



HAL
open science

SPIRAL

M. Lieuvain

► **To cite this version:**

M. Lieuvain. SPIRAL. École thématique. Ecole IN2P3 "Dynamique des faisceaux et accélérateurs de particules", La Londe les Maures, France. 1996. in2p3-03560392

HAL Id: in2p3-03560392

<https://hal.in2p3.fr/in2p3-03560392>

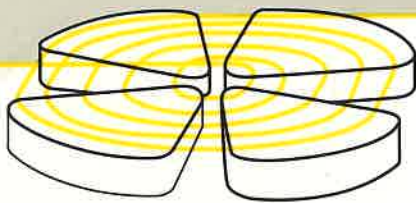
Submitted on 7 Feb 2022

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.

GANIL

GRAND ACCELERATEUR NATIONAL D'IONS LOURDS - CAEN
LABORATOIRE COMMUN IN2P3 (CNRS) - D.S.M. (CEA)



ECOLE IN2P3

**“Dynamique des faisceaux
et accélérateurs de particules”**

La Londe le Maures, 26 janvier-1^{er} février 1996

SPIRAL

Marcel Lieuvin

GANIL S 96 02

ECOLE IN2P3

**“Dynamique des faisceaux
et accélérateurs de particules”**

La Londe le Maures, 26 janvier-1^{er} février 1996

SPIRAL

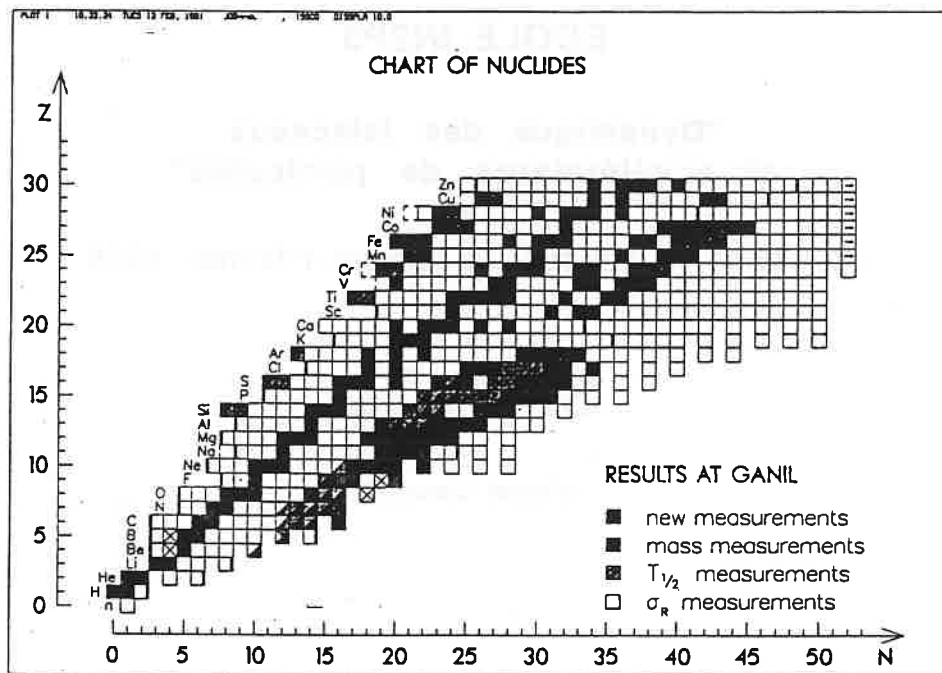
Marcel Lieuvain

SPIRAL

Système de Production d'Ions Radioactifs Accélérés en Ligne

1 Motivation: Pourquoi accélérer des ions radioactifs ?

L'intérêt des ions radioactifs pour la recherche apparaît de manière quasi évidente à qui regarde une carte de nucléons.



Une telle carte, si elle était en relief, apparaîtrait comme une vallée aux flancs abrupts au fond de laquelle gisent les atomes stables qui nous composent et qui peuplent notre terre.

Les noyaux stables sont, au moins pour les plus légers d'entre eux, caractérisés par un nombre de protons égal ou très voisin du nombre de neutrons (notion d'isospin).

L'instabilité des noyaux s'accroît à mesure que l'on s'écarte du centre de la vallée, que ce soit à gauche (riches en protons) ou à droite (riches en neutrons) et leur durée de vie décroît en conséquence.

Les "drip-lines" limitent à droite et à gauche de la carte l'existence des noyaux pouvant avoir une durée de vie, aussi brève soit-elle.

Ces noyaux radioactifs élargissent de façon considérable le domaine possible d'investigation (exemple: cuivre: 2 noyaux stables, 23 instables). Beaucoup d'entre eux n'ont même jamais été observés et constituent à ce titre une véritable "Terra Incognita".

Les atomes radioactifs (également appelés exotiques) intéressent plusieurs disciplines au premier rang desquelles, bien entendu, la physique nucléaire qui trouve là une extraordinaire extension de son domaine de recherche. L'étude des noyaux loin de la stabilité offre aux physiciens une opportunité de mieux comprendre la complexité des phénomènes et des interactions qui ont lieu au sein de la matière nucléaire.

Les expérimentateurs ont déjà trouvé chez certains de ces noyaux des configurations, des déformations et des formes étranges. Ils supposent probable que l'étrangeté de ces configurations s'accroîtra à mesure que l'on s'éloignera de la vallée de stabilité.

Déjà certaines découvertes inattendues ont résulté de ces recherches telles que la mise en évidence de noyaux à halos (ex: Lithium 11) chez lesquels un ou plusieurs neutrons, faiblement liés, ont une densité de présence s'étendant bien plus que la "normale" du centre du noyau, formant ainsi un "halo" de neutrons entourant le coeur dur du noyau.

Un autre exemple est la synthèse récente simultanément à GANIL et au GSI (Darmstadt) d'un noyau de ^{100}Sn auquel le nombre de protons et de neutrons confère une structure doublement "magique" ce qui lui procure une stabilité et des caractéristiques exceptionnelles. Selon leur domaine d'investigation, les physiciens nucléaires ont besoin de faisceaux d'ions radioactifs dont l'énergie varie de quelques MeV à quelques dizaines de MeV par nucléon. Cependant, beaucoup de réactions intéressantes sont attendues lors de collisions avec des ions stables au voisinage de la barrière coulombienne, ce qui nécessite des énergies de quelques MeV/nucléon seulement.

Une autre grande catégorie d'utilisateurs potentiels de SPIRAL est la communauté des astrophysiciens. En effet, les noyaux stables que nous connaissons peuvent être considérés comme les "cendres" refroidies des gigantesques creusets nucléaires que constituent les étoiles et en particulier les étoiles géantes (Rappel: notre Soleil est une étoile moyenne mais qui consomme malgré tout 500 million de tonnes d'hydrogène par seconde pour fabriquer de l'hélium par fusion nucléaire) et surtout les cendres des grands cataclysmes nucléaires que sont les supernovae.

La connaissance des durées de vie et des modes de décroissance de ces noyaux radioactifs apparaît fondamentale pour approfondir les

modes d'apparition des noyaux que nous connaissons et donc accroître notre compréhension de l'univers.

Le domaine d'énergie des ions dans les étoiles est typiquement inférieur au MeV/nucléon. Un certain nombre de réactions peuvent cependant être utilement étudiées à des énergies plus élevées.

Les physiciens atomistes, au même titre que les physiciens nucléaires, sont intéressés par les ions exotiques qui offrent autant de configurations nouvelles pouvant donner naissance à des atomes intéressants à étudier. Ils ont besoin en général de faisceaux dont l'énergie se chiffre en keV/nucléon, voir éventuellement d'ions pratiquement à arrêt que l'on peut piéger dans des configurations électromagnétiques spéciales (trappes à ions)

les biologistes et les médecins portent également un intérêt important à l'étude de ces noyaux susceptibles de leur procurer de nouveaux moyens d'investigation du vivant ou bien de nouveaux moyens de diagnostics et de traitement.

2 Comment produire les noyaux radioactifs ?

La production d'ions radioactifs sur terre ne peut résulter que d'interactions nucléaires obtenues à l'aide de faisceaux d'ions produits par des accélérateurs de particules ou par le flux de neutrons émis par des réacteurs nucléaires (et quelquefois, hélas, par des explosions nucléaires).

Ces 2 filières sont utilisées depuis plusieurs décennies pour produire un certain nombre de noyaux utilisés aussi bien à des fins civiles (ex: ^{124}I , ^{125}I utilisé pour le diagnostic et le traitement de certaines maladies thyroïdiennes, ^{60}Co utilisé pour la gamma thérapie) que militaires (tritium).

Ce sont en général des noyaux à vie longue qui sont produits en grande quantité dans des installations dédiées et qui sont isolés et purifiés par voie chimique.

Il est par contre relativement nouveau de vouloir produire de véritables faisceaux d'ions radioactifs à durée de vie brève ou très brève (de l'ordre de la seconde ou de la centaine de milliseconde).

Les modes de production des noyaux radioactifs peuvent être grossièrement classés en deux catégories:

-Première catégorie: On utilise une cible généralement lourde (matériau de numéro atomique élevé) bombardée par des particules légères -protons ou neutrons- de forte énergie. On obtient alors la formation de noyaux exotiques dans la cible par des réactions qui peuvent être:

- La fragmentation des noyaux cible.
- Des réactions de fusion/évaporation ou de fission des noyaux cibles.

-Seconde catégorie: On utilise une cible légère (matériau de faible numéro atomique tel que C, Be...) bombardée par des ions lourds de grande énergie. On obtiendra alors les ions exotiques par fragmentation des noyaux du faisceau incident (on parle alors de fragmentation du projectile). Si la cible est mince, les noyaux exotiques produits pourront continuer leur parcours pratiquement à la vitesse des ions incidents. Ils pourront alors être regroupés et focalisés pour constituer un faisceau, si, au contraire la cible est épaisse, ils seront arrêtés au coeur de cette cible.

Sauf dans le cas cible mince et légère et faisceau primaire d'ions lourds, la production de faisceaux d'ions nécessite en général la présence d'une source qui devra bien entendu être très proche de la production des noyaux radioactifs pour ceux qui ont une durée de vie brève.

3 Les faisceaux d'ions radioactifs dans le monde

Une des toutes premières installations de production d'ions radioactifs dans le monde est **Isolde** au CERN qui, en service depuis une vingtaine d'années, utilise le faisceau de protons de 1 GeV du booster du PS pour produire des noyaux radioactifs par bombardement d'une cible lourde. Les ions monochargés sont accélérés par une tension de quelques dizaines de KeV et envoyés après analyse dans plusieurs voies de faisceau. Cette installation pionnière qui a déjà produit de l'ordre de 600 isotopes va être maintenant complétée par l'adjonction d'un RFQ et d'un Linac qui porteront l'énergie des ions jusqu'à 2 MeV/nucléon (projet REX-Isolde).

Citons aussi particulièrement le cyclotron **Cyclone** à Louvain-La-Neuve qui, utilisant un faisceau primaire de protons de 30 MeV provenant d'un cyclotron compact et bombardant une cible légère, produit depuis plusieurs années quelques faisceaux spécifiques de noyaux radioactifs proches de la vallée de stabilité (^{13}N , ^{11}C , ^{19}Ne , ^{35}Ar ...). Cette installation sera prochainement complétée par un nouveau cyclotron à haute résolution destiné à produire des ions de 0.2 à 0.8 MeV/nucléon pour l'astrophysique nucléaire (projet ARENAS)

Les autres installations utilisant la méthode ISOLDE, c'est à dire utilisant un post-accélérateur sont pratiquement toutes à l'état de projet. Le tableau suivant donne quelques caractéristiques de l'essentiel de ces projets

.MÉTHODE ISOLDE : ACCÉLÉRATEUR FAISCEAU RADIOACTIF

Nom Laboratoire	Accélérateur		Énergie Mev/u		Limite en masse	Résolution en masse
		en service	min	max		
ARENAS 3 (Louvain)	cyclotron k=44		0,2	0,8	30	10000
ISAC (Triumf)	RFQ+linac		0,2	1,6	60	3000
PRIMA (CERN)	RFQ+linac		0,2	5	80	
E-ARENA (TOKYO)	RFQ+linac		0,17	6,5	60	9000
MOSCOU (MOSCOU)	RFQ+linac			6,5	150	
EXCYT (CATANE)	tandem 15MV	X		6,8	238	10000
ARENAS (LOUVAIN)	cyclotron k=110	X	0,56	10	100	6000
ISL (ISOPIN)	linac ou cyclotron		0,2	10	240	
OREB (OAK RIDGE)	tandem 25MV	X		13	76	16000
PIAFE (GRENOBLE)	cyclotron k=160	X	1,9	20	150	5000
SPIRAL (GANIL)	cyclotron k=265		2,7	25	238	30000

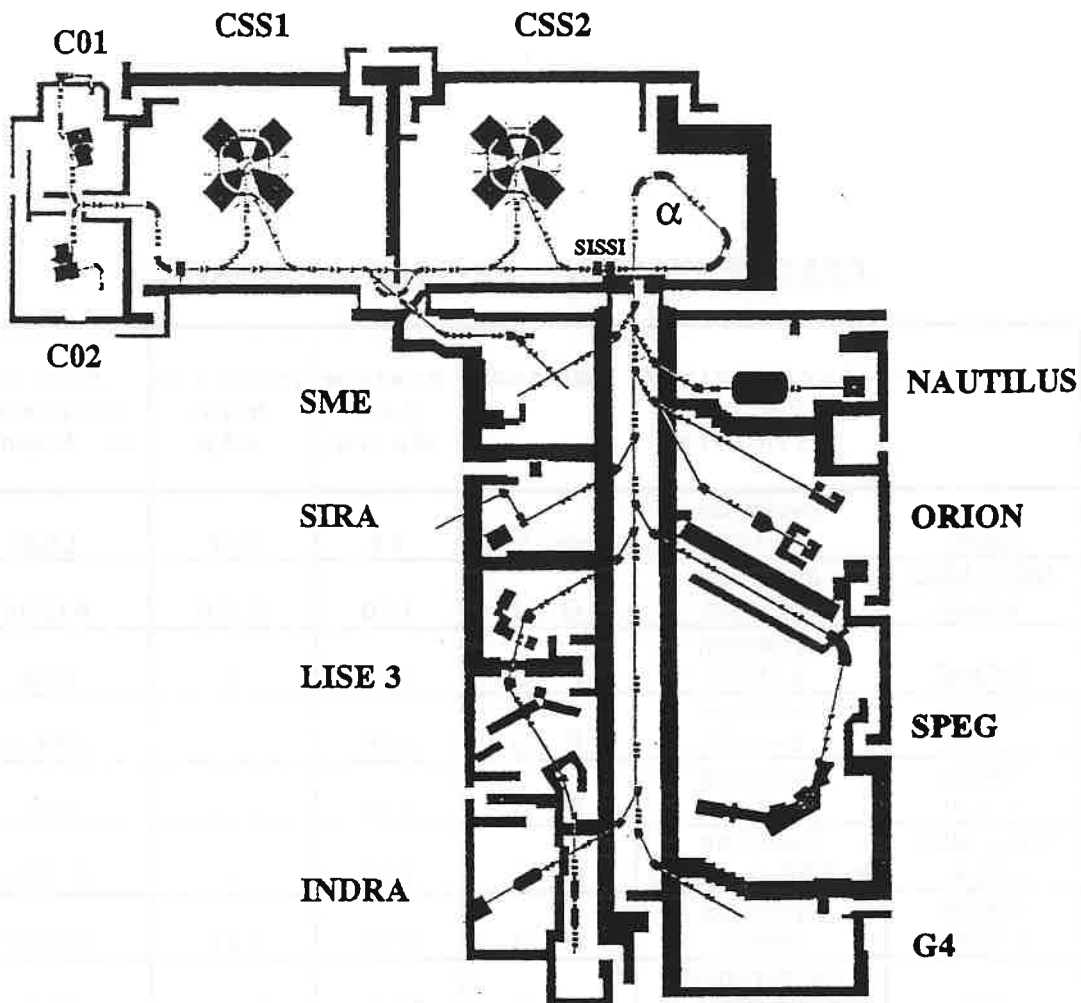
Les installations utilisant des faisceaux produits par la fragmentation de faisceaux primaires à travers une cible mince sont indiquées dans le tableau suivant.

FRAGMENTATION : FAISCEAU PRIMAIRE

Laboratoire	Accélérateur faisceau primaire	Faisceau	énergie max. Mev/u	intensité max. μ Ap	Nom du séparateur de fragment
GANIL	cyclotron k=400	He - U	95	3,2	LISE
NSCL-MSU actuel	cyclotron k=1200	O - U	100	0,06	A1200
CATANE	cyclotron k=800	P - U	100	1	FRS
DUBNA projet	cyclotron k=400	P - U	100	1,6	COMBAS
RIKEN actuel	cyclotron k=540	P - U	135	0,5	RIPS
NSCL-MSU projet	cyclotron k=500+k=1200	O - U	200	1	A1900
RIKEN projet	cyclotron (SRC)	P - U	600	160	RIPS2
GSI	synchrotron (SIS)	D - U	2000	0,01	SHIP
LEGNARO projet	synchrotron (ADRIA)	P - U	2500	0,3	ISL

4 GANIL

La figure suivante montre schématiquement la constitution du GANIL.



GANIL est une usine à ions lourds composée pour l'essentiel de deux cyclotrons presque identiques de $K=400$, fonctionnant en cascade et séparés par un étage d'épluchage (stripper). Ces grands cyclotrons sont alimentés par l'un ou l'autre des petits cyclotrons injecteurs qui reçoivent les ions produits par des sources ECR externes de très hautes performances.

GANIL permet d'accélérer tous les ions lourds depuis le carbone jusqu'à l'uranium à une énergie pouvant atteindre 100 MeV/nucléon (selon l'état de charge effectivement réalisable par les sources d'ions)

La puissance maximale du faisceau est limitée pour l'instant à 400 W pour des raisons de sécurité et sera prochainement portée à 6 kW ce qui représente jusqu'à $2 \cdot 10^{13}$ ions/seconde.

Les caractéristiques optiques du faisceau produit par GANIL sont excellentes, la définition en énergie est fixée par un séparateur de 270° en alpha de résolution 1/3000.

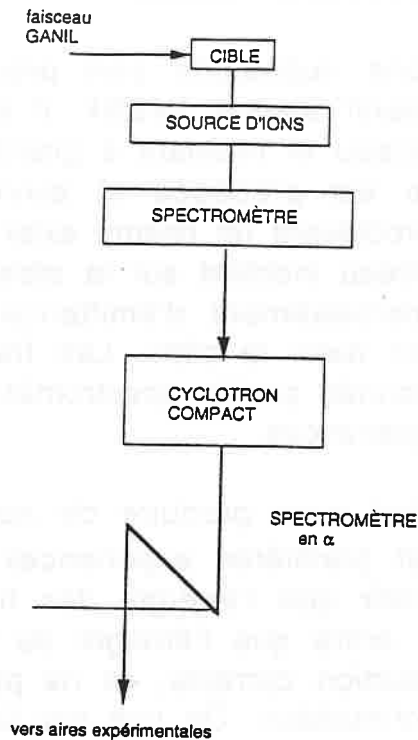
Des faisceaux d'ions radioactifs sont produits au GANIL depuis 1994 par un dispositif appelé **SISSI**. Il s'agit d'une cible mince placée dans le faisceau et tournant à grande vitesse pour éviter la fusion. Cette cible est précédée et suivie de deux solénoïdes supraconducteurs produisant un champ axial de 4 T dont le rôle est de focaliser le faisceau incident sur la cible à une fraction de mm afin de limiter l'accroissement d'émittance du faisceau émis par suite de la diffusion dans la cible. Les fragments radioactifs sont analysés et sélectionnés par le spectromètre avant d'être envoyés vers les aires d'expériences.

SISSI est très utilisé pour produire de nouveaux ions radioactifs (ex: identification et premières expériences avec ^{100}Sn en 1995) mais il faut bien voir que l'énergie des fragments émis est, par nucléon, du même ordre que l'énergie du faisceau primaire. Pour conserver une production correcte, on ne peut guère descendre en dessous de 50 MeV/nucléon. On voit par là que la production des ions par **SISSI** ou par les méthodes équivalentes utilisées ailleurs dans le monde est réservée à une physique à relativement haute énergie. Par ailleurs, en raison des diffusions multiples intervenant dans la cible de production, les propriétés optiques du faisceau ne peuvent être qu'assez médiocres.

5 Le projet SPIRAL

Le projet **SPIRAL** a été élaboré au GANIL à partir de 1992/1993. Il s'agit de réaliser un ensemble à partir d'une cible de production qui reçoit le faisceau primaire provenant du GANIL, puis, associant une source d'ions à cette cible pour ioniser les atomes radioactifs produits, d'obtenir un faisceau finalement accéléré par un nouveau cyclotron appelé CIME.

Le schéma suivant montre le principe retenu.



Le facteur **K** caractéristique du cyclotron **CIME** (Cyclotron pour Ions de Moyenne Énergie) a été déterminé en se fixant pour but d'obtenir une énergie maximum de **6 MeV/nucléon** pour des ions de **$A \leq 100$** et de charge telle que **$Q/A \geq 0.15$** .

$$\text{Sachant que } W = K \cdot \left(\frac{Q}{A}\right)^2$$

$$\text{Cela donne } K \approx 265 \text{ MeV}$$

Valeur retenue pour le cyclotron.

$$K \approx 48.3 B^2 R^2$$

$$\text{Ayant choisi } R = 1.5 \text{ m}$$

$$\text{Il en résulte que: } \bar{B}_{\max} = 1.56 \text{ T}$$

Ce qui est une valeur réaliste.

La condition **$Q/A \geq 0.15$** impose évidemment une source d'ions multichargés. Le choix fait à GANIL s'est porté sur une source de type ECR (Électron Cyclotron Résonance) car c'est l'un des 2 seuls

types de sources capables de produire des ions aussi chargés. Des sources ECR équipent déjà les cyclotrons injecteurs.

Les états de charge effectivement réalisables avec ce type de source ainsi que le choix d'une gamme de fréquence réaliste pour les résonateurs ont amené à fixer les limites extrêmes de l'énergie des ions à la sortie de l'accélérateur:

Sachant que: $f_{rev.} = \frac{QB}{2\pi\gamma m_0}$ avec: $\gamma = 1 + \frac{W_c}{m_0 c^2}$

En fixant: $(W_c)_{min} = 2.66 \text{ MeV / nucléon}$ et $(W_c)_{max} = 25 \text{ MeV / nucléon}$

On obtient: $(f_{rev.})_{min} = 2.4 \text{ MHz}$ et $(f_{rev.})_{max} = 7.25 \text{ MHz}$

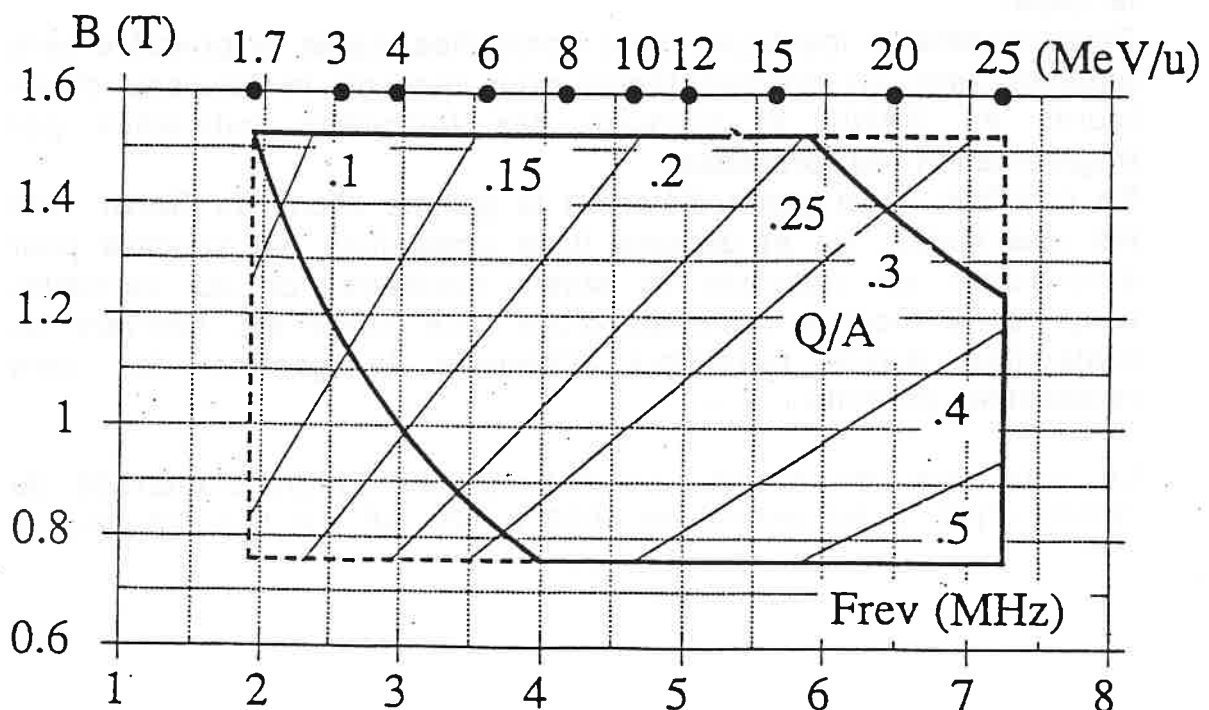
Cette gamme de fréquence est couverte par des résonateurs accordables entre 9.6 et 14 MHz. à condition de travailler en utilisant les harmoniques 2, 3 et 4.

Par la suite, il est apparu souhaitable d'élargir la gamme d'énergie vers le bas, ce qui semble possible en utilisant l'harmonique 5 qui doit permettre d'atteindre environ 1.7 Mev/nucléon.

L'ouverture angulaire des dees a été choisie de 40° ce qui donne une efficacité théorique d'accélération ($= \sin(h\theta/2)$) rappelée par le tableau suivant:

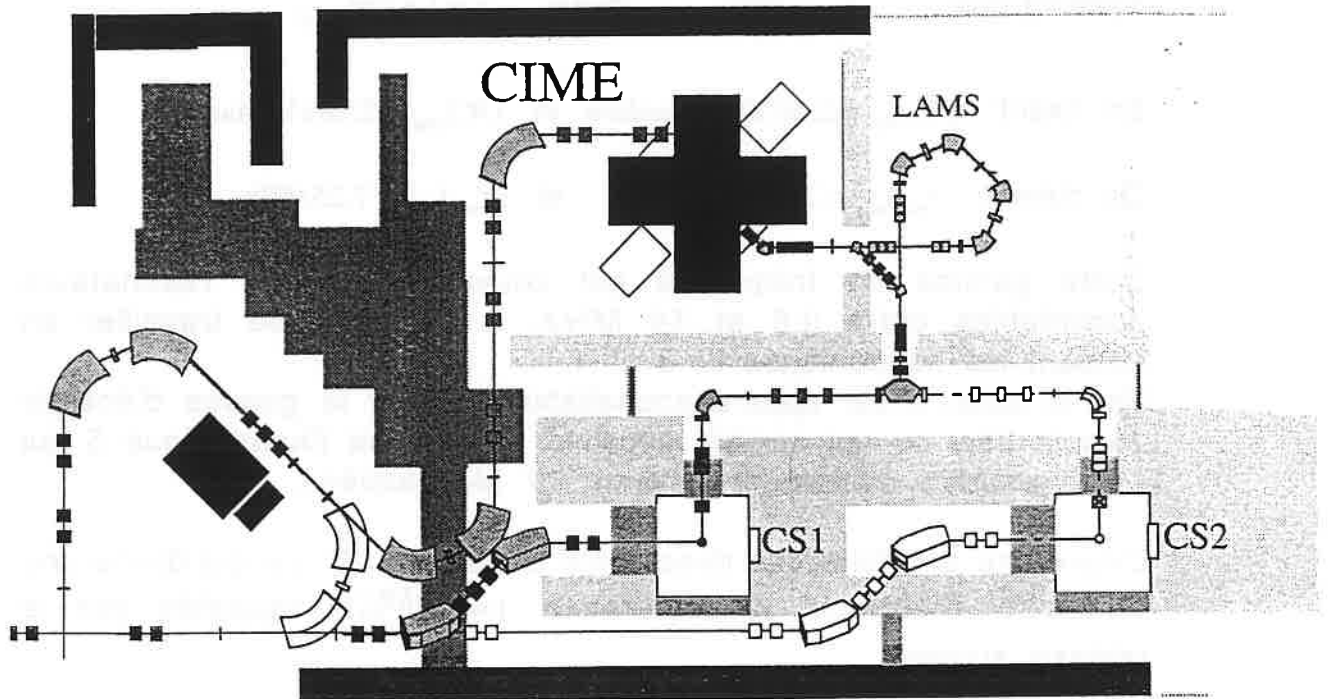
h	2	3	4	5
$\sin(h\theta/2)$	0.64	0.86	0.98	0.98

Ainsi défini, le diagramme de fonctionnement de CIME est parfaitement déterminé:



La grande force de **SPIRAL** comparé aux projets concurrents est la très grande variété des faisceaux produits par le GANIL. En effet, dans le processus de fragmentation des ions, le choix d'un ion incident selon A ou Z oriente très sensiblement la probabilité de formation de noyaux secondaires possédant les nombres de A et de Z recherchés.

La figure suivante montre la disposition géographique retenue pour le projet.



SPIRAL se situe dans le prolongement du hall machine existant. Les ensembles cible/sources seront placés dans 2 "casemates" en sous sol, fortement blindées pour se protéger de l'important flux de neutrons produit au cours de l'impact du faisceau primaire sur la cible.

Deux casemates identiques sont construites, seule la première sera équipée dans un premier temps pour recevoir le faisceau d'ions lourds du GANIL et produire des faisceaux radioactifs par fragmentation du projectile.

En parallèle, il est prévu d'étendre la gamme d'ions du GANIL vers les ions légers: He et deutons (Une proposition est soumise pour autorisation aux autorités de sûreté nucléaire) ce qui permettra d'équiper la seconde casemate d'une cible lourde qui, recevant les projectiles légers permettra d'étendre la gamme des ions radioactifs produits.

Le coût total du projet, incluant l'augmentation d'intensité du GANIL (THI), a été estimé en 1993 à 120 MF. Le feu vert pour la

réalisation a été donné en octobre 1993 et les études détaillées ont été entreprises immédiatement après cette date. Les grandes étapes de la construction sont évoquées dans le tableau suivant:

Étape	Période
Études préliminaires	1994
Génie civil	1995
Installation de CIME	1 ^o sem. 1996
Essais de CIME en ions stables	2 ^o sem. 1997
Installation des voies de faisceau	1997
Essais en ions radioactifs	1 ^o sem. 1998
Mise en service	Fin 1998

Les études et la réalisation impliquent les personnels de GANIL ainsi qu'une contribution particulièrement active et importants d'autres laboratoires français du CNRS et du CEA.

6 Production des ions: la cible

Deux types de cibles sont envisagées: Une cible légère pour les faisceaux primaires d'ions lourds et une cible lourde pour les faisceaux primaires d'ions légers.

Dans l'immédiat, seule la cible légère a fait l'objet d'études approfondies et d'essais.

Sa qualité première doit être de résister au faisceau primaire (6 kW) sans se détruire.

Sa structure microscopique et macroscopique doit permettre une libération aisée des noyaux radioactifs créés (phénomène de diffusion). Pour faciliter la diffusion des ions, la cible est chauffée à une température comprise entre 1800 et 2300 °C, soit directement par la puissance apportée par le faisceau incident, soit avec l'apport d'un chauffage auxiliaire.

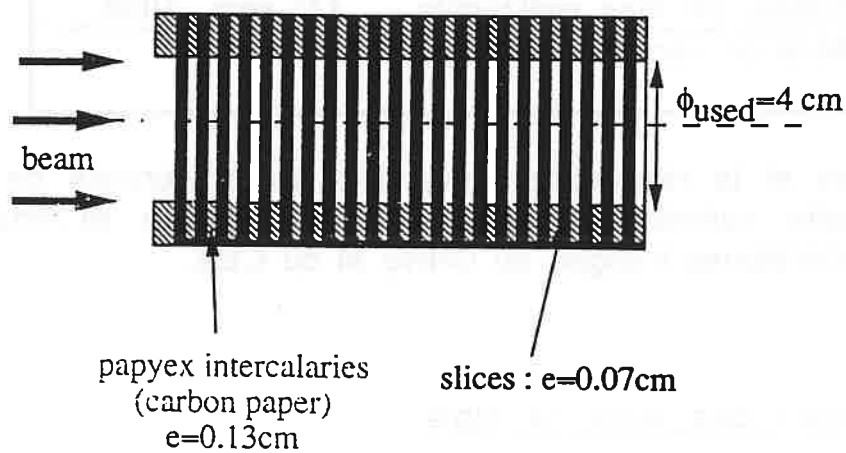
La structure microscopique doit être granulaire, avec une granulométrie aussi fine que possible pour faciliter la sortie des ions du grain et une bonne porosité pour qu'ils puissent circuler entre les grains.

Le nombre total de noyaux exotiques d'une espèce produits est proportionnel au produit de la section efficace de production pour cette espèce par le flux de particules incidentes et par le nombre de diffusions effectuées par les ions primaires dans la cible. On

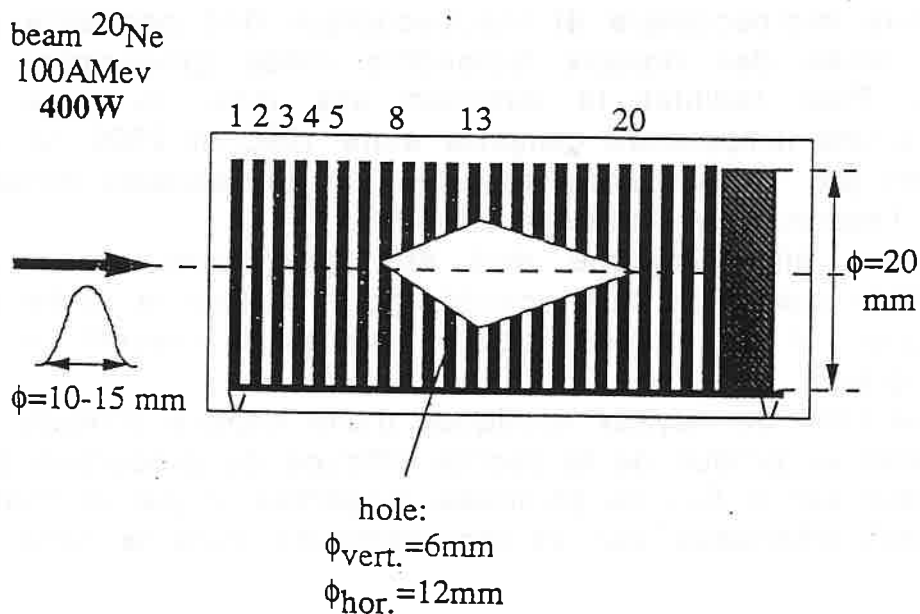
montre que, pour des ions incidents lourds, ce produit croît lorsque le Z de la cible diminue.

Il a donc été choisi de réaliser les cibles en graphite (carbone) avec une granulométrie très fine ($4\mu\text{m}$) et une porosité de 8%. Ce matériau est également suffisamment réfractaire pour supporter la température élevée. En outre le carbone, noyau de grande stabilité s'active très peu sous l'effet du bombardement.

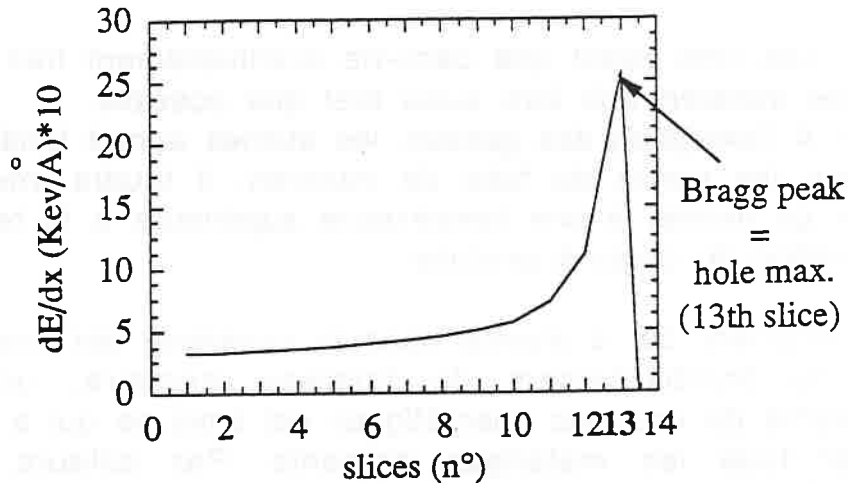
La première cible réalisée était un empilement de lamelles de 0.7 mm d'épaisseur espacées de 1 mm, de manière à faciliter la diffusion des atomes radioactifs.



Les premiers essais avec un faisceau limité à 400 w ont rapidement conduit à une destruction de la cible par l'apparition d'une cavité à l'intérieur de celle ci.

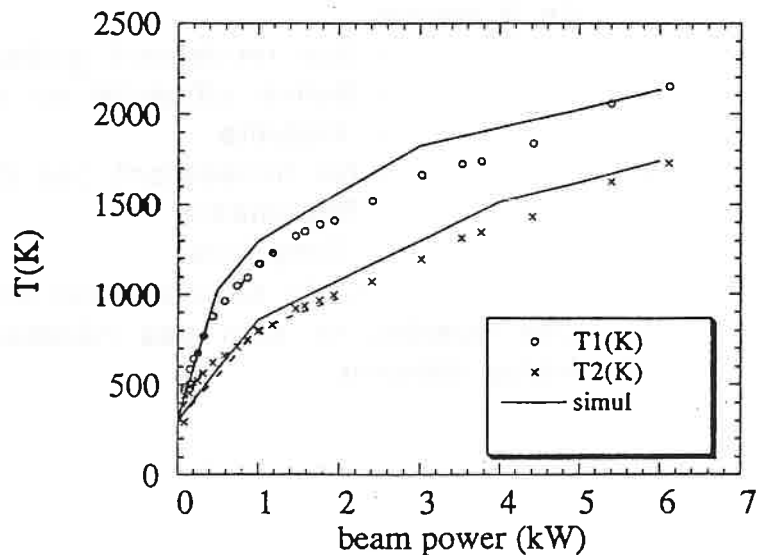
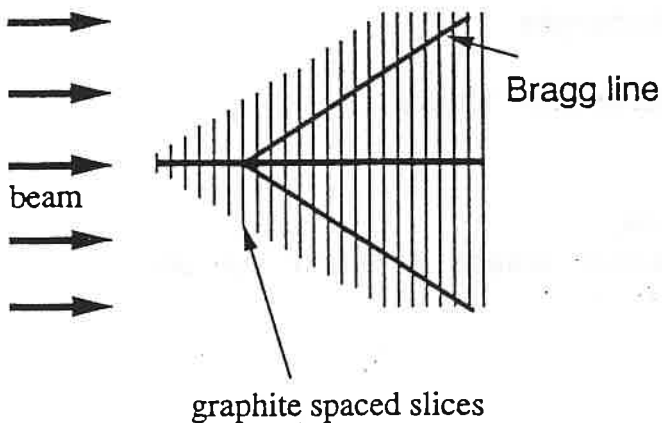


Cette destruction a été expliquée par le fait que l'énergie du faisceau est déposée sur une très faible épaisseur par le fait que, pour des ions lourds, le pic de Bragg qui décrit la densité d'énergie déposée est très pointu ce qui entraîne un échauffement local trop important et la sublimation du graphite.



Une simulation numérique de l'échauffement du graphite a été entreprise et a confirmé cette hypothèse. Elle a également montré que le phénomène de sublimation locale était rapide et devait se stabiliser de lui même dès que la distribution de la perte d'énergie devenait homogène.

Ces calculs ont conduit à l'élaboration d'une cible cônica permettant une meilleure distribution de l'énergie déposée. Cette cible a été testée à Louvain-La-Neuve avec un faisceau de protons de 30 MeV (distribution de la perte d'énergie très comparable aux ions lourds). Elle a montré une très bonne adéquation entre la mesure et les calculs ainsi qu'une bonne tenue jusqu'à une puissance incidente de 6 kW.



7 Production des ions: La source

Les sources de SPIRAL doivent produire des ions multichargés à partir des atomes radioactifs provenant de la cible.

Le transfert des atomes entre la cible et la source est en soi un problème pour 2 raisons:

1- Les ions ayant une demi-vie éventuellement très courte, le temps de transfert doit être aussi bref que possible.

2- A l'exception des gazeux, les atomes auront tendance à se coller sur les parois du tube de transfert. Il faudra envisager de chauffer ce dernier à une température supérieure à la température d'évaporation du corps à produire.

L'environnement de la source dans la casemate est hostile. Sous l'effet du bombardement du faisceau primaire, un nombre considérable de neutrons énergétiques est émis ce qui a pour effet d'activer tous les matériaux présents. Par ailleurs, la cible bombardée contiendra un nombre important de radionuclides qui, sortant de la cible pourront contaminer son conteneur ainsi que la source.

On envisage qu'un ensemble cible-source puisse avoir une durée de vie de 2 semaines après quoi il devra être remplacé par un ensemble neuf. Cette opération ne pourra se faire que par manipulation à distance.

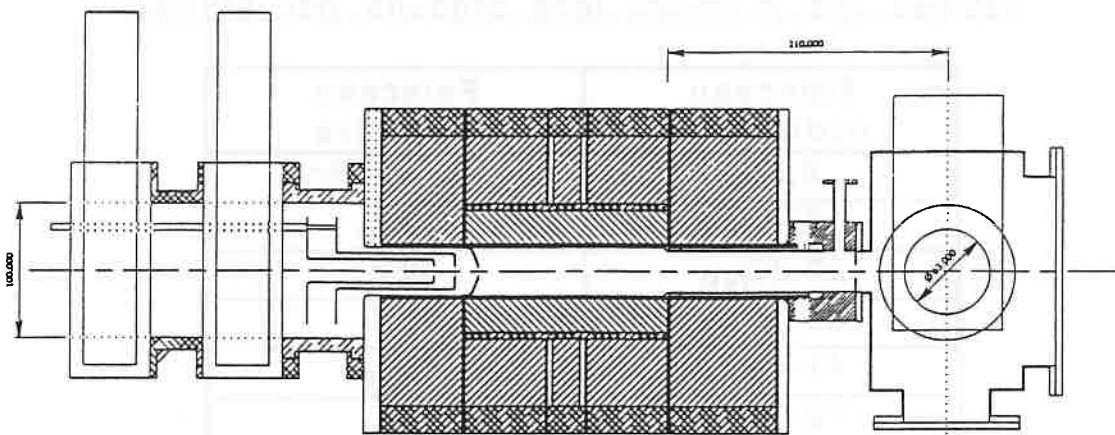
La cible et la source usagées seront alors stockées dans un cercueil de plomb le nombre de mois nécessaire pour permettre une décroissance suffisante de l'activité. On pourra alors envisager un démantèlement ayant pour objet la réutilisation de certains composants.

Pour résumer, on peut dresser la liste des qualités indispensables de la source:

- Bon rendement global d'ionisation
- Bonne efficacité en multichargés
- Fiabilité
- Ne nécessitant pas d'intervention locale
- Robustesse
- Simplicité
- Coût de réalisation modéré.

Ces qualités ne sont pas nécessairement aisées à réunir sur un même élément.

Une source à aimants permanents au Fer/Néodyme/Bore appelée NANOGAN 2 a été développée spécialement pour produire les ions gazeux.



Ø 40 mm plasma chamber
($V_{\text{ECR4}}/3$ and $|B| \Leftrightarrow \text{ECR4}$ with 1050 A)
with double cooling circuit

compact target box
with or without
ohmic heating

Cette source, d'un fonctionnement et d'un maniement extrêmement simple a été testée dans l'aire d'expérience SIRa à GANIL. Les résultats obtenus ont été satisfaisants, ils sont rappelés dans le tableau suivant:

Faisceaux Radioactifs mesurés à GANIL (SIRa)

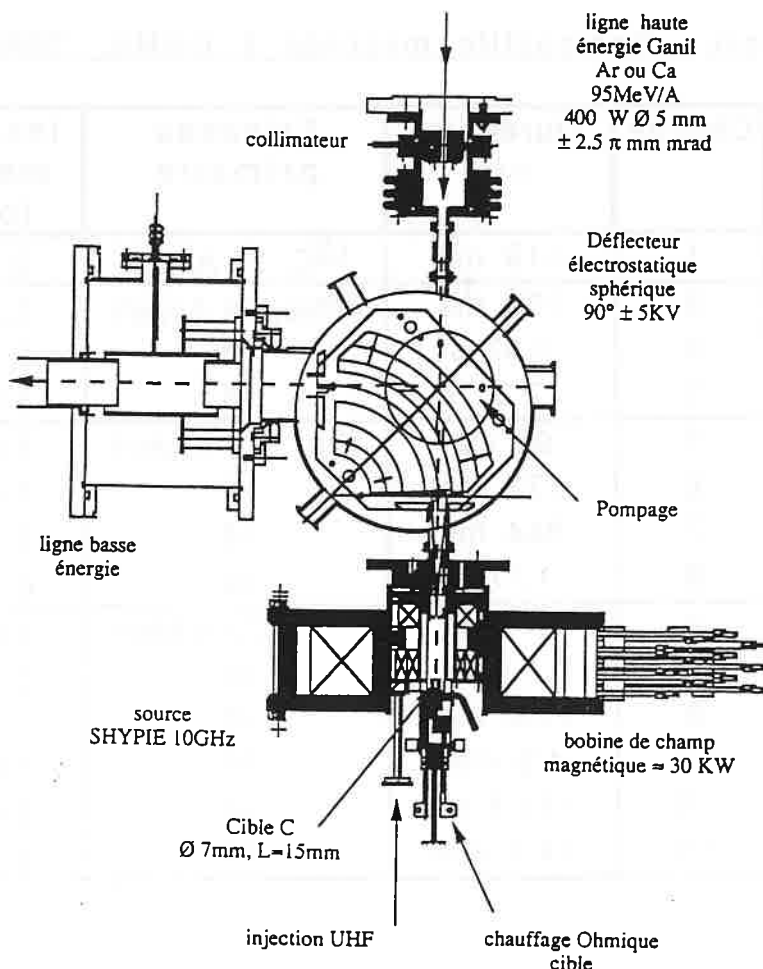
Noyau	Charge	Durée de vie	Faisceau primaire	Intensité mesurée ions/s
^8He	1	119 ms	^{13}C , 75 A.MeV	$2.1 \cdot 10^5$
^{17}Ne	5	109 ms	^{20}Ne , 96 A.MeV	$2.3 \cdot 10^5$
^{18}Ne	5	1.67 s	id	$3.1 \cdot 10^6$
^{19}Ne	5	17.22 s	id	$5.0 \cdot 10^7$
^{32}Ar	8	98 ms	^{36}Ar 96, A.MeV	$1.0 \cdot 10^2$
^{33}Ar	8	173 ms	id	$1.8 \cdot 10^4$
^{34}Ar	7	844 ms	id	$1.4 \cdot 10^6$
^{35}Ar	8	1.77 s	id	$6.2 \cdot 10^7$
^{72}Kr	9	17.2 s	^{78}Kr , 73 A.MeV	$2.6 \cdot 10^2$
^{73}Kr	9	27 s	id	$2.5 \cdot 10^3$
^{74}Kr	9	11.5 min	id	$7.0 \cdot 10^4$
^{75}Kr	10	4.3 min	id	$1.8 \cdot 10^5$
^{76}Kr	10	14.8 h	id	$3.6 \cdot 10^6$
^{77}Kr	10	74.4 min	id	$6.1 \cdot 10^6$

Cette source NANOGAN 2 sera par conséquent la source de première génération équipant SPIRAL pour les ions radioactifs gazeux. Les premiers ions produits seront choisis parmi la liste ci-dessous:

Tableau des premiers ions produits par SPIRAL

Faisceau radioactif	Faisceau primaire
6,8He	^{13}C ou ^{18}O
17-19Ne	^{20}Ne
23-26Ne	^{36}S
32-35Ar	^{36}Ar
41-46Ar	^{48}Ca
72-77Kr	^{78}Kr

Dans le but de produire des ions condensables (entre autres, des ions métalliques), une source de géométrie différente a été développée. La cible de graphite est placée cette fois sur l'axe de la source, très près de la surface du plasma ECR. Le faisceau primaire entre dans la source sur son axe, à travers l'électrode d'extraction et vient frapper la cible. Cette source nommée SHYPIE (Source HYbride pour la Production d'Ions Exotiques)



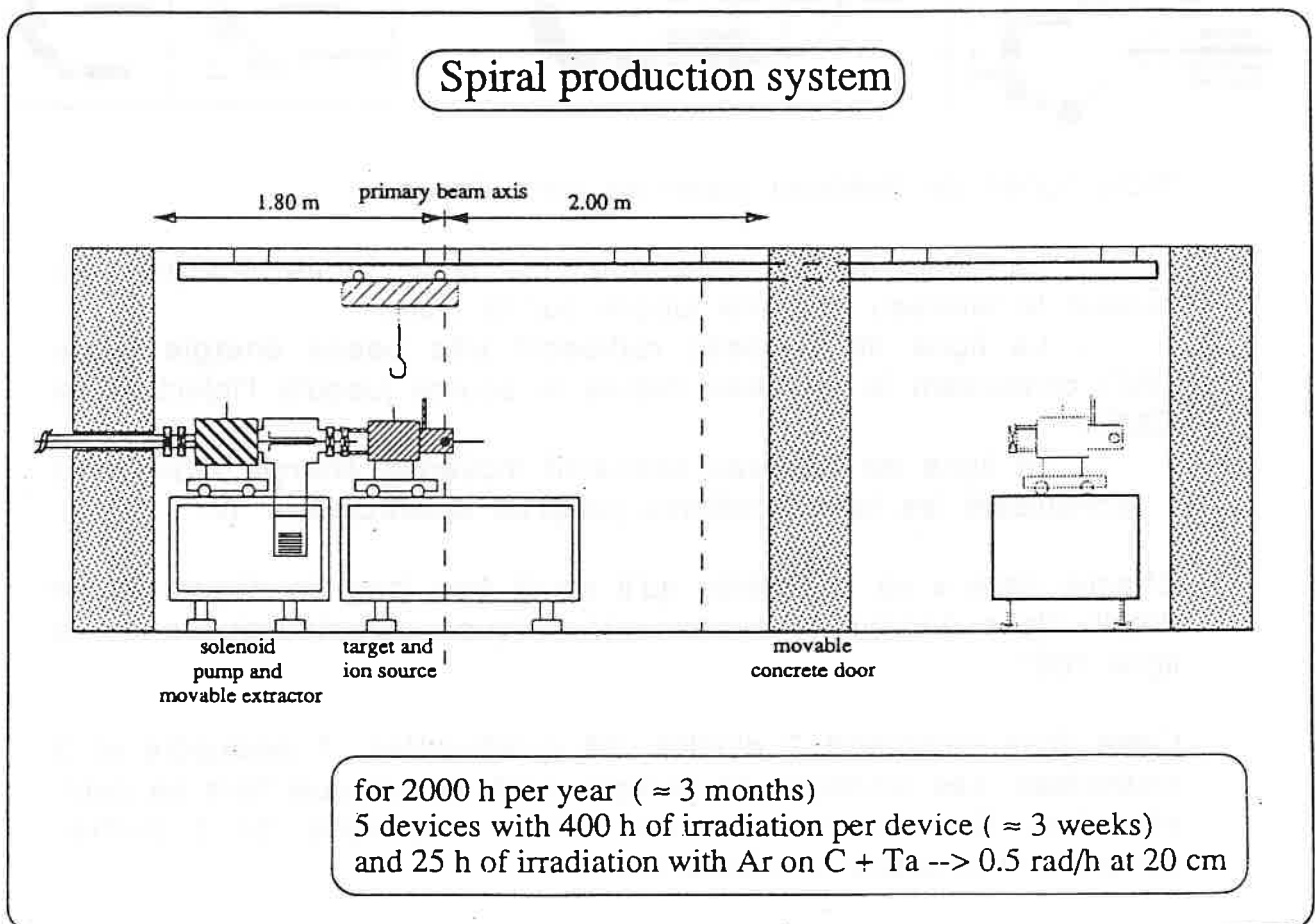
La disposition selon l'axe du faisceau de cette source est motivée par le fait que les aimants permanents sont sensibles aux neutrons rapides qui ont pour effet de les démagnétiser très rapidement.

Les neutrons rapides étant émis par la cible, préférentiellement selon l'axe du faisceau incident, une façon de protéger les aimants est de ne pas en disposer derrière la cible.

Cet ensemble cible/source a été testé en décembre 1995 et a effectivement produit des ions radioactifs de matériaux condensables (^{34}Cl , $^{37,38}\text{K}$, ^{39}Ca , ^{29}Al , ^{25}Na , ^{18}F) mais la cible était par nécessité de très petite taille et les intensités produites très faibles.

Il s'agit donc pour l'instant d'une voie de recherche intéressante, qui doit être poursuivie mais qui demandera d'importants développements techniques avant d'être opérationnelle.

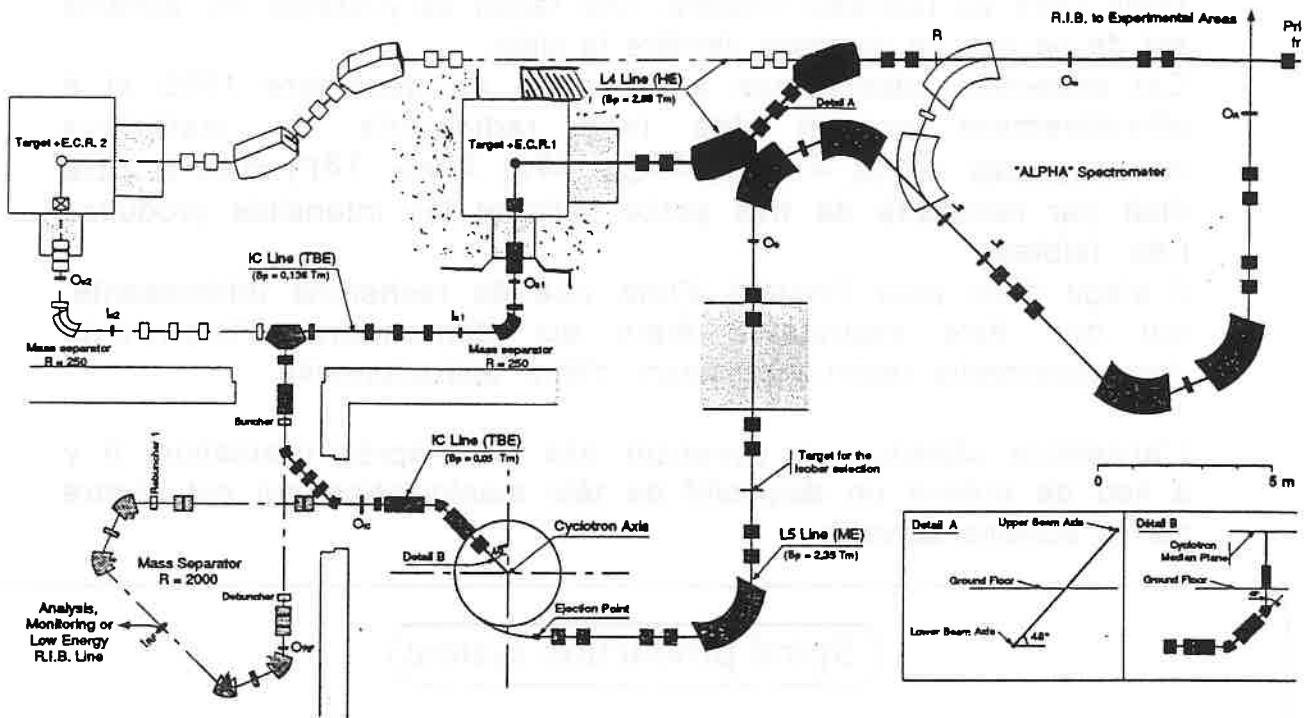
L'ensemble cible/source devenant très actif après irradiation, il y a lieu de prévoir un dispositif de télé manipulation qui est illustré sur le schéma suivant:



La source usagée est stockée dans une pièce réservée à cet usage en attendant que sa radioactivité ait suffisamment décru pour permettre d'intervenir.

8- Transport des ions

Le transport des ions est illustré par le schéma suivant:



Trois lignes de faisceau distinctes sont décrites:

- La ligne du faisceau primaire (ligne haute énergie) qui conduit le faisceau primaire jusque sur la cible.
- La ligne de faisceau radioactif très basse énergie (ligne TBE) conduisant le faisceau depuis la source jusqu'à l'injection de CIME.
- La ligne de faisceau radioactif moyenne énergie (ligne ME) conduisant les ions accélérés jusqu'au spectromètre α .

Chaque ligne a sa spécificité qu'il serait trop long de décrire ici en détail. Nous donnerons seulement quelques caractéristiques de la ligne TBE:

Cette ligne comprend 7 dipôles, 24 quadrupôles, 1 sextupôle et 3 solénoïdes. Les fonctions de la ligne sont, autant que faire se peut, séparées. On peut les décrire comme une suite de 2 parties comprenant chacune plusieurs sections:

- Première partie: Adaptée à l'extraction de la source, cette première partie aura une acceptation de $150 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ et une rigidité magnétique pouvant atteindre $0.136 \text{ T} \cdot \text{m}$.

-Première section: Analyse en masse du faisceau par l'action d'un spectromètre de masse achromatique composé de 2 dipôles séparés par un triplet quadrupolaire.

Le premier dipôle, élément d'analyse ($\theta = 90^\circ$, $\rho = 0.5$ m) sera à double focalisation. Grâce à la faible dispersion en énergie des ions émis par la source ECR (± 5 V par charge), il permettra d'atteindre une résolution en masse de $\pm 4 \cdot 10^{-3}$ pour une émittance radiale de $80 \pi \text{ mm.mrad}$. Cet aimant sera précédé d'un solénoïde en sortie de source, puis d'un triplet quadrupolaire assurant l'adaptation bétatron (dimension du faisceau dans 2 plans orthogonaux) au point objet du spectromètre et enfin d'un sextupôle destiné à compenser les aberrations géométriques du second ordre dues à la grande ouverture angulaire.

Rappel: la résolution d'un spectromètre est égale à:

$$\frac{\Delta m}{m} = 2 \times \left(\frac{e_i}{C_d} \right)$$

Avec e_i : dimension du faisceau au point image

C_d : Coefficient de dispersion, ici $1 \cdot 10^{-4}$

$$e_i = \sqrt{e_0^2 + \left(C_d \times \frac{\Delta p}{p} \right)^2}$$

e_0 : dimension du faisceau due à la seule émittance.

-Seconde section: Composée de 4 quadrupôles et 2 dipôles à 45° , elle assure une déviation achromatique de grandissement -1 et l'adaptation bétatron au point objet de la deuxième partie.

• Deuxième partie: Avec une acceptation de $80 \pi \text{ mm.mrad}$ et une rigidité maximum de 0.07 T.m, la deuxième partie constitue l'injection axiale du cyclotron CIME.

Destinée à assurer l'adaptation de l'émittance du faisceau à l'acceptation du cyclotron dans l'espace des phases à 6 dimensions, elle se décompose en quatre sections distinctes:

-Première section: Adaptation bétatron (dimensions du faisceau dans 2 plans orthogonaux) et regroupement (extension en phase = dimension longitudinale du faisceau)

-Seconde section: Adaptation chromatique radiale

-Troisième section: Adaptation chromatique verticale.

-Quatrième section: découplage bétatronique.

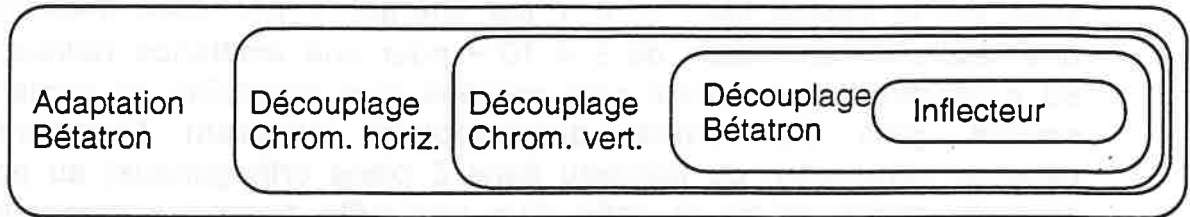
L'ensemble de l'inflecteur d'injection et du champ de fuite est en effet complexe et entraîne des couplages de trois ordres:

-Couplage bétatronique (entre les plans x et y)

-Couplage chromatique vertical

-Couplage chromatique horizontal

Le système d'injection axiale peut être considéré comme un ensemble de sous systèmes imbriqués (comme des poupées russes) assurant chacun une et une seule fonction spécifique.



Une autre façon de considérer ce problème est d'écrire la matrice transfert de l'ensemble comprenant l'injection axiale et le déflecteur:

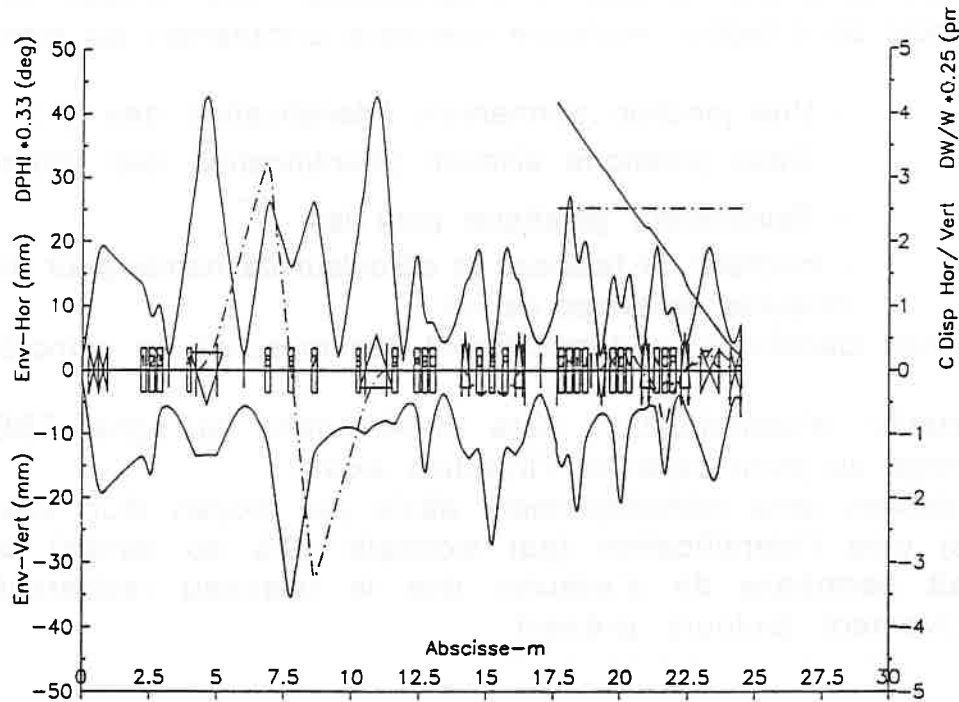
$$\begin{array}{c} x \\ x' \\ y \\ y' \\ l \\ \partial p/p \end{array} = \begin{array}{c|c|c|c|c|c} a_1 & a_2 & b_1 & b_2 & 0 & d_1 \\ \hline a_3 & a_4 & b_3 & b_4 & 0 & d_2 \\ \hline e_1 & e_2 & f_1 & f_2 & 0 & h_1 \\ e_3 & e_4 & f_3 & f_4 & 0 & h_2 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \times \begin{array}{c} x \\ x' \\ y \\ y' \\ l \\ \partial p/p \end{array}$$

Le découplage bétatron consiste à annuler les termes b et e , le découplage de chromaticité horizontale consiste à annuler les termes d , et ainsi de suite jusqu'à obtenir une matrice transfert parfaitement découplée:

$$\begin{array}{c|c|c|c|c|c} a_1 & a_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline a_3 & a_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & f_1 & f_2 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & f_3 & f_4 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}$$

Le système d'injection axiale doit également pouvoir s'adapter au fait que le fonctionnement de CIME en harmoniques 2,3,4 et 5 nécessitera 2 centres différents et 2 types d'inflecteurs ayant des matrices de transfert complètement distinctes.

La figure suivante montre le profil de l'enveloppe du faisceau tout au long de la ligne TBE avec l'inflecteur de Mueller utilisé pour les harmoniques 2 et 3.



9-Identification des ions et diagnostics de faisceau

Les atomes qui sortent de la cible et sont ionisés par la source sont multiples. Le pouvoir séparateur de notre analyse en masse ($\pm 4 \cdot 10^{-3}$) ne permet pas de séparer des ions de q/m voisin et l'on prévoit que le faisceau après analyse renferme encore plusieurs noyaux distincts.

Le premier pas consiste donc à **identifier** le faisceau radioactif produit pour s'assurer que le noyau recherché est effectivement produit par la source.

La signature d'un noyau radioactif est évidemment sa radioactivité. Celle ci peut s'exprimer sous plusieurs formes:

- Émission de rayons γ d'énergie déterminée.
- Émission de β^+ ou de β^-
- Émission de protons

Certains noyaux sont actuellement peu ou pas connus et donc difficiles à prévoir. Il faut également envisager le cas de noyaux très voisins émettant des rayonnements identiques ou presque: ils ne pourront alors être identifiés que par la mesure de leur durée de vie. Il faut enfin envisager que le faisceau recherché soit très ténu

et complètement "noyé" par un voisin des ordres de grandeur plus intense.

On voit donc que la station d'identification des noyaux sera un ensemble de détection nucléaire complexe comprenant au moins:

- Une jonction germanium (identification des γ)
- Deux jonctions silicium (identification des protons)
- Scintillateur plastique pour les β^-
- Hacheur de faisceau et dérouleur de bande pour les mesures de temps de vie.

Certaines identifications demanderont des mesures en coïncidence.

La station d'identification sera située dans la ligne TBE, au voisinage du point objet de l'injection axiale.

Le faisceau sera périodiquement dévié (au moyen d'un déviateur pulsé) vers l'identification (par exemple 10% du temps) ce qui devrait permettre de s'assurer que le faisceau recherché est effectivement toujours présent.

Les autres diagnostics de la ligne TBE seront parfaitement classiques et comprendront les habituelles **Faraday** (Mesure interceptive de l'intensité totale) et les **profileurs** à fils.

CIME comportera également des diagnostics classiques pour un cyclotron: Sonde radiale à débattement total avec doigt intégral et doigts différentiels, sondes de phase (non interceptive), sondes interceptives à l'entrée des canaux d'extraction.

Mais il sera équipé également de diagnostics de type nucléaire (jonction au Silicium ou scintillateur plastique et photo multiplicateur) qui, comptant les particules une par une et permettant d'identifier précisément un temps (par rapport à une référence) ou l'énergie permettent de diagnostiquer de manière très précise le comportement de faisceaux très peu intenses.

10- Réglage de CIME et des lignes

Les diagnostics de type particule par particule dans CIME permettront de surveiller son bon fonctionnement mais pas de réaliser le réglage initial.

Il est prévu de réaliser le réglage initial en utilisant un faisceau d'ions stables de q/m très voisin et d'intensité permettant l'usage des diagnostics classiques.

Le passage de l'ion stable à l'ion exotique se fera en décalant d'une quantité exactement calculable la tension source, les champs magnétiques, les fréquences et les phases.

Ceci n'est pas forcément chose facile car, s'il est aisé de modifier de manière parfaitement reproductible une tension ou une fréquence, ce n'est pas vrai pour un champ magnétique (à cause de l'hystérésis) ou pour une phase (que l'on ne sait pas mesurer précisément)

$$\text{Si l'on pose: } \varepsilon = \frac{\partial \left(\frac{q}{m_0} \right)}{\frac{q}{m_0}}$$

et γ_m la valeur moyenne de γ dans CIME

On peut dresser le tableau suivant des solutions possibles:

	$\frac{\Delta B_{\text{ligne}}}{B_{\text{ligne}}}$	$\frac{\Delta V_s}{V_s}$	$\frac{\Delta \phi}{\phi}$	$\frac{\Delta f}{f}$	$\frac{\Delta B_c}{B_c}$
A	0	$\frac{\varepsilon}{\gamma}$	$\frac{\Delta f}{f} - \frac{\varepsilon}{\gamma^2}$	Libre	$\gamma_m \frac{\Delta f}{f} - \varepsilon$
B	$-\frac{\varepsilon}{\gamma+1}$	0	$\frac{\Delta f}{f} - \frac{\varepsilon}{\gamma(\gamma+1)}$	Libre	$\gamma_m \frac{\Delta f}{f} - \varepsilon$
C	$\gamma^2 \frac{\Delta f}{f} - \varepsilon$	$\gamma(\gamma+1) \frac{\Delta f}{f} - \varepsilon$	0	Libre	$\gamma_m \frac{\Delta f}{f} - \varepsilon$

On remarque qu'il reste un paramètre libre: la variation de fréquence. On peut donc choisir astucieusement pour minimiser le nombre de paramètres à varier:

D	0	$\frac{\varepsilon}{\gamma}$	0	$\frac{\varepsilon}{\gamma^2}$	$(\gamma_m - 1)\varepsilon$
E	$-\frac{\varepsilon}{\gamma+1}$	0	0	$\frac{\varepsilon}{\gamma(\gamma+1)}$	$(\gamma_m/2 - 1)\varepsilon$

La solution D semble particulièrement intéressante puisqu'on ne varie ni les phases relatives ni le champ dans les lignes. On a

cependant une variation de fréquence, il faut vérifier que ceci n'entraîne pas de variation de phase, en particulier dans les groupeurs. On a également une faible variation de champ dans CIME ce qui fait que l'isochronisme est conservé globalement mais non localement (Car on ajuste le champ sur la valeur moyenne de γ et non sur sa valeur locale)

11- Nécessité d'une meilleure séparation: LAMS

La séparation en masses procurée par la ligne TBE ($\Delta m/m = \pm 4 \cdot 10^{-3}$) n'est en fait pas suffisante dans la plupart des cas pour éviter que de nombreux faisceaux différents se présentent simultanément à l'entrée de l'inflecteur de CIME.

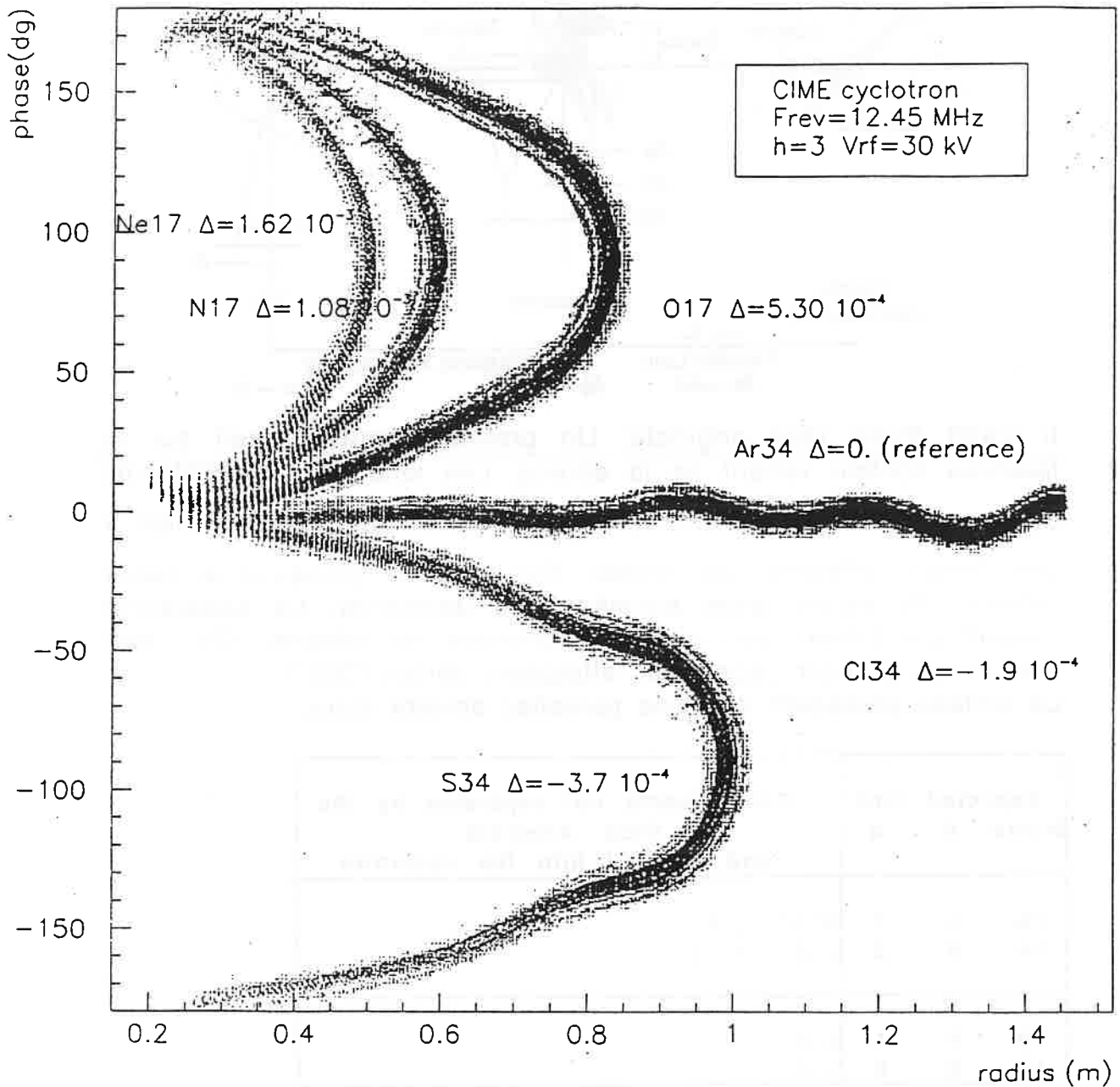
Le tableau suivant donne pour quelques ions la liste des polluants qui seront envoyés simultanément dans CIME.

Certains de ces faisceaux pourront être des ordres de grandeur plus intenses que le faisceau recherché.

Expected ions			Contaminants not separated by the first analysis and Injected into the cyclotron						
Name	A	q							
He	6	1	C 12	O 18	N 12	Li 6			
He	6	2	C 12	O 18	N 15	Ne 21	He 3		
			H 3	Li 6	N 12				
He	8	1	O 16	Li 6					
He	8	2	He 4	C 12	O 16	Li 6	N 12		
Ne	17	2 to 6	O 17	N 17	F 17				
Ne	18	3	C 12	O 18	He 6	Li 6	N 12	N 18	
Ne	19	3 to 6	F 19	N 19	O 19				
Kr	73	15	S 34	Kr 78	Cl 34	Cl 39	Ar 34	Ar 39	

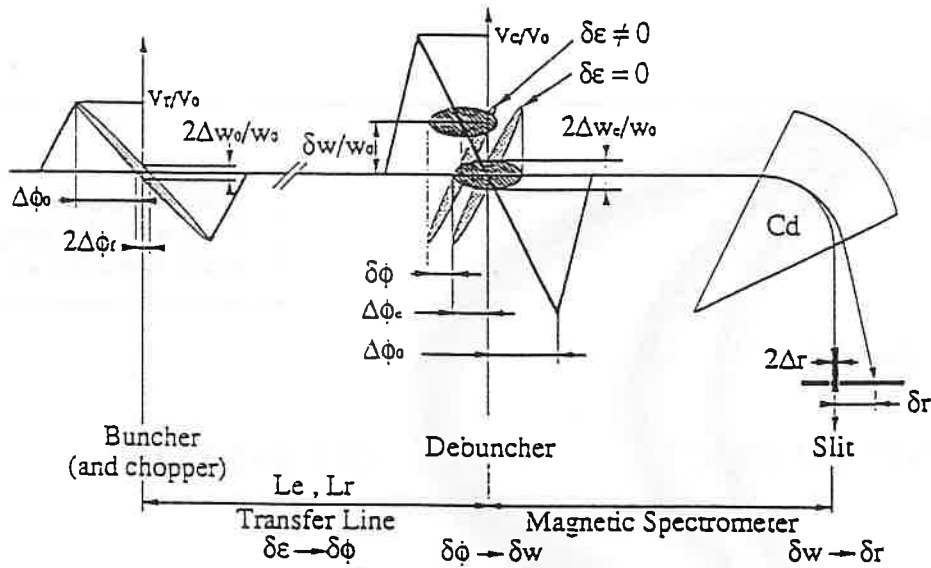
Les faisceaux injectés dans CIME seront accélérés et suivront chacun un sa propre loi de phase. Lorsqu'ils atteindront un déphasage de 90° , ils seront décélérés et retourneront jusqu'au centre (en effet, au premier ordre, la focalisation ne dépend que du champ magnétique).

Ce comportement a été simulé dans le cas d'un faisceau d' ^{34}Ar accompagné de quelques polluants probables.



Ces faisceaux parasites sont très gênants car ils vont venir polluer le centre et éventuellement l'activer et surtout, ils vont "aveugler" les diagnostics et les rendre inutilisables.

Il a donc été imaginé d'adjoindre un spectromètre à haute résolution dans la ligne TBE. Le schéma de principe de ce séparateur nommé LAMS (Large Acceptance Mass Separator) est montré ci-dessous.



Il s'agit d'une idée originale: Un premier groupeur agit sur le faisceau continu venant de la source. Les ions de q/m différents ayant une vitesse différente ($v \propto (q/m)^{0.5}$) arriveront groupés, mais à des temps différents au niveau d'un second groupeur à haute tension. Ils seront alors accélérés ou décélérés. Le séparateur magnétique suivant pourra alors facilement les séparer. On arrive ainsi à un pouvoir séparateur atteignant $\partial m/m = 1/2000$. Le tableau précédent des ions parasites devient alors:

Expected ions			Contaminants not separated by the first analysis and injected into the cyclotron
Name	A	q	
He	6	1	N 12 Li 6
He	6	2	Li 6 N 12
He	8	1	Li 8
He	8	2	Li 8
Ne	17	2 to 6	O 17 N 17 F 17
Ne	18	3	C 12 O 18 Li 6 N 12 N 18
Ne	19	3 to 6	F 19 N 19 O 19
Kr	73	15	Cl 34