



---

” ‘ • ’ ‡ ... - < ~ ‡ • f ... ... ± Ž ± ” f - ‡  
f ’ ’ ‘ ” - † - %oo ” ‘ — ’ ‡ † ‡ - ”  
• — ” Ž ‡ • f ... ... ± Ž ± ” f - ‡

---

Document compilé par M. Baylac, S. Boussoret, O. Napoly à partir des contributions de:

F. Ardellier, P. Bambade, M. Baylac, J.L. Biarrotte, S. Bousson, A. Chancé, F. Chautard, R. Chehab, S. Chein, N. Chauvin, E. Cottereau, A. Daël, J.M. De Conto, R. Duperrier, G.A. Durand, P. Delahaye, B. Gastineau, A. Gillibert, R. Gobin, J.F. Gournay, T. Kurtukian-Nieto, A. Jérémie, C. Lau, B. Launé, A. Lopez, O. Napoly, P.A. Nghiem, T. Lamy, F. Peauger, B. Pottin, J.M. Rey, J.M. Rifflet, H. Savajols, C. Schmidt, C. Stodel, P. Sortais, A. Specka, D. Uriot, A. Variola, P. Védrine, W. Kozanecki, F. Zomer

Mars 2012

## Sommaire

Préambule.....	4
1. Physique des particules.....	5
a. Collisionneurs $e^+e^-$ haute luminosité.....	5
b. Collisionneurs pp et ep.....	6
c. Collisionneurs linéaires $e^+e^-$ .....	7
d. Faisceaux de neutrinos et muons.....	8
e. Autres: polarisation.....	9
2. Physique nucléaire.....	9
a. Production d'ions radioactifs.....	9
b. Spectromètres.....	10
c. Cibles/sources.....	12
3. Machines neutroniques.....	15
a. Sources de neutrons.....	15
b. Irradiateurs.....	15
c. Réacteurs hybrides.....	16
4. Sources de rayonnement.....	17
a. Sources compactes.....	17
b. 4 <sup>ème</sup> génération/ ERL.....	18
5. Machines médicales.....	19
a. Cyclotrons.....	19
b. Synchrotrons.....	19
6. Développements technologiques.....	21
a. Dynamique de faisceau.....	21
b. Source de positons.....	22
c. Source d'ions légers.....	23
d. Source d'ions lourds.....	24
e. RFQ.....	26
f. L'Injecteur de Protons de Haute Intensité (IPHI).....	27
g. RF: cavités supraconductrices.....	27
h. RF: structure haut gradient.....	29
i. RF: sources coupleurs.....	31
j. Cryogénie.....	31

k.	Faisceaux ultra courts.....	31.....
l.	Aimants supraconducteurs.....	31.....
m.	Instrumentation de faisceau.....	34.....
n.	Contrôle commande.....	36.....
7.	Nouvelles techniques d'accélération.....	37.....
a.	Accélération par ondes plasma.....	37.....
	Le programme de CILEX.....	38.....
b.	Source de protons et d'ions par laser.....	39.....
8.	Interdisciplinaire.....	39.....
a.	Machines électrostatiques.....	39.....
b.	Déclassement des accélérateurs.....	40.....
9.	Infrastructures.....	40.....
10.	Valorisation.....	41.....
11.	Enseignement.....	42.....

## Préambule

Ce document présente un travail de prospection effectué au sein de la communauté des accélérateurs en France. La méthodologie repose sur une analyse par grande thématique de travail : physique des particules, physique nucléaire, développements technologiques, ....

Nous avons collecté 40 contributions environ dans l'objectif de broser un tableau cohérent et prospectif de nos activités, mais nous ne revendiquons pas l'exhaustivité du présent document. Nous avons tenté de proposer des pistes de discussion pour stimuler les échanges lors des journées de Giens.

# 1. Physique des particules

## a. Collisionneurs e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> haute luminosité

Les collisionneurs circulaires e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> de haute luminosité actuellement en opération, fonctionnent à des énergies de l'ordre de quelques GeV, soit :

- DALNE (Frascati) et VEPP-2000 (BINP) à l'énergie du  $10^4$  GeV pour étudier la violation de CP dans le secteur des Kaons,
- BEPCII (IHEP Chine) utilisé comme usine à quarks charme et à taus avec une luminosité visée de  $10^{33}$  cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>.

Les usines à mésons 'B', PEP-II (SLAC) et KEKB (KEK) ont été arrêtées respectivement en 2008 et 2010 lorsque leur luminosité avait atteint  $10^{34}$  cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>. Les prochaines générations d'usines à B visent une luminosité cent fois supérieure de  $10^{36}$  cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>. Afin de produire une telle luminosité, le projet italien SuperB (INFN, Tor Vergata), dont une partie des éléments provient de PEP-II, et le projet japonais SuperKEKB (KEK) utilisent un schéma de collision à grand angle de Piwinski (le rapport de l'angle de croisement à l'angle diagonal du faisceau dans le plan de croisement). Le projet SuperB envisage en outre d'améliorer la stabilité des collisions grâce au schéma d'optique « crab waist ». Les deux projets ont été approuvés et inaugurés officiellement.

Dans le cadre des usines à charme et tau, un projet russe basé à BINP (Novosibirsk) visant une luminosité de  $10^{35}$  cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> est à l'étude utilisant un schéma « crab waist » similaire à SuperB.

L'éventualité de la découverte au LHC d'un boson de Higgs léger ouvre la perspective d'un projet dit 'LEP3' (ou 'SuperTristan' à KEK) de collisionneur visant une énergie de centre de masse de l'ordre de 240 GeV et une luminosité de l'ordre de  $10^{34}$  cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>. Sa construction poserait des défis majeurs dans les domaines de la RF supra (cryomodules à hauts gradients en mode continu, dit CW), de la maîtrise des effets du rayonnement synchrotron et de la stabilisation des faisceaux à très haute luminosité.

L'IN2P3 a participé au test de la technique « crab waist » sur DALNE à Frascati. Sur le projet SuperB, des équipes mixtes IN2P3/IFU ont été engagées sur le dessin des injecteurs, du vide, du point d'interaction et de l'ouverture dynamique de l'anneau.

La décision de participer à un projet de collisionneur e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> avec une équipe mixte IN2P3/IFU permettrait de maintenir au plus haut niveau la connaissance et la technologie dans le domaine des collisionneurs leptoniques, en particulier dans la maîtrise des collisions à très haute luminosité, tout en renforçant la visibilité de la physique des accélérateurs française.

## b. Collisionneurs pp et ep

Les projets de collisionneurs protons protons ou bien électrons protons sont étudiés au CERN dans la continuité de l'exploitation du LHC et afin d'enrichir son champ de recherche:

- le projet **HL-LHC** dit de Haute Luminosité, vise un saut statistique significatif en augmentant la luminosité du LHC par un facteur 5 ;
- le projet **HE-LHC** dit de Haute Energie, vise une augmentation en énergie de centre de masse du LHC jusqu'à 33 TeV;
- le projet **LHeC** vise à prolonger l'exploration des collisions électrons protons menées à HERA (DESY) aux plus hautes énergies, soit 60 à 140 GeV(e) par 7 TeV(p).

Ces études multi laboratoires sont pilotées par le CERN avec une participation effective de l'IN2P3 et de l'Irfu au projet HL-LHC via le programme FP7 de 'Design Study' HiLumiLHC.

Trois domaines principaux de recherches sont concernés par ces études:

### 1. La conception des collisionneurs et la dynamique de faisceaux

La campagne 2011-2012 du LHC a démontré l'importance cruciale de cette discipline pour assurer le succès des expériences de physique sur un collisionneur limité en énergie par des défaillances technologiques. Les domaines d'expertises sur lesquels les équipes de l'IN2P3 et de l'Irfu pourraient contribuer sont particulièrement:

- a. La dynamique non linéaire des anneaux de stockage, ouverture dynamique, effets chromatique, etc...
- b. La conception des systèmes de focalisation et la modélisation des régions d'interaction, en interface avec la conception des quadripôles de focalisation.
- c. La dynamique des instabilités faisceau dans les accélérateurs d'électrons, en interface avec la conception des cavités accélératrices et l'amortissement des modes supérieurs.

### 2. Les aimants supraconducteurs à hauts champs

Ce champ de recherche est décrit dans le chapitre « Développement technologiques Aimants à hauts champs et pulsés »

### 3. Les cryomodules supraconducteurs accélérateurs à grand cycle utile (CW)

La mise au point de cryomodules accélérateurs à hauts gradients (~15 MV/m) à grand cycle utile (CW) est un domaine de recherche transverse à de multiples applications: source de lumière SASE, FEL de 4<sup>ème</sup> génération, accélérateur linéaire à recirculation et récupération d'énergie, accélérateur de protons de haute intensité et collisionneurs circulaires et à haute luminosité. Le développement de tels cryomodules est décrit dans le chapitre « Développement technologiques Cavités RF supraconductrices ».

### c. Collisionneurs linéaires e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>

La communauté mondiale mène depuis plus de vingt ans un ambitieux programme de R&D visant à la construction d'un collisionneur linéaire e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> à l'échelle du TeV, considéré comme le complément indispensable du LHC.

Les principaux défis à relever sont :

- 1) la production de faisceaux intenses, polarisés et de très faibles émittances;
- 2) l'accélération des faisceaux à des gradients suffisants et un transfert efficace de la puissance électrique afin de limiter la longueur et la consommation énergétique;
- 3) l'instrumentation permettant le contrôle des faisceaux dans l'ensemble du système pour permettre des collisions entre paquets de particules focalisés à des tailles transverses nanométriques;
- 4) l'industrialisation de solutions retenues de manière fiable et économique, et à grande échelle.

Deux projets sont en préparation avancée, selon deux approches différentes: l'ILC, basé sur la

à

d'activités, essentielle aussi bien pour ILC que pour CLIC, est adaptée à des équipes de tailles moyennes, notamment dans le cadre universitaire.

Ces activités vont de pair avec nos participations aux stations d'essai (FLASH à DESY, ATF3 au CERN, ATF2 au KEK peut être FACET au SLAC à l'avenir) qui permettent de développer des expériences sur l'accélération, l'instrumentation, l'optique et la dynamique des faisceaux qui sont cruciales pour la formation nos jeunes physiciens et ingénieurs.

#### **d. Faisceau de neutrinos et muons**

Trois sources possibles de faisceaux de neutrinos produits par des accélérateurs sont à l'étude. Ces différentes sources ont une sensibilité différente à l'angle  $\theta$ . Les résultats sur T2K et Double Chooz à venir dans les prochaines années permettront de préciser son domaine de validité et, en principe, de choisir parmi ces différentes usines.

- Les « superfaisceaux » sont basés sur la décroissance de pions, produits par l'interaction d'un faisceau intense de protons sur une cible puis focalisés par une corne magnétique. L'Irfu et l'IN2P3 sont indirectement impliqués dans le projet européen de superfaisceaux qui repose sur la construction du SPL au CERN, pour lequel nos compétences en dynamique de faisceau et en cryomodules accélérateurs supraconducteurs pourraient utilement être mises à contribution.
- Les « streams » reposent sur la décroissance d'ions radioactifs préalablement accélérés puis stockés dans un anneau de décroissance en forme de champ de course. Le projet à l'étude repose sur un complexe basé au CERN et utilisant une partie de l'infrastructure existante. Dans le cadre de l'étude de faisabilité d'un tel complexe qui doit se clore par un rapport conceptuel (CDR) pour la fin 2012, l'Irfu est impliqué sur les études de dynamique de faisceau pour l'anneau de décroissance tandis que l'IN2P3 (LPSC) étudie la source ECRA après la cible de production. Ces deux contributions pourraient naturellement être poursuivies dans le cadre d'un éventuel avant projet détaillé (TDR).
- Les Usines à Neutrinos utilisent la décroissance de muons. Le premier étage est similaire à un « superfaisceau » avec la production de pions qui décroissent alors en muons collectés puis rapidement accélérés jusqu'à un anneau où ils sont stockés jusqu'à leur décroissance. A ce jour, ni le CEAN ni l'IN2P3 ne travaillent sur ce type de sources. Une contribution est envisageable dans le domaine des aimants ou des accélérateurs supraconducteurs pour les faisceaux de muons de haute énergie.

L'implication actuelle de l'Irfu et de l'IN2P3 sur cette thématique s'achèvera avec la fin du programme européen FP7 EURO-N en 2013.



## e. Autres : polarisation

La question de la production de faisceaux d'électrons ou de positons polarisés se pose pour les collisionneurs leptoniques. Dans le cadre de la collaboration SuperB, il peut être intéressant de développer et de mettre en œuvre, par exemple au LPSQ, une installation permettant la production et la mesure de faisceaux d'électrons hautement polarisés, une partie des composants, notamment le photo canon, pouvant très probablement être récupérée aux USA. Ceci permettrait de mettre à profit les compétences disponibles au LPSQ et au LAL, et de renforcer les liens entre ces 2 laboratoires. En outre, une telle installation polarisée ouvrirait la voie à une collaboration possible avec le CERN pour les développements relatifs au CLIC.

## 2. Physique nucléaire

### a. Production d'ions radioactifs

La production de faisceaux radioactifs repose essentiellement sur deux techniques. La méthode en vol utilise une cible mince bombardée par un faisceau d'ions lourds énergétiques produisant des fragments radioactifs séparés en vitesse par un spectromètre. La méthode ISOL (Isotopic Separation On Line) produit quant à elle des faisceaux de faibles énergies puisque les atomes radioactifs produits par spallation et/ou fission sont stoppés dans une cible épaisse. Ces atomes diffusent ensuite hors de la cible et sont transférés dans une source d'ions pour y être ionisés puis extraits sous une tension accélératrice de quelques dizaines de kV. Ils sont ensuite analysés et éventuellement post accélérés.

La disponibilité de faisceaux d'ions exotiques intenses offre de nouvelles opportunités pour l'étude des noyaux très loin de la vallée de stabilité. La mise en route du linac à l'installation ALTO de l'IPNO délivrant 10  $\mu$ A d'électrons de 50 MeV pour la photofission de l'uranium permettra de disposer de faisceau 100 fois plus intense qu'avec la fission par neutrons induite par le breakup d'un faisceau de deutons de 26 MeV accéléré par le Tandem de cette même installation. Le projet SPIRA2 est basé sur le futur accélérateur LINAG qui devrait accélérer des faisceaux très intenses de deutons et ions lourds multichargés à des énergies principalement de 14.5 A MeV pour des faisceaux  $q/A=1/3$  et 40 MeV pour les deutons. Ce projet comporte deux phases : la première permettra la production de faisceaux très pauvres en neutrons ou super lourds en vol par des réactions de transfert, fusion et fusion évaporation avec les faisceaux d'ions lourds en utilisant le spectromètre S3 (voir la section Spectromètre). La deuxième permettra la production ISOL de faisceaux très riches en neutron d'intensité inégalée depuis la fission induite par neutron d'une cible haute densité d'Uranium et constitue une étape importante vers EURISOL. D'autres cibles ISOL légères seront également utilisées pour produire des faisceaux exotiques légers très intenses. L'installation ALTO servira de banc d'essai pour les cibles épaisses de la phase 2. Pour les faisceaux ISOL à ALTO et SPIRA2, la R&D associée aux cibles et aux sources d'ions sera traitée dans le paragraphe correspondant.

La nécessité de post accélérer les faisceaux radioactifs impose d'augmenter la charge de ces ions. Plus l'état de charge sera élevé, plus l'accélérateur pourra être compact et plus l'énergie accessible sera importante (au moins dans le cas de post accélérateurs de type cyclotrons ou de LINAC supraconducteurs). Dans le cadre de Spiral2, un programme important concernant les techniques d'élévation de charge est en cours au LPSG à partir d'une source d'ions ECR de type Phoenix, et dans le cadre du projet EMILIE (« Enhanced Multi – Ionisation for short – Lived Isotopes at EURISO ») qui étudie également un concept d'EBIS continu. Ce programme regroupe 8 laboratoires européens dont GANIL, INFN Legnaro, INFN LNS, LPSG, SNSM, LPCAen, HIL de Varsovie et JYFL.

## b. Spectromètres

Cette section présente les spectromètres et séparateurs qui seront développés ou upgradés par l'Irfu et l'IN2P3 dans les prochaines années. Les aspects de développement de détecteur et de cellule gazeuse dans le cas de S3 sont traités dans le rapport du G9: "Structure et dynamique nucléaire".

- Super-Séparateur-Spectromètre S3 (SPIRAL2 en vol : SPIRAL2 phase 1)

Le Super-Séparateur-Spectromètre (S3) est un dispositif de recherche innovant conçu pour les expériences de physique fondamentale avec les faisceaux d'ions lourds stables de très hautes intensités délivrés par l'accélérateur linéaire supraconducteur de l'installation SPIRAL2 au GANIL.

développements sur la fabrication des cibles d'actinides et en particulier leur supports (R&D menés conjointement avec les spécialistes des laboratoires de cibles européens: IPNO/CACAO, GSI, Mainz, Dubna).

- High Resolution Separator (SPIRAL 2 ISOL SPIRAL 2 phase 2)

Le HRS a pour fonction principale de purifier en masse les faisceaux radioactifs 1+ produits dans la zone de production de SPIRAL 2 à un niveau souhaité de 1/20000. La conception proposée pour le HRS se compose d'une partie magnétique avec une configuration en U de 180° et une partie électrostatique qui déflecte le faisceau à 90. Il est convenu que le montage s'effectue au CENBG. Les tests d'alignement et les premiers tests de qualification y seront menés. Dans un deuxième temps l'ensemble du système sera transféré sur le site de SPIRAL 2, monté et mis en service dans son lieu définitif.

- R&D sur les spectromètres du GANIL

Cibles solides (dP): au GANIL, des cibles dites épaisses (~mm) et minces (centaines de  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) sont utilisés pour la fragmentation (LISE) ou les réactions de fusion/évaporation, transfert etc... Avec des faisceaux actuels du GANIL (quelques  $\mu\text{Ae}$ ), les cibles épaisses peuvent supporter jusqu'à 600 watts de dépôt d'énergie grâce au système CLIM, ces disques de matière (Be ou C) sont livrés par un fabricant. Dans le cas des cibles minces, des développements sur leur fabrication se font en continu car chaque cible requise a des particularités en terme de dimensions, structure (avec ou sans support), les laboratoires de l'IPNO et GANIL permettent en grande partie de répondre à ce besoin.

Cibles cryogéniques CHyMENE dans le cadre du projet SPIRAL 2, Irfu propose de réaliser une cible cryogénique de protons pour accroître la pureté et la luminosité par rapport aux cibles actuelles. La collaboration rassemble l'Irfu (SPHN, SACM), l'Inac/SBT (Grenoble), le laboratoire PELIN (Russie) et l'IPNO. L'objectif est de produire une cible pure d'hydrogène H<sub>2</sub> (ou deutérium D<sub>2</sub>) solide, sans fenêtre, adaptée aux expériences de réactions directes en physique nucléaire. La nouvelle cible offrira un plus grand nombre d'atomes par cm<sup>2</sup>, tout en éliminant le problème dû à la présence des ions carbone et la nécessaire soustraction de leur contribution. Elle se présente sous la forme d'un ruban hydrogène solide qui s'écoule en continu par une technique d'extrusion dans le vide d'une chambre à réaction devant le faisceau d'ions lourds et dans l'environnement instrumental d'une expérience de physique.

VAMOS en « gas filled mode » : le spectromètre VAMOS du Ganil va jouer un rôle majeur à l'horizon SPIRAL 2 pour (i) rejeter le faisceau, (ii) isoler la réaction et/ou (iii) identifier les produits. Le spectromètre « à vide » n'est cependant pas adapté à l'ensemble des scénarios évoqués dans les Lettres d'Intention. Une expérience pilote a eu lieu en avril 2009 démontrant la pertinence d'un mode gazeux de VAMOS. Ceci en fait un séparateur à 0°, complémentaire au spectromètre à vide. Les performances de « VAMOS gaz » se sont montrées supérieures à celles des séparateurs existants (très bonne réjection du faisceau, inégalable transmission). Ce mode élargit la palette des réactions faisables, incluant notamment la fusion évaporation avec les projectiles lourds de SPIRAL 2 afin de rendre « VAMOS gaz » parfaitement opérationnel, des développements sont toutefois nécessaires (arrêt faisceau adapté, système de pompage différentiel). Ceci ferait de VAMOS un outil unique à travers le monde. La communauté, très intéressée par le projet, doit réfléchir à son financement.

- Collaborations internationales

#### Upgrade de Vassilissa

L'efficacité de transmission et de détection du séparateur VASSILISSA pour la réaction  $^{22}\text{Ne}$  sur une cible métallique de  $^{238}\text{U}$  (0.250 mg/cm<sup>2</sup>) a été mesurée à 1.5% en présence d'une fine feuille émissive pour la mesure du temps de vol des ions de recul. Cette valeur est faible et limite considérablement les noyaux accessibles à la spectroscopie de décroissance avec le séparateur VASSILISSA des cibles d'actinides radioactifs ce qui est la spécificité du projet de spectroscopie des noyaux lourds à Dubna. Le remplacement des 3 dipôles électriques existants par 2 jeux d'un dipôle électrique (à plaques amovibles) et d'un dipôle magnétique permettra d'accroître sensiblement l'efficacité de détection des noyaux lourds produits dans des réactions asymétriques et d'étendre l'acceptance de VASSILISSA aux combinaisons très symétriques, ayant une rigidité magnétique de l'ordre de 10 MV. Les éléments optiques nécessaires à la modernisation de VASSILISSA ont été conçus, commandés et livrés. De nouvelles alimentations électriques et de nouveaux détecteurs au Si pour le plan focal du séparateur ont été installés. Le projet est désormais au stade des tests de tenue au vide, des tests électriques et de la cartographie des champs magnétiques. Le commissioning du nouveau séparateur est prévue au printemps 2012. La construction et les tests des éléments optiques du séparateur VASSILISSA modernisé ont lieu au FLNR à Dubna. Des physiciens du CSNSM et de l'IPHC ont été impliqués dans la phase de conception et participeront aux tests de détecteurs et au commissioning du séparateur, auquel se joindra l'Irfu et GANIL.

#### R3B GLAD Participation au projet FAIR

Au sein de l'ensemble de détection de l'expérience R3B, le spectromètre supraconducteur de grande ouverture GLAD (GSIL Large Acceptance Dipole) jouera un rôle central. Il est conçu et sera réalisé par l'Irfu avec des partenaires industriels. Cet aimant sera utilisé par toutes les expériences de la collaboration R3B, que celles-ci aient pour objectif l'étude de la structure des noyaux exotiques ou l'étude des mécanismes des réactions nucléaires (en particulier de la spallation).

### c. Cibles/sources

Les ensembles cibles et sources d'ions (ECS) constituent le cœur de la production de faisceaux de noyaux radioactifs rares par séparation isotopique en ligne. En effet, les caractéristiques fondamentales de ces faisceaux dépendent essentiellement des performances de la cible, de la source d'ions et du tube transfert qui relie ces deux éléments. Ainsi, ces composants de l'ECS doivent être optimisés pour permettre une exploitation convenable. Afin de répondre aux nombreuses et diverses demandes de faisceaux de noyaux radioactifs, toutes les installations actuelles de séparation d'isotopes en ligne (ISOL) impliquent dans des développements de ces composants. Les installations de prochaine génération telles que celles des projets Spiral2, SPES ou EURISOL nécessitent des ECS qui doivent fonctionner sous des conditions d'irradiation beaucoup plus contraignantes. Par conséquent, la conception des composants de l'ECS doit intégrer différents paramètres supplémentaires concernant aussi bien la sûreté, la fiabilité à long terme que la gestion des déchets radioactifs.

- Développement des cibles

Les développements menés dans ce domaine en France sont aujourd'hui concentrés sur les besoins de Spiral2 dont le programme de R&D des cibles de fission est mené par l'IPNO. Historiquement, l'IPN a réalisé de nombreuses et diverses cibles épaisses pour des exploitations comme ISOCELE à l'IPNO, ISOLDE au CERN et SPIRAL au GANIL.

Les développements actuels portent sur les cibles de fission, notamment sur des composés de carbure d'uranium pour le projet Spiral2. Ces travaux à long terme constituent un programme de R&D conséquent car ils portent aussi bien sur la procédure d'élaboration du matériau cible, sur l'exploitation des cibles sous irradiation, que sur le retraitement après irradiation. De plus, les résultats de ces travaux bénéficieront à toutes les installations ISOL actuelles et futures à l'échelle internationale dans la mesure où toutes s'appuient sur l'exploitation de cibles de fission.

Ce programme de R&D est amené à s'élargir et à s'amplifier afin de répondre aussi à la demande sur les combustibles adaptés aux prochaines générations de réacteur nucléaire afin d'approfondir les développements sur les composés de carbure d'uranium et de carbure de thorium. Les différentes phases d'un tel programme mobilisent de nombreuses compétences: synthèse de matériaux, caractérisations physicochimiques, simulation à l'aide de codes de calcul (diffusion des radioéléments, réactions nucléaires, traitements thermiques etc.), montages expérimentaux, spectroscopie, sûreté et radioprotection. Les prototypes à développer doivent répondre aux différentes demandes; comme combustible, ils dépendent du type de réacteur: Gascooled Fast Reactor (GFR), Sodium Fast Reactor (SFR), Molten Salt Fast Reactor (MSFR) etc... Ces compétences devront se trouver au delà des équipes qui aujourd'hui développent les cibles radioactives pour les installations ISOL en s'élargissant notamment vers les radiochimistes.

L'ampleur d'un tel projet trouve toute sa justification au travers des installations de faisceaux nucléaires et des enjeux énergétiques dans le monde. Afin de répondre à la production de faisceaux de noyaux riches en neutron par des techniques de type guide d'ions pour séparation d'isotopes en ligne (IGISOL) le développement de cibles minces d'uranium et de thorium peut être aussi envisagé. Notamment, le couplage de cible mince de fission avec un système performant de catcher ioniseur permettrait de produire des faisceaux originaux de noyaux exotiques. Des travaux sur un tel système font partie des projets soutenus dans la R&D source d'ions.

- Développement des sources d'ions

Le développement des faisceaux de noyaux radioactifs exige un programme de R&D sur les sources d'ions. Celles-ci doivent en effet répondre à un cahier des charges spécifique aux installations ISOL. Les spécifications requises concernent notamment le régime et la cinétique d'ionisation, la fiabilité de la source d'ions sous irradiation et sa compatibilité avec le système cible tube de transfert.

Au cours de ces dernières années, les sources d'ions laser (RILIS) ont connu un fort développement. Ces sources RILIS (Resonant Ionization Laser Ion Source) sont tout à fait adaptées aux installations de nouvelle génération utilisant des faisceaux primaires de forte intensité. Elles permettent de déporter le système laser produisant l'ionisation hors de la zone d'irradiation et ionisent de façon sélective, ce qui est un atout majeur. Les développements sur ces sources concernent trois axes principaux: les schémas d'ionisation, le système laser et la cavité d'ionisation dans l'ECS.

Les travaux sur les schémas d'ionisation visent à pouvoir ioniser le plus grand nombre d'éléments du tableau périodique et à optimiser l'efficacité du schéma d'ionisation. Les développements portant sur le système laser portent principalement sur la fiabilisation et la stabilisation.

La cavité d'ionisation où se produit l'interaction atome-laser joue un rôle fondamental. Elle doit être maintenue à haute température pour éviter l'adsorption des noyaux d'intérêt provenant de la cible. Cependant dans une telle gamme de température, l'ionisation de surface se produit. Cette ionisation parasite est très efficace avec les éléments alcalins. Elle est d'autant plus problématique qu'une abondante quantité d'alcalins Rb et Cs est produite avec les cibles de fission. Pour remédier à cela, différents développements sont considérés sur la cavité d'ionisation et le tube transfert qui sert de liaison entre la cible et la source d'ions. Ces développements portent aussi bien sur les matériaux que sur des procédés électromagnétiques.

Les développements sur la source RILIS s'étendent aussi aux installations de type IGISOL (utilisation d'une source laser dans un système de catcher ioniseur couplé à une cible mince de fission constituerait un moyen efficace de produire des faisceaux originaux de noyaux exotiques. Sur ce thème, un projet à long terme vient d'être soumis: LASSCAR (Laser assisted solid state catcher technique for extremely rare isotope studies).

Parallèlement, le programme de R&D doit aussi porter sur d'autres types de source d'ions. Notamment les sources à plasma pour l'ionisation de gaz rares radioactifs et de noyaux d'intérêt sous forme moléculaire, ainsi que les sources à ionisation de surface pour les alcalins et, dans une certaine mesure, les alcalino-terreux et terres rares.

- Tube transfert et procédés de sélectivité

La R&D sur le tube transfert se justifie en grande partie par la nécessité de sélectivité. L'autre nécessité est de développer un tube ayant une longue tenue à haute température compte tenu de l'importance des réactions chimiques avec les éléments provenant de la cible de production. Concernant le critère de sélectivité, les développements sur le tube transfert s'inscrivent dans un programme de R&D plus global. Le type de matériau et la température de fonctionnement du tube transfert constituent des moyens de sélectivité physicochimique permettant de filtrer les noyaux indésirables avant ionisation.

Les procédés de sélectivité physicochimiques ne se limitent pas au seul tube transfert. L'utilisation d'un gaz particulier à faible débit est un moyen efficace d'induire la désorption d'un noyau réfractaire sous la forme d'une molécule volatile. Ce procédé a déjà prouvé son efficacité par la production de noyaux de terres rares sous forme de fluorure, ou encore la production de noyaux d'étain sous forme de sulfure. Cependant la fluoration et autres procédés chimiques peuvent être encore améliorés par des travaux d'optimisation et d'innovation. Le fait que la cible de production soit portée à haute température favorise grandement les interactions chimiques.

### 3. Machines neutroniques

#### a. Sources de neutrons

Les sources de neutrons de spallation obtenus par le bombardement d'une cible par un faisceau intense de protons issus d'un accélérateur d'énergie de 1 à quelques GeV représentent une part importante des développements accélérateurs au niveau mondial. La dernière décennie a vu l'approbation ou la construction d'une source de ce type par région globale du monde: JPARC (Tokai, Japon) pour l'Asie, SNS (Oakridge, USA) pour l'Amérique et désormais ESS (European Spallation Source, à Lund en Suède) pour l'Europe. ESS est le dernier projet approuvé en la matière (2009), tandis que SNS et JPARC approchent de la fin de leur commissioning et seront dans les 2 à 3 prochaines années à puissance nominale.

ESS est une source de neutron de spallation de 5 MW, basé sur un linac protons de 2,5 GeV et 50 mA de courant crête à 4% de cycle utile. Lorsqu'elle entrera en service, ce sera la source de neutrons la plus puissante au monde. Actuellement, l'accélérateur est en phase de re design (le précédent design datant de 2003) qui se terminera début 2013; puis suivront 3 années d'une intense phase de prototypage et tests des composants critiques de la machine avant de démarrer la construction au début 2016. Le premier neutron produit est attendu pour 2019, et la puissance nominale est aujourd'hui planifiée pour 2025.

L'implication des laboratoires accélérateurs français de l'Irfu et de l'IN2P3 (IPNO) dans la conception du linac d'ESS est très forte et très visible. Elle se situe à presque tous les niveaux de la machine, de l'injecteur aux sections accélératrices supraconductrices. Les challenges technologiques de la machine sont liés aux fortes intensités de faisceau crêtes (50 mA) et à la fiabilité requise pour les expériences neutroniques. Les scénarii d'upgrade déjà envisagés (soit en courant, soit en énergie) poussent ces problématiques encore plus loin. Pour ces accélérateurs fortes puissances, nos laboratoires bénéficient des compétences acquises et des résultats obtenus ces dernières années en menant des programmes de R&D (financés soit directement par les organismes soit par l'Europe) sur les structures d'accélération supraconductrices ou sur les injecteurs forte puissance (IPHI) et qui ont ainsi permis de prendre un rôle prépondérant dans la conception et la construction de ce type d'accélérateurs. Même si les paramètres faisceaux diffèrent, une synergie très forte existe entre ESS et d'autres accélérateurs de protons de forte intensité comme MYRRHA (démonstrateur ADS) et EURISOL. Les développements technologiques effectués pour ESS bénéficieront à ces machines.

Il est fort probable que les laboratoires de l'IN2P3 et de l'Irfu seront mobilisés pour prendre part à la construction de l'ESS avec une contribution « in kind » dont le contenu n'est pas encore défini. Outre les compétences de ses personnels, ce sont aussi les infrastructures accélérateurs spécifiques des organismes qui pourraient être mises à contribution.

#### b. Irradiateurs

Les machines de production de neutrons (irradiateurs) sont utilisées pour tester la tenue aux radiations de matériaux, analyser l'activation sous flux de neutrons, détecter des défauts dans des structures, rechercher de la matière (moississure ou matière explosive).

Dans la plupart des irradiateurs basés sur des accélérateurs les flux de neutrons sont produits lors d'une réaction de type « breakup » des deutons avec une cible de Li au cours de laquelle la dissociation en un neutron et un proton du deuton a lieu.

Les machines actuellement en fonctionnement dans le monde produisent des flux de neutrons d'environ  $10^{11}$ /sec/cm<sup>2</sup>. La qualification des matériaux capables de résister aux conditions extrêmes des futurs réacteurs pour la fusion (DEMO) requiert un irradiateur capable de délivrer un flux beaucoup plus intense de neutrons de 14 MeV ( $10^{17}$  neutrons/sec). Pour répondre aux contraintes et spécifications induites par ce flux de neutrons élevé, le programme IFMIF/EVEDA de construction de prototypes de l'accélérateur, de la cible Lithium et de cellules de test est en cours. Ces actions sont placées sous la responsabilité d'une collaboration Europe/Japon, l'ensemble des composants prototypes devant être installés sur le site de Rokkasho/Mura (Japon).

Sur la période 2007-2017, les équipes de l'Irfu participent à ces actions à travers : l'étude de la machine IFMIF (40 MeV) dans les aspects dynamique de faisceau et définition des composants accélérateurs ; la mise au point de la source haute intensité de deutons et la ligne basse énergie associée, le prototypage du premier cryomodule à résonateurs HWR supraconducteurs, la qualification de diagnostics faisceaux adaptés et les tests en puissance de plusieurs composants de l'accélérateur EVEDAL ; l'activité se déplacera ensuite vers le site de Rokkasho pour l'installation et le démarrage de l'accélérateur qui délivrera un faisceau de deutons 125 mA à 9 MeV. Une collaboration sur la préparation et le test des deux prototypes de cavités HWR est en cours avec l'IPNO.

Les caractéristiques extrêmes (intensité et puissance faisceau, charge d'espace) de cet accélérateur ne seront atteintes qu'après avoir élaboré des solutions originales sur de nombreux composants et en particulier sur les diagnostics faisceaux non interceptifs et les résonateurs supraconducteurs.

### c. Réacteurs hybrides

De par la nature même du sujet qui regroupe plusieurs thématiques, les réflexions sur le sujet des ADS doivent être menées de manière collective avec le groupe « Physique et chimie pour l'Energie Nucléaire » (groupe 11). Pour présenter la thématique et adresser les questions de motivations de ce thème, nous faisons référence à l'introduction du document de travail du groupe 11. Les programmes en soutien aux réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateurs sont présentés dans la partie B *Physique pour la neutronique et les données nucléaires*.

Le projet GUINEVERE unit depuis fin 2006, l'IN2P3 et le SCK/CEN (Belgique) pour le développement, la construction et l'exploitation d'une maquette à puissance nulle dédiée à l'étude des ADS. Une collaboration au sein de l'IN2P3 menée par le LPSC a la charge de l'accélérateur tandis que le SCK/CEN est responsable du réacteur. L'exploitation de l'installation, débutée en Octobre 2011, est prévue jusqu'en 2015. GUINEVERE ouvre la voie aux collaborations CNRS/SCK/CEN pour le projet MYRRHA qui s'effectuent dans le cadre du programme européen MAX, coordonné par l'IN2P3. L'IPNO étudie le design de l'accélérateur et développe les cavités supraconductrices du linac.

Pour l'accélérateur à protons de MYRRHA les paramètres sont à définir en concertation avec les impératifs de la physique nucléaire. Les chiffres rencontrés sont  $I = 1050$  mA CW,  $E_{\text{finale}} = 40$  MeV,



600 MeV pour étudier puis démontrer industriellement la transmutation, E finale=1.5 GeV pour étudier la production d'énergie. Cela induit une puissance faisceau finale de 0.4 MW, 6 MW, 15 MW pour la faible intensité, et 2, 30, 75 MW pour la grande intensité.

L'utilisation des structures cryogéniques est envisagée pour minimiser le coût de fonctionnement. Les projets ADS en cours utilisent les cavités CH à faible énergie, puis Spoke et Elliptiques à plus grande énergie. On pourrait étudier l'alternative (jusqu'à 40 MeV) des cavités HWR qui auront fait leur preuve sur IFMIF d'ici là.

Une construction en plusieurs étapes, 400 à 1500 MeV, avec des objectifs scientifiques et des réacteurs dédiés à chacune des étapes est envisagée dans le projet ADS chinois. La structure détaillée de l'accélérateur reste à être optimisée pour tenter de répondre aux deux principales difficultés décrites ci après. Le dédoublement ou plus des accélérateurs pourrait être envisagé, comme avec IFMIF ou MYRRHA.

Il faudrait tabler avec une longueur totale de l'accélérateur à l'étape finale de 400 à 500 m.

Une difficulté identifiée est la très grande fiabilité demandée, encore inconnue dans le monde des accélérateurs jusqu'à présent, mais de plus en plus demandée dans divers projets d'accélérateurs haute puissance.

Une deuxième difficulté est la très grande puissance finale du faisceau. Pour mémoire, les projets de spallation ou d'irradiation les plus puissants actuels sont autour de 10 MW.

Un programme R&D détaillé ainsi que des efforts fournis dès l'étape de conception seront nécessaires pour pouvoir surmonter ces difficultés.

## 4. Sources de rayonnement

### a. Sources compactes

Dans le cadre des sources compactes de rayons X le projet ThomX joue un rôle important. Il s'agit d'un petit anneau d'accumulation d'électrons où des rayons X durs de quelques dizaines de keV sont produits par effet Compton. L'énergie des électrons est ajustable de 50 MeV à 70 MeV, pour un courant d'environ 20 mA. Ce projet bénéficiera des progrès technologiques induits par les programmes de R&D sur les résonateurs optiques à fort gain (PLICet Mighty laser) qui visent à une puissance laser accumulée de l'ordre de centaines de kW. Ce schéma de source compacte a été choisi afin de fournir un flux moyen élevé. D'autres typologies de machines Compton sont possibles à haut flux crête : elles prévoient un accélérateur linéaire, comme le projet sur l'accélérateur SPAR@ Frascati (Italie), ou un ERL comme sur le projet de source compacte de Daresbury (UK), et des lasers pulsés à basse fréquence et haute énergie impulsionnelle.

Le projet ThomX, financé dans le cadre des programmes EQUIPEX du Ministère de la Recherche par la région Ile de France, l'IN2P3 et l'INSERM de Grenoble, voit la participation d'unités mixtes du CNRS

telles que le LAL, le CERN, le CEA, le CERN, l'Institut Néel, SOLEIL, ESRF et l'INSERM de Grenoble'sont également associés.

Le planning prévoit une phase d'assemblage de mise en œuvre et de mise en service de la machine qui devrait se terminer en 2014. Cette phase sera suivie d'une période consacrée aux utilisateurs. Différents domaines de spécialisations dans les accélérateurs, les lasers, l'instrumentation et l'imagerie X sont pris en compte. Les utilisateurs proviennent du domaine médical, de la conservation du patrimoine culturel ou de la cristallographie.

ThomX est un projet fédérateur tant du point de vue de l'intérêt scientifique que de la pluridisciplinarité. Différentes synergies entre les programmes de l'Irfu et de l'IN2P3 sont donc possibles.

## **b. 4<sup>ème</sup> génération / ERL**

Avec la mise en service de nouvelles sources de rayonnement laser X ultra courts, LCLS (USA) et SACLAY (JAPON) et la construction de la source européenne XFEL avec l'opération d'installations pionnières, FLASH (Allemagne), FERMI (Italie) et ALICE (UK) en Europe, et les projets de construction de nouvelles sources Belin Pro (Berlin), mais aussi à Cornell, Berkeley (USA), KEK (Japon) et en Corée, la thématique des sources de lumière de 4<sup>ème</sup> génération basées sur les lasers à électrons libres (LEL) en mode SASSE auto amplifié (Self Amplified Spontaneous Emission) ou injecté, avec ou sans récupération d'énergie (Energy Recovery Linac), a été la plus active et la plus riche du paysagè accélérateur de la dernière décennie.

En France cette thématique est portée par le laboratoire SOLEIL déjà initiateur d'un Avant Projet Sommaire pour une source de 4<sup>ème</sup> génération 'Arc en Ciel' basée sur un faisceau d'électrons de 700 MeV. En 2011, le laboratoire SOLEIL a obtenu de lancer des actions de R&D dans le cadre de l'avant projet LUNEX5 proposant d'expérimenter les techniques de générations d'harmoniques qui permettrait de produire des faisceaux de rayonnement X à partir d'un faisceau d'électrons d'énergie de l'ordre du GeV. Ceci ouvrirait la voie à des installations plus compactes et éventuellement basées sur l'accélération par onde de plasma.

L'avant projet LUNEX5 prévoit la construction d'un accélérateur linéaire supraconducteur pulsé de 400 MeV incluant un canon à électrons de faible émittance suivi d'un ensemble de 2 cryomodules de type XFEL (1,3 GHz). Dans une deuxième phase, cet accélérateur serait opéré en mode continu (CW) et alimenté par des amplificateurs RF à état solides, une technologie maîtrisée par le synchrotron SOLEIL à 352 MHz. Le projet LUNEX5 permettrait à l'IN2P3 et à l'Irfu de déployer, en synergie avec les objectifs propres à la communauté LEL, ses moyens et équipements dans le domaine des canons RF à électrons, coupleurs RF, cavités et cryomodules supraconducteurs, sur la thématique des accélérateurs RF à hauts gradients en mode continu (CW) qui semble devoir être un des thèmes majeurs de la prochaine décennie, par ses multiples applications aux projets Eurisol, FELSASECW et ERL collisionneur e+e- de haute luminosité, LHeC.

## 5. Machines médicales

### a. Cyclotrons

Les cyclotrons ont une longue histoire dans le domaine des accélérateurs qui débute en 1929 à Berkeley, Californie. Les développements qui ont suivi ont permis d'accroître l'énergie, l'intensité et la gamme de faisceau accélérés. Ces machines sont utilisées pour l'accélération d'hadrons. La compacité de telles machines était un atout pour les laboratoires, elle devient essentielle pour une application industrielle ou médicale.

Plus d'une cinquantaine de cyclotrons ont été utilisés pour la recherche à travers le monde. En France, le Grand Accélérateur National Ions Lourds à Caen possède 5 cyclotrons (3 compactes et 2 à secteurs séparés). Un second laboratoire du CRN à Orléans en possède également.

La fiabilité de ces machines et leurs dimensions réduites sont des critères attractifs dans le domaine médical. Ainsi, un très fort développement autour de ces accélérateurs est principalement mené à présent par des industriels vers lesquels un transfert de compétences s'est fait. En 2010, 205 cyclotrons à usage médical étaient recensés en Europe.

A titre d'exemple, le cyclotron ARRONAX mis en service fin 2010 à Nantes et qui produit des radioisotopes pour la recherche en médecine nucléaire a été réalisé par un industriel. De même, pour le design du cyclotron du projet ARCHARD à Caen qui sera un outil pour la recherche en hadronthérapie accélérant des ions carbone à 400 MeV/A.

Le CEA et l'IN2P3 ont conçu et réalisé de nombreux cyclotrons pour les besoins de la physique nucléaire (CEV, GANIL, AGOR, CIME). Les demandes de la physique ont orienté les choix technologiques vers des accélérateurs linéaires (SPIRAL2, EURISOL) et un industriel (IBA) a maintenant maîtrisé la fabrication des cyclotrons pour la thérapie ou la production d'isotopes. Nos laboratoires ont peu à peu perdu les compétences nécessaires à la conception de cyclotrons, il serait possible de les rassembler et d'en former de nouvelles, mais la demande n'est pas là, ni à court, ni à moyen terme. Aussi ne voyons-nous pas la nécessité de relancer cette activité. Il est néanmoins nécessaire d'assurer la maintenance des outils de calcul spécifiques qui avaient été développés au cours du temps.

### b. Synchrotrons

Pour le traitement des tumeurs cancéreuses, outre les cyclotrons précédemment cités, utilisés de manière standard pour la protonthérapie, les synchrotrons sont utilisés pour les ions légers jusqu'au carbone (430 MeV/nucléon à Heidelberg). L'hadronthérapie présente des avantages pour le traitement de certaines tumeurs inopérables et résistantes aux rayons X et/ou aux électrons. La présence du pic de Bragg permet un dépôt de dose localisé en fonction de l'énergie du faisceau. Au-delà des aspects thérapeutiques différents, les ions carbone présentent un avantage balistique par rapport aux protons (moins de diffusion latérale). Les synchrotrons sont des machines particulièrement bien adaptées. Leur énergie rapidement variable, leur cycle de déversement flexible

mais aussi leur courant extrait aisément ajustable, en font des machines particulièrement adaptées pour le traitement tridimensionnel des tumeurs internes. Leur fiabilité démontrée satisfait aux exigences des machines médicales.

Parmi les machines les plus anciennes, on peut citer HIMAC au Japon, qui a traité environ 3000 patients entre 1994 et 2008 (et toujours en service). En Allemagne, nous pouvons citer les machines de Marburg et de Heidelberg (HIT). La machine de Heidelberg a été développée par les laboratoires de Darmstadt (GSI) et Franckfort (pour l'injecteur). La machine de Marburg est basée sur HIT et a été construite par Siemens. L'Autriche a posé la première pierre de MedAustron, société de droit privé, le 16 mars 2011 à Wiener Neustadt, au sud de Vienne (premier patient prévu en 2015). L'Italie a, quant à elle, mis en œuvre la machine CNAO, basée, comme MedAustron, sur le synchrotron PIMMS conçu au CERN.

En France, le projet ETOILE a été lancé en 2000, avec la rédaction d'un avant-projet technique et médical, et basé sur la machine PIMMS. Le travail technique a été mené au sein d'une collaboration IN2P3/CEA et l'Université Claude Bernard à Lyon. Son ouverture est prévue pour 2016 et il permettra de traiter 2000 patients par an. D'ici là, quelques patients pourront être traités à l'étranger, ce qui permettra une évaluation des premiers résultats. ETOILE est structuré en Groupement de coopération Sanitaire (GGS) et emploie environ 20 personnes. Le centre sera réalisé selon des procédures d'appel d'offres en direction de sociétés privées pouvant prendre en charge tout ou partie du centre.

Perspectives pour ETOILE : ETOILE a fait l'objet d'un premier appel d'offres qui n'a pas permis de converger vers une solution satisfaisante. Bien que clairement orienté vers une prestation totalement privée, il est nécessaire d'envisager plusieurs scénarios qui dépendront de la réponse à l'appel d'offre :

1. Un scénario où la prestation reste intégralement industrielle (comme pour Marburg).
2. Un scénario où l'expertise des organismes de recherche français (nous ne parlons ici que des aspects liés à l'accélérateur) serait requise pour certains sous-ensembles. Par exemple, l'IN2P3 et le CERN ont contribué à la réalisation de CNAO (campagnes de mesures magnétiques, réalisation de l'électronique de la cavité du synchrotron, réalisation du système d'extraction lente).

Il ne semble pas raisonnable que la réalisation complète soit prise en charge par le CNRS et/ou le CEA. Mais nous soulignerons le rôle nécessaire et important que peuvent mener ces organismes de recherche. Outre la réalisation de certains sous-ensembles, leur expérience peut être requise et extrêmement profitable dans le domaine des diagnostics et de la dosimétrie on line. Des organismes comme le CEA peuvent apporter une contribution unique dans le développement de têtes rotatives isocentriques (« gantry ») à base de supraconducteurs, de manière à réduire la dimension assez colossale des « gantries » carbone. Une expertise peut également être souhaitée lors de l'analyse des offres et pendant la réalisation et la mise au point du centre.

## 6. Développements technologiques

### a. Dynamique de faisceau

La construction d'accélérateurs de particules à la frontière des applications pour la physique et pour la société, exige de porter la physique des accélérateurs et la dynamique des faisceaux vers un nouveau domaine d'outils de modélisation, de capacités de simulation et de précisions de calculs plus ambitieux. Les thèmes critiques qui motivent cette exigence pour les accélérateurs du futur incluent :

- La réalisation de hautes luminosités pour les collisionneurs circulaires et linéaires
- L'augmentation de l'énergie des collisionneurs de hadrons, dans un nouveau régime où le rayonnement synchrotron et l'amortissement devient significatif
- La génération, le stockage et le transport de faisceaux de faible émittance
- La production et l'accélération avec des pertes limitées, des faisceaux d'ions de haute intensité pour les accélérateurs linéaires.
- La réalisation d'une fiabilité sans précédent dans l'opération d'accélérateurs linéaires de protons, particulièrement pour les applications de l'énergie nucléaire
- La validation des schémas d'interaction laser faisceau appliqués à l'accélération plasma, la production de positron et la génération de rayonnement X
- Le développement de systèmes innovant pour l'accélération rapide de particules instables.

Les progrès dans cette discipline trouvent leur origine soit dans des nouveaux concepts d'optique de faisceaux (e.g. schéma 'nanobeam'), de manipulation de faisceau (génération d'harmoniques, compensation de la charge d'espace) et de nouveaux algorithmes de corrections de trajectoires, soit dans l'amélioration de la capacité de prédiction résultant de méthodes de calculs innovantes (analyse en fréquence), de codes plus élaborés (études d'erreurs) et de puissance de calcul démultipliée. La variété des méthodes et des approches est un élément essentiel pour assurer les progrès de cette branche la plus formelle et théorique de la science des accélérateurs.

Les défis à relever pour une modélisation fidèle de la dynamique du faisceau sont divers. Sur le plan fondamental, citons la prise en compte des phénomènes suivants : l'interaction avec le gaz résiduel, l'interaction avec les interfaces solides, la dynamique des plasmas des sources d'ions, l'optique du faisceau en présence d'éléments électromagnétiques d'ordres élevés (hexapôles, octupôles), la maîtrise de la formation du halo et des pertes du faisceau pour la maintenance des futurs accélérateurs de puissance, les stratégies limitant les conséquences d'éventuelles défaillances des organes accélérateurs, le rayonnement synchrotron à haute énergie, les effets non linéaires du champ de charge d'espace, l'interaction faisceau-faisceau dans les collisionneurs.

Maîtriser et comprendre l'ensemble de ces phénomènes nécessite la mise au point de modèles analytiques et le développement de méthodes numériques utilisant au mieux les ressources informatiques. Cette activité se traduit aujourd'hui principalement par le développement de codes

spécifiques nécessitant un processus de validation qui s'appuie d'une part sur des confrontations code à code via des collaborations internationales, en particulier des programmes européens, et des confrontations expérimentales. Au regard du tableau ci-dessous, les ressources allouées à cette spécialité devraient être renforcées pour être en capacité de répondre aux besoins requis pour la consolidation des accélérateurs en cours de construction et les études des accélérateurs du futur. Par ailleurs, l'activité en dynamique des faisceaux et en simulation est un complément très utile aux activités expérimentales de la communauté pour la formation de nos jeunes chercheurs en physique des accélérateurs.

code	domaine	Moyen humain/an	Maitre d'œuvre
Beta	Circulaires collisionneurs	0.5	lrfu
TraceWin	Linéaire haute intensité	0.3	lrfu
Toutatis	Dynamique dans les RFQ	0.3	lrfu
SOLMAXP	Lignes basse énergie, plasma, accélération laser	0.5	lrfu
GP++	Interaction faisceau faisceau	0.3	ln2p3

Codes en développement

## b. Source de positons

La génération et le transport des faisceaux de positons constituent des objectifs essentiels pour un ensemble d'applications et notamment pour les collisionneurs  $e^+e^-$ . Dans le cas des collisionneurs circulaires, l'émission, plus que l'intensité, représente le paramètre critique en vue d'une injection efficace dans les anneaux. En ce qui concerne les collisionneurs linéaires, les fortes intensités requises imposent des rendements  $e^+/e^-$  élevés, en plus d'une émission nécessairement réduite pour une bonne injection dans les anneaux d'amortissement. La possibilité d'avoir, en plus, des faisceaux polarisés  $e^+e^-$ , pour permettre l'élimination de réactions parasites et pour augmenter la luminosité effective, est tributaire de la génération de photons polarisés circulairement pouvant se matérialiser en paires  $e^+e^-$ , polarisés longitudinalement. Sur tous ces aspects, les laboratoires de l'IN2P3, le LAL en particulier ainsi que l'IPNL, en association avec des laboratoires étrangers (BINP à Novosibirsk, KEK à Tsukuba, CERN) se sont impliqués. Depuis une vingtaine d'années, une méthode originale de génération des positons basée sur la matérialisation de photons émis par des électrons en régime de canalisation dans un cristal a été développée par des laboratoires de l'IN2P3 en collaboration avec l'Institut Budker de Novosibirsk. Des expériences menées au CERN (WA 103) et ensuite au KEK ont validé cette méthode. Une source basée sur ce principe a été installée en 2006 sur KEKB et a apporté un gain en luminosité de 30%. Cette méthode de production des positons, qui permet de diminuer fortement la densité d'énergie déposée dans le convertisseur, a été choisie par le CERN (2008) pour la source de référence de CLIC. Une solution adaptée à ILC est actuellement à l'étude en collaboration avec le KEK et l'IHEP Beijing. Des tests concernant ce type de source ont été réalisés et doivent se poursuivre en 2012 sur le linac de KEKB. Par ailleurs, des sources de positons polarisés obtenues à travers l'interaction Compton d'un faisceau laser polarisé circulairement et d'un faisceau d'électrons de quelques GeV sont étudiées au LAL, en collaboration avec le KEK; des tests sont entrepris sur ATF-KEK avec une cavité optique étudiée et réalisée au LAL. Une application est prévue pour ces sources polarisées dans le cadre des projets CLIC et ILC.

Une méthode conventionnelle utilisant un convertisseur amorphe avec une optimisation de la capture des positons basée sur une décélération préliminaire des positons est mise en œuvre, au LAL, pour le collisionneur SuperB.

Pour le projet PEPP de LPSG, on a entrepris l'étude d'une source de positons polarisés ou des électrons polarisés longitudinalement qui génèrent des positons polarisés par bremsstrahlung polarisé dans une cible amorphe. Cette source est en cours de tests au JLab.

Par ailleurs, une expérience originale avec les positons en tant que constituants des atomes d'anti-rhydrogène est développée à Saclay pour des mesures concernant la gravitation; le but de cette expérience, nommée Gbar, est de mesurer l'accélération gravitationnelle sur des atomes d'anti-rhydrogène quasiment à l'arrêt. L'expérience Gbar est en cours d'approbation au CERN où elle doit être déménagée pour prendre place dans le hall AD et bénéficier des anti-protons de basse énergie venant d'ELENALa source de positons a éveillé un intérêt dans les sciences des matériaux pour remplacer les sources radioactives  $^{22}\text{Na}$  et porter les installations de recherche quasiment au niveau des centrales nucléaires de recherche. Une valorisation industrielle de la technique développée est à l'étude.

Les perspectives à moyen et long terme pour les sources de positons destinées aux collisionneurs  $e^+e^-$  s'orientent vers les sources non polarisées utilisant le rayonnement de canalisation et les sources polarisées obtenues à partir de l'interaction Compton d'un faisceau laser polarisé sur un faisceau d'électrons. A moyen terme, la construction d'une source de positons pour SuperB constitue une opportunité intéressante. Les autres applications, comme l'étude de la gravitation de l'anti-rhydrogène, étant appelées à se développer également, il semble important d'étudier les retombées possibles liées à la valorisation de ce type de source.

### c. Source d'ions légers

L'IN2P3 et l'Irfu collaborent depuis de nombreuses années dans le domaine des accélérateurs à fort courant, notamment par la construction d'un démonstrateur de basse énergie, l'injecteur de protons à haute intensité IPHI, et également aux projets SPIRAL2 et GANIL qui nécessitent un faisceau de deutons et de protons, FAIR au GSI, ESS et les réacteurs hybrides qui utilisent des protons. Enfin, le projet IFMIF/EVEDA requiert un faisceau de deutons d'intensité inégalée. Chacun de ces projets demande une source d'ions ECR performante et fiable dont le SACM maîtrise la conception et la construction. La modélisation du système d'extraction des particules de la source est effectuée en calculant le ménisque d'expansion du plasma et la génération du faisceau à travers un système d'extraction multi électrodes. La R&D sur les sources a pour objectif l'augmentation de la fiabilité, la reproductibilité dans le temps, la facilité de maintenance, l'augmentation des courants et la qualité des faisceaux extraits. La simplification de conception est également un point essentiel, pouvant à terme conduire à une possible industrialisation.

Cette R&D s'appuie aujourd'hui au SACM sur 2 infrastructures. La première est l'injecteur IPHI accueillant la source SILH qui fonctionne depuis 1997 et produit des faisceaux de  $\text{H}^+$  et de  $\text{D}^+$ . Elle sert de banc de test pour les démonstrations de période de production de longue durée d'un faisceau de protons de 100 mA à 95 keV. La seconde est le banc d'études et de tests des sources



d'ions, BETSI qui permet depuis 2006 de produire et d'analyser des faisceaux intenses, en mode pulsé ou continu, jusqu'à plusieurs dizaines de mA à 50 keV.

Ses infrastructures et son savoir-faire font du SACM un acteur majeur dans le développement de sources d'ions légers (voir tableau ci-dessous). Préserver et développer cette activité est donc essentiel si le SACM veut maintenir son expertise et sa capacité de production et ainsi être en capacité de répondre aux besoins actuels et futurs des accélérateurs à haute intensité.

Projet/source	Objectifs	Statut	Tension	Courant
SILHI -> IPHI	R&D	Opérationnelle	100KV	100mA H <sup>+</sup>
IFMIF-> EVEDA	Construction de l'injecteur	Entest	100kV	140mA D <sup>+</sup>
MYRRHA	Construction de la source	A l'étude	30kV	20mA H <sup>+</sup>
DIANA	Construction de la source	A l'étude	50/ 350KV	100mA <sup>3</sup> He <sup>+</sup>
SPIRAL2	Construction de l'injecteur	Opérationnelle	20KV.A	5mA H <sup>+</sup> , D <sup>+</sup>
FAIR	Construction de l'injecteur	En construction	95KV	100mA H <sup>+</sup>
ALISES	R&D générique	Entest	40KV	30 à 100mA
SILAP-1	Etude de configuration extraction	Entest	40KV	30mA
SILHI2	Industrialisation	A l'étude	50KV	40mA

*Sources d'ions légers pour les projets et la R&D*

Le LPSG n'a pas actuellement pour cœur de métier les développements de sources d'ions légers à forte intensité, il a cependant développé dans le cadre de SPIRAL2a source ECR à aimants permanents MICROPHOENIX pouvant fonctionner à des fréquences de 10 à 100 GHz. Cette source à



Le LPSQ avec son pôle accélérateurs et sources d'ions développé depuis de nombreuses années des sources d'ions ECR fonctionnant en mode pulsé ou continu et répondant à ces différents besoins. Pour ces développements les acteurs sont le LPSQ, GANIL et l'IPNO. Voici les différentes stratégies en cours permettant dans une certaine mesure de répondre aux 3 domaines cités ci-dessus

1. Production directe: afin d'augmenter la charge moyenne et les intensités extraites, il faut augmenter la densité du plasma qui varie comme le carré de la fréquence ECR. Actuellement la fréquence ECR la plus élevée est 28 GHz. Le champ magnétique ECR à cette fréquence est de 1 T, les champs axiaux et hexapolaires alors nécessaires sont d'environ 4 T ce qui implique l'utilisation de supraconducteurs. Le LPSQ qui est en charge de développer la source d'ions lourds de SPIRAL2 (intensités annoncées des plus élevées au monde – 1 mA d'Ar<sup>12+</sup>) n'a pas le financement nécessaire permettant de développer un tel prototype (~2.5 M€). Les ambitions extrêmes de SPIRAL2 pourront-elles être satisfaites et un budget raisonnable sera-t-il attribué pour cela? Veut-on rester compétitif dans ce domaine à forte concurrence internationale? Le LPSQ a initié un programme ambitieux de R&D en collaboration avec le Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses (LNCMI) INP/CNRS et l'Institute of Applied Physics de la Russian Academy of Sciences (Nizhny Novgorod) afin de développer des prototypes pouvant fonctionner à 60 GHz (ECR à 2.14 T, champ axial de 7 T) et utilisant les technologies des aimants à champ intense et ce pour un coût modique (~100 k€). Le premier prototype a été réalisé, il manque le financement d'une salle d'expérience au LNCMI afin de pouvoir étudier les plasmas et les faisceaux d'ions pouvant être extraits de tels prototypes. Les demandes successives de financement de ce type de programme ont été un échec (ANR, Equipex 2010 et 2011), Le LPSQ a d'autres idées pour le développement des sources ECR mais qui ne peuvent être développées par manque de financement. Le CNRS N2P3 veut-il poursuivre cette R&D extrêmement prometteuse vis-à-vis des concurrents (USA, Chine, Japon)?

2. Faisceaux secondaires Le multiplicateur (booster) de charge est un enjeu important pour les installations de production d'ions secondaires. Le LPSQ inventeur du booster de charge ECR est en radioactifs à CERN SOLDE, vendu et installé à TRIUMF – Vancouver, est aujourd'hui en charge de la construction, des tests et de l'installation des boosters de SPIRAL et SPES/INFN. Tout en continuant les développements pour l'augmentation des rendements et pour la pureté des faisceaux dans le cadre du projet européen 'Emilie' de NuPNET, le LPSQ engagée processus de nucléarisation de ces ensembles qui permettront d'assurer une maintenance et donc une disponibilité optimale. On notera une certaine dispersion des moyens à un moment où le booster de charge ECR est le seul qui puisse accepter de fortes intensités de faisceaux radioactifs et ce pour un coût très modeste. On citera l'upgrade de SPIRAL afin que l'installation puisse fournir des faisceaux d'ions métalliques ainsi qu'un effort non négligeable sur les EBIS. En tant que booster de charge alors que ces dernières n'ont pas encore prouvé leur capacité d'acceptance pour les faisceaux intenses et que leur coût est de 10 à 20 fois plus élevé que les ECR. Il serait bon de définir plus clairement les priorités entre SPIRAL et SPIRAL2 ainsi que de concentrer les efforts sur le booster ECR qui sera exploité de toutes façons prochainement lors des démarrages des nouvelles machines.

Un autre aspect de la production des ions secondaires concerne l'optimisation des sources mono-chargées qui sont dans un environnement difficile, au plus près des cibles de production: ce sont les sources IRENA à l'IPNO et ECR au GANIL pour SPIRAL2. La sélectivité est également un point important et des développements sont en cours à l'IPNO et au GANIL pour la mise au point de

sources laser. Il est important de maintenir la plateforme ALTO de l'IPNO pour la mise au point de ces sources.

3. Applications industrielles: Le LPSG a développé et breveté la source ECRa plus compacte du monde (COMIC) qui permet de nombreuses applications en laboratoire et dans le monde industriel. Cette miniaturisation associée à une fiabilisation et à une grande stabilité obtenue grâce à l'utilisation d'émetteurs HF 2.45 GHz à état solide, permet l'irradiation directe par faisceaux d'ions de pièces de toutes dimensions modifiant ainsi leurs caractéristiques mécaniques (dureté des métaux, glissement des polymères), l'utilisation de faisceaux d'ions gazeux dans les machines appelées 'Focused Ion Beams' ouvrant la voie à de nouvelles possibilités en microélectronique et dans le domaine de la biologie, la construction de nouvelles machines d'Ion Beam Sputtering extrêmement performantes pour la fabrication des cibles pour la physique nucléaire, pour les couches minces multiples nécessaires à l'optique, aux dépôts décoratifs. Une des voies prometteuses de ce type de machines semble être la possibilité de créer des couches minces supraconductrices.

Cette discipline est extrêmement prometteuse en termes d'interdisciplinarité, il serait bon que la politique du CNRS et de l'IN2P3 soit mieux définie dans ce domaine, de même l'absence de réelle politique de valorisation est un obstacle majeur et un motif de difficulté d'intégration ou d'articulation des activités de valorisation avec les activités plus fondamentales. Un questionnement pourrait être le suivant: quelle est la part souhaitable qu'il faut consacrer aux activités de valorisation dans nos instituts et avec quels moyens? Ne faudrait-il pas une politique plus active et volontariste de la part des instituts pour promouvoir ces développements sy compris dans le cadre des projets à vocation fondamentale?

Il est à noter également que le CEA a eu par le passé une expérience importante dans le domaine des sources d'ions lourds pour injecter dans le synchrotron Saturne. Aujourd'hui, toutes les disciplines telles que simulations (mécaniques, magnétiques, trajectoires de particules), design aimants supraconducteurs, design mécanique, hyperfréquences, haute tension, expérimentation, sont représentées pour développer des sources intenses de faisceaux d'ions lourds à la fois au sein de l'Irfu et de l'IN2P3 (à l'exception des aimants supraconducteurs).

#### e. RFQ

Inventé au début des années 70 par Kapchinskij et Teplyaev, le RFQ s'est imposé comme le premier étage indispensable dans les injecteurs ou post accélérateurs d'ions en raison du caractère multifonction de cette cavité: elle focalise dans les trois directions, assure la mise en paquets avec des transmissions faisceaux supérieures à 90% et porte l'énergie du faisceau de quelques dizaines de keV à quelques MeV.

Malgré son importance, il faut noter que cette technologie n'est pas encore arrivée à maturité. Si les RFQ en opération sur des accélérateurs à faible cycle utile, jusqu'à environ 1%, donnent satisfaction, il n'en est pas de même à plus haut cycle utile et en régime continu. A titre d'exemple, à JPARC (Tokai, Japon) et à SNS (Oak Ridge, USA) les RFQ sont montrés des instabilités structurelles de différentes natures qui rendent difficile l'opération de l'accélérateur aux niveaux de fiabilité requis. A SOREQ (Israël), le comportement thermo-mécanique interdit tout fonctionnement aux performances nominales. Si le démonstrateur LEDA à Los Alamos a atteint des performances records (100 mA de protons en continu), le retour d'expérience de cet équipement est très faible notamment parce qu'il



- Nouveaux matériaux supraconducteurs pour cavités accélératrices

La technologie des cavités supraconductrices basées sur le niobium massif approche aujourd'hui ses limites théoriques déterminées par le champ magnétique critique du niobium ( $B_c = 200$  mT, soit un équivalent de 55 MV/m pour une géométrie de type ILC). Les couches minces (épaisseur  $\sim 3$  à  $5$   $\mu\text{m}$ ) supraconductrices de type II (Nb, NbN, NbTiN, Nb<sub>3</sub>Sn), déposées sur du cuivre, sont une première alternative au niobium massif.

Une seconde alternative, basée sur la théorie de A. Gurevich, consiste à associer un supraconducteur de type II et  $T_c$  (température critique) élevée avec un diélectrique en multicouches (Supraconducteur solant / Supraconducteur SIS) déposés sur du niobium massif afin « d'écranter » le champ magnétique qui parvient jusqu'au niobium, permettant ainsi d'augmenter le champ RF dans les cavités. Une augmentation d'un facteur 2 à 5 du gradient accélérateur et de 1 à 2 décades sur le facteur de qualité semble possible par la technique des nano-composites du type multicouche SIS. Cette technique apparaît comme une voie prometteuse; toutefois, la théorie de A. Gurevich n'a pas encore été validée ou confirmée expérimentalement. Le programme de R&D sur ce thème peut s'appuyer sur deux instruments permettant l'étude d'échantillon et l'optimisation de ces structures multicouches :

- un magnétomètre local (Irfu) qui permet de déterminer sans ambiguïté à quel champ les vortex commencent à pénétrer dans le matériau et donc le champ accélérateur maximum.

- une cavité résonante TE<sub>011</sub> (IPNO) qui permet de mesurer la résistance de surface en RF et d'étudier en particulier la résistance résiduelle de ces nouveaux supraconducteurs.

Au vu des enjeux pour le développement des accélérateurs du futur, il est stratégiquement important de développer l'étude de ces matériaux et procéder en s'appuyant sur les compétences des laboratoires de l'IRFU et de l'IN2P3. L'effort de R&D dans ce domaine actuellement n'est probablement pas à la hauteur de l'enjeu, et un déploiement plus important de moyens et compétences serait souhaitable.

- Traitement de surface du niobium

Le traitement de surface des cavités est une étape clé pour l'obtention de gradients accélérateurs importants. Une de ces techniques est l'électropolissage, qui semble plus performante que le traitement de surface plus standard (décapage par mélange d'acide) à haut gradient. Bien que l'électropolissage du niobium soit étudié depuis plus de 20 ans il reste encore énormément de progrès à faire afin de gagner en reproductibilité et abaisser les coûts. L'IRFU s'est doté d'équipements d'électropolissage horizontal et vertical, et a entamé un programme de modélisation qui permet de mieux comprendre le comportement des électrolytes dans les conditions de géométries des différentes cavités.

Un autre moyen de réduire les coûts serait de remplacer la première étape d'électropolissage par un polissage mécanique permettant de réduire la couche écrouie (endommagée, et donc à propriétés supraconductrices dégradées). Ce procédé a été développé au FNAL (USA) pour des cavités de géométrie simple (2D axisymétrique telle que les cavités elliptiques). Deux voies de développement peuvent être envisagées :

- r Appliquer le même type de polissage sur les tôles avant mise en forme. Un tel développement pourrait se faire en collaboration avec un industriel et les laboratoires se partageraient les tests RF.
- r Développer cette technique pour des géométries de cavités 3D (cavités accélératrices à basse vitesse)

- Cavités supraconductrices à basse vitesse ( $\beta < 0,1$ )

Certaines applications utilisent l'accélération de particules ayant un rapport charge sur masse très faible et de nouvelles structures pourraient être développées. Citons par exemple la post accélération de faisceaux exotiques ou encore d'agrégats de molécules d'intérêt biologique et astrophysique. Le rapport charge sur masse ( $< 1/1000$ ) et l'énergie d'extraction excessivement basse ( $< 100$  keV/n) de ces derniers empêchent l'utilisation de structures RF classiques. L'accélération électrostatique utilisée dans ces cas particuliers est bien adaptée à la variété de particules produites mais est limitée en énergie et intensité. Ce domaine d'accélération de particules de très basse vitesse est donc porteur, et nécessite de l'innovation pour répondre à ces besoins spécifiques.

- Développement des cryomodules accélérateurs

Si la cavité accélératrice est le cœur de l'accélération, c'est bien la capacité à intégrer et opérer une cavité équipée de ses systèmes auxiliaires (système d'accord en fréquence à froid, tank hélium, coupleur de puissance) au sein d'un cryomodule complet (assurant la tenue mécanique, le refroidissement cryogénique, la capacité d'alignement, le vide d'isolation...) qui permet à une équipe ou un laboratoire accélérateur d'être à la fois visible et incontournable pour les grands projets d'accélérateurs froids. Dans la phase actuelle, ou de nombreux accélérateurs supraconducteurs sont à l'étude ou en construction, l'obtention de forts gradients accélérateurs sur une cavité « nue » en cryostat vertical n'est qu'une étape. Les défis technologiques sont ensuite nombreux pour obtenir la même performance en situation accélérateur, c'est à dire à froid et à puissance RF nominale sur un cryomodule complet intégrant plusieurs cavités. Les implications récentes de l'IN2P3 et de l'Ifu dans le développement de cryomodules dans le cadre de XFEL SPring8 ou ESS ouvrent la voie d'une véritable « école française » de développement de ces systèmes et placent idéalement nos équipes pour le développement de cryomodules hauts gradients qui seront requis par les futures machines pour la physique des particules.

## **h. RF : structure haut gradient**

Au cours des années 2000, le projet CLIC est devenu une collaboration internationale pour l'étude d'un collisionneur linéaire électron-positon de très haute énergie (de 0.5 à 3 TeV) et de forte luminosité ( $10^{34}$  cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>). Piloté par le CERN et doté d'une large plateforme d'essai CTF3, le projet a redéfini la fréquence RF de fonctionnement de 30 à 12 GHz (bande X) tout en conservant son schéma innovant d'accélération à deux faisceaux. Ce changement a permis d'établir une étroite collaboration avec le SLAC et KEK et de bénéficier de l'expérience acquise sur le projet NLC. En 2010 et 2011, plusieurs cavités accélératrices à 12 GHz en cuivre type CLIC ont atteint un gradient accélérateur de 100 MV/m avec une probabilité de claquage relativement faible (de  $10^8$  à  $10^7$  /impulsion/m).

En 2012, un 'Conceptual Design Report' visant à démontrer la faisabilité des principaux éléments de CLIC sera publié par la collaboration. L'Irfu y apportera une contribution majeure avec la fabrication et le début de tests avec faisceaux sur CTF3 de deux structures accélératrices équipées de détecteurs de champs de sillage (« wakefield monitors ») et la mise en service d'une station de test 120 MW en bande X au CERN.

Pour la période 2012-2016, la faisabilité technique de la cavité RF de base CLIC « toute équipée » reste à démontrer, en intégrant en particulier un réseau d'absorbeur hyperfréquence permettant d'atténuer fortement les modes supérieurs. Il s'agira de poursuivre l'étude détaillée de ces structures, d'effectuer leur optimisation technologique en termes de performance et de coût de fabrication et de les fabriquer en quantité significative (environ 50 cavités). Ces travaux seront liés à un processus d'industrialisation en coopération avec des entreprises spécialisées. Les structures accélératrices seront ensuite testées en puissance à l'aide de klystrons ou intégrées à des modules CLIC à deux faisceaux pour des essais avec faisceaux sur CTF3.

Plusieurs projets d'accélérateur envisagent aujourd'hui l'utilisation de structures accélératrices haut gradient en bande X. Les projets SwissFEL à PSI et FERMI à ELETTRA sont déjà équipés d'un klystron 50 MW et d'une cavité accélératrice. Ces cavités placées en fin de ligne sont utilisées pour linéariser le faisceau dans l'espace de phase longitudinal. De nouveaux projets de laser à électrons libres tels que ZFEL à KVI Groningen ou MaRIE à Los Alamos proposent l'utilisation de ces structures haut gradient en bande X pour une majeure partie de la ligne d'accélération, rendant l'installation plus compacte. Le projet de source de lumière par effet Compton Megaray au Lawrence Livermore Laboratory propose aussi d'utiliser ce même type de cavité.

Les activités de l'Irfu dans les 10 ans à venir en technologies des cavités hauts gradients en bande X pourraient s'étendre dans les domaines suivants:

- Conception RF des structures à onde progressive haut gradient: un effort plus particulier pourrait être mis sur la modélisation de l'extraction, l'atténuation et la détection des modes supérieurs dans les cavités avec comme application la mesure de position transversale du faisceau et éventuellement la détection de claquage (diagnostics RF). Il s'agit de simulations hyperfréquences à grande échelle avec faisceau utilisant des codes fréquentiels ou temporels parallélisés.

- Ingénierie des cavités haut gradient en cuivre: l'objectif est d'améliorer la maîtrise des procédés de fabrication tels que l'usinage d'ultra précision, l'assemblage haute température par diffusion et par brasage, les traitements de surface par attaque chimique et l'assemblage en environnement ultra propre.

- Fabrication de structures accélératrices type CLIC: les caractéristiques propres aux structures CLIC seront intégrées progressivement avec une optimisation du design en collaboration avec nos partenaires industriels. Plusieurs prototypes seront réalisés dans un coût et un délai compatible avec le coût de construction objectif du futur collisionneur CLIC.

- Test en puissance RF des structures accélératrices haut gradient 12 GHz: il est primordial d'accroître rapidement les capacités de test en puissance. L'implantation d'une nouvelle station d'essai 12 GHz à l'Irfu sur le schéma klystron modulateur compresseur d'impulsion serait d'un grand intérêt scientifique et technique. Cette installation permettrait de mesurer des gradients accélérateurs de l'ordre de 100 MV/m et de très faibles probabilités de claquage. Cela positionnerait l'Irfu au premier plan dans la communauté des cavités à hauts gradients en utilisant, pour construire

et piloter ce type d'équipement, les compétences présentes en alimentations en puissance pulsée, sources RF de puissance et procédés de conditionnement RF.

- Opération des structures accélératrices à CTF3 les structures seraient intégrées à des modules CLIC à deux faisceaux 12 GHz, l'objectif étant de caractériser complètement les cavités en environnement accélérateur.

Toutes ces activités sont dans la continuité avec les contributions actuelles de l'Irfu réalisées pour CLIC.

### **i. RF : sources, coupleurs**

### **j. Cryogénie**

### **k. Faisceaux ultra courts**

Le développement de la prochaine génération d'accélérateurs reposants sur la technique du champ de sillage dans un plasma, est extrêmement intéressant si l'on considère leur potentiel en termes de gradient accélérateur. Néanmoins il est nécessaire de développer un programme de recherche pour étudier les aspects de répétabilité, de taux de répétition et d'accélération multi étages pour pouvoir envisager un futur collisionneur linéaire basé sur cette technique de laser plasma. Ces études peuvent être réalisées en injectant des impulsions d'électrons aux propriétés parfaitement connues dans le plasma sur lesquels une caractérisation serait pratiquée pour mesurer l'effet de l'accélération sur l'émittance 6D du faisceau. Dans cette optique, il est essentiel de pouvoir produire grâce à des photocanons RF des impulsions très courtes (dizaines de fs) de faible charge à injecter successivement dans le plasma. Cette R&D peut être reliée avec les développements requis pour la prochaine génération de sources de lumière qui requièrent des impulsions très courtes et intenses d'électrons dans le schéma de « self amplified spontaneous emission » SASE. Récemment, un nouveau projet LUNEX<sup>5</sup> a été proposé par SOLEIL considérant la possibilité d'obtenir de l'émission SASE avec un Linac conventionnel et une machine de type Laser Wakefield Accelerator (LWA).

Une plateforme dédiée à la technologie des photocanons RF, PHIL, est opérationnelle au LAL. L'un des objectifs de PHIL est la production d'impulsions extrêmement courtes à partir d'un canon compact, sans post compression de paquet. Ces études s'accompagneront du développement de diagnostics rapides dans le domaine de la femto seconde. Actuellement, l'équipe du LAL est en recherche active de financement pour le laser qui permettra de lancer cette R&D

## **l. Aimants supraconducteurs**

Le développement des aimants supraconducteurs pour les accélérateurs de particules est une spécificité de l'Irfu qui est l'un des principaux partenaires du CERN dans ce domaine. L'activité à moyen et long terme couvre en particulier les projets de jouvence du LHC. L'activité sur les aimants

supraconducteurs peut avoir des retombées importantes dans le domaine médical (par exemple NeuroSpin) ou dans le domaine de l'énergie (ITER, stockage d'énergie, réacteurs hybrides).

Les matériaux les plus utilisés pour les aimants supraconducteurs sont le Niobium-Titane (NbTi), le Niobium-Étain (Nb<sub>3</sub>Sn) et les supraconducteurs à haute température critique (SHTC). Chacun de ces matériaux a ses propres caractéristiques et domaines d'utilisation.

- **Aimants en NbTi (T<sub>c</sub>=9,2 K)**

Le Niobium-Titane est le matériau supraconducteur le plus utilisé aujourd'hui et sa mise en œuvre est maîtrisée. Les performances du NbTi sont limitées à des champs magnétiques inférieurs à 9 T à 4,2 K, ou 12 T à 1,8 K.

Pour les aimants d'accélérateurs, la tendance est à l'augmentation de l'ouverture pour augmenter l'acceptance et diminuer l'impact des radiations émises par le faisceau, en particulier dans la région d'interaction des collisionneurs comme le projet HL-LHC au CERN ou le projet ILC. L'utilisation du NbTi est envisagée au cas où les développements sur le Niobium-Étain n'aboutiraient pas pour les multiplets de quadripôles de focalisation. La conséquence directe de l'augmentation d'ouverture est l'augmentation de l'énergie stockée et des contraintes mécaniques, ce qui motive le maintien des compétences de conception et de fabrication et le développement de structures mécaniques adaptées.

Le NbTi est aussi un candidat pour des aimants dont le champ magnétique est pulsé comme ce pourrait être le cas pour une jouvence du PS au CERN ou pour un anneau de stockage comme SIS300 à GSI Darmstadt. Ce type d'aimant nécessite l'utilisation de filaments supraconducteurs de diamètre le plus petit possible pour limiter les pertes, ce qui est possible avec le NbTi dont le diamètre des filaments peut être réduit à quelques micromètres. La caractérisation des conducteurs supraconducteurs en terme de pertes dynamiques nécessite la mise au point de stations d'essais dédiées en champ rapidement variable, et des études sur les aimants pour assurer l'évacuation de l'énergie déposée sur les conducteurs.

Le NbTi trouve également des applications dans des systèmes de masse réduite nécessitant un champ magnétique allant jusqu'à environ 10 T. L'utilisation de cryo-coolers capables d'absorber de l'ordre du Watt à 4 K permet d'envisager un fonctionnement sans apport de fluides cryogéniques, rendant ainsi l'exploitation peu onéreuse et particulièrement aisée. Les développements de tels systèmes sont en cours.

- **Aimants en Nb<sub>3</sub>Sn (T<sub>c</sub>=18,3 K)**

L'emploi du Nb<sub>3</sub>Sn permet de dépasser la barrière des 12 T en gardant l'avantage d'un mode de refroidissement à 4,2 K. Sa température critique plus élevée que celle du NbTi permet de faire fonctionner les aimants avec des marges en température plus importantes et de supporter plus facilement l'élévation en température générée par les pertes faisceaux.

Le Nb<sub>3</sub>Sn est malheureusement très sensible à la déformation mécanique à l'issue de son processus de fabrication. Celui-ci nécessite des traitements thermiques à haute température (> 600°C) pour obtenir le composé supraconducteur, ce qui rend le conducteur fragile et cassant et oblige à une imprégnation complète du bobinage. Ces traitements thermiques (« réactions ») sont généralement réalisés in situ après le bobinage de l'aimant, ce qui nécessite la fabrication de fours de grande taille, des outillages et des procédures (« wind & react ») adaptés à ces opérations. D'autre part, les



matériaux utilisés dans et autour du conducteur doivent soutenir la température de réaction sans dégradation de leurs propriétés mécaniques et électriques. Enfin le procédé de fabrication des conducteurs ne permet pas d'obtenir des tailles de filaments supraconducteurs inférieures à 25 à 50  $\mu\text{m}$ , ce qui a un impact négatif sur la qualité de champ des aimants et les pertes dynamiques.

Le coût du  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  est plus élevé que celui du  $\text{NbTi}$ , même si, rapportée à la capacité de transport de courant sous champ, cette différence s'atténue largement. L'utilisation du  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  ne se justifie donc économiquement que dans les zones de bobinage où le  $\text{NbTi}$  n'est plus utilisable, ce qui amène à la conception d'aimants hybrides dont le bobinage est étagé en différentes couches utilisant le conducteur le plus adapté aux conditions de champ et contraintes mécaniques.

De nouveaux programmes de développements d'aimants à haut champ utilisant du  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  sont en cours.

Le projet HL-LHC de haute luminosité du LHC au CERN à l'horizon 2017-2021, a pour objectif d'augmenter la luminosité d'un facteur cinq en 2022. Le programme de modernisation des régions d'interaction autour des deux expériences ATLAS et CMS, nécessite le remplacement de seize quadripôles « low  $\beta$  ». Ceux-ci verront leurs paramètres augmenter fortement: champ crête de 13 T (+60%), ouverture de 120 à 150 mm (+100%), et longueur de 8 à 10 m (+30%). Le programme, qui compte sur la participation de nombreux partenaires européens, comprend des développements technologiques exigeant des compétences techniques particulières et la mise en place de moyens de caractérisation et d'essais spécifiques sur les supraconducteurs  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  (courant critique et pertes dans le conducteur, propriétés mécaniques et thermiques, etc.).

Le projet HE-LHC de haute énergie du LHC au CERN avec de nouveaux dipôles à double ouverture d'environ 20 T vise à atteindre une énergie de 33 TeV dans le centre de masse pour les collisions de protons. Les défis de tels aimants sont multiples: l'emploi de supraconducteurs différents dans le même aimant ( $\text{NbTi}$ ,  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  et SHTC), alimentés indépendamment, des forces, des inductances et des énergies magnétiques stockées importantes. La production de près de 20 km de ces dipôles exige aussi un coût abordable, surtout pour les supraconducteurs  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  et SHTC. Un concept technique et éventuellement un démonstrateur doivent être prêts à l'horizon 2016-17.

L'emploi d'aimants en  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  est aussi envisagé dans des études plus futuristes de collisionneurs à muons avec des énergies dans le centre de masse allant de 100 GeV à plusieurs TeV.

- **Aimants en SHTC**

Depuis quelques années les nouvelles familles de matériaux supraconducteurs, dits à haute température critique ( $> 30\text{ K}$ ), sont mises en œuvre industriellement. Ces nouveaux matériaux sont des céramiques. La première génération, ou BSCCO, composée au Bismuth types  $\text{Bi}_2\text{223}$  et  $\text{Bi}_2\text{212}$ , sont obtenus par tréfilage suivi d'un traitement thermique destiné à ajuster la stœchiométrie en oxygène. La seconde génération, ou YBCO, est obtenue par des techniques de couches minces. Le dernier matériau découvert, le  $\text{MgB}_2$ , est un composé binaire qui présente plus d'analogie avec les matériaux supraconducteurs conventionnels.

Ces nouveaux matériaux permettent de concevoir des aimants produisant des champs plus intenses (jusqu'à 35 T), supportant des efforts mécaniques plus élevés (jusqu'à 500 MPa) et capables de supporter des pertes thermiques plus importantes.

Dans le domaine des accélérateurs, ces nouveaux types d'aimants trouvent leur place dans les projets d'injecteurs et autres machines pulsées, dans les projets d'usine à neutrinos et collisionneurs de muons, ainsi que dans les ADS pour la fission contrôlée. Ces nouveaux matériaux permettent de fonctionner à des températures supérieures à celle de l'hélium liquide ce qui ouvre des perspectives de réduction des coûts de fonctionnement intéressantes.

La poursuite des développements d'aimants utilisant ces nouveaux supraconducteurs requiert une mise à niveau et une évolution permanente des stations d'essais. En particulier, il faut pouvoir tester des prototypes dans des gammes de température et de champ magnétique plus importantes que pour les aimants supraconducteurs traditionnels.

## **m. Instrumentation de faisceau**

### **Moniteurs de Position**

L'Irfu et l'IN2P3 ont la maîtrise de la conception, de la fabrication et de l'exploitation avec faisceau de moniteurs de position pour les faisceaux d'électrons et de protons. Cette compétence inclut les aspects mécaniques et électroniques de traitement du signal de ces instruments. Les deux techniques les mieux représentées sont celle des moniteurs à électrodes boutons, et celle des moniteurs à cavités RF. Les développements futurs envisagés sont :

- les moniteurs de position de type bouton à très haute sensibilité et très grande dynamique pour les accélérateurs de protons, avec comme champ d'application les sources de faisceaux radioactifs (FAIR)
- les moniteurs de position RF à très bonne résolution spatiale ( $< 1 \mu\text{m}$ ) et temporelle ( $< 10 \text{ ns}$ ), avec comme champ d'application les accélérateurs linéaires de faisceaux d'électrons de très faible émittance (sources de lumière de 4<sup>ème</sup> génération, collisionneurs linéaires), en particulier pour les systèmes d'asservissement rapide de trajectoire et de collision.

### **Diagnostics pour faisceaux intenses**

Les diagnostics dédiés aux accélérateurs d'ions de forte puissance (de l'ordre du MW) ont connu un essor particulier au cours de ces dernières années et sont appelés à se développer afin de répondre aux besoins des machines en construction ou en projet. Les points particulièrement importants pour ce type de diagnostics sont :

- pouvoir fonctionner sous un haut flux de rayonnement (pertes faisceau, proximité cible de production),
- être non interceptifs afin de limiter l'activation ou la destruction des matériaux qui les composent,
- avoir un faible encombrement afin de limiter l'effet de la charge d'espacesur de longues distances dans les injecteurs,
- posséder une bonne résolution (inférieure au mm) et dynamique de mesure importante afin de servir aussi bien durant la mise en service de la machine que son exploitation.

## **Profileur à ionisation du gaz résiduel**

Ce diagnostic est non interceptif et peut être conçu de manière à fonctionner durablement dans un environnement soumis à haut flux de rayonnement (rayons X, neutrons). De très bons résultats ont été récemment obtenus en termes de résolution et de reproductibilité. Des développements doivent à présent être menés dans l'analyse des données fournies par ce diagnostic afin de corriger des effets de charge d'espace induits par le faisceau.

Ces profileurs peuvent être utilisés pour réaliser une mesure non interceptive d'émittance par la méthode des trois gradients. Cependant, pour des accélérateurs de haute intensité (au delà de plusieurs dizaines de mA), l'importante charge d'espace du faisceau rend l'analyse des données expérimentales issues de cette méthode très délicate. Il est alors nécessaire d'utiliser des codes de calculs simulant la charge d'espace pour estimer l'émittance du faisceau. Il est à présent fondamental de développer des algorithmes de reconstruction et d'optimisation afin d'obtenir une mesure d'émittance fiable par cette méthode.

## **Tomographie optique appliquée aux mesures de profil de faisceau**

Un programme de développement de mesure de profil de faisceau par tomographie optique, mené dans le cadre du réseau européen DITANET a débuté voici 2 ans à l'Irfu. Un profil 3D du faisceau est obtenu à l'aide d'une reconstruction tomographique de plusieurs images optiques (photons émis par excitation ou désexcitation produite par le faisceau sur le gaz résiduel) du faisceau prises avec des caméras CCD. Les premiers résultats obtenus sur des faisceaux de basse énergie (100 keV) sont très satisfaisants. Des développements ultérieurs dans ce domaine sont à encourager. On pense notamment à l'ajout d'une analyse de décalage Doppler aux caméras CCD pour obtenir la composition des différentes espèces constituant le faisceau ainsi que leur profil spécifique. Une augmentation de la sensibilité de ces diagnostics permettrait notamment de les utiliser dans les lignes haute énergie nécessitant une forme particulière et une homogénéisation du faisceau sur une cible.

## **Détecteur de « micro-pertes »**

Dans les accélérateurs de forte puissance les pertes de faisceau doivent être maintenues à un niveau très faible afin de minimiser l'activation des composants de la machine. Ainsi, l'une des spécifications de l'accélérateur FMI est de maintenir de très faibles pertes de faisceau soit inférieur à 1 particule sur 1 million. Dans ces conditions, il devient nécessaire de développer des détecteurs suffisamment sensibles pour mesurer ces pertes (que l'on peut appeler micro pertes). De plus, ce type de détecteur fournit un outil permettant d'optimiser le transport du faisceau dans la machine. Des calculs de dynamique de faisceau ont montré la faisabilité d'un réglage de machine par minimisation des pertes.

Un détecteur diamant (agissant comme une chambre à ionisation à état solide) a été récemment proposé par l'Irfu pour détecter des micro pertes de faisceau dans un accélérateur. Il s'agit à présent de valider leur fonctionnement dans l'environnement d'un accélérateur. Les détecteurs de micro pertes représentent un axe de développement très important pour les années à venir.

## n. Contrôle commande

Un système typique de contrôle commande d'accélérateurs s'appuie sur 3 types de technologie matérielle:

- des systèmes informatiques industriels intégrant des moyens d'interfaces aux équipements suffisamment diversifiés et aux performances adaptées au besoin dans ce domaine (principalement alimentations, ampli RF et diagnostic faisceau),
- des systèmes d'automates chargés des tâches liés à la sécurité des équipements et du personnel avec des contraintes de fiabilité élevées,
- des PCs standards assurant les fonctions de supervision, archivage des données et développement.

Donc hormis la problématique des diagnostics du faisceau pouvant nécessiter des performances élevées dans le domaine du taux d'acquisition et des volumes de données, les briques élémentaires de ces systèmes se situent dans le domaine industriel conventionnel et leur mise en œuvre nécessite un savoir-faire spécifique.

Ces systèmes sont interconnectés en réseau via des protocoles standardisés. De plus, des réseaux de type bus de terrain permettent l'accès à des contrôleurs gérant des entrées/sorties distantes.

Le support logiciel pour les systèmes informatiques s'articule sur une architecture à 3 niveaux (supervision, système de contrôle local et gestion des interfaces d'équipements). Le logiciel le plus communément utilisé depuis 15 ans pour le contrôle d'accélérateur est EPICS.

Au niveau des automates, on s'appuie presque exclusivement sur les solutions de type mono constructeur pour le matériel (UC et E/S) et le logiciel. L'Irfu sait proposer dans ce domaine une solution de supervision basée sur le système Muscadé<sup>®</sup> développé en son sein ainsi que des systèmes d'E/S spécialisés comme le CABTF (Centrale d'Acquisition de Basse Température) particulièrement adaptée aux processus cryogéniques pour les aimants et les cryomodules RF.

Pour les systèmes de contrôle locaux, les solutions à base de VME sont utilisées avec peu d'évolution depuis 20 ans. Leur obsolescence étant inévitable, la recherche d'un bus standardisé de substitution doit maintenant être entreprise. Des amorces d'innovation en ce domaine ont vu le jour mais parmi celles-ci (cPCI, PC Express, MXI, micro VCA), aucune ne s'est encore vraiment imposée. Une R&D dans ce domaine matériel en y intégrant l'aspect logiciel système (exécutif temps réel, Linux) doit être entreprise pour avoir une solution prête le moment venu lors du démarrage d'un nouveau projet.

Dans le domaine des systèmes embarqués sous Linux susceptibles de supporter EPICS, une R&D est déjà engagée à l'Irfu mais doit se poursuivre pour avoir une solution prête à l'emploi sur étagère. Disposée d'une solution flexible à bas coût et simple à intégrer au système de contrôle local pour, par exemple, l'intégration d'un diagnostic intelligent, permettrait d'économiser sur le coût et la complexité d'un système modulaire type VME ou autre.

Enfin un suivi/entretien doit être effectué au niveau supervision EPICS à un nouvel ensemble d'outils réunis dans un même cadre d'application (Eclipse, RCP) à vu le jour il y a quelques années. Afin de

fournir ces outils pour les nouveaux projets, il est nécessaire de se les approprier et éventuellement savoir orienter leur évolution au sein de la communauté EPICS. Une action de prospective est beaucoup plus délicate, sinon irréaliste, dans le domaine des automates, car nous sommes liés aux décisions techniques et stratégiques des constructeurs. Il est juste envisageable d'anticiper légèrement les nouvelles technologies et d'étudier leur impact. Une telle action a été entreprise pour le remplacement du bus de terrain Profibus par ProfiNET.

Le système de supervision Muscadé<sup>®</sup> développé par l'Irfu devra s'adapter aux nouveaux protocoles de communication comme OPC. En fait, dans nos prochains équipements intelligents, Muscadé<sup>®</sup> permettra de les configurer et d'en assurer la supervision spécifique. Conçue s'appuyant sur les technologies internet, un accent tout particulier est mis sur l'aspect sécurité de ces systèmes pour maîtriser les risques de plus en plus nombreux de ce domaine.

## **7. Nouvelles techniques d'accélération**

### **a. Accélération par ondes plasma**

Parmi les nouvelles technologies pour accélérer des particules, l'utilisation d'ondes plasma excitées par des impulsions laser est à la fois la plus ambitieuse et aussi celle qui promet les gradients les plus élevés dépassant de plusieurs ordres de grandeur ce qui est à présent réalisable avec des cavités radio fréquence (RF). Depuis que le principe de l'accélération laser plasma a été proposé dans les années 1980 cette discipline a connu des progrès considérables avec l'avènement des lasers à impulsion ultracourte (<100fs).

A l'international, la R&D sur l'accélération des électrons par ondes plasma entre dans une nouvelle phase. Après une décennie ponctuée d'un grand nombre de résultats expérimentaux qui furent salués comme des percées majeures (comme par exemple l'obtention de spectres d'énergie quasiment mono-énergétiques), plusieurs pays se dotent de installations dédiées à cette thématique. FACET et BELLA aux USA tentent respectivement sur l'excitation des ondes plasma par un paquet d'électrons ou par une impulsion laser. Le projet PDWFA sous la houlette du MPI de Munich et du CERN vise à exploiter un faisceau de protons pour exciter l'onde plasma. De plus, DESY et l'université de Hambourg, la LMU de Munich (CALA), l'INFN à Frascati (SPARC) ont des programmes qui mettent l'accélération d'électrons par onde plasma au premier plan.

En France, la R&D sur les nouvelles techniques d'accélération de particules par laser et onde plasma est depuis longtemps concentrée sur le plateau de Saclay, avec les lasers de classe 100TW du Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA) de l'ENSTA (Palaiseau), le laser UHI100 d'IRAMIS au CEA (Saclay) ainsi que le Laboratoire de l'Utilisation des Lasers Intenses (LULI) à l'École Polytechnique (Palaiseau) et le Laboratoire de Physique des Gaz et Plasmas (LPGP) à l'université Paris XI (Orsay). Avec la mise en service du laser APOLLON (10PW, 15fs, 1tir/min) sur le site du CEA à l'Orme des Merisiers et son équipement expérimental associé, l'EQUIPEX ILEX, la communauté aura à sa

disposition un outil unique dans le monde permettant de franchir une étape importante dans le domaine.

Le Centre Interdisciplinaire Lumière Extrême (CILEX) servira un éventail vaste d'objectifs scientifiques dont l'accélération des électrons est particulièrement mise en exergue ce qui est attesté par le fait que l'un des deux halls expérimentaux radio protégés lui est consacré.

Il est à noter que l'exploitation de CILEX sera préparée et accompagnée par le programme expérimental conduit sur les « Centrales de proximité » c'est à dire les lasers du LOA, de l'IRAMIS et LASERIX qui pourront fonctionner à une puissance moindre mais à une cadence plus élevée. L'accès à ces installations jumelées présentera un atout majeur pour la préparation efficace des expériences sur Apollon.

## **Le programme de CILEX**

À long terme, les objectifs scientifiques sont orientés vers une application de l'accélération laser plasma à la physique des hautes énergies. L'enjeu principal est soit de démontrer soit d'invalider la faisabilité d'un collisionneur électrons positrons avec des énergies dans le centre de masse au delà du Teraélectron volt (TeV) et d'identifier les principaux verrous en plus de ceux qui relèvent de la technologie des lasers. Parmi ces derniers le faible taux de répétition et le transfert de puissance « de la prise murale au faisceau » sont particulièrement décourageants en l'état actuel de l'art. En misant sur la continuation du progrès fulgurant qu'a connu la technologie laser, on découple la question de l'efficacité énergétique des lasers de la problématique de la production de l'accélération de faisceaux de bonne qualité. Ainsi une étape intermédiaire importante sera la démonstration de la faisabilité d'une source d'électrons de 1 à 10 GeV compacte et monochromatique qui pourrait être employée par exemple comme faisceau test pour des détecteurs de particules. Ce objectif s'accorde parfaitement avec l'exploitation des faisceaux d'électrons accélérés par onde plasma pour créer du rayonnement X, soit directement dans le plasma – où il constitue un puissant diagnostic des propriétés du faisceau – soit par injection dans un onduleur. La mesure et la conservation des excellentes propriétés des faisceaux, en particulier, ainsi que l'amélioration de la qualité et de la stabilité des faisceaux est commune aux deux applications.

Parmi les 12 laboratoires partenaires de CILEX se trouvent le LLR, le LAL, l'Irfu et SOLEIL leur appartient de promouvoir ces objectifs. Ils s'impliqueront notamment sur le développement des diagnostics et des lignes de transports pour les électrons, mais aussi sur la dynamique des faisceaux et la simulation de l'interaction plasma électrons.

Cependant, il est obligatoire d'assurer aux équipes d'expérimentateurs les moyens matériels de poursuivre les études de mécanismes d'accélération qui permettront d'identifier le régime de fonctionnement optimal et d'améliorer la qualité des faisceaux en ce qui concerne notamment la reproductibilité, la monochromaticité et l'émission. Le programme scientifique de ces études est à présent clairement défini et sa réussite dépend avant tout de la disponibilité et de la fiabilité des lasers que de leur puissance.

Lors d'un travail collaboratif des différents partenaires un phasage pluriannuel du programme « électrons » a été établi, partant des expériences simples en régime auto injecté et aboutissant à des expériences multi étages indispensables pour démontrer l'utilité de cette technique d'accélération.

La mise en service du laser Apollon est prévue pour 2015 pour une durée d'exploitation d'au moins sept ans. Avec une installation dédiée, et un nécessaire changement de la pratique expérimentale, CILEX offre l'opportunité de conduire un programme de R&D de longue haleine.

## **b. Source de protons et d'ions par laser**

Ce type de sources présente un intérêt potentiel pour les accélérateurs en hadronthérapie et en protonthérapie. Elles sont actuellement étudiées par la communauté de lasers (Iramis, LULI, Polytechnique, CILEX). L'Irfu et l'IN2P3 peuvent apporter leur expertise sur trois axes: les modélisations et simulations de l'interaction du faisceau laser avec la cible, les diagnostics et plus tard éventuellement le transport faisceau.

Les codes déjà écrits pour modéliser l'effet de charge d'espace ou de sillage peuvent être adaptés pour simuler précisément ce nouveau type de sources. Les faibles pas de temps et le très grand nombre de particules nécessaires impliquent un grand nombre d'opérations et donc l'utilisation de supercalculateurs. Il faut noter que le CEA/DAMa déjà développé des codes pour ce type de problèmes. Pour les diagnostics la validation de l'expérience doit se faire en caractérisant le faisceau accéléré en taille, longueur et énergie. Une des difficultés est de caractériser temporellement le faisceau produit qui sera ultracourt.

L'Irfu et l'IN2P3 ont commencé une activité dans ce domaine en se liant au projet CILEX. Les expériences d'accélération sont prévues commencer en 2015 et l'objectif est de produire dans les dix ans un faisceau de protons de l'ordre du GeV. L'Irfu peut participer à l'aspect simulation ainsi qu'aux diagnostics.

L'Irfu participe également au projet Petal Plus en étudiant le spectromètre, conjointement avec le CEA/DAM. Le but de ce projet est de reproduire des conditions propres à l'astrophysique en laboratoire en étudiant l'interaction d'un faisceau laser de haute énergie (de l'ordre du kJ) avec un plasma, ce qui accélère des électrons, protons et ions carbone multichargés.

Si ce type de sources devait se développer dans les années à venir, la communauté des accélérateurs devra en être partie prenante, par exemple en simulant et caractérisant des accélérateurs utilisant ces sources.

## **8. Interdisciplinaire**

### **a. Machines**

Plusieurs accélérateurs électrostatiques d'ions sont en exploitation à l'IN2P3 et à l'Irfu pour des applications diverses, dont :

- Le tandem à l'IPNO, pour la production de faisceaux d'ions légers à lourds et d'agrégats couplé à l'accélérateur d'électrons ALTO pour les études de structure nucléaire et des programmes pluridisciplinaires (chimie, biologie, physique atomique et de la matière condensée)
- La plateforme JANNUS (Jumelage d'Accélérateurs pour les Nanosciences et la Simulation) en région parisienne, opérée conjointement par le CNRS et le CEA et l'Université Paris Sud, pour la microscopie électronique à transmission in situ et l'analyse par combinaison de faisceaux avec ARAMIS (CSNSM Orsay) et EPIMETHE (Saclay)
- La plateforme AIFIRA (Applications Interdisciplinaires de Faisceaux d'Ions en Région Aquitaine) au CENBG pour l'analyse chimique, la caractérisation et l'irradiation de matériaux
- L'accélérateur GENEPI de la plateforme PEREN au LPSC pour la production de neutrons rapides pour les études de physique des réacteurs
- La plateforme ANAFIRE à l'IPNL, avec plusieurs implants et accélérateurs pour des études de radiobiologie et sur l'environnement.

Certains accélérateurs sont des machines industrielles (HVE ENEC) d'autres ont été développés par les laboratoires. Ces machines proposent souvent des prestations ouvertes aux industriels, par exemple pour le test de composants électroniques dédiés au spatial. Des réseaux permettent de promouvoir ces accélérateurs comme le réseau EMIR, créé par le CNRS et le CEA pour l'irradiation de matériaux.

Même si nos laboratoires sont parfois consultés au même titre que les industriels pour la fourniture d'accélérateurs électrostatiques, il ne paraît pas nécessaire de développer des compétences dans la conception de machines électrostatiques. Il est en revanche important de maintenir dans les laboratoires, les compétences relatives à leur exploitation.

## **b. Déclassement des accélérateurs**

Certains accélérateurs opérés par nos laboratoires, ou seront bientôt, en fin de vie. La question de leur démantèlement mérite d'être posée car il requiert des moyens financiers très importants (plusieurs M€ pour SARA au LPSC par exemple) et des compétences spécifiques rares dans nos laboratoires. D'autre part, ces machines à l'arrêt immobilisent des locaux équipés, qui pourraient être utilisés pour la mise en place de nouvelles expériences.

## **9. Infrastructures**



La science des accélérateurs est une discipline très expérimentale et technologique: le développement de techniques ou concepts d'accélération passe systématiquement par des étapes importantes et lourdes de préparation, de test ou de validation de performances. Le niveau de dotation des laboratoires en équipements spécifiques pour le développement et tests de composants accélérateurs est un facteur très important dans sa capacité d'aborder et traiter une problématique scientifique dans ce domaine. Il est donc éminemment stratégique de maintenir et développer un niveau d'équipement important dans les laboratoires de l'IN2P3 et de l'Irfu malgré les difficultés qu'ils peuvent poser pour le financement de leur installation et de leur opération (et maintenance).

Ainsi, entre les laboratoires, c'est la complémentarité, la synergie et la mutualisation des équipements qui doivent prévaloir pour pouvoir se doter de toutes ces infrastructures lourdes mais indispensables au développement de techniques et des composants accélérateurs.

## 10. Valorisation

Afin de valoriser les travaux effectués par nos instituts, il est légitime de se questionner sur les domaines d'applications possibles de technologies dont nous avons la maîtrise.

Actuellement, on dénombre en Europe plus de 12 millions de procédures médicales par an utilisant des radio isotopes, soit plus de 30 000 procédures par jour dont 90 % sont utilisés à des fins diagnostiques. Le progrès dans ce domaine dépend de façon cruciale de la disponibilité d'isotopes innovants pour les activités initiales de R&D, puis de la capacité d'en produire de grandes quantités pour les applications cliniques. La production de ces radio isotopes est effectuée par des réacteurs nucléaires ou par des accélérateurs. Le  $^{99m}\text{Tc}$ , radioélément le plus utilisé en imagerie médicale, est issu du  $^{99}\text{Mo}$  produit par les réacteurs HFR, OSIRIS et BR2 en Europe. Les cyclotrons sont bien adaptés à la production des éléments employés pour la TEP. Par exemple, le cyclotron ARRONAX pour but de produire les radio isotopes  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{68}\text{Ge}$ ,  $^{211}\text{At}$ ,  $^{82}\text{Sr}$ ,  $^{67}\text{Cu}$ ,  $^{44}\text{Sc}$ ,  $^{47}\text{Sc}$ . Existe-t-il un intérêt à produire d'autres espèces de radio isotopes avec un accélérateur? Pouvons-nous fournir avec une nouvelle machine un élément, pas ou peu disponibles selon les régions, bénéficiant à la médecine nucléaire? Avons-nous encore une place à prendre dans ce domaine compte tenu des éléments proposés par l'industrie?

Le domaine de l'art a également recours à des accélérateurs de particules depuis une vingtaine d'années. Par exemple, la machine AGLAE est utilisée au Louvre pour la caractérisation d'œuvres d'art. Cette machine a été achetée clé en main à un industriel américain (NEC) à l'avenir, si ce type de projet voyait à nouveau le jour, devrions-nous nous positionner? Avec le développement de ThomX, serait-il judicieux de lui coupler un outil d'analyse basé sur des faisceaux d'ions accélérés?

Les USA ont une vaste utilisation des accélérateurs pour assurer la sécurité du territoire. Beaucoup de machines sont basées sur des générateurs de neutrons. Devons-nous nous en inspirer? Pouvons-nous mettre à profit notre expérience dans le domaine pour faire de l'imagerie neutronique?

De manière plus générale, quels sont les besoins de la société? Sommes-nous capables d'identifier une application pour laquelle notre positionnement serait avantageux? S'il est facile d'inventorier et de se questionner sur les multiples domaines d'applications des accélérateurs, il est beaucoup plus difficile d'y apporter des réponses pertinentes. Aussi pourrait-il judicieux de mettre en place, avec le soutien de nos directions, une cellule de travail, formée par un groupe de nos experts, afin d'étudier l'état de l'art et d'identifier de possibles niches où nos instituts pourraient se positionner, pour à la fois faire profiter la société de nos travaux et augmenter nos ressources propres pour aider au développement de programmes qui ont du mal à trouver un financement.

## 11. Enseignement

Actuellement la physique des accélérateurs est enseignée pour ce qui concerne l'Université de Paris Sud, dans le cadre de deux Mastères 2, APIM et NPAC. Elle est enseignée par ailleurs à Archamps au Joint Universities Accelerator School (JUAS) et est proposée notamment aux étudiants de Mastères grenoblois.

Le Mastère 2 APIM est consacré à la physique des accélérateurs et à l'interaction particule-matière. Il prévoit environ 90 heures d'enseignement sur les sujets relatifs aux accélérateurs et la possibilité de choisir deux autres modules complémentaires de 20 heures chacun. Les sujets traités sont la dynamique des particules, la technologie liée aux accélérateurs, le diagnostic, les sources, l'interaction laser-plasma et le rayonnement de synchrotron.

Le Mastère 2 NPAC est consacré à la physique fondamentale des particules, à la physique nucléaire, aux astroparticules et à la cosmologie. Dans ce contexte, des modules de physique appliquée ont été insérés avec un module de 18 heures d'introduction aux accélérateurs au premier semestre et un module de spécialisation de 30 heures au deuxième semestre.

A Grenoble, le Mastère PSA est dédié à l'enseignement de la physique subatomique et des astroparticules. D'autre part, le Mastère EP est consacré à l'énergétique physique. En plus du tronc commun de chacun de ces cursus, ces Mastères offrent la possibilité aux étudiants d'intégrer des modules du JUAS dans leur parcours (18 ECTS sur un total de 36 pour les enseignements de PSA) leur offrant ainsi une solide formation dans le domaine des accélérateurs.

L'école des accélérateurs JUAS (Archamps) donne une formation complète dans le domaine, sur 10 semaines, tant sur la physique machine que sur les aspects plus techniques et technologiques. Elle est structurée en partenariat avec 14 universités européennes dont, pour la France, l'Université Joseph Fourier de Grenoble et Grenoble INP. Elle accueille des étudiants ou des professionnels du monde entier, avec la possibilité de formation à la carte (suivi de certains modules uniquement). Elle permet de se spécialiser en acquérant des crédits universitaires pour le diplôme de Mastère 2 ou le diplôme d'ingénieur. Elle bénéficie d'un support financier de l'IN2P3.

A ce jour, il n'existe pas de coordination entre les parcours parisiens et le JUAS. Cette coordination serait bénéfique si elle permettait d'améliorer la formation des étudiants en tirant le meilleur parti

de ces trois mastères: effectif étudiants pour NPAC, étendue de l'enseignement pour APIM, et formation technologique et proximité du CERN pour JUAS.

L'effort à fournir dans ce contexte est considérable. Le renforcement du nombre d'heures de cours dont dispose NPAC, l'augmentation de la quantité de thèses et de contrats proposés et la coordination entre les trois parcours sont autant d'objectifs souhaitables. Cependant, il est regrettable de constater le très faible nombre de spécialistes du domaine qui soient titulaires d'une habilitation à diriger des recherches (HDR) ou d'une thèse d'état, ce qui pose des problèmes d'encadrement et de constitution de jurys de thèse. A ce jour, il n'y a qu'un seul enseignant-chercheur spécialisé dans ce domaine (professeur à l'UJF).

Les statistiques relatives aux étudiants dans le domaine des accélérateurs sont inquiétantes, voir figure 1. Sur cette figure, les chiffres indexés en 2009 correspondent à une moyenne effectuée entre 2005 et 2009. Les chiffres référencés au niveau Undergraduate représentent le nombre de stagiaires accueillis dans les laboratoires jusqu'à un niveau de Bac+3. Les chiffres correspondant au niveau Mastères reflètent à la fois les étudiants accueillis en stage et les étudiants ayant suivi un Mastère dispensant une formation sur les accélérateurs (dans ce cas, la population est estimée par les effectifs totaux du Mastère pondérés par le rapport du nombre d'heures de cours dispensées sur les accélérateurs sur le nombre total d'heures de cours). Les étudiants référencés en PhD et Postdoc représentent respectivement les doctorants et les chercheurs en contrat post doctoral.

La décroissance est nette pour les niveaux Undergraduate et Mastères. Les effectifs des doctorants et post doctorants sont stables mais le nombre d'étudiants étrangers en formation dans les laboratoires français semble en augmentation. Le désintérêt des étudiants français pour notre discipline semble donc clair depuis plusieurs années. Cette pénurie est également reflétée au niveau des concours CNRS on observe en effet un nombre très limité de candidats que ce soit au niveau Ingénieur de Recherche ou Chargé de Recherche.

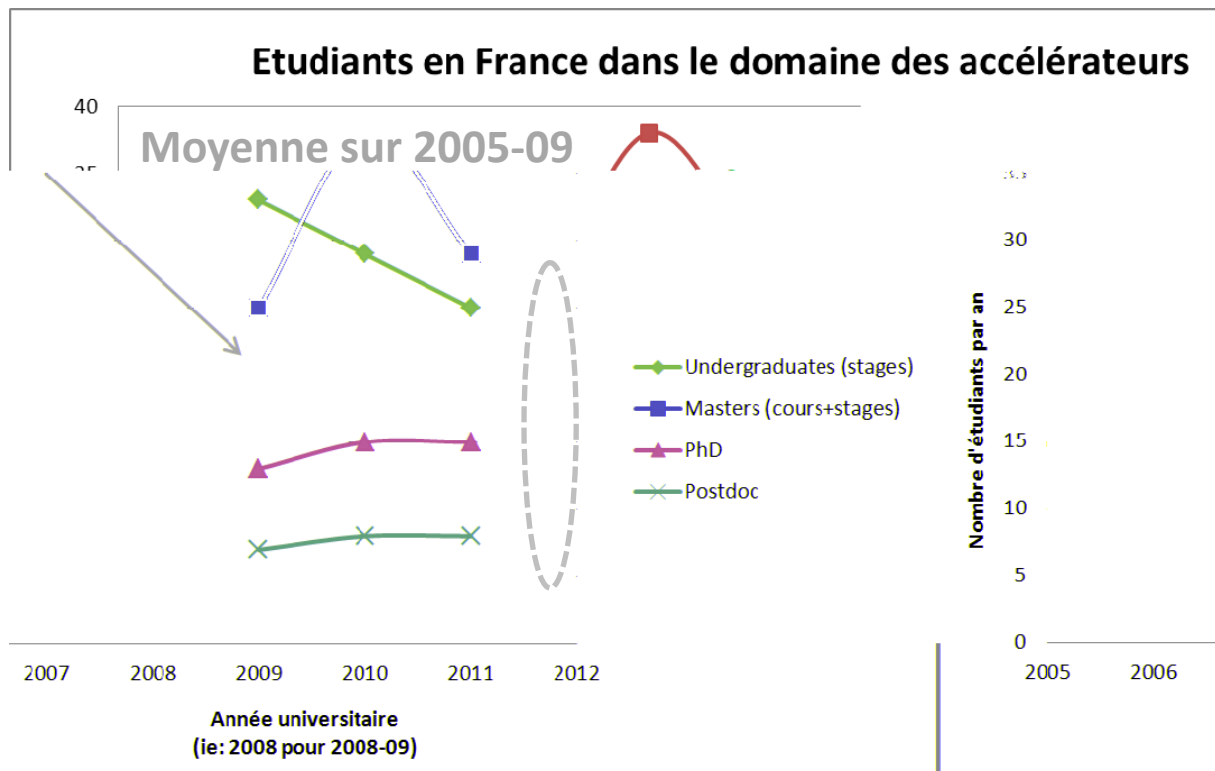


Figure1 : nombre d'étudiants dans le domaine des accélérateurs en fonction de l'année universitaire (données extraites du recensement effectué dans le cadre des études pour TIARA).

Il nous semble que notre discipline est mal connue des étudiants, en particulier sur les points suivants:

- l'existence des nombreuses infrastructures dédiées aux accélérateurs en Europe, à l'exception du CERN
- le caractère scientifique de nos métiers, qui apparaissent souvent trop techniques pour un travail de thèse.

Les statistiques des étudiants s'engageant dans des thèses accélérateurs bénéficieraient certainement d'une amélioration de ces points en donnant aux jeunes une meilleure image de l'envergure de notre discipline.