

R&D source d'ions lourds : contexte, activités à l'IN2P3 et perspectives

Conseil Scientifique IN2P3, 16 et 17 juin 2016

Auteurs :

J. Angot¹, C. Barué², M. Cheikh-Mhamed³, P. Delahaye², M. Dubois², H. Franberg – Delahaye², P. Jardin², T. Lamy¹, N. Lecesne², L. Maunoury², T. Thuillier¹

Laboratoires IN2P3 :

¹ Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie de Grenoble

² Grand Laboratoire National d'Ions Lourds

³ Institut de Physique Nucléaire d'Orsay

Table des matières

Introduction.....	1
1. Recherche et développement sur les sources d'ions lourds stables.....	2
1.1 Contexte	2
1.2 R&D Source d'Ions Lourds pour SPIRAL2.....	3
R&D PHOENIX V2.....	3
R&D PHOENIX V3.....	5
Perspectives.....	6
Ressources et moyens.....	7
Publications	7
1.3 Développement de faisceaux métalliques	8
Contexte	8
R&D fours métalliques.....	10
Ressources et budget	12
Auto-analyse SWOT.....	12
Références.....	12
1.4 R&D source 60 GHz	13
Historique et évolution.....	13
Perspectives à moyen terme.....	16
Perspectives à long terme	17
Ressources et moyens.....	17
Publications	18
2. R&D sur les ensembles cibles sources.....	19
2.1 Introduction.....	19
2.2 Les enjeux scientifiques.....	19
Exigences pour un ECS.....	20
2.3 Etat de l'art des cibles des ECS.....	21
Cibles d'UCx.....	21
Autres cibles	21
2.4 Sources d'ions radioactives	22
Source à ionisation de surface	22
Source FEBIAD	23
Sources ECR	24
Source laser	25

2.5 R&D ECS à ALTO.....	26
Développement des sources d'ions radioactifs.....	26
Développement de cibles.....	27
Genèse et calendrier	27
Ressources humaines.....	28
Ressources budgétaires.....	28
Réalizations techniques.....	29
2.6 R&D ECS SPIRAL 1 et SPIRAL 2 au GANIL.....	29
Genèse et calendrier	30
Ressources, moyens et activités de recherche.....	30
Réalisation techniques	31
Auto-analyse SWOT.....	32
3. R&D sur les boosters de Charge	33
3.1 Introduction.....	33
3.2 Historique des booster ECR.....	34
3.3 R&D EMILIE.....	37
3.4 R&D Booster de charge au LPSC.....	37
Expériences sur le booster de charge PHOENIX au LPSC	37
R&D source d'ions COMIC chaude	38
R&D source d'ions SUPERCOMIC.....	39
R&D booster PHOENIX SPIRAL2 (gelée)	40
Contrat de collaboration LPSC/INFN-LNL : booster SPES	40
R&D Booster PHOENIX LPSC.....	41
Perspectives de R&D du booster PHOENIX LPSC.....	42
Activité de publication.....	42
Ressources et budget	42
3.5 R&D BOOSTER SPIRAL1	43
Perspectives de la R&D Booster SPIRAL1	46
Ressources et budget	46
Table 2 : synthèse ressource et budget activité R&D booster	47
Références.....	47
Annexe 1 : Publications et références dans le document.....	1
Liste des publications et références de la partie 1.....	1
Référence de la section 1.1	1

Liste des Publications de la section 1.2	1
Liste des références de la section 1.3.....	1
Liste des publications de la section 1.4	1
Liste des références de la partie 2.....	3
Liste des références de la partie 3.....	4

Introduction

Le présent document répond à la demande du conseil scientifique de l'IN2P3 (CSI) de fournir une vue d'ensemble de l'activité de R&D sur les sources d'ions lourds dans l'institut. Trois activités distinctes sont rapportées : la R&D sur les sources d'ions lourds ECR utilisées pour produire les faisceaux d'ions multichargés des accélérateurs, la R&D sur les ensembles cibles sources utilisés pour générer des faisceaux d'ions radioactifs d'état de charge 1+ et la R&D sur les boosters de charge utilisés pour augmenter l'état de charge des faisceaux radioactifs afin d'assurer leurs post-accélérations.

Les laboratoires IN2P3 concernés par cette activité sont le GANIL, l'IPNO et le LPSC. Le nombre d'IR et chercheurs publiants à l'IN2P3 dans l'activité source d'ions lourds est d'environ une quinzaine. Le CSI demandait une longueur de document de 20 pages maximum. La richesse du domaine et le grand nombre d'auteurs spécialisés sollicités pour représenter cette activité dans sa globalité débouchent sur un rapport de 46 pages, ventilé sur 3 parties. Le calendrier serré pour mener à bien ce rapport n'a malheureusement pas permis d'initier un processus itératif avec les auteurs permettant d'en réduire la longueur et d'homogénéiser le poids de chaque contribution. Les publications et références mentionnées dans le document sont reportées en annexe et classées par partie.

1. Recherche et développement sur les sources d'ions lourds stables

1.1 Contexte

La R&D sur les sources d'ions lourds stables à l'IN2P3 est centrée sur les sources utilisant la résonance cyclotronique électronique (ECR). Inventées par Richard Geller au CEA Grenoble dans les années 1960, ces sources, grâce à leur robustesse et leur simplicité d'opération, ont diffusé de par le monde et sont aujourd'hui utilisées sur toutes les machines de recherche en physique des ions lourds où un faisceau d'ions continu est demandé. Au cœur de ces instruments, un plasma est entretenu sous vide en injectant en continu une puissance microonde dans une cavité cylindrique plongée dans un fort champ magnétique. La structure magnétique est dite à « minimum B » : l'intensité du champ magnétique est minimum au centre et maximum sur les bords. La microonde injectée est choisie de telle sorte que sur une surface fermée de module magnétique B, située loin de la paroi, il y ait égalité entre la fréquence de l'onde f et la fréquence cyclotronique électronique f_{ce} des électrons :

$$f = f_{ce} = \frac{1}{2\pi} \frac{eB}{m_e}$$

où e et m_e sont respectivement la charge électrique et la masse de l'électron. Cela permet un transfert résonant d'énergie de l'onde vers la population d'électrons du plasma. Les électrons du plasma, confinés par le champ magnétique, font des milliers d'allers-retours dans la chambre à plasma et traversent à répétition la zone de résonance. Une distribution d'électrons chauds de quelques keV en résulte, énergie suffisante pour multi-ioniser efficacement les atomes injectés en continu dans le plasma. Les ions, plus lourds, restent froids et sont extraits du plasma par un champ électrostatique pour former un faisceau d'ions. La grande force des sources ECR est l'existence d'une loi d'échelle : la densité du plasma n_e est théoriquement proportionnelle à la fréquence de chauffage de l'onde au carrée :

$$n_e \propto f^2$$

Comme l'intensité du faisceau d'ion extrait est directement proportionnelle à la densité du plasma, on comprend qu'augmenter la fréquence microonde permet d'augmenter les intensités extraites, mais le prix à payer est une augmentation de l'intensité du champ magnétique :

$$I \propto f^2 \propto B^2$$

Les fréquences des sources d'ions opérationnelles en France sont dans la gamme 2,45 -18 GHz. La technologie associée repose sur l'utilisation de solénoïdes en cuivre refroidis à l'eau pour générer le champ magnétique axial et des aimants permanents pour fabriquer le confinement radial.

Depuis les années 2000, des sources d'ions de nouvelle génération ont été développées aux Etats-Unis[1][2], en Chine[3], au Japon[4] (des développements sont en cours en Corée du sud). Celles-ci utilisent des aimants supraconducteurs pour fabriquer la structure magnétique, permettant un fonctionnement à la fréquence de 24 à 28 GHz. Aujourd'hui, le retour d'expérience a démontré que ces sources sont fiables et produisent des intensités record (ex. 1.4 mA d'Ar¹²⁺ à IMP Lanzhou[5]).

De 2004 à 2008, les laboratoires européens du domaine se sont associés pour mener une R&D innovante pendant le contrat européen EURONS (CEN Grenoble, LNS, KVI, GSI, GANIL, LPSC). Deux sources ont été développées pendant cette période : MS-ECRIS[6], (porteur LNS), une source ambitieuse totalement supraconductrice pouvant fonctionner jusqu'à la fréquence de 37 GHz, et A-PHOENIX (porteur LPSC), une source hybride mixant solénoïdes supraconducteur haute température, solénoïde chaud et hexapole en aimant permanent spécial pouvant fonctionner jusqu'à 28 GHz. Le projet MS-ECRIS n'a malheureusement pas abouti : l'aimant supraconducteur, conçu par la société ACCEL (Bruker Advanced Supercon aujourd'hui), quenche à 30% du champ nominal. Une erreur de

conception thermo-mécanique semble être à l'origine du problème. A-PHOENIX a été construite avec une structure magnétique conforme aux simulations et a produit des faisceaux d'ions. On peut noter que cette source contient l'hexapole en aimant permanent le plus intense du monde (1.8T au contact des aimants). Cependant, les nombreux tests et modifications apportées à la source ont abouti à des performances moyennes, bien en deçà des espérances (700 μ A d'Ar⁸⁺ et quelques dizaines de μ A d'Ar¹²⁺) (voir CS LPSC 16-17/10/2008 et 29-30/12/2012). La R&D a été stoppée mi 2009 pour se consacrer à la construction et aux tests de la ligne basse énergie de SPIRAL2. L'analyse a posteriori des limitations et difficultés observées avec A-PHOENIX est que cela est dû à un diamètre de chambre à plasma trop petit (64 mm, à comparer aux 180 mm de MS-ECRIS), diamètre imposé par un budget disponible limité (le financement d'A-PHOENIX s'est étalé sur plusieurs années avec des fonds propres LPSC (reliquat 5^{ème} PCRD, européens (6^{ème} PCRD), puis budget SPIRAL2).

Objectivement, l'Europe a perdu son leadership historique dans le domaine des sources ECR d'ions multichargés il y a une dizaine d'année, ne pouvant faire face aux moyens financiers mis à la disposition des équipes comme le LBNL, IMP CAS, MSU, RIKEN avec des développements de sources supraconductrices coûtant plusieurs M€, capables de fonctionner à haute fréquence (24-28 GHz) et de délivrer des intensités de faisceau très importantes. Le LBNL et l'IMP Lanzhou travaillent depuis quelques années à des études papier de conceptions de sources d'ions de plus haute fréquence (de 37 à 56 GHz) [7],[8],[9].

Cependant, une forte expertise existe bien toujours en France, internationalement reconnue, dans le domaine des sources d'ions ECR. Les laboratoires IN2P3 effectuant une R&D sur les sources d'ions lourds sont le GANIL et le LPSC. On peut identifier deux grands axes actuels de R&D :

- Le premier axe est lié à la R&D source du projet SPIRAL2 et au développement de faisceaux d'ions métalliques du GANIL. Le LPSC et le GANIL collaborent depuis de nombreuses années sur ces deux thèmes intimement liés. Il faut citer une participation de l'IPNL à ces activités (codirection des tests de la ligne basse énergie effectués au LPSC).
- Le deuxième axe porte sur une R&D amont très innovante dédiée aux sources ECR du futur fonctionnant à 60 GHz et à la physique du plasma associé. Cette étude est portée par le LPSC depuis 2006, en collaboration avec le Laboratoire National des Champs Magnétique Intenses de Grenoble (UPR3228) et l'Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Science (IAP RAS) de Nizhny Novgorod (Fédération de Russie) et rejoint récemment par le Jyväskylä Yliopisto University of Jyväskylä (JYFL).

1.2 R&D Source d'Ions Lourds pour SPIRAL2

R&D PHOENIX V2

L'objectif de la source d'ions lourds de SPIRAL2 est de fournir des hautes intensités de faisceaux d'ions de rapport charge sur masse $Q/A=1/3$ pour l'expérience S3 (Super Séparateur Spectromètre). La production d'ions avec le rapport $Q/A=1/3$ est physiquement possible dans les sources ECR pour les masses atomiques jusqu'à $A\sim 60$ environ. Au-delà, les intensités de faisceaux deviennent infinitésimales. Le cahier des charge initial prévoit que la source puisse produire 1 mA d'intensité d'ions jusqu'à la masse $A=40$ (⁴⁰Ar¹³⁺), ce qui est une intensité très importante. La source idéale pour SPIRAL2 serait une source d'ions de nouvelle génération fonctionnant à 28 GHz. Cependant, le budget disponible n'a pas permis de choisir cette option. Devant le besoin de consolider la production des faisceaux d'ions intenses dès 2009, et devant les résultats de R&D décevants d'A-PHOENIX, le LPSC a proposé de mettre à disposition du projet la source existante

PHOENIX¹, améliorée pour l'occasion, nommée PHOENIX V2 et fonctionnant à 18 GHz. La structure magnétique a été modifiée pour améliorer la stabilité du plasma (augmentation du gradient de champ magnétique axial), augmenter le confinement magnétique du plasma (hexapole radial renforcé de 1,2 à 1,35T). Cette source a permis de qualifier complètement la ligne basse énergie installée au LPSC de 2009 à 2012 (avec la participation de l'IPNL). PHOENIX V2 a démontré des performances en production d'ions meilleures de ~50% par rapport à sa version précédente (1.3 mA d'O⁶⁺, à comparer à 0.85 mA). Cette source est la seule au monde à tenir 60 kV en opération sans recourir à une plateforme haute-tension. C'est-à-dire que seul l'hexapole en aimant permanent et la chambre à plasma de la source sont à la haute tension. Il faut préciser qu'il a fallu plusieurs années de R&D pour tenir effectivement 60 kV en routine. Un isolateur haute-tension utilisant du quartz usiné a été conçu pour faire passer la HF de 0 à 60 kV. Cet équipement a été développé pour pallier la rupture d'approvisionnement des feuilles de téflon traditionnellement utilisées pour réaliser ce système.



Figure 1: Source PHOENIX V2 opérationnelle sur la ligne basse énergie de SPIRAL2 (07.2015)

Une campagne de mesure de production d'ions métallique s'est déroulée de 2010 à 2013 avec la source PHOENIX V2 équipée du four Large Capacity Oven (LCO) du GANIL en collaboration avec le GANIL et l'IPNL. Ce four compact ($\varnothing 11$ mm) est équipé d'un creuset cylindrique en alumine chauffé par une résistance bobinée en tungstène. Un écran thermique est situé autour de l'ensemble pour minimiser la puissance de chauffage nécessaire. L'élément métallique placé dans le creuset s'évapore et forme un flux d'ions dont la valeur dépend fortement de la température. Les tests ont démontré la capacité de la source à produire 1 μ A (μ A particule) d'ions Q/A=1/3 avec le nickel, le calcium, le soufre; intensités saluées par la direction du GANIL car permettant de faire des expériences d'intérêt pendant les premières années d'exploitation de la salle S3. La source PHOENIX V2 est maintenant installée dans le tunnel de SPIRAL2 (Figure 1) et fournit les faisceaux nécessaires au commissioning du quadripôle radio fréquence (RFQ). Ses intensités crêtes sont 1,3 mA d'¹⁶O⁶⁺, 3 mA d'⁴He²⁺, 50 μ A d'⁴⁰Ar¹⁴⁺, 205 μ A d'⁴⁰Ar¹²⁺, 20 μ A de ⁵⁶Ni¹⁹⁺, 16 μ A de ⁴⁰Ca¹⁶⁺, 40 μ A de ⁴⁰Ca¹⁴⁺, 55 μ A de ³⁶S¹²⁺, ce qui la classe comme une source 18 GHz performante. Les faisceaux d'⁴He²⁺ sont utilisés pour imiter le transport des deutons dans le RFQ (deutons normalement produits par la source d'ions léger) afin d'éviter tout risque d'activation pendant la phase de commissioning.

¹ Source développée initialement pour étudier la production des faisceaux d'ions plomb du LHC qui a donné 600 μ A de Pb²⁵⁺ et 300 μ A de Pb²⁷⁺.

R&D PHOENIX V3

De 2011 à 2014, le contrat européen CRISP, dédié aux infrastructures de recherche européennes, a apporté au GANIL un budget de 270 k€ pour financer une amélioration de la source d'ions PHOENIX V2. Le projet PHOENIX V3 a alors été initié par le LPSC qui assurait la responsabilité d'un lot de tâche. Cette R&D a pour objectif d'améliorer significativement les performances en intensités d'ions $Q/A=1/3$ en utilisant le retour d'expérience. La structure magnétique axiale existante de la source V2 est conservée afin de rendre les équipements auxiliaires de V2 avec V3 compatibles (alimentations de forte puissance générant le champ magnétique, émetteur HF, etc). La première idée directrice a consisté à augmenter la surface de la résonance ECR (+66%) en augmentant significativement le diamètre de la chambre à plasma (\varnothing 62 à 89 mm) tout en conservant l'intensité du champ magnétique hexapolaire. L'utilisation (optionnelle) de lamelles en fer doux judicieusement placées dans l'hexapole permet de tester l'effet sur le plasma de deux valeurs de champ magnétique radial 1,18T et 1,25T. Cette technique est issue du savoir-faire acquis avec A-PHOENIX. La *figure 2* montre l'évolution de la conception entre les versions 2 et 3 de PHOENIX.

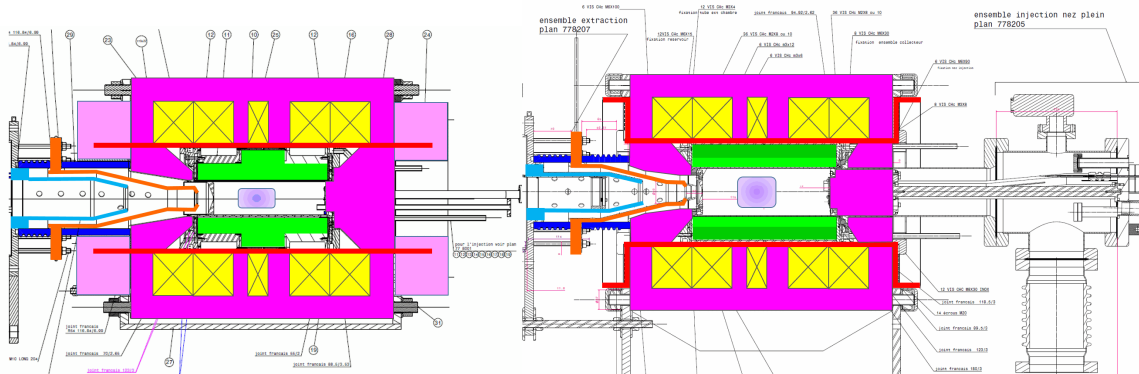


Figure 2: vue en coupe de PHOENIX V2 (gauche) et V3 (droite). Les bobines de confinement sont en jaune. La culasse magnétique en violet, l'isolant 60 kV en rouge, l'hexapole en vert. La zone ECR en mauve, Les électrodes 30kV et 0 kV respectivement en orange et bleu. Noter le caisson ultravide à l'arrière de V3 qui permet de baisser la pression dans la source.

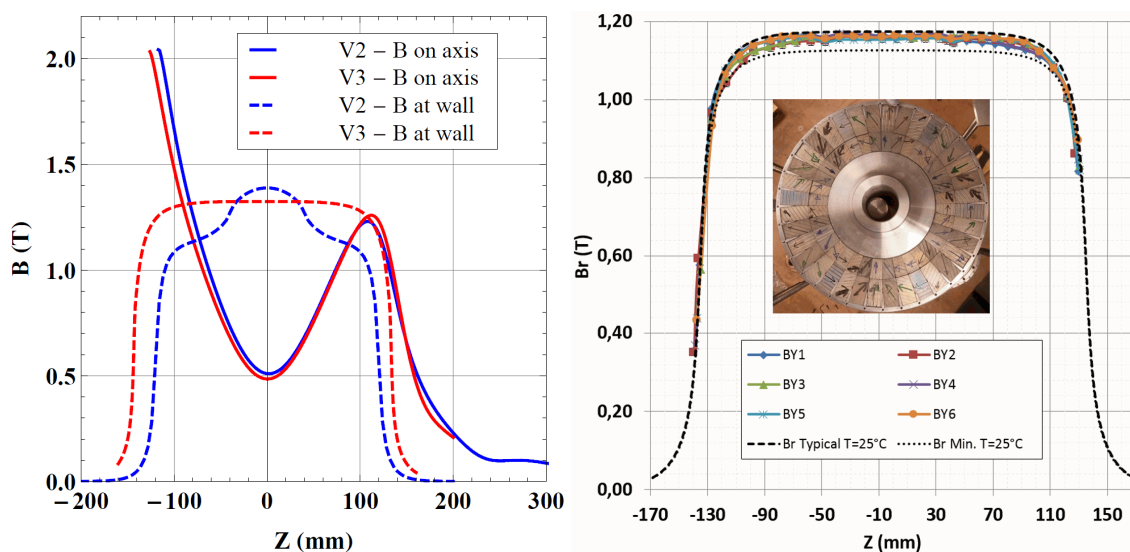


Figure 3: Gauche: profil magnétique sur l'axe et à la paroi des sources V2 et V3 (avec insert en fer). Droite, mesure expérimentale du champ magnétique hexapolaire (sans insert en fer) et photo de l'hexapole monté.

La [figure 3](#) gauche présente la mesure expérimentale du champ magnétique hexapolaire conforme aux simulations, la [figure 3](#) droite montre une comparaison des profils magnétiques dans les sources PHOENIX V2 et V3. Le deuxième axe d'amélioration est de réduire la pression résiduelle de neutres dans le plasma. En effet, ce sont les collisions entre les ions et les atomes (échange de charge) qui limitent la population d'ions de haut état de charge dans les plasmas ECR. PHOENIX V3 est ainsi équipée d'un système de pompage actif de la chambre à plasma localisé à l'arrière de la source en technologie ultra-vide. Le troisième axe de développement est de pouvoir accueillir des fours de production de vapeurs métalliques de nouvelle génération de $\varnothing 20$ mm (ce point est développé plus loin). La conception mécanique s'est achevée en 2014, le montage mécanique en mai 2015, et le premier plasma de la source d'ions a été obtenu le 8 mai 2016 sur un banc de test du LPSC, totalement rénové pour l'occasion. Les objectifs visés de PHOENIX V3 sont d'augmenter de 50 à 100% les intensités de $Q/A=1/3$ par rapport à la V2. Enfin, la source peut aussi être chauffée avec 2 fréquences 14+18 GHz, technique connue pour améliorer les performances. Le commissioning de la source s'étendra pendant environ 18 mois et son transfert vers SPIRAL2 pour remplacer la V2 est prévu en 2018, pendant une période d'arrêt machine à préciser.

Perspectives

Des études de physique communes LPSC/GANIL vont débiter sur la période 2016-2019 avec un travail de thèse dédié à la modélisation et la simulation du plasma ECR appliqué à l'étude de la production de faisceaux d'ions métalliques (développement d'un code particle in cell - à collision Monte-Carlo). L'acronyme de ce nouveau projet est METIS (**M**etal **E**vapora**T**ion **I**on **S**ource). Actuellement, le rendement de production d'ions métalliques à partir de vapeurs est de l'ordre de 10% (un ion pour 10 atomes injectés). 90% des atomes émis par le four passent à travers le plasma sans être ionisés et finissent leur vie collés sur la paroi refroidie de la chambre à plasma. Pendant cette thèse, un cylindre chauffant thermo-régulé sera conçu spécialement pour PHOENIX V3 dans le but d'étudier la ré-évaporation contrôlée des vapeurs métalliques. Un gain d'efficacité de 2 à 6 est espéré avec ce système. Les résultats expérimentaux seront comparés aux simulations. Ce travail ouvre de nombreuses perspectives aussi bien en termes de compréhension de la physique du plasma ECR, qu'en terme d'intensité ou coût de production d'un faisceau d'ions isotopique (par exemple 1 g de ^{48}Ca coûte environ 100 k€, consommé en quelques semaines). Les informations sur le budget et les ressources sont résumées dans la table 1.

A plus long terme, la phase 1++ du projet SPIRAL2 prévoit d'ajouter un injecteur complet avec un rapport $Q/A=1/7$ en amont de l'accélérateur linéaire (LINAC), ceci afin d'étendre à toute la table de Mendeleïev la capacité de production de faisceaux d'ions au-dessus de la barrière coulombienne. En effet, la création d'ions $Q/A=1/7$ est bien plus favorable dans les sources ECR que celle des ions $1/3$. C'est ce type de Q/A qui est utilisé dans la plupart des accélérateurs d'ions lourds dans le monde. Ce projet offre l'opportunité de développer, avec un vrai budget dédié, une source d'ions de très hautes performances totalement supraconductrice en Europe. Fonctionnant à la fréquence de 28 GHz cette source d'ions pourrait atteindre des intensités de faisceaux bien plus élevées qu'avec les sources classiques PHOENIX V2 et PHOENIX V3. Une synergie possible existe avec le projet FAIR en Allemagne où le besoin en source d'ions est assez proche. Un tel projet serait collaboratif et inclurait: le LPSC pour son expertise en développement de sources d'ions, le GANIL comme utilisateur final et spécialiste de la production d'ions métalliques, le SACM du CEA IRFU en tant que spécialiste dans la conception d'aimants supraconducteurs pour les accélérateurs et l'IPNL désireux de s'impliquer. Ce projet à plusieurs M€ bénéficierait d'une excellente visibilité internationale et permettrait au GANIL d'offrir à ses utilisateurs des intensités de faisceaux d'ions lourds au meilleur niveau mondial de

l'hélium jusqu'à l'uranium. Les estimations prévisionnelles sur le budget et les ressources sont résumées dans la [table 1](#). La [table 2](#) synthétise les données de la [table 1](#) en évaluant les ressources globales par période, par laboratoire et par projet.

Ressources et moyens

Les ressources mises en jeu ainsi que les budgets sont résumés dans la table 1. La ressource totale utilisée de 2005 à 2016 sur l'activité R&D SPIRAL2 est de ~11.5 H.AN comme IR/IE publiant, et ~12 H.AN comme ITA de soutien. L'activité de R&D sur les sources d'ions lourds stables au LPSC est actuellement portée par T. Thuillier (IR) et J. Jacob(AI).

Publications

Les activités de publication et de communication de 2004 à 2016 ont débouché sur 11 papiers dans des revues à comité de lecture, 9 présentations orales et 8 posters en conférence et workshop. Les références sont proposées en annexe.

Table 1 : budget et ressources pour les projets en cours et futurs R&D Source d'ions lourds SPIRAL2

projet	période	Budget global	Ressource totale	Fonction/grade	Labo.	nom
R&D A-PHOENIX	2005-2009	Reliquats contrats : 343 k€ SPIRAL2: 75k€ Eurons: 75k€ Eurisol: 35 k€ Total= 528 k€	3 H.AN 3 H.AN 3 H.AN 1 H.AN 1 H.AN 0.5 H.AN	IR publiant AI source AI source AI mécanique atelier mécanique IE électronique	LPSC LPSC LPSC LPSC LPSC LPSC	T. Thuillier P. Sole J.L. Vieux-Rochaz C. Fourel A. Patti
R&D PHOENIX V2	2009-2013	<30 k€ SPIRAL2	2.2 H.AN 1.6 H.AN 1 H.AN 1 H.AN	IR publiant IR publiant AI/IE/IR publiant AI	LPSC IPNL GANIL LPSC	T. Thuillier C. Peucelle P. Sole
R&D PHOENIX V3	2011-2016	270 k€ CRISP + 10 k€ SPIRAL2	3 H.AN 0.1 H.AN 0.6 H.AN 1.5 H.AN 0.4 H.AN	IR publiant IR publiant IE mécanique AI IR publiant	LPSC IPNL LPSC LPSC GANIL	T. Thuillier C. Peucelle C. Fourel J. Jacob L. Maunoury
Estimation R&D METIS	2016-2019	60 k€ IN2P3 60 k€ GANIL	3 H.AN 0.5 H.AN 0.5 H.AN	Doctorant IR publiant IR publiant	LPSC/GANIL LPSC GANIL	A. Leduc T. Thuillier L. Maunoury
Estimation Source SP2 phase 1++	2017~2023	>1,5 M€ SPIRAL2 ?	3.5 H.AN 1.5 H.AN 2.5 H.AN 1.5 H.AN 2 H.AN 1 H.AN 2 H.AN non discuté	IR coordination/expertise AI/IE électronique Post doc aimant supra IE mécanique source T/AI/IE montage + tests Atelier mécanique IR publiant IR suivi et tests	LPSC LPSC CEA LPSC LPSC LPSC IPNL GANIL	CDD CDD

Table 2 : Synthèse des ressources IN2P3 impliquées dans la R&D source SPIRAL2 de 2009 à 2016 et estimée de 2016 à 2023

Total ressource 2005-2009		LPSC		
IR/IE publiant		3 H.AN		
Soutien ITA		8.5 H.AN		
Total ressource 2009-2016		LPSC	GANIL	IPNL
IR/IE publiant		5.2 H.AN	1.4 H.AN	1.7 H.AN
Soutien ITA		3.1 H.AN	--	--
Estimation ressource 2016-2023		LPSC	GANIL	IPNL
IR/IE/IE publiant		5.5 H.AN	~2 H.AN	2 H.AN
Soutien ITA		6 H.AN		

1.3 Développement de faisceaux métalliques

Au GANIL, mais également dans tous les grands complexes accélérateurs d'ions lourds dans le monde, les demandes de production de faisceau d'ions métalliques sont en hausse. Les besoins exprimés en intensité d'ions métalliques nécessaires pour mener à bien les expériences nécessitent de réaliser une R&D de pointe dans le domaine des fours métalliques. Le LPSC, expert en R&D source d'ions et le GANIL, expert en production de faisceaux d'ions métalliques, associent leurs compétences pour relever le défi.

Contexte

Les faisceaux d'ions lourds stables peuvent être produits par 4 sources d'ions ECR différentes au GANIL (Figure 4) :

- Deux sources ECR4 et ECR4M fonctionnent en alternance et délivrent leurs faisceaux aux cyclotrons C0, CSS1 et CSS2. Les faisceaux sont ensuite dirigés vers les salles d'expériences ou vers la cible du dispositif de production d'ions radioactifs SPIRAL1.
- La source ECR Nanogan III de SPIRAL1, principalement dédiée à l'ionisation d'atomes radioactifs, peut aussi délivrer des faisceaux d'ions stables qui sont post-accélérés à l'aide du cyclotron CIME.
- Une source GTS installée dans le Hall D, hors installation nucléaire de base, délivre des faisceaux d'ions multi-chargés de basse énergie aux utilisateurs du banc ARIBE

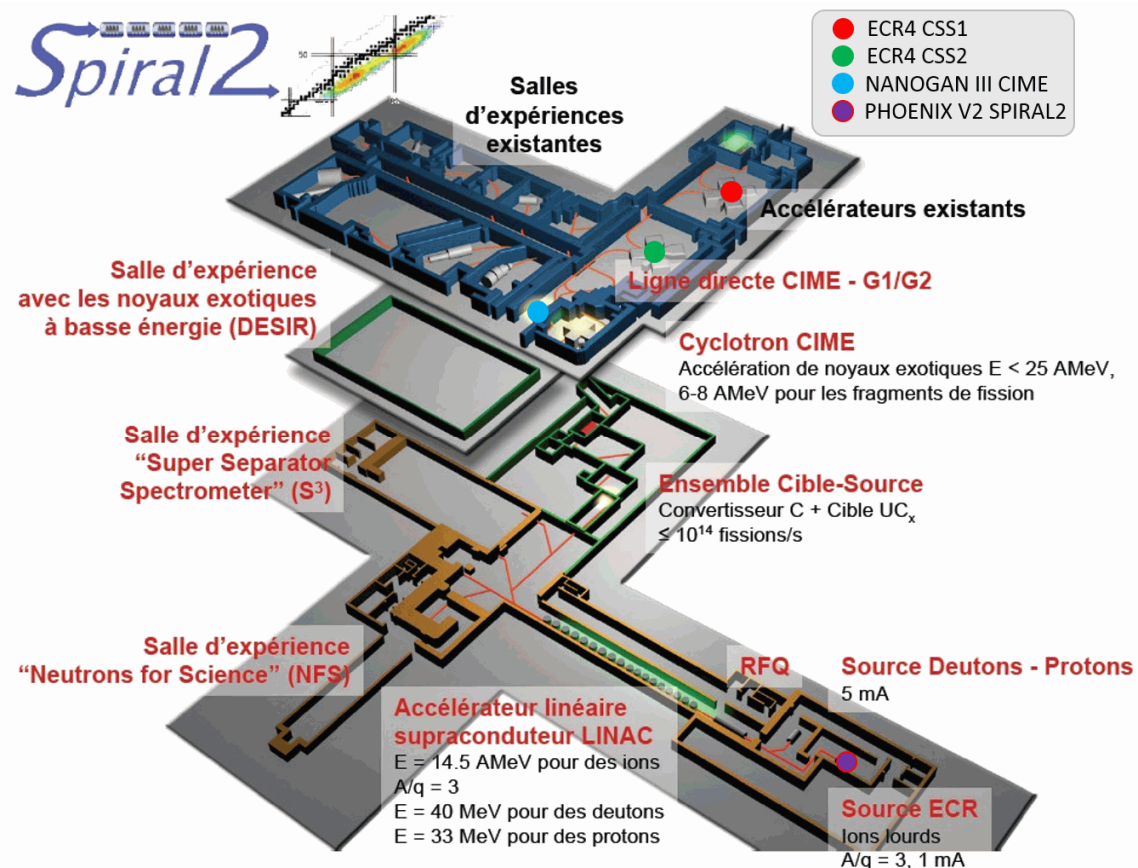


Figure 4. Vue d'ensemble du GANIL et localisation des sources d'ions lourds.

L'intérêt des utilisateurs pour l'installation du GANIL réside dans les performances des faisceaux délivrés et dans leur variété (figure 5) [1]. Le GANIL maintient ces atouts par un développement continu de nouveaux faisceaux et par une amélioration de leurs caractéristiques.

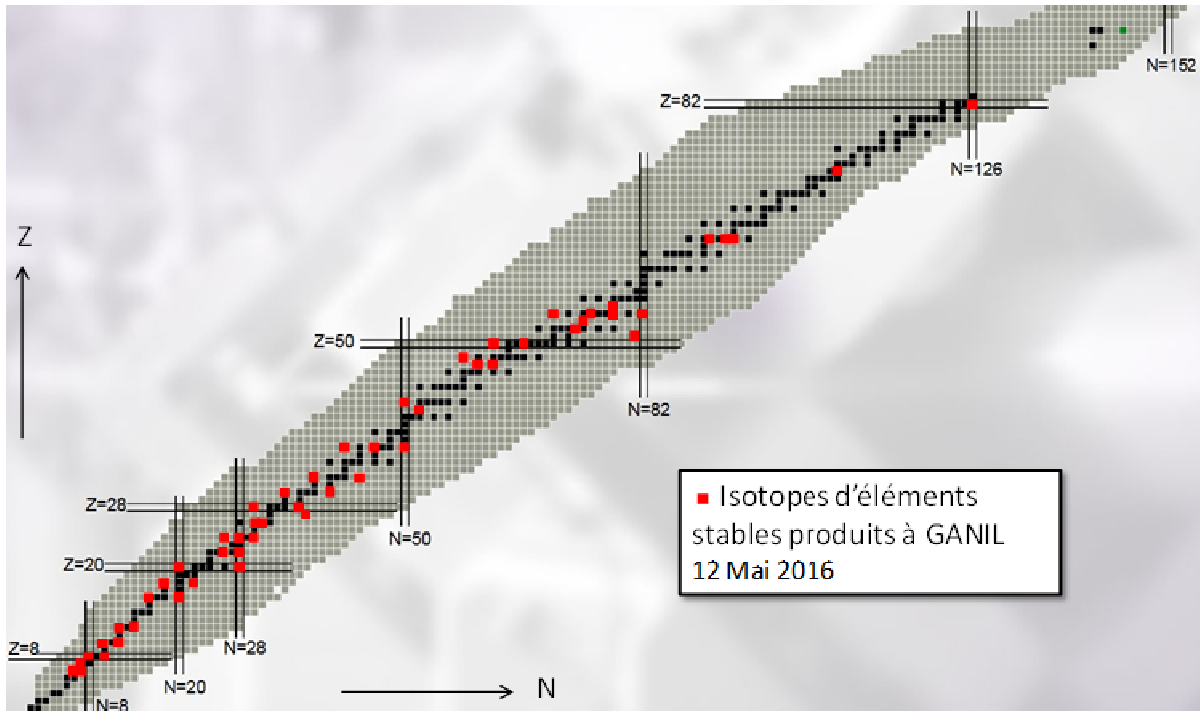


Figure 5 : Ions produits à GANIL à partir d'isotopes stables.

Les techniques mises en œuvre sont issues de développements locaux ou dérivées de techniques développées dans d'autres laboratoires. La production de faisceaux d'ions à partir d'éléments gazeux étant la plus simple, elle n'a pas subi d'évolution de principe notable depuis plusieurs années. Les techniques de production de faisceaux d'ions à partir d'éléments métalliques sont plus complexes. Elles consistent à injecter un flux d'atomes dans le plasma, mais le système de production du flux d'atomes fait appel à différentes techniques : four d'évaporation, sputtering (pulvérisation) à partir d'échantillons métalliques solides ou transport d'atomes sous forme vapeur par insertion dans une molécule organique (méthode Metal Ions from Volatile Organic Compounds). Voir les techniques utilisées en fonction des éléments sur la figure 6.

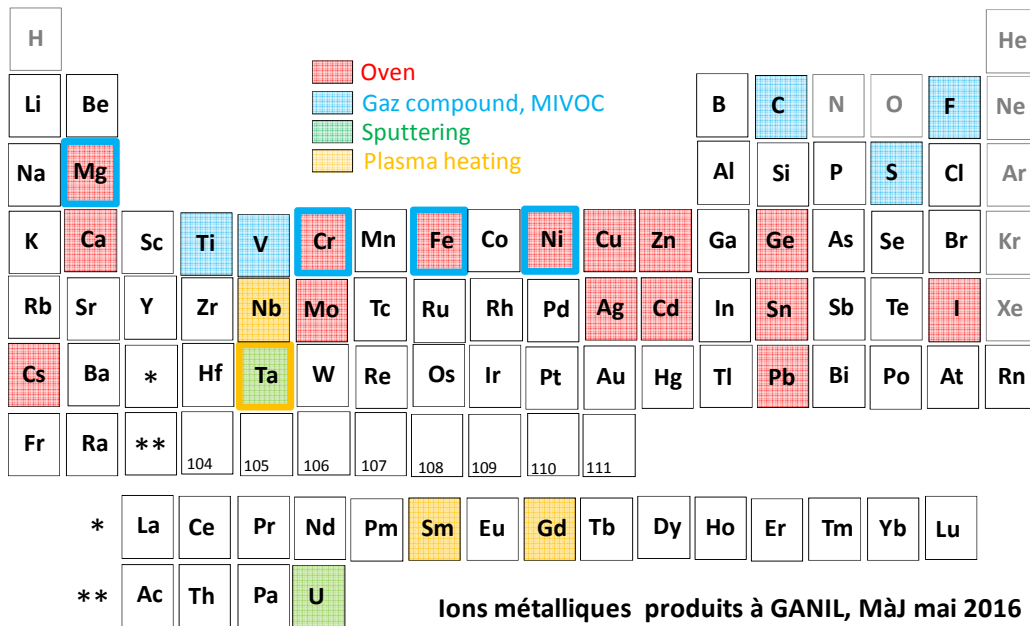


Figure 6 : Ions métalliques produits à GANIL et techniques d'injection mises en œuvre.

Ces techniques sont communes à de nombreuses installations. Elles sont l'objet d'évolutions régulières, adaptées à l'environnement technique existant dans chaque installation et à la demande des utilisateurs. Les performances qui en résultent sont très variées en termes d'intensité, d'énergie, de stabilité, d'émittance, de structure temporelle... Des évolutions sont régulièrement réalisées à GANIL pour améliorer ces performances. Associée aux instruments scientifiques disponibles, elles font de GANIL une installation unique.

R&D fours métalliques

Les faisceaux d'ions les plus difficiles à produire sont les faisceaux d'ions issus d'éléments métalliques à faible tension de vapeur. Plusieurs techniques sont envisageables mais chacune conditionne à sa façon les caractéristiques des faisceaux obtenus en termes de stabilité, d'état de charge, ou d'intensité. Aujourd'hui, plusieurs éléments réfractaires restent difficiles à produire avec simultanément une forte intensité et un fort état de charge comme dans le cas de l'uranium, demandé par le projet SPIRAL2 (voir figure 7).

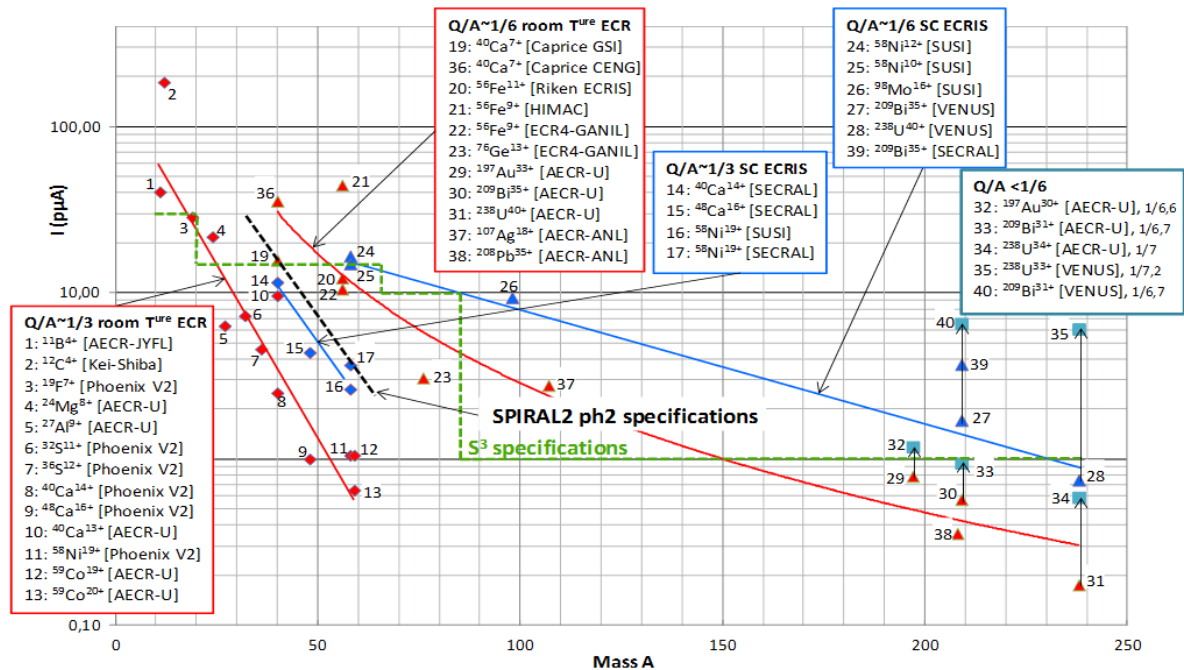


Figure 7 : Intensités (particule μA) mesurées dans les principaux laboratoires internationaux pour les ions $Q/A=1/3$ et $Q/A=1/6$ en sortie des sources d'ions ECR supra-conductrices et des sources d'ions ECR fonctionnant à température ambiante en fonction de la masse des ions (données compilées en 2014, non actualisées). Sont aussi présentées les spécifications en intensités pour le spectromètre S3 de SPIRAL2, représentées en pointillés verts. La ligne en pointillés noirs représente les intensités qui étaient attendues pour la phase 2 du projet SPIRAL2.

Les techniques de pulvérisation, d'évaporation et de composés organiques (métalloènes) sont toutes utilisées à GANIL. En 2016 et 2017, plusieurs tests de production de nouveaux faisceaux, de nouvelles techniques ou des techniques améliorées sont prévus. Des composés de Magnésocène et de Vanadocène (synthétisé par l'IPHC de Strasbourg) seront injectés dans une source ECR4. Une chambre destinée au recyclage des vapeurs de calcium (motivé par le coût élevé du ^{48}Ca) est en cours de montage sur la source ECR4.

Les tests de production d'ions métalliques au LPSC avec PHOENIX V2 équipé du four GANIL LCO ont donnés de bons résultats, mais ont aussi permis de mettre en évidence des limitations expérimentales qui ont été soigneusement analysées. Il est apparu que le contrôle de l'évaporation des ions à forte pression de vapeur comme le calcium (évaporation à 500°C) était impossible au-delà d'un chauffage HF du plasma excédant 500W, soit bien en deçà de l'optimum habituel pour fabriquer des ions $Q/A=1/3$ (> 1 kW). Au-delà de cette limite expérimentale, la puissance parasite induite par le plasma dépasse la puissance de chauffage nécessaire pour que le four atteigne 500°C (6W) : il s'ensuit une sur-évaporation de métal et une impossibilité de régler indépendamment le four et le plasma de la source d'ions. Une deuxième limitation est apparue avec l'ion nickel de très basse pression de vapeur (évaporation à 1500°C). Cette fois, les meilleurs résultats étaient obtenus à la température maximum du LCO et l'évolution du courant d'ions avec la température incitaient à vouloir monter cette dernière.

Afin d'améliorer les intensités d'ions métalliques, deux fours métalliques innovants sont en développement. Le premier au LPSC (contrat GANIL/LPSC), est un four dédié à l'évaporation des atomes à forte pression de vapeur (four "basse température" montant jusqu'à 650°C). L'objectif de ce développement est de rendre négligeable l'effet du chauffage parasite induit par le plasma sur la température d'équilibre du four). La conception est voisine d'un four développé dans ce but au LBNL. Ce four permettra d'étudier la production d'ions calcium à haute puissance HF injectée dans le plasma de PHOENIX V3. Ce nouveau four sera testé à la fin de l'année 2016. La [figure 8](#) montre une vue de la conception du four basse température.

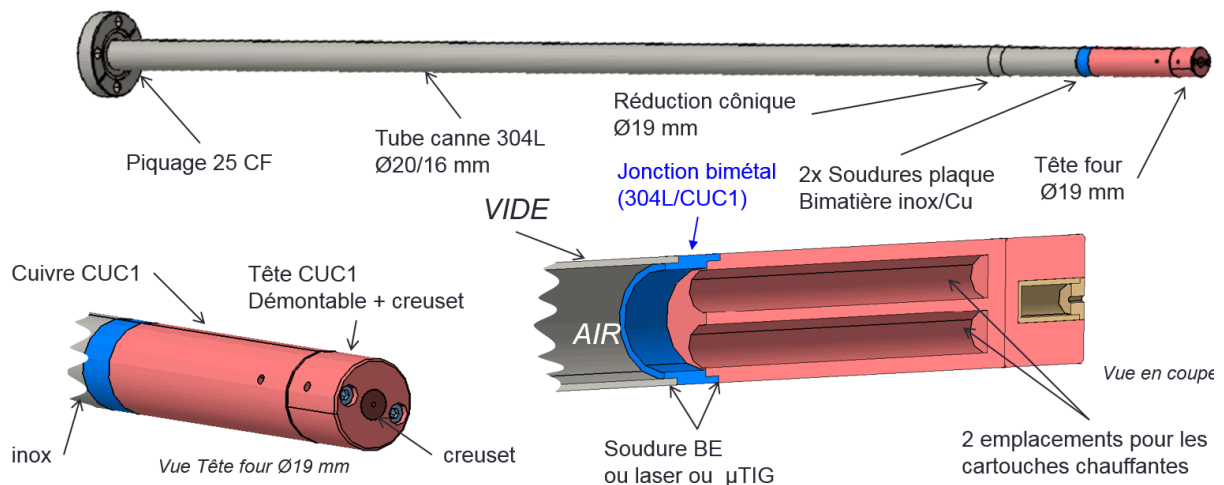


Figure 8: Conception détaillée du four "basse température" développé au LPSC pour PHOENIX V3.

Le deuxième développement de four à l'étude est dirigé par le GANIL. Il s'agit d'un four fonctionnant jusqu'à 2000°C (contre 1500° pour le LCO) applicable aux éléments réfractaires, ce qui permettra d'évaporer de plus grandes quantités de Nickel par exemple (limitation observée avec le LCO sur PHOENIXV2) ou de produire de l'uranium, faisceau difficile à maîtriser et d'un grand intérêt pour les expériences de physique nucléaire. Les premiers tests de ce four sont attendus en 2017.

Les installations en concurrence avec le GANIL apparaissent pour la plupart sur la [figure 7](#). Les deux critères de performances les plus souvent retenus pour comparer les installations de production de faisceaux d'ions sont l'intensité des faisceaux et l'état de charge des ions. Au cours des deux dernières décennies, plusieurs laboratoires se sont livrés à une compétition importante pour détenir

les records d'intensités qui sont souvent difficiles à maintenir dans les conditions d'une production continue. Cette compétition n'est pas toujours légitimée par l'objectif final de délivrance à des utilisateurs. A GANIL, les développements sont menés soit pour répondre à la demande des utilisateurs, soit proposés suite à l'identification de nouvelles possibilités techniques dont l'objectif est de mieux servir les utilisateurs. Comme le montrent les figures 6 et 7, les atouts du GANIL sont la variété des faisceaux offerts et, pour quelques faisceaux, leur intensité. Pour conserver ces atouts, le GANIL doit poursuivre l'effort de fourniture de nouveaux faisceaux, ou d'amélioration des faisceaux existants.

Ressources et budget

Les études, montages, tests et exploitation sont à la charge d'agents du GANIL. Seules les réalisations mécaniques sont sous-traitées auprès d'entreprises extérieures.

Aucune augmentation de l'effectif du groupe en charge de la fourniture des faisceaux d'ions stables n'est actuellement demandée, mais la mission prioritaire du GANIL étant la fourniture de faisceaux aux utilisateurs, les actions de R&D sont menées lorsque le planning de fourniture du faisceau et de maintenance le permet.

Ressources humaines : A GANIL, la production d'ions stables, la maintenance des équipements et le développement d'instruments est assuré par un groupe de 6 personnes à temps plein. Le GANIL collabore régulièrement avec le LPSC sur le développement de sources d'ions ECR, et ponctuellement sur le développement de faisceaux d'ions métalliques. Certains composés organiques sont synthétisés par l'IPHC/Strasbourg.

Ressources financières : Le budget de développement et d'exploitation accordé au GPI pour la production d'ions stables en 2016 est d'environ 50 k€. La fourniture des isotopes onéreux pour la production de faisceaux pour les utilisateurs est à la charge des utilisateurs.

Auto-analyse SWOT

Les Points forts du GANIL pour le développement de faisceaux sont :

- la variété des faisceaux proposés aux utilisateurs
- Mise en œuvre de toutes les techniques existantes pour produire des ions métalliques
- Capacité à faire évoluer les techniques existantes

Les Points faibles du GANIL pour le développement de faisceaux sont :

- Les Ressources humaines disponibles pour mener les actions de R&D

L'opportunité à venir est :

- la participation à la collaboration européenne ENSAR2/MIDAS-NS (dont le but est diffuser le savoir acquis entre laboratoires européens pour améliorer les performances des faisceaux délivrés par les sources ECR)

Références

La liste des références est disponible dans l'annexe 1 du document.

1.4 R&D source 60 GHz

Historique et évolution

La R&D 60 GHz est née dans le cadre du projet Beta Beams (EURISOL puis EURO-nu) pour lequel le LPSC a proposé d'utiliser une source s'ions ECR à plasma dense pour multi-ioniser avec la plus grande efficacité possible un flux continu d'atomes radioactifs (${}^6\text{He}$ ou ${}^{18}\text{Ne}$) en provenance d'une cible, et de les ré-extraire en régime pulsé afin de les injecter directement dans la chaîne d'accélérateurs du CERN avec la bonne structure temporelle.

Dans un premier temps, des études expérimentales ont été menées sur la source PHOENIX V2 (2005-2006) qui ont permis d'étudier un nouveau phénomène transitoire découvert au LPSC : le pulse de preglow [1] qui montre une extraction rapide d'ions multichargés dès le début du pulse HF (figure 9). Cette découverte a été accueillie avec intérêt dans la communauté et a amené d'autres publications communes avec les groupes de Jyväskylä [2] et de Nizhny Novgorod [3]. L'analyse du phénomène de preglow a été analysée comme la conséquence de la présence d'une population d'électrons super-adiabatiques extrêmement énergétique dans la source avant que le plasma ne s'allume. Ces électrons chauds interagissent peu avec les atomes et ions. Lorsque la densité du plasma augmente, la puissance HF est répartie sur un nombre grandissant d'électrons et l'énergie moyenne de la population d'électrons super-adiabatique décroît. Lorsque l'énergie moyenne des électrons coïncide avec les optima d'ionisation par impact électronique avec les atomes du plasma, le pic de preglow apparaît transitoirement. La distribution d'électron évolue ensuite vers un régime stationnaire.

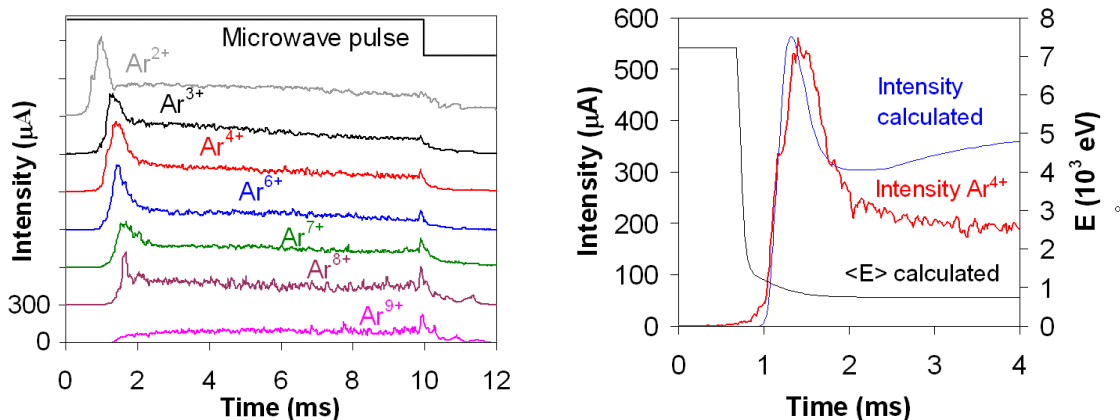


Figure 9 : Gauche Observation expérimentale du phénomène de preglow avec PHOENIX V2. Noter la présence du pic d'afterglow à la coupure de la HF. Droite simulation de la formation du pic de preglow en utilisant la transition de la distribution d'énergie des électrons du régime superadiabatique au régime normal.

Afin de répondre aux besoins de l'étude de conception du scénario Beta Beam, il était nécessaire de développer une source radio-résistante, munie d'un plasma dense capable d'ioniser avec une haute efficacité les gaz radioactifs et de les extraire rapidement sous forme de pulses. La fréquence ECR de 60 GHz a été choisie car elle permet d'atteindre des densités 4 fois plus importantes (soit $n \sim 4 \cdot 10^{13} / \text{cm}^3$) que les sources existantes à 28 GHz. La résonance ECR associée à 2,14 T implique des valeurs jusqu'à 6 T en confinement axial et 4 T en champ magnétique radial. Pour répondre à ce défi, nous avons choisi de générer le champ magnétique de la source avec la technologie des hélices développée au LNCMI (bobines massives en alliage de cuivre, refroidies à l'eau). Celles-ci permettent de produire des densités de courant très importantes (>400 A/mm²) et ajustable localement, de plus l'intérêt de leur utilisation réside dans leur radio-résistance intrinsèque. Un prototype de source

d'ions possédant une zone de résonance fermée à 60 GHz (soit 2,14 T) a ainsi été développé en collaboration avec le LNCMI. La structure magnétique choisie à symétrie de révolution établit un champ en forme de cusp (bobines en opposition). Le champ magnétique attendu est à 'minimum-B', son induction croît dans toutes les directions à partir du centre de la structure où le champ est nul. La [figure 10](#) montre la simulation thermique et magnétique (effectuée avec le code numérique GetDP) de 2 groupes de 2 hélices alimentés en opposition avec un courant de 30000A, on peut voir la zone de résonance à 60 GHz en bleu au centre de la structure. Il faut noter qu'à ce jour, cette source est la seule au monde à avoir une zone de résonance fermée à 2,14T n'interceptant pas les parois. Ce point est important pour garantir une population d'électrons chauds garantissant une multi-ionisation du plasma. La [figure 11](#) représente une vue en coupe du prototype réalisé, et la [figure 12](#), celui-ci installé dans la salle M3 du LNCMI pour la mesure du champ magnétique.

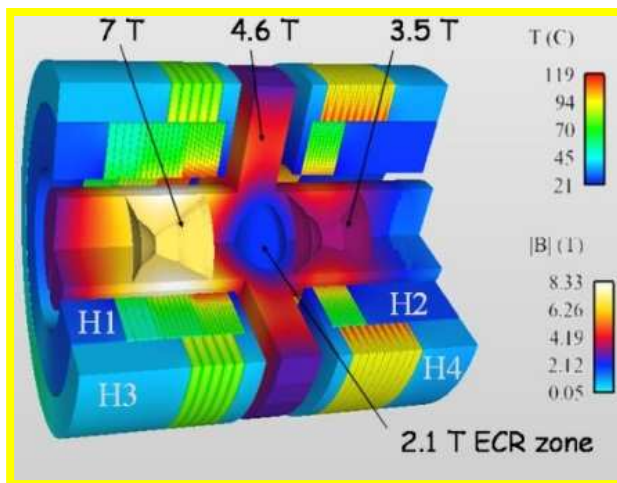


Figure 10 : Simulation du champ magnétique et de la température de 4 hélices alimentées avec un courant de 30000 A

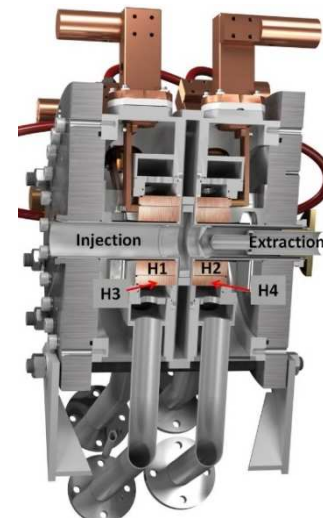


Figure 11 : Vue en coupe du prototype Cusp 60 GHz

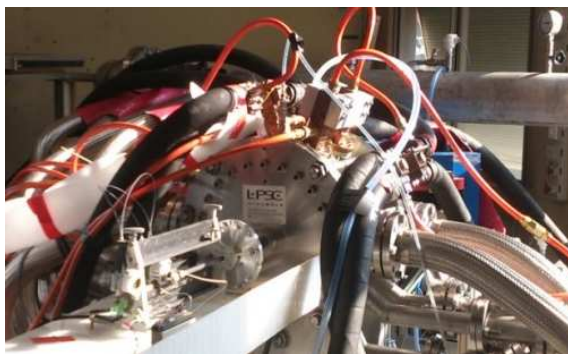


Figure 12 : Mesure du champ magnétique du prototype au LNCMI

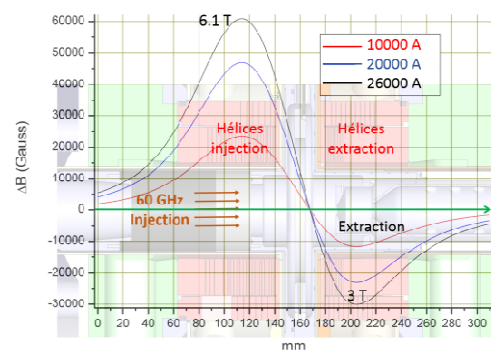


Figure 13 : Mesure du champ magnétique

Nous avons constaté expérimentalement qu'au-dessus d'une intensité électrique de 21000 A parcourant les hélices, une induction magnétique de 2.14T était établie sur une surface n'interceptant pas les parois matérielles de la source. Afin d'obtenir des latitudes de réglages, l'induction magnétique a été mesurée avec succès jusqu'à une intensité de 26000 A. Pour la technologie des hélices, il s'agit d'un record, la densité de courant étant la plus haute jamais atteinte dans le cuivre (520 A/mm^2). La [figure 13](#) montre l'induction axiale mesurée sur l'axe du prototype, superposée à une vue en coupe de la source. Suite à sa qualification magnétique nous avons pu effectuer les premières expériences de production de faisceaux d'ions. Le plasma est créé grâce à un

gyrotron 60 GHz qui a été spécialement développé par l'IAP-RAS et la société Gycom, dans le cadre d'un contrat ISTC cofinancé par le CNRS et l'union européenne. Il peut délivrer jusqu'à 300 kW de puissance en mode pulsé (jusqu'à 5 Hz), la durée des pulses pouvant être réglée de 50 μ s à 10 ms. Les ondes électromagnétiques sont délivrées en mode quasi optique et sont focalisées au centre de la source. Le faisceau d'ions est extrait à travers un trou d'1mm de diamètre dans l'électrode plasma et est accéléré par une différence de potentiel pouvant atteindre 25 kV. Il est ensuite mesuré dans une coupelle de Faraday située en aval d'un spectromètre magnétique permettant la sélection des faisceaux d'une charge et masse données. La [figure 14](#) (gauche) montre un spectre d'ions oxygène en fonction du temps, le point remarquable est la présence d'ions multichargés jusqu'à la charge 5+ indiquant un confinement du plasma pendant le pulse HF. Sur la [figure 14](#) (droite) est représenté le pulse d'ions O^{3+} pour différentes tensions d'extraction.

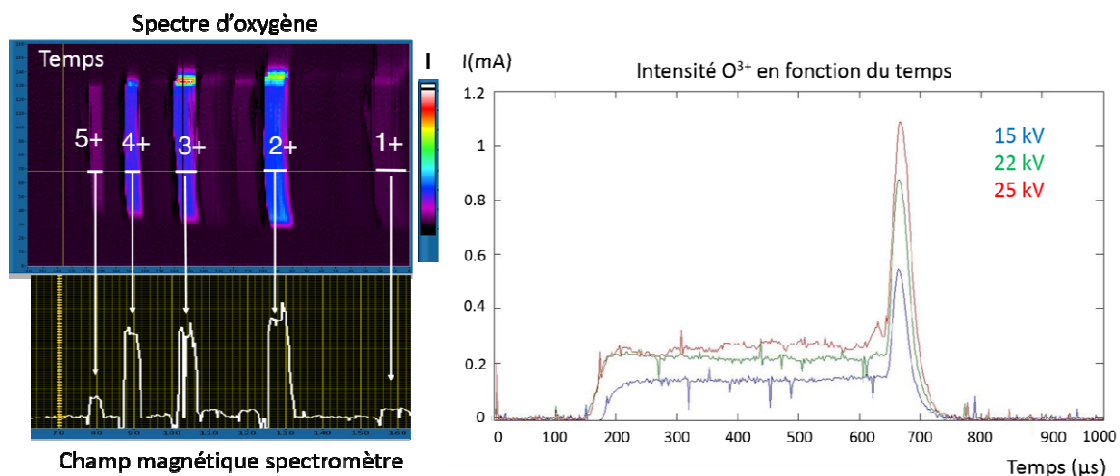


Figure 14: Spectre des ions oxygène et intensité de l' O^{3+} en fonction du temps

On remarque la présence d'un pic d'afterglow suite à la coupure de la puissance HF, ce qui témoigne à nouveau d'un bon confinement du plasma. Enfin la densité d'ions mesurée dans le faisceau d'ions analysé (O^{3+}) atteint 140 mA/cm² (1.1 mA). Les valeurs de la densité du faisceau global extrait de la source dépassent 1 A/cm², ce qui représente plus d'un ordre de grandeur au-dessus des valeurs expérimentales mesurées sur les sources d'ions multichargés de hautes performances. Ces résultats ont été présentés en 2015, lors d'un talk invité à la conférence internationale « Heavy Ion Accelerator Technology »[4].

Le projet et au sens large, la thématique scientifique dont il relève, a fait l'objet de plusieurs demandes budgétaires qui sont répertoriées ci-dessous :

2005 : PICS "Creation of prototype of multi-charged ion source based on ECR discharge sustained by powerful gyrotron radiation with high-current beam and pulse frequency repetition up to 1Hz", porteurs LPSC (T. Lamy et IAP-RAS (V. Zorin), financé sur 3 ans

2006 : ANR blanche « Source d'ions à plasma ECR hyper dense confiné magnétiquement par des bobines de Bitter », porteur LPSC (T. Lamy), non financé

2009 : ISTC project 3695, « Design, manufacturing and tests of short pulse ECR Multi-Charged Ion Source Prototype with High Ionization Efficiency », porteurs IAP-RAS (V. Zorin) et LPSC (T. Lamy), finance à hauteur de 716 k€, ce projet nous a permis, entre autres d'acquérir le gyrotron 60 GHz.

2010 : Equipex CePiT « Centre de plasma denses, de faisceaux d'ions intenses, d'ondes THz intenses », porteur LNCMI (F. Debray), co-porteur LPSC (T. Lamy), non financé

2011 : Equipex COLOSSECRIS « COnnecting LOcal Superpower Systems for Electron Cyclotron Resonance Intense Ion Source », porteur LPSC (T. Lamy), non financé

2014 : Appel conjoint COMUE Université Grenoble Alpes-CNRS, AGIR Programme Exploratoire Premier soutien, porteur LPSC (T. Lamy), « BION60 – Bouteille magnétique créée par des polyhélices pour une source d'ions 60 GHz », financé à hauteur de 38 k€.

2015 : Appel Emergence et partenariats stratégiques de l'université Grenoble Alpes, « Physics toward the 4th ECR ion source generation », porteurs LPSC (T. Lamy) – JYFL (H. Koivisto). Financement d'une demi bourse de thèse (cotutelle avec l'université de Jyväskylä) et à hauteur de 10 k€/an pendant 3 ans pour des visites de collaborateurs de JYFL et de l'IAP-RAS au LPSC et au LNCMI.

Le projet a été évalué par le **conseil scientifique du LPSC en novembre 2012** (avant l'obtention d'un premier plasma à 60 GHz) lors de l'évaluation des activités du pôle accélérateurs et sources d'ions, la conclusion a été la suivante :

« Le Conseil a été fortement impressionné par le travail de R&D sur les sources à 60GHz, de par l'ampleur des techniques mises en jeu, et par l'ouverture scientifique que cela signifie. La demande de thèse en cotutelle avec le LNCMI en est un exemple ».

Perspectives à moyen terme

La source 60 GHz existante offre des perspectives d'étude de physique d'un grand intérêt pour la communauté scientifique. Pour une fréquence ECR donnée, des instabilités plasmas limitant l'absorption de puissance sont identifiées, de même que lors de l'augmentation de la fréquence, on constate une augmentation des pertes d'énergie électronique par bremsstrahlung. Les questions scientifiques adressées sont les suivantes : les lois d'échelle ont-elles des limites et quelles sont-elles ? Quelle est la loi d'évolution de la densité électronique en fonction de la fréquence de chauffage et du champ magnétique de confinement ? L'augmentation de la fréquence ECR pour produire des plasmas denses et confinés est-elle la méthode la plus efficace pour produire des faisceaux d'ions intenses de charge très élevée ? Comment se passe la transition entre le régime de confinement du plasma de type Paschukov (basse pression, ions non collisionnels) au régime « gasdynamic » (haute pression, ions collisionnels) ? Ces questions seront évaluées par des expériences dans le cadre de la collaboration avec l'IAP RAS et le JYFL.

Dans les deux années qui viennent, il est projeté de modifier le prototype de la source d'ions. Il s'agit de pouvoir faire varier la distance entre les deux groupes d'hélices situés respectivement à l'injection et à l'extraction de la source, ceci permettra à la fois de faire varier la longueur du cusp pour tester le régime plasma en dynamique des gaz, puis par la suite, par inversion du courant dans l'un des deux groupes, de modifier la topologie magnétique pour passer du mode cusp au mode bouteille magnétique. La conception des modifications du prototype ont commencé, leur réalisation est financée par AGIR PEPS. Il reste à concevoir une nouvelle chambre à plasma pouvant s'adapter à la modification de la nouvelle mécanique de source. Dans le même temps, nous avons installé deux contacteurs au LNCMI afin de pouvoir régler séparément le champ magnétique à l'injection et à l'extraction de la source. Une fois le prototype modifié il sera nécessaire de faire quelques campagnes expérimentales, au plus tard en 2017. Il est envisagé de caractériser l'émission X du

plasma, celle des ondes électromagnétiques qu'il réémet en régime instable et la spectroscopie de la lumière qu'il émet. Les besoins en ressources humaines de la part des services techniques du laboratoire, pour cette étape du projet, sont assez limitées, la réalisation des pièces nécessaires étant soit sous-traitées soit effectuées à l'atelier du LPSC si leur planning leur permet.

Perspectives à long terme

Le potentiel de R&D sur les sources ECR à 60 GHz est extrêmement important. En effet, actuellement dans le monde, les équipes hésitent à franchir le pas pour développer des sources d'ions supraconductrices fonctionnant de 37 à 60 GHz. En effet, celles-ci nécessitent de superposer un champ magnétique radial hexapolaire utile de 4T avec un champ axial allant jusqu'à 7 T. Les contraintes mécaniques subies par les supraconducteurs sont au-delà de la limite acceptable pour la technologie NbTi et nécessitent vraisemblablement l'utilisation de câble Nb₃Sn. La technologie du Nb₃Sn est délicate et relève actuellement de la recherche et développement (nécessité de chauffer chaque bobine à 650°C pour fabriquer le matériau supraconducteur, qui devient alors extrêmement cassant), il n'existe pas d'expérience industrielle dans le domaine comme c'est le cas pour le NbTi. Le risque projet est important avec un coût pour la source supraconductrice en Nb₃Sn de 2 M€ environ (hors salaire) et un délai moyen de réalisation d'environ 5 ans. De plus le succès de la réalisation n'est pas garanti du fait des défis technologiques. Dans ce contexte, l'expérience 60 GHz installée au LNCMI offre une opportunité unique : le développement d'une source d'ions d'étude dédiée à la production continue de fortes intensités d'ions multichargés utilisant, pour la structure magnétique, la technologie des poly-hélices du LNCMI, est peu risqué. D'un coût raisonnable, l'aimant reviendrait à environ 500 k€ et serait conçu et développé en 2 ans environ et permettrait possiblement de faire des rétroactions sur la structure magnétique si cela s'avérait nécessaire. Ce projet permettrait d'étudier les sources d'ions du futur bien avant les autres laboratoires dans le monde. Une condition supplémentaire importante est l'aménagement d'une ligne basse énergie de haute performance, la ligne d'analyse actuelle n'étant pas prévue pour gérer des faisceaux d'intensité extrême. La difficulté principale actuelle est d'installer un accélérateur dans un laboratoire de champs magnétiques intenses, qui n'est pas prévu pour cela (protections contre les rayonnements X et hyperfréquence, haute tension, masse des éléments de la ligne de faisceau...). Un appel à projet à l'échelle européenne avec les laboratoires partenaire (LNCMI, JYFL, IAP RAS) est envisagé pour mener à bien cette étude.

Ressources et moyens

Les ressources humaines techniques nécessaires par le passé sont montrées dans le tableau 1. Les ressources humaines globales, comprenant les post docs et les ingénieurs de recherche publiants sont dans le tableau 2.

L'objectif actuel est de poursuivre le projet jusqu'à la phase décrite dans le paragraphe suivant 'perspectives à moyen terme', et ceci ne nécessite pas de ressources supplémentaires par rapport à l'équipe actuelle. Ensuite, il conviendra de définir avec les collaborateurs du LNCMI, de JYFL et de l'IAP-RAS dans quelle direction développer le projet et comment trouver le financement pour son évolution future (2 post-doctorants plus l'investissement nécessaire à la construction de l'installation soit environ 400 k€).

L'effectif permanent en IR publiants au LPSC est le suivant :

T. Lamy IRHC 0.2 FTE, T. Thuillier IR1 0.1 FTE. À partir d'octobre 2016, un doctorant débutera sa thèse en cotutelle UGA-JYFL, sa participation au projet du LPSC devrait être effective à partir de début

2018 ; à ce moment, T. Thuillier augmentera sa participation au projet à hauteur de 30-40%. Pour les phases expérimentales, l'équipe russe de l'IAP-RAS Nizhny Novgorod apporte le soutien de deux physiciens, l'équipe finlandaise de JYFL devrait aussi participer avec un physicien, ces visites sont financées par le programme Emergence de l'UGA (10 k€/an de 2016 à 2018).

Depuis 2 ans, l'IN2P3 finance le projet à hauteur d'environ 35 k€, ce qui permet de maintenir le projet mais ne permet pas d'investir sur une installation expérimentale optimisée pour le projet. Cet investissement devra être obtenu grâce à un projet ANR ou européen. Le budget AGIR PEPS disponible est de 30 k€.

Tableau 1: ressources humaines techniques

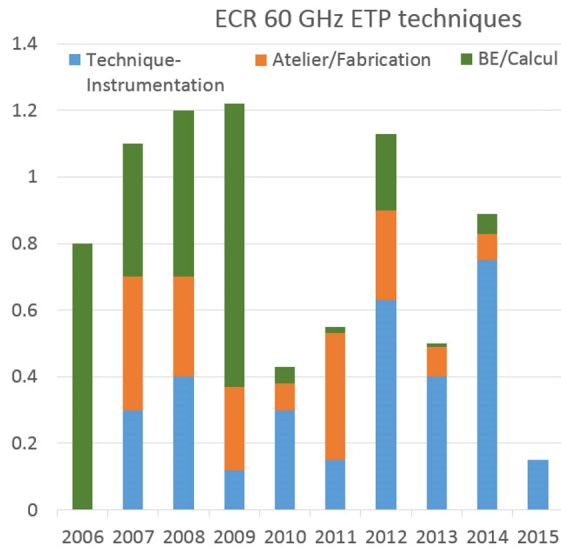
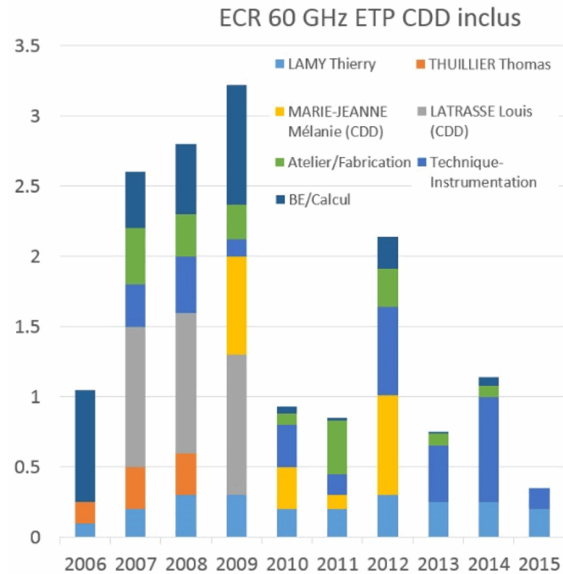


Tableau 2: Ressources humaines globales



Publications

L'activité de R&D source d'ions 60 GHz a débouché depuis 2007 sur la publication de 7 articles dans des revues à comité de lecture, 16 communications en conférence dont 12 à l'oral. La liste des publications est disponible dans l'annexe 1 du document.

2. R&D sur les ensembles cibles sources

2.1 Introduction

Il existe deux méthodes générales pour la production des faisceaux d'ions radioactifs : la fragmentation en vol et la séparation d'isotopes en ligne (ISOL). La fragmentation en vol utilise un faisceau primaire qui induit des réactions de fragmentation ou de fission en traversant une cible mince² ; les ions produits sont directement séparés en masse, charge et impédance (vitesse) et sont ensuite souvent utilisés pour des réactions secondaires dans une deuxième cible de réaction. La production des ions radioactifs dans les installations dites ISOL repose sur des procédures et techniques couplées : la production d'atomes radioactifs dans une cible, l'ionisation dans une source d'ions et la séparation en masse dans un séparateur en ligne. Après le séparateur, on retrouve généralement d'autres équipements (coolers, bunchers, charge breeders, etc) pour adapter les faisceaux radioactifs avant la détection ou une post-accélération.

Cette partie présente les activités de R&D pour les Ensemble Cibles et Sources d'ions (ECS) dans des installations ISOL en France. Les techniques de purification et de traitement des faisceaux radioactifs après l'ECS ne sont pas discutés ici, ni les R&D sur les ensembles de production et les installations utilisant la technique de fragmentation en vol. Pour plus d'information, les différentes techniques de production et leurs implantations dans des laboratoires en France et Europe sont discutées dans le rapport de NuPECC d'Avril 2000 « Radioactive Nuclear Beam Facilities »³

Alors que les sources d'ions sont intimement liées à l'histoire et l'évolution des accélérateurs de particules stables, les cibles et les sources d'ions radioactives sont également liées au développement des installations ISOL. Dans ces installations, les ECS sont l'un des maillons importants de la chaîne de production complète des faisceaux d'ions radioactifs secondaires. La première génération de sources d'ions radioactifs a été paradoxalement développée pour produire des ions stables dans les accélérateurs tels que les cyclotrons et les séparateurs de masse. Plus tard, elles ont été adaptées pour répondre aux besoins spécifiques de la production et de l'accélération des isotopes radioactifs, dont l'intensité est plusieurs ordres de grandeur moindre que leurs homologues stables et dont, par définition, leur durée de vie est limitée par leur désintégration radioactive.

L'étude des noyaux loin de la stabilité, qualifiés d'«exotiques», est constitutive de l'histoire de la physique nucléaire dès son origine. Elle permet d'accéder à des informations nouvelles sur la structure nucléaire et ainsi mesurer la solidité de notre conception de la matière nucléaire lorsque cette dernière est poussée dans des états «extrêmes».

2.2 Les enjeux scientifiques

La production des faisceaux radioactifs est le cœur de nos laboratoires de recherche nucléaires. C'est dans les ECS que sont produits, ionisés et extraits les faisceaux des isotopes qui sont nécessaires pour répondre aux demandes des chercheurs. Le champ d'application couvre la physique nucléaire, l'astrophysique, la physique atomique, la science des matériaux et les sciences de la vie.

Dépendant du type d'expérience et des outils de détection associés, les caractéristiques des faisceaux d'isotopes demandés varient en intensité et en pureté. Même si, ces dernières années, l'effort de développement a essentiellement porté sur le traitement des faisceaux après la première

² Une cible mince désigne une cible qui n'arrête pas le faisceau primaire. La notion de cible mince ou épaisse est relative et dépend de l'utilisateur.

³ http://www.nupecc.org/pub/radioactive_nuclear_beam_facilities_2000.pdf

séparation en masse, le besoin de continuer à améliorer les performances des ECS demeure primordial pour ces installations.

La production des isotopes radioactifs est le résultat de la réaction d'un faisceau primaire avec une cible. Les réactions nucléaires induites sont la spallation, la fragmentation ou la fission (directe ou induite par un flux de neutrons) dépendants de l'énergie, de la masse du faisceau primaire et de la matière de cible. Ces cibles doivent avoir une épaisseur dépassant largement la distance que parcourent les produits de réaction avant de s'arrêter. Elles sont couplées, via le tube de transfert, à une source d'ions de type ionisation de surface, laser ou plasma. Les cibles sont portées à des hautes températures afin que l'élément recherché soit sous forme gazeuse et puisse diffuser et effuser vers la source d'ions où il sera ionisé, avant d'être accéléré et envoyé vers un séparateur de masse et les salles d'expériences.

Optimiser un ECS est un travail pluridisciplinaire qui nécessite un fort investissement pour garantir la production de faisceaux intenses, purifiés et de plus en plus exotiques pour la recherche. Les isotopes radioactifs produits ont des demi-vies de l'ordre de quelques millisecondes. Pendant ce laps de temps, l'ECS doit permettre sa production, son ionisation et son extraction vers la salle d'expérience. Les ECS doivent être rapides, efficaces et sélectifs [1].

Afin de répondre aux nombreuses et diverses demandes de faisceaux de noyaux radioactifs, toutes les installations actuelles de type ISOL s'impliquent dans une R&D de ces composants. Le GANIL et l'IPN Orsay ont tous deux des équipes et des infrastructures dédiées pour les développements des installations en cours : ALTO et SPIRAL 1, mais aussi pour les installations futures, comme celles des projets européens SPIRAL 2-GANIL, SPES en Italie, HIE-ISOLDE au CERN ou EURISOL, ou internationales comme RIKEN, HIE-RIPS, TRIUMF. Dans ces projets de nouvelle génération, les ECS doivent pouvoir fonctionner pendant de longues périodes sous des conditions d'irradiation extrêmes.

Exigences pour un ECS

Une cible idéale doit donc : [2]

- Avoir une section efficace optimum pour la réaction recherchée avec le faisceau primaire accessible.
- Relâcher très rapidement les noyaux radioactifs produits ;
- Être capable de travailler pour un laps de temps suffisant à des températures élevées (plus de 2000 °C) et sous vide poussé sans dégradation de ses propriétés, afin d'accélérer les mécanismes de diffusion et d'effusion ;
- Doit présenter une émissivité et conductivité thermique élevée afin de dissiper la puissance générée par son interaction avec le faisceau primaire sans subir de dommages structurels ;
- Doit être hautement perméable à des espèces exotiques au cours de leur trajet vers la source d'ions. Ce comportement est strictement lié à la présence de porosité ouverte interconnectée, ce qui favorise le relâchement des espèces de la cible [3] [4].

Une source idéale doit donc :

- Avoir des composants résistants aux rayonnements ionisants et non ionisants.
- Fournir une efficacité d'ionisation maximale pour un élément donné ou un groupe d'éléments parmi une phase gazeuse constituée d'un cocktail d'éléments et molécules sortant de la cible avec plusieurs ordres de concentrations plus élevées que l'élément ou la molécule d'intérêt ;
- Être neutres vis-à-vis les réactions comme l'oxydation, la carburation causé par les éléments qui sortent de la cible.
- Assurer un temps de séjour minimal pour l'isotope d'intérêt dans la chambre d'ionisation, à savoir, de l'ordre de la milliseconde pour les isotopes les plus exotiques produits par la méthode ISOL.

- Fonctionner de manière stable dans le temps pour permettre la conduite des équipements de traitement de faisceau qui suivent.

Les couplages de différentes cibles et sources d'ions ne sont pas évidents. Les conditions de fonctionnement à haute température, sous vide et sous fort rayonnement demandent des connaissances poussées en physique des matériaux pour garantir une exploitation continue pendant des périodes allant de quelques jours à quelques semaines, voire des mois. La défaillance d'un ECS pendant un cycle de fonctionnement peut être la cause de plusieurs jours d'arrêts d'une installation, le temps de résoudre les problèmes dans un environnement hautement radioactif.

2.3 Etat de l'art des cibles des ECS

Cibles d'UCx

Le carbure d'uranium est le matériau de cible de référence de la plupart des installations ISOL à travers le monde. C'est la cible phare des installations futures comme SPIRAL 2 phase 2, SPES en Italie, TRIUMF au Canada et HIE-ISOLDE au CERN. Certains des carbures métalliques utilisés pour les cibles sont parmi les céramiques les plus réfractaires connues. La température de fonctionnement de la cible n'est plus alors limitée par la pression de vapeur du matériau de la cible, mais plutôt par l'évolution des propriétés de la matière dans le temps. Ce vieillissement concerne la cible ou la mécanique du container cible et les autres matériaux adjacents. Le type le plus commun de carbure d'uranium produit, testé et utilisé dans les installations de type ISOL peut être désigné comme UCx, indiquant qu'il est composé de dicarbure d'uranium (UC₂), du graphite (C), et une quantité mineure de monocarbure d'uranium (UC). [2] [3] [4] [5]. Ces dernières années beaucoup de progrès ont été réalisés sur les structures des cibles UCx ce qui a permis d'atteindre des efficacités améliorées et de produire des nouveaux isotopes. Mais il reste encore un travail d'adaptation dans chaque projet pour garantir le bon fonctionnement des ECS pendant les temps d'irradiations spécifiés. Cette R&D concerne non seulement la construction de la cible, mais aussi son post-traitement après irradiation (la cible devient alors un déchet radioactif à traiter).

Autres cibles

SPIRAL 1 au GANIL utilise des cibles de Carbone avec des faisceaux primaire d'ions lourds, ces cibles sont couplées à une source ECR (NANOGEN III). L'avantage de cet ensemble cible source est qu'il permet de produire directement des ions multichargés. La limitation vient du fait que seuls les éléments présents dans la source d'ions sous forme de gaz sont accélérables. La mise à niveau de SPIRAL 1 (projet en cours avec démarrage du 1er faisceau radioactif en 2016/2017) permettra l'utilisation d'une grande variété de couples projectiles-cibles et des sources d'ions autres que des sources ECR. Cette particularité permettra de produire des faisceaux d'ions radioactifs provenant d'une plus grande variété de processus réactionnels, à savoir fragmentation des noyaux du faisceau primaire, fragmentation des noyaux de la cible ou réactions de fusion-évaporation. Cette installation propose de nouveaux faisceaux, complémentaires de ceux d'ISOLDE et d'ISAC, et mène en continu les développements nécessaires pour étendre son offre. Les expériences acquises au GANIL dans le domaine de développement de cibles et la collaboration avec les autres laboratoires, dont ISOLDE, SPES et IPNO au sein de ENSAR et prochainement ENSAR 2 permettent d'espérer à court terme l'extension de l'offre à de nouveaux faisceaux difficiles à produire. Le développement de cibles adaptées à cette installation est nécessaire pour le futur de SPIRAL 1 au GANIL et l'utilisation de cibles légères reste complémentaire avec d'autres laboratoires comme ISOLDE et TRIUMF. L'attractivité de l'upgrade SPIRAL1 réside aussi dans les énergies de faisceaux accessibles à la suite de

la post-accélération dans le cyclotron CIME qui permet de fournir des ions radioactifs à des hautes énergies actuellement inaccessible dans les autres laboratoires.

2.4 Sources d'ions radioactives

Dans cette section, les quatre types de sources d'ions radioactifs exploitées dans l'installation ISOL ALTO et SPIRAL 1 et prévues pour SPIRAL 2 au GANIL sont présentées.

Source à ionisation de surface

La source à ionisation de surface est efficace pour produire des ions mono-chargés des éléments avec un potentiel d'ionisation relativement bas, donc pour les éléments alcalins et alcalino-terreux en priorité. Elle est souvent constituée d'un tube ou d'une cavité maintenue à une température élevée usinée dans un matériau avec un fort travail de sortie électronique. Ces sources sont utilisées dans la plupart des installations de type ISOL actuelles. Elles ont été introduites dans les années 1970, [6] [7] [8] et développées dans les premiers jours de la technique de séparation des isotopes. Ce sont des sources d'ions simples, robustes et rapides. Cependant, le cahier des charges des installations futures pour de telles sources exige qu'elles conservent leurs performances pendant des durées pouvant atteindre plusieurs semaines. Or, l'efficacité d'ionisation de surface dépend du matériau du tube et de son état de surface en cours d'exploitation. La difficulté vient du fait que l'état de surface du tube peut être rapidement modifié par un fort dégazage de l'environnement de la cible. Pour les cibles UC_x , la vapeur de carbone crée des carbures en s'associant à différents matériaux. La conception du tube de transfert entre la cible et la source d'ions doit aussi prendre en compte cet aspect. L'IPN Orsay a développé et fabriqué la première source d'ions utilisé à ISOLDE au CERN dans les années 1970 qui est représenté sur la [figure. 1](#)



Figure : source d'ions à ionisation de surface développée à Orsay pour ioniser les métaux alcalins et utilisés au CERN dans les années 1960[22]

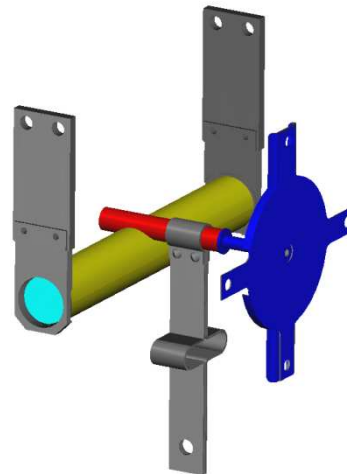


Figure : modèle d'une source à ionisation de surface couplée à un container cible via le tube de transfert. Ce design est utilisé actuellement auprès de l'installation ISOL ALTO.

Une version adaptée pour une utilisation en ligne à ISOLDE était disponible peu de temps après [9] ([Figure. 2](#)). Dans cette dernière version, la source est connectée à un conteneur cible par l'intermédiaire d'un tube de transfert. Le tube de transfert est conçu de telle manière que l'irradiation par le faisceau primaire et le chauffage de la cible soient découplés de la source d'ions. Le chauffage est assuré soit par un bombardement d'électrons, soit par effet joule. Les efficacités

d'ionisation pour ce type de sources peuvent atteindre plusieurs dizaines de pourcent. Plus tard, d'autres développements ont eu lieu, par exemple en fournissant des sources de surface négatives et en exploitant différents matériaux [10] [11] [12].

Au GANIL, une source destinée à l'ionisation des isotopes d'alcalins a été développée pour être utilisée sur SPIRAL 2 phase 2. La source devait répondre à une exigence de durée de vie d'au moins trois mois sous irradiation, tout en préservant une efficacité d'ionisation acceptable. Le recours à une conception originale basée sur les propriétés physico-chimiques particulières du rhénium et sur la création d'un champ électrique interne pour accélérer le transport des ions a permis d'obtenir des efficacités d'ionisation plus élevées que dans toute autre source à ionisation de surface (proches de 100% pour certains alcalins), et des temps de réponse très faibles (de l'ordre de quelques ms). La source a été évaluée dans le cas de leur association à une cible de graphite de géométrie identique à celle de la cible de carbure d'uranium de SPIRAL 2 phase 2. L'étape ultérieure de ces développements consistait en une étude des performances de production d'ions radioactifs à l'aide d'un faisceau primaire d'ions stables. Les enseignements tirés de ces études sont actuellement utilisés pour concevoir les ensembles de production d'ions radioactifs pour l'upgrade de SPIRAL1.

Source FEBIAD

Les sources d'ions de type FEBIAD (Forced-Electrons Beam Induced Arc Discharge) ont été spécialement développées pour la production de faisceaux d'ions radioactifs. Elles sont compactes et permettent de fournir des décharges d'arc stables sans injection de gaz support. Les premiers développements et l'application de ces sources ont été rapportés par R. Kirchner à GSI et S. Sundell à ISOLDE-CERN dans les années 1970 [13]. Les différentes versions des sources FEBIAD ont été développées [14], en exploitant différents matériaux de structure pour la cathode, la grille d'accélération, la chambre d'anode ou des écrans thermiques. Les sources FEBIAD sont connectées à la cible avec une tube de transfert chauffé et, les parois de la source étant chaudes; des ions mono-chargés sont produits pour une grande partie des éléments ayant une température de vaporisation et un potentiel d'ionisation élevés. Ce sont des sources polyvalentes non sélectives, compactes, rapides qui offrent des rendements élevés d'ionisation pour les éléments condensables. Elles ont également été utilisées pour produire des faisceaux moléculaires des éléments condensables tels que SnS^+ , SeCO^+ et AlF^+ [15].

Au GANIL, une source FEBIAD de type VADIS (développé initialement pour ISOLDE CERN) a été couplée avec la cible de graphite de SPIRAL 1 au GANIL pour augmenter l'offre de faisceau disponible. Ce changement, qui a nécessité une adaptation du système d'extraction dédié aux ions $1+$, a permis d'apprendre à maîtriser une nouvelle technique d'ionisation.

A l'IPNO, une source FEBIAD de modèle MK5, (développée à ISOLDE-CERN) [14] est exploitée dans l'installation ALTO (figure 3). Les différents modèles de cette source ont été combinés avec différents types de cibles et reliés par l'intermédiaire de lignes de transfert maintenus à des températures différentes. Ces sources FEBIAD ont besoins d'un champ magnétique pour maintenir le plasma. Il faut préciser que ce mode de fonctionnement n'est pas compatible avec un environnement où les rayonnements ionisants et non ionisants ont des niveaux très élevés. Une autre source d'ions de type FEBIAD dédiée aux installations ISOL de futures générations comme SPIRAL2 et EURISOL a été développée à l'IPNO. Ce prototype est nommé IRENA (figure 4) (Ionisation by Radial Electron Neat Adaptation) [16] [17] [18]. Elle est basée sur le modèle des sources d'ions EGBP (Electron Beam Generated Plasma) [19]. Elle présente une configuration géométrique radiale, ce qui est un avantage pour l'exploitation dans des environnements fortement irradiés, en présences de champs électriques

et d'un flux de neutrons très élevé. En particulier, la délocalisation des isolants permet de chauffer la cathode jusqu'à 2500 °C et donc de produire des ions non volatils. Le fonctionnement sans aimant est nécessaire à cause des flux de neutrons mais peut être un avantage car cela réduit sensiblement la partie de la source d'ions traitée comme un déchet radioactif. De plus, l'utilisation d'une cathode radiale devrait améliorer la durée de vie de la source d'ions en empêchant l'usure locale observée après irradiation sur des cathodes planes présentes dans les sources standards de type FEBIAD. Les premiers tests de cette source montrent des efficacités d'ionisation obtenues au moins du même ordre de grandeur que celles des sources FEBIAD-MK5 en fonctionnement sur ALTO [20].

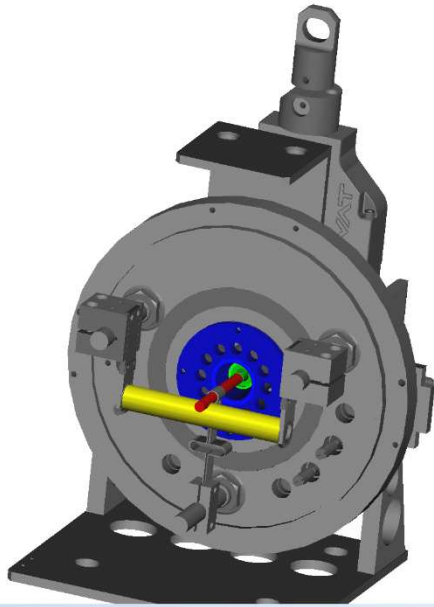


Figure Modèle d'un ensemble cible et source d'ions de type FEBIAD intégré dans la base constituant la chambre à vide.

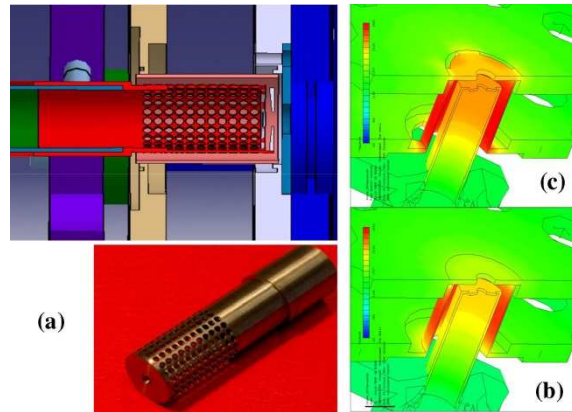


Figure 4 (a) Modèle de conception de la source d'ions IRENA ; (b) et (c) Optimisation thermique de la cathode : homogénéisation du gradient thermique après un ajustement du design mécanique.

Sources ECR

Les sources de plasma à la résonance cyclotron électronique⁴ (ECR) n'ont pas besoin de surface chaude pour fonctionner et peuvent être couplées avec la cible à travers des tubes de transfert de températures plus basse. Cela permet à la source d'être sélective en éléments selon leurs températures de vaporisation individuelles. Les sources ECR peuvent donner des faisceaux mono-chargés ou multichargés selon la configuration de leur champ magnétique. Le champ magnétique peut être généré par des aimants permanents ou par des bobines. La première source ECR utilisée pour des faisceaux radioactifs utilisait des aimants permanents. Ces sources quotidiennement utilisées à SPIRAL 1 GANIL, ont des efficacités d'ionisations très avantageuses en comparaison des autres sources, mais, étant sensibles à la température de fonctionnement, leurs champ d'application est réduit à des éléments gazeux et moléculaire. Pour le projet SPIRAL 2, une nouvelle source ECR a été développée au GANIL permettant d'ioniser efficacement les gaz radioactifs produits dans une cible ISOL ayant une durée de vie prolongée à proximité directe de la cible sous un flux de neutrons élevé [31],[32],[33],[34]. La source Monobob a été développée dans ce but et a permis d'obtenir des efficacités pouvant atteindre plusieurs dizaines de pourcents (jusqu'à 55% pour le Kr). Sa conception, affranchie de l'utilisation d'aimants permanents et de matériaux radio-sensibles, permettait d'espérer une durée de vie supérieure à 3 mois.

⁴ Voir la 1ere partie du rapport

Source laser

La quatrième source utilisée dans les ECS est la source laser. Seule une source d'ions laser à haute cadence permet d'ioniser un élément donné avec une très grande sélectivité et de façon très efficace. Il s'agit de produire des ions mono-chargés par photo-excitation résonante, où les atomes sont ionisés par étapes successives d'excitation résonante atomique jusqu'à l'ionisation lors de la dernière transition, grâce à plusieurs faisceaux laser de longueurs d'onde correspondant au schéma atomique d'un unique élément chimique. Cette méthode est intensivement utilisée dans les laboratoires qui produisent des ions radioactifs comme ISOLDE, TRIUMF ou à ALTO. Elle est également utilisée pour étudier les propriétés fondamentales des noyaux grâce à la spectroscopie laser de leur structure hyperfine (rayon carré moyen, moments, spin...).

Depuis 2008, le projet au GANIL nommé « GISELE » (GANIL Ion Source using Electron Laser Excitation) s'intéresse au développement d'une source d'ions à ionisation laser résonante. Cette source, basée sur des lasers à état solide avec des cristaux de Saphir dopés au Titane, a été construite au GANIL conjointement avec l'IPNO, Johannes Gutenberg Universität de Mainz en Allemagne (JGU). Dans ce dispositif, un système laser accordable permet de produire 2 ou 3 faisceaux laser de longueurs d'ondes spécifiques à chaque élément chimique qui sont ensuite transportés jusqu'à une cavité chaude portée à très haute température (jusqu'à 2000°C) dans laquelle a lieu l'interaction entre les faisceaux laser et les atomes d'intérêt à ioniser. Les faisceaux d'ions ainsi produits sont analysés après un séparateur de masse où leur intensité et leur émittance peuvent être mesurées. La mesure de ces paramètres expérimentaux permet de comparer les schémas d'ionisation utilisés et d'optimiser la géométrie de la cavité chaude, qui peut par la suite être connectée à une cible de production de noyaux radioactifs, développée par ailleurs. Dans le cadre du développement de l'ECS laser pour SPIRAL2 phase 2, une campagne d'optimisation de cette cavité chaude a été entreprise en étudiant l'influence de sa géométrie (diamètre, longueur) ainsi que des matériaux utilisés (Tantale, Carbure de Zirconium) sur l'efficacité d'ionisation et la pureté des faisceaux d'ions produits. La décision en 2013 du report sine die de la construction du bâtiment de production de SPIRAL2 phase 2 a mis l'activité de développement de cavité chaude en stand-by après l'accomplissement de la thèse de J. L. Henares.

Le projet GISELE a donné lieu à plus d'une vingtaine de présentations nationales et internationales depuis 2010 et à neuf publications dans des revues internationales à comité de lecture. Par exemple, nous avons publié une description complète de la source d'ions à ionisation laser résonante développée au GANIL [26] et tous les résultats obtenus avec ce dispositif jusqu'à présent [27] [28] [29] [30].

Les développements expérimentaux autour du système laser GISELE et les connaissances acquises sur ce sujet sont dès à présent mis à profit et pérennisés pour le nouveau projet « REGLIS » (**R**are **E**lements in-**G**as **L**aser **I**on **S**ource and **S**pectroscopy at **S**³) de production d'ions radioactifs et leur étude par ionisation laser résonante en cellule gazeuse auprès de la ligne basse énergie du spectromètre S3 sur SPIRAL 2 Phase 1. Plusieurs dispositifs de production d'ions radioactifs par cellule gazeuse et ionisation laser résonante sont en cours de développement dans le monde (PALIS à Riken, GALS à Dubna, LEB-MARA à Jyväskylä). La combinaison des faisceaux de grande intensité de SPIRAL2, du spectromètre S³ et du dispositif à basse énergie REGLIS est probablement la plus ambitieuse et permettra des avancées uniques dans la compréhension de la matière nucléaire à partir de 2018.

Une source d'ionisation laser RILIS existe également au sein de l'installation ALTO à l'IPN Orsay. C'est une source utilisant des lasers à colorants.

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.

2.5 R&D ECS à ALTO

Développement des sources d'ions radioactifs

Les sources d'ions à ionisation de surface ont été utilisées pour produire des faisceaux moléculaires avec des potentiels d'ionisation appropriés. Il s'agit principalement d'oxydes de lanthanide, de composés du fluor, des alcalino-terreux et des molécules de fluorure [9] [21]. Un programme de production de faisceaux moléculaire de lanthane par fluoration a déjà été initié à l'IPNO. Les éléments clés pour exploiter en ligne ces sources sont en cours d'investigation et font l'objet d'un programme de R&D. Parallèlement, l'étude d'optimisation de l'ionisation de surface pour les alcalins et, dans une certaine mesure, les alcalino-terreux et terres rares doit continuer.

Le programme de R&D doit aussi porter sur d'autres types de source d'ions. Notamment les sources à plasma (FEBIAD) pour l'ionisation de gaz rares radioactifs et de noyaux d'intérêt sous forme moléculaire. Une forte demande de production de faisceaux de SnS est exprimée pour l'installation ALTO. Une réduction du taux de CO_2^+ dans la chambre d'ionisation est primordiale pour garantir la pureté du faisceau secondaire, cela peut être assuré par une conception appropriée des pièces en graphites. Certes, la source IRENA a montré un potentiel important pour l'ionisation des noyaux radioactifs pour les installations de seconde génération. En revanche, l'étude de son couplage avec la cible UC_x ainsi que l'optimisation de la configuration de son tube de transfert doivent continuer.

Récemment, des développements intéressants ont montrés l'opportunité du couplage continu de ces cavités avec des sources lasers. Des études préliminaires ont montré un fort intérêt du couplage source laser avec la cavité d'ionisation des sources FEBIAD. La cavité d'ionisation où se produit l'interaction atomes-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.

Au cours de ces dernières années, les sources d'ions laser (RILIS) ont connu un fort développement. Ces sources RILIS 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 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 de transfert s'inscrivent dans un programme de R&D plus global. Le type de matériau et la température de fonctionnement du tube de transfert constituent des moyens de sélectivité physico-chimique permettant de filtrer les noyaux indésirables avant ionisation. Les procédés de sélectivité physico-chimiques 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.

Développement de cibles

Les développements menés dans le domaine des cibles en France sont aujourd'hui concentrés sur les besoins de SPIRAL 2 dont le programme de R&D des cibles de fission était mené par l'IPNO jusqu'à la suspension de la Phase 2 de SPIRAL 2 en 2013. Historiquement, l'IPNO a réalisé de nombreuses et diverses cibles épaisses pour des exploitations comme ISOCELE à l'IPNO, ISOLDE au CERN et SPIRAL1 au GANIL.

Les développements récents portent sur les cibles de fission, notamment sur des composés de carbure d'uranium. Ces travaux ont été effectués dans le cadre des collaborations européennes avec ISOLDE-CERN, PSI en Suisse, LNL-INFN et GANIL. 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 directement à l'installation ALTO et 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 à l'IPNO 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 physico-chimiques, simulation à l'aide de codes de calcul (diffusion des radioéléments, réactions nucléaires, traitements thermiques etc.), montages expérimentaux, spectroscopie, sûreté et radioprotection. 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.

Genèse et calendrier

L'installation ALTO à l'IPN Orsay a été utile pour le développement des cibles et source pour SPIRAL 2 phase 2. Un laboratoire de cible UCx a été financé par SPIRAL 2 à l'IPNO pour permettre la synthèse des nouvelles cibles et l'analyse des échantillons de matières en amont des irradiations et ensuite des analyses de temps de relâchement après irradiation de différents type de cible UCx. Pour la R&D

sources d'ions radioactifs, le groupe exploite un séparateur de masse hors ligne, comme banc de tests, pour la qualification des sources d'ions et le développement de nouveaux faisceaux d'ions.

Ressources humaines

A titre indicatif, le [tableau 1](#) suivant montre la variation des équivalent temps plein « %FTE » du personnel du groupe R&D cibles et sources d'ions pour les activités de R&D entre 2009 et 2015. La dernière ligne montre l'évolution du pourcentage total « %FTE cumulé » pour les activités de R&D cibles et sources d'ions entre 2009 et 2015. Il paraît évident que le remplacement des départs dans le groupe devient une urgence.

Tableau variation des %FTE pour les activités R&D cibles et sources d'ions radioactifs entre 2009 et 2015

Agent	Fonction	Equivalent temps plein (%FTE)						
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
M. CHEIKH-MHAMED	IR	100	85	85	88	89	58	47,5
E. COTTEREAU**	IP	54	45	20				
M. Ducourtieux**	I	30	50	12				
S. ESSABAA**	IR	20	16	3	2			
S. FONTEYRAUD	TC	32						
B. HY*	IE	60	90	59				
C. LAU***	IR	30	50	25	22	85	71	
H. LEFORT**	IE	75						
J-P. MOUFFRON**	TP	30	34					
A.OLIVIER-KAISER**	IR	10	15					
Y. RICHARD	TC	10	5					
S. TUSSEAU-NENEZ**	IR				66	45	44	41
TOTAL %FTE		451	390	204	178	219	173	88,5

* : CDD ; ** : Départs : retraite, noemi, détachement ; *** : congés sans solde

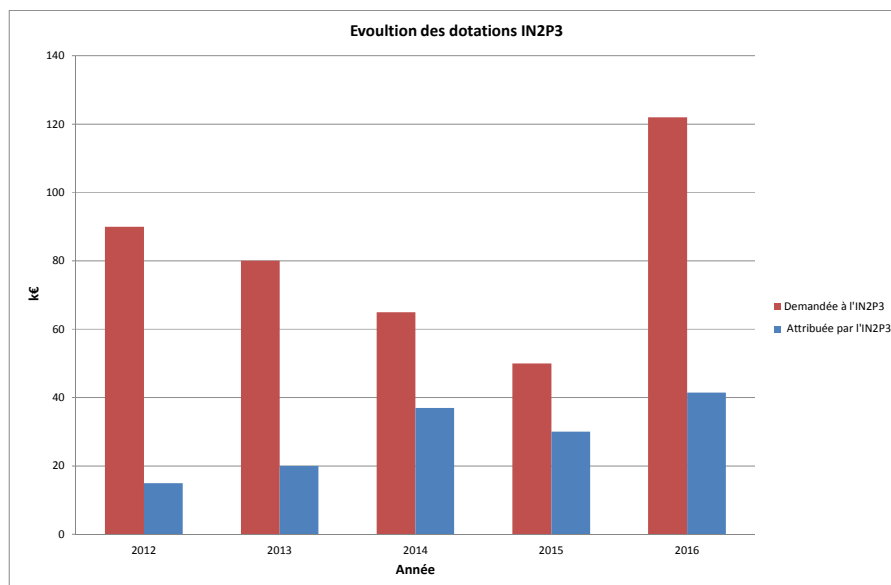


Figure Evolution des dotations IN2P3 pour les activités R&D cibles et sources d'ions radioactifs entre 2012 et 2016

Ressources budgétaires

Les ressources financières pour les activités R&D cibles et sources d'ions se basent essentiellement sur les dotations de projets nationaux et internationaux dans lesquels le groupe est impliqué ainsi que sur les dotations IN2P3. A titre indicatif, l'évolution des dotations IN2P3 pour les activités R&D

cibles et sources d'ions radioactifs entre 2012 et 2016 est présentée dans la [figure 5](#). Ce tableau n'intègre pas les financements donnés directement par projet comme par exemple EURISOL, ACTILAB, SPIRAL 2 ou des ANR.

Réalisations techniques

Depuis quelques années le laboratoire UCx à l'IPN Orsay a bien servi à la communauté et a permis à ALTO de répondre rapidement aux nouvelles demandes. Pour être efficace dans la continuité de développement des ECS et pour répondre aux demandes pour la physique ; les collaborations nationales et internationales se sont développées ces dernières années. Ces collaborations ont permis aux communautés des chercheurs et ingénieurs qui travaillent pour ces développements d'enrichir leurs connaissances. Au niveau de l'installation ALTO, et afin de fiabiliser d'avantage le fonctionnement des ECS en exploitation, un nouveau banc d'études thermiques est en cours de développement.

2.6 R&D ECS SPIRAL 1 et SPIRAL 2 au GANIL

L'installation SPIRAL1 (Système de Production d'Ions Radioactifs Accélérés en Ligne) a démarré en 2001. Son principe consiste à envoyer les ions stables d'un faisceau de haute énergie (max. 100 A.MeV) sur les atomes d'une cible épaisse en graphite pour produire des noyaux radioactifs par fragmentation des noyaux projectiles. Les éléments radioactifs sont ionisés par une source ECR. Un cyclotron permet si nécessaire d'accélérer le faisceau produit à plus haute énergie (max. 25 A.MeV). La conception initiale permettait de produire des ions radioactifs uniquement à partir d'éléments gazeux. L'upgrade SPIRAL1, qui délivrera son premier faisceau en 2017, a pour but d'étendre aux éléments métalliques la palette d'ions radioactifs disponibles

Pour atteindre son but, le projet de modification de l'installation SPIRAL1 consiste en trois transformations importantes :

- Le cœur du dispositif a été transformé pour pouvoir accueillir de nouveaux dispositifs de production d'ions radioactifs, des nouveaux Ensembles Cibles Sources (ECS).
- La deuxième transformation a consisté à installer un amplificateur de charge (voir la partie 3 booster de charge) en aval du faisceau d'ions délivré par l'ECS pour permettre leur accélération par le cyclotron CIME.
- Enfin, l'ensemble de l'installation a évolué pour tenir compte des évolutions des exigences de sûreté.

L'avenir de SPIRAL1 réside notamment dans la production d'ions radioactifs de courts temps de vie situés dans la région des noyaux légers, de l'He au Kr, et la région des noyaux plus lourds (jusqu'à $A \sim 200$) très déficients en neutrons, souvent plus difficiles d'accès pour ISOLDE et ISAC, [22]. Ces isotopes représentent un challenge car leurs sections efficaces de production sont faibles et leur temps de vie nécessite de minimiser le temps de réponse du processus de transformation en ions. L'expérience acquise à GANIL dans ce domaine et la collaboration avec les autres laboratoires, dont ISOLDE, SPES et IPNO au sein d'ENSAR 2 permettent cependant d'espérer à court terme l'offre de nouveaux faisceaux difficiles à produire.

Des tests préliminaires ont déjà démontré la possibilité d'en produire quelques-uns [23]. La possibilité d'augmenter leur état de charge a été démontrée grâce à l'utilisation d'un booster de charge, qui permet à la fois d'élever efficacement les états de charge des faisceaux d'ions radioactifs mono-chargés produits par les nouveaux ECS et de transmettre efficacement ceux déjà produits sous la forme d'ions multi-chargés.

Genèse et calendrier

Pour des raisons de ressources, le projet SPIRAL1 a initialement été limité à la production d'isotopes de gaz. Son upgrade pour la production d'isotopes d'éléments métalliques était implicite. Avant d'être réalisé, l'Upgrade devait attendre que l'installation SPIRAL1 ait démontré ses performances et que les utilisateurs aient pu en profiter car sa réalisation impliquait une étude supplémentaire de conception puis un arrêt de plusieurs années pour sa mise en œuvre, impliquant une indisponibilité prolongée pour les expérimentateurs. En 2009, un comité d'experts propose le projet d'Upgrade de SPIRAL1 comme priorité pour la mise à niveau de l'installation GANIL existante, de façon complémentaire à la construction de SPIRAL 2⁵ En 2010, un avant projet est présenté au conseil scientifique et un premier appel à expériences recueille une dizaine de lettres d'intention évaluées par le Programme Advisory Committee (PAC) du GANIL. Le projet est évalué positivement par le conseil scientifique du GANIL en 2012, et démarre officiellement. Le projet d'Upgrade de SPIRAL 1 retenu permettra de fournir une variété de faisceaux importante tout en minimisant l'impact technique et financier. En 2013 et 2014, de nouvelles lettres d'intention sont discutées dans des workshops dédiés à AGATA (9 LoIs) et DESIR (8 LoIs). En Février 2016, un workshop dédié au démarrage de l'installation Upgrade de SPIRAL 1 a permis d'organiser les propositions d'expériences et lettres d'intention soumises à l'examen du PAC de Juin 2016: 9 propositions d'expérience ont ainsi été soumises, incluant notamment les premières expériences avec ACTAR, ainsi que 12 lettres d'intention, dont certaines englobant plusieurs expériences, préparant entre autre la future campagne AGATA avec les faisceaux SPIRAL1, ou différentes mesures de masses à DESIR. Le projet est actuellement en cours et les tests de réception débuteront à l'automne 2016. Dès 2017, l'installation accueillera de nouveaux ECS. Les principes de production ont été diversifiés par un élargissement des possibilités de couples projectiles-cibles-sources d'ions. La variété des faisceaux qui seront disponibles peut être appréciée au travers de la carte des noyaux mise à la disposition des utilisateurs du GANIL⁶.

Les résultats en physique nucléaire sont publiés par les utilisateurs des faisceaux d'ions radioactifs. Les travaux menés en instrumentation sont publiés en grande partie dans les proceedings des conférences : International Conference on Ion Sources (ICIS), Electron Cyclotron Ion Sources (ECRIS) et Electro Magnetic Ion Separator (EMIS) au rythme moyen d'environ 3 publications par an. Depuis le début du projet SPIRAL1, 7 thèses et une habilitation à diriger les recherches portant sur l'étude des ECS ont été soutenues. Maintenant il est important pour le projet qu'un développement de cible soit mis en place au GANIL pour profiter de cette nouvelle installation.

Ressources, moyens et activités de recherche

La mise à jour de SPIRAL 1 est un projet en collaboration incluant GANIL, LPSC-Grenoble, ISOLDE-CERN, SPES en Italie et IPN Orsay. Le chef de projet est un agent du GANIL. Les études et la réalisation des travaux d'infrastructure ont été conduites par un maître d'œuvre extérieur au GANIL, en relation permanente avec le responsable du lot « infrastructure », agent du GANIL. Les travaux d'infrastructure ont été sous traités à des entreprises extérieures. Les études, la mise en œuvre et la réception du procédé sont des lots attribués à des agents du GANIL. Quatre responsables de lots, comprenant 28 responsables de tâches ont été désignés au sein du GANIL. Une partie des études a été menée en collaboration avec les laboratoires LPSC et ANL (Argonne National Laboratory). La réalisation a été majoritairement sous traitée à des entreprises extérieures.

⁵ <http://pro.ganil-spiral2.eu/laboratory/research/our-future/ganil-2015-reports/ganil-2015-final-report>.

⁶ <http://u.ganil-spiral2.eu/chartbeams/>

Le volume des ressources demandées aux responsables de tâches depuis le début du projet a été évalué à 351 Hommes/mois. La contribution des agents CNRS/IN2P3 du GANIL représente 243 H/m, les 108 H.m restant correspondant à la contribution des agents CEA. Cette différence est simplement due à la répartition parmi les agents CEA et IN2P3 des compétences requises par le projet. Le GANIL n'as pas d'agents IN2P3 qui travaillent sur le développement ECS pour le projet SPIRAL 2 phase 2 depuis la suspension du projet en 2013. Nous n'incluons pas dans ce rapport les ressources sur la source d'ions laser car ils travaillent actuellement sur le projet purifications de faisceau en post-traitement et pas sur la source couplée avec la cible.

Table 1: Moyens financiers du projet d'upgrade SPIRAL1

	Années	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Total
Procédé	Integration et commissioning	0,000	56,935	141,473	112,153	94,564	139,727	438,167	7,302	1219,316
	Casemate	47,590	56,632	37,821	1,765					143,808
	FEBIAD		21,579	32,179	26,879	36,182	4,226	35,000		156,045
	Magasin	0,000	3,200	6,609	0,530	0,018	0,000	10,000	0,000	20,356
	Mission			0,252	0,623	2,800	3,620	4,400	0,000	11,695
	Total Procédé	47,590	138,346	218,334	141,950	133,563	147,573	487,567	7,302	1322,226
Infrastructure	Total MOE + travaux				59,540	158,811	116,444	1197,162	0,000	1531,957
	Total Général	47,590	138,346	218,334	201,490	292,374	264,017	1684,729	7,302	2854,183

Les travaux d'infrastructure ont été financés par le budget dédié au réexamen de sûreté (1.531 M€). Le budget dédié au projet par le GANIL a été de 1.322 M€. Le projet a bénéficié de deux financements annexes (collaboration Emilie : 32 k€ et collaboration ENSAR : 12 k€). Le projet source laser a fait l'objet de la thèse de Jose Luis Henares, financée par un contrat européen Marie Curie, soutenue le 8 mars 2016 au GANIL et publiée⁷.

Réalisation techniques

Une fois le projet Upgrade SPIRAL1 achevé (2017), l'exploitation sera reversée au secteur des Accélérateurs au GANIL. Le budget de maintenance doit être estimé pour l'opération à partir de 2017. Aucune ressource humaine supplémentaire n'a été demandée. La durée de vie des ECS est limitée à quelques semaines à cause de leur endommagement sous rayonnement. Il est nécessaire d'en construire environ 3 nouveaux par an (~3 x 50k€). La gestion de leur cycle de vie, construction, montage, tests, exploitation, recyclage nécessite 5 ETP. En parallèle, l'évolution des performances nécessite la construction de prototypes à une fréquence estimée à 1 par an (1 x 50k€), et nécessite 2 ETP, dont un doctorant. Pour ces ECS, les études et tests sont effectuées par des agents du GANIL. La réalisation mécanique est confiée à des entreprises extérieures.

Il apparait important que chaque laboratoire ISOL ait une équipe forte avec une infrastructure qui réponde aux demandes et qui soit réactive pour pouvoir adapter les développements aux besoins spécifiques de la physique. Avec l'upgrade de SPIRAL 1 au GANIL, il est nécessaire que le GANIL renforce son équipe avec des personnes qui soient disponibles pour développer des cibles dans un laboratoire dédié. Aujourd'hui, un unique banc de test est utilisé pour caractériser les ECS avant leur opération et pour faire de la R&D. Ce fonctionnement limitera fortement la possibilité de faire de la

⁷ <http://hal.in2p3.fr/tel-01314260>

R&D dès le redémarrage de la machine. Les demandes des faisceaux exotiques augmenteront dans les années à venir avec la nouvelle plateforme d'expérience de DESIR-SPIRAL 2.

Auto-analyse SWOT

Point forts :

- Projet en cours d'achèvement et perspectives de production compétitives par rapport aux autres installations
- Singularité des modes de production : production de noyaux indisponibles dans les installations concurrentes, possibilité de post accélération à une énergie actuellement inaccessible dans les installations concurrentes
- Les concepteurs seront les exploitants. Pas de délai de transmission et de prise en main lors de la phase de réception/allotissement

Points faibles :

- Ressources insuffisantes pour l'atteinte des objectifs de R&D
- Départ du Chef de projet Upgrade, aussi responsable de l'exploitation, vers d'autres activités
- Pas de REX sur les ressources associées à l'obtention de l'autorisation d'utilisation de nouveaux dispositifs de production

Opportunités

- Collaboration européenne ENSAR2 : NA MIDAS pour l'étude des sources d'ions ECR multi-chargées (charge breeder) et JRA Eurisol pour étude des nouveaux ECS.

3. R&D sur les boosters de Charge

3.1 Introduction

L'activité de R&D sur les boosters de charge s'inscrit dans la thématique plus générale de la production et du transport des faisceaux d'ions radioactifs (RIB) auprès des installations dédiées. Dans cette partie, le booster de charge est vu comme une source d'ions spéciale qui accepte des ions $1+$ en entrée et de laquelle on extrait des faisceaux d'ions multichargés d'état de charge $N+$. Le lecteur est invité à lire la partie consacrée aux ensembles cible sources qui offre une introduction d'ensemble aux installations dédiées aux faisceaux d'ions radioactifs. La problématique de la R&D sur les boosters de charge concerne principalement l'amélioration du rendement de conversion du faisceau $1+$ injecté en faisceau $N+$ extrait ainsi que la minimisation de la durée du processus pour éviter la perte en ligne de RIB qui se désintègrent. Un autre facteur important est le taux de contamination du faisceau $N+$. La sensibilité à ce dernier paramètre étant très dépendante du type d'accélérateur disponible pour post accélérer les faisceaux des boosters de charge.

Il existe deux types de booster de charge :

- Les boosters de type EBIS (electron beam ion source) dans lequel un faisceau d'électrons très intense traverse un long tube sous vide plongé dans un fort champ magnétique et muni d'une succession d'électrodes placées à des potentiels programmés. Des ions $1+$ sont injectés en continu ou en pulsé dans la source et sont piégés axialement par le potentiel électrostatique imposé au jeu d'électrodes (figure 1). Les ions sont confinés radialement par la charge d'espace générée par le faisceau d'électrons. Les ions sont ionisés charge par charge par impact électronique avec le faisceau d'électron. Lorsque l'état de charge désiré est atteint, les ions sont extraits de la source en baissant le potentiel électrostatique. Les ions forment alors un pulse qui peut être post accéléré. Pour plus de détail, voir par exemple la source REX-EBIS de l'installation ISOLDE DU CERN [1]. Les booster EBIS sont complétés d'une « Penning Trap » en amont pour refroidir les ions $1+$ et rendre l'émittance du faisceau $1+$ compatible avec une injection dans la source. En aval, si la structure temporelle n'est pas appropriée pour l'application, un dégroupueur de paquets peut être mis en place pour allonger significativement le pulse.

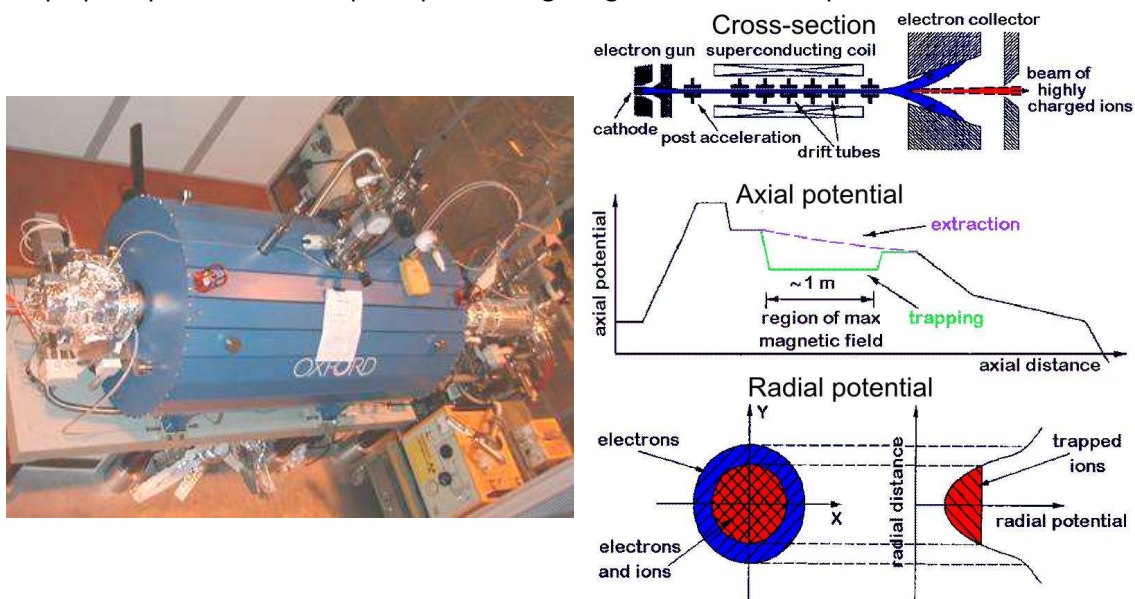


Figure 1 : photo de REX-EBIS au CERN (droite) et schémas de principe illustrant le fonctionnement du booster EBIS [1].

- Les boosters de type ECR (résonance cyclotronique électronique), dérivés des sources d'ions homonymes, dans lequel un faisceau d'ions $1+$ à basse énergie est injecté en continu (ou en

pulsé) par un côté de la source. est capturé par le plasma ECR, puis ré-extrait avec un état de charge augmenté N^+ de l'autre côté de la source d'ions (figure 2). Le plasma est généralement entretenu en injectant en continu un flux de gaz oxygène ou hélium. En France, l'activité source d'ion booster est principalement dédiée à la R&D sur les booster de charge ECR. La suite du rapport lui est consacrée.

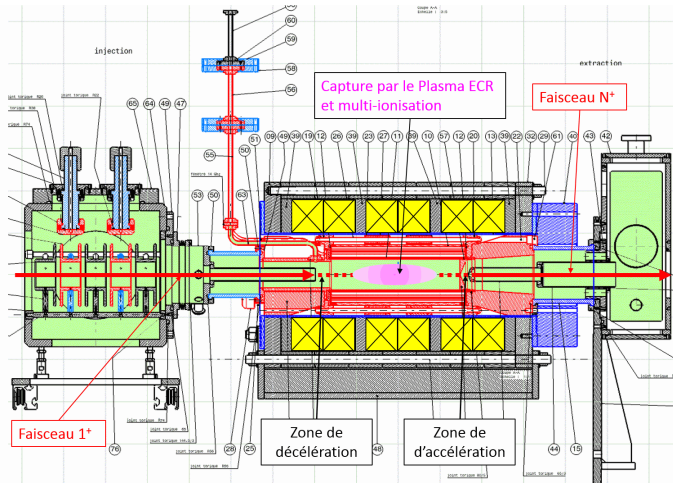


Figure 2: principe de fonctionnement d'un booster de charge ECR (PHOENIX).

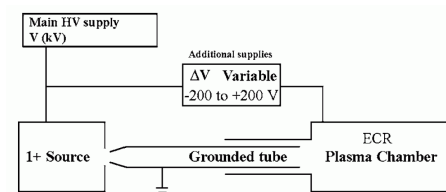


Figure 3: principe de l'ajustement du ralentissement des ions pour favoriser leur capture dans le booster avec l'alimentation dite " ΔV ".

3.2 Historique des booster ECR

Le concept de Booster de charge ECR a été inventé au LPSC dans les années 90 dans le cadre de la R&D du projet PIAFE [2], qui consistait à transporter des ions radioactifs sous forme $1+$ créés dans le réacteur de l'Institut Laue Langevin pour être post-accélérés dans le cyclotron SARA du LPSC (Institut des Sciences Nucléaires à l'époque). Même si ce projet n'a jamais vu le jour, le concept de booster ECR était né. La première source dédiée à l'étude de la méthode du « charge breeding » (CB) est le PHOENIX BOOSTER du LPSC. Opérationnelle depuis 1999, la R&D innovante menée sur cette source d'ions a ouvert la voie à une technique puissante, simple, robuste, adaptable à la post-accélération des faisceaux d'ions radioactifs. Une photo de la source insérée dans la ligne de faisceau et un schéma du banc expérimental sont proposés figure 4.

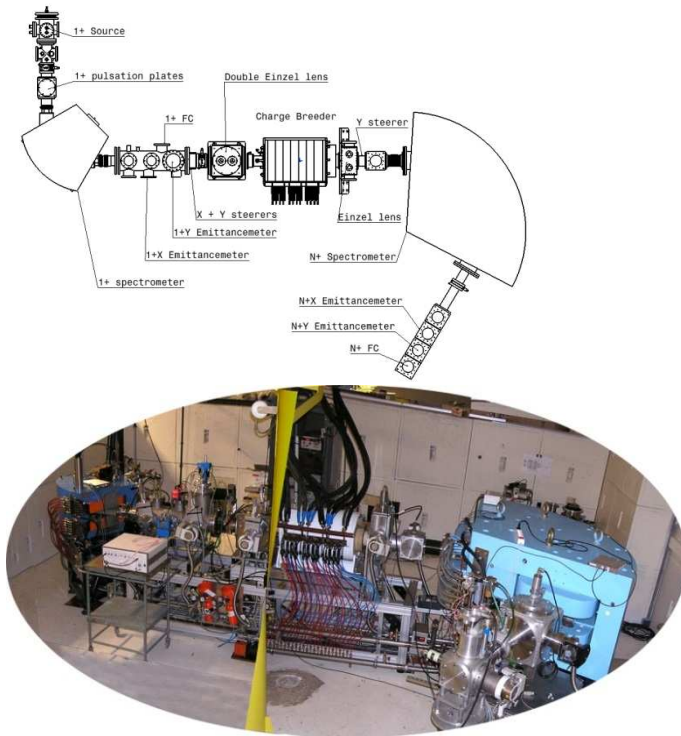


Figure 4 : Schéma et photo du banc de test 1+N+ au LPSC équipé de la source PHOENIX Booster.

Le travail pionnier de l'équipe du LPSC a permis de mettre en place le formalisme de physique expérimental caractérisant la méthode et a publié les premiers résultats d'efficacité de conversion des ions 1+ en N+ [3], [4]. Le rendement 1+N+ est défini comme le rapport du flux d'atomes extraits avec l'état de charge désiré sur le flux total d'atomes introduits :

$$\eta = \frac{nI^{n+}}{I^{1+}}$$

Où I^{1+} est l'intensité du faisceau 1+ entrant et I^{n+} l'intensité du faisceau sortant dans l'état de charge n+. En pratique, les faisceaux d'ions 1+ sont pulsés en entrée pour mesurer le temps de montée τ du signal n+ (« breeding time »). Selon le réglage du plasma, τ est de l'ordre de 1 à ~20 ms par état de charge. Le réglage le plus délicat du booster ECR consiste à trouver la bonne vitesse de passage des ions 1+ dans le plasma, de telle sorte qu'elle soit voisine de la vitesse des ions de celui-ci. Cet ajustement est obtenu en faisant varier la différence de potentiel ΔV (voir figure 3) entre la source 1+ créant les ions et le booster ECR. Un chronogramme typique montrant l'injection pulsée d'ions 1+ et les signaux d'ions n+ extraits est présenté sur la figure 5. La figure 6 représente l'évolution du courant I^{n+} extrait en fonction du paramètre ΔV pour divers ions produits par différents types de sources d'ions 1+. On note que la capture des ions gazeux est bien plus facile que pour les ions condensables : dans le cas du gaz, le faisceau 1+ peut être injecté à grande vitesse car si les ions touchent la paroi du booster, ils seront neutralisés puis réémis vers le plasma. Un ion condensable est quant à lui perdu s'il touche la paroi car il restera collé dessus.

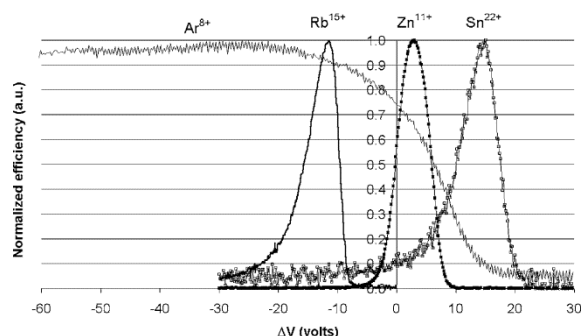
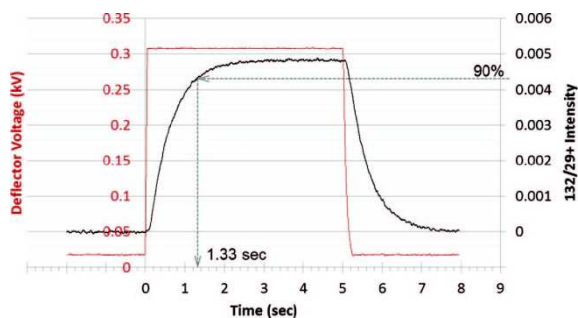


Figure 5: Gauche évolution du courant I^{n+} pendant Figure 6: courbe typique de I^{n+} en fonction de ΔV

le créneau d'injection du faisceau 1+ [13].

pour des condensables et du gaz.

Les expériences pionnières réalisées au LPSC montrent, selon l'élément chimique, des efficacités d'ionisation, dans un état de charge donné, de l'ordre de 1 à 10% (16% depuis). Les éléments légers (Na, Li...) correspondent aux efficacités les plus faibles. Le CB PHOENIX du LPSC a été vendu par la société PANTECHNIK à l'université de Daresbury, puis a été testé au CERN dans l'installation ISOLDE [5] (Expérience IS397, 2002-2009). Plusieurs expériences d'injections d'ions radioactifs ont été menées et ont permis d'évaluer, pour la première fois dans une installation dédiée aux ions radioactifs, les capacités du CB ECR [6,7]. Les expériences ont permis d'évaluer les avantages et inconvénients du booster ECR et de les comparer à ceux du booster de type EBIS déjà existant. Il apparaît que les deux types de booster sont complémentaires, comme résumé dans la [table 1](#).

Table 1 : comparaison expérimentale des boosters de type ECRIS et EBIS en 2012 [8]

	ECRIS booster	EBIS booster
Opération en continu	oui	non
robustesse	+++	+
Simplicité d'opération	+++	+
Contamination du faisceau	haute (nA)	basse (pA)
efficacité	~5-20% (update 2016)	~5-20%
« breeding time » τ	1-100 ms	10-100 ms
Courant 1+ injectable	~ μ A	~nA
Équipement auxiliaire nécessaire	Spectromètre à haut pouvoir de séparation en aval >10000	Penning trap en amont

Le point fort du CB ECRIS est qu'il peut gérer de grandes quantités d'ions 1+, le point faible est que le taux de contaminants du faisceau N+ est élevé. En effet, le plasma ECR ionise absolument tout ce qui passe à travers le plasma, incluant les constituants pulvérisés de la chambre à plasma et de la ligne de faisceau. Pour fonctionner efficacement dans une installation dédiée aux faisceaux radioactifs, le CB ECRIS doit être complété par un système de tri en aval (aimant, cyclotron) avec un pouvoir de résolution $m/\Delta m > 10000$ pour séparer efficacement le RIB d'intérêt des contaminants. Les points forts des CB EBIS sont le faible taux de contamination du faisceau N+ (réduit grâce au niveau d'ultravide dans la source, nécessaire pour le bon fonctionnement du processus) et une efficacité élevée même pour les ions légers, les points faibles du CB EBIS sont la limitation en intensité de l'ordre du nA, 1000 fois plus faible que pour le booster ECRIS, ainsi qu'un fonctionnement d'origine en pulsé, ajustable depuis quelques temps en mode pseudo continu.

Suite à une collaboration scientifique d'évaluation entre le LPSC et TRIUMF (Vancouver), un booster PHOENIX a de même été fourni par la société PANTECHNIK pour le complexe ISAC en 2005 [9]. Du fait du dimensionnement des optiques de faisceau de la ligne post booster, les résultats d'efficacité sont inférieurs à ceux trouvés au LPSC et à ISOLDE. Le premier faisceau radioactif est accéléré en 2008 ($^{124}\text{Cs}^{20+}$) [10]. Des efficacités de quelques % en ions radioactifs ont été obtenues récemment. Les faibles intensités de faisceaux radioactifs 1+ sont noyées dans le bruit de fond du booster ECR et, compte tenu du manque de résolution en masse du schéma accélérateur en aval de la source, seules quelques expériences de physique bien ciblées ont pu être réalisées avec les faisceaux accélérés. Un CB EBIS, plus approprié dans ces circonstances, est actuellement à l'étude pour fournir aux expériences des RIB post accélérés moins contaminés.

Le CB ECR KEKCB a été installé à TRIAC (JAEA, Japon) et a montré que l'utilisation d'une chambre à plasma en aluminium soigneusement préparée pour le vide réduisait significativement le bruit de fond [11].

Aux Etats-Unis, ANL a adapté une source d'ions ECR existante pour la transformer en booster de charge sur la période 2009-2014 afin de l'utiliser sur l'installation CARIBU [12]. Ce booster de charge a donné d'excellents résultats expérimentaux [13] avec des efficacités record en ions stables et ions radioactifs atteignant jusqu'à 20%, valeurs comparables à celles des sources CB EBIS. Les efficacités

de cette source sont présentées plus loin sur la [figure 13](#) et comparées avec celles d'autres boosters. L'amélioration des performances par rapport à celles des booster PHOENIX est analysée comme suit: un meilleur niveau de vide dans la source (3×10^{-8} au lieu de 2×10^{-7} mbar), un champ magnétique axial symétrique autour de l'axe et l'utilisation de chauffage HF double fréquence. Comme à TRIUMF, le manque de pouvoir de séparation en aval du CB ECRIS a incité l'équipe à stopper la R&D booster ECR et à s'orienter vers un CB EBIS pour résoudre le problème de la contamination des faisceaux d'ions N+ radioactifs.

Récemment, des simulations numériques du processus physique de capture des ions 1+ ont été développées dans la communauté [14, 15]. Grâce aux comparaisons possibles des résultats avec l'expérience, ces simulations offrent une perspective de compréhension accrue du phénomène de capture et éventuellement une possibilité à long terme de prédire les meilleurs réglages en ligne des booster.

3.3 R&D EMILIE

Le projet EMILIE [16], financé dans le cadre de l'appel à projet européen NuPNET, regroupe une collaboration de laboratoires européens dans le but d'améliorer les techniques de « charge breeding » pour les installations ISOL précurseurs d'EURISOL : SPES, HIE ISOLDE et SPIRAL 2. La collaboration est constituée du GANIL (coordinateur P. Delahaye), de l'INFN LNS et LNL, du LPSC, du LPC Caen, de JYFL, HIL, et ISOLDE. Les activités concernant la technique de charge breeding ECR du GANIL et du LPSC au sein d'EMILIE sont développées dans cette partie. Un piège de Paul permettant d'allonger les pulses des sources EBIS au point de rendre le faisceau multichargé virtuellement continu a été développé par le LPC Caen, sur la base de simulations réalisées par le GANIL. La technique de CB EBIS permet d'atteindre de très hauts états de charges. A SPIRAL 1 et SPIRAL 2, elle permettrait de bénéficier de faisceaux de 20 AMeV accélérés par CIME, pour l'ensemble des isotopes produits à une intensité suffisante (10^{3-4} pps), se démarquant des installations SPES, ISOLDE ou TRIUMF qui visent une énergie de 10 AMeV. L'inconvénient d'une source EBIS pour la technique de CB est son mode pulsé qui concentre les événements de physique sur des temps très courts, engendrant des problèmes de détection et d'acquisition de données (problèmes de pile-up et dead time). Le piège de Paul qui a montré ses premiers résultats en 2015[17] pourrait résoudre ce problème. Des tests approfondis seront réalisés en automne 2016, toujours dans le cadre d'EMILIE, puis pendant ENSAR 2 au sein du JRA EURISOL. Le JRA EURISOL permettra également d'évaluer l'ensemble du concept de source EBIS continue utilisant ce piège de Paul, son couplage avec une source EBIS de test au CERN étant envisagé sérieusement pendant la période 2016-2020. Le développement du piège de Paul n'étant pas à proprement parler une source d'ions, il n'est pas plus détaillé ici. Les tâches d'EMILIE qui seront développées dans la suite sont celles qui concernent le CB ECR :

- T1: Optimisation des efficacités d'ionisation dans les CB ECR
- T2: Effet du recyclage des condensables sur les parois et réduction du bruit de fond des CB PHOENIX
- T3: Reproductibilité des performances du booster PHOENIX
- T4: Optimisation du chauffage double fréquence dans les booster PHOENIX

3.4 R&D Booster de charge au LPSC

Expériences sur le booster de charge PHOENIX au LPSC

En 2013 et 2014, Le LPSC a accueilli la collaboration EMILIE (Tâche 1) pour réaliser des expériences sur le banc de test du booster PHOENIX afin d'étudier le phénomène de capture du faisceau 1+ dans le plasma ECR, et plus spécifiquement la capture des ions légers condensables dont le rendement global est assez bas dans les sources PHOENIX (environ 30%). Pendant le processus de capture, l'ion

incident est d'abord freiné longitudinalement par son interaction avec les ions plus lents du plasma. Quand sa vitesse devient comparable aux ions du plasma, le cumul des multiples interactions coulombiennes qu'il subit font doucement diffuser son vecteur vitesse. Lorsque la densité du plasma est suffisante, la diffusion de l'ion permet sa capture par le plasma avant qu'il ne finisse sa traversée de la source. Pour des densités de plasma intermédiaires, l'analyse des expériences montre qu'une partie du faisceau primaire traverse la source sans être capturé [18, 19]. Ce faisceau transmis, non capturé, est aussi partiellement ionisé en vol par impact électronique avec les ions du plasma. Ceci explique la remontée en intensité des charges 1+, 2+, et 3+ du spectre d'ions de la [figure 7](#) gauche. Cette interprétation est confirmée par les courbes 1+ et 2+ de $I^{n+}=f(\Delta V)$ affichées dans la [figure 7](#) droite qui indiquent, de par leur forme, que les ions passent à travers le plasma sans être capturés. Ces résultats établissent que l'injection d'un faisceau mono-chargé dans un plasma permet d'en sonder certains paramètres tel que proposé par le LPSC dès 2010. Cette analyse a été confirmée par des simulations menées par l'INFN-LNS [15]. Les informations contenues dans les expériences ont permis d'estimer les fréquences de collisions coulombiennes pour les ions concernés et aussi la densité moyenne du plasma sur l'axe de la source d'ions estimé à $\sim 10^{11}$ /cm³ soit environ un facteur 10 en dessous de la densité critique d'une source d'ions chauffée par une microonde à 14,5 GHz. Ce point est d'une grande importance : Un effort de R&D pour améliorer la densité du plasma est à mener, ce qui devrait mener à une amélioration du processus de capture, pour les ions légers en particulier.

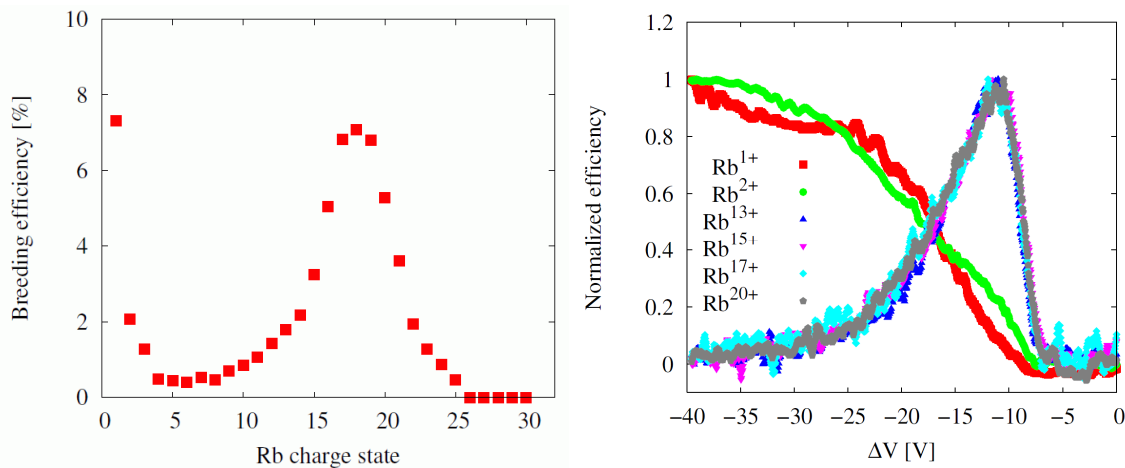


Figure 7. Gauche : Spectre N+ du rubidium extrait de PHOENIX optimisée pour la capture. Droite : courbe $I^{n+}=f(\Delta V)$ pour les ions rubidium de basse charge et de haute charge. La "remontée" des intensités des états de charge 1+,2+,3+ dans le spectre est analysée comme des ions qui ont traversé le plasma sans être capturés mais ont été ionisés en vol par impact électronique (pour les 2+ et 3+).

R&D source d'ions COMIC chaude

Dans la tâche 2.2 du projet EMILIE, Le LPSC a conçu et développé une nouvelle source d'ions ECR dédiée à la production de faisceaux 1+ pour tester les boosters de charge ECR. La chambre à plasma de la source peut être chauffée jusqu'à 600°C grâce à l'emploi d'un câble Thermocoax industriel brasé autour de la chambre à plasma. Cette source peut produire des faisceaux d'ions gazeux mais aussi des faisceaux de condensables comme les alcalins. Le but est d'étudier le phénomène de recyclage des condensables sur les parois chaudes en fonction de la température et d'offrir à la communauté une source bon marché, fournissant des intensités de l'ordre du μA dans de petites émittances et utilisable comme source de test 1+ pour les boosters PHOENIX. La conception de la source est dérivée de la source d'ions compacte COMIC 2,45 GHz [20]. La [figure 8](#) gauche présente une vue de la conception où l'on distingue au centre la cavité plasma, en violet les coupleurs HF, en rouge, la chambre à plasma chauffée, en bleu le conteneur à aimant activement refroidi par un circuit d'eau (bleu foncé). La source est aujourd'hui assemblée ([figure 8](#) droite). Les tests de fonctionnement sont prévus pour l'automne 2016.

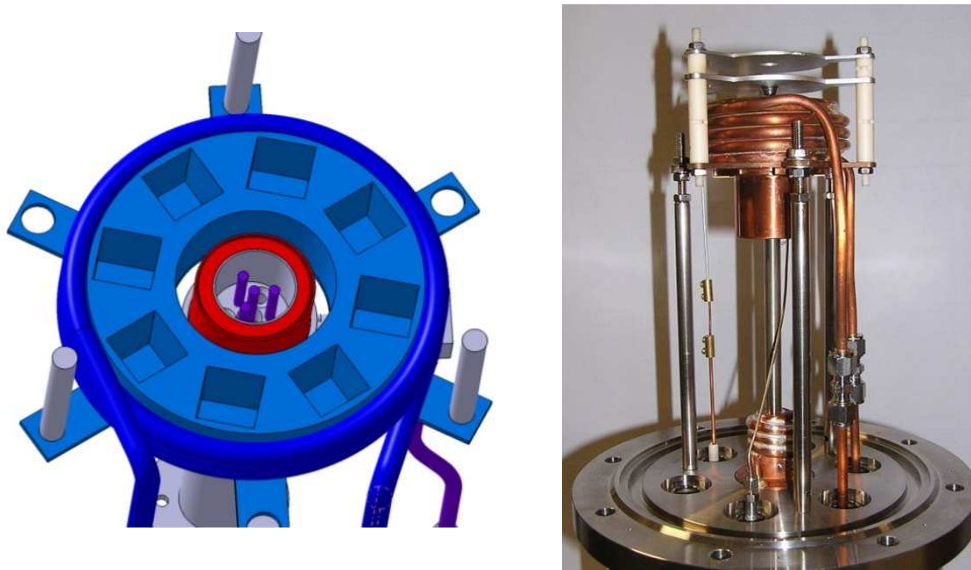


Figure 8. Gauche: vue de la conception de la source COMIC chaude. Droite: photo de la source assemblée.

R&D source d'ions SUPERCOMIC

Un autre effort de R&D se déroule au LPSC dans le cadre du projet EMILIE (Tâche 2.2) et concerne la conception d'une source d'ions ECR, bon marché, chauffée à 5,8 GHz, fonctionnant à basse puissance (<100W avec un émetteur à état solide) et capable de produire des ions faiblement chargés. L'un des objectifs de cette source est de pouvoir injecter des ions $n+$ dans le booster PHOENIX pour étudier la capture des ions en fonction de leur état de charge. Initialement construite comme une source COMIC avec une configuration magnétique purement axiale, la conception a évolué pour améliorer ses performances et répondre à un besoin local de production d'1 mA de faisceau $D+$. La version 2 de la source contient une structure magnétique à "minimum B" (voir la partie 1 sur les sources d'ions lourds). Le champ magnétique est fabriqué par un ensemble d'aimants permanents qui sont insérés dans des conteneurs. L'ensemble de la source est placé sous vide (figure 9). L'injection de HF par un câble coaxial a été remplacée récemment par un guide d'onde au moyen d'une transition coaxial/guide (calculée sur mesure) qui s'est révélé bien plus efficace. Les résultats de cette nouvelle configuration sont excellents : 1 mA de D^+ ont été obtenus pour 25W de HF avec une électrode d'extraction percée d'un trou de $\varnothing 4$ mm. La source a aussi montré à ce jour la capacité de production d'ions $Ar^{1+,2+,3+,4+}$ avec des intensités $>$ au μA (figure 10), ce qui valide la possibilité d'expériences d'injection d'ions $n+$ dans le booster de charge. La limitation en état de charge $4+$ pour les tests d'argon est analysée par une pression résiduelle élevée dans la source dans la gamme 10^{-5} - 10^{-6} mbar.

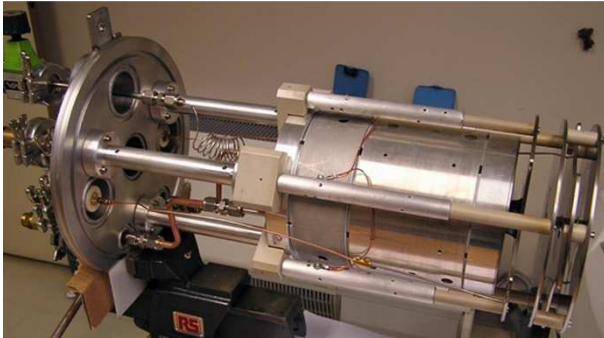


Figure 9. Gauche : photo de la version 2 de la source SUPERCOMIC 5,8 GHz.

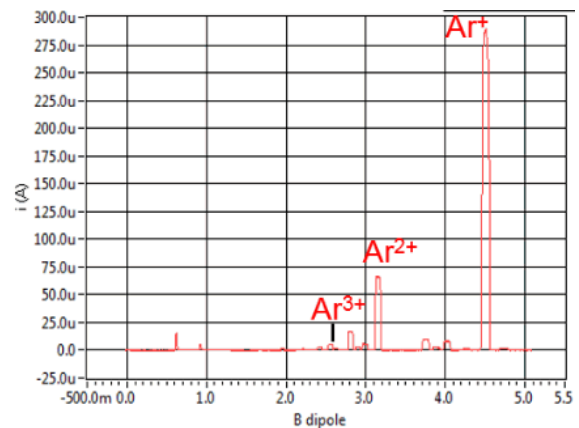


Figure 10: spectre d'ions argon obtenus en optimisant le pic d'argon 1+.

R&D booster PHOENIX SPIRAL2 (gelée)

La phase 2 du projet SPIRAL2 est gelée depuis octobre 2013. Le LPSC était jusqu'alors responsable de la nucléarisation du booster de charge PHOENIX et de la ligne de transport verticale en aval du booster. Les dernières activités ont consisté à finaliser la conception mécanique du booster nucléarisé (figure 11) en interaction avec la société de conseil SEGULA ainsi que la conception de la ligne d'analyse verticale. L'objectif de la nucléarisation du booster est de simplifier au maximum la procédure de montage et de démontage de la source. L'effort local de conception mécanique de la source et de gestion du projet est résumé dans la table 2.

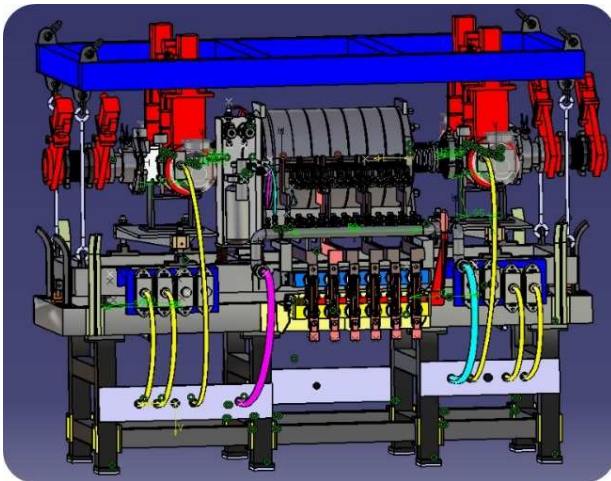


Figure 11: vue de la conception du booster PHOENIX nucléarisé pour SPIRAL2.

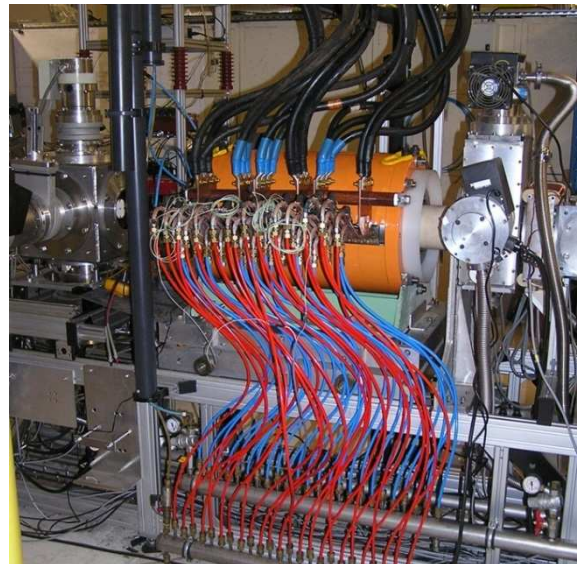


Figure 12: photo du booster SPES monté sur la ligne 1+N+ du LPSC.

Contrat de collaboration LPSC/INFN-LNL : booster SPES

Un contrat de collaboration a été signé entre le CNRS-LPSC et l'INFN LNL pour la réalisation du booster de charge, de type PHOENIX, nécessaire au projet SPES [23]. Le contrat a couvert la période du 01/01/2015 au 31/12/2015. Afin de garantir les performances, la conception du booster est très

proche de l'existant. L'équipe source du LPSC a géré l'approvisionnement, l'assemblage, le montage du booster et ses tests de qualification sur le banc de test 1+N+ qui se sont déroulés de mars à avril 2015. Le fonctionnement du booster a rempli l'ensemble des spécifications demandées par le LNL et le booster a été expédié dans les temps fin 2015 (figure 12). Le LPSC a également fourni la baie d'électronique de commande du booster. Quelques pièces techniques secondaires demandées en avenant au contrat restent à être réceptionnées, assemblées puis envoyées pour clore cette activité de valorisation. La table 2 résume les coûts et ressources associés à cette opération. Les perspectives d'application du booster SPES au LNL sont très intéressantes car il sera associé en aval à un séparateur en masse avec un pouvoir de résolution de 1000, ce qui limitera l'effet du bruit de fond induit par le plasma du booster ECR.

R&D Booster PHOENIX LPSC

L'objectif de la R&D booster PHOENIX dans EMILIE est d'améliorer la reproductibilité des réglages du booster PHOENIX et d'augmenter la stabilité du plasma ECR (Tâche 3.1). Un ensemble de modifications de la structure magnétique du booster PHOENIX a été défini pendant le projet. Chaque modification fera l'objet d'expériences pour mesurer l'effet sur le rendement 1+N+, la stabilité du plasma, la reproductibilité du réglage. Les étapes proposées sont les suivantes :

- Augmentation du pic d'intensité de champ magnétique axial (1.2→1.6 T) du côté de l'injection des ions 1+ en installant un "plug magnétique" à l'entrée de la source (sur la figure 13 gauche, le plug apparaît en rouge).
- Installation d'un hexapole existant renforcé par rapport à celui de PHOENIX booster (1.1T au lieu de 0.8T). voir la figure 13 droite haut.
- Suppression d'une bobine centrale de confinement pour découpler le réglage du champ minimum B_{min} , au centre du plasma, des champs crêtes B_{inj} et B_{ext} (voir figure 13 droite bas). l'objectif est ici de simplifier la procédure de réglage et d'améliorer leur reproductibilité. On peut noter que la longueur du booster est alors réduite de 80 mm tout en conservant la même longueur magnétique utile pour le plasma.
- Conception, construction, puis installation d'un hexapole de grand diamètre ($\varnothing 90$ à 100 au lieu de $\varnothing 78$ mm), pour : améliorer le confinement du plasma (le volume de la chambre à plasma passant de 1,2 à 2,3 litre), réduire la pression de neutres et par conséquent réduire la largeur de la distribution des états de charges dans le spectre N+.

Compte tenu de l'effort effectué par le LPSC pour construire et qualifier le booster de SPES ainsi que pour qualifier le booster de l'upgrade de SPIRAL1 pendant le contrat EMILIE, ces études n'ont pas encore pu être menées à ce jour mais sont programmées pour débiter à partir de l'automne 2016 et s'étendront ensuite sur la période 2017-2018.

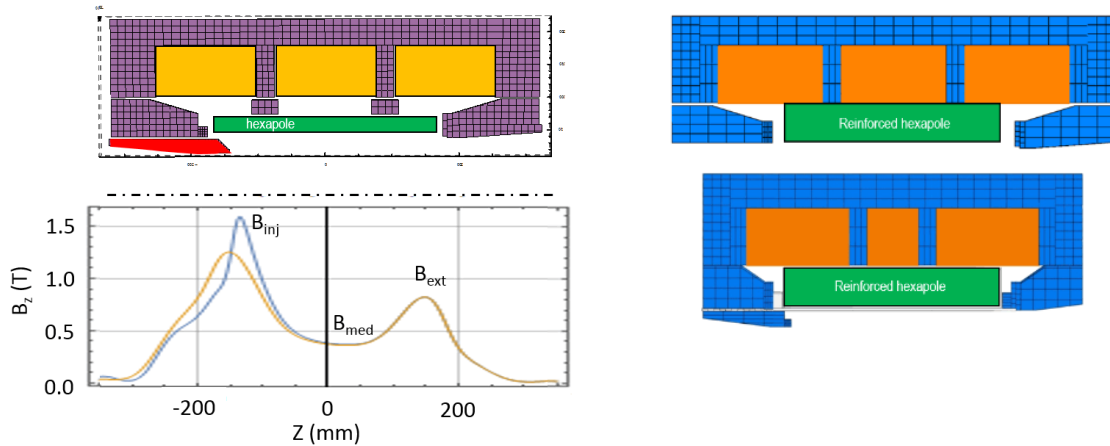


Figure 13. Gauche: Ajout d'un plug en fer sous vide (rouge) pour augmenter le pic de champ magnétique à l'injection B_{inj} . Droite, haut: installation d'un hexapole renforcé. Droite, bas : suppression d'une bobine de confinement centrale pour améliorer le réglage et la stabilité du plasma.

Perspectives de R&D du booster PHOENIX LPSC

Le projet EMILIE permet de financer un upgrade du booster du LPSC (40 k€) dont la conception va débuter prochainement. Ce projet bénéficiera du retour d'expérience des différents boosters en fonctionnement et du savoir-faire local en conception de sources ECR (PHOENIX V2 et V3). L'objectif pour les années à venir, est que le booster LPSC soit au meilleur niveau mondial en termes d'efficacité pour la méthode 1+N+, de poursuivre les études de la physique des plasmas ECR qui ont déjà fourni récemment des résultats remarquables au niveau international, d'innover pour minimiser la pollution et améliorer encore l'efficacité de capture des atomes condensables. L'équipe du LPSC compte poursuivre les expériences de physique où le faisceau 1+ est utilisé comme une sonde pour mesurer les grandeurs physiques du plasma. En particulier, un effort de R&D sera maintenu pour développer une source d'ions capable de produire des faisceaux d'ions condensables de charge 1+,2+,3+,4+ qui pourront être injectés dans le booster. Les perspectives de compréhension améliorée du plasma ECR, basées sur des études expérimentales, et les publications associées sont totalement uniques. Enfin, des expériences du développement des instabilités cinétiques du plasma en fonction du gradient de champ magnétique dans le booster PHOENIX sont planifiées avec l'équipe du JYFL dans le cadre d'une thèse en co-tutelle (UGA-JYFL) qui se déroulera sur la période 2016-2019.

Enfin, il est envisagé de réaliser une jouvence du banc de test 1+N+ pour améliorer significativement son niveau de vide résiduel ($2 \cdot 10^{-7}$ mbar aujourd'hui). Ce point est une étape important pour étudier la contamination des faisceaux N+.

Activité de publication

Depuis l'année 2000, l'activité de R&D booster a fait l'objet d'une thèse, et a permis la publication de 24 articles dans des revues à comité de lecture, de 35 communications orales et de 10 posters en conférence ou colloque.

Ressources et budget

L'activité de R&D booster (et sources 1+ associées) est menée au LPSC par J. Angot (IR) à hauteur d'1 H.AN et P. Sole (AI) à hauteur de 0.8 H.AN. Le budget IN2P3 annuel se situe entre 15 et 30 k€ selon les années. Ce budget permet de maintenir les lignes de tests et financer quelques travaux de R&D. La table 2 en fin de document propose une vue d'ensemble des ressources et budget pour la R&D booster au LPSC.

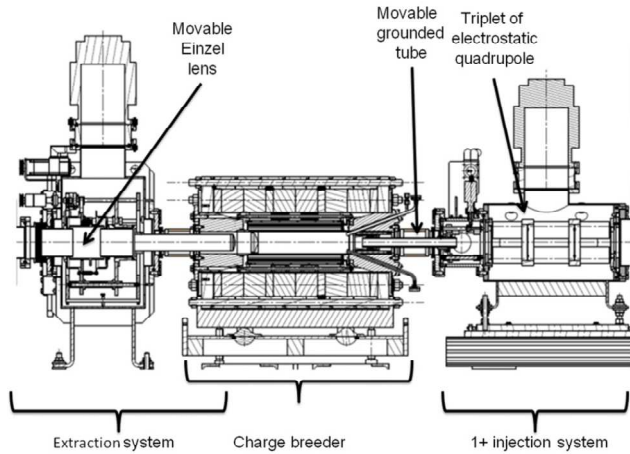


Figure 14 : Coupe du booster de charge pour spiral1 avec ses boîtes injection et extraction

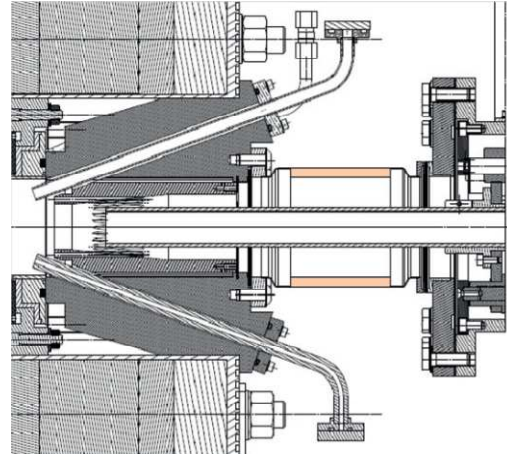


Figure 15 : Zoom sur la partie injection 1+ montrant les deux injections RF, le plug fer symétrisé ainsi que l'électrode de décélération mobile

3.5 R&D BOOSTER SPIRAL1

L'Upgrade de l'installation SPIRAL1 est basée sur l'utilisation de la technique 1+/n+ qui permettra la production de faisceaux d'ions radioactifs de type condensable, ce qui n'était pas possible dans la configuration initiale. Cette technique implique l'utilisation d'un booster de charge pour transformer les faisceaux d'ions mono chargés en faisceaux multichargés adaptés à l'injection dans le cyclotron CIME. Pour ce faire, un booster de charge type ECRIS - Phoenix Booster, développé initialement par le LPSC, a été modifié suite aux expériences menées par L. Maunoury et P. Delahaye (GANIL) sur le booster de charge de l'installation CARIBU du laboratoire Argonne National Laboratory (2013-2014).

Les modifications du booster SPIRAL1 ont consistées principalement en :

- Optimisation du vide par remplacement au maximum des joints élastomères par des joints métalliques et augmentation des conductances de vide ; ajout de 2 fois 1500 l/s de pompage
- Le plug fer à l'injection a été symétrisé
- Possibilité d'injecter deux ondes RF de 14.5GHz et 8-18 GHz
- Le gaz est injecté via un capillaire au plus près de la chambre plasma
- Utilisation, lorsque possible, de composants en aluminium
- Utilisation d'un triplet de quadrupole électrostatique pour la mise en forme et focalisation du faisceau 1+
- Electrode de décélération mobile

Les figures 14 et 15 récapitulent les modifications faites.

Afin de valider la pertinence de ces modifications [21] et les performances du booster de charge de SPIRAL1, une collaboration a été faite en 2015 avec le LPSC pour effectuer sur le banc 1+/n+ les mesures d'efficacité et de temps de transformation 1+/n+. Les résultats obtenus au LPSC [22] ratifient les transformations faites et ont démontré que pour un nombre important d'éléments chimiques de masse <90uma (domaine d'utilisation de l'installation SPIRAL1) le booster de charge est dans les tous premiers au monde regardant ses performances (figure 16).

La mise en opération de ce booster de charge sera effective en 2017. Au vu des résultats obtenus, de la R&D doit être effectué car il y a encore de l'espace pour augmenter les efficacités de transformation surtout pour les éléments légers (sodium) et le paramètre « temps de la

transformation » est mal maîtrisé car il peut passer du simple au sextuple suite à des modifications très légères des réglages source.

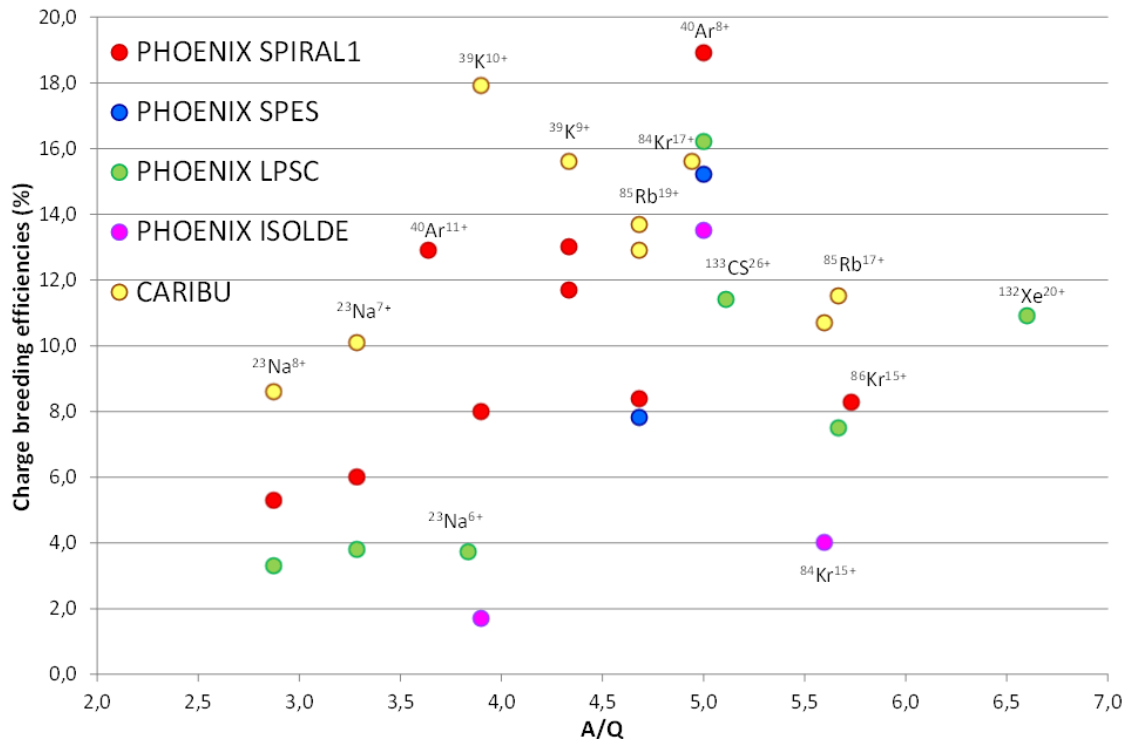


Figure 16: Efficacité de la transformation $1+/n+$ pour les principaux booster en fonctionnement dans le monde en fonction du rapport A/Q de l'ion extrait. On peut noter les améliorations obtenues avec l'upgrade du booster PHOENIX SPIRAL1 par rapport aux booster PHOENIX existants.

Comme on peut le constater sur le [tableau 3](#), pour un même élément comme le potassium $9+$ ou le rubidium $19+$ des temps de transformation $1+ / n+$ peuvent être drastiquement modifiés en comparaison de l'efficacité associée et ceci suite à une modification légère de la fréquence de fonctionnement de la source (quelques MHz) ou une modification de gaz support ou un changement de régime du plasma.

Tableau 3 : Résumé de quelques mesures d'efficacité et temps associés de la transformation 1+ / n+ pour différents booster de charge à travers le monde [22].

Ion	A/Q	SPIRAL1		SPES		CARIBU		LPSC		ISOLDE	
		Efficiency (%)	Charge Breeding Time (ms / q)	Efficiency (%)	Charge Breeding Time (ms / q)	Efficiency (%)	Charge Breeding Time (ms / q)	Efficiency (%)	Charge Breeding Time (ms / q)	Efficiency (%)	Charge Breeding Time (ms / q)
²³ Na ⁶⁺	3.83							3.7	6.0		
²³ Na ⁷⁺	3.29	6.0	7.4			10.1		3.8	7.4		
²³ Na ⁸⁺	2.88	5.3				8.6		3.2	8.8		
³⁹ K ⁹⁺	4.33	13.0	13			15.6	16.7	8	5.4		
³⁹ K ⁹⁺	4.33	11.7	3.9								
³⁹ K ¹⁰⁺	3.90	8.0				17.9	15.7	5.2	6.0	1.7	10
⁴⁰ Ar ⁸⁺	5.00	18.9	10.9	15.2	9.1			16.2	9.8	13.5	
⁴⁰ Ar ¹¹⁺	3.64	12.9	9.8					8.4			
⁸⁴ Kr ¹⁵⁺	5.60					10.7		10.0		4.0	
⁸⁴ Kr ¹⁷⁺	4.94					15.6		12.0	8.5		
⁸⁵ Rb ¹⁷⁺	5.67					11.5	10.6	7.5	13.3		
⁸⁵ Rb ¹⁹⁺	4.68	8.4	15.8	7.8	28.2	13.7	77.9	7.3	12.0		
⁸⁵ Rb ¹⁹⁺	4.68					12.9	12.1				
⁸⁶ Kr ¹⁵⁺	5.73	8.3	3.4								

Comme il a été démontré dans la référence [22] et visible sur la figure 17, il est possible de modifier les distributions d'état de charge selon l'emploi du gaz support et ainsi de choisir l'état de charge le plus adapté au faisceau d'ions radioactifs à produire.

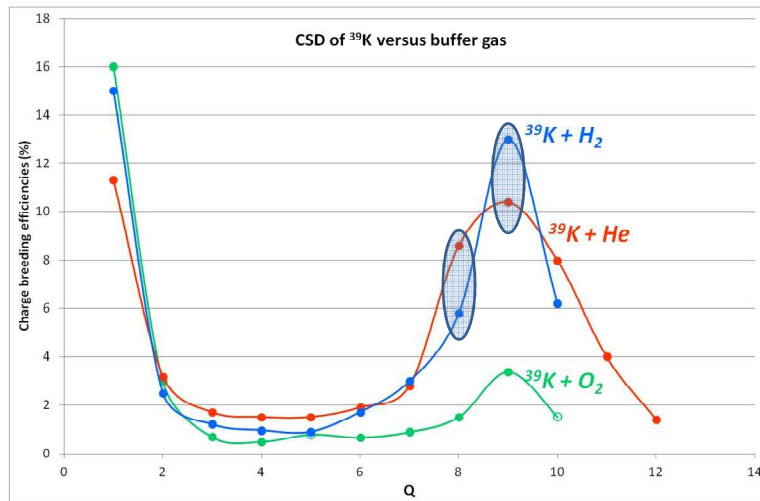


Figure 17: Evolution de la distribution d'états de charge du ³⁹K en fonction du gaz support utilisé. L'emploi de gaz support différent permet de moduler l'état de charge que l'on veut extraire et ainsi adapter l'énergie finale du RIB.

Afin de rendre le booster de charge de SPIRAL1 le plus efficace pour la production d'une large gamme de faisceaux d'ions radioactifs, il est nécessaire :

- De maîtriser les paramètres plasma qui régissent l'efficacité et les temps de la transformation 1+ / n+ => nécessite la mise en œuvre de simulations numériques à confronter aux nombreux résultats expérimentaux
- De déterminer les paramètres d'injections du faisceaux 1+ dans le booster de charge qui maximisent la capture des ions 1+ par le plasma ECR => nécessite la mise en œuvre de simulations numériques

- Suite à la mise en opération du booster de charge SPIRAL1 avec la production d'ions radioactifs, de confronter les paramètres en radioactif avec les paramètres en stable

Perspectives de la R&D Booster SPIRAL1

Le travail qui va être effectué sur le booster de charge à GANIL va s'inscrire au sein d'une thèse. Il va être à la fois expérimental et théorique. Il vise à maîtriser les trois observables suivantes : efficacité de capture du faisceau 1+ par un plasma RCE, temps de la transformation 1+/n+ et transmission d'un faisceau 1+ à travers le booster de charge. Le travail expérimental va s'inscrire autour de la production des nouveaux faisceaux d'ions radioactifs et des optiques d'injection dans le booster de charge. Le travail théorique va avoir deux directions différentes :

- insertion dans le code SIMION du formalisme de Langevin pour reproduire les efficacités de capture d'un faisceau 1+ par un plasma RCE.
- insertion dans le code SIMION des collisions coulombiennes réalistes pour reproduire les efficacités de capture d'un faisceau 1+ par un plasma RCE.

Tout au long du travail théorique, les résultats du code seront confrontés aux nombreuses mesures déjà réalisées ou aux mesures à effectuer pour valider certaines fonctions du code.

Le travail expérimental et le travail de simulation seront menés en parallèle. Le calendrier du projet de R&D est le suivant :

Période 10/2016 – 07/2017

- Mise en place du code utilisant le formalisme de Langevin, comparaison avec les données obtenues au LPSC et dans le cadre du réseau EMILIE
- Commissioning du booster de charge de SPIRAL1 en stable et en radioactif ; analyse des données collectées dans le cas des faisceaux radioactifs

Période 09/2017 – 07/2018

- Mise en place du code de Collisions coulombiennes réelles, comparaison avec les données obtenues au LPSC et dans le cadre du réseau EMILIE
- Selon les nouveaux faisceaux demandés en radioactif ; préparation et opération du booster de charge, analyse des données collectées

Période 09/2018 – 12/2018

- Comparaison des deux codes et extraction des paramètres pertinents permettant de mieux maîtriser les efficacités de capture des ions monochargés et du temps de la transformation 1+/n+
- Selon les nouveaux faisceaux demandés en radioactif ; préparation et opération du booster de charge, analyse des données collectées
- Selon le pouvoir prédictif des codes de calcul, tests sur le booster de charge pour prouver l'augmentation de l'efficacité de capture et la maîtrise du temps de la transformation 1+/n+

Période 01/2019 – 09/2019

- Optimisation des codes numériques
- Rédaction de la thèse

Ressources et budget

Ressources humaines : 4.5 homme.an dont Thésard, Ingénieurs, Physicien sur la période 2016-2019.

Ressources financières : Le budget est très faible car les équipements existent déjà ; seul un ordinateur puissant sera nécessaire : 4 k€

Table 2 : synthèse ressource et budget activité R&D booster

Table 2 : budget et ressource sur l'activité booster de charge ECR pour les projets EMILIE, SPES, upgrade SPIRAL1 et R&D booster

projet	période	Budget global	Ressource totale pendant la période	fonction	Labo.	nom
R&D EMILIE	01/2012 - 01/2017	250 k€ IN2P3	4 H.AN 0.1 H.AN 0.1 H.AN 4 H.AN 0.05 H.AN 0.5 H.AN 1.5 H.AN	IR publiant IR publiant IR publiant AI opération IE calculs IR publiant CR publiant	LPSC LPSC LPSC LPSC LPSC GANIL GANIL	J. Angot T. Lamy T. Thuillier P. Sole J. Giraud L. Maunoury P. Delahaye
Contrat SPES	01/2015 - 01/2016	500k€ SPES LNL	1 H.AN 0.05 H.AN 0.1 H.AN 0.1 H.AN 0.1 H.AN 0.05 H.AN 0.1 H.AN 1 H.AN	IR publiant AI montage AI montage IR publiant T câbleur T câbleur T administration AI mécanique	LPSC LPSC LPSC LPSC LPSC LPSC LPSC LPSC	J. Angot P. Sole J. Jacob T. Lamy J.P. Scordilis E. Tourba F. Petiot G. Frêche
R&D Booster SPIRAL2 (gelée)	2009-2013	Budget SPIRAL2 <30 k€	0.5 H.AN 1 H.AN 1,4 H.AN	IR Publiant IE Publiant IE mécanique	LPSC LPSC LPSC	T. Lamy J. Angot C. Fourel
R&D booster SPIRAL1 Thèse	09/2016 - 09/2019	4 k€ GANIL	1.5 H.AN 3 H.AN 0.6 H.AN	IR Publiant Doctorant CR publiant	GANIL GANIL GANIL	L. Maunoury P. Delahaye

Références

Les références de la partie 3 sont reportées dans l'Annexe 1.

Annexe 1 : Publications et références dans le document

Liste des publications et références de la partie 1

Référence de la section 1.1

- [1] C. Lyneis et al., Rev. Sci. Instrum. 81, 02A201 (2010)
- [2] P. A. Zavodszky *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 77, 03A334 (2006)
- [3] H. W. Zhao *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 77, 03A333 (2006)
- [4] T. Nakagawa *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 79, 02A327 (2008)
- [5] L. Sun *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 87, 02A707 (2016)
- [6] G. Ciavola *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 77, 03A303 (2006)
- [7] C. Lyneis *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 83, 02A301 (2012)
- [8] D. Z. Xie *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 87, 02A702 (2016)
- [9] L. Sun, communication privée

Liste des Publications de la section 1.2

- [1] T. Thuillier *et al.*, Advanced magnetic calculations for high magnetic field compact ion source, Review of Scientific Instruments 75, 1526 (2004)
- [2] T. Thuillier *et al.*, High current beam transport with PHOENIX 28 GHz : experiment and simulation, Proceedings of the 16th International Workshop on ECR Ion Sources, Berkeley, USA, September 2004, AIP Conf. Proc. 749, pp. 41-46.
- [3] T. Thuillier *et al.*, A-Phoenix, an electron cyclotron resonance ion source for the Spiral 2 facility, Review of Scientific Instruments 77, 03A323 (2006)
- [4] T. Thuillier *et al.*, First plasma of the A-PHOENIX electron cyclotron resonance ion source, Rev. of Scient. Instrum. 79, 02A330 (2008)
- [5] L. Schachter *et al.*, The influence of ambipolarity on plasma confinement and the performance of ECRIS, Rev. of Scient. Instrum. 79, 02A329 (2008)
- [6] H. R. Kremser *et al.*, Comparison between an Allison scanner and the KVI-4d emittance meter, Proceedings of the 18th International Workshop on ECR Ion Sources, Chicago, USA, September 2008, www.jacow.org.
- [7] T. Thuillier *et al.*, Status report of the heavy ions source research and development for Spiral2, Rev. of Scient. Instrum. 81, 02A316 (2010)
- [8] A. C. Villari *et al.*, PK-ISIS: a new superconducting ECR ion source at Pantechnik, Proceedings of the 19th International Workshop on ECR Ion Sources, Grenoble, France (2010), JACoW online proceedings, www.jacow.org.
- [9] C. Peaucelle *et al.*, First A/Q=3 beams of Phoenix V2 on the Spiral2 LEPT, Proceedings of the 19th International Workshop on ECR Ion Sources, Grenoble, France (2010), JACoW online proceedings, www.jacow.org.
- [10] T. Thuillier *et al.*, Roadmap for the design of a superconducting electron cyclotron resonance ion source for Spiral2, Rev. of Scient. Instrum. 83, 02A339 (2012)
- [11] G. Gaubert *et al.*, Pantechnik new superconducting ion source: PKISIS, Rev. Sci. Instrum. 83, 02A344 (2012)
- [12] T. Thuillier *et al.*, Recent Results of PHOENIX V2 and New Prospects with PHOENIX V3, Proceedings of the 20th International Workshop on ECR Ion Sources, Sydney, Australia (2012), JACoW online proceedings, www.jacow.org.
- [13] C. Lyneis *et al.*, A mode converter to generate a Gaussian-like mode for injection into the VENUS electron cyclotron resonance ion source, Rev. Sci. Instrum. 85, 02A932 (2014)
- [14] C. Barué *et al.*, Metallic beam developments for the SPIRAL 2 project, Rev. Sci. Instrum. 85, 02A946 (2014)
- [15] T. Thuillier *et al.*, Investigation on the electron flux to the wall in the VENUS ion source, Rev. Sci. Instrum. 87, 02A736 (2016)
- [16] H. Koivisto *et al.*, Ion source research and development at University of Jyväskylä: Studies of different plasma processes and towards the higher beam intensities, Rev. Sci. Instrum. 87, 02A725 (2016)
- [17] T. Thuillier *et al.*, Status of the SPIRAL2 injector commissioning, Rev. Sci. Instrum. 87, 02A733 (2016)

Liste des références de la section 1.3

- [1] : <http://pro.ganil-spiral2.eu/users-guide/accelerators>

Liste des publications de la section 1.4

- [1] T. Thuillier *et al.*, Study of pulsed electron cyclotron resonance ion source plasma near breakdown: The preglow, Rev. Sci. Instrum. 79, 02A314 (2008).
- [2] O. Tarvainen *et al.*, The role of seed electrons on the plasma breakdown and *preglow* of electron cyclotron resonance ion source, Rev. Sci. Instrum. 81, 02A303 (2010)

- [3] I.V. Izotov *et al.*, Experimental and theoretical investigation of the Preglow in ECRIS, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008, 36/4, pp.1494-1501.
- [4] T. Lamy *et al.*, 60-GHz ECR Ion Sources, *13th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology (HIAT 2015)*, Sep 2015, Yokohama, Japan, JACoW, pp.277-281 2015, HIAT2015.
- [5] T. Lamy, First ion beams extracted from a 60GHz ECR ion source using polyhelices technique, *European Magnetic Field Laboratory Users Meeting 2015*, Jul 2015, Grenoble, France
- [6] T. Lamy *et al.* First ion beams extracted from a 60 GHz ECR ion source using polyhelices technique, *21st International Workshop on ECR Ion Sources (ECRIS 2014)*, Aug 2014, Nizhny Novgorod, Russia
- [7] M. Bakulin *et al.* The 60 GHz 300 kW gyrotron system for ECR ion source of new generation, *21st International Workshop on ECR Ion Sources (ECRIS 2014)*, Aug 2014, Nizhny Novgorod, Russia.
- [8] E. Wildner *et al.* Design of a neutrino source based on beta beams, *Physical Review ST Accelerators and Beams*, 2014, 17, pp.071002.
- [9] T.R. Edgecock, O. Caretta, T. Davenne, C. Densam, M. Fitton *et al.* High intensity neutrino oscillation facilities in Europe *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, 2013, 16, pp.021002.
- [10] M. Marie-Jeanne *et al.*, Status of the SEISM experiment, *20th International Workshop on Electron Cyclotron Resonance Ion Sources (ECRIS-2012)*, Sep 2012, Sydney, Australia. JaCoW online proc., ECRIS12, pp.111-113, 2012
- [11] T. Lamy. Status and perspectives of high power ion sources, *ECOS 2012 Advances and challenges in nuclear physics with high intensity stable beams*, Jun 2012, Como Lake, Italy. 2012
- [12] M.I. Bakulin *et al.* 60 GHz pulsed gyrotron complex for plasma creation in ECR multicharged ion source of new generation, *24th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons*, Jun 2012, Nizhny Novgorod, Russia
- [13] E. Wildner *et al.* Beta beams for precision measurement of neutrino oscillation parameters, *International Particle Accelerator Conference - IPAC'12*, May 2012, New Orleans, United States. Joint Accelerator Conferences Website, IPAC2012, pp.3939-3941, 2012
- [14] T. Lamy *et al.* Split magnet for efficient electron cyclotron resonance ion sources developments, *22th International Conference on Magnet Technology (MT-22 2011)*, Sep 2011, Marseille, France. 22, pp.4101804, 2011
- [15] T. Lamy *et al.* 60 GHz ECR source status, *13th International Workshop on Neutrino Factories, Super Beams and Beta Beams (NUFACT 11)*, Aug 2011, Geneva, Switzerland
- [16] O. Tarvainen *et al.* Pulsed Operation of ECR Ion Sources - Plasma Physics and Diagnostics, *8th International Workshop "Strong Microwaves and Terahertz Waves : Sources and Applications"*, Jul 2011, Nizhny Novgorod, Russia. Russian Academy of Sciences, pp.43, 2011
- [17] T. Lamy *et al.* An ECR ion source with a high power - high frequency gyrotron, the 60 GHz 'SEISM' project, *8th International Workshop "Strong Microwaves and Terahertz Waves : Sources and Applications"*, Jul 2011, Nizhny Novgorod, Russia. Russian Academy of Sciences, pp.281
- [18] E. Wildner *et al.* Beta beams: an accelerator-based facility to explore neutrino oscillation physics, *2nd International Particle Accelerator Conference (IPAC'11)*, 2011, San Sebastian, Spain. WEPS024, pp.2535-2537, 2011
- [19] V. Zorin *et al.* Preglowⁿ investigation in ECR discharge @ 37 GHz, 100kW, *XIXth International Workshop on ECR Ion Sources (ECRIS 2010)*, Aug 2010, Grenoble, France. pp.TUCOBK02, 2010
- [20] M. Marie-Jeanne *et al.* Measurement of the Sixty GHz ECR Ion Source using Megawatt magnets - SEISM magnetic field map, *XIXth International Workshop on ECR Ion Sources (ECRIS 2010)*, Aug 2010, Grenoble, France. pp.MOCOCK04, 2010
- [21] V.G. Zorin *et al.* ECR breakdown of heavy gases in open mirror trap, *8th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2010)*, 2010, Novosibirsk, Russia. American Nuclear Society, 59, pp.140-143, 2011
- [22] L. Latrasse *et al.* SEISM : a 60GHz cusp electron cyclotron resonance ion source, *The 13th International Conference on Ion Sources (ICIS'09)*, 2009, Gatlinburg, United States. AIP Press, 81, pp.02A324, 2010,
- [23] T. Thuillier *et al.* A 60 GHz electron cyclotron resonance ion source for pulsed radioactive ion beam production, *18th International Workshop on ECR Ion Sources (ECRIS08)*, Sep 2008, Chicago, United States. Joint Accelerator Conferences Website, pp.TUCO-A03, 2008
- [24] T. Thuillier *et al.* High frequency ECR ion source (60 GHz) in pre-glow mode for bunching of beta-beam isotopes, *10th International Workshop on Neutrino Factories, Super Beams and Beta Beams (NUFACT08)*, Jul 2008, Valencia, Spain. Proceedings of Science, Nufact08, pp.089, 2008

Liste des références de la partie 2

- [1] U. Koster, Prog. In Part. and Nucl. Phys, vol. 46, p. 411, 2001.
- [2] L. Biassetto, J. Nucl Mater, vol. 26, p. 68, 2010.
- [3] B. Hy, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., vol. B288, p. 34, 2012.
- [4] S. Tusseau-Nenez, Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res., vol. B370, p. 19, 2016.
- [5] A. Gottberg, Nucl. Instrum. Meth, vol. B376, p. 8, 2016.
- [6] G. J. Beyer, Nucl. Instrum. Meth, vol. 96, p. 437, 1971.
- [7] M. Remy et R. Haug, Rev. Sci. Instrum, vol. 41, p. 650, 1970.
- [8] P. G. Johnson, Nucl. Instrum. Meth, vol. 41, p. 83, 1973.
- [9] H. L. Ravn, Nucl. Instrum. Meth., vol. 123, p. 131, 1975.
- [10] B. Vosicki, Nucl. Instrum. Meth, vol. 186, p. 307, 1981.
- [11] M. Menna, Nucl. Instrum. Meth., vol. B266, p. 4391, 2008.
- [12] F. Schwellnus, Nucl. Instrum. Meth, vol. B267, p. 1856, 2009.
- [13] R. Kirchner et E. Roeckl, Nucl. Instrum. Meth, vol. 139, p. 276, 1976.
- [14] S. Sundell et H. Ravn, Nucl. Instrum. Meth, vol. B70, p. 160, 1992.
- [15] E. Hagebo, Nucl. Instrum. Meth, vol. B70, p. 165, 1992.
- [16] M. C. Mhamed, Rev. Sci. Instrum, vol. 77, p. 03A702, 2006.
- [17] C. Lau, Rev. Sci. Instrum., vol. 79, p. 02A903, 2008.
- [18] M. C. Mhamed, Rev. Sci. Instrum, vol. 79, p. 02B911, 2008.
- [19] J. M. Nitschke, Nucl. Instrum. Meth, vol. A236, p. 1, 1985.
- [20] S. Essabaa, Nucl. Instrum. Meth, vol. B317, p. 218, 2013.
- [21] H. L. Ravn, J. Inorg. Nucl. Chem., vol. 37, p. 383, 1975.
- [22] P. Jardin et al., Nucl. Instrum. Meth., vol. 376B, p. 64, 2016.
- [23] P. Chauveau, Nucl. Instrum. Meth, vol. 376, p. 35, 2016.
- [24] P. Delahaye, Nucl. Instrum. Meth., vol. A 693, p. 104, 2012.
- [25] L. Maunoury, Rev. Sci. Instrum., vol. 87, p. 02B508, 2016.
- [26] N. Lecesne, Rev. Sci. Instrum, vol. 81, p. 02A910, 2010.
- [27] J. Henares, Rev. Sci. Instrum, vol. 85, p. 02B914, 2014.
- [28] J. L. Henares, Nucl. Instrum. Meth, 2015.
- [29] L. Hijazi, Phys. Proc, vol. 77, p. 15, 2015.
- [30] J. L. Henares, Rev. Sci. Instrum, vol. 87, p. 02B701, 2016.
- [31] P. Jardin et al., Nuc. Instrum. Methods B 241 (2005) 940
- [32] C. Huet-Equibec, Nuc. Instrum. Methods B 240 (2005) 752
- [33] A. Pichard et al., Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy (2008), <http://www.jacow.org>
- [34] A. Pichard et al., Rev. Scient. Instrum. 81, 02A908 (2010)

Liste des références de la partie 3

- [1] <http://rex-isolde.web.cern.ch/rexebis>
- [2] R. Geller, C. Tamburella and J. L. Belmont, The ISOL–MAFIOS Source, *Rev. Sci. Instrum.* **67**, 1281 (1996)
- [3] P. Sortais *et al.*, Electron cyclotron resonance charge breeder, *Rev. Sci. Instrum.* **71**, 617 (2000).
- [4] T. Lamy *et al.*, The development of an ECRIS charge-state breeder for generating RIB's, *AIP Conf. Proc.* **576**, 281 (2001)
- [5] <http://cerncourier.com/cws/article/cern/29160>
- [6] P. Delahaye *et al.*, Recent results with the Phoenix booster at ISOLDE, *Review of Scientific Instruments* **77**, 03B105 (2006).
- [7] C. Barton *et al.*, Status of the PHOENIX ECR charge breeder at ISOLDE CERN, *Rev. of Scient. Instrum.*, **79**, 02A905, 2008
- [8] <https://cas.web.cern.ch/cas/Slovakia-2012/Lectures/Wenander.pdf>
- [9] F. Ames *et al.*, Charge state breeding of radioactive ions with an electron cyclotron resonance ion source at TRIUMF, *Rev. Sci. Instrum.* **77**, 03B103 (2006);
- [10] F. Ames *et al.*, Charge state breeding for the acceleration of radioactive ions at TRIUMF, *Rev. Sci. Instrum.* **81**, 02A903 (2010).
- [11] N. Imai *et al.*, KEKCB electron cyclotron resonance charge breeder at TRIAC, *Rev. Sci. Instr.* **79**, 02A906, (2008)
- [12] R. Vondrasek *et al.*, Status of the electron cyclotron resonance charge breeder for the Cf252 fission source project at ATLAS, *Rev. Sci. Instrum.* **79**, 02A901 (2008)
- [13] R. Vondrasek *et al.*, Operational experience with the Argonne National Laboratory Californium Rare Ion Breeder Upgrade facility and electron cyclotron resonance charge breeder, *Rev. Sci. Instrum.* **85**, 02B903 (2014)
- [14] L. Neri *et al.*, A 3D Monte Carlo code for the modeling of plasma dynamics and beam formation mechanism in electron cyclotron resonance ion sources, *Review of Scientific Instruments* **83** 02A330 (2012)
- [15] A. Galata *et al.*, A three-dimensional numerical modelling of the PHOENIX-SPES charge breeder based on the Langevin formalism, *RSI*, **87**, 02B507 (2016)
- [16] <http://www.emilie-eurisol.eu/>
- [17] P. Delahaye *et al.*, Optimizing charge breeding techniques for ISOL facilities in Europe: Conclusions from the EMILIE project, *Rev. of Scient. Instrum.* **87**, 02B510 (2016);
- [18] O. Tarvainen *et al.*, Injected 1+ ion beam as a diagnostic tool of charge breeder ECR ion source plasmas, *Plasma Sources Science and Technology* **24** 035014 (2015)
- [19] O. Tarvainen *et al.*, Diagnostics of a charge breeder ECRIS helium plasma with injection of $^{23}\text{Na}^{1+}$ ions, *Physical Review Accelerators and beam* **19** 053402 (2016)
- [20] P. Sortais *et al.*, Ultracompact/ultralow power electron cyclotron resonance ion source for multipurpose applications, *Rev. Sci. Instrum.* **81**, 02B314 (2010)
- [21] P. Delahaye *et al.*, Charge breeding of light metallic ions: Prospects for SPIRAL, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment* **693** 104 (2012)
- [22] L. Maunoury *et al.*, Charge breeder for the SPIRAL1 upgrade: preliminary results, *Review of Scientific Instruments* **87** 02B508 (2016)
- [23] A. Galatà *et al.*, The new ECR charge breeder for the Selective Production of Exotic Species project at INFN—Laboratori Nazionali di Legnaro, *Rev. Sci. Instrum.* **87**, 02B503 (2016)