser des mesures interférométriques de la pression dans le domaine visible comme dans le travail de thèse de Jinchuan Ju (équipe de Brigitte Cros LPGP) car la variation d'indice linéaire induite par le gaz à si faible pression est trop petite. Deux diagnostics optiques du profil de densité sont prévus. Tout d'abord une mesure de la densité intégrée le long du trajet optique dans la cellule plasma peut se faire en mesurant l'absorption d'un faisceau XUV. Laserix dispose d'une source harmonique d'ordre élevé qui peut générer des harmoniques entre 15 et 30 nm. Les simulations montrent que l'absorption dans une cellule de longueur 1 cm avec une pression de l'ordre du mbar à une telle longueur d'onde est de 10%. La mesure d'une telle absorption est tout à fait envisageable sur la plateforme Laserix. La résolution du profil de densité ne pourra pas être obtenue par une telle mesure. Nous envisageons d'utiliser une cellule en plexiglas qui permet un diagnostic transverse. Le plasma est constitué d'He qui sera dans un état doublement ionisé et simplement ionisé. Ces ions présentent des raies d'émission dans le visible. Nous envisageons de mesurer le profil transverse d'émission du plasma pour remonter au profil de densité. Ce travail pourra être validé sur LASERIX fin 2016 avant même d'effectuer le couplage avec la source d'électrons.

Diagnosics pour les faisceaux d'électrons

Les diagnostics pour les électrons devront permettre une caractérisation des principaux paramètres du faisceau : charge, énergie, dimensions transverse et longitudinale.

Les dimensions transverses pourront être mesurées par des écrans. Des écrans YAG seront utilisés au début mais à moyen terme nous envisagerons aussi l'utilisation d'écran à radiation de transition (OTR) qui donnent une image plus fidèle et permettent d'autres mesures.

Pour l'énergie un aimant sera utilisé comme spectromètre. Le spectromètre actuel de PHIL étant nécessaire en amont de l'expérience il sera nécessaire d'en construire un nouveau. Celui-ci aura une forme en C, la chambre étant ouverte sur un écran Lanex pour donner une mesure avec une grande largeur de bande en énergie.

Pour la charge, PHIL est équipé d'intégrateurs de charge (ICT) qui pourront être utilisés lors des expériences. La performance d'ICT en présence d'un plasma intense a déjà été questionnée celle-ci devra donc être comparée avec d'autres techniques insensibles aux champs créés par le plasma tels que des écrans (OTR ou YAG). ESCULAP offre aussi la possibilité de produire un faisceau et de le mesurer dans un ICT avec et sans décharge dans le plasma pour tester les conditions dans lesquelles la décharge plasma interfère avec l'ICT.

La mesure de la dimension longitudinale sera la plus difficile et plusieurs diagnostics devront être testés. Cela inclut la mesure du spectre émis par les écrans OTR, la méthode des trois phase, éventuellement un moniteur de Smith-Purcell ou une cavité défléctrice.

À plus long terme une mesure d'émittance utilisant une poivrière à haute énergie pourra être envisagée.

Synchronisation entre le laser et le paquet d'électrons.

La génération des paquets d'électrons courts en irradiant la photocathode de PHIL avec un prélèvement du Laserix nécessite évidemment que le laser et la RF soient synchronisés. Sur ce point, le travail de développement électronique a déjà été réalisé. Actuellement Laserix fournit un signal à 75 MHz synchrone de l'impulsion laser à PHIL. Le pilote de celui-ci a été modifié pour générer le 3 GHz du canon RF et un signal 10 Hz à partir de ce signal fourni à 75 MHz. La caractérisation finale du jitter entre la RF avec l'impulsion laser sur la photocathode sera réalisée lors des prochains essais de tir avec Laserix sur la photocathode de PHIL.

La synchronisation entre le laser qui crée le plasma et le paquet d'électrons devra être assurée par une méthode permettant d'évaluer le délai entre le laser et les électrons au niveau de la zone d'interaction à l'échelle la plus courte possible. Nous proposons pour cela d'utiliser une méthode électro-optique (Electro-Optic-Sampling [1], [2], [3]). Le principe de la mesure est le suivant : le paquet d'électrons de durée la centaine de fs passe à proximité d'un cristal de Zn-Te et induit une biréfringence dans le cristal que l'on peut mesurer grâce à la modification induite sur la polarisation de la lumière qui traverse le cristal au même instant que passent les électrons. L'information temporelle est codée sur le spectre de la lumière. Cela nécessite d'éclairer le cristal de Zn-Te avec une source large spectralement. Pour cela un prélèvement du faisceau infrarouge (quelques μ) qui sert à générer les photoélectrons servira à créer un super continuum dans une lame de Saphir. Le super continuum est ensuite dispersé temporellement (typiquement à la dizaine de ps) et est envoyé dans le cristal de Zn-Te. La biréfringence induite modifiera la polarisation de la partie du spectre qui traversera le cristal au même instant que les électrons. L'analyse du spectre permet de remonter à l'information temporelle du passage des électrons. Pour synchroniser le passage des électrons avec le laser infrarouge qui crée le plasma, nous envisageons d'envoyer une partie de celui-ci dans le même cristal de Zn-Te pour induire lui-même une biréfringence par effet Kerr. Cette méthode permettra de contrôler le délai entre le laser créant le plasma et le paquet d'électrons à la résolution de l'ordre de la ps.

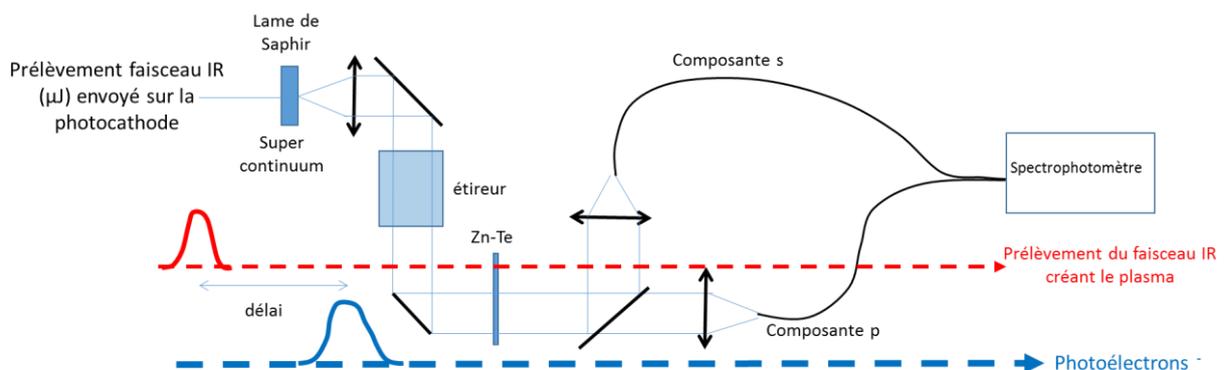


Fig. 8 : Schéma de principe du sampling électro-optique pour le contrôle du délai entre le laser et les paquets d'électrons

- [1] I. Wilke et al, *Phys Rev Lett*, **88**, 124801 (2002)
 [2] Berden et al, *Phys Rev Lett*, **93**, 114802 (2004)
 [3] De Waele et al, *Radiation Physics and Chemistry*, **78**, 1099 (2009)

Financier

Ressources, budget

Le budget final pour le projet ESCULAP sera arrêté au moment de l'édition de l'APD.

Nous pouvons ici donner les grandes lignes du budget nécessaire pour l'accomplissement des objectifs définis pour l'année 2016.

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

Le tableau 1 montre la répartition en ETP pour le personnel déjà identifié comme partie prenante du projet.

Nom	Affiliation	Fraction
Christelle Bruni	LAL	0,3
Nicolas Delerue	LAL	0,5
David Garzella	CEA/DRF	0,35
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

Tableau 1 : Récapitulatif des ETP déjà identifiés pour ESCULAP

Une position post-doctorale de 24 mois a été financée par le LABEX P2IO et le recrutement est en cours. Au cours du projet, il est envisagé de recruter au moins deux étudiants en thèse, grâce notamment aux liens privilégiés avec le M2 « Grands Instruments ».

Le budget en équipement sera majoritairement alloué par des contrats externes. Un exemple est donné par le projet DRUM (LABEX P2IO), porté par C. Bruni, qui finance une partie de l'équipement, à hauteur de 66 k€, ventilé selon le tableau ci-dessous.

Type d'équipement	Place dans le projet	Prix
Triplage de fréquence	Ajustement longueur d'onde laser	8k€
Compresseur	Ajustement durée du laser	15k€
Thermalisation	Stabilisation de la phase pour la mesure des 3-phases	3k€
Déphaseur + guide	Contrôle de la phase du booster pour la mesure des 3-phases	40k€
Total		66 k€

Tableau 2 : Récapitulatif du financement dans le cadre du projet DRUM, financé par le Labex P2IO

Concernant la subvention demandée au LAL pour l'année 2016, nous reportons le tableau suivant, par groupe de travail et poste détaillé. On précise ici que les missions techniques envisagées concernent la création de collaborations et la consolidation du consortium avec les partenaires européens. Le total du budget demandé s'élève à 48 k€.

<i>Coordination</i>	
Missions techniques	3 k€
<i>Booster</i>	
Electronique	5 k€
Composants RF	10 k€
<i>Faisceaux Laser IR-UV et Optique</i>	
Optomécanique	10 k€
<i>Diagnostics Electrons</i>	
OTR	4 k€
Spectromètre électrons	6 k€
<i>Synchronisation</i>	
Spectromètre + caméra CCD	3 k€
Cristal Zn-Te	2 k€
Polariseurs	500 €
Lame $\lambda/4$	500 €
Lentilles	2 k€
Miroirs	1 k€
Etireur (lame de SF57)	1 k€

Tableau 3 : Financement demandé au LAL pour l'année 2016