



HAL
open science

La production de faisceaux radioactifs

M. Loiselet

► **To cite this version:**

M. Loiselet. La production de faisceaux radioactifs. École thématique. Ecole Joliot Curie "Physique nucléaire instrumentale : de la mesure à la grandeur physique", Maubuisson, (France), du 9-15 septembre 2001 : 20ème session, 2001. cel-00654212

HAL Id: cel-00654212

<https://cel.hal.science/cel-00654212v1>

Submitted on 21 Dec 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LA PRODUCTION DES FAISCEAUX RADIOACTIFS

Marc LOISELET

*Centre de Recherches du Cyclotron
Université catholique de Louvain
Louvain-la-Neuve, Belgique*

Résumé

Les grandes étapes de la production des faisceaux radioactifs par la méthode de la séparation en ligne sont étudiées. Elles sont d'abord illustrées à partir de l'exemple particulier du faisceau d'hélium-6 accéléré à Louvain-la-Neuve. Les défis à relever lors de chacune de ces étapes sont ensuite détaillés et les solutions proposées par divers laboratoires sont discutées. Trois exemples d'installations basées sur des schémas très différents sont analysés. Enfin, les développements actuellement à l'étude sont brièvement décrits.

Abstract

The major steps involved in the production of radioactive beams by the on-line separation method are studied. They are first illustrated by the particular example of the acceleration of helium-6 at the Louvain-la-Neuve laboratory. For each of these steps, the challenges are described and the solutions proposed by various laboratories discussed. Three existing facilities based on very different schemes are analyzed. Finally, the developments presently under study are briefly described.

1. Introduction

Dès 1983, l'importance des faisceaux radioactifs avait été soulignée par W. Fowler lors de la réception du prix Nobel pour ses travaux en astrophysique nucléaire¹:

"It is my view that continued development and application of radioactive ion beam techniques could bring the most exciting results in laboratory Nuclear Astrophysics in the next decade. For example, the rate of the $^{13}\text{N}(p,\gamma)^{14}\text{O}$ reaction, which will be studied as $^1\text{H}(^{13}\text{N},\gamma)^{14}\text{O}$, is crucial to the operation of the so-called fast CN cycle."

Depuis lors, et suite aux premières expériences menées avec succès dans différents laboratoires avec des faisceaux radioactifs produits en vol d'abord, avec des faisceaux post-accelérés ensuite, l'intérêt de ces faisceaux non seulement pour l'astrophysique nucléaire mais également pour la physique nucléaire n'a fait que grandir. Le grand nombre de projets d'installation de faisceaux radioactifs actuellement à l'étude dans le monde en est une preuve. Le rapport NuPPEC² paru en 2000 et intitulé "Radioactive Nuclear Beam Facilities" présente de façon extensive ces projets. Les différentes techniques actuellement envisagées pour établir une installation de "seconde génération" en Europe (projet EURISOL) y sont abondamment détaillées.

L'exposé ci-dessous se concentrera sur la méthode de production des faisceaux radioactifs par la méthode ISOL. Il partira de l'expérience qui a été acquise à Louvain-la-Neuve pour mettre

en évidence certains aspects caractéristiques des installations de faisceaux radioactifs. Faute de temps, l'option a été prise de privilégier les exemples tirés d'installations en fonctionnement en septembre 2001. Les informations concernant les installations dont la mise en fonctionnement est prévue dans un avenir plus ou moins proche seront trouvées dans le rapport NuPPEC qui constitue actuellement la meilleure référence sur ce sujet en évolution constante.

2. Méthodes de production des faisceaux radioactifs

Deux types de méthodes sont utilisées pour produire des faisceaux radioactifs: la méthode dite de la production en vol qui sera brièvement décrite ci-dessous, et la méthode dite de séparation en ligne ou "ISOL method" (acronyme de Isotope Separation On Line).

2.1. La production des faisceaux radioactifs en vol

Dans cette méthode, les faisceaux radioactifs sont produits par fragmentation d'un faisceau d'ions lourds accélérés à quelques dizaines de MeV par nucléon (typiquement 100 MeV/A) sur une cible mince. Les produits de la réaction, qui sortent de la cible avec une vitesse proche de celle du faisceau initial, sont séparés par une analyse magnétique couplée à un dégradeur d'énergie pour permettre l'identification en Z.

La production en vol est utilisée en France (GANIL), en Allemagne (GSI), au Japon (RIKEN), au Etats-Unis (MSU), en Russie (Dubna)^{3,4,5}. Elle a l'avantage de permettre la production de noyaux radioactifs de temps de vie très court (μs) et de grande énergie, ce qui permet de les détecter même si seulement quelques atomes par seconde sont produits. L'énergie de ces faisceaux est fixée par l'énergie du faisceau primaire et présente une distribution qui peut-être relativement grande ce qui, dans certains cas, constitue une limitation. Au laboratoire du GSI, ces faisceaux peuvent être injectés dans un synchrotron pour être post-accélérés à 1 GeV/A.

2.2. La production des faisceaux radioactifs en ligne

Contrairement à la méthode précédente, les noyaux exotiques produits par le faisceau d'un premier accélérateur sont arrêtés dans la cible de production. Après en avoir été extraits, ils sont ionisés dans une source d'ions et injectés après séparation dans un second accélérateur qui les amène à l'énergie requise. Cette technique permet une plus grande flexibilité dans le choix de l'énergie du faisceau secondaire ainsi qu'une meilleure qualité optique de celui-ci. Elle est cependant difficilement applicable aux noyaux de temps de vie inférieur à quelques ms.

Les deux méthodes sont complémentaires à de nombreux égards. Nous nous concentrerons ici uniquement sur différents aspects de la production des faisceaux radioactifs par la méthode en ligne.

3. Les grandes étapes de la production des faisceaux radioactifs post-accélérés

La production des faisceaux radioactifs par la méthode en ligne comporte 5 étapes importantes que l'on retrouve dans les différents schémas proposés :

- la production des noyaux radioactifs
- leur extraction de la cible
- l'ionisation
- la séparation des faisceaux isobares ou analogues
- l'accélération.

L'exemple du faisceau d' ${}^6\text{He}^{1+}$ ($T_{1/2} = 0.8$ s) tel qu'il est produit et accéléré dans l'installation de Louvain-la-Neuve, permet d'illustrer à partir d'un cas particulier ces différentes étapes.

Le schéma de cette installation est présenté à la figure 1. Le premier cyclotron (CYCLONE30) accélère des protons jusqu'à une énergie maximale de 30 MeV avec des intensités pouvant aller jusqu'à $500 \mu\text{A}$, ce qui représente une puissance de 15 kW dans le faisceau. La nature et l'énergie du projectile imposent de produire le noyau ${}^6\text{He}$ par la réaction ${}^7\text{Li}(p, 2p){}^6\text{He}$, dont le rendement en cible épaisse est de $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ ${}^6\text{He}$ par proton.

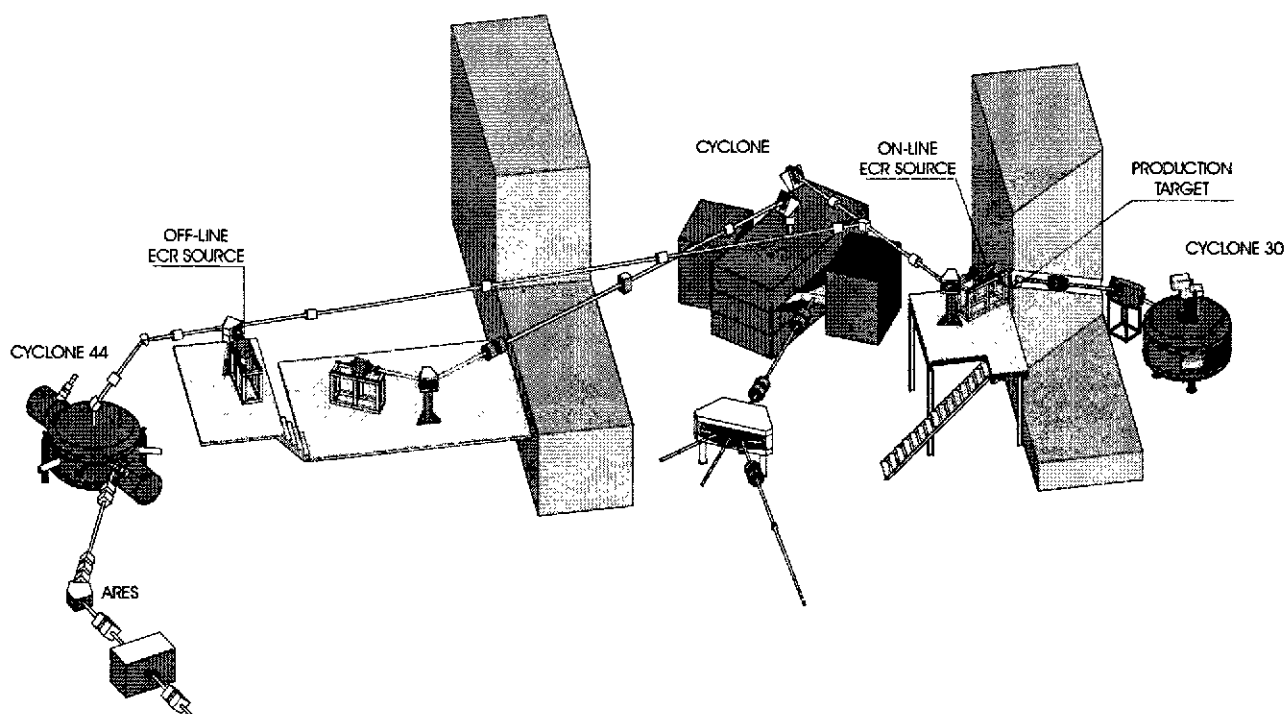


Figure 1: Vue d'ensemble de l'installation de Louvain-la-Neuve.

La cible est constituée de poudre de LiF comprimée dans un creuset en graphite, lui-même monté sur un support en cuivre refroidi à l'eau (figure 2). Une fenêtre de graphite mince (épaisseur: 0.5 mm) recouvre le creuset. Pour éviter de concentrer la puissance du faisceau primaire sur une petite surface, un aimant de balayage permet d'étaler le faisceau sur un diamètre de 50 mm. Bien que la cible ait été testée pendant plusieurs heures avec un faisceau de $270 \mu\text{A}$, l'intensité du faisceau primaire est limitée à $\sim 200 \mu\text{A}$ (soit 6 kW) pour garantir la fiabilité. Pendant l'irradiation,

le fluorure de lithium passe en phase liquide (t° de fusion = 845 °C). La même cible est également utilisée pour la production de ^{19}Ne ($T_{1/2} = 17$ s) et ^{18}Ne ($T_{1/2} = 1.7$ s).

L'hélium-6 étant un gaz noble, il diffuse à travers la fenêtre en graphite (qui est poreuse pour les gaz) et est pompé dans la source d'ions. Le temps de transfert de la cible à la source est de l'ordre de 1s. Ce temps assez long est dû à la distance entre la cible et la source (~ 1.5 m)^a.

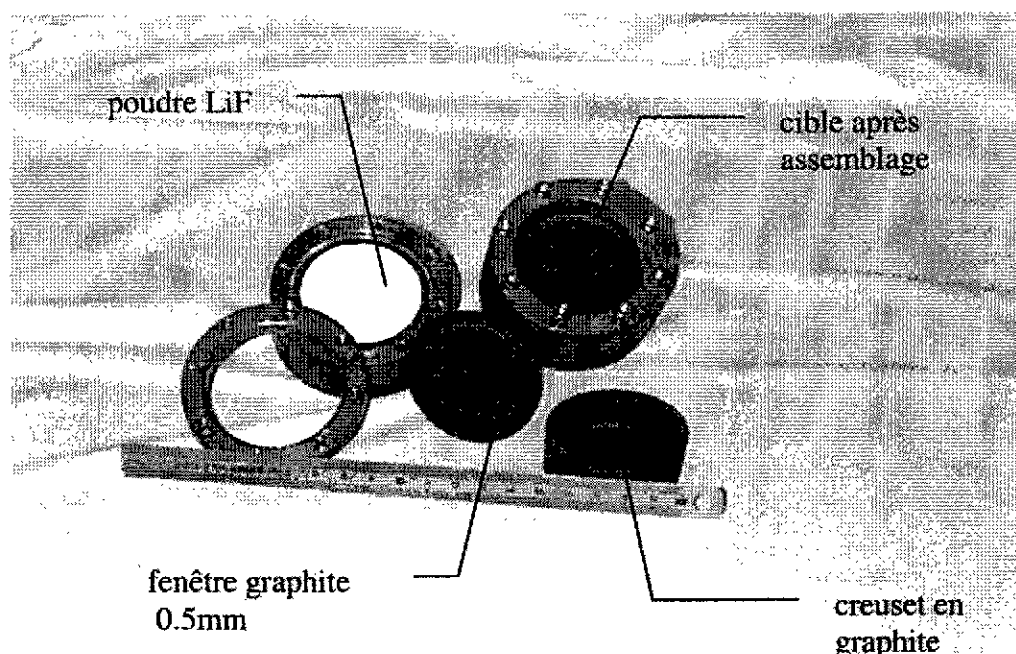


Figure 2: cible de production du faisceau d' ^6He

La source d'ions utilisée à Louvain-la-Neuve est une source de type ECR (Electron Cyclotron Resonance)^b. Ce type de source permet d'obtenir des ions multichargés avec une bonne efficacité d'ionisation. Typiquement celle-ci est de l'ordre de 35 % pour He^{1+} . Elle varie en fonction de la pression dans la source, qui elle-même dépend de la quantité de gaz provenant de la cible (dégazage, gaz de balayage).

Après extraction de la source, les ions de rapport $M/Q = 6$ sont sélectionnés par un aimant d'analyse avant d'être injectés dans le deuxième cyclotron (CYCLONE). Ce dernier joue non seulement le rôle d'accélérateur mais aussi celui de séparateur de masse. En effet, le faisceau $^6\text{He}^{1+}$ est injecté dans le cyclotron avec d'autres faisceaux de rapport M/Q très voisins. Ces faisceaux proviennent soit du gaz résiduel de la source (ex: $^{18}\text{O}^{3+}$, $^{12}\text{C}^{2+}$), soit d'éléments stables ou radioactifs extraits de la cible (ex: $^6\text{Li}^{1+}$, $^{18}\text{F}^{3+}$, $^{18}\text{Ne}^{3+}$). Le faisceau d' $^6\text{He}^{1+}$, dont l'intensité à la sortie de la source est inférieure à 1 nA, est ainsi injecté dans le post-accélérateur en compagnie d'un faisceau de $^{12}\text{C}^{2+}$ beaucoup plus intense (quelques μA). Seul le faisceau d' $^6\text{He}^{1+}$ est éjecté de la machine car il reste en phase avec la tension d'accélération jusqu'au rayon d'extraction. Les faisceaux

^a A l'origine, le dispositif avait été prévu pour montrer la faisabilité d'un faisceau de ^{13}N dont le temps de demi-vie est de 10 min.

^b Dans ce type de source, on crée un plasma qui est confiné dans une "bouteille magnétique". Les électrons de ce plasma sont chauffés par des ondes électromagnétiques de fréquence égale à la fréquence de rotation de ces électrons dans certaines zones de la bouteille magnétique.

contaminants dont la masse diffère de plus de $2 \cdot 10^{-4}$ ne respectent pas cette condition d'isochronisme, et sont décélérés avant d'atteindre le rayon d'extraction (voir ci-dessous).

4. Les défis à relever

4.1. Production des noyaux exotiques

Comme le montre le tableau 1, l'installation de Louvain-la-Neuve permet de produire des faisceaux intenses de noyaux proches de la ligne de stabilité. Le faisceau primaire (protons de 30 MeV) constitue néanmoins un handicap pour la production de noyaux plus exotiques, et de nombreuses alternatives ont été proposées pour les synthétiser.

La solution la plus fréquemment envisagée consiste à utiliser des faisceaux de protons d'énergie plus élevée. Cette solution est adoptée au laboratoire de TRIUMF (Canada), où un faisceau de 500 MeV et 100 μ A est disponible, et à ISOLDE (CERN) avec un faisceau de quelques μ A à 1.4 GeV.

Element	$T_{1/2}$	q	Intensité [pps]	Gamme d'énergie [MeV]
⁶ Helium	0.8 s	1+	$9 \cdot 10^6$	5.3-18
		2+	$3 \cdot 10^5$	30-73
⁷ Beryllium	53 days	1+	$2 \cdot 10^7$	5.3-12.9
		2+	$4 \cdot 10^6$	25-62
¹¹ Carbon	20 min	1+	$1 \cdot 10^7$	6.2-10
¹³ Nitrogen	10 min	1+	$4 \cdot 10^8$	7.3-8.5
		2+	$3 \cdot 10^8$	11-34
		3+	$1 \cdot 10^8$	45-70
¹⁵ Oxygen	2 min	2+	$6 \cdot 10^7$	10-29
¹⁸ Fluorine	110 min	2+	$5 \cdot 10^6$	11-24
¹⁸ Neon	1.7 s	2+	$6 \cdot 10^6$	11-24
		3+	$4 \cdot 10^6$	24-33,45-55
¹⁹ Neon	17 s	2+	$2 \cdot 10^9$	11-23
		2+	$5 \cdot 10^9$ *	7.5-9.5
		3+	$1.5 \cdot 10^9$	23-35,45-50
		4+	$8 \cdot 10^8$	60-93
³⁵ Argon	1.8 s	3+	$2 \cdot 10^6$	20-28
		5+	$1 \cdot 10^5$	50-79

Table 1: Faisceaux d'ions radioactifs actuellement disponibles (9-2001) à Louvain-la-Neuve. Intensités mesurées après accélération et séparation isobarique. * avec Cyclone44

Il est parfois intéressant d'utiliser d'autres projectiles que les protons. La possibilité d'accélérer des deutons, des hélium ou des ions lourds permet de sélectionner le projectile et le matériau cible les plus appropriés à l'extraction chimique des noyaux radioactifs produits. Les exemples des laboratoires d'Oak-Ridge (USA) et du GANIL, qui utilisent ce type de particules, seront détaillés plus loin.

Une autre voie consiste utiliser des neutrons comme projectiles pour produire des noyaux radioactifs riches en neutrons par la fission de l'uranium. C'est l'option prise par le laboratoire de Munich (Allemagne) où une source d'ions sera placée dans le flux de neutrons d'un réacteur actuellement en construction. Les laboratoires de Dubna (Russie) et du GANIL étudient la possibilité de faire la photo-fission de l'uranium en utilisant un faisceau très intense d'électrons de 50 MeV. Le laboratoire d'Argonne a proposé d'utiliser les neutrons secondaires produits par un faisceau très intense de deutons.

4.2. Extraction des noyaux radioactifs

4.2.A. Importance de la chimie dans la cible de production

Le développement du faisceau d' ^{15}O ($T_{1/2} = 2$ min), tel qu'il a été effectué à Louvain-la-Neuve, constitue un bon exemple de l'importance de la chimie dans la cible. En effet la cible de LiF, qui a été décrite plus haut pour la production du faisceau de ^6He , permet également la production de ^{15}O par la réaction $^{19}\text{F}(p,\alpha)^{15}\text{O}$ dont le rendement est très élevé ($1.5 \cdot 10^{-3}$ ^{15}O /proton en cible épaisse avec un faisceau de 30 MeV).

Dès les premières analyses des gaz extraits de la cible, il est apparu que très peu de noyaux ^{15}O étaient extraits car l' ^{15}O produit reste chimiquement piégé dans la cible. Une étude détaillée a montré que la présence de carbone favorisait l'extraction de l' ^{15}O sous forme de molécules C^{15}O ou C^{15}O_2 à haute température. La cible a dès lors été modifiée comme le montre la figure 3. La poudre de LiF est comprimée dans un barillet en graphite comprenant 48 alvéoles, ce qui permet d'avoir une grande surface de contact avec le carbone tout en réduisant la distance moyenne que doit parcourir un atome d' ^{15}O avant de rencontrer une surface en graphite. Dans cette nouvelle géométrie, des rendements d'extraction de 24% pour ^{15}O ont été obtenus à haute intensité (300 μA).

Les difficultés rencontrées pour l'extraction des noyaux radioactifs produits dans la cible peuvent être plus facilement contournées si le faisceau primaire est un faisceau d'ions lourds comme au GANIL. On peut alors sélectionner le meilleur couple (faisceau primaire-cible) permettant à la fois de produire et d'extraire l'élément souhaité.

4.2.B. Extraction des éléments de court temps de vie

L'extraction des éléments de court temps de vie constitue un autre défi pour les faisceaux radioactifs produits par la méthode en ligne. Il est cependant possible d'extraire des noyaux tels que le ^{11}Li dont le temps de demi-vie est de 8.7 ms. Les travaux de J. R. Bennett⁶, menés auprès de ISOLDE, ont montré l'importance de la géométrie de la cible pour diminuer le temps d'extraction.

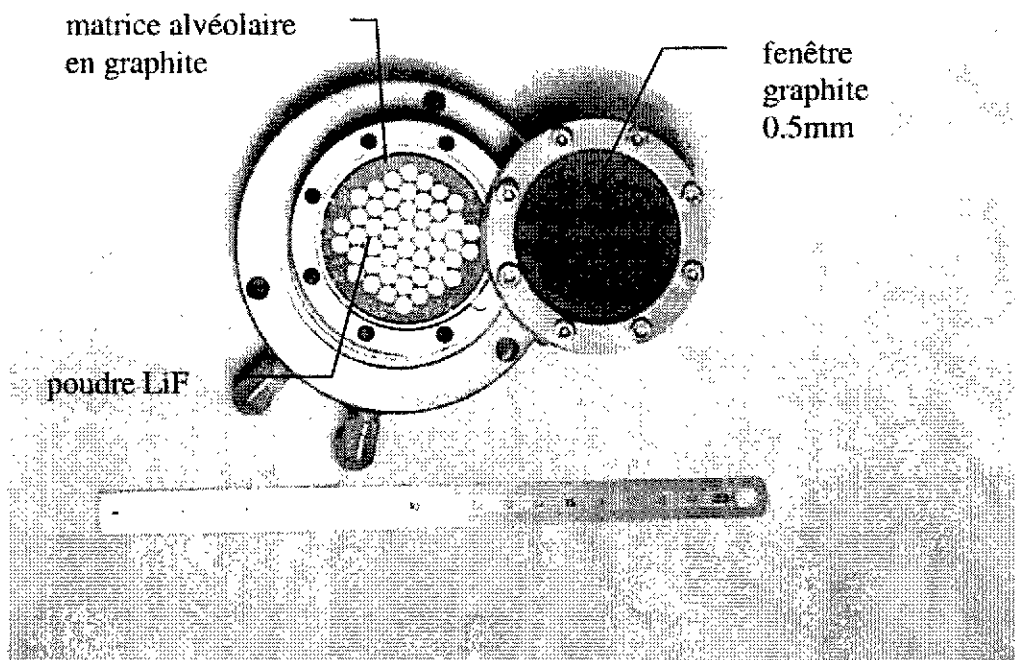


Figure 3 : Cible de production de ^{15}O

4.3. Ionisation

Outre les sources de type ECR, telles que celle brièvement décrite plus haut, il existe d'autres types de sources qui permettent la production d'ions monochargés^{7, 8}. En plus de leur robustesse aux radiations, ces sources peuvent présenter une certaine sélectivité chimique, ce qui limite considérablement les problèmes liés à la contamination isobarique. Ainsi, les sources à ionisation de surface ionisent préférentiellement les éléments alcalins tandis que les sources laser ionisent sélectivement un type d'élément en utilisant des faisceaux laser de fréquence appropriée^{9, 10}. Ces sources ont généralement des bonnes caractéristiques optiques. Elles ne permettent cependant pas de produire des ions multichargés, ce qui constitue une limitation importante. En effet, s'il est en principe possible de post-accélérer des éléments lourds ($A > 30$) de charge +1, il est souhaitable, pour limiter le coût du post-accélérateur, de pouvoir disposer d'ions de charge supérieure à un.

Les sources ECR présentent l'avantage de permettre la production d'ions multichargés. Elles ont une bonne efficacité d'ionisation pour les gaz et en particulier pour les gaz nobles. Cependant, pour les éléments condensables, leur efficacité est limitée parce que ce sont des sources à parois froides. Les ions qui se neutralisent sur les parois ont alors des "temps de collage" qui peuvent être longs par rapport au temps de vie de la particule à ioniser. La présence d'aimants permanent pour confiner le plasma constitue une limitation majeure des sources ECR car ils se démagnétisent lorsqu'ils sont soumis à une dose importante de neutrons. Il faut donc placer ce type de source en dehors du flux de neutrons. Enfin, leur émittance est relativement grande ($\geq \sim 50 \pi \text{ mm mrad}$), ce qui est difficilement compatible avec l'utilisation d'un séparateur de masse à haut pouvoir de résolution.

Les sources actuellement disponibles ne répondent donc pas aux contraintes spécifiques liées à la production (robustesse aux rayonnements), à la séparation (sélectivité chimique, faible émittance) et à l'accélération des faisceaux radioactifs (nécessité d'avoir des ions multichargés). Pour remédier à cela, des solutions mixtes sont proposées dans lesquelles les éléments sont extraits

de la cible sous forme d'ions $1+$, puis sont injectés dans une autre source qui les transforme en ions $n+$. C'est le principe de l'amplificateur de charge. La source d'ions $n+$ serait une source ECR, ainsi que l'a proposé le laboratoire de Grenoble¹¹, ou une source EBIS¹². Cette dernière solution est en cours de réalisation à REX-ISOLDE.

4.4. Séparation isobarique

La contamination par des faisceaux isobares ou des faisceaux analogues (de même rapport m/q) est un problème important pour les faisceaux radioactifs, spécialement lorsque ceux-ci sont proches de la ligne de stabilité. Parmi les cas rencontrés à Louvain-la-Neuve, citons les faisceaux $^{13}\text{N}^{1+}$ et $^{18}\text{F}^{2+}$. Pour le premier, les contaminants isobariques potentiels sont non seulement $^{13}\text{C}^{1+}$ ($\Delta m/m = -2 \cdot 10^{-4}$) mais aussi le faisceau d'ions moléculaires $^{12}\text{CH}^{1+}$ ($\Delta m/m = +2 \cdot 10^{-4}$). Pour le second, le contaminant isobarique est $^{18}\text{O}^{2+}$, avec $\Delta m/m = 9.9 \cdot 10^{-5}$. Dans ces deux exemples, les contaminants se trouvent dans le gaz résiduel de la source.

4.4.A. Le cyclotron comme séparateur de masse

Dans le champ magnétique B du cyclotron post-accélérateur, une particule de masse m et de charge q tourne avec une période $T_p = 2\pi m/qB$. Pour qu'il y ait accélération, il faut que la fréquence de rotation de cette particule soit égale à la fréquence de la tension d'accélération^a, $\omega_{\text{HF}} = \omega_p$ ("résonance"). Pour un contaminant de masse $m' = m + \Delta m$, il y a à chaque tour un retard $\Delta t = 2\pi \Delta m/qB$ par rapport à la particule de masse m , ce qui introduit un déphasage entre la tension d'accélération et le contaminant. Si après n tours, ce déphasage est tel que le contaminant se présente devant la cavité accélératrice lorsque la tension est décélétratrice, il sera décélétré. Le nombre de tours requis pour atteindre le rayon d'extraction est fixé par la tension d'accélération. En diminuant cette tension, on peut ainsi augmenter le nombre de tours dans la machine pour que le contaminant soit décélétré avant qu'il n'atteigne le rayon d'extraction. Cette technique a été utilisée pour séparer le faisceau de $^{18}\text{F}^{2+}$ de son contaminant isobarique $^{18}\text{O}^{2+}$. La figure 4 montre l'intensité des faisceaux extraits du cyclotron en fonction du champ magnétique¹³. L'intensité du faisceau $^{18}\text{O}^{2+}$ a été mesurée avant d'injecter le fluor-18 dans la source. L'oxygène-18 étant toujours présent dans le gaz résiduel de la source, ce faisceau est relativement intense (5 nA) à la résonance, mais il décroît très rapidement. En particulier, il ne reste que quelques fA de $^{18}\text{O}^{2+}$ au champ pour lequel $^{18}\text{F}^{2+}$ sera accéléré. Après injection du fluor-18 dans la source, les deux faisceaux sont bien séparés, alors que l'intensité de $^{18}\text{F}^{2+}$ (320 fA, échelle de droite) est beaucoup plus faible que celle $^{18}\text{O}^{2+}$ (5 nA, échelle de gauche). La variation du champ magnétique pour passer de $^{18}\text{O}^{2+}$ à $^{18}\text{F}^{2+}$ est de 1.2 gauss, pour un champ nominal de 12000 gauss. Cette séparation a été obtenue en réduisant la tension accélératrice de 36kV (valeur nominale) à 19kV, ce qui a pour conséquence de diminuer le rendement d'accélétration qui passe de 3 - 5 % à 0.5 - 1 %.

4.4.B. Séparateur d'isobares à basse énergie

Lorsque le post-accélétrateur est un linéaire, la séparation des isobares doit se faire avant injection, c'est-à-dire lorsque le faisceau a une énergie fixée par la tension sur la source qui est typiquement de l'ordre de 50 kV. La solution "classique" consiste à faire une analyse magnétique

^a L'accélétration est également possible pour certaines valeurs entières telles que $\omega_{\text{HF}} = n \omega_p$.

suivie d'une analyse électrique^{14, 15}. La première sépare les faisceaux suivant leur rigidité magnétique. La seconde élimine les particules n'ayant pas la bonne énergie, par exemple celles dont l'état de charge a varié lors de l'accélération à la sortie de la source suite aux collisions sur le gaz résiduel.

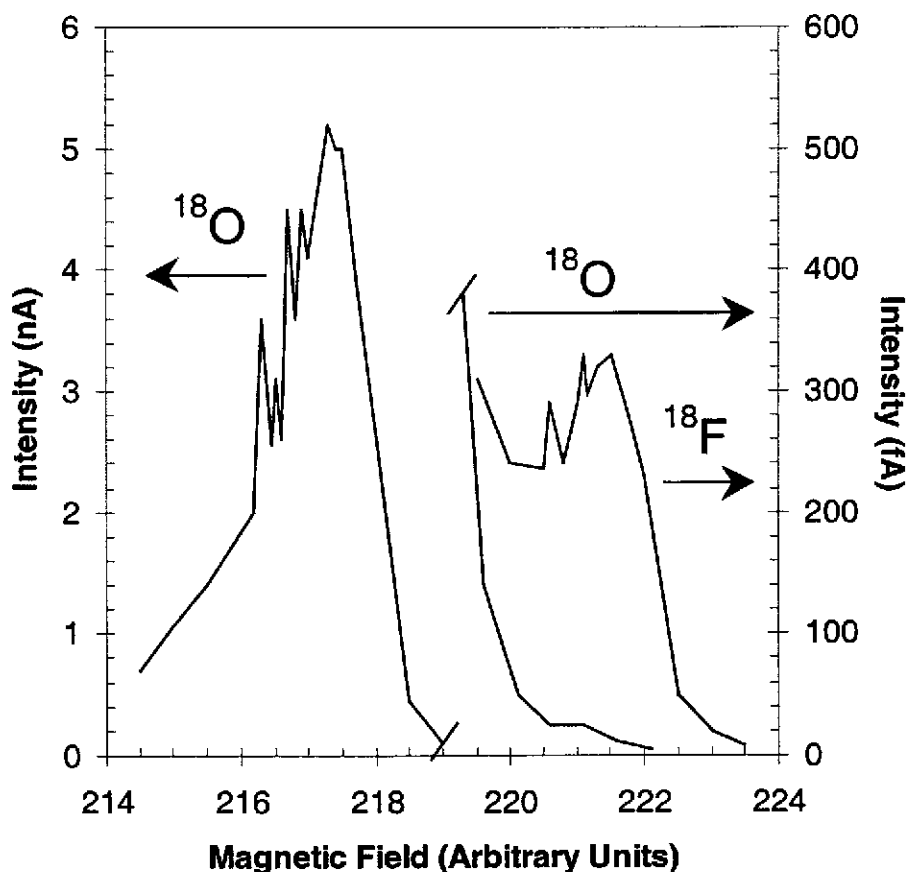


Figure 4: Séparation isobarique entre ¹⁸O et ¹⁸F: intensité du faisceau extrait en fonction du champ magnétique du cyclotron.

Avec de tels séparateurs à haute résolution, il est théoriquement possible de séparer deux faisceaux dont la masse relative diffère de $5 \cdot 10^{-5}$. Il faut cependant noter que l'acceptance de ces séparateurs est relativement faible, ce qui impose d'utiliser des sources d'ions de très bonne émittance (source à ionisation de surface par exemple, mais pas les sources ECR). De plus, comme il n'est pas rare que l'intensité du faisceau contaminant soit plus grande de plusieurs ordres de grandeur, il faut un facteur de réjection élevé pour pouvoir garantir la pureté du faisceau.

4.4.C. Sélectivité chimique dans la cible

Il est parfois possible d'utiliser la sélectivité de certaines réactions chimiques dans la cible pour diminuer considérablement les problèmes de contamination isobarique. Le faisceau ¹³²Sn ($T_{1/2} = 40$ s) actuellement en cours de développement à Oak-Ridge, en est un bel exemple¹⁶. Ces noyaux sont produits par fission induite par proton dans une cible de carbure d'uranium. Les contaminants isobariques potentiels sont ¹³²Sb, ¹³²Te, ¹³²I, ¹³²Xe. Après ionisation, la composition

du faisceau est $^{132}\text{Sb}^{1+}$: 12%, $^{132}\text{Te}^{1+}$: 87%, $^{132}\text{Sn}^{1+}$: 1%. La différence de masse relative entre ^{132}Sn et ^{132}Sb n'étant que $3 \cdot 10^{-5}$, il est actuellement extrêmement difficile de séparer ces isobares par les méthodes décrites plus haut. Le groupe de Oak-Ridge a cependant montré qu'il était possible d'obtenir un faisceau isobariquement pur en favorisant la formation de molécules SnS par la présence de vapeur de soufre dans la cible. En sélectionnant ensuite les ions moléculaires $^{132}\text{SnS}^+$ à la sortie de la source, aucune contamination par les isotopes de Sb et Te n'a été mesurée.

4.4.D. Sélectivité chimique de la source

Les problèmes liés à la contamination isobarique peuvent être considérablement réduits ou même éliminés par l'utilisation d'une source ayant une sélectivité chimique. C'est le cas des sources à ionisation de surface pour les éléments alcalins, et de façon plus générale pour les sources laser citées plus haut.

La possibilité d'accélérer des faisceaux de ^{14}C exempts de toute contamination est un exemple particulier où la sélectivité chimique de la source a permis une augmentation de la sensibilité de la méthode de datation au carbone-14 pour l'archéologie. Dans ce cas, la contamination isobarique en ^{14}N ($\Delta m/m = 1.2 \cdot 10^{-5}$!!) est supprimée grâce à l'utilisation d'une source d'ions négatifs, car l'ion $^{14}\text{N}^-$ est instable. A la sortie de la source, les seuls contaminants isobariques sont les ions moléculaires $^{12}\text{CHH}^-$ et $^{13}\text{CH}^-$. Ils sont éliminés lors de l'accélération dans un tandem par passage dans un épilucheur (feuille de carbone mince) où les liaisons moléculaires sont brisées.

4.4.E. Épiluchage du faisceau

La technique de l'épiluchage après accélération permet dans certains cas d'éliminer le contaminant isobarique. Elle a été utilisée à Louvain-la-Neuve pour garantir une très grande pureté du faisceau de ^7Be . Bien que la différence de masse entre le ^7Be et son contaminant isobarique ^7Li soit relativement petite ($\Delta m/m = 1.4 \cdot 10^{-4}$), il est possible d'éliminer le faisceau de ^7Li après passage dans un épilucheur en sélectionnant avec un dipôle magnétique les ions de charge $q = 4$ car cet état de charge n'existe pas pour le lithium ($Z = 3$).

Pour pouvoir utiliser cette technique il faut que le numéro atomique du contaminant soit plus petit que celui du faisceau (ici Li: 3; Be: 4). Il faut aussi que l'énergie du faisceau soit suffisamment élevée pour assurer un rendement élevé en ions complètement épiluchés.

Pour le ^7Be , il suffit de 0.6 MeV/A pour avoir 50% du faisceau dans l'état de charge 4+, mais cette énergie augmente considérablement pour des éléments de nombre atomique élevé (plus de 20 MeV/A pour Ar18+).

4.5. Accélération

A l'heure actuelle, trois types d'accélérateur sont utilisés pour accélérer les ions radioactifs: un cyclotron à Louvain-la-Neuve et à Caen (SPIRAL), un tandem à Oak-Ridge, un linéaire à Vancouver (TRIUMF) ainsi que pour le projet REX-ISOLDE.

Comme il a été dit plus haut, l'avantage du cyclotron est d'assurer à la fois l'accélération et la séparation des isobares dont la différence de masse relative est supérieure à 10^{-4} . Selon le facteur de réjection exigé, la transmission de ces machines varie de quelques % (Louvain-la-Neuve) à 50% (SPIRAL). La variation de l'énergie du faisceau en fonction de l'état de charge de l'ion injecté est

une autre caractéristique des cyclotrons. En effet, pour des ions lourds, l'énergie maximale est donnée par la relation $E = K_{\max} q^2/A$ où K_{\max} est une caractéristique de la machine. Ainsi, contrairement aux autres machines, l'énergie est proportionnelle au carré de l'état de charge de l'ion injecté. Le développement des sources d'ions multichargés est donc particulièrement important pour les cyclotrons.

Le tandem requiert l'injection d'ions négatifs et une séparation des isobares avant l'accélération dans la plupart des cas. La transmission du tandem est de l'ordre de 3 à 10%. Elle dépend de l'état de charge nécessaire après épluchage dans le terminal pour atteindre l'énergie requise. Le tandem a l'avantage de pouvoir accélérer des ions très lourds (Pb par exemple) à partir d'ions monochargés et de délivrer des faisceaux de très bonne qualité optique.

L'accélérateur linéaire offre l'avantage d'un rendement d'accélération proche de 100% mais il exige également une séparation isobarique avant l'injection. La construction modulaire de ce type d'accélérateur permet d'étendre la gamme d'énergie en ajoutant de nouvelles cavités.

5. Quelques exemples d'installation en fonctionnement

5.1. Le post-accélérateur est un cyclotron: l'exemple de SPIRAL

Le plan d'ensemble de l'installation est présenté à la figure 5. Le faisceau primaire est un faisceau d'ions lourds dont l'énergie peut atteindre 100 MeV/A jusque $A = 60$ et dont la puissance peut atteindre 6 kW. Les noyaux radioactifs sont produits par fragmentation du projectile dans une cible. Ce schéma permet de sélectionner à la fois le faisceau primaire et la cible non seulement pour favoriser la production mais aussi pour résoudre les problèmes liés à la chimie dans la cible.

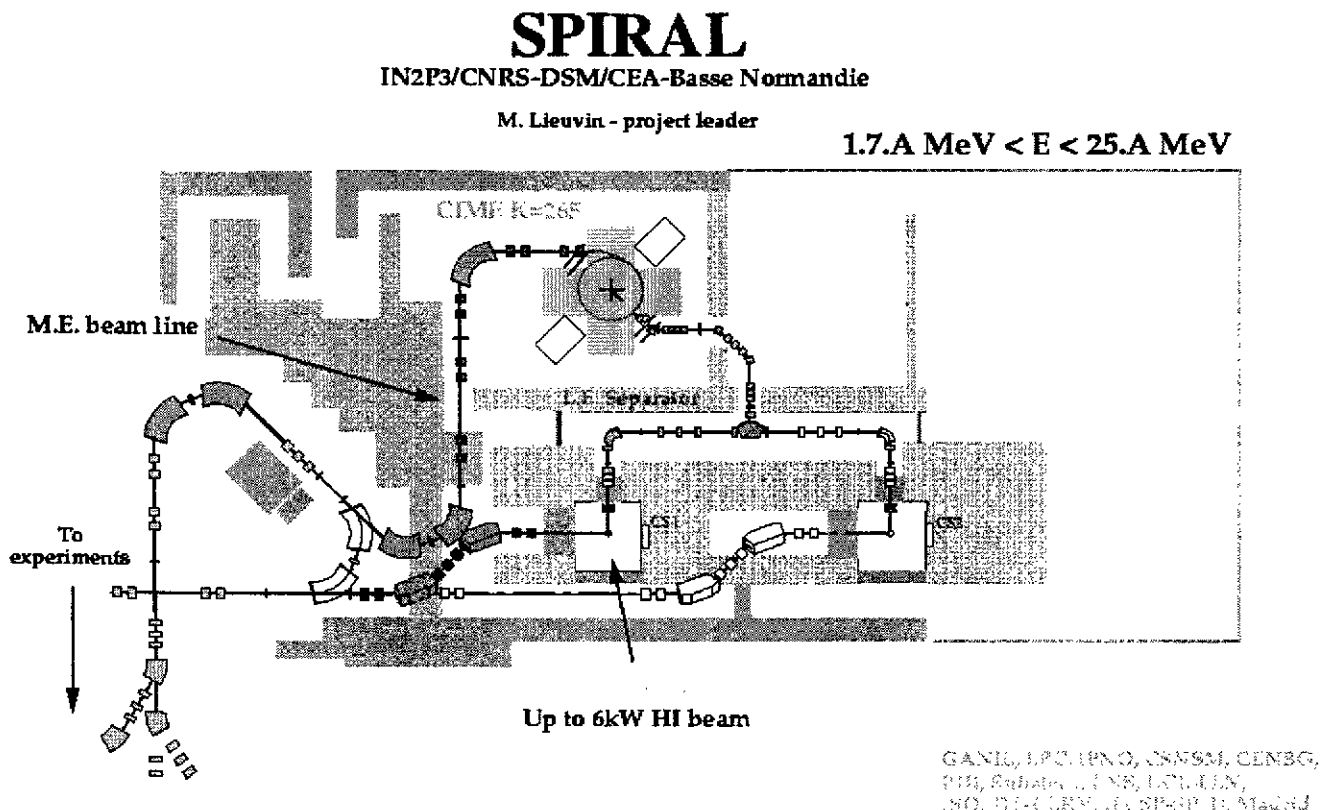


Figure 5: Vue d'ensemble de SPIRAL

La cible (figure 6) est en graphite dont la structure est très poreuse et dont la température de sublimation élevée autorise un fonctionnement à 2000 °C, ce qui favorise une extraction rapide des noyaux radioactifs qui y sont produits. Elle est chauffée par le faisceau ou par chauffage ohmique, et sa géométrie particulière permet d'évacuer par rayonnement une puissance de 2 kW¹⁷. Cette cible est couplée à une source ECR dont le champ magnétique est produit par des aimants permanents uniquement. Ces aimants étant très sensibles aux neutrons, la source est placée en-dehors du flux de neutrons produits par le faisceau incident. La source produit des ions multichargés tels que $^{18}\text{Ne}^{4+}$, $^{34}\text{Ar}^{8+}$ avec une efficacité d'ionisation de l'ordre de 10 à 15%.

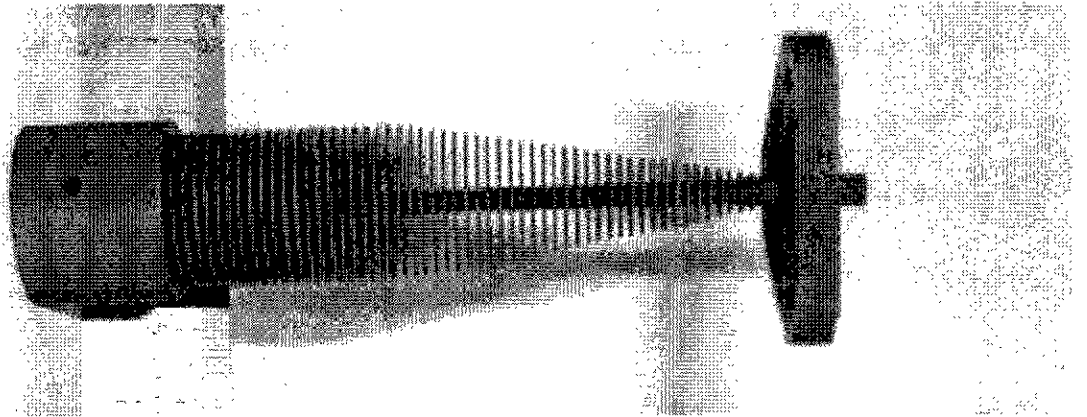


Figure 6: cible de production de SPIRAL

Le cyclotron CIME ($K_{\text{max}} = 265$) couvre la gamme d'énergie entre 1.7 et 25 MeV/A et permet de séparer les isobares dont la différence de masse relative est de $4 \cdot 10^{-4}$.

Fin septembre 2001, SPIRAL a accéléré son premier faisceau de ^{18}Ne produit à partir d'un faisceau primaire de ^{20}Ne sur la cible de graphite. La liste des faisceaux disponibles est accessible sur la Toile¹⁸.

5.2. Le post-accélérateur est un tandem: l'exemple de Oak-Ridge

Le plan d'ensemble de l'installation de Oak-Ridge¹⁹ est présenté à la figure 7. Les ions radioactifs sont produits par des faisceaux de 10 μA de protons, deutons ou alphas accélérés dans un cyclotron. La cible est portée à 1800°C par chauffage ohmique. Les ions négatifs sont produits directement dans une source d'ions négatifs, ou indirectement à partir d'une source d'ions positifs suivie d'une cellule d'échange de charge contenant des vapeurs de césium pour la conversion en ions négatifs. La séparation isobarique se fait avant l'injection dans le tandem. La tension sur le terminal fixe l'énergie de la première étape d'accélération ($U_{\text{max}} = 25 \text{ MV}$). Après passage dans un éplucheur situé dans le terminal, le faisceau est alors transformé en ions positifs et un dipôle permet de sélectionner l'état de charge $+Q$. Le faisceau est alors accéléré une deuxième fois jusqu'à l'énergie $(1+Q)eU$. Le rendement d'accélération est en grande partie fixé par le rendement d'épluchage dans le terminal. Il varie entre 3 et 10% suivant l'état de charge requis pour atteindre l'énergie demandée.

Parmi les faisceaux déjà accélérés à Oak-Ridge, les faisceaux de ^{18}F ($T_{1/2} = 110 \text{ min}$), et ^{17}F ($T_{1/2} = 65 \text{ s}$) méritent d'être soulignés vu la réactivité chimique du fluor²⁰. Les noyaux ^{18}F sont produits avec un faisceau de particules α de 85 MeV sur ^{16}O par la réaction $^{16}\text{O}(\alpha, pn) ^{18}\text{F}$. La cible est constituée de fibres de HfO_2 de 2 μm . L'extraction du fluor se fait à haute température sous la

forme d'ions AlF^+ dont la formation est favorisée par la présence d'aluminium dans la cible. Après passage dans la cellule d'échange de charge les ions F^- sont injectés à 200 kV dans le séparateur d'isobares puis dans le tandem.

La dispersion en énergie induite par le passage dans la cellule d'échange de charge limite considérablement le pouvoir de séparation. En effet, pour séparer 2 faisceaux tels que ^{18}F et ^{18}O pour lesquels $\Delta m/m = 9.9 \cdot 10^{-5}$, il serait nécessaire d'avoir une dispersion en énergie inférieure à 20 eV pour une source installée à 200 kV. Cette dispersion étant nettement supérieure à 20 eV à la sortie de la cellule d'échange de charge, la contamination du faisceau de ^{18}F par ^{18}O reste très importante et l'utilisation d'un épilucheur pour sélectionner les ions $^{18}F^{9+}$ après l'accélération est obligatoire pour purifier le faisceau.

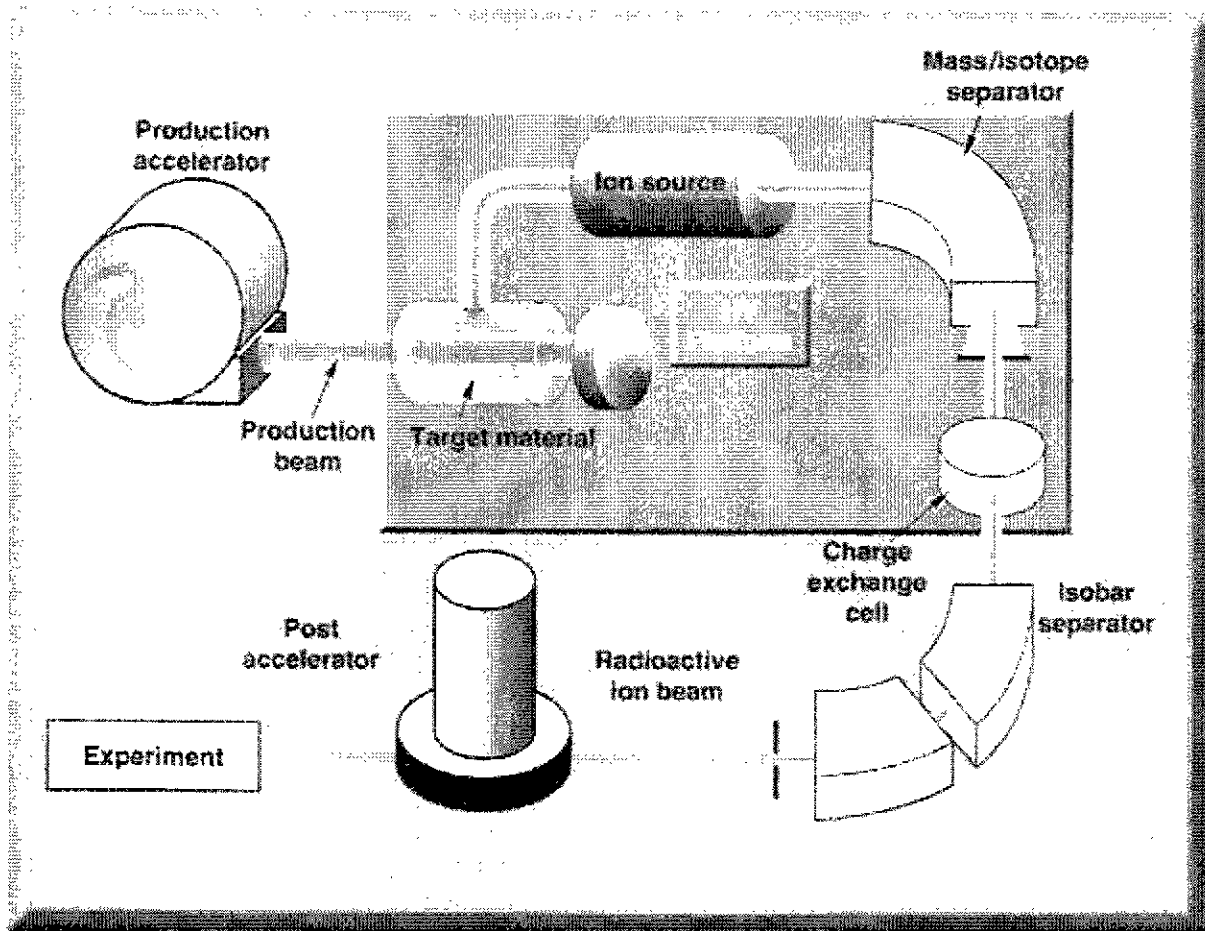


Figure 7: Vue schématique de l'installation de Oak-Ridge. Le post-accelérateur est un tandem.

5.3. Le post-accelérateur est un linéaire: l'exemple de ISAC (TRIUMF)

Les projets utilisant un accélérateur linéaire pour l'accélération des ions radioactifs sont nombreux et relativement anciens puisque le premier date de 1986. La seule installation en fonctionnement à l'heure actuelle (septembre 2001) est celle du laboratoire de Vancouver (ISAC-TRIUMF) dont le premier faisceau radioactif a été accéléré en juillet 2001²¹. Les premiers faisceaux de l'installation REX-ISOLDE au CERN sont attendus pour la fin 2001²².

Le plan d'ensemble de l'installation ISAC est donné à la figure 8. Les noyaux radioactifs sont produits par un faisceau de protons de 500 MeV. Bien que le cyclotron de TRIUMF puisse accélérer jusqu'à 180 μA de faisceau (soit 90 kW de puissance dans le faisceau), dans une première étape cette intensité est limitée à 20 μA pour la production des ions radioactifs. L'énergie élevée du faisceau permet de produire des noyaux très éloignés de la ligne de stabilité mais est aussi à l'origine d'une activation importante de la cible. Ceci requiert un système de manipulation et de démantèlement des cibles particulièrement étudié. Après ionisation, les ions sont séparés en masse par un séparateur à haute résolution ($\Delta m/m = 10^{-4}$) puis injectés à 2 keV/A dans un RFQ (radio frequency quadrupole). Celui-ci accélère les ions de rapport M/Q inférieur à 30 jusqu'à une énergie de sortie de 150 keV/A. Ils sont ensuite épluchés dans une feuille de carbone mince et injectés dans un accélérateur linéaire qui couvre la gamme d'énergie entre 0.15 MeV/A et 1.5 MeV/A pour des ions de rapport M/Q compris entre 3 et 6.

ISAC at TRIUMF

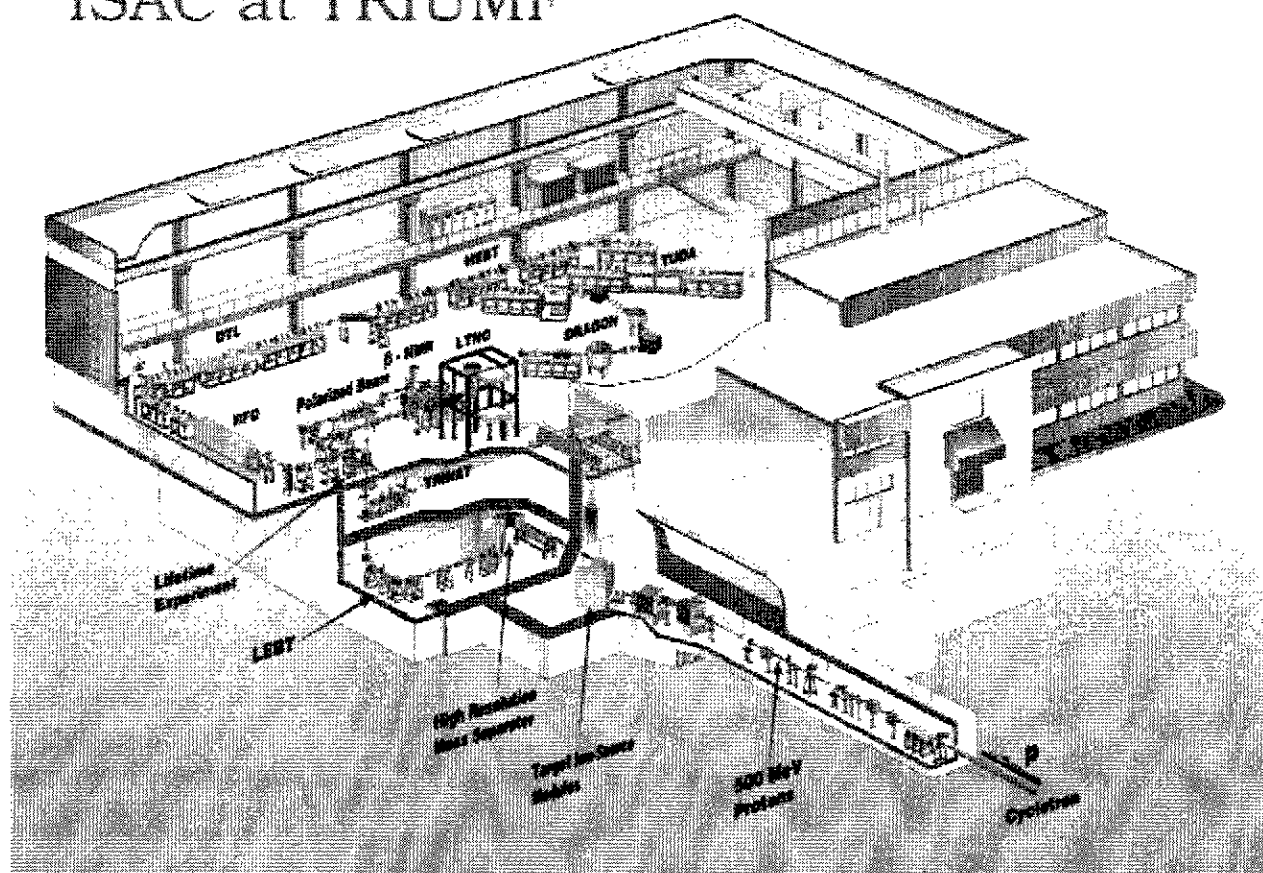


Figure 8: Vue d'ensemble de l'installation de TRIUMF

Le premier faisceau accéléré à ISAC est un faisceau de ${}^8\text{Li}^{1+}$ ($T_{1/2} = 0.8\text{s}$), produit dans une cible de tantale. Les noyaux sont ionisés dans une source à ionisation de surface dont la sélectivité pour les alcalins est très grande et qui ne produit que des ions monochargés. Les ions moléculaires (${}^7\text{LiH}^+$ et ${}^6\text{LiHH}^+$) seraient les seuls contaminants possibles pour ce faisceau puisque les ions tels que ${}^{16}\text{O}^{2+}$ ne sont pas produits. Après passage dans l'éplucheur, les ions ${}^8\text{Li}^{2+}$ (~50% du faisceau de 1+) sont injectés dans le linac. Un faisceau pur de $2 \cdot 10^8$ pps a ainsi été obtenu. La transmission dans l'ensemble de l'accélérateur est finalement fixée par le rendement d'épluchage.

Dans ce schéma, le problème de la contamination isobarique ne se pose pas tant que l'on peut utiliser une source dont la sélectivité chimique est grande. C'est le cas pour les faisceaux de Li^+ et de Na^+ pour lesquels une source à ionisation de surface convient. Pour les autres faisceaux légers tels que $^{15}\text{O}^{1+}$, ou les faisceaux de masse supérieure à 30 pour lesquels des ions multichargés sont requis, l'utilisation d'une source ECR est envisagée. L'émittance assez grande de ce type de source ($\sim 50 \pi \text{ mm.mrad}$) est cependant difficilement compatible avec l'acceptance limitée du séparateur à haute résolution ($\sim 5 \pi \text{ mm.mrad}$).

6. Développements en cours

6.1. Production des éléments radioactifs

La production des éléments riches en neutrons par fission de l'uranium est actuellement très étudiée. La solution la plus en vogue envisage d'utiliser les neutrons rapides produits par un faisceau de deutons sur une cible légère. Elle offre l'avantage de découpler la cible dans laquelle le faisceau primaire est arrêté, de la cible d'uranium dans laquelle les noyaux de fission sont produits. Ceci permet d'optimiser d'une part la cible primaire pour évacuer la puissance déposée par les deutons et d'autre part la cible d'uranium pour permettre une extraction rapide des fragments de fission.

6.2. Ionisation

Comme il a été montré ci-dessus, tant pour les cyclotrons que pour les accélérateurs linéaires, il est nécessaire de pouvoir disposer d'ions multichargés. La présence d'aimants permanents sensibles aux radiations dans une source ECR est une limitation importante à l'emploi de ces sources au voisinage d'une cible de production. Pour cette raison, la solution de transporter les ions $1+$ provenant d'une source robuste située près de la cible, pour les injecter dans une autre source chargée de fournir les ions $n+$, retient l'attention de nombreux centres. Le laboratoire de Grenoble qui a joué un rôle de pionnier dans le domaine a mesuré des efficacités de 10 % pour la conversion de Kr^{1+} en Kr^{11+} , et de 5% pour la conversion de Pb^{1+} en Pb^{22+} dans une source ECR. Le projet REX-ISOLDE utilisera une source EBIS pour produire les ions multichargés.

L'utilisation des sources laser pour tenter d'éliminer les problèmes de la contamination isobarique est une autre ligne de recherche prometteuse qui est actuellement développée notamment à ISOLDE et à Leuven (LISOL).

6.3. Accélération des ions radioactifs

Les développements en cours dans le domaine des accélérateurs suivent deux directions. Dans le domaine des accélérateurs linéaires, ils visent principalement à permettre l'accélération d'ions radioactifs de rapport M/Q supérieur à 30 en mode continu dans un RFQ, la deuxième phase de l'accélération se faisant dans un linéaire supraconducteur tel que celui développé à Argonne. Pour les cyclotrons, les efforts se concentrent à Louvain-la-Neuve sur la mise au point d'un cyclotron (CYCLONE44) spécialement conçu pour avoir à la fois un rendement d'accélération élevé et un grand pouvoir de séparation.

7. Conclusions

Depuis la première expérience avec un faisceau radioactif post-accélééré menée en 1990 à Louvain-la-Neuve, de nombreux projets d'accélération d'ions exotiques ont vu le jour à travers le monde. A ce jour (septembre 2001), quelques projets, dits de première génération, ont déjà accéléré des faisceaux radioactifs (Oak-Rigide, TRIUMF, SPIRAL) ou devraient le faire dans un avenir très proche (REX-ISOLDE). Ils utilisent des schémas différents pour produire, ioniser, séparer et accélérer, et ont tous leurs spécificités et leurs limitations.

D'autres projets beaucoup plus ambitieux sont à l'étude: le projet RIA aux Etats-Unis, le projet EURISOL en Europe. Pour ces projets dits de deuxième génération, de nombreuses options sont ouvertes. Des machines permettant d'accélérer des faisceaux d'ions lourds de centaines de kW, ou de MW pour les protons sont envisagées. Elles devront être couplées à des cibles capables d'évacuer la puissance déposée par le faisceau tout en assurant à la fois une extraction efficace des noyaux radioactifs formés et des conditions de fonctionnement adéquates pour la source d'ions située en aval. Des efforts considérables devront être consacrés pour développer ces accélérateurs et ces cibles dont la fiabilité sera un élément clé. Si les développements de la technique de l'amplificateur de charge permettent d'entrevoir la possibilité de produire des ions multichargés pour une large gamme d'éléments, des techniques nouvelles doivent encore être imaginées pour résoudre le problème de la contamination isobarique pour lequel les méthodes actuelles sont insuffisantes.

Remerciements

Je tiens à remercier Michel Gaelens et Pierre Leleux pour l'aide qu'ils m'ont apportée durant la rédaction de ces notes.

Références

- ¹ W.A. Fowler, Rev. Mod. Phys. 56 (1984) 149.
- ² NuPECC REPORT, "Radioactive Nuclear Beam Facilities", 2000.
- ³ Proc. of the 3rd Int.Conf. on Radioactive Nuclear Beams, East Lansing (1993), ed by D.J. Morrissey, Editions Frontières.
- ⁴ Proc. of the 4th Int.Conf. on Radioactive Nuclear Beams, Omya (1996), Nucl. Phys. A 616, 1997.
- ⁵ Proc. of the 5th Int.Conf. on Radioactive Nuclear Beams, Divonne (2000) à paraître.
- ⁶ J.R.J. Bennett et al., NIM B155 (1999) 515.
- ⁷ T. Bjornstad et al., NIM B26 (1987) 174.
- ⁸ H.L. Ravn et B. Allardyce, Treatise on Heavy-Ion Science, ed. A Bromley, Vol 8, p363.
- ⁹ Y. Kudryavtsev et al., Rev. of Sc. Inst., 69 (1998) 738.
- ¹⁰ J. Lettry et al., Rev. Sc. Inst., 69 (1998) 761.
- ¹¹ P. Sortais et al., Rev Sc. Instr., 71 (2000) 617.
- ¹² B. H. Wolf et al., Rev Sc. Inst., 73 (2002) 682
- ¹³ M. Cogneau et al., NIM A220 (1999) 489.
- ¹⁴ M. Przewloka et al. , NIM B70 (1992) 451.
- ¹⁵ M. Wada et al. , NIM B126 (1997) 25.
- ¹⁶ D.W. Stracener dans HRIBF Newsletter-Spring Quarter 2001, <http://www.phy.ornl.gov/hribtf/usersgroup/news/>
- ¹⁷ J.C. Putaux, NIM B126 (1997)113.
- ¹⁸ voir http://www.ganil.fr/operation/available_beams/radioactive_beams.htm

¹⁹ voir <http://www.phy.ornl.gov/hribtf>

²⁰ D.W. Stracener, in Application of Accelerators in Research and Industry, AIP Conf. Proc., Denton2000 CP576 (2001) 257

²¹ voir <http://www.triumf.ca/isac>

²² voir <http://isolde.cern.ch/>