

Photoinjecteurs

H Monard 18/05/2016

Résumé

Les photo-injecteurs* sont devenus depuis leur apparition dans les années 80, une composante essentielle de linac nécessitant un faisceau de haute qualité, en termes de brillance, d'émittance, de durée d'impulsion, de dispersion d'énergie. En effet, la tendance est une demande de faisceau de forte brillance, de faible émittance, et plus récemment de durée d'impulsion très courte.

Un photoinjecteur est constitué à la base d'une cavité RF fonctionnant en mode stationnaire couplée avec un laser qui vient éclairer une photocathode. La photoémission est le mode de production des électrons. C'est la physique associée à la photoémission, et l'accélération rapide des électrons qui permet d'obtenir des paramètres intéressants, et le tout avec une compacité remarquable.

La plateforme de R&D pour les photo-injecteurs s'appelle PHIL (Photo-Injecteur au LAL) et c'est de son développement qu'il s'agira ici. Nous évoquerons les liens entre PHIL et les autres projets nécessitant un photo-injecteur : ThomX, PRAE, ESCULAP. En effet PHIL sert de plateforme de tests pour les différents projets.

1. Enjeux scientifiques

Les enjeux scientifiques liés aux photo-injecteurs peuvent être listés en liaison avec les paramètres suivants :

- une faible émittance $< 5 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$
 - permet l'obtention de faisceau de grande brillance, par exemple pour les lasers à électrons libres [lowemit].
- une très courte durée $< 1 \text{ ps}$
 - une très courte durée (10 à 100fs) permet d'envisager un photo-injecteur comme source d'électrons pour le scénario d'accélération laser-plasma avec une injection externe. Le temps de réponse de la photocathode n'est pas encore limitant [responsatto]. Cela permet aussi d'envisager de la radiolyse pulsée en mode fs, mais aussi d'autres types d'expériences [radiolysfemto]
- un fort gradient accélérateur $> 100 \text{ MV/m}$ (en bande S)
 - un fort gradient permet de neutraliser plus vite les effets de charge d'espace et de conserver au mieux les caractéristiques comme la durée d'impulsion, l'émittance,...
- un grand taux de répétition $> 50 \text{ Hz}$
 - un taux de répétition élevé permet d'envisager un photo-injecteur comme source d'électrons avec un meilleur cycle utile, tendant ultimement vers le continu. Par exemple, dans un scénario de production de rayonnement Compton utilisant un linac(ELI-NP), une grande fréquence de répétition améliore le flux émis. Il permet

aussi de limiter les temps d'acquisitions et donc les fluctuations de signal lorsque des expériences utilisent un photo-injecteur (radiolyse, LEETECH, ...).

Un grand taux de répétition, est désirable pour toute expérience où l'on fait une coïncidence entre deux ou plus encore de particules, le taux de coïncidences fortuites est proportionnel au taux instantané. Avec un faisceau « quasi » continu, on peut mesurer des processus rares qui ne sont pas noyés dans événements les fortuits. Dans le cas de PRAE est très favorable pour les expériences de mesure du rayon du proton.

Une direction possible est le canon RF supraconducteur. Des études sont en cours [rfsupra]

- un faible nombre d'électrons émis par impulsion
- beaucoup de demande concerne la calibration de détecteurs avec un faible nombre d'électrons par impulsion (LEETECH). Cette demande permet un axe de développement à la fois des moyens de production, par exemple en utilisant la photoémission multiphotonique [nphoton], et des moyens de caractérisation et de mesure d'un faible nombre d'électrons par impulsion [diam]. PRAE profitera aussi de l'expérience acquise avec LEETECH dans ce domaine.

- la production d'électrons polarisés

La production d'électrons polarisés est utile dans certaines expériences de physique nucléaire. La polarisation ouvre des champs d'application physique, en particulier vers la violation de la parité. Pour les positrons, c'est la façon la moins coûteuse d'avoir des positrons polarisés pour faire de la physique à n'importe quelle énergie, de la physique du solide à ILC.

L'AsGa comme source d'électrons polarisé a fait ses preuves dans des canons de type électrostatique, mais il n'est pas utilisé dans des canon RF au vu de ses exigences en terme de vide, et de sa fragilité. Un champ de recherche peut ici être ouvert.

2. Enjeux technologiques

Les axes de R&D qu'il faut pousser pour les photo-injecteurs sont liés aux trois composantes d'un photo-injecteur :

- Le canon RF
- La photocathode
- Le laser

2.1 Le canon RF

Le canon RF est une cavité constituée de $n + 1/2$ cellules fonctionnant en mode d'onde électromagnétique stationnaire. Les fréquences utilisées et les longueurs typiques associées sont la bande S (3GHz, 10 cm) , la bande C (6 GHz, 5 cm) et la bande X (12 GHz, 2.5 cm). Plus la fréquence est élevée plus les cavités sont petites (meilleure compacité), mais elles deviennent plus difficiles à fabriquer, et les paramètres du faisceau que l'on peut obtenir ne sont pas équivalents. Pour une charge élevée (> 1 nC) il vaut mieux la bande S par exemple [scalerfgun].

Les progrès qui restent à faire, en bande S, concernent :

- obtenir un fort gradient $> 100 \text{ MV/m}$

Il faut améliorer les géométries, les procédés de nettoyage des surfaces internes des cavités,...

-augmenter le nombre de cellule

Un canon RF « classique » comporte aujourd'hui 2.5 cellules ce qui permet de produire Un faisceau de 5 MeV environ.

La fabrication d'un canon de 4.5 cellules permet d'obtenir un faisceau de 9 MeV directement avec des caractéristiques intéressantes et permet aussi des économies car une seule source RF est nécessaire, et un réseau de distribution de la RF simple. Ce projet est à l'étude sur PHIL. L'autre option étant d'ajouter une petite section accélératrice indépendante, mais alors des dépenses supplémentaires sont à prévoir pour la distribution de la RF (gain estimé à 100 k€).

- réduire les délais et les risques et les coûts de fabrication

Un mode de fabrication plus industriel serait souhaitable et la question du transfert de technologie se pose ici.

Une piste qui concerne la fabrication d'un canon RF sans brasage qui est possible aujourd'hui [nobraze].

La stabilité du niveau de champ dans le canon RF est liée à la stabilité de la source RF. C'est une instabilité de second ordre par rapport à celle du laser. Les points critiques d'un photo-injecteur en fonctionnement sont liés : au jitter de phase du laser par rapport à la RF, à la stabilité de position transverse du faisceau sur la cathode,

2.2 La photocathode

La photocathode est l'élément clé pour les paramètres du faisceau. Les paramètres du faisceau souhaités dépendent des besoins des utilisateurs du faisceau : nécessité d'une forte charge ? D'une durée d'impulsion très courte ? D'une longue durée d'acquisition, etc. Les paramètres du faisceau sont la convolution entre les caractéristiques du laser et les propriétés d'émission de la photocathode.

Les photocathodes utilisées sont de deux types : métalliques ou semi-conductrices. Le tableau ci-dessous résume leurs avantages et inconvénients :

	Métallique	Semi-conductrices
Rendement à l'utilisation	Faible 0.01 à 0.01 % charge $< 300 \text{ pC/pulse}$	Bon $>1\%$ Charge $> 1 \text{ nC/pulse}$
Durée de vie (dépend utilisation)	Longue $>6 \text{ mois}$	Moins longue $< 1 \text{ mois}$
Temps de réponse	$< 100 \text{ fs}$	$< 100 \text{ fs}$
Fabrication	Facile	Plus difficile fabrication spécifique
Coût	Faible	Elevé Bâti d'évaporation ultra-vide Bras de transfert

La durée de vie d'une photocathode dépend de la façon dont on l'utilise. Elle peut être vue comme un réservoir fini d'électrons que l'on vient vider au fur et à mesure de l'utilisation.

Le temps de réponses des photocathodes est une question qui devient de plus en plus d'actualité, surtout pour la production d'impulsions ultra-courtes (< 10 fs).

Des estimations peut être faite à partir du modèle à 3 étapes décrivant la photoémission : $\sim 10^{-15}$ s pour les métaux, et 10^{-12} s pour les semi-conducteurs [spicer]. Des mesures récentes semble montrer que le temps de réponse est du domaine de l'attoseconde [repatto].

Les progrès en matière de photocathode concernent :

- la durée de vie que l'on souhaite la plus longue possible, plusieurs mois, voire des années
- la reproductibilité des rendements après préparation et fabrication pour que l'on puisse obtenir le même niveau de charge par impulsion
- L'homogénéité du rendement sur la surface de la cathode afin d'améliorer l'émittance du faisceau

2.3 Le laser

Le laser est la source de la formation des caractéristiques d'une impulsion :

- Sa durée donne la durée d'impulsion des électrons
- Son énergie donne la charge émise
- Sa distribution transverse d'énergie influence la valeur de l'émittance
- Sa stabilité en position influence celle du faisceau d'électrons
- Sa stabilité en énergie donne la fluctuation de la charge émise

Les lasers sont capables de délivrer des impulsions de durée ultra-courte (~ 10 fs).

Les calculs et les mesures montrent qu'une distribution transverse « plate » donne une meilleure émittance. Une autre piste d'amélioration concerne une distribution ellipsoïdale [laserellips]

3. Projet

En quoi consiste exactement le projet, et comment il répond aux enjeux susmentionnés ? Quelles sont les productions scientifiques attendues (publications, brevets, thèses, réalisations, etc.) ?

L'accélérateur PHIL est une station de tests de photo-injecteur installée au LAL, qui se situe dans la continuité des activités de R&D accélérateur du LAL. C'est en s'appuyant sur son expérience passée avec CANDELA, ALPHAX, ELYSE, le CLIC test Facility et PITZ que le LAL a maintenant une expertise reconnue mondialement dans le domaine des photo-injecteurs de forte brillance. La pertinence de PHIL s'articule autour de deux thèmes : le développement des sources d'électrons de forte brillance d'une part, et la production de faisceau pour des utilisateurs d'autre part. Dans ce contexte, le fait de disposer d'un accélérateur local à Orsay, qui permet de faire des tests sur des appareillages qui sont destinés à être montés sur des accélérateurs à visibilité internationale (CERN, ATF, ...), est un atout majeur. PHIL est aussi une plateforme qui

permet de former les techniciens et ingénieurs pour des projets similaires ou connexes comme THOMX. Des travaux pratiques pour des étudiants de master se sont déroulés à plusieurs reprises.

Les thèmes forts du programme de R&D de l'équipe PHIL pour les sources d'électrons du futur sont :

- l'obtention de fort gradient de champ accélérateur (100 MV/m),
- la production et la caractérisation de faisceaux sub-picosecondes,
- l'obtention de faible émittance via la mise en forme du laser,
- l'optimisation du nombre de cellules pour un canon HF
- Obtenir et quantifier de très faibles charges < 1 pC /impulsion
- la fabrication de photocathodes ayant une plus grande durée de vie,
- la minimisation du courant d'obscurité.

Le premier faisceau d'électrons à PHIL a été obtenu fin 2009. PHIL est capable aujourd'hui de produire un faisceau d'électrons picoseconde avec une énergie de 2 à 5 MeV, avec une charge variant de 5pC à 1 nC, une émittance variant de 3 à 10 mm.mrad, à une fréquence de 5 Hz ainsi qu'un gradient accélérateur de 90 MV/m.

PHIL a été initialement financé par le projet européen CARE (FP6). Les upgrades ont été financés par le LAL et l'IN2P3. Notamment, l'IN2P3 a supporté PHIL en lui permettant d'acquérir récemment un circulateur autorisant la montée en gradient accélérateur du photoinjecteur. L'arrivée de LASERIX [laserix] au LAL proche de PHIL est une occasion unique pour mesurer et quantifier les performances des paquets courts obtenus par un photoinjecteur à fort gradient.

Cette plateforme ne peut pas explorer toutes les pistes citées ci-dessus par manque de moyens humains et financiers, d'autant que PHIL accueille des utilisateurs nécessitant des adaptations matériels et du temps faisceau dédié.

Cependant certaines pistes peuvent être suivies relativement facilement, et certaines réalisations ont déjà eues lieux :

Canon RF :

- Fort gradient accélérateur > 100 MV/m. PHIL a obtenu 92 MV/m en 2011
Des efforts restent à faire pour rendre un fonctionnement à 100 MV/m routinier.
- Un projet de canon RF en bande S avec 4.5 cellules
Ce projet est déjà démarré et les simulations RF sont en cours. Il faudra par la suite trouver de bonnes stratégies pour le brasage.
- De faible émittance obtenues (3 mm.mrad)
Obtenue en 2010 pour une faible charge.
- De très faibles charges < 1 pC /impulsion
- Augmenter le taux de répétition de 5 à 10 puis 50 Hz

Le laser :

- Le laser initial de PHIL est un Nd:YLF ayant une durée d'impulsion minimale possible de 5 ps (mi-hauteur)

- L'arrivée de LASERIX et de l'équipe associé au LAL permet des développements dans la direction des impulsions très courtes : projets FEMTAC, DRUM et ESCULAP

La photocathode :

- Des tests concluants de photocathodes en magnésium ont déjà eu lieu. La magnésium est le métal possédant le meilleur rendement parmi les métaux. Cette photocathode sera utilisée pour ThomX afin d'atteindre 1 nC/impulsion. PHIL à jouer pleinement ici son rôle de plateforme de R&D photoinjecteur.
- D'autre part, un projet de développement technique entre le CERN/CTF et le LAL a permis la mise au point d'un bras de transfert de photocathodes en Cs₂Te sous vide (sans avoir à remettre à l'air le canon RF).

Ce qui est envisagé :

- Refonte de la ligne de transport afin de gagner en souplesse d'utilisation pour les demandes diverses d'utilisation du faisceau
- Augmentation de l'énergie du faisceau de 5 à 9 MeV par deux méthodes : ajout d'un booster et/ou fabrication d'un canon de 4.5 cellules
- Augmentation de la fréquence de récurrence. Ce projet est en liaison avec le projet PRAE
- Production de paquets ultra-courts en liaison avec DRUM et ESCULAP

PHIL est déjà générateur de publications et a accueilli un thésard de 2012 à 2015.

4. Genèse et calendrier

Comment / quand le projet est-il né ? Quelles sont les étapes franchies / à franchir ? Au niveau global (si applicable), mais surtout à l'IN2P3. Le cas échéant, rappeler d'éventuels passages devant des conseils scientifiques (IN2P3, labo, comité d'expériences, etc.) et leur conclusion. Quelles sont les productions scientifiques passées (publications, brevets, thèses, réalisations, etc.) ?

L'activité photo-injecteur est née au LAL dans les années 90, peu de temps après la test du premier canon RF américain. Un certain nombre de canon RF ont été réalisés au LAL pour différents laboratoires.

Année	Nom	E (MeV)	Emit (µm.rad)	ncell	Application
1988	CANDELA			nc	R&D canon HF
2000	Elyse	3	25	1.5	Radiolyse pulsée
2003	Alpha-x	6	10	1.5	Production RX
2008	CERN/Calife	5	8	2.5	Injecteur CLIC probe beam
2007	CERN/PHIN 1	5	8	2.5	Injecteur CLIC drive beam
2010	LAL/PHIN3	6	5	2.5	Phil : R&D canon
2012 ?	RadIndi	5	8	2.5	Radiolyse pulsée Inde abandonné
2016	ThomX	5	8	2.5	Production RX En cours
2017 ?	4.5c	9	10	4.5	Phil : R&D canon
2017 ?	PRAE				

Après une période de réhabilitation de locaux du LAL, PHIL s'est installé avec les résultats suivants :

- 1^{er} faisceau 2009
- Accélérateur plus fiable. Amélioration continue temps de faisceau disponible : 40 j/an (2010) à 90j/an (2013).
- Equipement en diagnostics : charge, taille, émittance, énergie+dispersion, durée
- Accueil utilisateurs : 5 utilisateurs depuis 2010
- Accueil stagiaires M2 + 1 thésard
- Obtention financement pour TP P2io (sept 2014)
- Étude de 2 canons RF : alphax+ PHIN
- 1^{er} article 2012
- Étude cathode Mg : préparation surface limite le conditionnement à 2h et charge max ~ 2 nC
- Installation bras de transfert de photocathodes
- Obtention gradient max de 92 MV/m (2010)
- Mesure émittance min ~ 3 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (rms normalisée, faible charge 30 pC)
- Dispersion énergie min $\sim 0,2$ % (faible charge 50 pC)

La principale étape à franchir est la fiabilisation de l'accélérateur, et l'adaptation pour les utilisateurs (focalisation, compacité, versatilité), ainsi que de franchir des performances en terme de gradient accélérateur et de durée des paquets.

PHIL est passé au conseil scientifique du LAL en 2010.

Publications :

Performances of the alphax rf gun on the PHIL accelerator at LAL, T. Vinatier et al., NIMA, 797 (2015)

PHIL a beam test line at LAL, R. Roux et al., HAL, in2p3-00450630

PHIL a beam test line at LAL, R. Roux et al., EPAC 2008

Experimental results on the PHIL photoinjector test stand at LAL, R. Roux et al., LINAC 2012,

Design of a 4.5 cell rf gun, R. Roux, poster, IPAC 2010

A slow laser feedback for the PHIL photoinjecto, N. El Kamchi, 2012

Thèses :

“Influence des paramètres du laser sur la dynamique des paquets courts d'électrons relativistes dans des accélérateurs linéaires basés sur des canons RF et développement de diagnostics associés “, T. Vinatier, 2015

5. État de l'art

Comment se positionne le projet vis-à-vis de l'éventuelle concurrence (nationale, européenne et internationale) en termes de calendrier et de performances ?

La R&D photo-injecteurs est un sujet depuis la fabrication du premier canon RF en 1985. Elle a suivi les progrès de réalisation des cavités, du développement des lasers, des photocathodes.

Les grands centres européens qui s'emparent de cette thématique sont PITZ (Berlin) et SFTC (Angleterre), l'INFN (Milan). Le CERN/CTF a longtemps été un acteur pour le développement des photocathodes et des canon RF.

Des collaborations existent entre ces différents centres. Par exemple, PITZ reçoit des photocathodes CsTe fabriqué à Milan.

Le LAL a participé au design du spectromètre de PITZ (Heda2) et a fabriqué les canon RF de CLIC. Le futur photo-injecteur de Daresbury a repris un canon RF fabriqué par le LAL (dit canon alpha-x), que nous avons caractérisé en 2009-2011. Les relations de PHIL avec ses homologues (Pitz) existent à travers des échanges de technologie et d'informations. Cependant, PHIL gagnerait à établir des collaborations scientifiques sur des sujets précis comme les photocathodes, les impulsions courtes, ...

6. Ressources et moyens

Quelles sont les ressources techniques et humaines disponibles pour le projet, et leur évolution temporelle passée (si applicable) et envisagée ? Pour un projet collaboratif, indiquer quelle fraction l'IN2P3 représente, en termes humains et financiers.

Ressources humaines : Lister les laboratoires impliqués à l'IN2P3, avec pour chacun, le nombre de physiciens permanents / non-permanents / ingénieurs impliqués, ainsi que l'équivalent FTE. Donner les noms, au moins des permanents, ainsi que la fraction de chacun dédiée au projet.

Laboratoires impliqués : LAL

En 2012, 5 FTE était mobilisé sur PHIL.

En 2016, 1.3 FTE sont mobilisés. Cette perte s'explique par des départs, des transferts sur d'autres projets. Il est clair qu'il faut renforcer PHIL en ressources humaines compte tenu des projets du Depacc. Il faudrait revenir au niveau de 2012.

Un post doc financé par le labex P2IO arrive en juillet 2015 sur la thématique laser – paquets courts

Besoins en personnel :

- 1 IR avec un profil expérimentateur dédié aux mesures de dynamique faisceau, l'entretien et l'évolution de diagnostics associés, ainsi qu'à l'interface avec les utilisateurs (définition des besoins, adaptation de PHIL)
- 1 thésard en lien avec l'émission d'électrons à la cathode (processus multiphotonique, bras de transfert universel compatible, quantifier les performances en terme de faisceau de différents cathodes)
- 1 IE pour l'électronique et contrôle à distance, automatisation des mesures
- 1 AI opérateur de la machine grand instrument

Ressources financières :

PHIL est presque exclusivement financé sur ressources propres du laboratoire et de l'in2p3. Une petite part est venue de financement P2io.

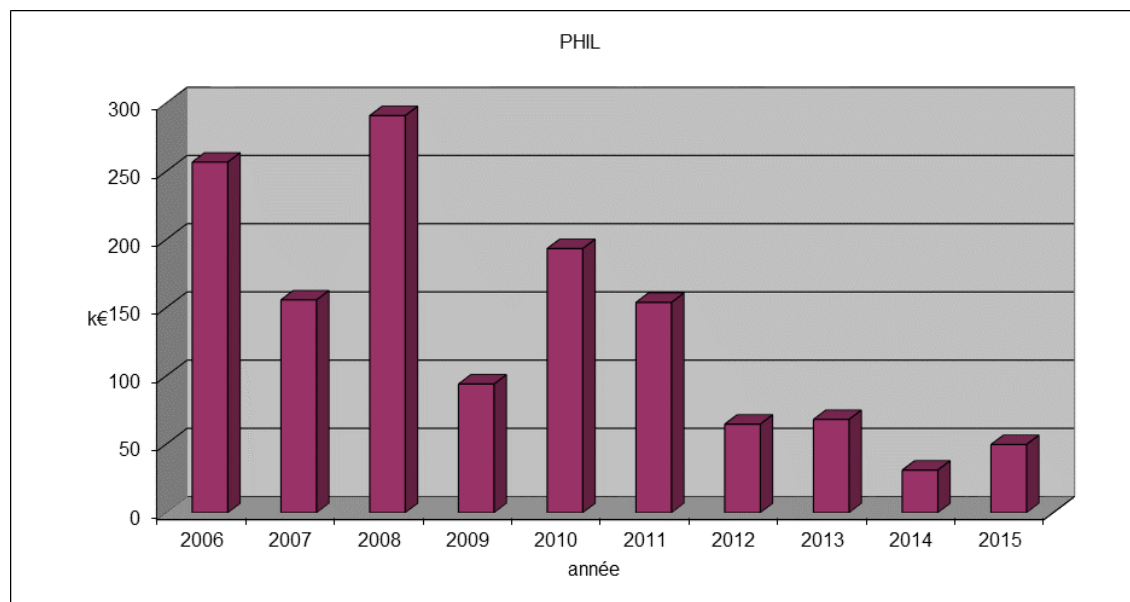


Tableau de financement de PHIL

Le tableau ci-dessus donne le budget dépensé par PHIL depuis 2006 (1,2M€ sur 10 ans). Les premières années (2006-2008) sont consacrées essentiellement au bâtiment et à un minimum d'équipement de diagnostics. 2009 est l'année du premier faisceau, puis des modifications du modulateur et une seconde tranche de diagnostics sont intervenus (2010-2011). Enfin, le budget dépensé continue la fin d'équipement des diagnostics, achat de quelques spare, le bras de transfert, les adaptations pour les utilisateurs ...

Le budget alloué à PHIL est clairement insuffisant au vu des développements prévus. Le coût de fonctionnement seul annuel de PHIL est estimé à 80 k€, son coût horaire d'utilisation entre 1 et 2 k€/jour (hors personnel).

Un budget correct pour le développement de PHIL serait autour de 150 k€/an.

La thématique paquet court a obtenu un budget de 66 keuros via un appel d'offre P2IO couvrant les dépenses d'optique pour le faisceau Laserix à la cathode, et un déphaseur. Le booster sera réalisé en interne en 2015-2016.

La focalisation est un point crucial demandé par les utilisateurs et nécessaires pour certains diagnostics. Elle nécessiterait l'achat de trois quadrupôles et leur alimentation estimée à 50 keuros.

La fiabilisation de la plateforme ainsi que sa jouvence nécessiterait un budget de 1 Meuros.

7. Réalisations techniques

Quelles réalisations techniques sont envisagées, et comment seront-elles réalisées (interne, sous-traitance...) ? Préciser ici les besoins en personnel technique. Si des équipements spécifiques doivent être acquis, préciser leurs potentielles utilisations futures.

- Liste réalisation techniques prévues :
 - Un booster et un déphaseur réalisé en interne afin de maîtriser les étapes de fabrication → énergie nominale de PHIL, mesure des paquets courts par la méthode des 3 phases
 - Un mesureur d'émittance par des fentes est en cours de réalisation en interne
 - Le bras de transfert amélioré en interne → tests de photocathode, échange avec d'autres installations internationales
 - Un Canon 4.5 cellules qui pourra être fait en interne, permettra d'atteindre directement 9 MeV, en remplacement du canon actuel
 - Changement modulateur (Frep = 50 Hz)
 - Une modification de l'enceinte de radioprotection pour fonctionner à 50 Hz et pouvoir monter en énergie. Cela implique des travaux et l'arrêt de PHIL ainsi que la révision de l'autorisation délivrée par l'ASN.

8. Les liens entre PHIL et les autres projets

Les liens entre PHIL et les autres projets (ThomX, PRAE, ESCULAP) sont évidents.

Outre sa propre thématique R&D des photo-injecteurs et utilisateurs, PHIL sert de plateforme de tests divers : diagnostics, conditionnement de canon RF, tests de photocathodes, tests d'aimants ... Par exemple, les BPM de ThomX seront testés dans leur intégralité : fonctionnement, pilotage, et permet un premier retour d'expérience avant l'installation sur site. Il paraît important de garder la R&D sur PHIL qui pourra aider les autres projets, aussi bien techniquement que pour la formation des personnes à la conduite d'opérations, ainsi que pour la formation des étudiants. De nouvelles photocathodes, un nouveau canon RF, un diagnostic plus performant ... tout cela pourrait être testé sur PHIL. Les injecteurs des autres projets sont basés sur l'architecture de PHIL.

De plus, l'arrivée de Laserix permet un développement vers les impulsions très courtes grâce à l'injection d'une partie du laser de Laserix.

9. Auto-analyse SWOT (facultative)

Quelles sont les forces, faiblesses, opportunités et menaces qui pèsent sur le projet.

Forces :

- Savoir-faire canon RF
- compétence laser

- plateforme pour autre projets (ThomX, Prae, Esculap, Femtac)

Faiblesses :

- Budget insuffisant
- Personnel insuffisant

Menaces :

- Implication du personnel sur d'autres projets
- ...

Opportunités :

- Projet Esculap
- Projet PRAE
- ThomX

Références

design reports, sites webs, etc

[lowemit] RECENT RESULTS AND PERSPECTIVES OF THE LOW EMITTANCE PHOTO INJECTOR AT PITZ, F. Stephan et al. / Proceedings of the 2004 FEL Conference, 347-350

[short] generation of ultra-short , high brightness relativistic electron bunches, PhD Thesis, FB Kiewet, 2003

[repatto] R. Locher et al., Energy-dependant photoemission delays from noble metal surface by attosecond interferometry,

[laserellips] M. Krasilnikov et al., FEL2013, NY, beam dynamics optimization for the high brightness Pitz photo-injector using 3D ellipsoidal cathode laser pulses

[radiolysfemto] DEVELOPMENT OF A FEMTOSECOND PULSE RADIOLYSIS FOR REACTION ANALYSIS IN NANO-SPACE, proceedings of EPAC 2004

100 femtosecond MeV electron source for ultrafast electron diffraction, J. Yang et al., Radiation Physics and chemistry 78 (2009)

[spicer] modern theory and application of photocathodes, Slac Pub 6306, 1993

[responsatto] energy dependant photoemission delays from noble metal surfaces by attosecond interferometry, R. Locher at al.

[rfsupra] review on superconducting RF guns, D. Janssen at al.
A superconducting Rf photo-injector for operation at ELBE linear accelerator, J teichert et al., FEL 2007

[multiphoton] Multiphoton Photoemission from a Copper Cathode Illuminated by Ultrashort Laser Pulses in an rf Photoinjector, P. Musumeci, Phys. Rev. Lett. 104, (2000) 084801

[leetech] LEETECH FACILITY AS A FLEXIBLE SOURCE OF LOW ENERGY ELECTRONS, D. Attie et al. arXiv:1601.04348

[diam] Status of diamond detector development for beam Halo investigation at ATF2, S. Liu et al., IPAC 2014, THPME09

DEVELOPMENT OF DIAMOND SENSORS FOR BEAM HALO AND COMPTON SPECTRUM DIAGNOSTICS AFTER THE INTERACTION POINT OF ATF2, Shan Liu et al., IPAC2013

[scalerfgun] on the frequency scaling of RF gun, LCL Lin,

Charge and wavelength scaling of RF photoinjectors, a design tool, J. Rosenberg, E. Colby,

Introduction to photo-injector design, C Travier, note LAL/RT 93-08

[Polaris] polarized electron using the PWT RF gun, Slac pub 9550, 2002

[nobraze] new technology based on clamping for high gradient radio frequency photogun, D. Alesini et al. Phys. Rev. ST, accelerators and beams 18, (2015)

[laserix]

<http://hebergement.u-psud.fr/laserix/fr/>

<https://www.sfpnet.fr/rendez-visite-a-phil-et-laserix-avec-la-sfp>