



# Réalisation d'un dispositif de test de cibles pour la production d'ions radioactifs par la méthode ISOL

F. Durantel

► **To cite this version:**

F. Durantel. Réalisation d'un dispositif de test de cibles pour la production d'ions radioactifs par la méthode ISOL. Physique Nucléaire Théorique [nucl-th]. Conservatoire national des arts et métiers - CNAM, 2005. Français. <tel-00009664>

**HAL Id: tel-00009664**

**<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00009664>**

Submitted on 4 Jul 2005

**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.

**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS**

CENTRE REGIONAL ASSOCIE DE BASSE NORMANDIE

---

**MEMOIRE**

présenté en vue d'obtenir

le **DIPLOME D'INGENIEUR C.N.A.M.**

en

**INSTRUMENTATION – MESURES**

par

**Florent DURANTEL**

---

*Réalisation d'un dispositif de test de cibles pour la production d'ions  
radioactifs par la méthode ISOL*

Soutenu le 19 Janvier 2005

---

**JURY**

PRESIDENT : M. P. Juncar

MEMBRES : MM. P. Dujardin  
G. Alcuri  
R. Leroy  
P. Jardin

Directeur du mémoire



**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS**

**CENTRE REGIONAL ASSOCIE DE BASSE NORMANDIE**

---

**MEMOIRE**

présenté en vue d'obtenir

**le DIPLOME D'INGENIEUR C.N.A.M.**

en

**INSTRUMENTATION – MESURES**

par

**Florent DURANTEL**

---

*Réalisation d'un dispositif de test de cibles pour la production d'ions  
radioactifs par la méthode ISOL*

---



## Remerciements

A Renan Leroy pour son accueil dans le GPI et pour ses critiques constructives, à Philippe Dujardin pour ses conseils avisés, à messieurs Juncar et Alcuri pour avoir accepté de faire partie du jury, à Pascal Jardin, mon directeur de stage, pour son investissement dans ce rôle, pour ses encouragements et son soutiens constant, à Maître Gaubert qui m'a tout appris et dont je tente humblement de suivre la trace, à Jean Yves Pacquet sans qui le hall D ne serait pour moi qu'un vaste univers hostile et pour son aide précieuse et quasi quotidienne, à Nathalie Lecesne pour m'avoir fait connaître les joies des collaborations internationales, à Mickael Dubois qu'il me pardonne de lui avoir démantibulé son banc de test, à Frédéric Lemagnen pour ses informations précieuses sur les fours, à Marie Geneviève Saint Laurent pour ses conseils et sa relecture du mémoire, à Frédérique Pellemoine et Stéven Tanguy pour tout le dossier de plan et les fruits de mer, à Michel Ozille pour la correction des plans et son aide précieuse lors du montage du distributeur, à Vincent Morel pour la même raison et pour ses cours de dessin industriel, à Eric Meding, Patrick Robert et Serge Cros que j'ai beaucoup, beaucoup sollicité, à Didier Heuzé pour les mêmes raisons, à Cynthia Huet Equilbec pour m'avoir supporté dans le bureau 110 ainsi qu'à Liviu Penescu pour les stages de tennis intensifs, à Laurent Maunoury, à Christophe Barué et Patrick Lehérissier, au professeur Michelon pour sa relecture à régime forcé, à Jean et Chantal pour les corrections express, à Marie pour les pauses cinéma absolument nécessaires, à Virginia pour l'espoir, à tous ceux que j'ai oublié, enfin à mon fils Thomas qui sans protester à fait les frais d'une longue rédaction, à tous pour votre disponibilité, pour m'avoir fait confiance, MERCI.



# Table des matières

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>5</b>
---------------------------	----------

<b>PREMIERE PARTIE : CONCEPTION DU DISPOSITIF</b> .....	<b>9</b>
---	----------

## CHAPITRE I : CADRE GENERAL DU PROJET

<b>I.1 LE GANIL, PRESENTATION GENERALE</b> .....	<b>11</b>
<b>I.2 PRODUCTION DE FAISCEAUX RADIOACTIFS</b> .....	<b>12</b>
I.2.1 FRAGMENTATION EN VOL.....	13
I.2.2 LA METHODE ISOL.....	13
<b>I.3 EFFICACITES DANS LA METHODE ISOL</b> .....	<b>15</b>
I.3.1 EFFICACITES D'IONISATION ET DE TRANSPORT .....	15
I.3.2 DIFFUSION.....	15
I.3.3 EFFUSION.....	17
<b>I.4 QUELQUES RESULTATS DE DIFFUSION</b> .....	<b>18</b>
<b>I.5 PRINCIPES DU PROJET ET PROPOSITION D'EXPERIENCE</b> .....	<b>21</b>
I.5.1 PRINCIPES DU PROJET.....	21
I.5.2 PROPOSITION D'EXPERIENCE .....	23

## CHAPITRE II : CONCEPTION ET REALISATION

<b>II.1 CAHIER DES CHARGES</b> .....	<b>27</b>
<b>II.2 VUE D'ENSEMBLE DES BESOINS</b> .....	<b>29</b>
<b>II.3 LE COUPLE FAISCEAUX PRIMAIRES/CIBLES</b> .....	<b>32</b>
II.3.1 DIMENSIONS DES CIBLES .....	33
II.3.1.1 Diamètre des cibles .....	33
II.3.1.2 Longueur des cibles .....	34
II.3.2 NATURE DES CIBLES .....	36
<b>II.4 LE SYSTEME DE CHAUFFAGE</b> .....	<b>36</b>
II.4.1 DESCRIPTIF TECHNIQUE.....	37
II.4.1.1 Choix du matériau.....	37
II.4.1.2 Dimensions du four.....	38
II.4.1.3 Résistance électrique.....	39
II.4.1.3 Durée de vie du four.....	41
II.4.2 L'ENVIRONNEMENT .....	41
II.4.3 SIMULATIONS SYSTUS.....	44
<b>II.5 LE DISTRIBUTEUR</b> .....	<b>46</b>
II.5.1 LE MOUVEMENT.....	47



II.5.2	LA MOTORISATION .....	49
<b>II.6</b>	<b>LA SOURCE RCE .....</b>	<b>51</b>
<b>II.7</b>	<b>COMMANDE ET CONTROLE .....</b>	<b>54</b>
<b>II.8</b>	<b>REALISATION DU PROJET .....</b>	<b>56</b>
II.8.1	BUDGET .....	56
II.8.2	ORGANISATION DU TRAVAIL.....	57
II.8.3	CALENDRIER .....	58
<b>SECONDE PARTIE : CONCEPTION DU DISPOSITIF.....</b>		<b>59</b>

### CHAPITRE III : TESTS DE LA SOURCE D'IONS

<b>III.1</b>	<b>VERIFICATION DU CHAMP MAGNETIQUE DE LA SOURCE .....</b>	<b>62</b>
<b>III.2</b>	<b>DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET PRINCIPE DE LA MESURE.....</b>	<b>63</b>
III.2.1	DESCRIPTION DU BANC DE TEST DU HALL D .....	63
III.2.2	PRINCIPE DE L'ANALYSE DU FAISCEAU D'IONS QUI EMERGE DE LA SOURCE .....	65
III.2.2.1	Spectres .....	65
III.2.2.2	Détermination de l'efficacité de transport .....	67
III.2.2.3	Principe de détermination de l'efficacité d'ionisation .....	67
<b>III.3</b>	<b>EFICACITES D' IONISATION DE MONO1000.....</b>	<b>68</b>
III.3.1	OPTIMISATION DE L'EFFICACITE DE TRANSPORT .....	69
III.3.2	RESULTATS DES MESURES D' EFFICACITES D'IONISATION.....	71
III.3.2.1	Résultats en argon, néon et hélium.....	73
III.3.2.2	Rôle du gaz support.....	74
<b>III.4</b>	<b>EFFICACITES DE LA SOURCE EN PRESENCE DU FOUR .....</b>	<b>76</b>
<b>III.5</b>	<b>MESURE DES TEMPS D'IONISATION .....</b>	<b>80</b>
III.5.1	PRINCIPE DE LA MESURE.....	80
III.5.2	RESULTATS.....	82

### CHAPITRE IV : MESURE DES TEMPERATURES. CARACTERISATION DU FOUR

<b>IV.1</b>	<b>MESURE DES HAUTES TEMPERATURES .....</b>	<b>86</b>
IV.1.1	THERMOCOUPLES .....	86
IV.1.2	PYROMETRE.....	87
IV.1.3	AVANTAGE DE L'UTILISATION SIMULTANEE DU PYROMETRE ET DU THERMOCOUPLE .....	88
<b>IV.2</b>	<b>MONTAGE ET PLAN DE MESURES .....</b>	<b>89</b>
IV.2.1	BANC DE TEST ET MONTAGE.....	89
IV.2.1.1	Description .....	89
IV.2.1.2	Sécurités.....	90
IV.2.2	PLAN DE MESURES.....	90

<b>IV.3 PREMIERS RESULTATS.....</b>	<b>93</b>
IV.3.1 PREMIERS TESTS DU FOUR .....	93
IV.3.2 STABILITE DE L'ALIMENTATION DU FOUR.....	94
IV.3.3 MESURES PAR PYROMETRE.....	96
<b>IV.4 ACTIONS CORRECTIVES SUR LE FOUR TARGISOL.....</b>	<b>98</b>
IV.4.1 ANALYSE DE LA SITUATION .....	99
IV.4.1.1 Retour sur la simulation SYSTUS.....	99
IV.4.1.2 Estimation des températures moyennes du four et du réflecteur à partir de la mesure de la température de la cible.....	100
IV.4.2 SOLUTIONS PROPOSEES.....	104
IV.4.2.1 Le réflecteur.....	104
IV.4.2.2 Le four .....	105
IV.4.3 RESULTATS OBTENUS AVEC UN NOUVEAU REFLECTEUR.....	109

## CHAPITRE V : TEST GLOBAL ET BILAN GENERAL

<b>V.1 TEST DU DISTRIBUTEUR.....</b>	<b>111</b>
V.1.1 TESTS MECANIQUES.....	112
V.1.2 TESTS THERMIQUES ET MESURE DE LA TEMPERATURE.....	113
V.1.2.1 Essais de chauffage.....	113
V.1.2.2 Mesure de la température en présence du distributeur.....	114
<b>V.2 BILAN GLOBAL DES TESTS.....</b>	<b>117</b>
V.2.1 CE QUI A ETE FAIT .....	117
V.2.2 CE QU'IL RESTE A FAIRE.....	118
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>121</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>123</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>181</b>



# INTRODUCTION

La physique nucléaire est une science jeune qui a tout au long du siècle passé bousculé notre façon de voir le monde, de le comprendre et de l'interroger. Au fur et à mesure que progressent nos connaissances sur le noyau atomique les modèles théoriques se perfectionnent et s'affinent. Il devient alors intéressant de pouvoir confronter ces modèles à des noyaux de plus en plus éloignés de la stabilité C'est la raison pour laquelle les noyaux exotiques passionnent tant la communauté des physiciens nucléaires. Les noyaux exotiques sont des noyaux instables dont la durée de vie est trop courte pour exister encore aujourd'hui sur Terre. La création de ces noyaux « artificiels » renseigne sur l'édifice nucléaire, masse, durée de vie, mode de désintégration, forme, états excités...

Pour aller au delà dans la compréhension, il faut pouvoir provoquer des réactions nucléaires. Il faut donc un grand nombre de noyaux pour augmenter les probabilités d'observer ces réactions. Il est également nécessaire de fournir aux noyaux une énergie importante pour vaincre les forces de cohésion nucléaires. C'est ici qu'interviennent les faisceaux radioactifs.

Les réactions nucléaires générées par un faisceau d'ions bombardant une cible constituent les outils de base de l'étude de la matière nucléaire et sont à l'origine de découvertes récentes telles que les noyaux super déformés, les noyaux à halots, et peut être, à l'avenir, la formation de noyaux super lourds [Sci-96].

La production de ces faisceaux de haute énergie fait appel aux infrastructures lourdes que sont les accélérateurs de particules. Ils sont peu nombreux dans le monde mais présents sur tous les continents. Ainsi en France, le Grand Accélérateur National d'Ions Lourds se présente comme un fournisseur de faisceaux d'ions stables ou radioactifs qui doit assurer une production. A ce titre, il a pour mission de garantir un taux de production (maintenir ce taux et pouvoir le répéter), d'optimiser les taux existants et développer de nouveaux faisceaux pour la physique.

Une des méthodes de production de noyaux radioactifs, dont il sera question dans ce mémoire, est la méthode ISOL, présentée en détails dans le premier chapitre. Un faisceau d'ions stables bombarde une cible et produit dans cette cible les atomes radioactifs à étudier. Les atomes créés diffusent hors de la cible et sont ensuite ionisés afin de pouvoir être transportés en nouveau faisceau vers les équipements d'analyses.

Le GANIL est acteur du programme européen TARGISOL qui vise à mieux connaître et à optimiser l'étape de diffusion des atomes radioactifs hors des cibles de production. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail.

Ce mémoire présente un dispositif complet destiné à la mesure des paramètres de diffusion hors de différentes cibles. Il est constitué

- d'un four haute température recevant les cibles à tester
- d'une source d'ionisation destinée à ioniser les atomes radioactifs
- d'un distributeur disposant de 12 cibles et permettant de les introduire les unes après les autres dans le four.

La responsabilité de ce projet m'a été confiée au sein du Groupe de Production d'Ions du GANIL, depuis la conception de l'ensemble (hormis la source d'ionisation) jusqu'aux tests hors faisceau.

Cette tâche, réalisée sur une période de dix-sept mois, peut être scindée en deux parties. La première retrace la phase de conception de l'ensemble que j'ai assurée en collaboration avec les différentes équipes du GANIL concernées par ce projet.

Le premier chapitre définit les paramètres de diffusion, expose les exigences propres à la mesure de ces paramètres, le type de mesures envisagées par les groupes «physiciens» et «production d'ions» du GANIL et finalement l'expérience qui devrait être réalisée.

Le deuxième chapitre est consacré à la conception des différents ensembles élaborée en collaboration avec le Bureau d'Etude. Après avoir décrit le cahier des charges de l'ensemble, construit à partir des exigences exprimées dans le premier chapitre, on s'intéressera à la conception de chaque élément de l'ensemble, à la méthode de travail, à l'organisation de ce projet et à sa réalisation.

La seconde partie de ce mémoire est consacrée aux tests de validations du dispositif auxquels j'ai procédé ainsi que des modifications et solutions que j'ai été amené à proposer. Pour des raisons liées tout autant à des aspects financiers qu'à des questions de sécurité, il est impossible d'effectuer un test global sous faisceau. Par conséquent, la validation du projet s'est déroulé étape par étape, élément par élément.

---

Le chapitre III présente les résultats des tests liés à la source d'ionisation, à la mesure de ses performances, source agissant seule dans un premier temps, puis couplée au four.

Le quatrième chapitre est consacré au four et à la mesure des hautes températures (2300 K).

Enfin le dernier chapitre expose les résultats attachés au distributeur et au fonctionnement global de l'équipement. Le bilan final des tests est présenté en fin de chapitre.

Afin d'alléger la présentation de ce mémoire et pour en faciliter la lecture, j'ai choisi d'accorder une place importante aux annexes pour tout ce qui concerne le principe de fonctionnement de certains instruments, les calculs réalisés et les résultats de mesures.



*Première partie :*

*Conception du dispositif*







# CHAPITRE I

## *Cadre général du projet*

### I.1 LE GANIL, PRESENTATION GENERALE

Le GANIL « Grand Accélérateur National d'Ions Lourds » est un accélérateur de particules commun au CNRS/ IN2P3 au CEA/DSM. Il fait partie des Grandes Installations Européennes pour la recherche. En service depuis 1983, le GANIL est un laboratoire d'accueil dont la mission est de fournir des faisceaux pour les chercheurs de la communauté scientifique internationale. La gamme des faisceaux disponibles s'étend du  $^{12}\text{C}$  à l' $^{235}\text{U}$  à une énergie maximale qui s'échelonne selon la masse des constituants de 24 MeV/A à 95 MeV/A avec une intensité de  $6 \cdot 10^9$  à  $2 \cdot 10^{13}$  p/s (particules par seconde). A titre d'exemple, un faisceau de  $2 \cdot 10^{12}$  p/s d'  $^{36}\text{Ar}^{18+}$  accélérés à 95 MeV/A correspond à une puissance de 1100 W, une intensité électrique de 5,7  $\mu\text{A}$  et à une vitesse des ions de 0,42 fois la vitesse de la lumière.

Une vue d'ensemble des installations du GANIL est présentée dans la figure 1.1. Les ions d'intérêt sont produits par une source ECR [Sor-94] puis injectés dans un des cyclotrons compacts C01 ou C02, où ils sont accélérés à une centaine de keV/A. Ils sont alors injectés dans le premier cyclotron à secteurs séparés CSS1. En sortie de CSS1, l'énergie des ions varie de 4 MeV/A ( pour  $\text{U}^{24+}$ ) à 15 MeV/A (pour l'ion  $^{20}\text{Ne}^{6+}$ ). L'étape suivante est l'accélération dans CSS2, identique à CSS1. Celle ci n'est possible que si la charge de l'ion est augmentée. Pour cela, une feuille de carbone très mince, dite «éplucheur », interposée sur le trajet du faisceau entre les deux cyclotrons permet d'augmenter l'état de charge de l'ion en modifiant très faiblement sa vitesse. Le faisceau atteint son énergie maximale à la sortie de CSS2 et, après avoir traversé le spectromètre ALPHA destiné à en supprimer les impuretés, il est prêt à être distribué dans les différentes aires expérimentales.

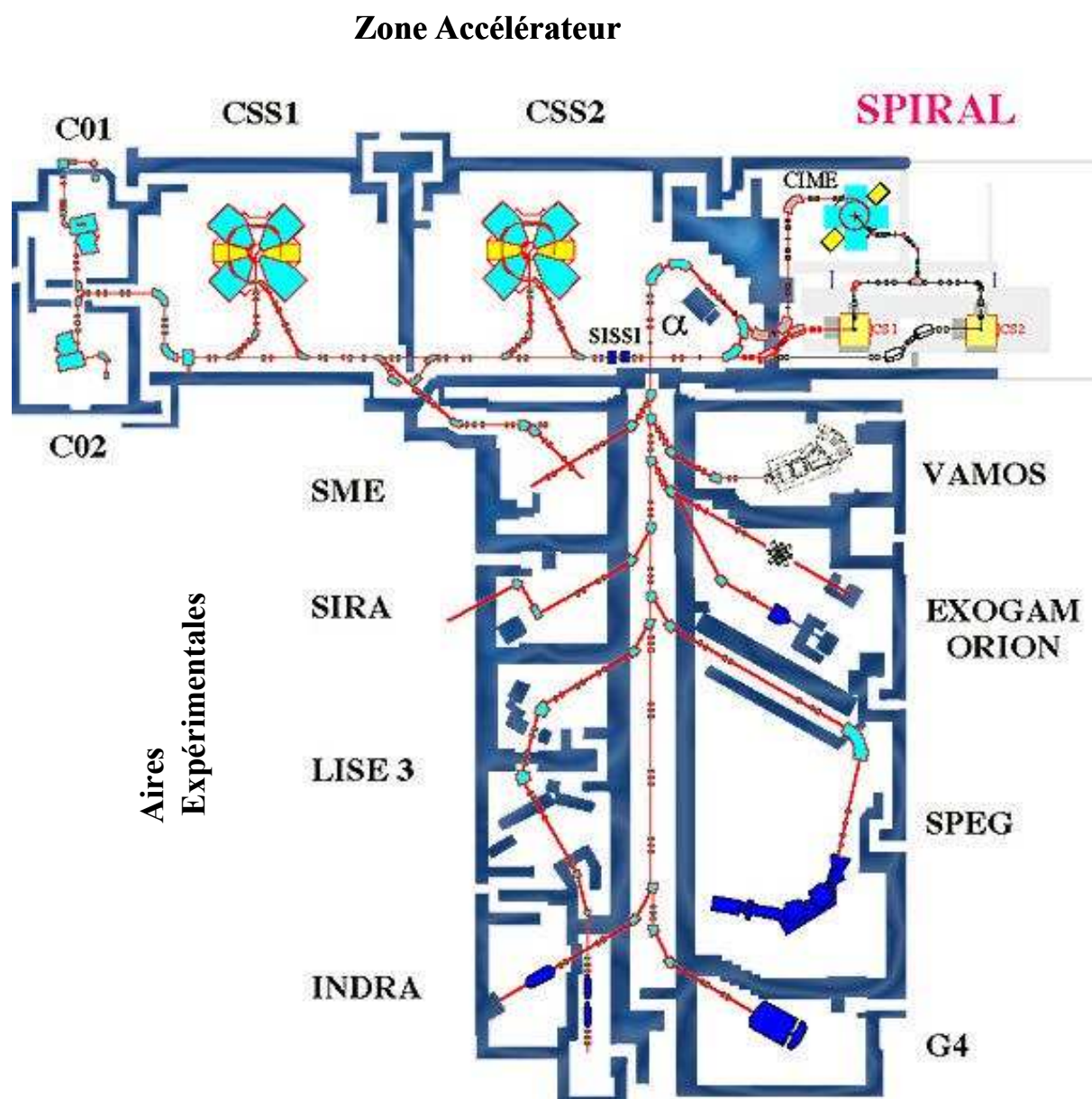


Figure -I.1 : Plan général du GANIL : accélérateur et aires expérimentales

## I.2 PRODUCTION DE FAISCEAUX RADIOACTIFS

Il existe principalement au GANIL deux méthodes complémentaires pour produire des faisceaux d'ions radioactifs : la fragmentation en vol et la séparation isotopique en ligne, dite méthode ISOL. Avec les dispositifs SISI ou LISE d'une part et SPIRAL d'autre part, le GANIL dispose de ces deux types d'outils dont une description de principe suit.

## I.2.1 FRAGMENTATION EN VOL

Dans cette méthode, les noyaux radioactifs sont produits par fragmentation du projectile sur une cible mince (les ions en la traversant perdent de l'ordre de 10 à 20% de leur énergie). C'est le cas au GANIL du dispositif SISSI (Source d'Ions Secondaires à Supraconducteur Intense)[Jou-91]. Le choix du faisceau stable et de la cible permet de couvrir une très large gamme de noyaux dont les masses sont généralement inférieures à celle du projectile. La perte d'énergie à la traversée de la cible étant faible, ce dispositif permet de produire des faisceaux secondaires de haute énergie ( $> 25$  MeV/A). Dans le faisceau secondaire, le noyau d'intérêt est mélangé à d'autres noyaux créés dans la cible et au faisceau primaire n'ayant pas réagi. La sélection des noyaux à transmettre vers les aires expérimentales se fait par le spectromètre ALPHA constitué principalement de deux dipôles magnétiques et d'un dégradeur<sup>1</sup> achromatique situé entre ces derniers.

Le temps de transport des ions jusqu'aux salles d'expériences étant très court (de l'ordre de la micro-seconde), la méthode de fragmentation en vol permet d'étudier des noyaux radioactifs de très courtes périodes avec de faibles pertes par décroissance radioactive. Compte tenu de la faible probabilité d'interaction des noyaux avec les noyaux de la cible, les intensités obtenues sont relativement faibles par rapport à celle du faisceau incident ; elles dépendent bien entendu du noyau considéré mais ne dépassent guère les  $10^8$  p/s dans le meilleur des cas. Par ailleurs, les propriétés optiques du faisceau secondaire sont dégradées en raison de la dispersion en angle et en énergie provoquées par l'épaisseur de la cible et du dégradeur. Le nombre de noyaux radioactifs créés augmentant avec l'épaisseur de la cible, cette dernière fait généralement l'objet d'un compromis entre qualité optique et intensité du faisceau. Cette méthode présente l'avantage de produire des noyaux très exotiques et de périodes très courtes, quelque soit leur espèce chimique. En effet, elle ne fait pas intervenir le processus de diffusion effusion qui est impliqué dans la méthode ISOL.

## I.2.2 LA METHODE ISOL

Acronyme de «Isotope Separation On line », la méthode ISOL consiste à bombarder avec un faisceau d'ions (protons, deutons ou ions lourds) une cible suffisamment épaisse pour arrêter le faisceau d'ions dans la cible. Une partie des noyaux incidents se fragmentent et donnent lieu à des noyaux radioactifs. Une fois leur cortège électronique reconstitué, ceux-ci diffusent en dehors de la cible sous forme atomique ou moléculaire. Pour accélérer le processus de diffusion, la cible est fortement chauffée. Une fois en dehors de la cible, les noyaux radioactifs effusent jusqu'à une source d'ions, où ils sont ionisés, puis séparés. C'est sur le principe ISOL que repose l'équipement SPIRAL «Système de Production d'Ions Accélérées en Ligne » du GANIL [Vil-02], [Spi-04]. Cette installation se compose d'un ensemble cible-source constitué d'une cible épaisse de carbone couplée à une source

---

<sup>1</sup> la réduction ou minimisation des polluants, espèces que l'on ne souhaite pas transmettre, se fait par traversée de matière qui constitue le dégradeur.

d'ionisation ECR NANOGAN III . Après sélection du noyau d'intérêt, le faisceau est injecté dans le cyclotron CIME qui permet par la suite de distribuer dans les aires expérimentales des faisceaux secondaires avec une énergie allant de 1,7 MeV/A à 25 MeV/A.

La méthode ISOL a l'avantage de produire des faisceaux de plus grande intensité que la fragmentation en vol. De plus le faisceau secondaire étant indépendant du faisceau primaire, il est bien défini optiquement et sa dispersion en énergie est faible. En revanche le temps des processus de diffusion/effusion/ionisation restreint l'utilisation de cette méthode aux noyaux dont la période radioactive est supérieure à quelques milli-secondes.

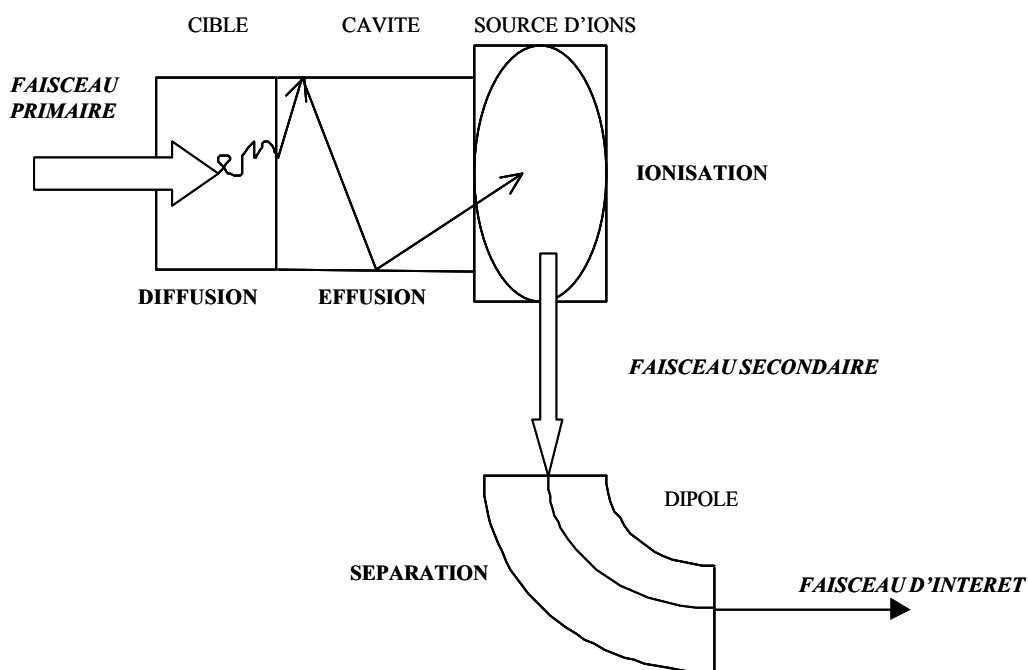


Figure I.2 : Schéma de principe de la méthode ISOL

Tous les efforts de recherche et développement de production de faisceaux par la méthode ISOL visent à réduire les temps de « sortie » du dispositif, et pour cela à optimiser les efficacités de diffusion des atomes dans les cibles, d'effusion, d'ionisation et à limiter le temps de collage des atomes sur les parois du dispositif par une prise en compte de leurs caractéristiques physico-chimiques. Les paragraphes suivants ont pour objet de définir les différentes efficacités, de présenter leur mesure dans quelques cas et de décrire les problèmes qui y sont attachés.

### I.3 EFFICACITES DANS LA METHODE ISOL

Les performances d'un ensemble cible-source destiné à la production de noyaux radioactifs s'évaluent en termes d'efficacités de diffusion, d'effusion et d'ionisation. Pour une espèce donnée, l'efficacité totale est :

$$\xi_{tot} = \frac{n_i}{n_0} \quad (I-1)$$

-  $n_i$  est le nombre d'ions de l'espèce considérée détectés à la sortie du séparateur. Il peut s'agir d'une mesure électrique (cf. § III-2) ou d'une mesure de radioactivité ( $\beta$ ,  $\gamma$  ou proton) issue de la désintégration des noyaux étudiés.

-  $n_0$  représente soit le nombre d'ions radioactifs implantés et mesurés, soit le nombre optimal de noyaux créés dans la cible estimé par différents codes de calcul.

L'efficacité totale permet de comparer les performances de différents ensembles cible-sources utilisés le cas échéant dans des conditions expérimentales différentes. Elle dépend donc des capacités de diffusion, d'effusion et ionisation :

$$\xi_{tot} = \xi_{dif} \cdot \xi_{eff} \cdot \xi_{ion} \cdot \xi_{tr} \quad (I-2)$$

$\xi_{dif}$  est l'efficacité de diffusion d'un atome donné dans une matrice donnée.

$\xi_{eff}$  est l'efficacité d'effusion des atomes jusqu'à la source d'ions.

$\xi_{ion}$  est l'efficacité d'ionisation de la source d'ions.

$\xi_{tr}$  est l'efficacité de transport.

#### I.3.1 EFFICACITES D'IONISATION ET DE TRANSPORT

L'efficacité d'ionisation reflète la capacité de la source à ioniser une espèce donnée. L'efficacité de transport permet d'évaluer les pertes depuis l'extraction des ions de la source jusqu'à la détection. Ces mesures réalisables hors-ligne, c'est-à-dire sans faisceau, font l'objet du paragraphe III.2.

#### I.3.2 DIFFUSION

La diffusion d'atomes dans un solide est le mécanisme par lequel les atomes peuvent par agitation thermique se déplacer à travers les interstices du réseau ou les défauts du cristal (lacunes, dislocations, joints de grains...) [Gui-94]. Le phénomène de la diffusion peut être caractérisé en première instance par un coefficient unique défini par la première loi de Fick :

$$J = -D \cdot \text{grad}(C) \quad (I-3)$$

où  $J$  représente le flux d'atomes traversant une surface donnée par unité de temps et  $C$  correspond à la concentration en atomes diffusants définie en tout point du solide.

$D$  est le coefficient de diffusion. Il s'exprime en  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Ce coefficient reflète la capacité d'un type d'atome donné à diffuser dans une matrice donnée. Comme tous les phénomènes activés thermiquement, il peut s'exprimer selon une relation du type suivant :

$$D = D_0 e^{\left(-\frac{E_a}{kT}\right)} \quad (\text{I-4})$$

$D_0$  et  $E_a$  sont les coefficients d'Arrhenius. La constante de diffusion  $D_0$ , ou facteur de fréquence, a les mêmes dimensions que  $D$ ; elle est liée à la fois aux paramètres de la maille cristalline et à la fréquence de vibration de l'atome diffusant.  $E_a$  est l'énergie d'activation (en J) que doit fournir l'atome pour aller de sites en sites à travers le solide. La diffusion sera donc favorisée par un coefficient  $D_0$  important et/ou par une température importante. C'est la raison pour laquelle les cibles de production d'atomes radioactifs sont portées à haute température (autour de 2500 K pour les cibles carbone de SPIRAL).

Pour caractériser la sortie des noyaux radioactifs de la cible, les paramètres de diffusion seuls ne suffisent pas. Il faut en effet prendre en compte la décroissance radioactive des noyaux créés dans la cible pendant cette étape de diffusion. Il faut également prendre en compte la structure du matériau cible. A titre d'exemple, il a été démontré [Fuj-81] que la diffusion était meilleure dans une sphère que dans une fibre ou dans une feuille constituée du même élément chimique. Les cibles de SPIRAL sont ainsi constituées de poudres de carbone pressées, cuites puis graphitées [Lan-01].

L'efficacité de diffusion correspond au rapport en régime permanent du flux d'atomes diffusant hors d'un volume donné sur la production d'atomes radioactifs dans ce volume. Par exemple, l'efficacité de diffusion dans une sphère s'écrit [Mau-98] :

$$\xi_{diff} = 3 \frac{\left( \sqrt{\frac{\pi^2 \lambda}{\mu_0}} \coth\left(\sqrt{\frac{\pi^2 \lambda}{\mu_0}}\right) - 1 \right)}{\frac{\pi^2 \lambda}{\mu_0}} \quad (\text{I-5})$$

avec -  $\lambda$  constante radioactive de l'atome diffusant ( $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ )

-  $\mu_0 = \frac{\pi^2 D}{\rho^2}$  où  $\rho$  est le rayon du grain. Ce coefficient, qui s'exprime en  $\text{s}^{-1}$ ,

correspond à l'inverse d'un temps caractéristique de diffusion dans le grain. On peut aisément vérifier d'après la relation I-5 que plus la constante radioactive  $\lambda$  est importante ( i.e. plus le temps de demi-vie  $T_{1/2}$  est court) et plus  $\mu_0$  doit être également important pour assurer une

meilleure efficacité de diffusion. Expérimentalement, la mesure d'une efficacité de diffusion donne accès à ce paramètre  $\mu_0^2$ .

### I.3.3 EFFUSION

Une fois diffusés hors de la cible, les atomes poursuivent leur trajectoire en ligne droite jusqu'à rencontrer une paroi où ils restent collés un certain temps puis reprennent une nouvelle trajectoire jusqu'à une autre paroi, jusqu'à ce qu'ils atteignent la source d'ionisation. Il est possible d'évaluer un temps moyen d'effusion comme la somme d'un temps moyen de vol et d'un temps moyen de collage :

$$\tau_{eff} = \chi(\tau_{vol} + \tau_{collage}) = \frac{1}{\nu} \quad (I-6)$$

$\chi$  est le nombre moyen de collisions avec les parois de l'ensemble jusqu'à la source d'ionisation et  $\nu$  représente l'équivalent d'une constante caractéristique d'effusion qui s'exprime en  $s^{-1}$ .

Le temps moyen de vol est directement lié à la vitesse thermique des atomes. Ainsi, pour une distance parcourue de 10 cm, à une température de 2000 K, un atome d' $^{35}\text{Ar}$  a un temps moyen de vol de l'ordre de  $8,4 \cdot 10^{-5}$  s.

Le temps moyen de collage est défini par l'équation de Frenkel [Kir-86] :

$$\tau_{collage} = \tau_0 e^{\frac{\Delta H_a}{kT}} \quad (I-7)$$

$\Delta H_a$  est une enthalpie d'adsorption, elle dépend de l'atome adsorbé et de la surface. Pour un élément adsorbant donné,  $\tau_0$  est une constante. Il existe peu de données sur les valeurs de  $\tau_0$ , il vaut par exemple  $2,4 \cdot 10^{-15}$  s pour le tantale [Kir-87].

Le temps moyen de collage est négligeable dans le cas des gaz rares, pour lesquels on peut considérer que  $\tau_{collage} \approx \tau_0$ . Pour les autres éléments dits condensables, la situation est très différente et le temps de collage dépend très fortement de la température, comme l'illustre la relation I-7. Il varie ainsi pour le  $^7\text{Li}$  dans une matrice de C « dit  $1\mu\text{m}$  » d'une durée infinie à température ambiante, à  $10^{-6}$  s à 2000 K [Gib-03]. La conséquence pratique de ces résultats est que toute zone froide dans l'ensemble cible-source constitue un piège pour les atomes radioactifs que l'on souhaite produire, le temps qu'ils passent collés à une paroi diminue leurs chances de sortir de la source d'ionisation avant qu'ils ne se désintègrent.

L'efficacité d'effusion dépend elle aussi de la décroissance radioactive de l'atome considéré, et l'on peut montrer [Kir-92] qu'elle s'écrit de la manière suivante (régime permanent):

---

<sup>2</sup>

Dans cette approche, on néglige ce qui se passe entre les grains constituant la cible en le cachant dans la diffusion du grain ou dans l'effusion.



$$\xi_{eff} = \frac{v}{v + \lambda} \quad (I-8)$$

La mesure d'une efficacité d'effusion donne accès à la valeur du coefficient  $v$ .

#### I.4 QUELQUES RESULTATS DE DIFFUSION

L'étape de diffusion est une étape critique dans la méthode ISOL. Il existe cependant peu de mesures relatives aux paramètres d'Arrhenius et ces derniers sont généralement mal connus. De plus comme le montre le tableau I-1, il existe des disparités importantes entre les mesures réalisées par différents laboratoires. Même dans le cas le plus étudié de l'autodiffusion (cas ici d'atomes de Mg dans une matrice de Mg), et pour une même gamme de température, les constantes  $D_0$  et  $E_a$  sont mal définies. Les raisons de ces disparités observées dans les mesures sont nombreuses, nous allons en aborder quelques unes par la suite sur l'exemple de la diffusion dans une matrice de carbone. Les propositions d'expériences qui découlent de cette analyse, et la réalisation d'un dispositif approprié constituent la raison d'être de ce travail.

Elément	Matrice	Gamme de température (K)	$D_0$ (m <sup>2</sup> /s)	$E_a$ (kJ/mol)	Référence
Li	Nb	803-923	$5,5 \cdot 10^{-9}$	125	[Fin-74]
Li	Nb	873-1473	$3,2 \cdot 10^1$	285	[Bre-67]
Li	Nb	1023-1313	$2,0 \cdot 10^{-9}$	203	[Bie-74]
O	Mg	1323-1711	$1,8 \cdot 10^{-7}$	250	[Has-72]
O	Mg	1293-1723	$2,4 \cdot 10^{-11}$	234	[Shi-73]
Sc	Ti	1200-1700	$1,3 \cdot 10^{-4}$	207	[Bey-77]
Sc	Ti	1213-1843	$4,0 \cdot 10^{-7}$	136	[Ask-71]
Mg	Mg	1373-2023	$7,8 \cdot 10^{-7}$	164	[Har-71]
Mg	Mg	1373-2023	$7,4 \cdot 10^{-5}$	328	[Har-72]

*Tableau I.1 : Coefficients d'Arrhenius provenant de la base de données TARGISOL [Tar-04]. Les résultats présentés ici n'ont pas été choisis pour l'intérêt particulier qu'ils pourraient présenter pour la production d'atomes radioactifs, mais pour les disparités qu'ils mettent en évidence. Outre cette disparité, la consultation de cette base de données montre la forte dépendance des résultats avec la gamme de température choisie ainsi que le manque de données expérimentales aux hautes températures.*

Les expériences réalisées au GANIL ces dernières années sur les ensembles cible-sources portent principalement sur des cibles en carbone [Mau-98], [Lan-01], [Gib-03]. Le dispositif SPIRAL est effectivement équipé de cibles carbone, et ces dernières ont naturellement fait l'objet d'efforts particuliers de recherche et développement.

La figure I-3 réunit les mesures réalisées par L. Maunoury [Mau-98] et F. Pellemoine [Lan-01] d'efficacité de diffusion et effusion d' $^{35}\text{Ar}$  dans une cible de carbone.

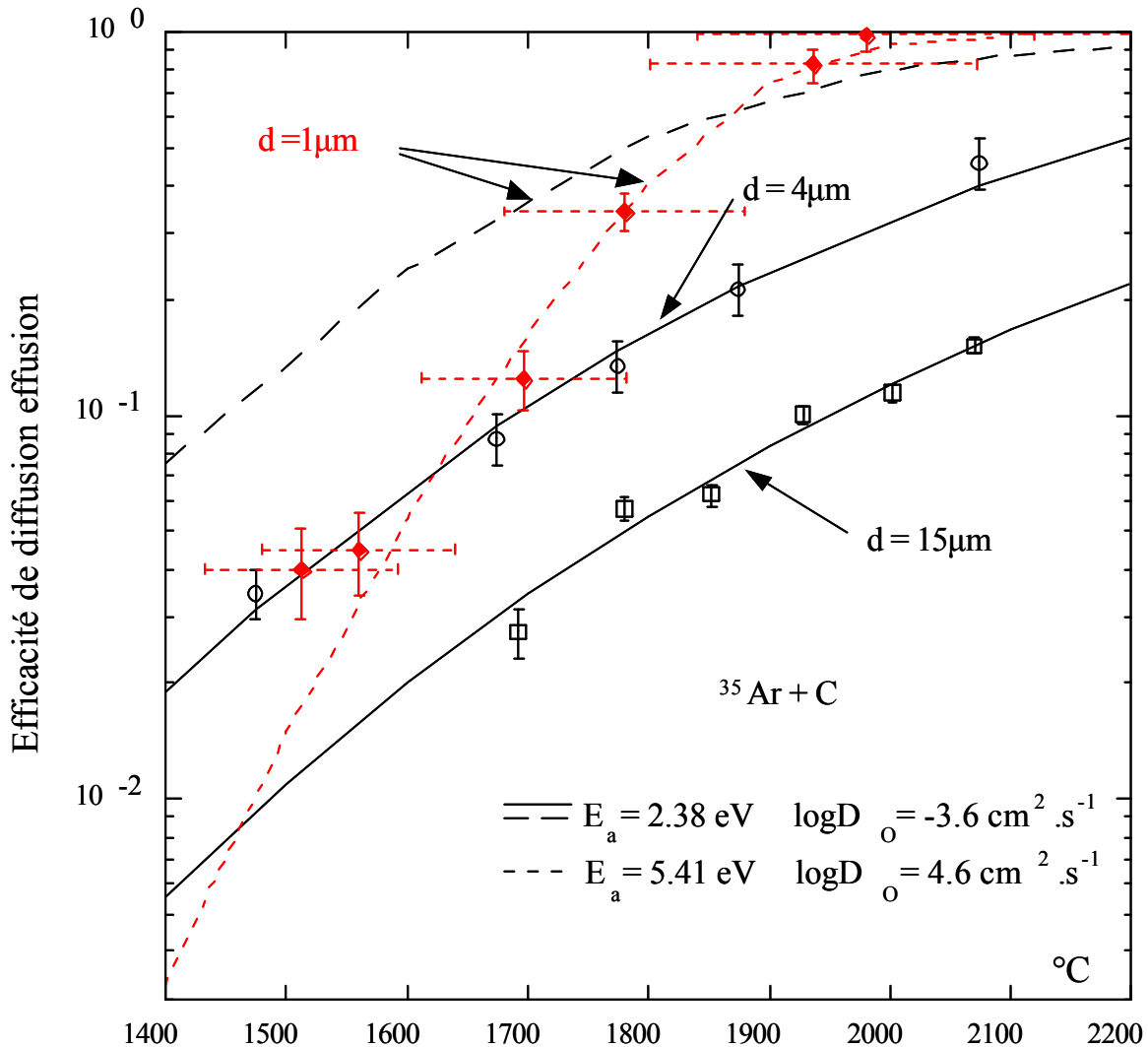


Figure I.3 : [Lan-01] Résultats expérimentaux de l'efficacité de diffusion effusion pour  $^{35}\text{Ar}$  en fonction de la température de la cible. En traits pleins correspondent les courbes d'ajustement des données expérimentales avec les coefficients d'Arrhenius du carbone 4 et 15  $\mu\text{m}$ . La courbe en pointillés larges correspond, pour le carbone 1  $\mu\text{m}$ , à l'estimation de l'efficacité de diffusion effusion avec les coefficients d'Arrhenius des carbonnes 4 et 15  $\mu\text{m}$ . Le trait en pointillés fins correspond à la courbe d'ajustement des données expérimentales du carbone 1  $\mu\text{m}$ . Les barres horizontales représentent la température minimale et maximale dans la cible de carbone 1  $\mu\text{m}$ .

Sur cette figure, ont été représentées les variations des efficacités selon la température pour différentes cibles constituées de différentes tailles de grain. Pour ces séries de mesures, l'efficacité d'effusion a pu être évaluée à 0,9 [Mau-98].

Les mesures ayant été réalisées pour différentes températures, on peut alors « remonter » aux coefficients d'Arrhenius. L'efficacité augmente bien avec la température comme le suggérait la relation I-5. De la même manière, on remarque également que l'efficacité est accrue lorsque l'on passe d'une cible constituée de grains de 15  $\mu\text{m}$  à une cible composée de grains de 4  $\mu\text{m}$ . Dans ces deux cas, les coefficients  $E_a$  et  $D_0$  sont bien identiques. En revanche, les mesures réalisées par F. Pellemoine sur la cible 1  $\mu\text{m}$  présentent un comportement différent. En effet, la courbe en grands pointillés représente l'extrapolation des données à 15 et 4  $\mu\text{m}$  pour une cible de grains de 1  $\mu\text{m}$ . La courbe en pointillés courts est le résultat de mesures pour un même type de cible. Il est manifeste que ces deux résultats sont en désaccord. Afin d'expliquer ce désaccord, F. Pellemoine émet différentes hypothèses [Lan-01] qui sont résumées ici :

- Changement de source d'ionisation : les mesures sur les cibles 15, 4 et 1  $\mu\text{m}$  ont été réalisées avec trois sources d'ionisation différentes, respectivement Nanogan II, ECR3 et Nanogan III. Quelle est l'influence de l'environnement et du contexte expérimental sur les résultats ?
- Changement de fournisseur : les carbones 15 et 4  $\mu\text{m}$  provenaient de la société Carbone Lorraine [Car-04], tandis que le carbone 1  $\mu\text{m}$  était fourni par la société POCO Graphite [Poc-04]. Ce changement induit également un changement de mode de fabrication. Les poudres de carbone sont d'origines différentes et le taux d'impuretés n'est pas le même. Elles ne sont pas traitées de la même manière par la suite. De plus, chaque fabricant rajoute aux poudres un liant, dont la composition est tenue secrète, et qui n'est donc probablement pas identique.
- Changement de régime de diffusion : le mode de diffusion dépend de la température et également de la structure du matériau. Dans le carbone 1  $\mu\text{m}$ , il pourrait y avoir compétition entre diffusion aux joints de grains et diffusion en volume (la diffusion en volume est généralement prépondérante à haute température [Gui-94]). Pour les carbones de taille de grains 4 et 15  $\mu\text{m}$  le rapport entre la taille des grains et l'épaisseur des joints de grains jouerait plutôt en faveur d'une diffusion en volume. Le changement de coefficient  $D$  devrait alors apparaître à plus basse température pour ces derniers.
- Changement de type de chauffage de la cible : les cibles « 4 et 15  $\mu\text{m}$  » étaient chauffées par un four externe alors que la cible 1  $\mu\text{m}$  l'était par leur axe. Cette dernière méthode induit dans la cible un profil de température bien moins homogène. C'est la raison pour laquelle les barres d'erreur sur la courbe « 1  $\mu\text{m}$  » sont si importantes. De plus les cibles « 4 et 15  $\mu\text{m}$  » étaient optimisées pour un chauffage de 400 W, la cible 1  $\mu\text{m}$  était optimisée pour un chauffage de 2 kW. Les cibles étaient donc différentes.

C'est pour tenter de répondre à ces différentes questions que le dispositif expérimental décrit dans ce mémoire a été conçu et réalisé.

## I.5 PRINCIPES DU PROJET ET PROPOSITION D'EXPERIENCE

Le développement de nouveaux faisceaux radioactifs et l'optimisation en intensité et en pureté des faisceaux déjà existants impose de mieux maîtriser l'étape de diffusion-effusion. Pour cela, et comme l'illustre le paragraphe précédent, il est donc nécessaire de compléter et d'affiner les connaissances déjà existantes sur les paramètres de relâchement (i.e. coefficients d'Arrhenius et paramètres d'adsorption). C'est le but du programme européen TARGISOL [TAR-01]. Fruit de la collaboration de six laboratoires européens (ISOLDE (CERN, Genève), PSI (Villigen, Suisse), LMU (Munich), GSI (Darmstadt), IEM (Madrid) et GANIL (Caen)), ce programme a pour objectif de collecter le maximum d'informations sur les propriétés de relâchement des atomes radioactifs depuis des cibles de dispositifs de type ISOL. Les différents paramètres issus de la littérature ou de nouvelles mesures doivent alimenter une base de données accessible à tous les laboratoires. Cette base de données doit permettre par la suite de construire un programme informatique de calcul et d'optimisation des cibles ISOL. Le programme TARGISOL n'est pas seulement une mise en commun des compétences de différents laboratoires, c'est aussi un support financier de l'Union Européenne dont ce travail a bénéficié.

### I.5.1 PRINCIPES DU PROJET

La comparaison des résultats obtenus avec les cibles de carbone permet de mettre en évidence plusieurs points importants en vue de mesures ultérieures. Le nombre de paramètres mis en jeu est important (taille des cibles, système de chauffage, géométrie du dispositif, type de source d'ionisation...) et l'influence de ceux-ci les uns sur les autres et sur la mesure des paramètres de relâchement est difficile à contrôler ou évaluer. L'analyse systématique de l'influence sur l'ensemble de chacun de ces paramètres, en admettant qu'elle soit réalisable, prendrait beaucoup trop de temps et n'est pas envisageable. Le plus simple est donc de garder le même dispositif expérimental pour toutes les mesures. De plus, pour effectuer une comparaison rigoureuse des résultats obtenus, il faut être certain de pouvoir ramener les mesures sur une base commune de conditions expérimentales. La façon la plus simple de procéder est d'effectuer le minimum de modifications entre deux mesures, donc d'effectuer ces mesures au cours d'une même période d'irradiation, avec un même dispositif expérimental.

Il faut donc concevoir un dispositif qui permette de tester plusieurs cibles pendant la même expérience. Dans un premier temps, le cahier des charges consiste à réaliser un système adapté à différent type de carbone.

Comme le montre la relation I-4, le coefficient de diffusion dépend fortement de la température. Pour obtenir une mesure rigoureuse des coefficients  $E_a$  et  $D_0$ , il est impératif de pouvoir contrôler la température et assurer son homogénéité dans la cible. Ces deux conditions imposent d'utiliser un chauffage externe. Comme le montre en effet la courbe d'efficacité du carbone  $1\mu$  de la figure I-3, les écarts de température dans une cible chauffée par son axe peuvent atteindre 350 K à une température moyenne de 2300 K, montrant ainsi l'hétérogénéité en température dans la cible. Un chauffage externe de dimensions adaptées à celles de la cible permet d'obtenir une distribution de température à l'intérieur de la cible beaucoup plus homogène. Le dispositif doit donc comporter un four dans lequel on doit pouvoir introduire les différentes cibles à tester. Ce four doit pouvoir porter les cibles à une température de 2300 K. Le choix de cette température fait l'objet d'un compromis. La figure I-3 met clairement en évidence l'évolution croissante de l'efficacité de diffusion-effusion avec la température, ce qui suggère de chauffer fortement les cibles. En revanche plus la cible est chaude et plus son évaporation est importante. On obtient ainsi une plage d'utilisation qui pour le carbone, par exemple, s'étend de 2070 K à 2470 K, centrée sur 2300 K. En effet, au delà de 2500 K, la durée de vie d'une cible en carbone risque d'être plus courte que la durée prévue de l'expérience. Les limites de température ainsi fixées permettront par ailleurs de comparer les résultats à venir avec ceux déjà obtenus au GANIL ainsi que dans d'autres laboratoires. La maîtrise de la température de la cible impose également que celle-ci ne soit chauffée que par le four. Pour que les conséquences soient minimales sur les caractéristiques de relâchement des atomes par la cible, il est nécessaire que l'apport de chaleur par le faisceau primaire arrêté dans la cible n'ait pas d'influence sur la température de cette dernière, donc que la puissance déposée par le faisceau soit globalement négligeable par rapport à la puissance de chauffage du four. Il est donc nécessaire d'utiliser un faisceau de faible intensité.

Quel type de faisceau utiliser ?

Il n'est pas envisageable d'avoir recours à un faisceau d'ions stables, comme cela est fait pour la production de faisceaux d'ions radioactifs. En effet, sur 100 noyaux stables du faisceau primaire, seul environ 1 se transforme après collision avec un noyau cible. L'énergie des 99 ions restant a cependant été déposée dans la cible, et a contribué à son échauffement. Dans le cas présent on cherche à étudier la diffusion des ions radioactifs dans la cible tout en minimisant l'incidence thermique de leur apparition dans la cible.

Un faisceau primaire de faible intensité, c'est à dire autour de 50 W (cf. Chapitre II), conduirait à un échauffement de la cible modéré (environ 100 K en moyenne sur le volume) mais ne produirait pas suffisamment d'ions radioactifs pour permettre leur détection dans de « bonnes » conditions.

Il paraît plus approprié d'implanter directement des ions radioactifs dans les cibles et d'étudier leurs caractéristiques de relâchement hors de celles-ci. Comme on l'a vu précédemment, le GANIL dispose de deux équipements complémentaires susceptibles de fournir des ions radioactifs, SPIRAL et SISSI. Cependant, si l'on souhaite implanter les ions radioactifs dans les mêmes conditions que s'ils étaient créés dans la cible par un faisceau d'ions stables, il est nécessaire d'utiliser un faisceau de haute énergie. Il faut donc utiliser un faisceau issu de SISSI. De plus, un faisceau SISSI présente l'avantage de fournir un large

éventail de faisceaux radioactifs exploitables. Il permet en outre d'implanter une quantité connue d'éléments radioactifs et de mesurer l'efficacité du système en tenant compte de la décroissance radioactive.

Les dispositifs expérimentaux utilisant les faisceaux de haute énergie sont placés dans des casemates. Au GANIL, la casemate de la salle SIRa a été conçue pour développer les différents ensembles cible-source destinés à la production d'ions radioactifs. Pour des raisons de radioprotection, cette casemate est inaccessible non seulement pendant le déroulement de l'expérience mais aussi après, le temps que l'activité résiduelle ait atteint un niveau acceptable au regard des normes en vigueur. Cette durée dépend de l'ampleur de l'activation subie par les matériaux avoisinant l'ensemble cible-source, et donc de l'intensité du faisceau primaire utilisé. Dans le cas de SIRa où l'intensité du faisceau primaire est limitée à 400 W, il est fréquent de devoir attendre quelques semaines voire quelques mois avant de pouvoir pénétrer dans la casemate. Il faut donc prévoir d'automatiser le système permettant le changement de cible afin de pouvoir le commander à distance. Ce point n'est pas obligatoire dans le cas d'un faisceau SISSI- c'est à dire un faisceau de faible intensité ne produisant que peu de réactions nucléaires dans la cible, et donc peu susceptible d'activer l'environnement- mais représente un gain de temps important au cours de l'expérience. En revanche, une fois les mesures de diffusion et effusion effectuées, il pourrait être intéressant de réaliser, pour les matériaux les plus prometteurs déterminés à partir de l'expérience avec SISSI, les mêmes expériences, mais cette fois avec production dans les cibles, et donc avec un faisceau direct de forte puissance.

## I.5.2 PROPOSITION D'EXPERIENCE

Bien que cela dépasse largement le cadre du travail présenté dans ce mémoire, il m'a paru intéressant d'exposer ici le type d'expérience qui était envisagée avec le dispositif réalisé.

### Description :

L'expérience doit avoir lieu sur le banc de test SIRa (Séparateur d'Ions Radioactifs), implanté dans la salle D2 des aires expérimentales du GANIL. Outre l'ensemble cible-source à étudier, l'ensemble SIRa comprend une ligne basse énergie d'analyse avec son dipôle et un système de détection. Le faisceau est implanté dans une bande de mylar aluminisé en regard de différents détecteurs. Selon le type de noyaux radioactifs étudiés, on peut installer un détecteur germanium pour la détection des rayons  $\gamma$ , un plastique scintillant pour détection des  $\beta^-$  ou des diodes silicium pour la détection des particules chargées [Lec-97].

Le faisceau d'ions radioactifs produit par SISSI est implanté dans la cible installée sur SIRa. Un scintillateur plastique placé en amont de l'ensemble cible-source permet de mesurer le nombre  $N_i$  d'ions radioactifs implantés dans la cible. Le système de détection de SIRa permet

ensuite de mesurer le nombre d'ions  $N_s$  radioactifs sortant de l'ensemble cible-source. L'efficacité totale s'écrivant:

$$\xi_{tot} = \frac{N_s}{N_i} = \xi_{dif} \cdot \xi_{eff} \cdot \xi_{ion} \cdot \xi_{tr} \quad (I-9)$$

et connaissant l'efficacité de transport et d'ionisation pour l'espèce considérée, on en déduit l'efficacité de diffusion-effusion. Cette méthode à l'avantage, comme il a déjà été mentionné, de ne pas utiliser de codes de calculs estimant le taux de production dans la cible.

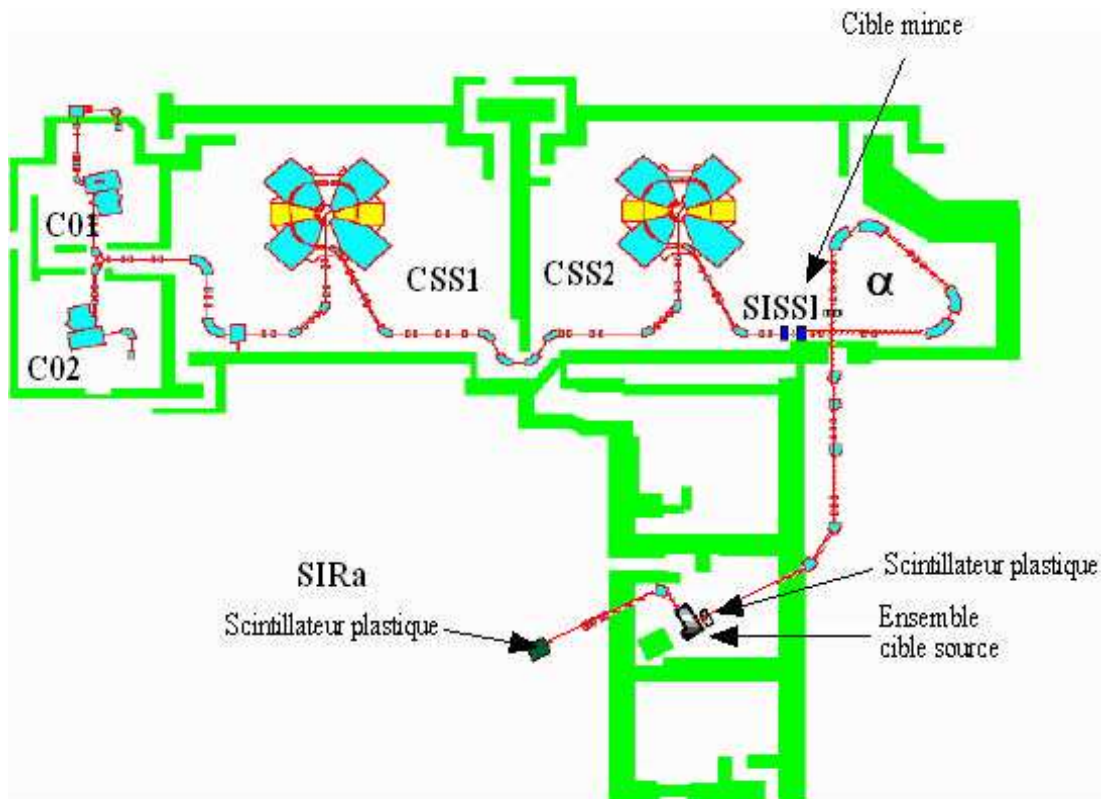


Figure I.4 : Disposition des ensembles SISSI et SIRa du GANIL

#### Procédés de mesure :

- La première méthode utilisable est celle dite du temps de montée où l'on mesure la quantité d'atomes extraits de la cible dans le temps. La mesure se fait donc à une température donnée et pour un isotope donné. Cette mesure donne accès aux paramètres  $\mu$  et  $\nu$  mais ne permet pas d'obtenir les valeurs de  $D_0$ ,  $E_a$ ,  $\tau_0$  et  $\Delta H_a$ .

Une fois atteint un régime permanent (un plateau), et dans la mesure où on connaît le nombre d'atomes implantés, on peut mesurer une efficacité  $\xi$  de diffusion-effusion.

- Une autre méthode dite de mesure directe consiste à mesurer l'efficacité  $\xi$  pour un même noyau, à différentes températures. On a autant de points que de relations entre les différents paramètres, de sorte que cette méthode permet en général d'obtenir les paramètres  $D_0$  et  $E_a$ . On peut extraire de ces résultats les paramètres d'effusion dans la zone «plateau»

de la courbe  $\xi(T)$ . Cependant, comme le montre la figure I-3, ce plateau est difficile à obtenir. Pour ajuster plus finement les résultats aux modèles, on peut alors répéter ces mêmes mesures pour différents isotopes d'un atome donné. On obtient alors un réseau de courbes dont les paramètres de diffusion sont supposés être les mêmes, ce qui permet d'extraire les paramètres d'effusion.

On peut remarquer qu'une mesure systématique du temps de montée donne à chaque fois une relation supplémentaire entre  $\mu$  et  $v$  ce qui permet de contraindre encore davantage le modèle.

#### Déroulement de l'expérience :

Dans la collaboration TARGISOL, le GANIL s'est vu attribuer la tâche de déterminer les paramètres de relâchement depuis différentes cibles des éléments suivants : C, N, O, F, Si, P, S, Cl et Ar.

Cette première série de mesure peut donc se scinder en deux grandes parties : la première constitue un travail de comparaisons de différents carbones ; la deuxième consiste à déterminer les meilleurs couples projectiles-cibles et à obtenir pour chacun les paramètres de diffusion et effusion.

##### 1- Paramètres de diffusion et effusion pour les carbones :

La première partie de cette expérience peut être consacrée à l'étude de différents types de carbones pour les cibles, ceci afin de répondre aux questions soulevées au paragraphe I.4. Il est proposé dans cette première partie de tester au moins 3 tailles de grain pour trois fabricants : Toyo[Toy-04], Poco[Poc-04], et Carbone Lorraine[Car-04]. Cette expérience doit permettre d'obtenir une série homogène de résultats, dans la mesure où ils auront été réalisés dans les mêmes conditions. Elle permet de plus de comparer la série de mesure à effectuer à celles déjà réalisées. Elle permet enfin d'étudier plus en détail le rôle de la taille des grains dans le mécanisme de la diffusion dans une matrice carbone.

Toujours afin de pouvoir comparer les résultats avec les études précédentes, cette étude peut être menée avec différents isotopes de l'Argon. Les différents points à prendre en considération sont les suivants :

- Faisceau primaire sur SISSI :  $^{36}\text{Ar}$ , 2kW à 95 MeV/A
- Faisceau secondaire :  $^{35}\text{Ar}$  et  $^{33}\text{Ar}$  ou  $^{32}\text{Ar}$  pour dépouillements indépendants et comparaison des paramètres  $\log D_0$  et  $E_a$ .
- Mesure des temps de montées et des plateaux à différentes températures, pour en extraire les paramètres  $\log D_0$ ,  $E_a$ ,  $\tau_0$  et  $\Delta H_a$ .
- Dans le même ordre d'idée, on pourra aussi tester un faisceau direct d' $^{36}\text{Ar}$  (à 100 nA) : mesure sur une coupelle de Faraday reliée à un oscilloscope et rapprocher ces mesures des précédentes.

##### 2-Détermination du meilleur couple projectile/cible :

Cette seconde partie concerne le test et la détermination des paramètres de relâchement dans différentes cibles. Une étude systématique et détaillée de chaque couple, projectile/cible serait beaucoup trop longue et l'intérêt qu'elle revêt, quant à la production d'atomes radioactifs, n'est peut être pas à la hauteur du temps qu'il faudrait y consacrer.



Aussi, il a été proposé de procéder de la sorte :

- Recherche de la meilleure cible pour les faisceaux suivants :
  - ⇒  $^{33}\text{Cl}$  et  $^{32}\text{Cl}$
  - ⇒  $^{31}\text{S}$  et  $^{30}\text{S}$
  - ⇒  $^{30}\text{P}$   $^{29}\text{P}$  et peut être  $^{28}\text{P}$
  - ⇒ éventuellement Si , Al et Mg
- Mesure unique d'efficacité à haute température sur les différentes cibles.
- Pour le meilleur couple projectile/cible : mesure des efficacités et du temps de montée en fonction de la température (pour en extraire les paramètres  $\log D_0$ ,  $E_a$ ,  $t_0$  et  $H_a$ ).
- Remarque : Faisceau primaire sur SISSI :  $^{36}\text{Ar}$  et  $^{20}\text{Ne}$

Le tableau I-2 présente quelques taux de production estimés des noyaux d'intérêt produit avec SISSI et implantés sur l'échantillon cible à tester. L'efficacité globale du processus (production et détection) peut varier de façon importante de  $10^{-3}$  à  $10^{-6}$  dans les conditions les plus défavorables (elle dépend des efficacités de diffusion, effusion, ionisation, transport mais aussi du rapport d'embranchement de la raie d'énergie à détecter et de l'efficacité du détecteur..). Si l'on considère qu'il faut un taux de comptage minimum en détection d'un dizaine de coups par seconde, le taux de production minimum utilisable doit donc être de l'ordre de  $10^6$  voire  $10^7$  p/s

Noyau d'intérêt	Faisceau primaire	Taux estimé (pps)	$T_{1/2}$	Energie en sortie de SISSI (MeV/A)
$^{33}\text{Cl}$	$^{36}\text{Ar}^{18+}$ (95 MeV/A, 2 kW)	$2,65 \cdot 10^7$	2,51 s	71,1
$^{32}\text{Cl}$		$2,33 \cdot 10^6$	291 ms	70,69
$^{29}\text{S}$		$1,02 \cdot 10^5$	187 ms	71,02
$^{31}\text{S}$		$1,04 \cdot 10^7$	2,58 s	71,86
$^{30}\text{S}$		$1,41 \cdot 10^6$	1,18 s	71,45
$^{30}\text{P}$		$3,13 \cdot 10^7$	2,5 min	72,99
$^{29}\text{P}$		$9,69 \cdot 10^6$	4,1 s	72,61
$^{28}\text{P}$		$1,59 \cdot 10^6$	268 ms	72,21
$^{27}\text{Si}$		$7,43 \cdot 10^6$	4,16 s	73,35
$^{26}\text{Si}$		$1,27 \cdot 10^6$	2,21 s	72,95
$^{25}\text{Si}$		$1,02 \cdot 10^5$	218 ms	72,51
$^{18}\text{F}$	$^{20}\text{Ne}^{10+}$ (95 MeV/A, 2 kW)	$1,69 \cdot 10^8$	109,7 min	82,88
$^{17}\text{F}$		$8,33 \cdot 10^7$	64,8 s	82,54
$^{15}\text{O}$		$3,35 \cdot 10^7$	2,03 min	83,24
$^{14}\text{O}$		$5,86 \cdot 10^6$	70,59 s	82,85
$^{13}\text{N}$		$2,2 \cdot 10^7$	9,96 min	83,94
$^{11}\text{C}$		$1,46 \cdot 10^7$	20,38 min	84,67

Tableau I.2 : Taux de production de SISSI à la sortie de l'ALPHA (avec dégradateur) de quelques noyaux d'intérêt estimés par le code de calcul Lise++ (Calculs réalisés par Antony Lopez).

# CHAPITRE II

## *Conception et réalisation*

Le déroulement de l'expérience exposé au chapitre précédent ainsi que les contraintes pré existantes liées au matériel déjà en place, permettent d'établir un cahier des charges du dispositif. L'étude qui en suit conduit à décomposer le processus en quatre sous ensembles correspondant aux quatre fonctions essentielles du dispositif expérimental :

- Un faisceau primaire d'ions radioactifs et une cible d'implantation
- Un système de chauffage de la cible
- Un distributeur de cibles
- Une source pour transformer les atomes en ions

Les paragraphes qui suivent présentent un descriptif technique détaillé de chaque ensemble ainsi que les conditions de réalisation de ce projet.

### **II.1 CAHIER DES CHARGES**

Le cahier des charges du dispositif expérimental peut être développé en cinq points :

1) Le dispositif doit être installé dans la casemate SIRa des aires expérimentales du GANIL. Cela impose en particulier de prendre en compte les dispositions du lieu et les dimensions des espaces libres.

2) Le faisceau primaire est choisi en fonction de la cible et des ions radioactifs à produire. Son intensité doit être suffisamment forte pour que le nombre d'ions radioactifs puisse être détecté, et suffisamment faible pour que la puissance déposée dans la cible n'entraîne pas de modification de la température de la cible. La température doit être uniquement déterminée par le système de chauffage.

3) Le système de chauffage a pour but d'amener la cible à une température précise et fixe pour stabiliser les caractéristiques cinétiques du relâchement des atomes par le matériau cible. Pour que les temps de relâchement soient aussi courts que possible, la température doit être aussi importante que possible, tout en respectant les limites imposées par la tenue en température des matériels utilisés pour la conception du four et de son environnement.

4) Le système de remplacement des cibles doit permettre de garder des conditions expérimentales similaires pour toutes les mesures faites sur différentes cibles ou sur une même cible. La variété des mesures impose que pour certaines, il faille passer les cibles à tour de rôle. Si une cible doit être réutilisée, elle doit avoir conservé les mêmes caractéristiques entre les deux mesures. Elles doivent donc être conservées sous vide pour éviter qu'elle n'adsorbent de gaz entre deux mesures.

5) La source d'ionisation doit présenter une efficacité d'ionisation importante pour deux raisons : d'une part pour que le nombre d'ions radioactifs en sortie du système de production soit maximal et soit ainsi plus facile à mesurer (les flux d'ions radioactifs sont souvent ténus) ; d'autre part pour que le temps de transformation des atomes en ions soit aussi faible que possible c'est à dire beaucoup plus faible que le temps de diffusion, afin qu'il ne masque pas ce dernier (cf. § III.2 et III.4).

Au départ de ce projet, la source d'ionisation existait déjà. Cette source a été choisie pour des raisons d'efficacité et de géométrie (cf. § II.6). L'ouverture qu'elle présentait en son milieu permettait d'envisager d'installer en regard direct de la source d'ionisation la cible de production et ainsi de minimiser les volumes d'effusion des atomes donc leur temps d'effusion.

La conception des autres sous ensembles a évidemment été tributaire de ce préexistant.

La figure II-1 résume les différents aspects du cahier des charges. A ce stade, ce schéma recoupe largement le schéma de principe de la méthode ISOL. Les choix et définitions des matériels font l'objet des paragraphes suivants.

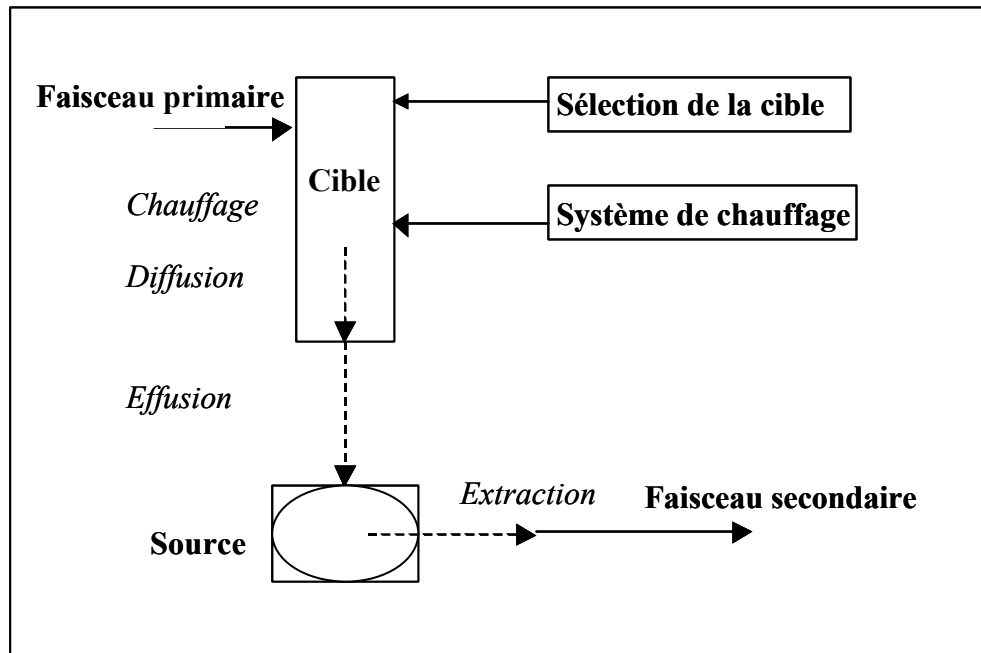


Figure II.1 Schéma du dispositif et des différents sous ensembles

## II.2 VUE D'ENSEMBLE DES BESOINS

La réponse au cahier des charges défini dans le paragraphe précédent impose en premier lieu de définir les différents éléments constituant le dispositif et d'adopter un point de vue global sur le dispositif afin de garder à l'esprit le fait que chaque élément ajouté peut avoir une influence sur l'ensemble du système.

Un dispositif expérimental unique doit être utilisé pour réaliser les mesures de diffusion. Ceci invite à considérer un ensemble destiné exclusivement à ces mesures, constitué de la source d'ionisation, d'un système de chauffage et d'un système de sélection de cible qu'il reste à définir. L'examen du cahier des charges permet d'avancer les solutions suivantes :

L'augmentation de la température modifie les équilibres chimiques et accélère généralement l'évolution du système. Il en résulte généralement une modification chimique des matériaux en présence. C'est le cas, par exemple, des métaux réfractaires tels que le tantale ou le tungstène qui en présence de carbone et à haute température forment des

carbures. A ces phénomènes chimiques se superposent des phénomènes physiques comme des modifications de l'état cristallin et, bien entendu, la diffusion. Ainsi à hautes températures, les motifs de contamination de matériaux en contact sont nombreux. Pour étudier la diffusion d'atome radioactifs dans une matrice donnée, il faut par conséquent s'assurer que le matériau constituant la cible a peu évolué, ou que l'on connaît cette évolution. Il paraît donc souhaitable d'éviter le plus possible de multiplier les matériaux en contact. Les cibles doivent dès lors être séparées les unes des autres et placées dans le four séparément. Le type de solution qui consiste à utiliser une cible unique constituée des différents matériaux à tester ne peut pas être retenu.

Pour homogénéiser la température dans le volume de la cible, il est préférable que le système de chauffage soit externe à la cible, donc qu'il s'agisse d'un four entourant la cible. Le plus simple a semblé de le réaliser à l'aide d'une enveloppe de matériau conducteur. Traversée par un courant, celle-ci chauffe par effet joule. Afin de réduire le plus possible les temps d'effusion, il est souhaitable de diminuer les surfaces et les volumes de l'ensemble. Le four devait donc être de faible volume, situé à proximité de la source d'ionisation et relié à la source par une zone de transfert de faible volume et de grande conductance.

Comment insérer les cibles dans le four ? On souhaite garder autant que faire se peut les mêmes conditions expérimentales pour toutes les mesures. Pour que ces dernières subissent un minimum de variations lors d'une expérience, il faut limiter le nombre de manipulations sur le dispositif. La méthode qui consistait à introduire les cibles les unes après les autres par un sas air/vide a donc été écartée. La solution opposée qui consistait à introduire l'ensemble des cibles dès le départ dans le dispositif répondait davantage aux préoccupations présentes. Une fois les cibles chauffées et dégazées, les mesures sur chaque cible pouvaient être réalisées dans un environnement sensiblement équivalent. Mais la présence de l'ensemble des cibles dans le volume de la source impliquait un volume important nuisible à l'efficacité d'ionisation car il augmente le temps d'effusion. De plus, les cibles inutilisées pouvaient se charger en atomes radioactifs qui auraient été relâchés une fois celles-ci utilisées, donnant lieu à un bruit de fond. Il a donc été décidé d'équiper le dispositif d'un distributeur de cibles capable d'introduire une cible dans le four, de l'en retirer, de changer de cible tout en laissant l'ensemble du système sous vide, cibles comprises.

Un avantage supplémentaire lié à ce système réside dans le fait que la phase de dégazage de l'ensemble des cibles peut être réalisée avant l'expérience, ce qui représente un gain de temps considérable sans lequel l'expérience serait difficilement envisageable.

***En résumé, le dispositif expérimental compte quatre grands ensembles : le couple faisceau primaire/cibles, la source d'ionisation, le four dans lequel sont insérées les cibles et le distributeur capable d'introduire une cible dans le four et de l'en retirer. La figure II.2 présente le schéma global du dispositif.***

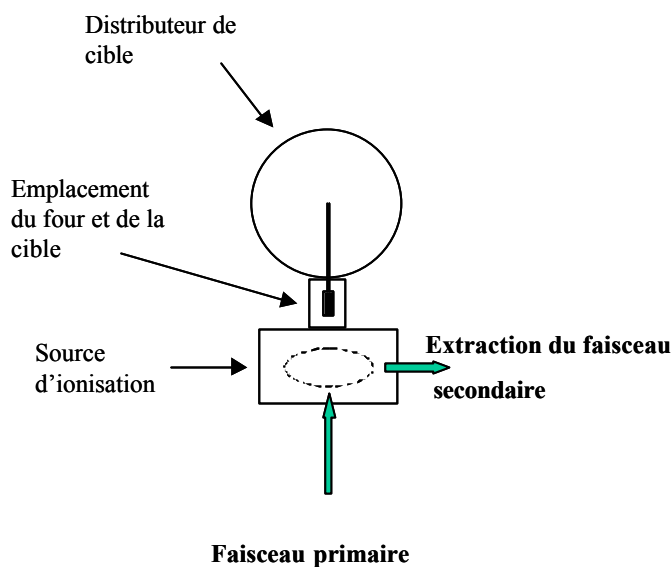


Figure II. 2 Schéma de principe du dispositif

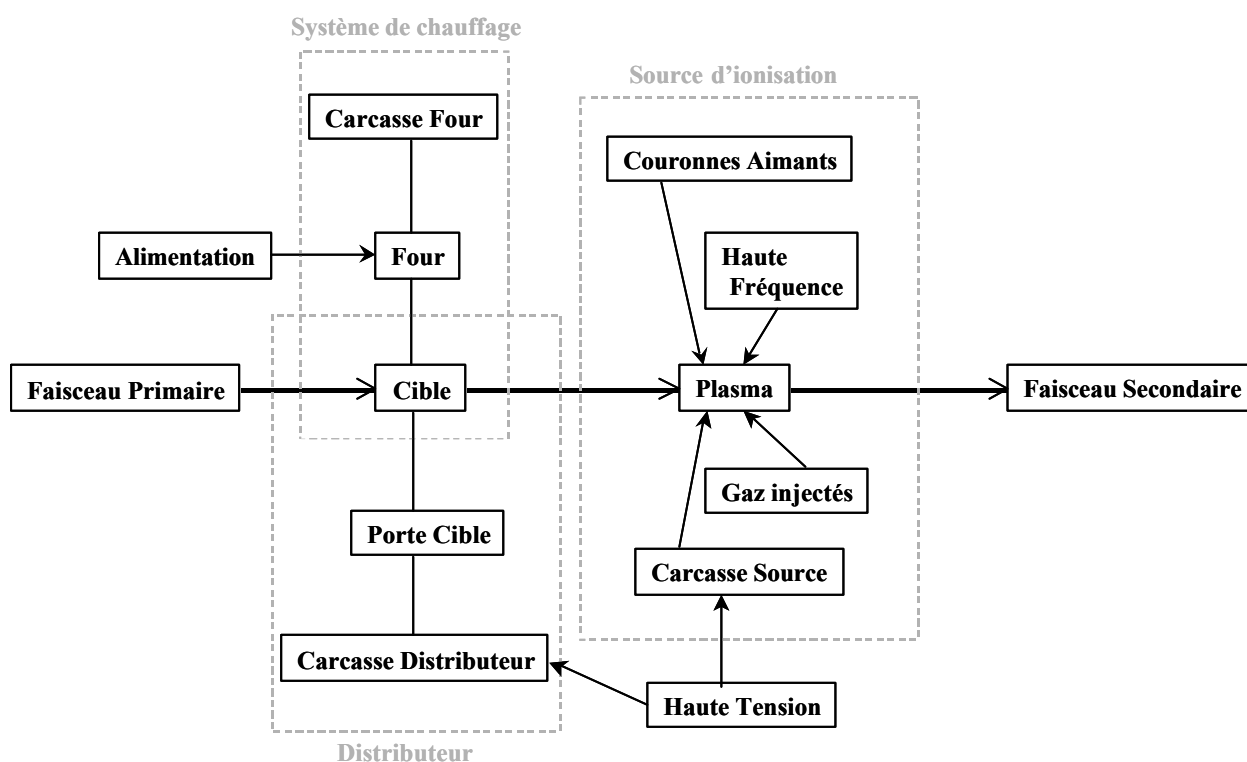


Figure II. 3 Description de l'ensemble du dispositif. Les principaux éléments nécessaires à son fonctionnement figurent également.

La figure II.3 rassemble les différents éléments constituant le dispositif . Chaque ensemble est décrit en détails dans les paragraphes suivants.

Ce schéma peut aussi être vu comme celui du fonctionnement de principe du dispositif, il permet en particulier de constater qu'il existe de nombreuses possibilités d'interactions indésirables entre les différents constituants qu'il ne faut pas perdre de vue lors de la définition de ceux ci. Ces interactions sont de tous ordres :

- Mécaniques ( forces agissant sur les ions, contraintes sur les structures... )
- Electriques (Champ électromagnétique, courant, tension...)
- Thermiques ( Transferts de chaleur, changements d'états, pression de vapeur...)
- Nucléaires ( Activité due aux désintégrations)
- Chimiques (Réactions d'oxydoréduction, déplacement d'équilibres...)

A chaque fois que cela a été possible, le choix d'un élément du dispositif a été soumis à l'examen des influences que celui-ci pourrait subir de la part du reste du système. Ainsi, lorsqu'une interaction entre deux éléments était pressentie, plusieurs cas de figures étaient envisageables :

- elle était prévisible et incompatible avec la fonction première de l'élément. Il fallait donc considérer un nouveau matériel
- elle était prévisible mais non critique. Elle était donc à contrôler à l'aide d'un capteur
- elle était prévisible mais d'ampleur inconnue. Elle a donc fait l'objet de tests hors ligne afin de valider le choix du matériel.

Ces derniers points ont imposé naturellement la liste des sécurités à mettre en place sur le dispositif (telles que le contrôle de la température des brides métalliques ou le contrôle de la pression à l'intérieur du distributeur). Ils ont également fourni un canevas pour les tests à réaliser, en procédant par étapes et en validant dans un premier temps les ensembles séparément. puis conjointement.

### **II.3 LE COUPLE FAISCEAUX PRIMAIRES /CIBLES**

Si la forme exacte des cibles dépasse le cadre de ce travail et concerne plus directement le groupe des physiciens du GANIL, il est toutefois important pour la réalisation de ce projet de pouvoir déterminer un volume utile pour les cibles. C'est en effet à partir de ce volume à chauffer que l'on peut déterminer les dimensions du four et au delà de l'ensemble du dispositif. Ce volume utile dépend de la nature du faisceau primaire que reçoit la cible. L'extension spatiale du faisceau permet de dimensionner le diamètre des cibles. Son énergie permet de calculer une profondeur de pénétration du faisceau dans la cible et de donner une longueur suffisante aux cibles pour stopper le faisceau primaire. Le calcul des profondeurs de pénétration ne peut se faire que pour un couple déterminé faisceau/cible. Le dernier paragraphe présente donc quelques matériaux pressentis pour être testés en tant que cible (cf. Chapitre I) et pris comme référence dans le calcul .

Pour éviter les pertes de noyaux radioactifs par collage sur des surfaces froides aux extrémités de l'enceinte du four, les cibles sont entourées d'un conteneur. Pour éviter d'éventuelles interactions chimiques entre le four et les cibles, le conteneur est réalisé dans le même matériau que la cible qu'il entoure. Le conteneur est pratiquement aussi long que le four de manière à ce qu'il n'y ait pas de zones du four en regard direct de la cible. La figure II.4 présente le schéma d'un ensemble cible. La zone arrière, hachurée sur le schéma correspond à la zone de fixation de la cible.

### II.3.1 DIMENSIONS DES CIBLES

On considère ici que la cible est un cylindre dont on cherche à déterminer le volume utile.

#### II.3.1.1 Diamètre des cibles

Le diamètre des cibles fait l'objet d'un compromis entre une valeur que l'on cherche à minimiser afin d'augmenter l'efficacité d'effusion du dispositif, et d'autre part la taille importante du faisceau SISSI sur laquelle il n'y a que peu de latitude de réglage. Les figures de l'annexe II.1 retracent les profils du faisceau depuis l'ALPHA jusqu'à la cible (enveloppes horizontale et verticale). Plus le faisceau est focalisé sur la cible et plus cette focalisation induit des pertes en amont dans la ligne dont le diamètre est de 80 mm. Les calculs réalisés par F. Chautard (GANIL) font état de deux possibilités qui minimisent les pertes dans la ligne. On obtient sur la cible :

- une tache circulaire de rayon 12 mm
- une ellipsoïde de dimensions 5 x 15 mm de demi axes

Des cibles dont les diamètres seraient de 24 ou 30 mm ne sont pas envisageables. En effet des cibles de ces dimensions imposent des fours de diamètres importants ( par rapport à la solution retenue) qui consomment une puissance électrique importante qui impose de sur dimensionner les alimentations. Ensuite et surtout, ces dimensions imposeraient également de déporter le four loin du plasma de la source, ce qui aurait pour conséquence d'augmenter les zones froides et par conséquent d'augmenter les durées d'effusion.

Une autre solution consiste à utiliser des cibles de diamètres plus petits et d'utiliser les fentes à l'entrée de SIRa pour couper le faisceau. Le profil du faisceau étant sensiblement gaussien, couper de moitié une tache de rayon correspondant à deux écarts-type revient à se priver de 28% du faisceau incident, ce qui est certes regrettable mais acceptable pour l'expérience envisagée.



Il a donc été décidé d'utiliser des cibles de 12 mm de diamètre entourées d'un conteneur de 16 mm de diamètre extérieur. Dans cette configuration, le conteneur prévu dans le même matériau que la cible est en fait partie intégrante de la cible, ceci afin d'éviter qu'une partie du faisceau ne manque la cible.

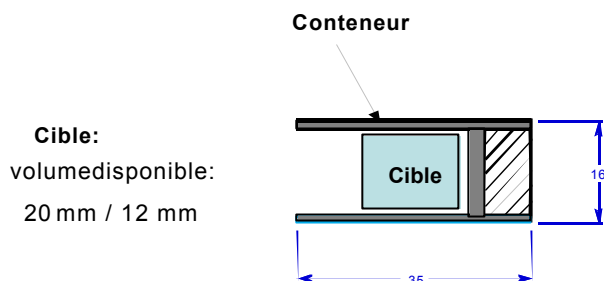


Figure II.4 Schémas des volumes respectifs de la cible et du conteneur.

### II.3.1.2 Longueur des cibles

La longueur de la cible, qui définit le volume utile de celle-ci, est directement liée à la profondeur de pénétration du faisceau dans le matériau cible. Il est en effet nécessaire que la totalité du faisceau soit arrêté dans la cible. La profondeur de pénétration dépend à la fois de la nature et de l'énergie du faisceau incident et du matériau constituant la cible. Comme l'illustre la figure II.5, la perte d'énergie du faisceau dans la cible se caractérise par un pic de Bragg [Bou-02] qui a pour conséquence que l'implantation des ions du faisceau se fait principalement à une profondeur donnée.

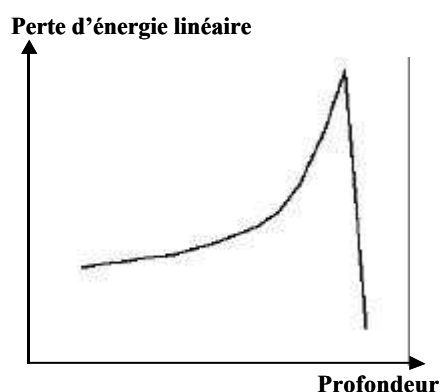


Figure II.5 Allure de la perte d'énergie linéaire d'un faisceau en fonction de la profondeur de pénétration dans un matériau cible.

Noyaux	E/A (MeV/A)	E (MeV)	Carbone	Tantale	Tungstène
<sup>36</sup> Ar	95	3430	3,85	0,976	0,834
<sup>35</sup> Ar	95	3325	3,73	0,945	0,807
<sup>33</sup> Ar	95	3135	3,51	0,891	0,761
<sup>32</sup> Ar	95	3040	3,41	0,864	0,738
<sup>33</sup> Cl	95	3135	4,03	1,02	0,873
<sup>32</sup> Cl	95	3040	3,91	0,99	0,846
<sup>31</sup> S	95	2945	4,2	1,06	0,91
<sup>30</sup> S	95	2850	4,07	1,03	0,88
<sup>29</sup> S	95	2755	3,93	0,996	0,851
<sup>30</sup> P	95	2850	4,67	1,18	1,01
<sup>29</sup> P	95	2755	4,51	1,14	0,976
<sup>28</sup> P	95	2660	4,36	1,1	0,943
<sup>27</sup> Si	95	2565	4,85	1,23	1,05
<sup>26</sup> Si	95	2470	4,67	1,18	1,01
<sup>25</sup> Si	95	2375	4,35	1,11	0,944
<sup>25</sup> Al	95	2375	5,05	1,28	1,09
<sup>23</sup> Mg	95	2185	5,68	1,43	1,23
<sup>22</sup> Mg	95	2090	5,43	1,37	1,17
<sup>21</sup> Mg	95	1995	5,18	1,31	1,12
<sup>22</sup> Ne	79,4	1746,8	5,63	1,44	1,23
<sup>20</sup> Ne	95	1900	7,05	1,78	1,52
<sup>21</sup> F	70,9	1488,9	5,39	1,4	1,19
<sup>20</sup> F	77,9	1558	6,07	1,56	1,33
<sup>18</sup> F	95	1710	7,79	1,97	1,68
<sup>17</sup> F	95	1615	7,36	1,86	1,59
<sup>20</sup> O	62	1240	5,08	1,34	1,14
<sup>19</sup> O	68,5	1301,5	5,77	1,5	1,28
<sup>15</sup> O	95	1425	8,2	2,07	1,77
<sup>14</sup> O	95	1330	7,65	1,93	1,65
<sup>18</sup> N	58,7	1056,6	5,4	1,43	1,21
<sup>17</sup> N	65,6	1115,2	6,23	1,63	1,39
<sup>13</sup> N	95	1235	9,27	2,33	2
<sup>16</sup> C	54,7	875,2	5,85	1,56	1,32
<sup>15</sup> C	62	930	6,88	1,8	1,54
<sup>11</sup> C	95	1045	10,86	2,73	2,34
<sup>10</sup> C	95	950	9,87	2,49	2,12
<sup>11</sup> Be	51,5	566,5	8,17	2,18	1,86

Tableau II 1 Profondeur de pénétration en mm de différents ions dans une cible de carbone, de tantale et de tungstène. Les énergies indiquées correspondent aux énergies maximales en sortie de l'ALPHA. Calculs réalisés avec le logiciel SRIM [Sri-04].

Le tableau II.1 donne la distance parcourue dans le carbone, le tantale et le tungstène pour différents faisceaux d'intérêt. Les énergies choisies correspondent aux énergies maximales compatibles avec les capacités de l'accélérateur d'une part (maximum de 95

MeV/A) et de transport dans l'ALPHA d'autre part. La distance maximale obtenue est de 10,86 mm pour le  $^{11}\text{C}$ . Une longueur de 15 mm pour les cibles assure une sécurité suffisante quant à l'arrêt du faisceau. Cette longueur peut être portée à 20 mm si l'on utilise une cible constituée de lamelles régulièrement espacées.

### II.3.2 NATURE DES CIBLES

Le choix définitif de la nature des cibles ainsi que de leur géométrie doit faire l'objet d'une étude ultérieure en étroite collaboration avec le groupe des physiciens du GANIL. On peut cependant, aux vues des exigences théoriques exposées au premier chapitre, donner un aperçu des cibles envisagées pour la première série d'expérience. Le tableau II.2 résume ces informations.

Matériaux	Caractéristiques	Fournisseurs
Carbone	Grains de 1 $\mu\text{m}$	Toyo [Toy-04],
	Grains de 5 $\mu\text{m}$	Poco [Poc-04],
	Grains de 10 $\mu\text{m}$	Carbone Lorraine [Car-04]
Tantale	3 feuilles de 3 $\mu\text{m}$	Goodfellow [Goo-04]
	1 feuille de 10 $\mu\text{m}$	
Tungstène	3 feuilles de 3 $\mu\text{m}$	
	1 feuille de 10 $\mu\text{m}$	
MgO	à étudier	
CaO		
ZrO <sub>2</sub>		

Tableau II 2 Liste des différentes cibles envisagées au 01/04/2004.

## II.4 LE SYSTEME DE CHAUFFAGE

On présentera ici dans un premier temps un descriptif technique du four et des motifs qui ont abouti à ce choix, puis la manière dont il s'intègre dans son environnement immédiat. Enfin, on exposera les résultats des calculs thermiques réalisés par le Bureau d'Etude.

## II.4.1 DESCRIPTIF TECHNIQUE

En accord avec les exigences exprimées dans le premier chapitre, le four à insérer dans le dispositif TARGISOL, constitué d'un cylindre de carbone, peut porter la cible à une température de 2300 K pour une puissance électrique de 2,5 kW

### II.4.1.1 Choix du matériau

Les matériaux solides susceptibles d'être portés à des températures supérieures à 2300 K sont assez peu nombreux. On y distingue essentiellement le carbone, des métaux dits réfractaires et quelques oxydes.

On peut écarter rapidement les oxydes métalliques du choix, pour des raisons d'ordre chimique. Il y a en effet un risque pour de tels composés d'être réduits par des cibles en carbone ou tungstène. Par ailleurs, les pressions de vapeur des oxydes sont généralement fortes. Ceci n'interdit pas en revanche de tester à l'avenir, des cibles composées d'oxydes, dans la mesure où les températures d'utilisations seraient plus faibles. Le tableau de l'annexe II-2 présente différents matériaux susceptibles d'être utilisés dans des fours.

Parmi les autres matériaux, seuls le tungstène et le carbone ont retenu notre attention, ceci en premier lieu en raison de leur bonne tenue mécanique en température et une température de fusion beaucoup plus grande que les 2300 K prévus d'utilisation du four. Il est à noter enfin que ce sont aussi les deux matériaux les moins chers de la liste considérée précédemment. Le tableau II.3 résume les différents avantages et contraintes liés à l'utilisation du carbone ou du tungstène.

A partir de cette comparaison et des exigences exprimées, le carbone apparaît comme le meilleur candidat, ceci pour les raisons principales suivantes :

- La plupart des cibles testées lors de la première série d'expérience seront elles mêmes en carbone, un four constitué de la même matière est donc particulièrement approprié
- Il est important d'avoir une grande stabilité du four durant l'expérience de comparaison des cibles, tant en ce qui concerne ses propriétés électriques que mécaniques. Des expériences récentes menées au GANIL sur des micro-fours d'évaporation constitués de filaments de tungstène [Lem-03], [Lec-98] ont montré que sous l'action conjointe de la température et du champ magnétique, les spires du four avaient tendance à se joindre et à se tordre créant ainsi des déformations qui modifient la résistance du four.
- De par sa grande résistivité électrique, le carbone permet d'utiliser des sections de conducteur plus importantes et donc des structures plus rigides.

Tungstène	Carbone
Très dur Utilisé en filaments	facilement usinable en toute forme
Résistivité faible (5. 10 <sup>-8</sup> W.m)	Résistivité élevée (1,3 10 <sup>-5</sup> W.m)
Devient très cassant après cycle de chauffage et recristallisation.	comportement mécanique stable
Oxydations et carburations  $w + O_2 \rightarrow WO_3$ ou $WO_6$ $W + C \rightarrow WC$	carburation et réduction des oxydes métalliques  $W + C \rightarrow WC$ $C + XOn \rightarrow X + CO_2$
Capacité calorifique: 133 Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Capacité calorifique: 712 Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Tenue au champ B: filaments mouvement des spires	Caisson à priori rigide

Tableau II.3. Tableau comparatif du tungstène et du carbone

#### II.4.1.2 Dimensions du four

Le four, de symétrie cylindrique, comporte deux ouvertures : une première en regard du faisceau primaire (devant), et une autre (derrière) utilisée pour placer et retirer les cibles.

Les dimensions du four sont fixées en fonction de celles des cibles (cf. § II.3). Ces dernières ont un diamètre de 12 mm. Elles sont entourées d'un conteneur d'épaisseur 1 mm sur la longueur du four. L'ensemble « cible » a donc un diamètre de 16 mm. Afin de faciliter le mouvement des cibles dans le four et d'éviter les contacts avec ce dernier, deux millimètres séparent le conteneur du four, ce qui impose pour le four un rayon interne de 20 mm.

Le four doit être suffisamment long pour assurer une température homogène de la cible. En revanche, limiter la longueur du four permet aussi de limiter la longueur de la course des cibles depuis le distributeur jusqu'au four.

La longueur du four est de 38 mm, ce qui représente environ deux fois la longueur des cibles (figure II.6).

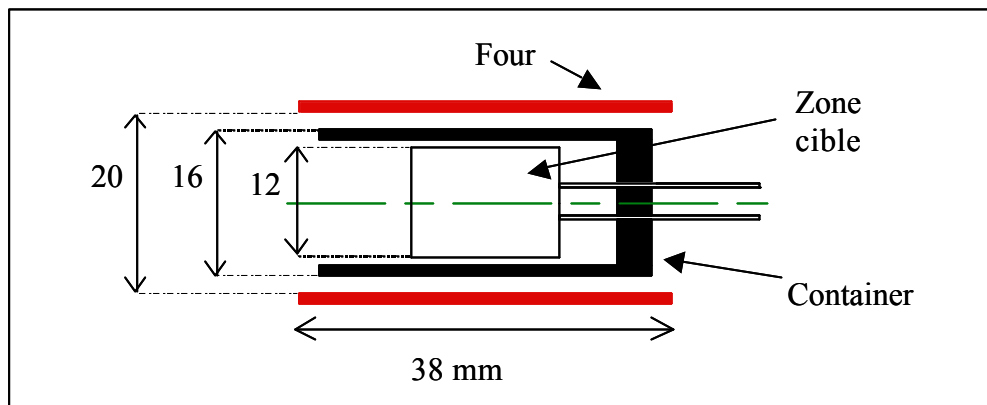


Figure II.6. Schéma de l'ensemble cible – conteneur.

### II.4.1.3 Résistance électrique

Le four est alimenté par ses extrémités, de manière à ce que le courant circule à travers le cylindre creux. A partir de cette base cylindrique, on peut facilement usiner le carbone de façon à augmenter la résistance électrique du four, en diminuant faiblement la rigidité de l'ensemble.

Différents fours en carbone (mais de dimensions plus importantes) ont déjà été développés au GANIL et testés dans des ensemble cible-source (four MONOLITHE, four cible Hélium 3,3 kW). L'épaisseur du four est de 1 mm. Ce choix est le résultat d'un compromis entre la résistance électrique que l'on veut la plus grande possible d'une part, et la rigidité et la durée de vie d'autre part. Le cylindre est zébré de fentes latérales créant ainsi trois circuits électriques en dérivation (figure II.7). Le nombre de fentes latérales décide de la longueur des circuits.

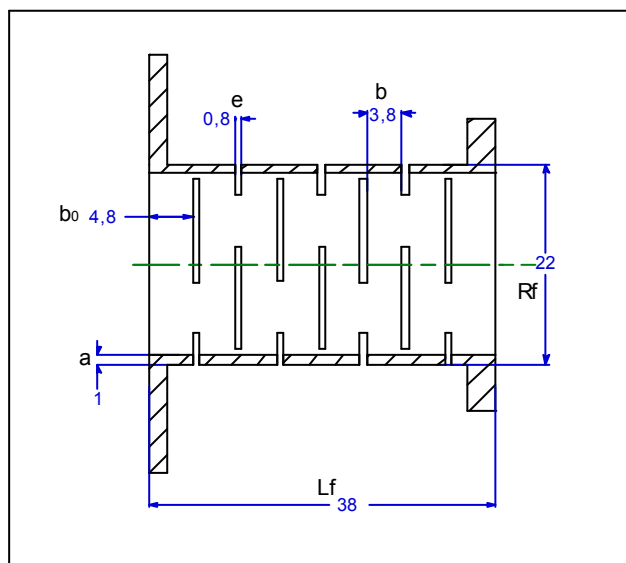


Figure II.7. Schéma du four « Targisol ».



Figure II.8. Four carbone constitué de 7 fentes latérales (5 fentes effectives)

Le tableau suivant donne la résistance équivalente pour différents nombres de fentes latérales et pour un cylindre plein. Les détails du calcul sont reportés dans l'annexe II-3.

Nombre de fentes	Résistance équivalente (mΩ)	Paramètres :
0	1,3	Longueur : 38 mm
3	34	Rayon interne : 10 mm
5	45	Epaisseur : 1mm
7	64	Largeur de fente : 0,8 mm
9	90	Résistivité : $1,3 \cdot 10^{-5} \Omega.m$

Tableau II 4. Evolution de la résistance électrique avec le nombre de fentes latérales

La résistance du four est un paramètre important à suivre lors de l'expérience. C'est en effet le seul paramètre qui permet de juger de l'état du four en fonctionnement. Une variation brutale ou simplement plus rapide qu'attendue de cette valeur, à une température donnée, est révélatrice d'une rupture mécanique ou d'une évaporation trop importante. La courbe d'évolution de la résistance en fonction de la température permet de suivre l'évolution de la résistance au cours d'une montée en température (cf. Chapitre IV).

### II.4.1.3 Durée de vie du four

En comparaison avec les métaux réfractaires, la pression de vapeur du carbone est élevée. Elle est de  $1,5 \cdot 10^{-4}$  mbar à 2300 K. Cette valeur de pression est beaucoup plus élevée que la pression qui règne dans les lignes et dans la source d'ions, qui est de l'ordre de  $10^{-7}$  -  $10^{-6}$  mbar. Le carbone solide et sa vapeur sont donc dans ces conditions de fonctionnement en déséquilibre. A terme, il y a donc disparition du four par évaporation. Comme on peut l'observer sur la figure II.9, la vitesse d'évaporation dépend fortement de la température. Pour la durée prévue de l'expérience (de l'ordre de quelques jours), le four ne doit pas dépasser la température de 2500 K.

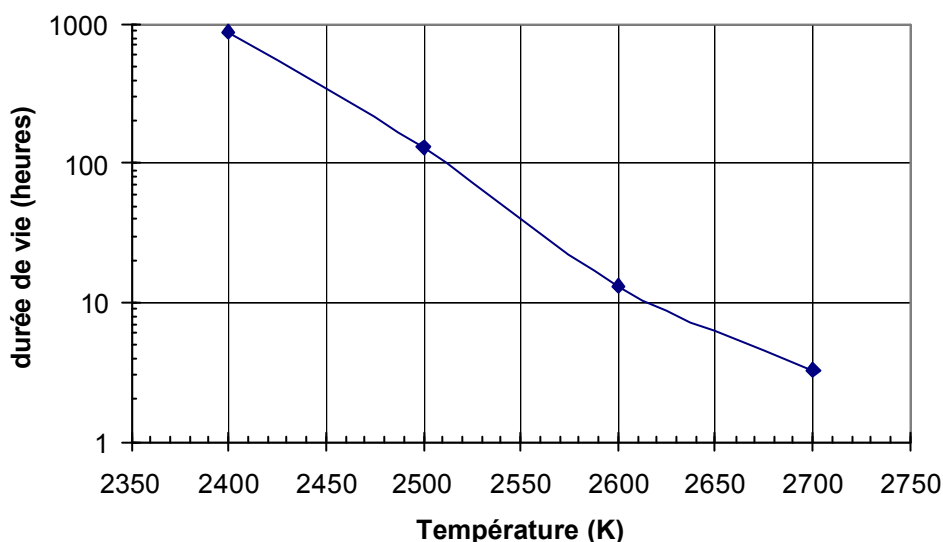


Figure II.9. Durée de vie d'un cylindre ayant les dimensions du four en fonction de sa température. (cf. annexe II-4 pour les détails et les références)

## II.4.2 L'ENVIRONNEMENT

Compte tenu des très hautes températures mises en jeu, l'environnement immédiat du four doit faire l'objet d'une attention particulière. La figure II.10 présente le bloc «four» constitué des pièces en carbone (four et réflecteurs) et des brides (inox et cuivre) qui entourent et soutiennent le four.

Les brides du four sont installées entre les couronnes d'aimant de la source (cf. §II.6 pour une description de la source). Leur dimensions sont donc tributaires de celles de la



source, déjà existante. Entre le four et son carter, les espaces vides et les zones froides ont été minimisés de manière à réduire les pertes d'atomes issus de la cible par collage.

D'un point de vue thermique, on peut souligner les points suivants :

- Les enceintes sont refroidies par circulation d'eau (5 l/min), afin d'éviter les contraintes mécaniques trop importantes sur les pièces (par dilatation) et la dégradation des joints élastomères par élévation de température.
- Un réflecteur en carbone est installé autour du four afin de protéger le carter du four et de diminuer la puissance électrique nécessaire au chauffage de la cible.

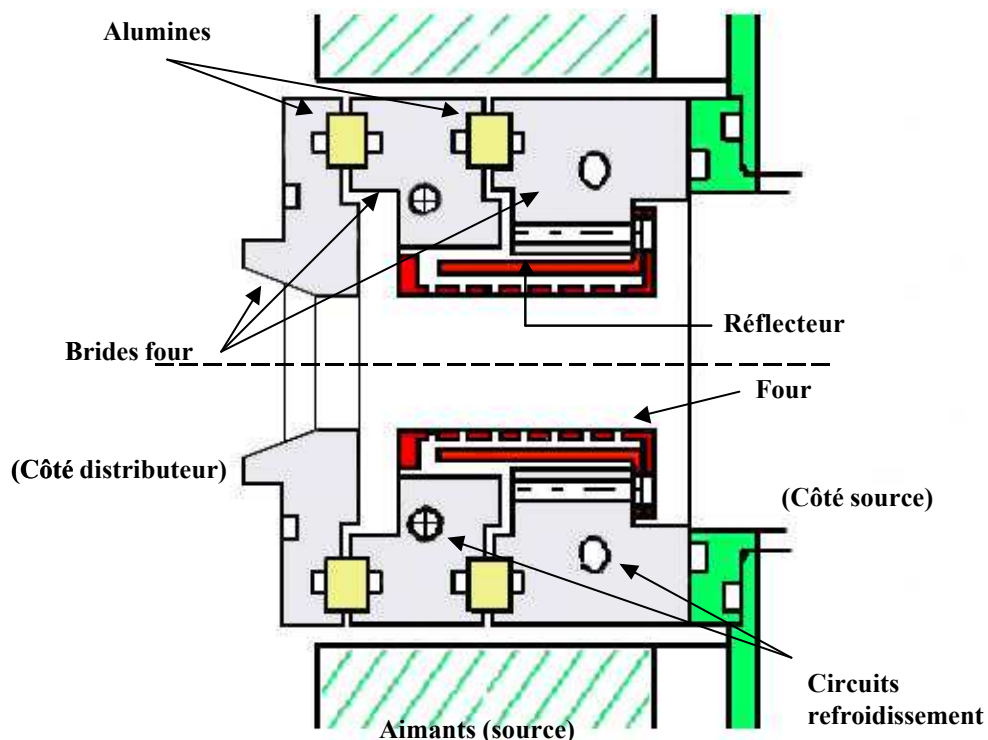


Figure II. 10 Schéma du bloc four.

D'un point de vue électrique :

- Les amenées de courant sont fixées sur les brides centrales, c'est la raison de la présence d'une couronne d'alumine entre ces deux brides.
- Les connexions électriques entre le four et les brides sont assurées par du papier carboné (papyex). Elles sont donc suffisamment souples pour permettre d'accommoder les mouvements de dilatation du four.
- La seconde alumine permet d'isoler la bride centrale et de maintenir par un contact extérieur, le distributeur au même potentiel électrique que la source.

Les aimants de la source sont également refroidis. Ils doivent être protégés du four et surveillés lors des tests. A titre d'exemple, il n'est pas recommandé d'utiliser des aimants Nd-Fe-B à des températures au delà de 100 K [Gau-98]. Cette température est largement en dessous du point de Curie des aimants ( 310 K), mais elle peut néanmoins introduire des diminutions de la valeur de champ rémanent initial de l'ordre de 10 à 20% (cela dépend pour une grande part du mode de fabrication).

Vis-à-vis du plasma de la source :

Le four est situé le plus près possible de la source, ceci afin d'une part de minimiser les temps d'effusion des atomes extraits de la cible, et d'autre part de maximiser le nombre d'atomes issus de la cible qui traversent le plasma. Le four par sa présence (par ses dimensions importantes par rapport aux fours à évaporations habituellement utilisés au GANIL [Lem-03] pour obtenir des ions métalliques par exemple) peut éventuellement modifier les caractéristiques du plasma (émission d'électrons, modification des conditions de confinement..). Par précaution, le four ne pénètre donc pas dans le plasma, la limite fixée étant la dernière ligne de champ fermée de la source, située à 0,087 T. Des tests devront alors être réalisés afin d'observer dans quelle mesure la présence du four perturbe le plasma.

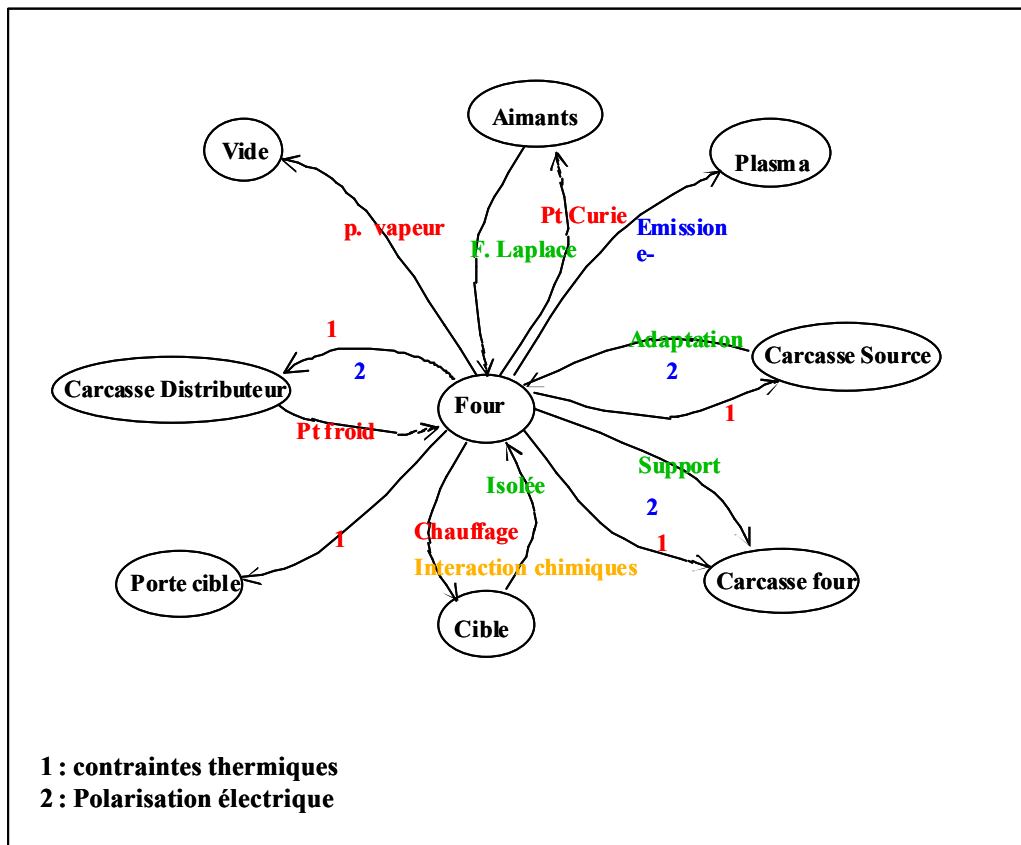


Figure II.11. Schéma récapitulatif des interactions possibles entre le four et les différents éléments qui constituent son environnement immédiat.

L'ensemble du dispositif est placé sous vide moléculaire (la pression dans la source est de l'ordre de  $10^{-6}$  mbar). La quantité de gaz désorbé par les parois sera un paramètre à suivre lors de tests. Dans le même ordre d'idée, les réactions chimiques potentielles entre cibles et four doivent être envisagées (réaction redox de carburation, oxydation ...).

Le schéma de la figure II.11 récapitule les différentes interactions envisagées entre le four (la pièce en carbone) et son environnement.

### II.4.3 SIMULATIONS SYSTUS

Il est important de pouvoir évaluer à priori d'une part la puissance nécessaire à apporter au four pour permettre à une cible d'atteindre la température voulue, et d'autre part la distribution en température aux alentours du four.

Le Bureau d'Etude du GANIL dispose d'un logiciel de calculs thermiques, Systus<sup>®</sup> [Sys-04], par éléments finis, qui prend en compte les aspects complexes du rayonnement (rayonnement mutuel, cavité rayonnante en particulier) et qui permet d'obtenir une vue d'ensemble du profil de température à la fois dans la cible et dans l'environnement proche du four. Les résultats des calculs effectués par S. Tanguy [Tan-03] sont présentés dans le tableau II.5. Les simulations ont été réalisées pour 3 types de cibles carbone, tungstène et tantale, occupant à chaque fois l'intégralité du volume disponible et entourées d'un conteneur de même nature que les cibles (cf. figure II.13). Ces simulations mettent en évidence plusieurs points importants :

- Elles permettent d'estimer à 2,5 kW la puissance à fournir au four pour obtenir une température de 2300 K (ou plus) de la cible.
- Elles permettent d'estimer l'écart maximum de température dans la cible. Cet écart, plus important dans les cibles en carbone qu'en tungstène ou en tantale, est au maximum de 100 K. La figure I.12 représente la distribution en température à l'intérieur d'une cible en carbone (hors faisceau).
- Ils permettent d'estimer que les températures de l'environnement carter, source, cône des cibles et distributeur et par là même de valider le choix des matériaux (c. f. annexe II-5).

Cible et conteneur Carbone		
	Tmax (K)	Tmin (K)
Cible	2297	2192
Four	2473	428
Conteneur	2372	1787
Réflecteur	2122	417

Cible et conteneur Tungstène		
	Tmax (K)	Tmin (K)
Cible	2400	2391
Four	2660	416
Conteneur	2461	2254
Réflecteur	2313	403

Cible et conteneur Tantale		
	Tmax (K)	Tmin (K)
Cible	2401	2391
Four	2683	416
Conteneur	2461	2247
Réflecteur	2331	404

Tableau II.5. Comparaison des températures obtenues pour différentes cibles, pour un chauffage de 2,5 kW.

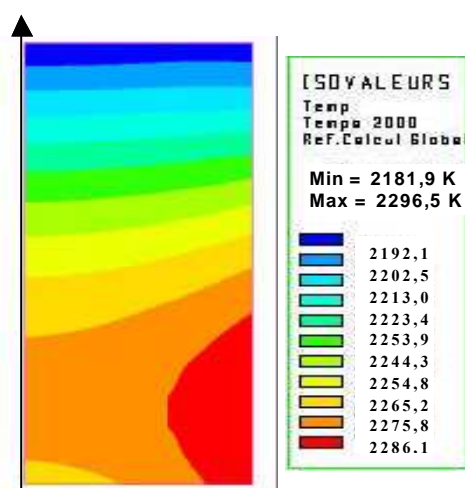


Figure II.12. Distribution des températures dans une cible en carbone. La flèche verticale représente l'axe de symétrie (la pointe de la flèche correspond à la partie de la cible qui reçoit le faisceau).

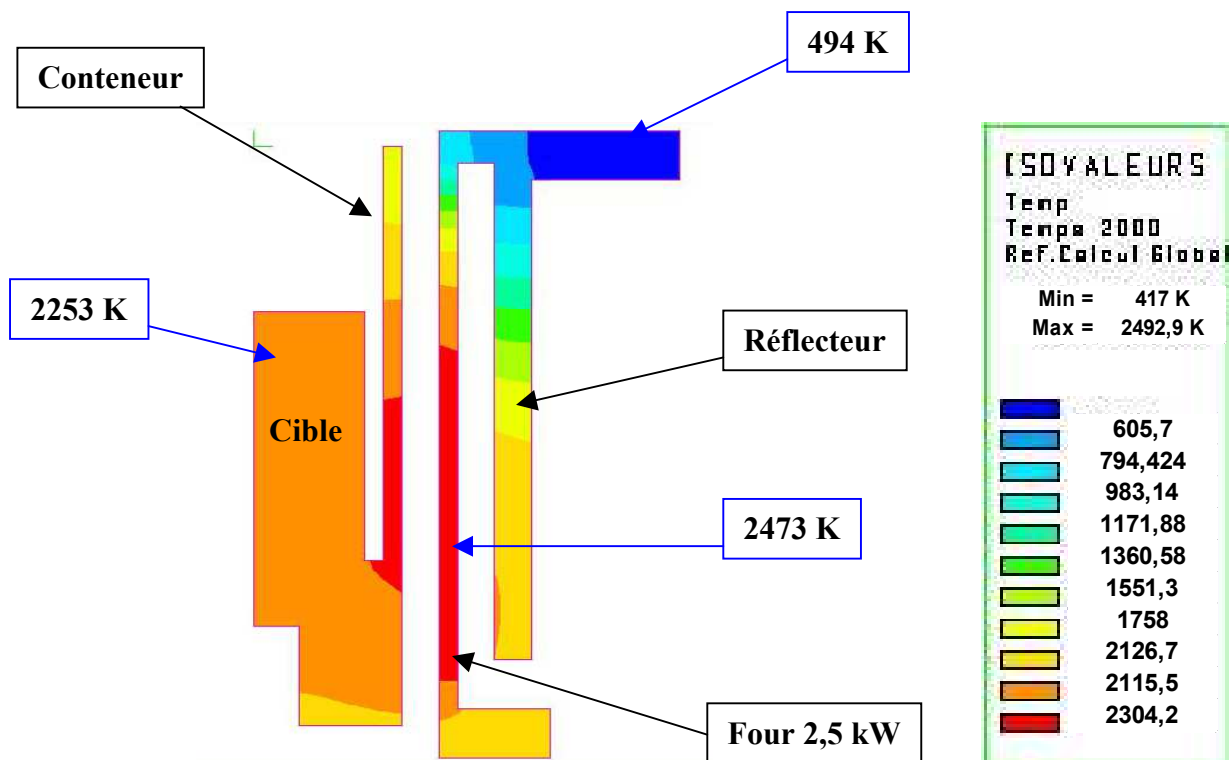


Figure II.13. Distribution des températures dans l'ensemble cible carbone + conteneur + four + réflecteur.

## II.5 LE DISTRIBUTEUR

La conception et le dessin du distributeur ont été réalisés en collaboration avec le Bureau d'Etudes du GANIL [Tan-03]. Les caractéristiques générales du distributeur sont les suivantes :

- Le dispositif peut porter 12 cibles. Ce nombre devait être le plus grand possible tout en restant dans les limites de la place disponible dans la casemate de SIRa et dans l'enveloppe budgétaire. En effet, dans l'optique d'avoir une base de comparaison des cibles la plus large possible, il est important de pouvoir placer au départ dans le dispositif le nombre de cibles le plus grand, et ce même si la durée de l'expérience impose que les tests soient réalisés en plusieurs fois.

- Le système est automatisé en prévision du cas où un faisceau direct de forte intensité d'ions stables serait utilisé, interdisant pour des raisons de radioprotection l'accès à la

casemate de SIRa. Afin de ne pas perdre de temps de faisceau inutilement en cas de panne informatique par exemple, le système est débrayable et utilisable manuellement.

- L'ensemble est placé sous vide. Le distributeur est à la même pression que la source, c'est-à-dire autour de  $10^{-6}$  mbar. L'ensemble est donc étanche au vide et pompé. Lors des mesures de relâchement, les vides du distributeur et de la source sont séparés pour que le volume du distributeur ne joue pas le rôle de volume mort pour les ions radioactifs.

- Les cibles soutenues par un porte-cible sont portées à une température de 2300 K. Il faut donc prévoir le refroidissement par circulation d'eau des pièces sensibles du distributeur.

- Afin de ne pas perturber la structure du champ magnétique de la source, il faut utiliser des matériaux amagnétiques. Il est également important d'éloigner les moteurs et autres systèmes de commande des aimants de la source.

- Le distributeur est porté au même potentiel électrique que la source (à 20 kV) afin de ne perturber ni le plasma, ni les conditions d'extraction des ions de la source.

- Dans le cas d'utilisation d'un faisceau intense, l'aspect radioprotection du démontage de l'équipement a été pris en compte. Le démontage est simple et compatible avec les procédures utilisées en protection radiologique.

- Pour des raisons purement pratiques (de test du dispositif en particulier), une trappe latérale a été prévue offrant la possibilité d'installer et retirer une cible du dispositif sans avoir à démonter l'ensemble du distributeur (cf. figure II.14).

- Outre un système d'identification extérieur des cibles, il est possible d'installer un hublot sur le distributeur (à travers un piquage) de façon à pouvoir observer les cibles à l'aide d'une caméra. Un passage a été prévu pour installer une sonde de pression directement sur le distributeur.

## II.5.1 LE MOUVEMENT

Le mouvement des cibles se décompose en deux parties : une rotation permet de sélectionner la cible et de l'aligner avec l'ouverture du four, une translation permet d'insérer et de retirer la cible.

Les cibles sont placées sur des ensembles porte-cible (figure II.14) guidés sur une couronne verticale. La couronne tourne d'un angle de  $30^\circ$  afin de présenter l'une des 12 cibles choisie face au four. Ensuite un système « engrenage-crémaillère » place la cible dans le four. Le cône d'appui (figure II.15) vient en contact avec la partie extérieure du four. Il permet de guider la cible avec précision au centre du four et également de garder une pseudo-étanchéité entre la source et le distributeur. Des ressorts disposés sur les porte-cibles permettent à la cible de revenir en position initiale d'une part et d'autre part d'éviter aux cibles situées dans la position basse verticale de tomber par leur propre poids. Puis la couronne pivote à nouveau jusqu'à la cible suivante. L'ensemble porte cible a un mouvement télescopique, (figure II.18 et Annexe II-6) ce qui permet d'augmenter la course et de diminuer l'encombrement. Il peut être installé dans le dispositif par une ouverture située sur le dessus du distributeur. Ceci permet le pré montage des cibles à l'extérieur du mécanisme sans avoir à démonter les capots.

Une attache, permettant de lier la crémaillère et l'ensemble porte cible, a été conçue pour assurer le retour de l'ensemble (Figure II.15).

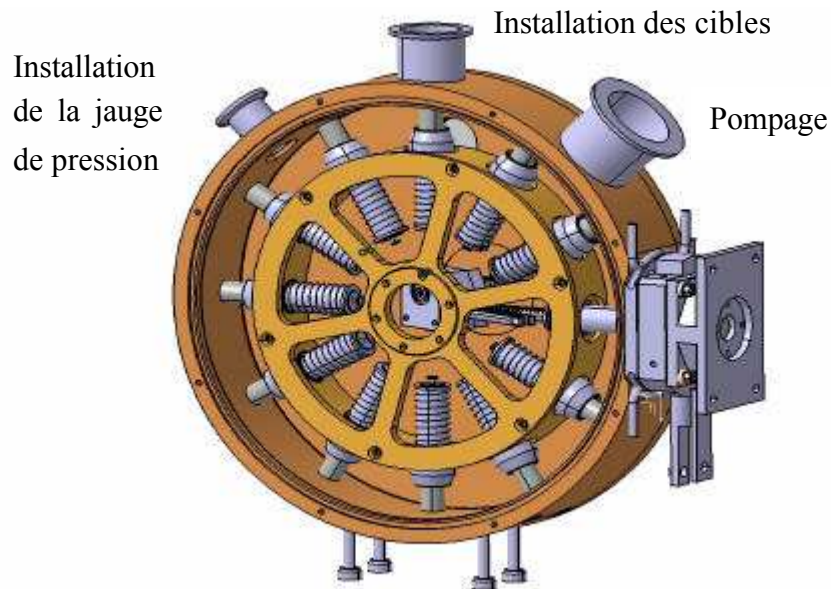


Figure II.14. Vue d'ensemble du distributeur, de la couronne supportant les porte cibles et des brides du four.

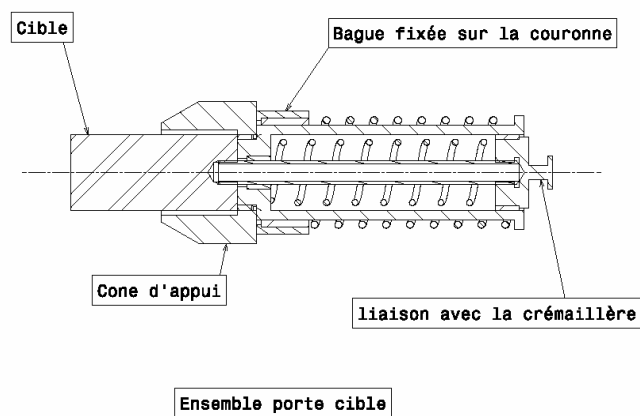


Figure II.15. Schéma d'un ensemble porte cible.

## II.5.2 LA MOTORISATION

### Motorisation de la rotation

La motorisation de la rotation doit permettre à la couronne porte cible d'effectuer une rotation d'un angle précis (pour 12 cibles l'angle est de 30°). En raison de la proximité de l'ensemble des aimants de la source, la solution d'un moteur pas à pas asservi par un résolveur n'a pas été retenue. L'utilisation d'un moteur à courant continu a elle aussi été écartée. Le moteur à courant continu est commandé par les capteurs qui coupent l'alimentation de celui-ci lorsque la rotation a eu lieu. Le problème dans ce cas est de bloquer la rotation lorsque le moteur n'est plus alimenté.

La solution retenue, qui semble la plus fiable est d'utiliser un vérin pneumatique poussant sur une roue dentée. La course du vérin correspond à une rotation d'un angle de 30°. La couronne est maintenue mécaniquement par la fin de course du vérin pendant que la cible se trouve dans le four. Un capteur de position est placé sur l'axe de rotation afin d'informer l'utilisateur de la position de la couronne. Le passage étanche est assuré par un double joint torique afin d'éviter les problèmes de fuite lors des mouvements des pièces mécaniques.

#### ➤ Schéma de principe :

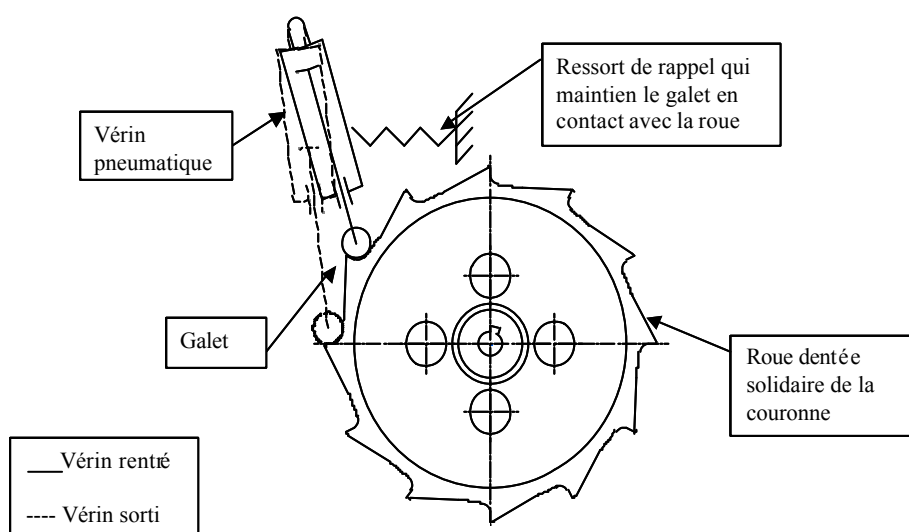


Figure II..16. Vérin assurant le mouvement de rotation

### Motorisation de la translation

Le mouvement de translation est effectué à l'aide d'une crémaillère (sous vide) et d'une réduction extérieure par deux engrenages. L'étanchéité est réalisée sur l'axe par deux joints toriques.



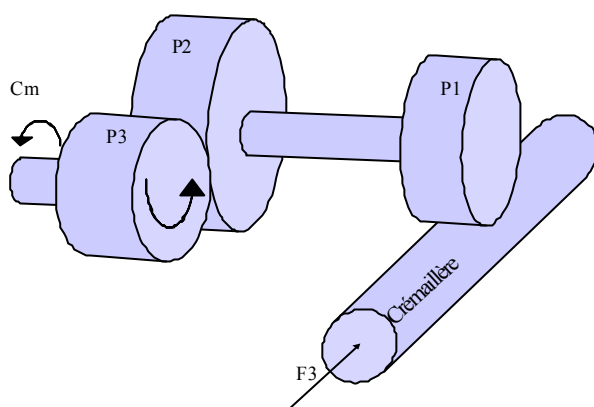


Figure II.17. Principe de l'ensemble engrenage-crémaillère. F3 représente les efforts des ressorts sur la crémaillère, Cm est le couple moteur à appliquer. Les couples résistants dus aux passages sous vide ont également été pris en compte [Tan-03].

Un vérin pneumatique rotatif a été choisi car il permet d'effectuer la course de la cible pour un mouvement de rotation de  $270^\circ$ . Les deux positions de la cible (rentrée et sortie) se font donc sur des butées mécaniques réglables du vérin. Le couple de ce vérin est de 5Nm à 6 bar. Ce couple nous offre un coefficient de sécurité de 2.8, (couple résistant estimé à 1,75 Nm [Tan-03]) ce qui nous assure un bon fonctionnement de la translation de la cible.

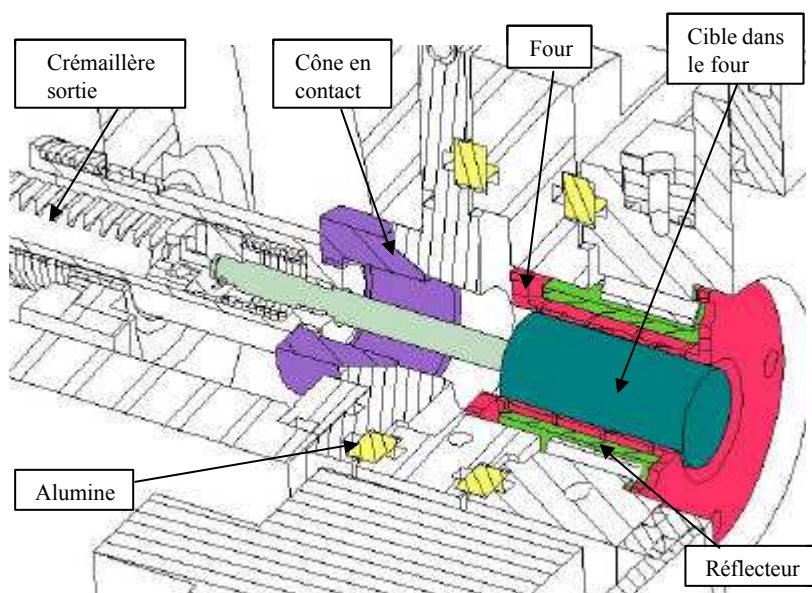


Figure II.18. Cible en position dans le four et environnement immédiat.

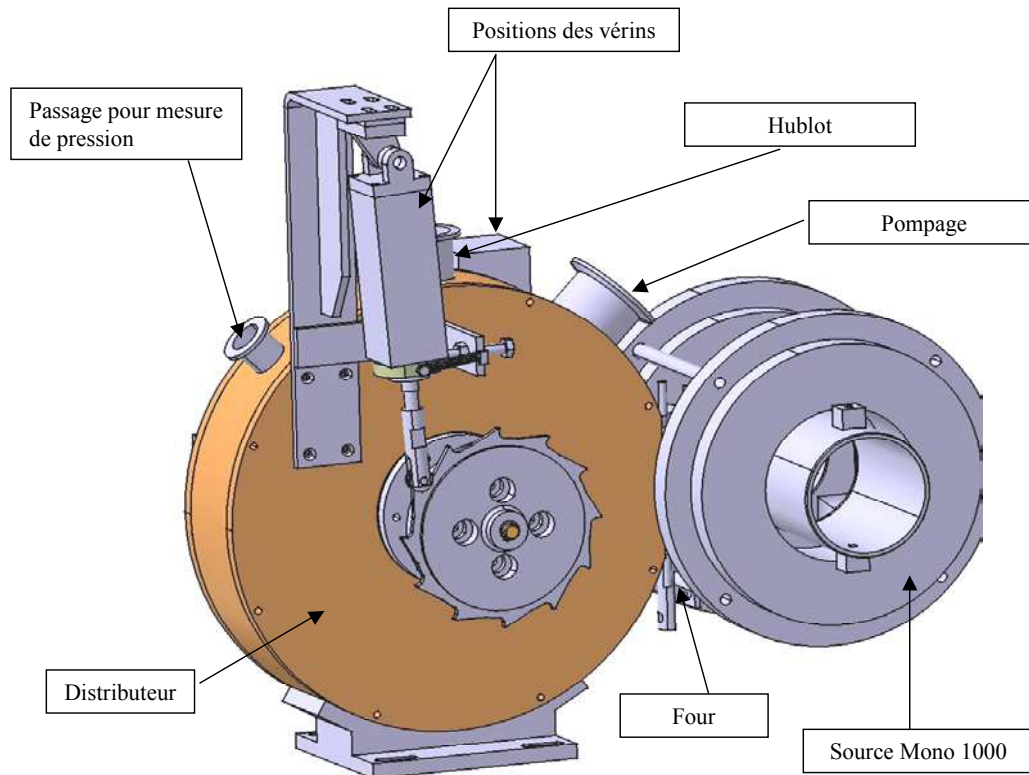


Figure II.19. Vue générale du dispositif

## II.6 LA SOURCE RCE

Les sources d'ionisation à Résonance Cyclotronique Electroniques, développées depuis une vingtaine d'années [Gel-96], permettent d'obtenir avec une efficacité importante (pouvant aller jusqu'à 100%) des faisceaux d'ions mono ou multichargés. Les ions sont produits dans un plasma par collisions entre électrons et atomes ou ions. Les particules chargées formant le plasma sont confinées dans une chambre à vide, par un champ magnétique de structure appropriée, formant une succession de surfaces fermées de mêmes modules de champ magnétique. Ce confinement augmente le temps de présence et la densité de particules chargées dans la source, augmentant par là même les probabilités d'ionisation.

injection d'une onde électromagnétique haute fréquence (de l'ordre du GHz). Pour une certaine valeur du champ magnétique, cette onde HF entre en résonance avec la fréquence de précession des électrons autour du champ magnétique. Une description du principe de fonctionnement d'une source RCE est donnée en annexe II.7.

La source d'ionisation utilisée dans ce projet, est une source RCE de type MONO1000, récemment développée au GANIL [Pac-02],[Jar-02].

Le confinement magnétique est assuré par deux couronnes d'aimant NdFeB distantes de 80 mm et de rayon intérieur 50 mm. Cette disposition crée un confinement à symétrie de révolution axiale dont le module de la dernière surface fermée atteint 0,23 T. La figure II.1 présente le plan de la source MONO1000 ainsi que la structure du champ magnétique en son centre.

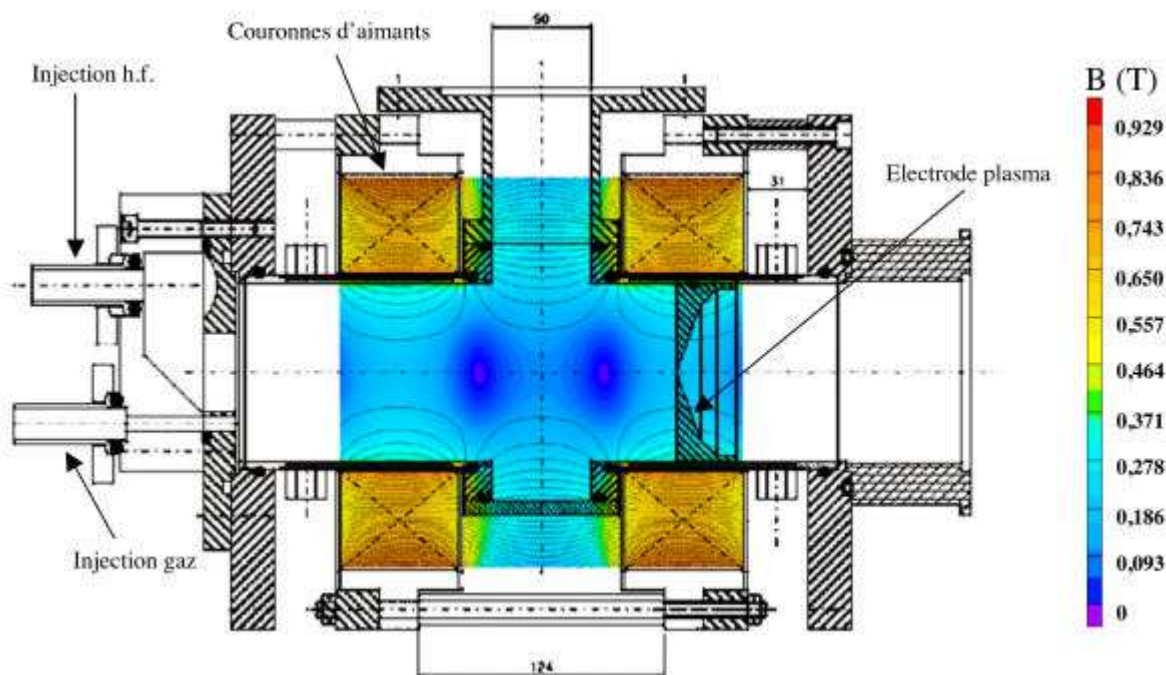


Figure II.19 Schéma de la source MONO100 et module du champ magnétique en son centre. La structure centrale en forme de « cacahuète » (symétrie de révolution) représente approximativement la zone la plus dense du plasma.

La fréquence de fonctionnement de la source est de 2,45 GHz, ce qui correspond à une surface de résonance de 0,087 T (Cf. annexe II.7). L'injection de l'onde se fait par une transition câble coaxial/guide d'onde installée à l'extrémité de la source. La puissance de travail peut aller jusqu'à 200 W. Les chambres à vide sont refroidies par circulation d'eau.

L'injection de gaz, nécessaire à alimenter le plasma et à maintenir une certaine densité, se fait par des piquages disposés entre les couronnes d'aimants (ou par l'extrémité de la source). La structure magnétique particulière de MONO1000 laisse un espace important (figure II-19) entre les couronnes d'aimants, qui permet d'installer au plus près du plasma un système de chauffage. C'est une des raisons du choix de cette source.

L'extraction des ions de la source est électrostatique. Une électrode dite « plasma » située dans la source est portée à un potentiel de plusieurs kilo Volts. A leur sortie de la source, les ions sont accélérés vers l'électrode d'extraction placée au potentiel de la masse 0V, reliée à la terre . L'électrode plasma collecte les électrons qui émergent de la source et qui à l'inverse des ions sont repoussés par la différence de potentiel. Dans toutes les mesures réalisées par la suite, le diamètre du trou de l'électrode plasma est de 7 mm.

La source MONO1000 produit principalement des ions monochargés. Ce point ne constitue pas une limite pour le dispositif expérimental. En effet, dans la première série d'expériences prévues, la masse la plus grande à transporter correspond à l'<sup>36</sup>Ar. Or le dipôle de la ligne SIRa permet d'obtenir un  $(B\rho)_{\max}^1$  de 0,141 T.m, ce qui permet à son tour, pour une tension d'extraction de 20 kV utilisée dans SIRa, de transporter et dévier dans de bonnes conditions des masses en dessous de 47 u.m.a. (cf. Annexe I.1).

Cette source présente des efficacités d'ionisation importantes et pouvant atteindre 100% dans les cas des gaz rares [Pac-02], ce qui a constitué un argument supplémentaire dans son choix. La source d'ionisation doit présenter une efficacité d'ionisation importante pour deux raisons : d'une part pour que le nombre d'ions radioactifs en sortie du système de production soit maximal et soit ainsi plus facile à mesurer (les flux d'ions radioactifs sont souvent ténus) ; d'autre part pour que le temps de transformation des atomes en ions soit aussi faible que possible c'est à dire beaucoup plus faible que le temps de diffusion, afin qu'il ne masque pas ce dernier (cf. Chapitre III). Effectivement, ce sont les caractéristiques de relâchement au travers du temps de relâchement des ions radioactifs par les cibles que l'on désire étudier, et non pas les temps de production totaux. Le temps total de production résultant du temps de relâchement et du temps de transformation des atomes en ions, il est essentiel que le second soit aussi faible que possible. Le temps de transformation  $\tau_{ion}$  des atomes en ions étant lié à l'efficacité d'ionisation  $\epsilon_{ion}$  par la relation [Jar-04] :

$$\tau_{ion} = \frac{1 - \epsilon_{ion}}{\lambda_{eff} \epsilon_{ion}} \ln 2 \quad (II.1)$$

il est important que l'efficacité d'ionisation soit aussi proche que possible de 1 pour que le temps d'ionisation soit proche de 0. ( $\lambda_{eff}$  est inversement proportionnel au temps d'effusion. Il est fixe pour un système donné).

---

<sup>1</sup> Rigidité magnétique, produit du champ magnétique par le rayon de courbure de la trajectoire de la particule. (cf. Annexe I.1)

## II.7 COMMANDE ET CONTROLE

Dans la salle D2 de SIRa, la commande des équipements se fait par un automate API 5000 ou directement par un programme Labview installé sur un PC et relié à des interfaces de commande développées par le GANIL. Le partage des tâches se fait de la manière suivante.

L'automate gère l'ensemble du système de vide, il commande l'ouverture des vannes des pompes primaires et turbomoléculaires. Il gère également l'intégralité des sécurités portant sur l'ensemble cible-source en autorisant la mise en marche de l'alimentation haute tension, de l'émetteur hautes fréquences et de l'alimentation du four. Il autorise enfin l'accès du dispositif au faisceau.

Les programmes Labview contrôlent et commandent les différentes alimentations de l'ensemble cible source et l'ensemble des diagnostics de faisceau en bout de ligne de SIRa.

Par rapport aux utilisations précédentes de SIRa, il n'y a donc que la commande et le contrôle des mouvements du distributeur à ajouter. C'est l'automate qui va se charger de cette tâche. L'automate est programmé par le groupe Technique de la Physique du GANIL auquel il faut fournir le synoptique du programme de changement de cible. Celui-ci est présenté sur la figure II.20.

### Commande du distributeur

Le déplacement automatique des cibles est assuré par deux vérins.

Le premier vérin assure la rotation de la roue qui contient les cibles et place la cible choisie dans l'axe du four. Une impulsion électrique appliquée à la commande électromécanique du vérin suffit à assurer l'aller et retour du bras de ce dernier. Un contact électrique sec suffit donc à vérifier que le vérin est bien revenu à sa position initiale.

Le second vérin permet d'introduire la cible dans le four et par le mouvement inverse de l'en retirer. Dans ce cas, le vérin doit avoir deux états. En effet par soucis de sécurité, on ne peut « autoriser » le faisceau que dans le cas où une cible est en position dans le four. Inversement, tout changement de cible ne peut se faire que lorsque le faisceau a été coupé. De plus, en cas de problème (coupure d'alimentation, blocage informatique ...) la cible doit être maintenue en place dans le four. Les deux fins de course du vérin doivent donc être contrôlées par contacts électriques.

Un connecteur 12 positions solidaire de l'axe de rotation permet d'identifier les cibles. Un pont potentiométrique envoie une tension 1-10 V sur une entrée analogique de l'automate.

L'alimentation du four doit être coupée lors d'un changement de cible afin que la cible refroidisse avant de rejoindre son emplacement dans le distributeur. Il faut une temporisation réglable avant le retrait de la cible du four.

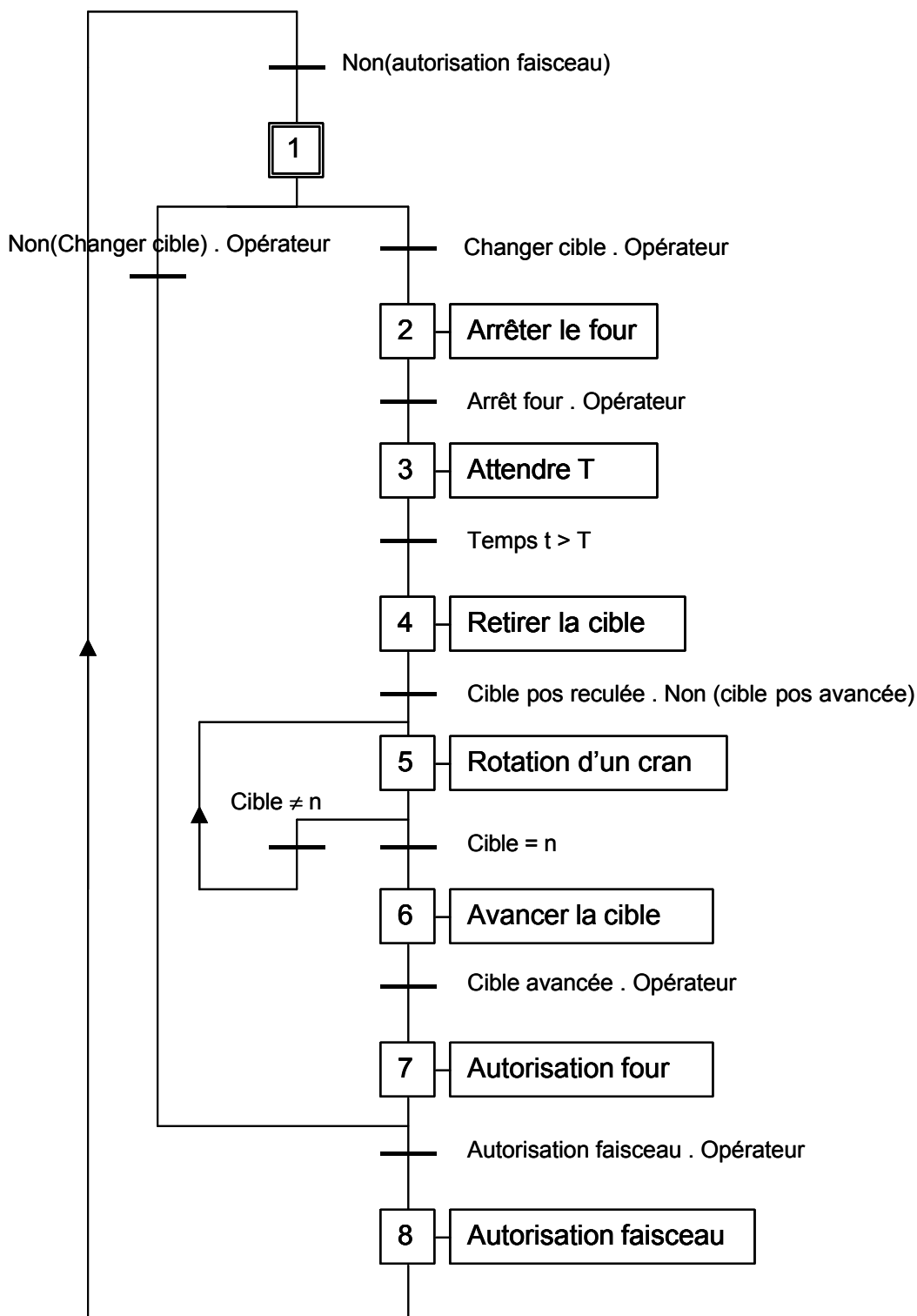


Figure II.20. Grafset du changement de cible géré par l'automate. On demandera à l'opérateur de valider chaque étape à travers un programme Labview qui communiquera avec l'automate.

Une jauge de pression doit permettre de comparer la qualité des vides dans le distributeur et dans la source. Enfin il est envisagé de placer une webcam devant un hublot afin de doubler l'identification des cibles et de contrôler leur état après test.

## II.8 REALISATION DU PROJET

### II.8.1 BUDGET

Comme il a été dit au chapitre précédent, ce travail entre dans le cadre de la collaboration européenne TARGISOL, financée par l'Union Européenne. Le budget alloué au GANIL pour ce projet, c'est-à-dire pour l'achat d'appareils, l'achat de « consommables » et la fabrication des pièces était de 31900 Euros. Le tableau II.6 détaille les coûts des différents éléments.

Eléments	Détail	Fournisseur	Prix
Source	Aimants permanents	TV Magnetics	3971,48
	Chambres mono1000	SOMINEX	1963
	Ensemble Méca. mono1000	MECA-QG	1850
	2 couronnes+4 flasques	MECA GEST	1121
	corps de source mono 1000	Sominex	450
Distributeur	porte cibles	GRM	9290
	ressorts porte-cible	MDP	217,6
	alumine porte-cible	FRIATEC	295
	tube Mo porte-cible	PLANSEE	350
	volant		48,54
	electrodistributeur	FESTO	159,9
Four		polygraphite	2450,4
Divers	entretoises	VAT	262,2
	Thermocouples W/Re et elctronique de mesure	Thermocoax	2222,8
	silicium SIRa	AMETEK	1270
	honoraires douane	Sogecaen	284,03
	<b>Total somme engagée</b>		<b>26205,95</b>
	<b>SOLDE</b>	31900	<b>5694,05</b>

Tableau II.6 Détail des coûts en matériel et fournitures.

**II.8.2 ORGANISATION DU TRAVAIL**

La figure II.21 précise la fonction des différents intervenants de ce projet et la répartition des tâches. Les flèches indiquent les échanges d'informations. Le bureau d'études du GANIL a en charge la conception mécanique et les simulations thermiques (sous logiciel Systus). Le groupe Techniques de la physique s'occupe de l'installation des dispositifs dans les aires expérimentales du GANIL, le groupe Physiciens collabore à la préparation des expériences ainsi qu'à tout ce qui concerne l'acquisition et le dépouillement des résultats. Les pièces mécaniques sont réalisées au GANIL ou à l'extérieur dans le cas de pièces spécifiques qui demandent l'emploi d'outils dont le GANIL ne dispose pas.

Dans ce projet, j'ai eu pour tâches la conception du dispositif en collaboration avec les différents groupes concernés, puis au sein du groupe de production d'ions, le montage et les tests du dispositif à savoir :

- Montage et tests d'une nouvelle source d'ions MONO1000 consacrée au programme TARGISOL
- Montage et tests de l'ensemble constituant le four.
- Montage et tests du distributeur.
- Montage et test de l'ensemble.

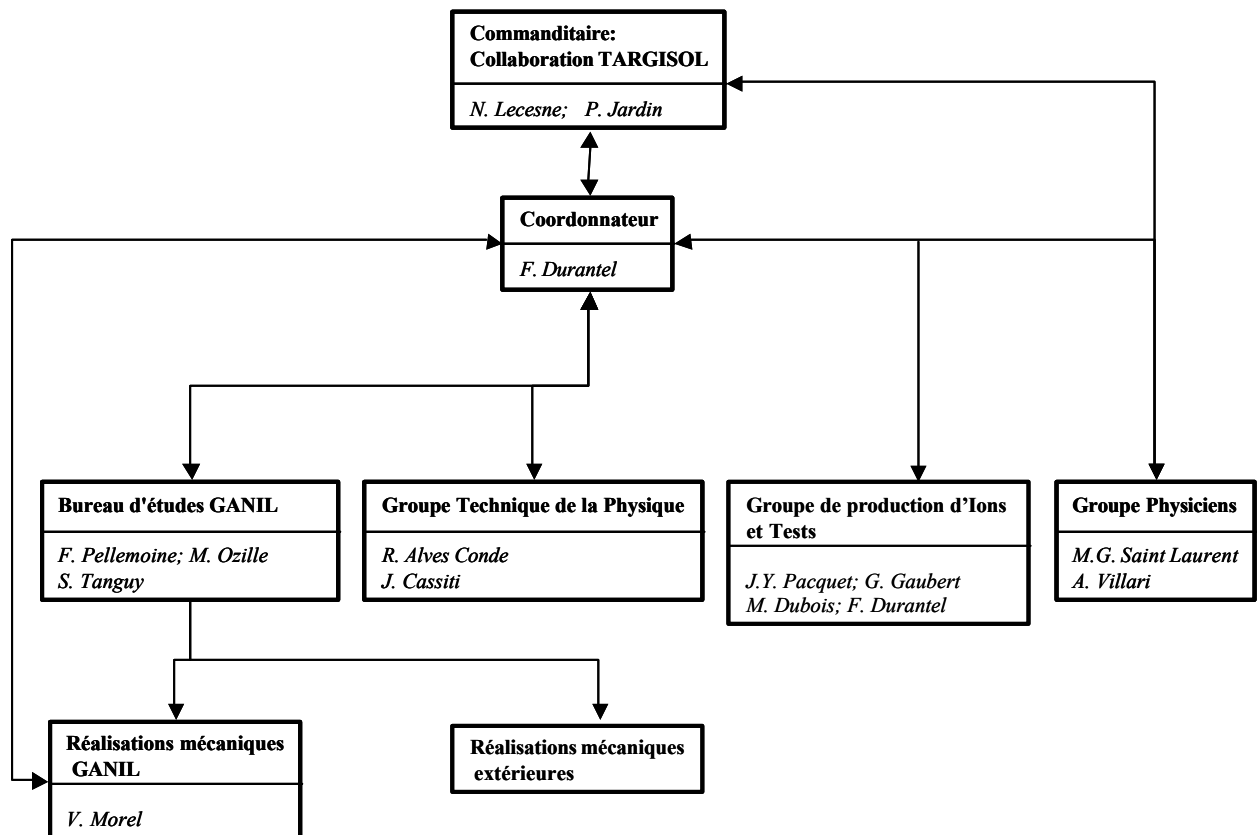


Figure II.21. Organisation des tâches et transfert des informations dans la réalisation du projet TARGISOL.



**II.8.3 CALENDRIER**

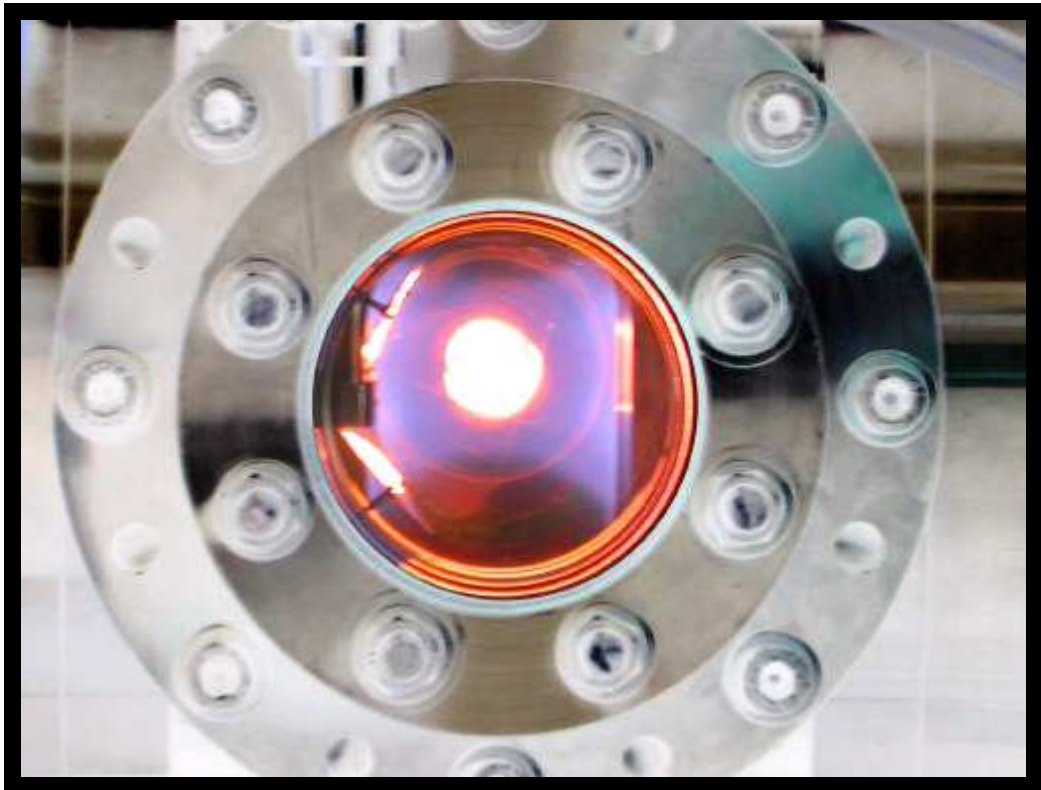
Le tableau II.7 ci-dessous indique les grandes étapes de réalisation de ce projet. Ce travail à été réalisé sur une période qui va de janvier 2003 à mai 2004, soit une durée de 17 mois. La réalisation de ce projet devait être achevée pour le mois de mars 2004. On constate donc un retard de deux mois dans les prévisions qui s’explique par un retard des crédits au début 2003 (ce qui a retardé la livraison des pièces de la source) et par la mesure des températures dont la durée a dépassé les prévisions d’un bon mois.

Périodes	Mois	Source	Four	Distributeur
1	jan-03	dessins d'une nouvelle source MONO1000 raccourcie	études préliminaires	études préliminaires
2	fev.	commande source		
3	mars		conception et dessin	conception et dessin
4	avril			modifications
5	mai			conception et dessin
6	juin	réception source	commande	commande
7	juil.	montage et tests source		conception et dessin
8	aout			commande
9	sept.	corrections		
10	oct.	tests	réception four, montage	
11	nov.		tests	
12	déc.		modifications	réception
13	jan-04		tests	montage mécanique
14	fev.			
15	mars			
16	avril	tests	tests four et source	
17	mai			tests avec et sans four

Tableau II.7. Déroulement des différentes étapes de réalisation du projet TARGISOL.

*Seconde partie :*

*Tests du dispositif*





## CHAPITRE III

### *Tests de la source d'ionisation*

Le but de cette série de tests est d'une part de connaître précisément les performances de la source nouvellement assemblée, de s'assurer qu'elles sont équivalentes aux résultats des sources antérieures, et d'autre part de caractériser le comportement de la source dans des conditions de fonctionnement proches de celles des expériences TARGISOL «on-line», c'est à dire avec une cible chauffée.

La source MONO1000 avait été choisie pour son importante efficacité d'ionisation, mais cette efficacité n'avait jamais été mesurée avec un four et une cible chauds à proximité directe du plasma. L'incidence sur l'efficacité d'ionisation de cette proximité était inconnue, tout comme l'incidence des gaz désorbés sous l'effet de la chaleur. Avant de tester l'ensemble «on line», il était donc nécessaire de vérifier les caractéristiques de fonctionnement de la source en fonction du gaz support, puis d'étudier son comportement en présence du four et d'une cible.

La première étape a consisté à réaliser la source puis à vérifier que le champ magnétique créé par les couronnes d'aimants était conforme au champ attendu. Il a ensuite fallu installer la source sur le banc de test n°2 du Hall D pour optimiser l'efficacité de transport du faisceau d'ions dans le spectromètre magnétique, efficacité sans laquelle il est impossible de déterminer l'efficacité d'ionisation de la source.

La deuxième étape concerne la mesure des efficacités d'ionisation. Elle a d'abord permis de mettre en évidence un défaut de configuration mécanique qui une fois corrigé a permis d'obtenir des résultats conformes aux résultats antérieurs pour différents gaz supports et gaz d'intérêt.

La troisième étape a consisté à étudier le comportement de la source associée au four chaud.

Le problème de la production de noyaux radioactifs peut également être abordé sous un angle complémentaire de la mesure des efficacités qui consiste à mesurer les temps

caractéristiques de chaque étape de la production. Dans l'objectif de produire des faisceaux d'ions radioactifs de durée de vie de plus en plus courte, il apparaît nécessaire de développer des systèmes de plus en plus « rapides » et de pouvoir caractériser ces différents systèmes en terme de temps de réponse. La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la mesure des temps de transformation atome-ion de gaz rares dans la source MONO1000.

### III.1 VERIFICATION DU CHAMP MAGNETIQUE DE LA SOURCE

Une source d'ions de type MONO1000 dédiée aux expériences TARGISOL a été réalisée. Cette source ne diffère des autres sources du même type que par la longueur de la chambre côté injection HF, qui a été raccourcie comme le montre la figure III.1. Cette modification a été réalisée dans le but de diminuer les volumes morts, de façon à diminuer les temps d'effusion.

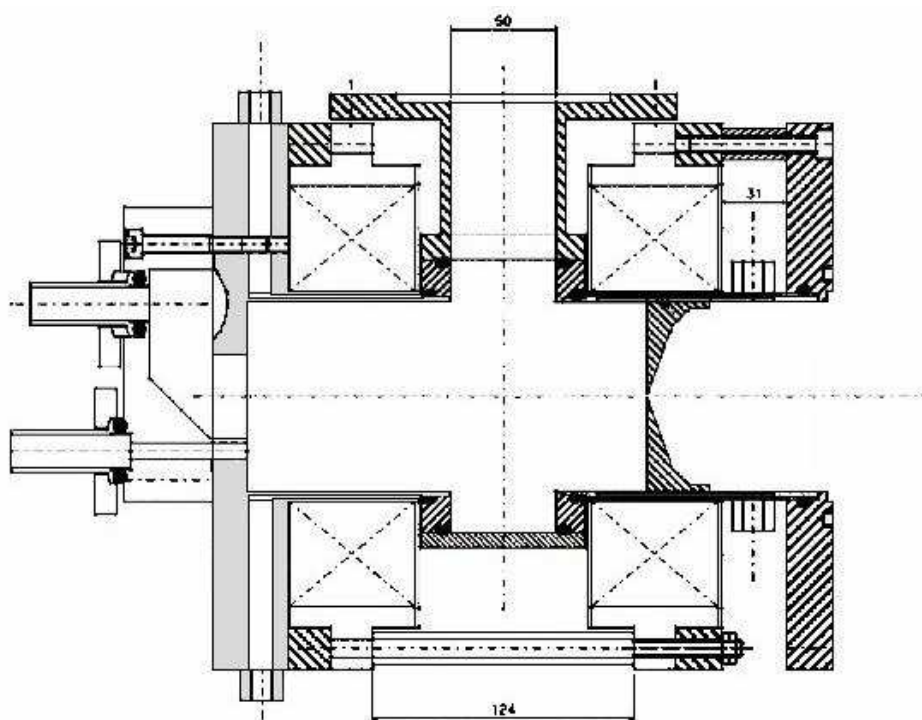


Figure III. 1 Schéma de la source MONO1000 raccourcie. La bride de fixation de l'injection HF (en grisé) et la chambre cylindrique ne font qu'une seule pièce.

La bride de fixation du bloc d'injection HF et la chambre circulaire sont solidaires. Le refroidissement par eau se fait par la bride. L'ensemble est en acier inoxydable amagnétique.

La structure du champ magnétique dans la source est essentielle puisque c'est le champ qui assure le confinement des particules chargées du plasma (cf. annexe II.7). La

figure III.2 donne le résultat de la mesure de la composante longitudinale du champ sur l'axe de la source. L'origine des abscisses correspond au centre de la chambre à plasma. La structure du champ est conforme au calcul réalisé sous Quickfield<sup>®</sup>, ainsi qu'aux mesures faites sur les sources antérieures. Le léger écart en amplitude observable entre les deux mesures peut provenir des aimants qui ont été fournis par deux entreprises différentes.

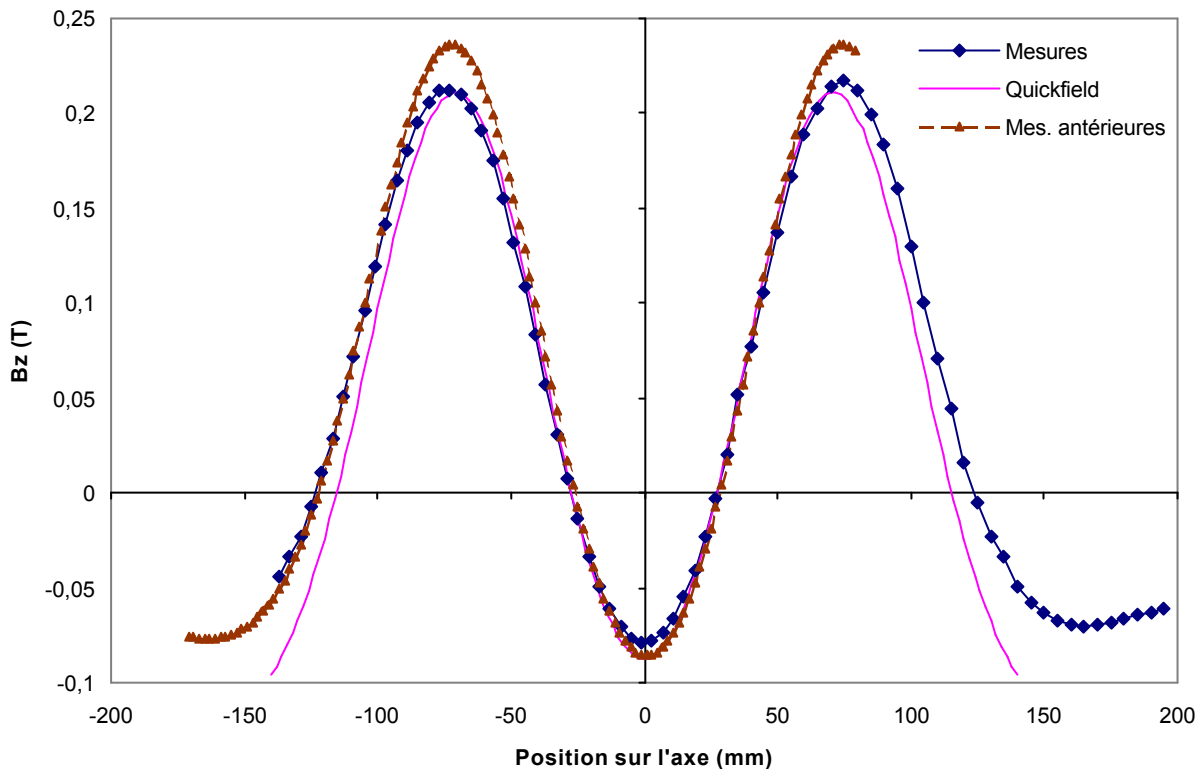


Figure III- 2 Champ B longitudinal sur l'axe. Comparaison entre les mesures réalisées sur la source « TARGISOL », mesures réalisées sur la source antérieure MONO1001 et modélisation avec le logiciel Quickfield<sup>®</sup>.

## III.2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET PRINCIPE DE LA MESURE

### III.2.1 DESCRIPTION DU BANC DE TEST DU HALL D

Toutes les mesures d'efficacité de transport et d'ionisation ont été réalisées sur le banc de test 2 du Hall D du GANIL (figure III.3). Ce banc est un spectromètre magnétique : il

permet de trier les différentes espèces d'ions formés dans la source en fonction de leur rapport charge  $q$  sur masse  $M$  et d'en mesurer l'intensité (cf. annexe I.1).

Le principe du spectromètre est le suivant : les ions émergent de la source et sont accélérés par la différence de potentiel appliquée entre la source et la masse pour former un faisceau d'ions. Celui-ci est focalisé par une lentille électrostatique puis traverse un dipôle magnétique qui sépare les trajectoires de ions en fonction de leur rapport  $q/M$ . Le faisceau qui emprunte la trajectoire « centrale » émerge du dipôle pour achever sa course dans une coupelle de Faraday.

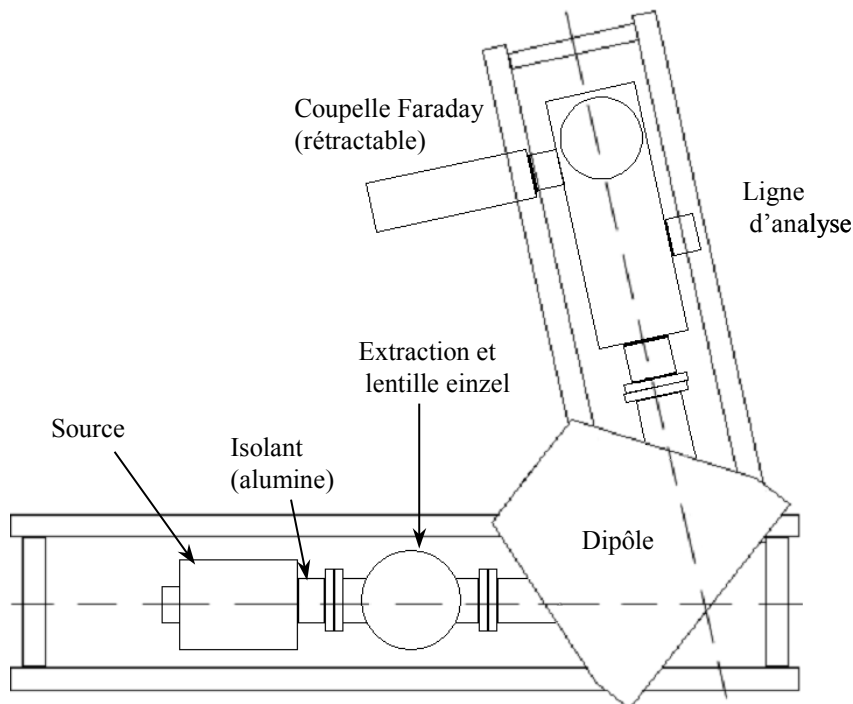


Figure III.3 Schéma du banc de test 2 du Hall D

Plus précisément, les ions émergent librement de la source au travers de l'électrode dite « plasma » : il s'agit d'un disque percé en son centre qui délimite la chambre de la source et qui est situé au même potentiel que la source (20kV max). Grâce à une électrode dite « d'extraction » située face à l'électrode plasma et raccordée au potentiel de la masse (0V) (figure III.4), les ions sont accélérés. Une lentille électrostatique (lentille « einzel ») permet d'adapter la divergence du faisceau aux caractéristiques du dipôle d'analyse. Elle est constituée de trois électrodes à symétrie de révolution qui se suivent ; l'électrode centrale est portée à une haute tension (entre +20kV et -20kV) et les électrodes extrêmes sont à la masse (0V).

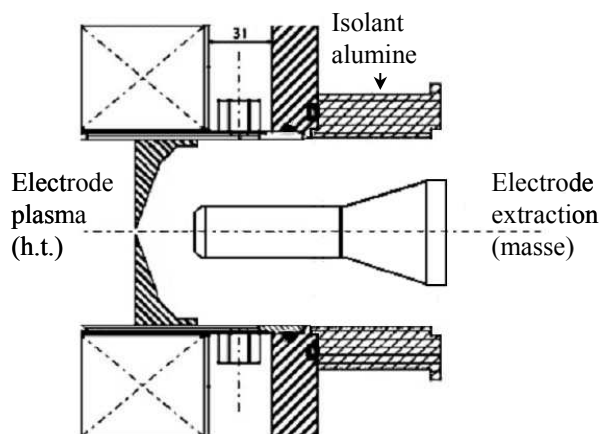


Figure III- 4 : Schéma de l'extraction. Les ions sont accélérés par la différence de potentiel appliquée entre les deux électrodes.

Le dipôle d'analyse est constitué d'un électro-aimant dipolaire (cf. annexe I-1). Le rayon de courbure du dipôle est de 0,350 m. Pour les ions qui suivent la trajectoire centrale du dipôle, l'angle de déviation est de  $102^\circ$ . L'intensité du courant électrique d'alimentation du dipôle varie de 20 à 265 A, ce qui permet d'obtenir un champ magnétique maximum de 0,33 T, qui correspond à une rigidité magnétique maximum du faisceau  $(B\rho)_{\max}$  de 0,115 T.m. A titre d'exemple, cette rigidité magnétique correspond à celle d'un faisceau d' $^{40}\text{Ar}^+$  accéléré à une tension de 14kV.

La coupelle de Faraday est reliée à la masse au travers d'une résistance. La mesure de la tension à ses bornes permet de déterminer le courant déposé sur la coupelle.

Devant la coupelle est également disposé un jeu de fentes horizontales qui permettent de limiter la taille du faisceau. Deux profileurs permettent en outre d'obtenir la distribution spatiale de l'intensité du faisceau.

L'ensemble des chambres est maintenu sous vide. L'annexe III-1 décrit la gestion du vide et l'injection de gaz dans la source.

### III.2.2 PRINCIPE DE L'ANALYSE DU FAISCEAU D'IONS QUI EMERGE DE LA SOURCE

#### III.2.2.1 Spectres

La coupelle de faraday permet de mesurer l'intensité d'un faisceau pour un rapport  $q/M$  donné. En balayant l'intensité du dipôle de 20 à 265 A, c'est à dire en modifiant la valeur  $B\rho$  en continu, et en enregistrant simultanément les valeurs de courant déposé sur la coupelle



de Faraday, on obtient le spectre de l'intensité des  $q/M$  qui émergent de la source en fonction de l'intensité du dipôle. A titre d'exemple, la figure III.5 présente un spectre réalisé pour une tension d'accélération des ions de 14 kV en utilisant la source MONO1000. Chaque pic correspond à un rapport  $q/M$  donné. Si on suppose que le champ magnétique varie linéairement avec l'intensité qui traverse la bobine du dipôle (zone non saturée de l'acier du dipôle), l'identification de deux pics permet de déterminer le rapport  $q/M$  des autres pics. Ces deux pics peuvent par exemple être les pics de  $N_2^+$  et de  $H^+$  dont on sait par expérience qu'ils sont toujours présents sur les spectres (ions issus de l'ionisation de  $N_2$  et de  $H_2O$  désorbés par les parois).

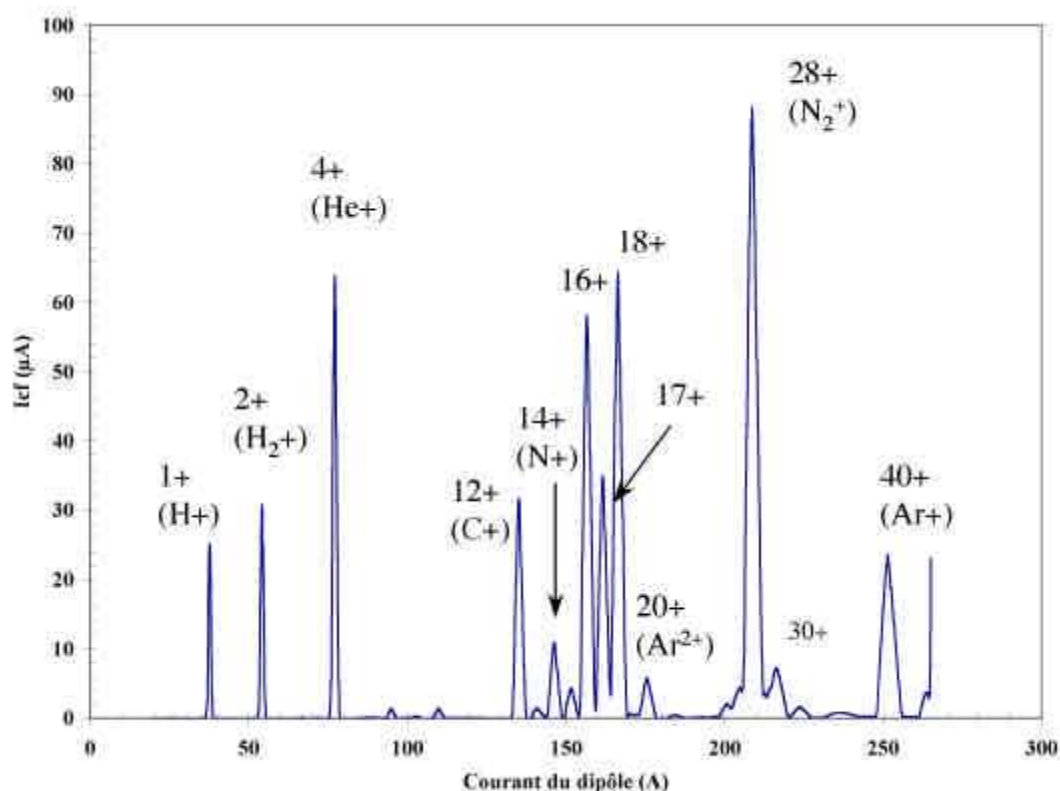


Figure III-5 Exemple de spectre de la source dans laquelle sont injectés de l'hélium en gaz support et de l'argon dans la fuite calibrée. La source est encore en situation de dégazage comme l'atteste l'importance relative des pics d'éléments C,N,O,H. La présence importante et constante d'azote permet également de diagnostiquer l'existence d'une fuite, due à un défaut d'étanchéité de l'ensemble.

Il est important de noter que chaque pic ne correspond pas nécessairement à une espèce unique. En effet cette méthode ne permet pas de séparer les ions  $N_2^+$  des ions  $CO^+$  ou encore les ions  $N_2^{2+}$  des ions  $N^+$ . Les spectres doivent donc souvent être interprétés avec de grandes précautions. La coupelle de faraday permet de détecter aisément jusqu'à  $0,5 \mu A$  de faisceau, ce qui correspond à un courant de  $3 \cdot 10^{12}$  particules par secondes (en considérant des ions monochargés) soit encore un courant d'environ  $5 \cdot 10^{-12}$  mol/s, ce qui est suffisant au regard des intensités des pics les plus abondants qui émergent de la source.

### III.2.2.2 Détermination de l'efficacité de transport

L'efficacité de transport traduit le pourcentage de pertes en ions dans la ligne qui s'étend de l'électrode plasma au point de mesure. Il est impératif de la connaître pour pouvoir déterminer l'efficacité d'ionisation. Elle peut être déduite du rapport entre la somme des courants ioniques mesurés (à partir d'un spectre) et le courant  $I_{HT}$  fourni à la source par l'alimentation H.T. Ce courant est égal au courant total  $I_{HTtot}$  débité par l'alimentation auquel on retranche les courants  $I_f$  de fuite (le courant dans la résistance de charge de l'alimentation H.T. et le courant dans le circuit d'eau de refroidissement par exemple).

$$I_{HT} = I_{HTtot} - I_f$$

$$\xi_{tr} = \frac{\sum I_q}{I_{HT}} \quad (\text{III.1})$$

$I_f$  peut être mesuré en appliquant la haute tension sur la source lorsque le plasma de celle-ci est éteint (générateur HF éteint). Une fois le plasma allumé, la différence de débit de l'alimentation H.T. est due au courant d'ions.

Cependant, lorsque le plasma de la source est allumé, une partie du faisceau d'ions qui émerge de la source peut aussi frapper le métal de l'électrode d'extraction, induire une émission d'électrons et donc un courant électronique entre l'électrode d'extraction et l'électrode plasma. Ce courant électronique fausse le calcul du courant d'ions et constitue une source d'erreur dans le calcul de l'efficacité de transport. Si le courant électronique est important, il conduit à majorer le courant  $I_{HT}$ , à minorer l'efficacité de transport et à majorer l'efficacité d'ionisation, parfois jusqu'à des valeurs supérieures à 100% (cf. §.III.3.1).

### III.2.2.3 Principe de détermination de l'efficacité d'ionisation

L'efficacité totale d'ionisation (i.e. ionisation et transport) d'une espèce d'atomes donnée est le rapport du nombre  $n_{ion}$  d'ions de l'espèce considérée qui émergent de la source, par le nombre d'atomes  $n_a$  de la même espèce injectés dans la source (Eq. III.2). ( $n_{ion}$  et  $n_a$  sont des nombres par unité de temps).

$$\xi_{ion-tr} = \frac{n_{ion}}{n_a} \quad (\text{III.2})$$

$n_a$  est fixé par l'utilisation d'une fuite préalablement calibrée dont l'amont est alimenté par une pression de gaz connue, et dont l'aval communique avec la chambre de la source.  $n_{ion}$  est déduit du courant d'ions mesuré sur la coupelle de Faraday :

$$n_{ion} = \sum_q \frac{I^{q+}}{q} \quad (\text{III.3})$$

La somme est effectuée sur tous les états de charges de l'espèce considérée. Le courant d'ions mesuré sur la coupelle de Faraday est affecté par l'efficacité de transport  $\xi_{tr}$  des ions entre la sortie de la source et la coupelle de Faraday. Pour connaître l'efficacité d'ionisation, on doit donc corriger le rapport (III.2) par un facteur  $1/\xi_{tr}$  :

$$\xi_{ion} = \frac{1}{\xi_{tr}} \frac{\sum_q \frac{I^{q+}}{q}}{n_a} \quad (\text{III.4})$$

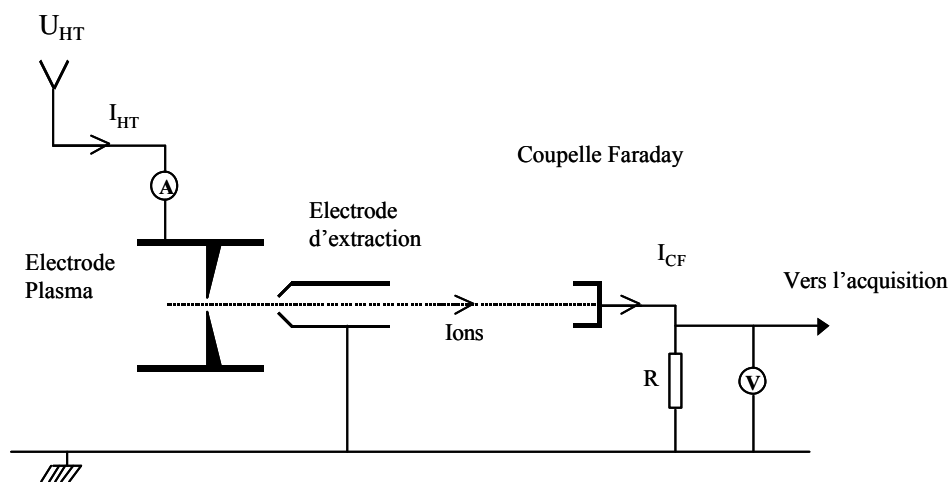


Figure III.5bis Schéma électrique situant les grandeurs mises en jeu dans la mesure des efficacités

### III .3 EFICACITES D' IONISATION DE MONO1000

Le but de cette série de mesures était de mesurer les efficacités d'ionisation de la source pour les gaz rares argon, néon et Hélium, afin de connaître précisément les performances de cette source et de pouvoir également les comparer aux résultats d'autres sources de type MONO1000.

### III.3.1 OPTIMISATION DE L'EFFICACITE DE TRANSPORT

Les premières mesures de test de la source ont été réalisées avec de l'argon dans la fuite calibrée et différents gaz support tels que l'hélium, le diazote et le dioxygène. Ces essais ont été réalisés dans différentes conditions : à différentes puissances HF, à différents débits de la source et pour plusieurs positions de l'électrode d'extraction; ils avaient pour objectifs de trouver les meilleures conditions de transport, préalable nécessaire à toute mesure d'efficacité d'ionisation. La figure III.6 résume ces différentes mesures et présente également des résultats antérieurs réalisés avec la source MONO1001. On cherche bien évidemment la meilleure efficacité d'ionisation pour le meilleur transport. La figure III.6 illustre tout l'intérêt voire la nécessité qu'il y a d'optimiser le transport. On remarque en effet que la dispersion des points du graphique augmente très rapidement lorsque le transport se dégrade, jusqu'à atteindre des valeurs aberrantes d'efficacité d'ionisation supérieure à 100%. De fait, meilleur est le transport et plus grande est la confiance que l'on peut avoir dans la mesure de l'efficacité d'ionisation.

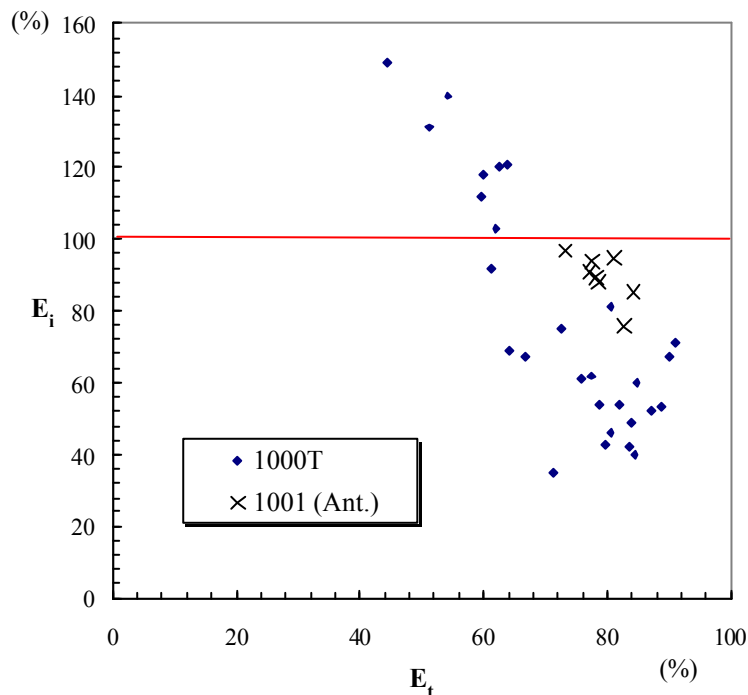


Figure III-6 Efficacités d'ionisation de l'argon en fonction de l'efficacité du transport pour la source «TARGISOL» et comparaison avec quelques résultats antérieurs (MONO1001). Ces efficacités d'ionisation et de transport ont été mesurées pour différents gaz supports tels que l'hélium, le diazote et le dioxygène. Ces mesures ont été réalisées dans différentes conditions de puissances HF de courants  $I_{HT}$  et pour plusieurs distances entre l'électrode d'extraction et l'électrode plasma.

Les deux principaux paramètres qui permettent de limiter cette erreur sur l'efficacité de transport sont la différence de potentiel appliquée entre l'électrode plasma et l'électrode d'extraction et la distance entre ces deux électrodes. En jouant sur ces paramètres, il est possible de minimiser la divergence du faisceau en limitant l'effet des composantes de vitesses radiales des ions par rapport à leur composante de vitesse selon la direction du faisceau. L'efficacité du transport doit donc augmenter lorsqu'on augmente la différence de potentiel entre les électrodes, jusqu'à atteindre un maximum qui correspond au passage de la totalité des ions au travers du trou de l'électrode d'extraction. C'est ce que montre la figure III.7 : on obtient à partir de 13 kV un plateau en courant débité par la source  $I_{HT}$  et en courant mesuré sur la coupelle de faraday  $I_{cf}$ , au delà de cette valeur les courants n'évoluent plus. On en déduit donc que l'ensemble du faisceau passe au travers du trou de l'électrode d'extraction. Pour maximiser l'efficacité de transport, la tension appliquée à la source a été fixée à 14 kV.

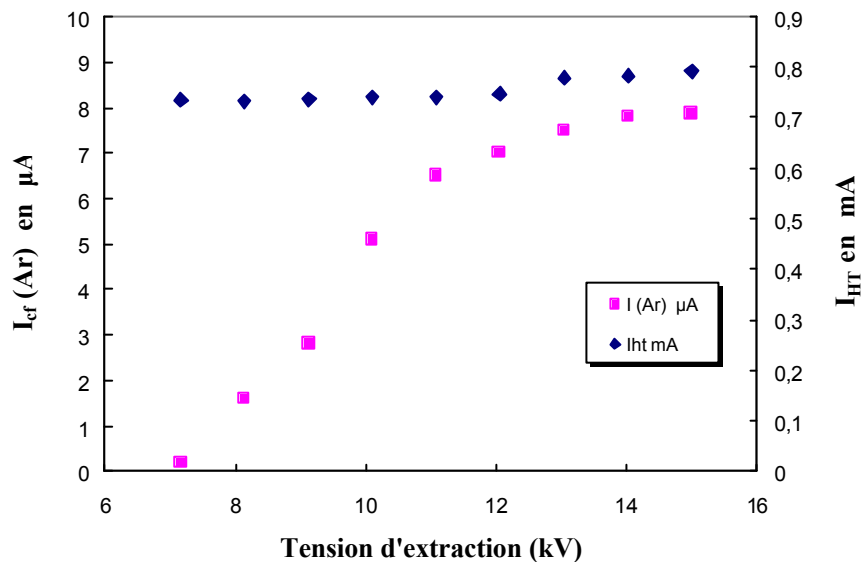


Figure III. 7 Evolution du courant total débité par la source et du courant mesuré sur la coupelle de faraday en fonction de la tension d'extraction

L'efficacité de transport n'est pas pour autant égale à 100% car d'autres pertes de faisceau peuvent intervenir.

Pour observer son influence sur l'efficacité de transport, la distance entre électrodes a fait l'objet de plusieurs modifications qui sont présentées sur la figure III.8, la tension d'extraction étant fixée à 14 kV.

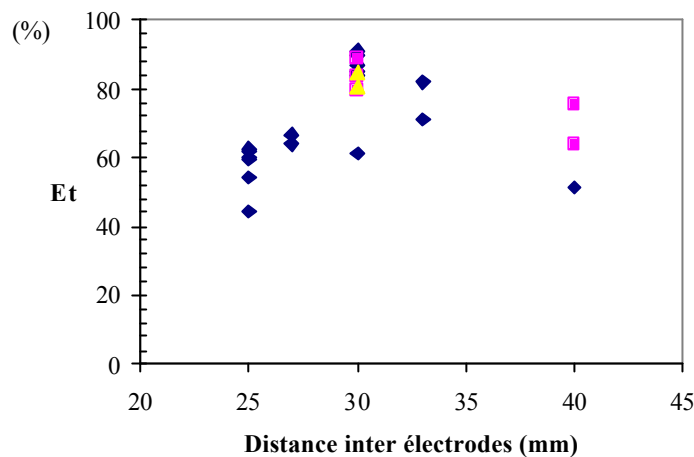


Figure III-8 Influence de la distance inter électrodes sur l'efficacité de transport (mesures réalisées à 14 kV avec différents gaz support).

A l'issu de ces essais, la distance de 30 mm à été adoptée et conservée pour tous les tests. On obtient alors un transport de l'ordre de 80% (83% en moyenne).

Il est important de remarquer que l'efficacité de transport ainsi évaluée est une efficacité moyennée sur l'ensemble des ions présents dans le spectre. Elle est principalement représentative du transport de l'espèce majoritaire.

### III.3.2 RESULTATS DES MESURES D' EFFICACITES D'IONISATION

Les résultats présentés figure III.6 mettent en évidence que quel que soit le régime de fonctionnement de la source, pour des efficacités de transport de l'ordre de 80%, les efficacités d'ionisation sont globalement inférieures d'environ 30% à celles des versions antérieures de MONO1000.

Une fois le transport optimisé, plusieurs tests ont été réalisés pour tenter d'améliorer l'efficacité d'ionisation de la source. Deux hypothèses se présentaient afin d'expliquer les écarts entre MONO1000T (TARGISOL) et les sources antérieures MONO1001 : Mauvais confinement des particules chargées ou un mauvais couplage entre l'onde HF injectée et le plasma de la source.

Le confinement des particules dépend de la structure magnétique de la source. Les structures magnétiques des deux sources étant identiques, la première hypothèse à été assez rapidement écartée.

Afin de tester la seconde hypothèse, deux essais ont été effectués :

- Changement de l'antenne HF

- Changement du bloc d'injection HF

Le résultat de ces tests est présenté en figure III.9, série « 1000T ». Aucun de ces tests n'a donné satisfaction, les efficacités d'ionisation restant sensiblement dans la même fourchette de valeurs inférieures aux valeurs obtenues avec les sources antérieures (série « 1001(Ant.) »).

La source a donc été démontée et rétablie dans sa forme initiale, en supprimant la chambre raccourcie et en retournant à une configuration du même type que les sources « 1001 ». Les essais réalisés par la suite ont montré une nette amélioration des résultats (figure III.8, série « 1001T ») qui correspondent aux résultats obtenus avec les sources antérieures.

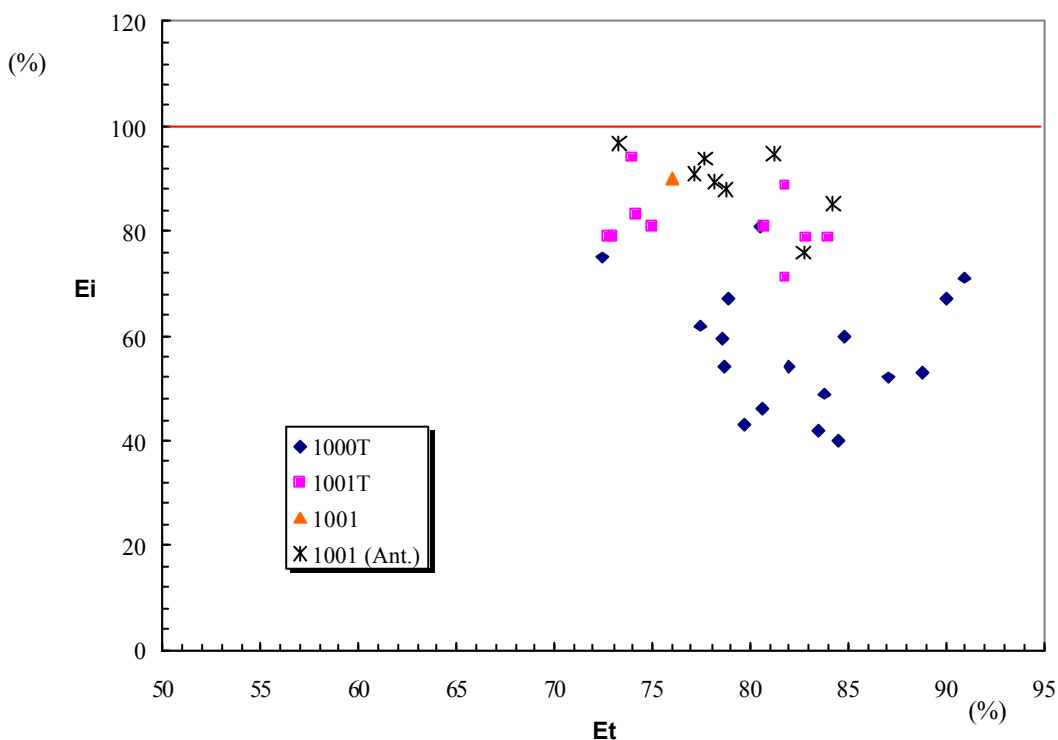


Figure III.9 Résultats des différents tests d'efficacité d'ionisation de l'argon et comparaison avec les résultats antérieurs. La série « 1001 » correspond à une source MONO1001 testée sur le banc dans les mêmes conditions d'extraction que la source TARGISOL.

Il semble donc que le fait d'avoir raccourci la chambre latérale ait agi de façon défavorable sur le couplage entre l'onde HF et le plasma. Ce couplage est très difficile à évaluer et à modéliser en grande partie en raison de la difficulté que l'on rencontre à estimer une impédance équivalente pour le plasma.

La source MONO1000 TARGISOL a donc été rétablie dans ses dimensions initiales correspondant aux sources précédentes de type MONO1001. Par la suite, toutes les mesures ont été réalisées dans cette configuration.

### III.3.2.1 Résultats en argon, néon et hélium

La figure III.10 présente les résultats de mesures des efficacités d'ionisation de l'argon, du néon et de l'hélium. Dans cet ordre, les efficacités vont de manière décroissante, ce qui est cohérent avec le fait que les énergies de première ionisation sont, toujours dans cet ordre, croissantes<sup>1</sup>.

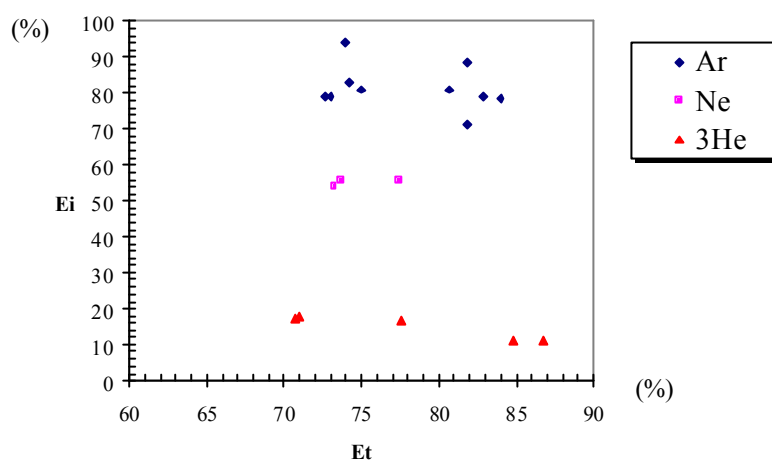


Figure III.10 Comparaison des efficacités d'ionisation de l'argon, du néon et de l'hélium en fonction des efficacités de transport.

Le tableau III.1 rassemble ces résultats.

gaz principal	gaz support	Efficacités moyennes d'ionisation
Ar	He4	80
Ar	N2	88
Ar	O2	84
Ne	N2	54
Ne	He4	56
He3	He4	15
He4	He3	31

Tableau III-1 Efficacités moyennes d'ionisation

<sup>1</sup> 15,75 eV pour l'argon, 21,56 eV pour le néon et 24,58 eV pour l'hélium.



### III.3.2.2 Rôle du gaz support

Les figures III.11 montrent que si la nature du gaz support utilisé pour l'ionisation de l'argon semble jouer un rôle mineur, il semble en revanche être plus marqué dans le cas de l'hélium. Dans ce cas en effet, l'efficacité d'ionisation varie d'un facteur 2 entre l'<sup>4</sup>He et l'<sup>3</sup>He (cf. figure III.11b)<sup>2</sup>. Les figures suivantes III.12, 13, 14 donnent un exemple de spectre pour chacun des gaz étudiés.

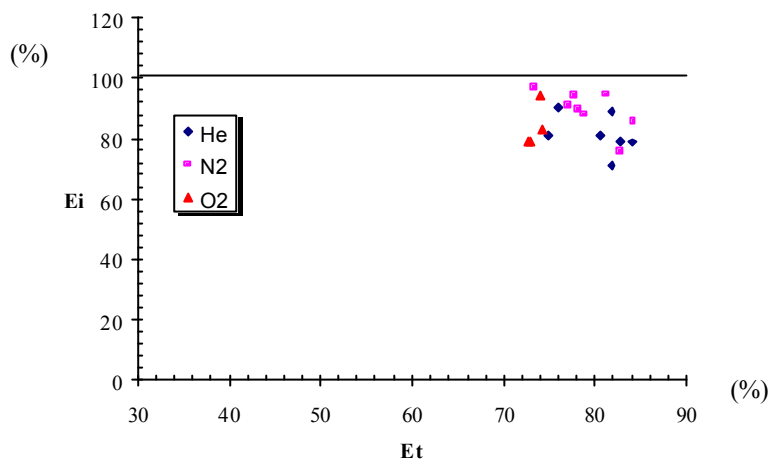


Figure III.11 a : Influence du gaz support sur l'ionisation de l'argon

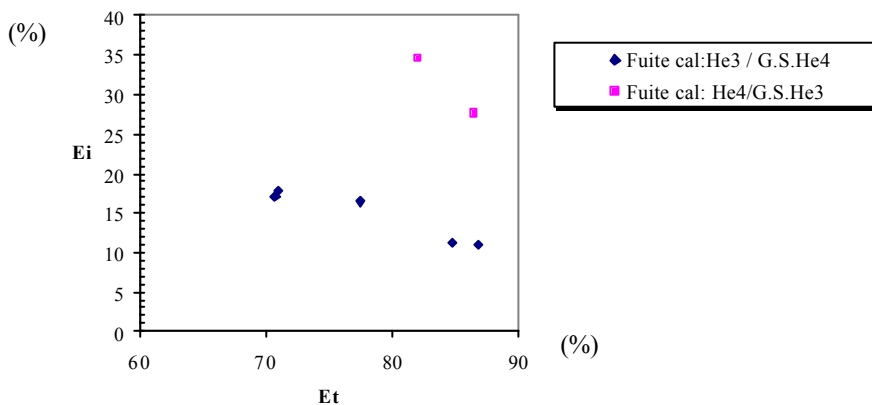


Figure III.11 b : Ionisation de l'hélium.

<sup>2</sup> Ces résultats sont toutefois à considérer avec précautions car la mesure sur l'<sup>4</sup>He peut être sujette à polluants tels que H<sub>2</sub><sup>+</sup>.

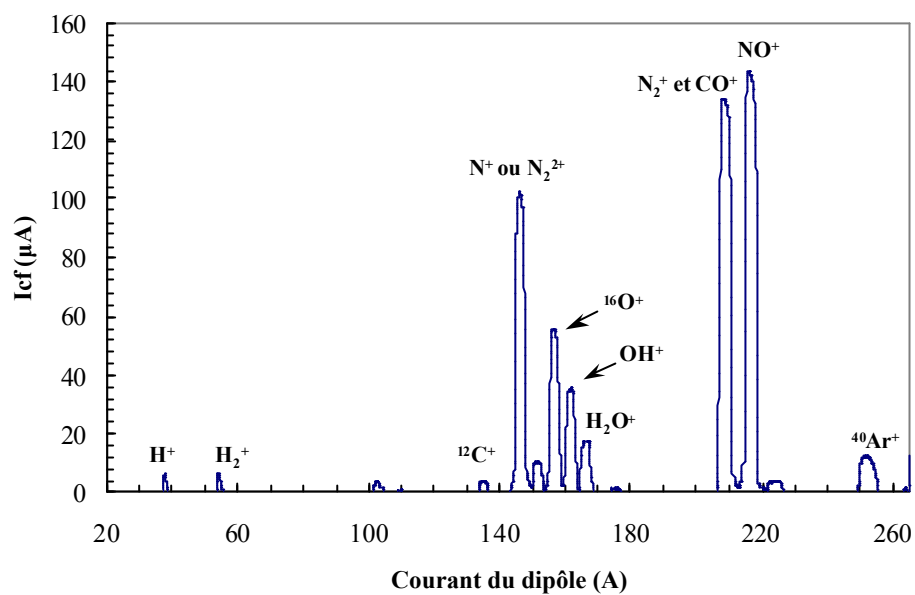


Figure III.12 Spectre réalisé à 14 kV et 40 W de puissance HF. La fuite calibrée est alimentée avec de l'argon. Le diazote est le gaz support

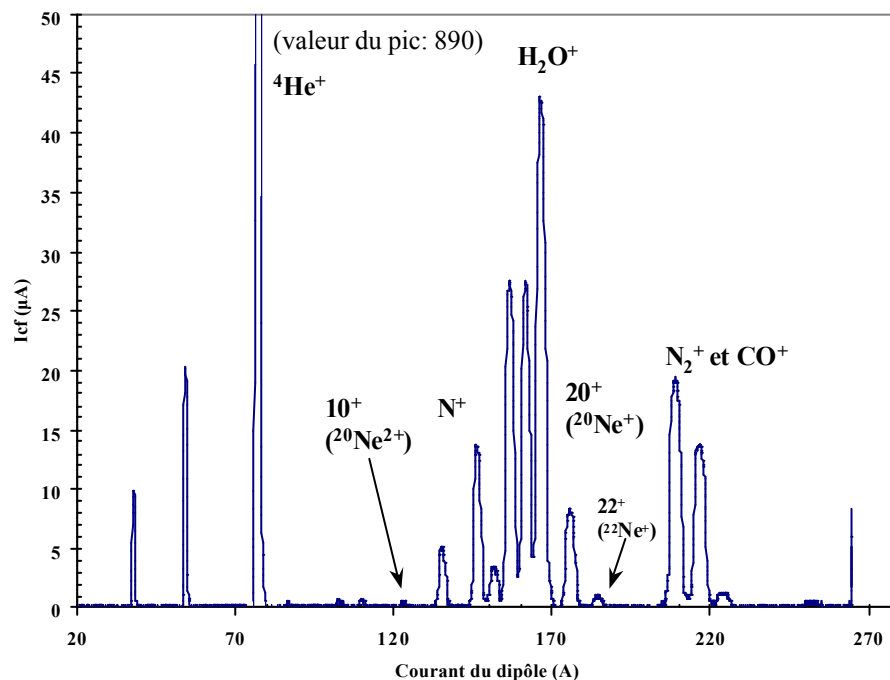


Figure III.13 Spectre réalisé dans les mêmes conditions que figure III.12. Gaz support : Hélium 4; fuite calibrée : Néon.

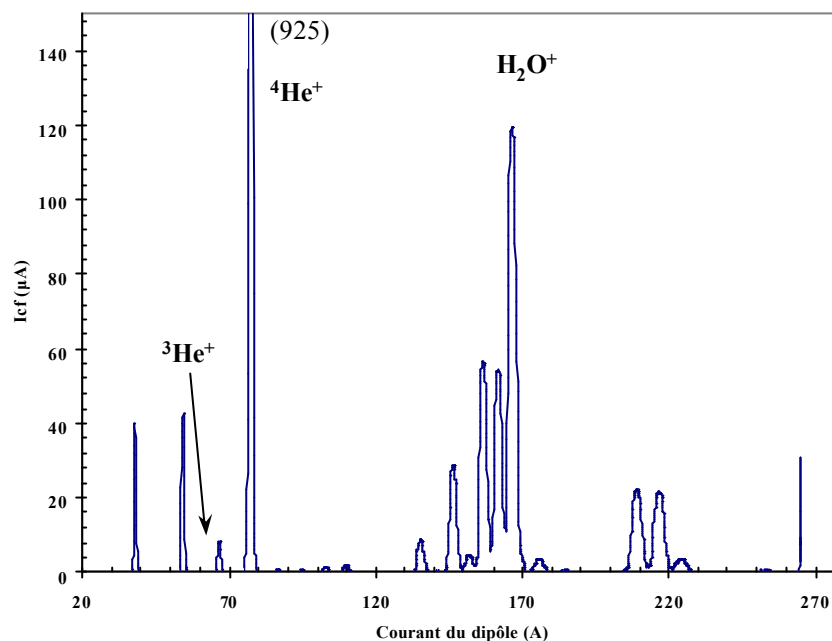


Figure III.14 Fuite calibrée :  ${}^3\text{He}$ . Gaz support :  ${}^4\text{He}$ .  $P_{HF} = 100 \text{ W}$ .

### III.4 EFFICACITES DE LA SOURCE EN PRESENCE DU FOUR

Le but de cette série de mesure est d'observer l'influence du four sur le fonctionnement de la source. La quantité de gaz désorbé des parois de l'enceinte ainsi que l'évaporation du four en carbone augmente avec la température. Les particules qui en découlent viennent alimenter le plasma de la source. Il est donc important de mesurer l'incidence des conditions de fonctionnement de la source sur ses performances.

La source a été testée une nouvelle fois en argon, néon et hélium pour différentes températures mesurées à l'aide du thermocouple (cf. Chapitre IV).

Les figures III-15a et b montrent l'évolution des efficacités d'ionisation en fonction de la température. On constate que les efficacités d'ionisation restent stables et proches de leur valeur en l'absence du four jusqu'aux alentours de 1800 K, après quoi elles subissent une chute importante.

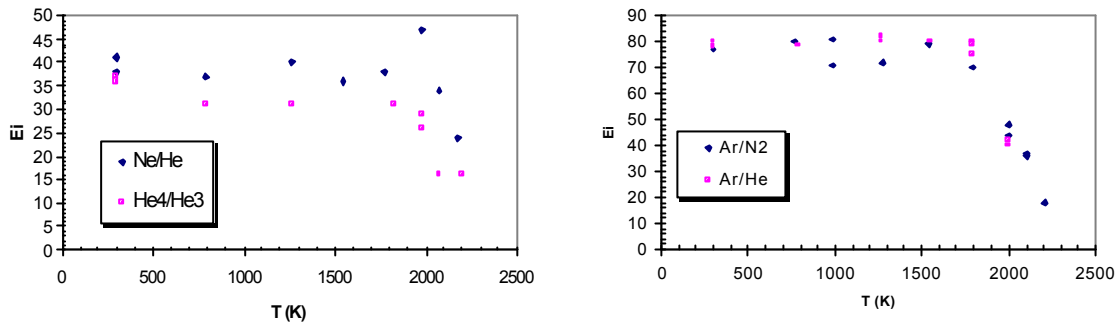


Figure III.15 a et b : Evolution de l'efficacité d'ionisation en fonction de la température mesurée par le thermocouple au cœur de la cible. Les légendes indiquent dans l'ordre le gaz étudié et le gaz support.

La figure III-16 présente quatre spectres réalisés à différentes températures. La fuite calibrée injecte de l'argon dans la source et l'hélium sert de gaz support. Lorsque la température augmente, l'amplitude du pic de carbone augmente également, signe de l'augmentation du taux d'évaporation du carbone du four. Mais il est également intéressant de constater que l'augmentation la plus flagrante est davantage liée à l'oxygène et aux oxydes de carbone. On peut penser que la présence d'oxygène stimule la présence de carbone dans l'enceinte, celui-ci étant transporté sous forme moléculaire ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ) de la cible à la source. La présence de ces espèces en quantités importantes dans la source à haute température impose de diminuer le flux du gaz support pour retrouver un point de fonctionnement stable. On observe sur la figure III.16, qu'à 2186 K le régime de fonctionnement de la source est entièrement régi par la présence du carbone et surtout des oxydes, rendant impossible tout réglage.

Cependant, si la présence de carbone est inévitable, celle de l'oxygène est due au dégazage des parois et peut donc être diminuée. Sans oxygène, la présence de carbone dans la source peut donc être fortement diminuée.

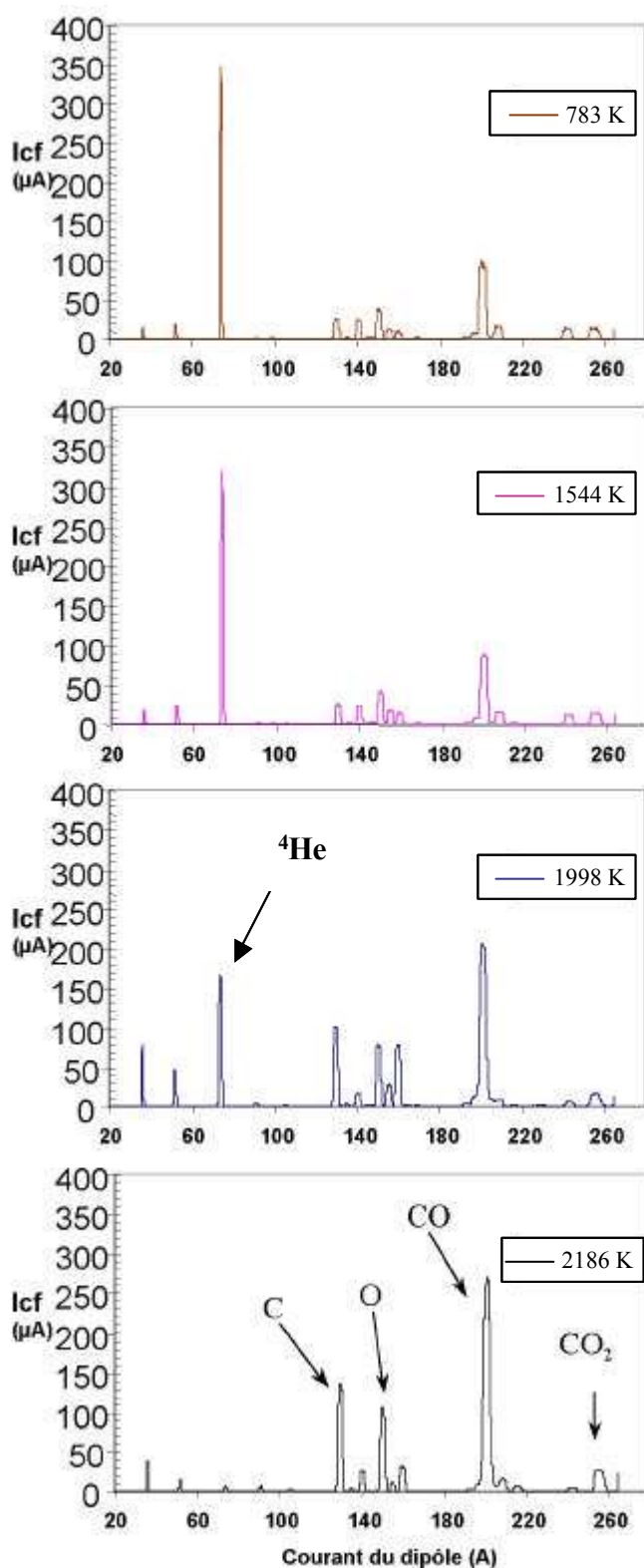


Figure III.16 Rôle du carbone et de l'oxygène dans le fonctionnement de la source en présence du four chaud. (gaz support :  ${}^4\text{He}$  ; gaz d'étude :  ${}^{40}\text{Ar}$ )

Afin de tester cette hypothèse, nous avons donc fait fonctionner la source dans les mêmes conditions à la température de 1998 K pendant une journée entière et enregistré un spectre par heure. Les résultats sont présentés sur la figure III.17

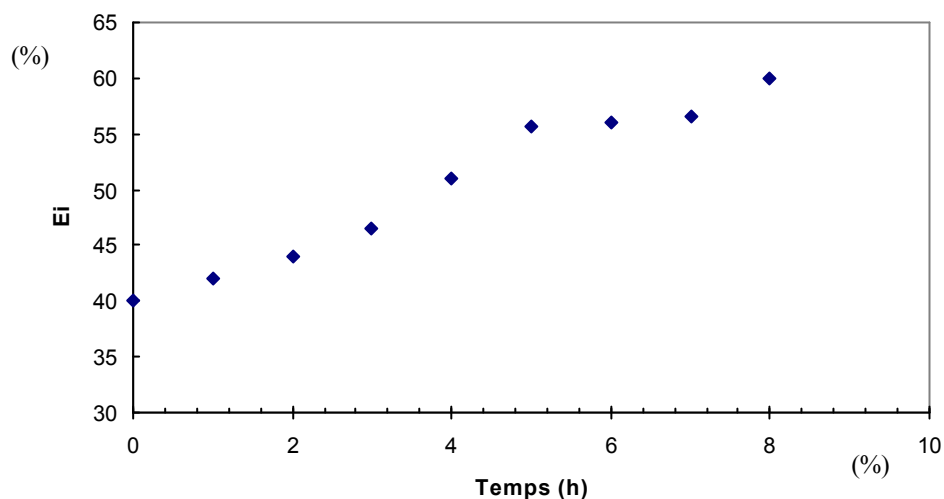


Figure III.17 Evolution de l'efficacité d'ionisation de l'Argon en fonction de la durée de fonctionnement de la source à 1998 K.

Dans le cas présent, l'efficacité de l'argon augmente et passe de 40% au début de l'expérience à 60% après 8 heures de fonctionnement, sans que cette évolution ne montre d'inflexion.

On en conclut donc que dans le cas de l'ionisation de l'argon, l'apparition de carbone dans la source due à l'élévation de température du four est transitoire, et qu'il doit être possible, après dégazage, de retrouver une efficacité d'ionisation proche de celle obtenue pour une température basse du four.

## III.5 MESURE DES TEMPS D'IONISATION

Le but de ces mesures est d'obtenir les temps caractéristiques de transformation atome-ion dans une source de type MONO1000 pour des gaz rares. Elles contribuent par ailleurs au développement de modèles de comportement dynamique des sources RCE [Jar-02], [Jar-03].

Ces mesures seront à comparer ultérieurement (i.e. sous faisceau) aux durées totales de sortie des atomes radioactifs afin d'en extraire des temps caractéristiques de diffusion.

### III.5.1 PRINCIPE DE LA MESURE

La source RCE MONO1000 est installée sur le banc de test 2 du Hall D dans les mêmes conditions que lors des mesures d'efficacité d'ionisation. En plus de la vanne qui alimente la source en gaz support et de la fuite calibrée qui permet le calcul des efficacités d'ionisation du gaz injecté, une vanne rapide, pulsée, alimentée par un générateur d'impulsions permet d'injecter en faible quantité un troisième gaz pendant la durée de l'impulsion fixée à 1,3 ms. (cette durée correspond au signal de commande de la vanne dont la constante de temps d'ouverture et fermeture est probablement plus importante (cf. annexe III.2)).

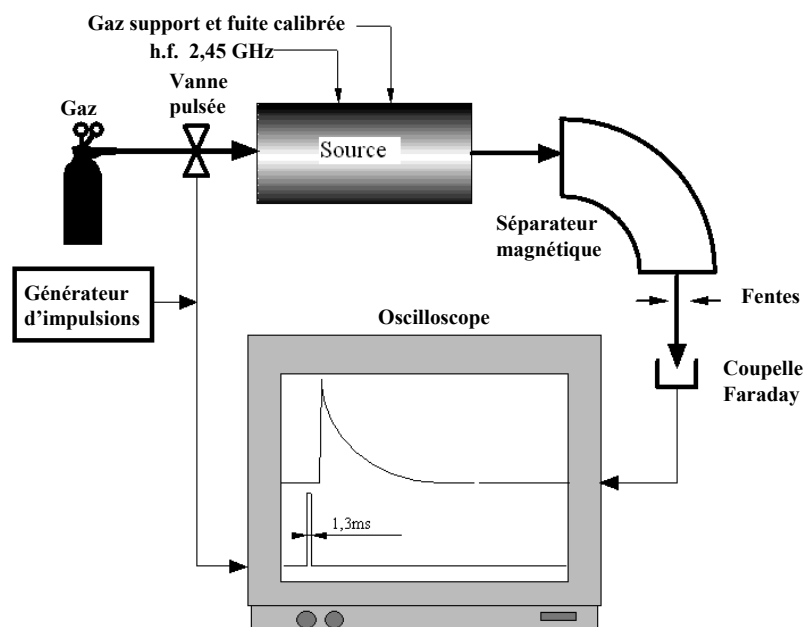


Figure III- 17 : Schéma du dispositif expérimental

Le générateur d'impulsions permet de déclencher un oscilloscope numérique qui enregistre le courant d'ions collecté sur la coupelle de Faraday. L'oscilloscope peut effectuer la moyenne de nombreux enregistrements de pulses successifs (jusqu'à 128), ce qui permet de diminuer considérablement le bruit de fond. L'intervalle entre deux impulsions est ajusté de manière à éviter tout empilement d'enregistrements successifs.

Des travaux récents [Jar-02] ont montré de quelle façon le temps de transformation atome-ion  $T_{ai}$  et l'efficacité d'ionisation de la source étaient liés. Aussi, la simple mesure d'une efficacité d'ionisation permet de connaître le temps de transformation. Pour vérifier la concordance entre temps de transformation et efficacité d'ionisation, une fuite calibrée est connectée à la source. Elle nous permet de plus de vérifier que l'efficacité d'ionisation ne varie pas (ou peu) lors d'un enregistrement

- soit à cause d'une dérive du point de fonctionnement de la source (variation du flux de gaz support par dérive thermique de la vanne d'injection par exemple)
- soit à cause de l'apport brutal de gaz par le pulse qui peut engendrer une modification des caractéristiques du plasma. La quantité de gaz injecté à travers la vanne pulsée est donc limitée et contrôlée .

La figure III-18 présente la réponse de la source à un pulse d' $^{22}\text{Ne}$  alors que du  $^{20}\text{Ne}$  est injecté par la fuite calibrée. L'intensité maximale en  $^{22}\text{Ne}$  ne dépasse pas  $5\ \mu\text{A}$ , ce qui est négligeable comparé au courant total débité par la source qui est de l'ordre de  $1\ \text{mA}$ . On observe également que l'injection de  $^{22}\text{Ne}$  n'a aucune influence sur l'ionisation du  $^{20}\text{Ne}$ .

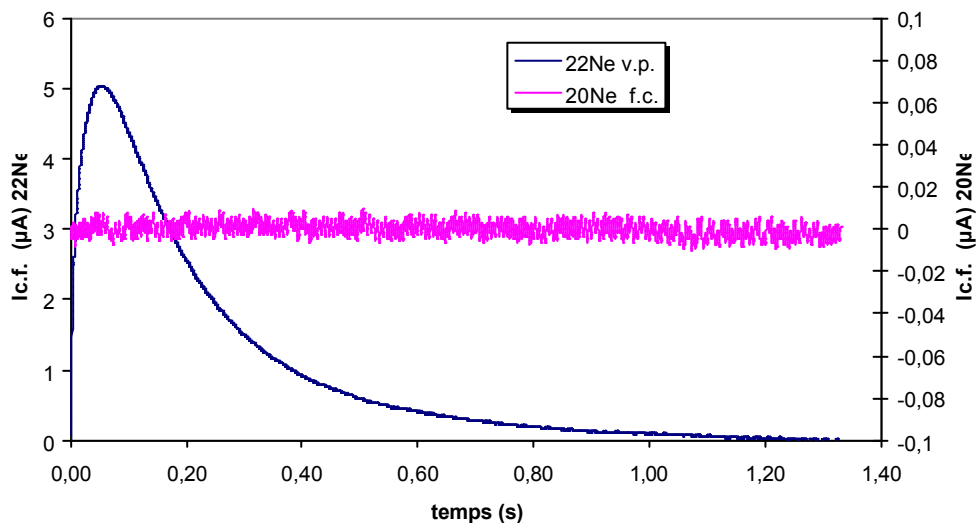


Figure III- 18 : Réponse à un pulse de  $^{22}\text{Ne}$ .



### III.5.2 RESULTATS

Les courbes obtenues par la mesure correspondent à la réponse du système constitué de la vanne rapide et de la source. Afin d'obtenir un temps caractéristique de la source seule, il est nécessaire d'extraire ce résultat de la réponse globale. Cela est aisément réalisable dans la mesure où le temps caractéristique de la source est beaucoup plus grand que celui de la vanne. On peut montrer alors (cf. annexe III.2) que la décroissance de la réponse globale ne concerne que la source. Cette décroissance est exponentielle, ce qui est conforme au comportement décrit dans [Jar-03]. Les paramètres de cette exponentielle sont obtenus par ajustement à la partie décroissante de la réponse. Une illustration de la méthode est donnée par la figure III-19. Les temps d'ionisation sont ensuite déduits de la manière suivante :

Le nombre d'ions détectés par seconde par la coupelle de Faraday est de la forme :

$$y(t) = Ae^{-\lambda t} \quad (\text{III.5})$$

Et le temps  $T_{ai}$  au bout duquel 50% des ions ont été détectés est

$$T_{ai} = \ln 2 / \lambda \quad (\text{III.6})$$

Le tableau III-2 suivant résume l'ensemble des mesures effectués.

Réponse	$\lambda$ (s <sup>-1</sup> )	$T_{ai}$ (s)	Incert. rel.	Gaz Support	Fuite calibrée	V. pulsée	Eff. Ion.(%)
He4	4,829	0,144	0,035	He3	He4	He4	11,6
He3	5,180	0,134	0,005	He3	He4	He3	11,6
He4	5,485	0,126	0,024	He3	He4	He4	16
He4	5,708	0,121	0,042	He3	He4	He4	21
Ne20	5,269	0,132	0,016	He4	Ne22	Ne20	28,8
Ne22	4,913	0,141	0,037	He4	Ne20	Ne22	46
Ar40	6,035	0,115	0,023	He4	Ar	Ar40	70
Ar40	4,998	0,139	0,125	N2	Ar	Ar40	63

Tableau III.2 : La constante  $\lambda$  est obtenue par un « fit » de la décroissance exponentielle. Les temps de réponse à 50%  $T_{ai}$  en découlent d'après l'équation III.6.

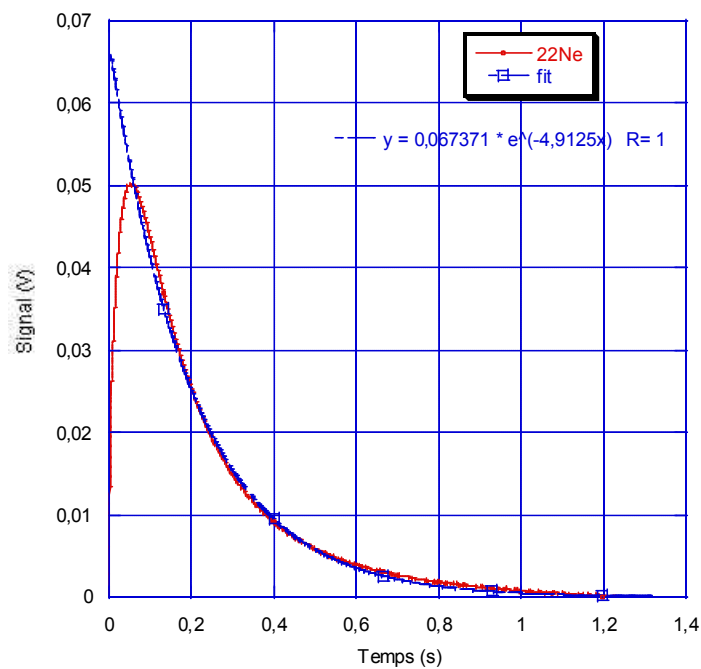


Figure III- 19 : Réponse à un pulse en  $^{22}\text{Ne}$  et « fit » de la partie décroissante.

Les temps moyens au bout desquels 50% des atomes ont été ionisés varient entre 115 et 141 ms. On remarque que l'on retrouve bien le fait que les temps caractéristiques diminuent lorsque l'efficacité d'ionisation s'accroît.

Le tableau III.3 présente des mesures de temps de diffusion à 50% de  $^7\text{Be}$  dans des lamelles de carbone de 1 mm d'épaisseur réalisées par Beyer et al. [Bey-03]. Ces mesures ont été réalisées pour différentes températures du carbone.

<b>T(50%) Diffusion</b>	15 min	60 s	1 s
<b>Température (K)</b>	1953	2113	2453

Tableau III.3 Temps caractéristiques de diffusion à 50% pour différentes températures [Bey-03].

Les constantes de temps de diffusion et d'ionisation sont suffisamment éloignées pour qu'il soit possible d'extraire simplement les temps de diffusion d'une mesure globale de temps (durée qui sépare le bombardement de la cible de la détection des ions formés).

## III.6 BILAN DES TESTS

Les tests réalisés sur la source MONO1000 « TARGISOL » permettent de présenter le bilan suivant :

- Efficacités de la source :

Après un retour à la configuration antérieure des sources MONO1000, les mesures d'efficacité d'ionisation sur l'argon, le néon et l'hélium donnent des résultats conformes aux autres sources du même type. Ces efficacités d'ionisation varient de 84% en moyenne pour l'argon à 15% pour l'hélium.

-Influence du four sur les efficacités :

Le four situé à proximité du plasma de la source tend à diminuer les efficacités d'ionisation pour des températures au delà de 1800 K. Cette tendance semble toutefois pouvoir être grandement atténuée par un dégazage de l'ensemble du dispositif et des cibles en particulier.

-Temps d'ionisation :

Les temps d'ionisation beaucoup plus faibles que l'estimation que l'on peut faire des temps de diffusion ne devraient pas masquer la mesure de ces derniers lors du déroulement de l'expérience sous faisceau.

# CHAPITRE IV

## *Mesure des températures*

### *Caractérisation du four*

Pendant le déroulement de l'expérience sous faisceau radioactif, il sera impossible de mesurer la température de la cible. En effet, on ne dispose pas de fenêtre de visée pour un pyromètre et le fonctionnement du distributeur empêche l'utilisation d'un thermocouple. Dans ces conditions, la température de la cible ne peut faire l'objet d'une régulation. Seules les caractéristiques d'alimentation du four permettent d'évaluer cette température. Il importe donc de déterminer ces caractéristiques avec le plus grand soin.

Pour mener à bien les mesures de température un thermocouple et un pyromètre bicolore ont été utilisés conjointement. Le but de l'utilisation du pyromètre est de pouvoir continuer à mesurer la température sur le banc de test une fois le thermocouple retiré pour céder la place au distributeur. De plus, afin d'affiner les modèles de simulations thermiques, il est également important de collecter le plus grand nombre d'informations sur les propriétés thermiques des cibles et du matériau constituant le four.

Ce chapitre est donc orienté selon deux axes : l'un concerne la validation du four et l'obtention d'une caractéristique (I,T) courant-température cible. Le second est lié à la « faisabilité » des mesures de température par pyromètre.

Après avoir présenté les instruments dont on dispose, on exposera le plan de mesure envisagé pour répondre aux différentes questions précédentes.

La seconde partie de ce chapitre est consacrée à l'exécution du plan de mesure, à la caractérisation du four, à l'analyse des problèmes rencontrés et aux solutions proposées en réponse à ces derniers.

## IV.1 MESURE DES HAUTES TEMPERATURES

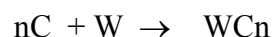
Pour réaliser cette étude dans le Hall D du GANIL, on dispose :

- d'un thermocouple de type « C »
- d'un pyromètre optique bi chromatique
- de différentes cibles chauffées, qui servent de points de mesure simultanée aux deux capteurs

### IV.1.1 THERMOCOUPLES

Les thermocouples utilisés sont de type « C » i.e. à jonction W-Re 5 % - W-Re 25% capables de donner une indication fiable de la température jusqu'à 2500 K. Il s'agit dans la plupart des cas d'un procédé de mesure par contact. La mesure est en effet très localisée puisqu'elle a lieu à l'extrémité du thermocouple ; d'où l'importance de placer le thermocouple le plus près possible de la zone d'intérêt, et par conséquent souvent en contact avec ladite zone. Outre le fait que la présence même du thermocouple contribue à perturber la mesure, les problèmes que posent les mesures avec thermocouples sont les suivants :

- Problèmes de résistance mécanique : après chauffage (autour de 2300 K), les thermocouples deviennent cassants et par conséquent fragiles [Bur-72].
- Problèmes de stabilité dans le temps : sur de longues utilisations, l'évaporation du rhénium modifie les propriétés électriques de la jonction. (Ce point ne semble cependant pas critique en ce qui nous concerne dans la mesure où le thermocouple ne sera pas utilisé suffisamment longtemps pour observer un changement significatif de ses propriétés[Bur-72].
- Environnement chimique hostile : à hautes températures le tungstène de la gaine du thermocouple est carburé selon les réactions



ce qui limite sa durée de vie.

- Enfin, comme il a été mentionné précédemment, les thermocouples sont très sensibles aux rayonnements neutroniques [Mal-LANL] et ne peuvent pas être utilisés au-delà de quelques heures sous faisceau.

Hors irradiation, l'expérience locale a montré que l'espérance de vie d'un thermocouple pouvait varier de quelques dizaines d'heures à une centaine d'heures.

#### **Incertitudes sur les mesures avec thermocouples :**

Le constructeur (Thermocoax, [The-04]) garanti pour ces thermocouples une incertitude de +/- 1% dans la mesure de températures sur la gamme 725 – 2400 K

L'afficheur associé présente une erreur d'affichage  $\leq 3$  K sur la même plage de température.

### IV.1.2 PYROMETRE

Le pyromètre apparaît comme un outils intéressant qui permet d'effectuer des mesures à distance :

- il ne perturbe pas le système
- il n'est pas abîmé ou altéré par l'environnement.

Cependant, la mise en œuvre des mesures par pyromètre est assez délicate :

- les conditions de visée sont importantes (flux lumineux reçu par le détecteur, sensibilité de la mesure à l'inhomogénéité en température de la surface de la cible visée par le pyromètre)

- Le point le plus délicat concerne l'émissivité en fonction de la longueur d'onde, pour le matériau émetteur considéré et à la température considérée. Une mesure correcte et précise doit en effet tenir compte de cette donnée qui est généralement mal connue [Cor-94].

- La visée est souvent faite au travers d'éléments d'optique dont la transmission varie en fonction de la longueur d'onde, et dont la surface peut changer au cours du temps à la suite de dépôts (par évaporation de la surface émettrice par exemple).

#### Schéma de principe du pyromètre bi-chromatique :

Le pyromètre utilisé est un modèle bi-chromatique associé à une fibre optique et commercialisé par Land Infrared [Lan-04]. Les deux bandes spectrales de travail sont centrées respectivement sur  $0,85 \mu\text{m}$  et  $1,1 \mu\text{m}$  (cellule Silicium). Le schéma de principe de l'appareil est illustré par la figure IV.1.

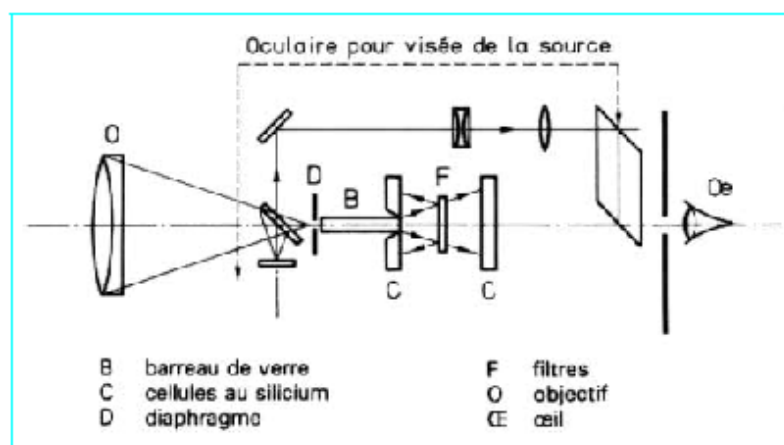


Figure IV.1: schéma de principe du fonctionnement d'un pyromètre bicolore [Cab-90].

Le flux lumineux incident est séparé en deux faisceaux qui traversent respectivement un filtre centré sur 0,85  $\mu\text{m}$  et 1,1  $\mu\text{m}$ . Chaque faisceau filtré est détecté par une cellule Silicium. Après filtrage, le signal électrique issu de chaque bande spectrale peut s'écrire sous la forme suivante [Her-95] :

$$Y(\lambda, T) = k\phi(\lambda, T)\tau(\lambda)S(\lambda)(1 - P(\lambda)) \quad (\text{IV.1})$$

où :

- k est un facteur de proportionnalité
- $\phi(\lambda, T)$  est le flux spectral incident
- $\tau(\lambda)$  représente la transmission optique du système (hublot, système optique, filtres)
- $S(\lambda)$  est la sensibilité spectrale du récepteur
- $P(\lambda)$  représente les pertes dans la fibre optique.

Le signal électrique de sortie du pyromètre est le rapport des signaux issus des détecteurs, soit :

$$R_{\lambda_1, \lambda_2}(T) = \frac{Y(\lambda_1, T)}{Y(\lambda_2, T)} \quad (\text{IV.2})$$

Une description plus détaillée du principe de fonctionnement d'un pyromètre bichromatique se trouve en annexe IV.1.

L'avantage principal de mesurer l'intensité lumineuse émise à deux longueurs d'onde est de s'affranchir des variations d'intensité de la source, dues par exemple à un dépôt sur la fenêtre d'observation, et des conditions géométriques de visée.

La fibre optique (en silice) a une longueur de 7 m. L'ouverture numérique (voir définition en annexe IV.2) est corrigée par une lentille convergente de distance focale 50 cm. Le champ nominal (voir définition en annexe IV.2) est de 1/75, ce qui assure une mesure sur un disque de 6,7 mm de diamètre dans le plan focal du système optique.

### IV.1.3 AVANTAGE DE L'UTILISATION SIMULTANEE DU PYROMETRE ET DU THERMOCOUPLE

L'introduction du thermocouple pour effectuer la mesure de la température de la cible peut conduire à modifier la température de la cible à cause du pont thermique que constitue la gaine du thermocouple. Pour évaluer cette influence, on comparera les indications de températures fournies par le pyromètre en fonction de la puissance de chauffage du four, avec le thermocouple introduit dans la cible et sans thermocouple.

Une fois la relation établie entre l'indication en température du pyromètre, la valeur en température du thermocouple et la puissance de chauffage appliquée sur le four, il sera

possible de retirer le thermocouple et d'effectuer la mesure de la température de la cible à l'aide du pyromètre seul. Et par la suite, le pyromètre prendra le relais du thermocouple.

## **IV.2 MONTAGE ET PLAN DE MESURES**

### **IV.2.1 BANC DE TEST ET MONTAGE**

#### **IV.2.1.1 Description**

Afin de se placer dans des conditions les plus proches possible des conditions finales d'expérience, le four a été installé sur la source. La source fait donc partie intégrante du dispositif (voir figure IV.2 page suivante). A l'arrière du four, nous avons respecté au mieux le volume des cavités qui sont présentes lorsque le distributeur est accolé au four. C'est de ce côté qu'est placé le thermocouple, protégé dans un tube de tantale qui sert par la même occasion de support aux cibles tests. Du côté opposé de la source, en regard du four, une enceinte maintient le hublot de visée du pyromètre éloigné de la cible, afin de le protéger de la chaleur. Un volet placé devant le hublot, dans l'enceinte, le protège des dépôts de carbone qui ont lieu à hautes températures et qui altèrent la transmission optique du hublot.

La source (en particulier les aimants) et l'enceinte du four sont refroidis par circulation d'eau sous une pression de 2.5 bars.

L'alimentation du four peut délivrer un courant électrique maximum de 330 A et/ou une tension maximum de 10 V. Dans le cas présent, étant donnée la résistance faible du four (40 mΩ à chaud), la puissance fournie par l'alimentation ne peut excéder 4400 W. Les valeurs de l'intensité du courant et de la tension sont directement renvoyées par liaison série sur un ordinateur et affichées grâce à un programme Labview®.

En bout de source, du côté de l'extraction, une pompe à vide primaire a été installée ainsi qu'une jauge à capacitance « Balzers » (ACR 263) permettant de mesurer des pressions allant  $10^{-3}$  mbar à 10 mbar.

On dispose également d'une unité de contrôle de la jauge « Balzers » appelée Maxijauge. Ce convertisseur analogique/numérique dispose de 6 entrées que l'on peut utiliser pour renvoyer vers l'ordinateur (par le biais d'une liaison RS422) d'autres valeurs que la pression comme la température issue du pyromètre et celle issue du thermocouple.



#### IV.2.1.2 Sécurité

Plusieurs dispositifs de sécurité sont installés autour du banc de test. Chacun de ces dispositifs est relié en série à l'alimentation du four, celle-ci est coupée dès que l'un d'eux est mis en défaut.

- Sécurité électrique :

Pour éviter tout court-circuit d'origine extérieure, les arrivées de courant ont été entourées d'une cage protectrice reliée à un bouton-poussoir. Si la cage est enlevée, le circuit de sécurité est ouvert et l'alimentation est coupée.

Par ailleurs, afin d'éviter toute sur intensité dans le circuit de chauffage, l'alimentation est elle même dotée d'une butée qui limite l'intensité disponible.

- Sécurité sur le circuit de refroidissement :

Le circuit de refroidissement est muni d'un débitmètre. Si le débit est inférieur à 1,5 litres par minute, l'alimentation est coupée.

Sur ce même circuit, un thermostat à bilame (Vigitherm) installé en aval du four permet de couper l'alimentation si la température de l'eau de refroidissement dépasse 60°C

- Sécurité sur le vide :

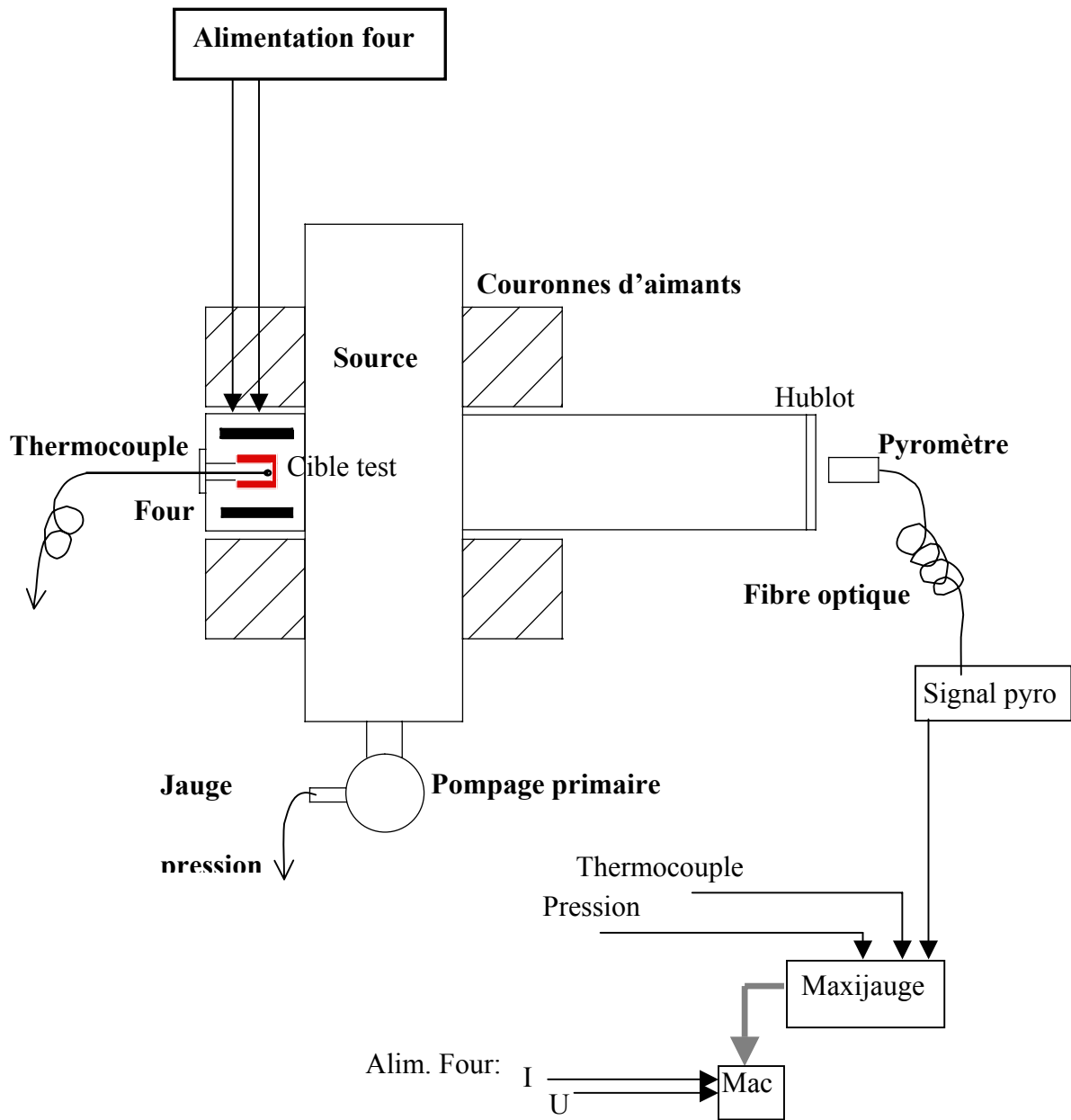
Une fuite dans l'enceinte ou tout autre source de remontée rapide de pression entraîne une érosion de la cible par oxydation avec l'oxygène de l'air et doit donc faire l'objet de surveillance. Un seuil de pression de 0,1 mbar est imposé par l'intermédiaire du « maxi jauge »

#### IV.2.2 PLAN DE MESURES

L'objectif premier de cette série de mesures est de valider la conception de l'ensemble « four » et d'obtenir la caractéristique de la température de la cible en fonction des valeurs de courant et tension de l'alimentation du four.

On peut cependant profiter de la présence d'un thermocouple et d'un pyromètre pour tenter d'obtenir des valeurs d'émissivité du carbone de la cible. En effet les émissivité du carbone en fonction de la température sont assez mal connues. Les simulations thermiques utilisent généralement une émissivité globale (souvent seule information disponible), qui entachent les résultats d'une erreur difficile à évaluer. L'utilisation conjointe d'un thermocouple et d'un pyromètre devrait permettre par comparaison d'obtenir une indication sur l'émissivité de la cible visée.

Figure IV.2 : Banc de test de chauffage des cibles



Afin de vérifier la « faisabilité » de ces mesures, un premier test peut être réalisé avec une cible de tungstène. L'utilisation importante du tungstène par l'industrie a stimulé la publication de nombreuses données sur son émissivité, qui sont donc bien connues [Han-99]. On doit donc pouvoir valider le procédé expérimental en comparant les données mesurées de celles issues de la littérature.

Notre plan de mesure peut donc se présenter sous la forme suivante :

#### 1- Mesures avec une cible en tungstène

On utilise un disque en tungstène. Le thermocouple vient en contact sur le disque dont la surface est suffisante pour permettre une visée par pyromètre. On procède de la manière suivante :

- Vérifier le fonctionnement du pyromètre
- Réaliser une première mesure de la relation. Tension, Intensité du four  $\Leftrightarrow$  Température de la cible
- Observer l'influence des variations d'émissivité sur la mesure et sur la température.

#### 2- Mesures avec une cible en carbone

La cible en carbone aura les mêmes dimensions que les cibles réelles. Il s'agit du carbone PT 2318 de Carbone Lorraine [Car-04]. Dans cette partie, on considère deux objectifs :

- établir la caractéristique Tension et Intensité du four  $\Leftrightarrow$  Température de la cible dans des conditions les plus proches des conditions réelles d'utilisation. Cela peut être réalisé avec le thermocouple.

- On veut que le pyromètre soit capable de prendre le relais du thermocouple. Pour cela on a besoin du rapport des émissivités aux deux longueurs d'onde de travail pour les différentes températures. Cette courbe  $R(T)$  peut s'obtenir en même temps que la caractéristique du four. Une fois cette dernière connue pour le matériau considéré, une mesure de la température de couleur suffit à retrouver la température vraie de la cible.

## IV.3 PREMIERS RESULTATS

Les premières mesures réalisées sur le banc de test de chauffage ont permis de mettre en évidence différents problèmes liés soit à la mesure soit au dispositif lui-même. Après une présentation rapide de ces premiers résultats, on s'intéressera aux problèmes liés à l'alimentation électrique du four et à la mesure des températures avec pyromètre. Le paragraphe suivant (§. IV.4) abordera les problèmes et les corrections apportées à l'ensemble « four ».

### IV.3.1 PREMIERS TESTS DU FOUR

Les figures IV.3 et IV.4 présentent la température de la cible en fonction de la puissance fournie par l'alimentation et l'évolution de la résistance du four avec la température. Ces deux figures rassemblent plusieurs mesures réalisées sur une période de plusieurs semaines et sur les cibles de tungstène et carbone. La température est mesurée avec le thermocouple.

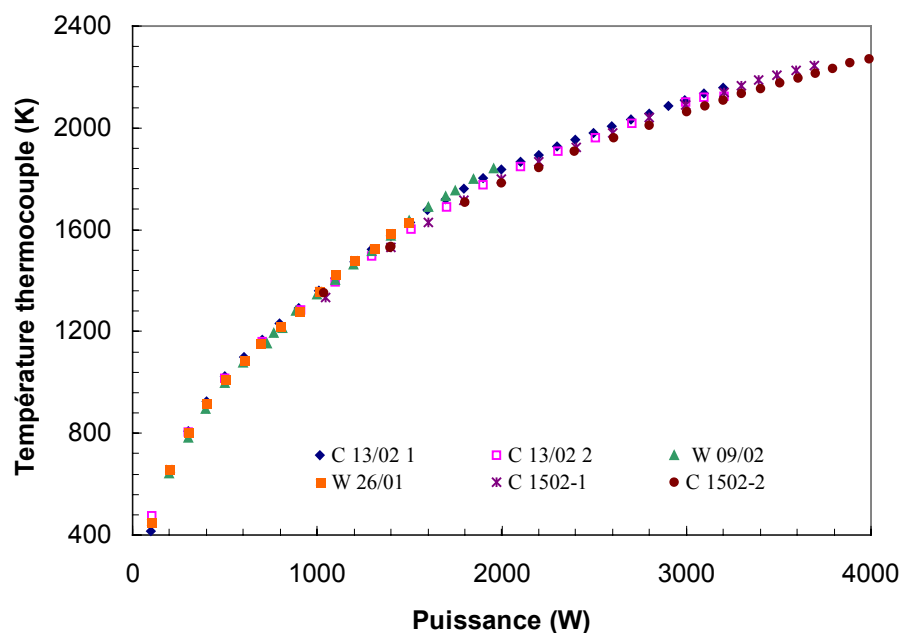


Figure IV.3 : Puissance de l'alimentation et résistance du four en fonction de la température de la cible.

La puissance fournie par l'alimentation pour porter la cible à une température de 2300 K est de 4 kW alors que les prévisions étaient de 2,5 kW. Ces conditions de fonctionnement ,

très éloignées des conditions « nominales » d'utilisation ont menées à la rupture par évaporation du carbone d'un four test (cf. Annexe IV.5). L'analyse détaillée de cette situation et les corrections apportées sont présentées dans le paragraphe IV.4.

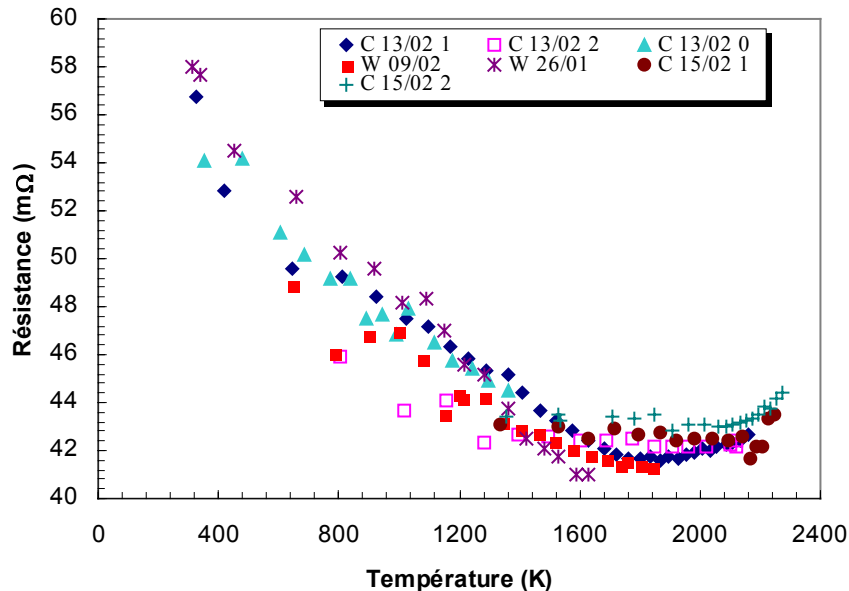


Figure IV.4 : Evolution de la résistance électrique du four en fonction de la température

La résistance du four décroît avec la température, atteint un palier autour de 1770 K avant d'amorcer une légère remontée. Cette évolution que l'on peut attribuer à la résistivité est conforme au comportement de semi conducteur du carbone. Elle présente en revanche des fluctuations notables non seulement d'un essai à l'autre mais aussi au sein d'une même série de mesure.

### IV.3.2 STABILITE DE L'ALIMENTATION DU FOUR

La résistance du four tout comme la puissance consommée sont calculées à partir de la mesure du courant et de la tension appliquée pour lesquelles on cherche à obtenir la plus grande stabilité. Les fluctuations sur ces dernières valeurs ont donc fait l'objet d'un contrôle. La figure IV.5 présente un enregistrement de l'intensité du courant lors d'une montée en température et montre que la mesure est effectivement fortement parasitée.

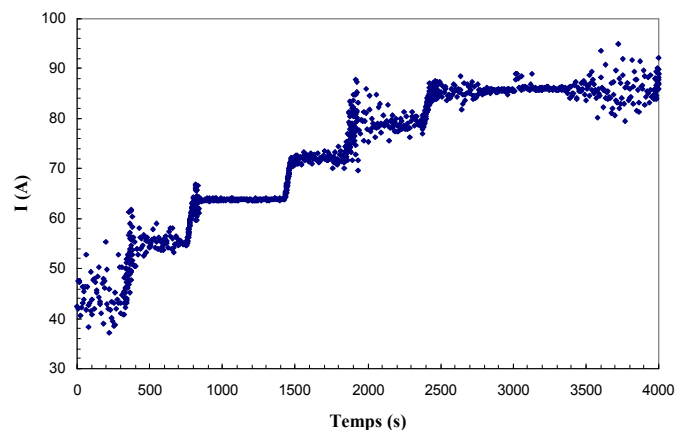


Figure IV.5 : Enregistrement de l'intensité du courant traversant le four lors d'une montée en température. Chaque saut correspond à une nouvelle consigne. Le dernier plateau correspond à une température de 900 K

Il est rapidement apparu que la mesure du couple courant-tension était bruitée par l'interface de commande/contrôle de l'alimentation elle-même.

Les mesures ultérieures ont été réalisées manuellement à l'aide de multimètres préalablement étalonnés par comparaison avec un générateur étalon à 6 chiffres significatifs pour le plus haut calibre. L'interface de l'alimentation n'a été conservée que pour la gestion des sécurités du banc de test.

Les mesures qui ont suivi ont permis de vérifier que le bruit avait été considérablement atténué et qu'il n'était plus détectable par les multimètres dont les incertitudes respectives étaient de 0,001 pour la mesure du courant et de 0,003 pour celle de la tension. L'alimentation est donc stabilisée en puissance à 0,004 au moins, ce qui est proche de ses spécifications qui donnaient une stabilité de 0,002.

La figure IV.6 présente l'évolution de la résistance du four mesurée dans ces conditions, ainsi qu'à titre indicatif, celle de câbles d'alimentation en cuivre.

Par ailleurs il semble préférable dans le cadre TARGISOL de contrôler le four en courant plutôt qu'en puissance. En effet les fours déjà développés au GANIL et utilisés sur SPIRAL sont contrôlés en puissance, ce qui permet de pouvoir contrôler la puissance « ohmique » fournie à la cible (maîtriser l'emballement), et comparer immédiatement cette dernière, à la puissance déposée par le faisceau d'ions. Dans le cas présent, on cherche à imposer une température à la cible de la manière la plus précise possible. Une commande en courant permet donc de s'affranchir du dispositif. Les résultats obtenus sur le banc d'essais sont transposables sur un autre banc, ceci indépendamment des câbles d'alimentation par exemple. L'évolution de la puissance et du courant en fonction de la température sont présentés au paragraphe suivant (§ IV.4).

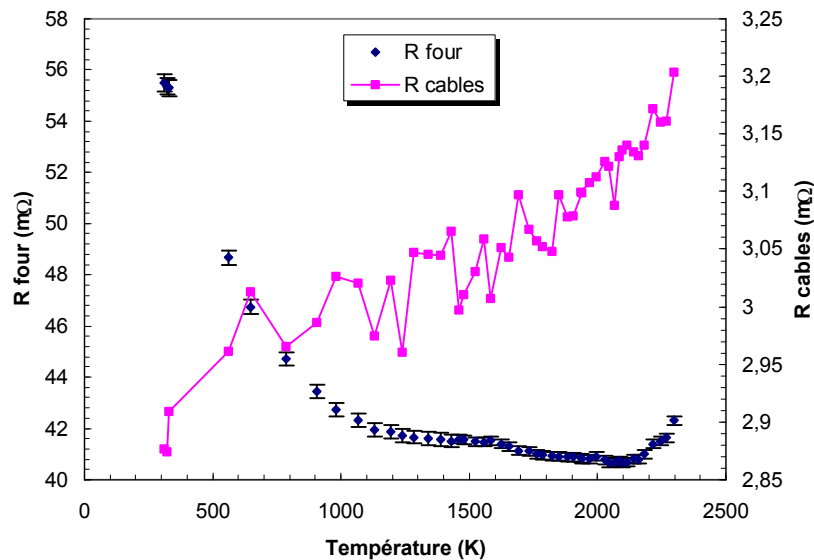


Figure IV.6 : Evolution de la résistance du four en fonction de la température. L'évolution de la résistance des câbles en cuivre est donnée à titre indicatif. La résistance est obtenue par différence entre la mesure de la tension aux bornes de l'alimentation et aux bornes de la source. L'incertitude sur cette mesure est donc plus importante que celle de la résistance du four (1%). En tenant compte de la dilatation du conducteur et du coefficient de température, on obtient une température des câbles de l'ordre de 313 K lorsque la cible est à 2200 K. Cette valeur correspond à la température des câbles mesurée à l'aide d'une caméra infra rouge.

### IV.3.3 MESURES PAR PYROMETRE

La cible de tungstène dont on connaît par la littérature les émissivités spectrales pour toutes les températures (cf. Annexe IV.3). doit permettre de vérifier le comportement du pyromètre par comparaison entre la température donnée par le thermocouple et celle donnée par le pyromètre (Cf. figure IV.2).

Cependant, il est apparu dès les premières mesures que l'on n'obtenait pas les résultats attendus. Pour la même lecture de température du pyromètre et du thermocouple, la comparaison entre les rapports d'émissivité mesurés et trouvés dans la littérature laisse apparaître d'importantes divergences de résultats, comme l'illustre la figure IV.7.

L'annexe IV.4 présente le détail des problèmes rencontrés avec le pyromètre. En tout état de cause, il demeure impossible d'obtenir de cette manière l'information attendue sur l'émissivité du matériau testé sans un nouvel étalonnage préalable du pyromètre. Cet étalonnage n'a pas pu être réalisé par manque de temps car il imposait le renvoi au fabricant pour une longue période ou de trouver un corps noir susceptible de monter à 2300 K.

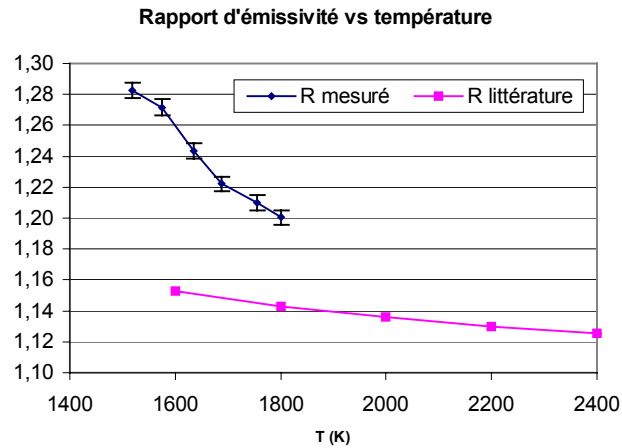


Figure IV.7 :  $R$  mesuré correspond au réglage de  $R$  tel que la température affichée par le pyromètre corresponde à la température donnée par le thermocouple.

Si les résultats précédents nous montrent que l'on peut difficilement utiliser ce pyromètre en l'état pour effectuer des mesures précises de températures ou le cas échéant de rapports d'émissivité, le pyromètre reste néanmoins un instrument essentiel pour les différents tests de validation de l'ensemble du dispositif. En effet une fois le porte cible installé, il n'y a plus de possibilité de contrôler la température par thermocouple. On est alors contraint d'estimer la température par la puissance fournie au four sans pouvoir vérifier si le changement de géométrie a affecté la distribution de température (et par conséquent la puissance), ou si l'usure du four a modifié ses caractéristiques.

La mesure de la température par le pyromètre peut alors s'envisager de la façon suivante : Il est impossible d'obtenir une information sur le rapport d'émissivité que l'on ne peut dissocier du gain total de l'appareil (cf. annexe IV.4). Mais on peut fixer ce gain  $G$  à une valeur arbitraire et enregistrer la relation entre la température donnée par le thermocouple et celle affichée par le pyromètre

La figure IV.8 présente les résultats obtenus sur une cible de carbone. Le gain  $G$ , est réglé par une entrée 4 – 20 mA. Nous avons fixé arbitrairement cette valeur à 18,58 mA (Ce choix n'est pas totalement arbitraire, il correspond à un gain élevé de façon à obtenir une réponse du pyromètre dès 1370 K, et par ailleurs il correspond aussi à une région où les écarts entre la température thermocouple et la température pyromètre sont les plus faibles). Une fois le pyromètre déclenché, on obtient une relation sensiblement linéaire entre la sortie pyromètre en volt et la température thermocouple. La table de conversion correspondante est fournie en annexe V.2.



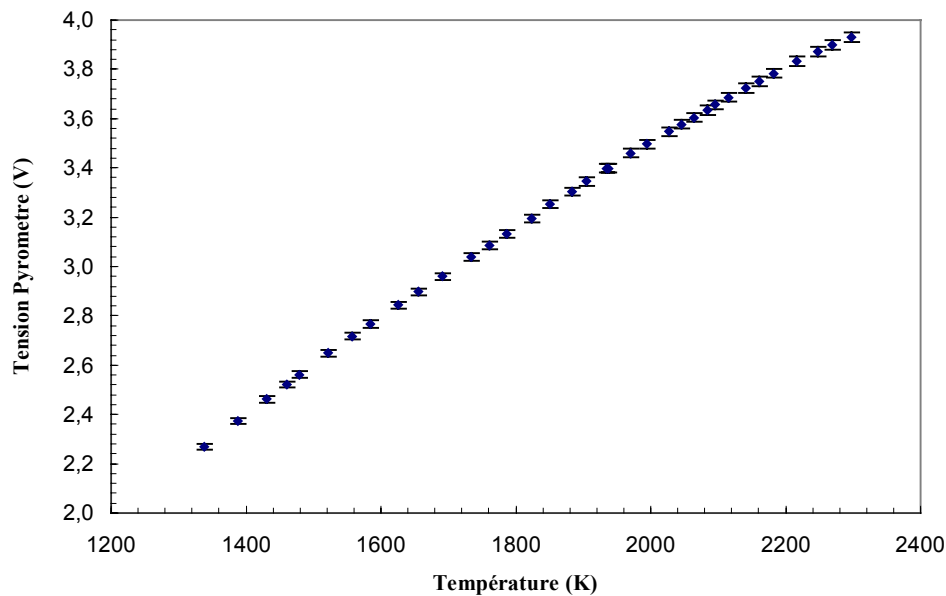


Figure IV.8 : Réponse du pyromètre ( en Volt) pour un gain fixé à 18.58 mA en fonction de la température donnée par le thermocouple. Les barres d'erreur ne correspondent qu'aux incertitudes des multimètres mesurant la tension de sortie du pyromètre et le gain imposé.

Cette relation dépend fortement de l'environnement et doit être réalisée à chaque nouveau montage, de plus elle n'autorise la mesure que pour une cible particulière. Elle a cependant permis par la suite de contrôler la température une fois le thermocouple retiré avec une précision assez encourageante (voir au chapitre V). Enfin, elle permet la mesure de la température de la cible indépendamment de son émissivité.

## IV.4 ACTIONS CORRECTIVES SUR LE FOUR TARGISOL

Les résultats présentés au paragraphe précédent ont montré que la puissance électrique de 4 kW nécessaire pour porter la cible à 2300 K était beaucoup plus importante que la valeur prévue de 2,5 kW. Le courant circulant dans les bretelles du four était donc plus important, ce qui a eu pour conséquence la rupture par surchauffe locale d'un four de test. L'annexe IV.5 fourni le rapport du démontage du bloc « four » après cette rupture.

Il était donc essentiel de tenter de comprendre dans un premier temps les raisons de ce dysfonctionnement afin d'engager par la suite les actions correctives qui s'imposaient.

De nouveaux tests ont ensuite été réalisés afin de valider les modifications apportées au dispositif.

#### IV.4.1 ANALYSE DE LA SITUATION

L'analyse du problème impose de reprendre les simulations thermiques effectuées et de poser sur ces dernières un nouveau regard.

##### IV.4.1.1 Retour sur la simulation SYSTUS

La figure IV.9 rappelle le résultat des simulations thermiques réalisées par le Bureau d'Etude à partir du logiciel Systus :

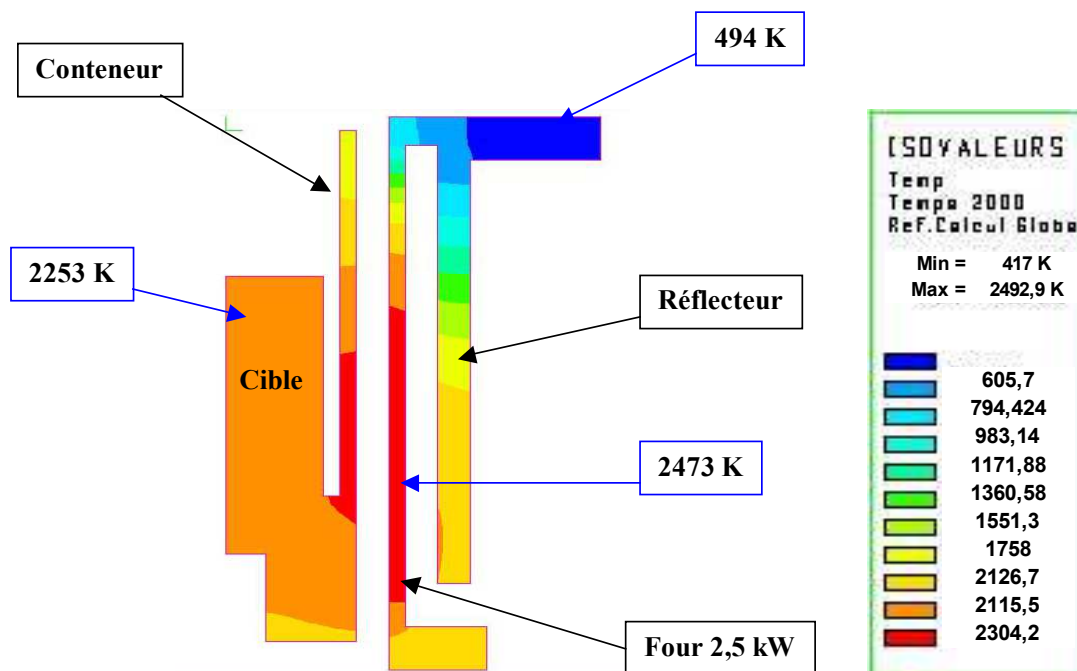


Figure IV.9 Simulation thermique (Systus) de l'ensemble cible four réflecteur

Le profil de températures présenté dans la figure IV.9 suggère les remarques suivantes :

La cible est portée à 2253 K par un four à 2473 K, ce qui correspond à la fois aux températures attendues d'après les résultats obtenus sur d'autres fours carbone, et aux calculs simples réalisés plus bas.

Le profil de température dans le réflecteur montre que celui-ci est beaucoup plus froid que le four, puisque sa température moyenne peut être évaluée à première vue autour de 1300 K. Le réflecteur semble être refroidi de manière importante par conduction. Il présente en effet une surface de contact importante avec la bride aluminium refroidie par circulation d'eau. De plus son épaisseur propre de 2 mm facilite la conduction thermique.

Comme on le verra par la suite, la température du réflecteur permet de justifier les 4 kW utilisés lors des essais. En somme, seule l'estimation de la puissance à fournir au four semble fausse.

#### IV.4.1.2 Estimation des températures moyennes du four et du réflecteur à partir de la mesure de la température de la cible.

Les températures ont été mesurées par un thermocouple placé au cœur de la cible. Par ailleurs, la tension aux bornes du four ainsi que l'intensité du courant le traversant ont également été mesurées afin de connaître la puissance fournie au four. A partir de ces données et d'un modèle extrêmement simplifié de la géométrie du four, on peut estimer les températures du four et du réflecteur.

On simplifie le problème (figure IV.10) en considérant une cible cylindrique entourée par deux cylindres concentriques et de même longueur (35 mm) qui correspond à la longueur effective de chauffage<sup>1</sup>.

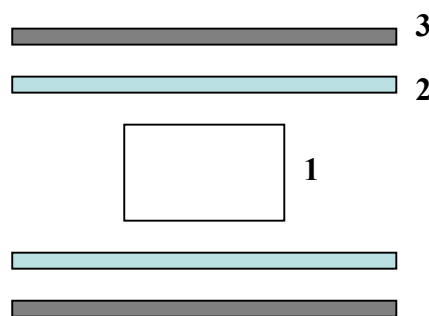


Figure IV.10 schématisation de l'ensemble de chauffage :

1 – cible : longueur 20 mm, diamètre 12 mm

2 – four : longueur 35 mm, diamètres 20-22 mm

3 – réflecteur : longueur 20 mm, diamètre intérieur 26 mm

On peut alors envisager les rayonnements mutuels des surfaces en regard, c'est-à-dire, la cible et le four d'une part, le four et le réflecteur d'autre part.

#### Cible et four :

Le flux surfacique de puissance perdu par la surface 1 en regard de la surface 2 peut s'écrire [Hue-92] :

<sup>1</sup> Dans ce modèle très simple, on ne tient pas compte du conteneur de la cible

$$\varphi_1^R = \frac{\varphi_1^o - \varphi_2^o}{\frac{\rho_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{f_{12}} + \frac{S_1 \rho_2}{S_2 \varepsilon_2}} \quad (\text{IV.3})$$

où :  $\varphi_i^o$  est la puissance surfacique rayonnée par un corps noir  
 $\varepsilon_i$  est l'émissivité du corps i et  $\rho_i$  son coefficient de réflexion tel que  $\varepsilon_i + \rho_i = 1$   
 $S_1$  et  $S_2$  sont les surfaces respectives de la cible et du four  
 $f_{12}$  est le facteur de forme de 1 vers 2

Le flux total perdu par la cible est donc [Hue-92] :

$$\Phi_1^R = \frac{S_1 \sigma}{\frac{\rho_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{f_{12}} + \frac{S_1 \rho_2}{S_2 \varepsilon_2}} (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{IV.4})$$

On connaît cette valeur en faisant l'hypothèse qu'en régime permanent l'énergie transmise par le four à la cible est entièrement dissipée par les 2 extrémités du cylindre cible. On fait aussi l'hypothèse que les extrémités de la cible rayonnent sur des cavités et ne reçoivent donc pas de rayonnement en retour. On a alors :

$$P_c = \varepsilon \sigma S T^4 \quad (\text{IV.5})$$

$P_c$  puissance évacuée par les deux disques extrêmes du cylindre cible

Avec  $T_{\text{cible}} = 2300 \text{ K}$

$$\varepsilon = 0.8$$

$$\sigma = 5.7 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$$

$$S = 2.26 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

On obtient :  $P_c = 288.4 \text{ W}$  soit

$$\underline{\underline{P_c \approx 290 \text{ W}}}$$

#### Evaluation de $f_{12}$

$$f_{12} = \frac{\Phi_{1 \rightarrow 2}}{\Phi_1} \approx \frac{S_{\text{latérale}}}{S_{\text{totale}}} \quad \text{aux vues des hypothèses précédentes,}$$

ce qui permet d'estimer  $f_{12}$  à 0,77.

#### Calcul de la température moyenne du four :

La cible et le four étant constitués du même matériau, et portés à des températures proches, les deux surfaces ont les mêmes propriétés d'émission et de réflexion.

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho \quad \text{et} \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon \quad (\text{IV.6})$$

Le flux total perdu par la surface S1 (cible) en regard de la surface S2 (four) peut donc s'écrire et s'évaluer de la façon suivante :

$$\Phi_1^R = \frac{S_1 \sigma}{\frac{1}{f_{12}} + \frac{\rho}{\varepsilon} \left(1 + \frac{S_1}{S_2}\right)} (T^4 - T_2^4) \approx -P_c \quad (\text{IV.7})$$

On obtient alors pour le four :

$$\text{Avec } \varepsilon = 0,8 \quad T_2 = 2460 \text{ K}$$

$$\text{Avec } \varepsilon = 0,85 \quad T_2 = 2450 \text{ K}$$

Ces valeurs correspondent, à 40 K près, aux valeurs données par Systus.

On peut remarquer que sur les 4 kW fourni au four seuls 300 W sont utilisés pour maintenir la température de la cible .

Calcul de la température du réflecteur :

A partir de la température du four, il est possible d'estimer la température du réflecteur. Four et réflecteur forment un ensemble de deux cylindres de même longueur (35 mm) et de rayon respectifs 11 et 13 mm.

Comme précédemment, le flux total perdu par la surface S<sub>2</sub> en regard de la surface S<sub>3</sub> (réflecteur) s'écrira :

$$\Phi_2^R = \frac{S_2 \sigma}{\frac{1}{f_{23}} + \frac{\rho}{\varepsilon} \left(1 + \frac{S_2}{S_3}\right)} (T_2^4 - T_3^4) \quad (\text{IV.8})$$

Des formulaires de facteurs de formes permettent de calculer f<sub>23</sub> [Hue-92]

Dans le cas présent de deux cylindres concentriques de même longueur, on obtient :

$$f_{23} = 0,953$$

La figure IV.11 représente cette puissance perdue par le four en fonction de la température du réflecteur, pour différentes émissivités du carbone.[Car-04]

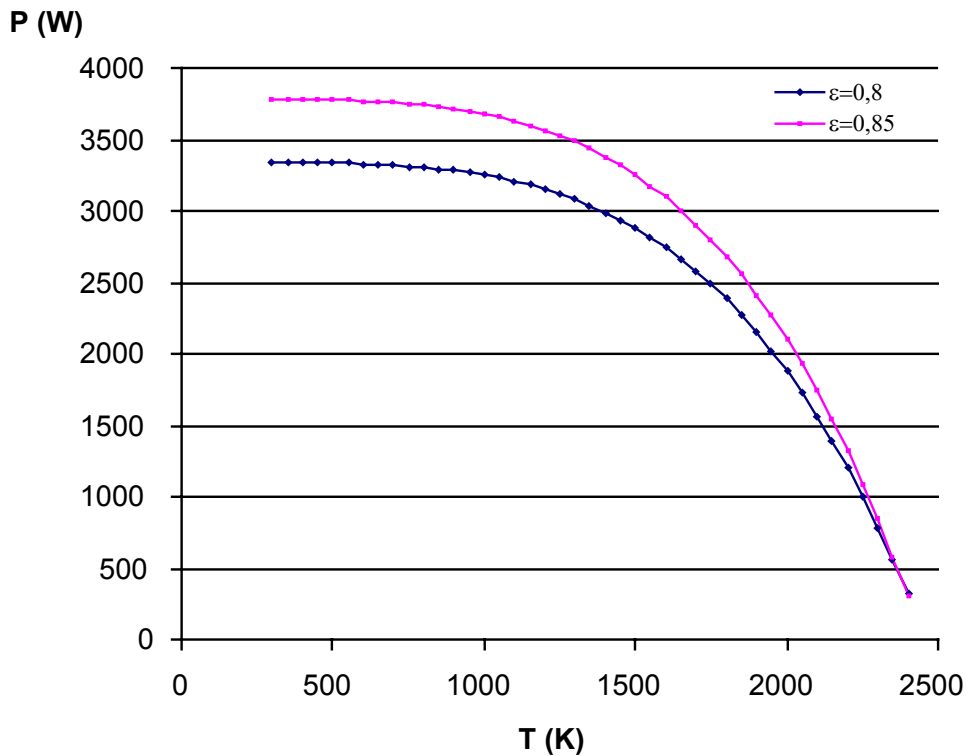


Figure IV.11 : Puissance perdue par le four en fonction de la température du réflecteur

Le manque de données sur l'émissivité du carbone et sa dépendance en température ne permet pas d'estimer précisément les températures. C'est la raison pour laquelle les courbes précédentes ont été tracées pour différentes émissivités. Aux 4 kW fournis au four, il faut retrancher les 300 W utilisés pour maintenir la température de la cible. Restent donc 3700 W perdu par le four (en négligeant la part de la conduction). A cette puissance dissipée, on peut voir que le point qui nous intéresse se situe entre les deux courbes tracées et sur le plateau des basses températures du réflecteur. Il semble donc raisonnable d'estimer que dans ces conditions, la température du réflecteur ne dépasse pas 1200 K. On retrouve encore une fois le résultat obtenu avec Systus.

En conclusion, il apparaît que si le profil de température de l'ensemble du four calculé par Systus semble raisonnable, la prévision des 2,5 kW est par contre erronée. De plus, l'ensemble des résultats précédents montrent que la température du réflecteur est trop basse pour que celui-ci joue son rôle efficacement. Pour que l'ensemble puisse effectivement fonctionner à la puissance de 2,5 kW, il faudrait que le réflecteur puisse être porté à une température proche de 1800 K.

## IV.4.2 SOLUTIONS PROPOSEES

Les modifications à apporter concernent non seulement le réflecteur mais aussi le four.

### IV.4.2.1 Le réflecteur

Les observations précédentes ont montré qu'il était nécessaire que le réflecteur soit porté à des températures proches de 1800 K. Pour cela il est impératif de pouvoir l'isoler d'un point de vue thermique. Une solution doit donc être trouvée pour casser le pont thermique entre le réflecteur et son support.

Une première solution envisagée consistait à inciser le réflecteur à sa base. Cela imposait, dans un premier temps, de reprendre une pièce en carbone déjà réalisée, ce qui comportait un risque, rendant également la pièce beaucoup plus fragile.

La solution finalement retenue a consisté à rouler une feuille mince de tungstène, métal réfractaire, autour du four en guise de réflecteur. Cette feuille de 0,75 mm d'épaisseur, est roulée deux fois de sorte qu'elle constitue quasiment un double réflecteur. Elle est maintenue par des agrafes de tantale, matériau de faible conductivité thermique, de façon à limiter les contacts thermiques du réflecteur avec la bride inox, ainsi que pour protéger cette dernière d'une éventuelle surchauffe locale, au point de contact. La figure IV.12 représente de manière très schématique cette organisation

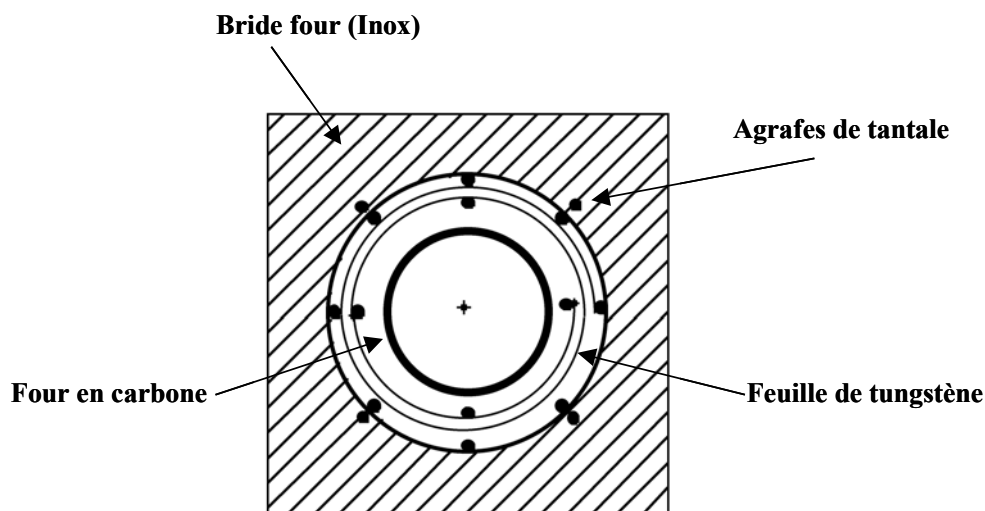


Figure IV.12 Réflecteur en W, maintenu par des épingles de tantale.

Ce réflecteur a été monté en remplacement du réflecteur d'origine en carbone et a donné des résultats satisfaisants présentés au paragraphe IV.4.3

IV.4.2.2 Le four

La rupture du four de test s’est produite sur les bretelles du milieu du résistor, qui constituent donc les zones les plus chaudes (figure IV.13). La section locale est de  $5,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ . Lors de la rupture, il circulait dans chacune des bretelles un courant de 100 A. Le tableau suivant permet de comparer les densités de courant dans une bretelle et dans une bande latérale.

	Bretelle	Bande latérale
Section ( $\text{m}^2$ )	$5,7 \cdot 10^{-6}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$
Densité de courant à 4 kW ( $\text{A}/\text{m}^2$ )	$1,75 \cdot 10^7$	$1,31 \cdot 10^7$
Densité de courant à 2,5 kW ( $\text{A}/\text{m}^2$ )	$1,44 \cdot 10^7$	$1,08 \cdot 10^7$

Tableau IV.1

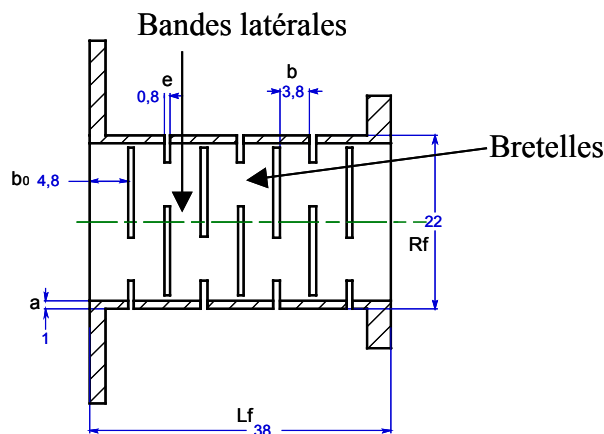


Figure IV.13 : Rappel de la géométrie du four actuel

Il est difficile de déterminer à partir de ces résultats une valeur limite de la densité de courant, puisque cette valeur « limite » dépend de l'échauffement local et donc de l'environnement direct du point chaud. On peut en revanche avoir une idée de la différence de température qu'induit cet écart de densité de courant dans un cas simple. Le tableau IV.2 donne le résultat de simulations thermiques locales réalisées avec le logiciel Quickfield®. Ce modèle extrêmement simple considère une bretelle ou une bande latérale comme un parallélépipède .



	Bretelle	Bande latérale
Température moyenne (K)	2562	2223

Tableau IV.2 : Comparaison des températures moyennes estimées dans une bretelle et dans une bande latérale dans le contexte de rupture du four (à 4 kW)

Ce modèle très schématique montre que l'on peut s'attendre à de grandes inhomogénéités en température à l'intérieur du four, présentant des écarts de plusieurs centaines de K.

Cette inhomogénéité en température pose différents problèmes. En premier lieu elle répond mal aux exigences des expériences TARGISOL en matière d'homogénéité de température sur la cible. Ensuite elle fragilise le four lui-même. Le contrôle du courant imposé au four se fait par la mesure de la température à l'intérieur de la cible. On obtient donc une température moyenne, en réalité sujette à des écarts importants qui peuvent eux-mêmes être amplifiés par des écarts de température sur le réflecteur. On peut donc se trouver dans des situations où la température locale du four est beaucoup plus élevée que la température supposée à partir de laquelle on assure le contrôle du courant.

En conclusion : plutôt que de limiter le courant dans le four, il paraît plus important d'assurer l'homogénéité de distribution de densité de courant dans le four et de température sur le réflecteur.

#### Proposition de modification du four carbone :

En vue de limiter le courant circulant dans le four, on peut diminuer la largeur des fentes, ce qui permet d'en placer davantage et donc de rallonger le parcours dans la résistance, et du même coup de mieux utiliser l'alimentation dont nous disposons en se rapprochant de son couple courant tension nominal. Le nombre de fentes doit être choisi de manière à ce que la largeur des bretelles soit le double de la largeur des bandes latérales.

Le logiciel Quickfield permet de se rendre compte de la distribution des densités de courant dans la résistance. La figure IV.14 page suivante présente le modèle plan du four<sup>2</sup>. En gardant la même largeur de bretelle de 5.7 mm, la largeur de bande doit être de 2.8 mm. On peut placer dans ce cas 11 fentes de 0.3 mm d'épaisseur.

Le tableau IV.3 reprend les principaux résultats obtenus avec Quickfield :

<sup>2</sup> Ce modèle plan est un modèle électrique uniquement.

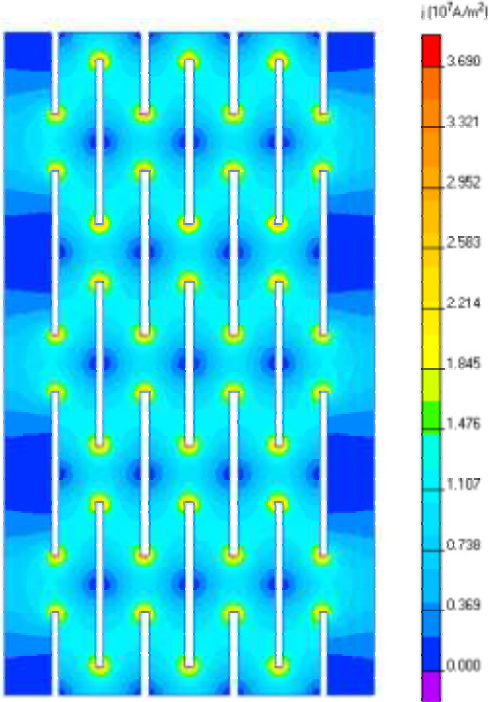
	Puissance	U four (V)	I four (A)		Densité de courant ( $10^7$ A/m <sup>2</sup> )
<b>Four actuel</b>	2,5 kW	10,2	242	Bretelle	1,41
				Bande latérale	1,06
	4 kW	13	316	Bretelle	1,86
				Bande latérale	1,39
<b>Nouvelle version</b>	2,5 kW	13	190	Bretelle	1,1
				Bande latérale	1,12
	4 kW	16,55	241,2	Bretelle	1,41
				Bande latérale	1,43

Tableau IV.3

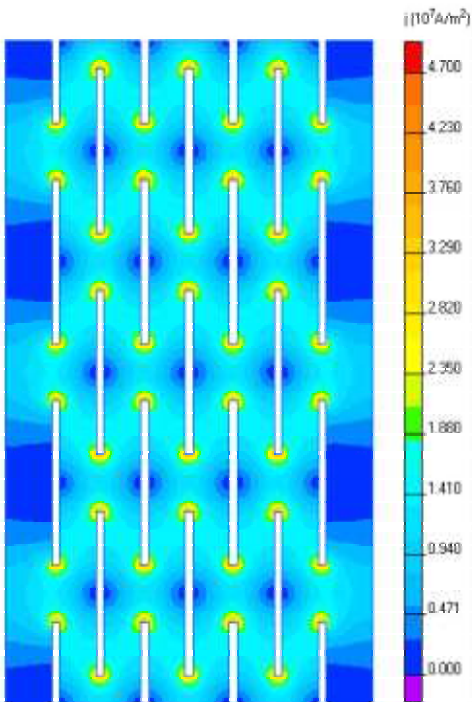
Les résultats précédents montrent que l'on peut obtenir une répartition plus homogène de la densité de courant et donc de la densité de puissance « ohmique », tout en diminuant le courant total circulant à travers le résistor; ceci au prix difficilement évitable d'une fragilisation de l'ensemble.

Cette nouvelle version du four n'a pas encore été testée.

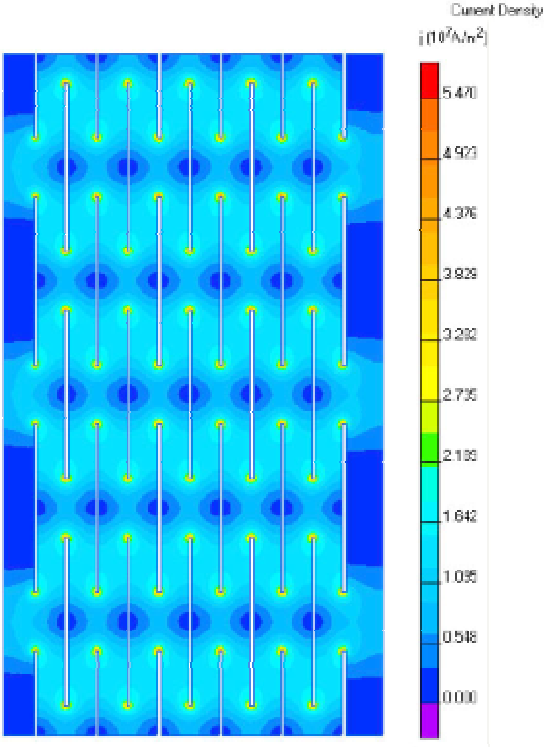
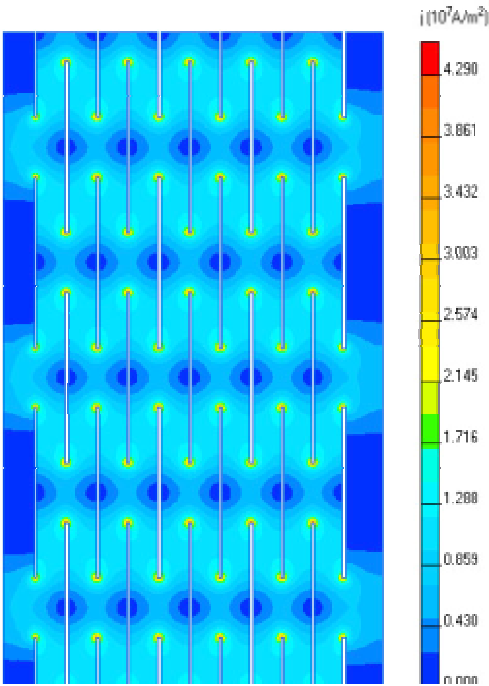
Four actuel 2,5 kW



Four actuel 4 kW



Nouveau four 4 kW



### IV.4.3 RESULTATS OBTENUS AVEC UN NOUVEAU REFLECTEUR

Le dispositif de chauffage a été testé avec le réflecteur en tungstène décrit précédemment et le même type de four test.

Les figures IV.15 et IV.16 présentent les résultats d'une montée en température réalisée dans ces conditions. et comparent ces derniers avec les performances antérieures du dispositif.

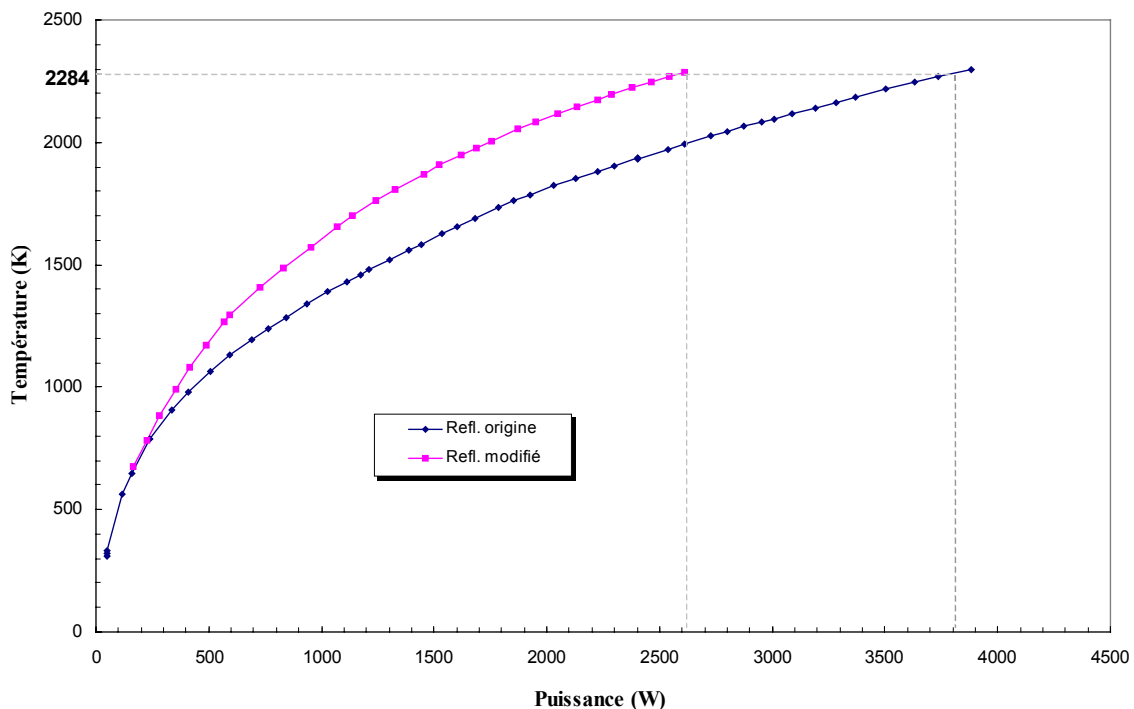


Figure IV 15 : Comparaison de la température mesurée de la cible en fonction de la puissance fournie au four pour un réflecteur en carbone et un second en tungstène.

L'amélioration des performances est manifeste puisque pour une même température de cible de 2284 K la puissance électrique est ramenée à 2610 W (depuis 3800 W) et l'intensité du courant est diminuée de 50 A. On retrouve ainsi les conditions de fonctionnement prévues initialement et décrites au paragraphe précédent.

Comme cela a été exposé en début de chapitre, l'utilisation d'un thermocouple ou d'un pyromètre lors de l'expérience sous faisceau sera devenu impossible. La caractéristique température de la cible-Intensité du courant constitue l'outil qui permettra alors d'évaluer la température de la cible. Cette caractéristique est présentée sous forme de table dans l'annexe IV.6

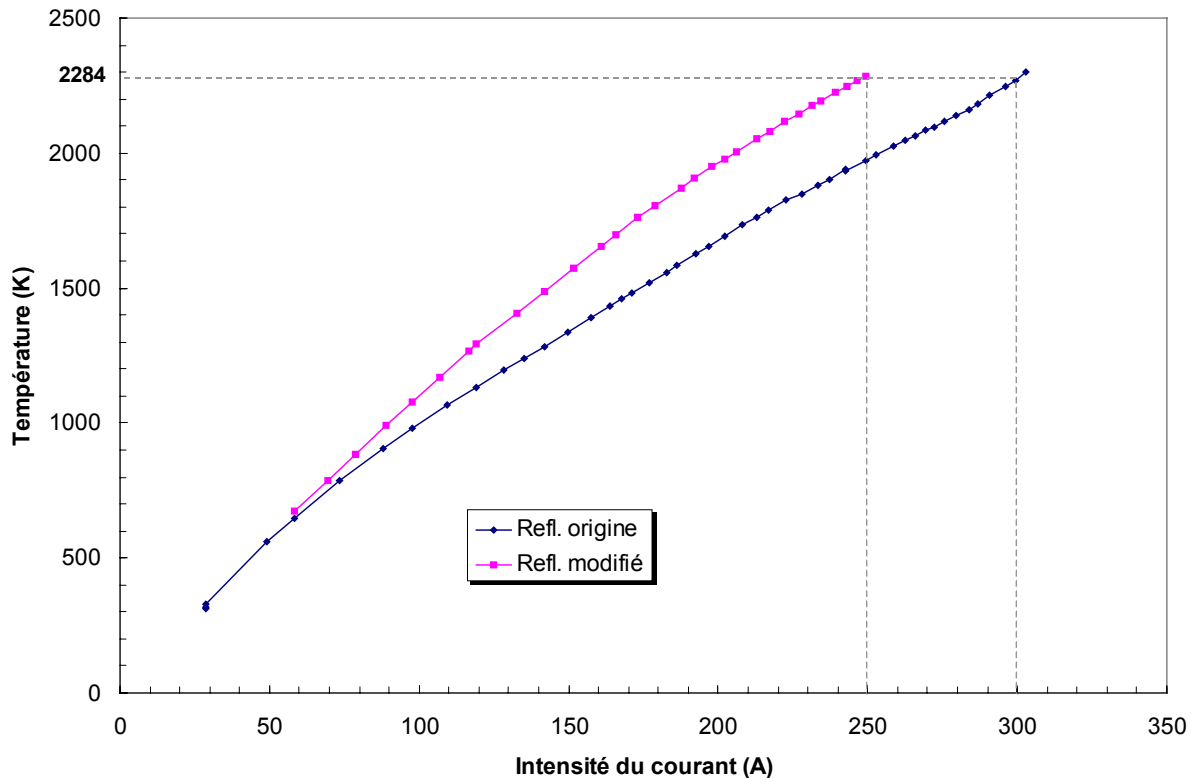


Figure IV 16 : Comparaison de la température mesurée de la cible en fonction de l'intensité du courant traversant le four pour un réflecteur en carbone et un second en tungstène.

### En résumé :

La première version de l'ensemble « four » a été testée et des modifications ont été apportées :

- Le réflecteur a été modifié et testé.
- Un nouveau schéma de four a été proposé.

Les tests réalisés avec le nouveau réflecteur en tungstène donnent satisfaction.

La caractéristique courant d'alimentation -température de la cible a été établie (Annexe IV.6) Les mesures par pyromètre ont montrées qu'il était possible de connaître la température de la cible sans connaissance de son émissivité. Il sera donc possible par la suite, de contrôler précisément la température de la cible sans thermocouple.

# CHAPITRE V

## *Test global et bilan général*

Après avoir testé le four sur le banc de chauffage, l'ensemble source et four a été installé sur le banc de test 2 du Hall D afin de mesurer les efficacités de la source en présence du four (cf. Chapitre III). Puis le distributeur a été installé à son tour afin de compléter le dispositif. Il a ainsi été possible d'éprouver les mouvements des porte-cibles sous vide et de contrôler la tenue en température de ces derniers. Le thermocouple ayant été retiré, la température a été contrôlée par le pyromètre.

La dernière partie de ce chapitre est consacrée au bilan général des tests du dispositif.

### **V.I TEST DU DISTRIBUTEUR**

Lors de cette série de tests, la plus grande attention a été portée au comportement des porte-cibles, points les plus sensibles du dispositif. Les tests ont été réalisés avec deux porte-cibles « prototypes » dont il fallait valider la conception avant de lancer la fabrication des dix autres (on rappelle que le distributeur peut être équipé de 12 cibles). Les plans d'ensemble du dispositif sont présentés dans l'annexe VI.

### V.I.1 TESTS MECANIQUES

Après réception du distributeur, l'ensemble a été démonté, chaque pièce a été dégraissée par bains à ultrasons puis remontée.

Tests en atmosphère :

Les tests mécaniques de mouvement des cibles dans le distributeur n'ont pas mis en évidence de difficultés particulières. Les mouvements de rotation et translation sont réguliers, sans à-coups. Le réglage de l'alignement four cône femelle et couronne porte cible donne de bons résultats. Le réglage se fait en désaxant légèrement la bille de positionnement de son site sur la couronne dentée (cf. Annexe VI).. On règle ensuite la hauteur du galet du vérin assurant la rotation des cibles afin d'en ajuster la course.

La position de la cible dans le four est très répétable (pour autant que l'on puisse en juger en se basant sur une observation de visu du centrage et de la position de la cible). Le test d'introduction de la cible dans le four a été réalisé une centaine de fois environ en faisant tourner la couronne porte cible d'un tour entier à chaque fois.

Tests sous vide :

Le distributeur a été monté sur la source MONO1000, sur le banc de test 2 du hall D.

L'ensemble distributeur-four solidaire doit ensuite être fixé sur une fenêtre latérale de la source.

Le vide dans le distributeur est assuré par la même pompe turbo que la source par l'intermédiaire d'un by-pass fixé sur le piquage en DN 40. Dans le distributeur, le vide est de  $6 \cdot 10^{-3}$  mbar lorsque la pression à l'extraction de la source est de  $10^{-6}$  mbar. Cet écart semble pouvoir s'expliquer par la conductance de pompage faible (DN40) ainsi que par la surface importante à dégazer que constitue l'ensemble du distributeur.

Sous vide les mouvements de coulissement d'une pièce dans une autre sont beaucoup plus délicats qu'à l'air libre en raison d'une tendance beaucoup plus marquée au grippage. Le cas s'est présenté (après une phase de chauffage à 1800 K) entre le tube de molybdène qui soutient la cible et la bague de guidage en inox fixée sur le porte cible correspondant (figure V.1).

Après démontage et analyse de la bague et du tube, il est apparu qu'il y avait un défaut de réalisation de la pièce et que le jeu entre la bague et le tube Mo était insuffisant. Le jeu demandé était de 0.05 alors que les pièces en présence étaient ajustées.

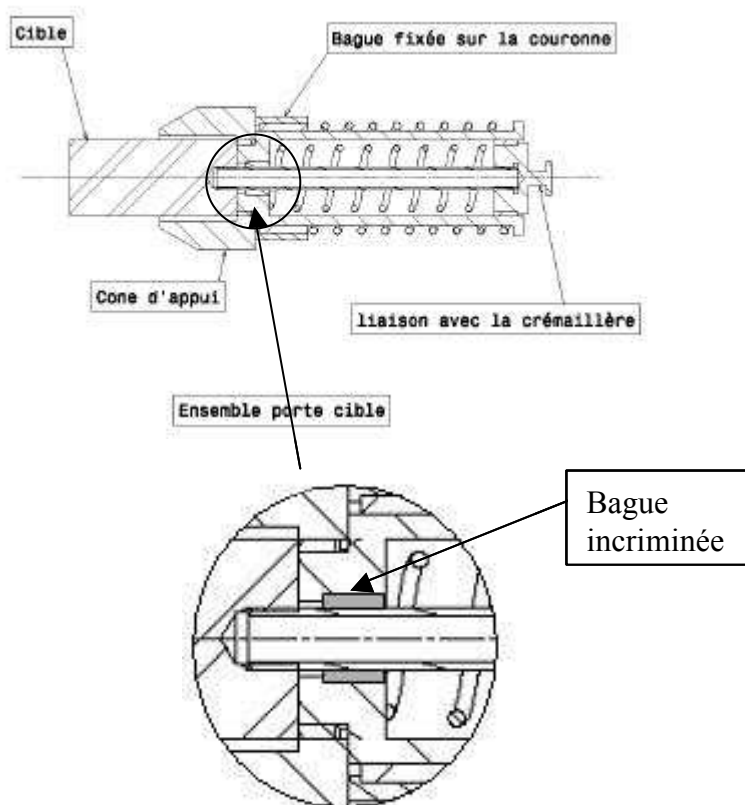


Figure V.1 : Ensemble porte-cible et lieu du grippage.

Afin que cette situation ne se reproduise pas à l'avenir sur les prochains porte-cibles, il a été envisagé, outre le respect du jeu, de coltérer la bague (traitement de surface de l'inox) afin de durcir davantage cette dernière.

Par manque de temps, ces tests correctifs n'ont pas pu être réalisés.

## V.1.2 TESTS THERMIQUES ET MESURE DE LA TEMPERATURE

### V.1.2.1 Essais de chauffage

Une fois la cible introduite dans le four et que celui-ci est en fonctionnement la question restait de savoir si le cône du porte cible en aluminium était suffisamment refroidi par la bride en cuivre (figure V.2).

Les éléments en mouvements ne peuvent pas être refroidis par circulation d'eau et l'unique moyen de refroidir un porte-cible en place (i.e. lorsque la cible est en place dans le four) est d'optimiser la conduction thermique entre les surfaces des cônes de positionnement. C'est la raison pour laquelle la bride a été réalisée en cuivre et le cône d'appui en aluminium,



tous deux matériaux à grande conductivité thermique. La température de fusion de l'aluminium étant assez basse (933 K) ce raisonnement était donc basé sur l'hypothèse d'une bonne qualité de contact entre les deux surfaces des cônes. Cela constituait donc un point important à surveiller lors des essais de chauffage.

La cible a été portée à 1900 K trois fois sur trois jours (une fois par jour en augmentant progressivement la température, en restant à la température mentionnée pendant quelques heures, puis en diminuant progressivement la température).

Après démontage, le porte cible et les brides ne portaient aucune trace de chauffe particulière. On ne constate pas non plus de changement apparent de la raideur des ressorts.

Jusqu'à la température de 1900 K, on peut donc dire que les essais sont concluants.

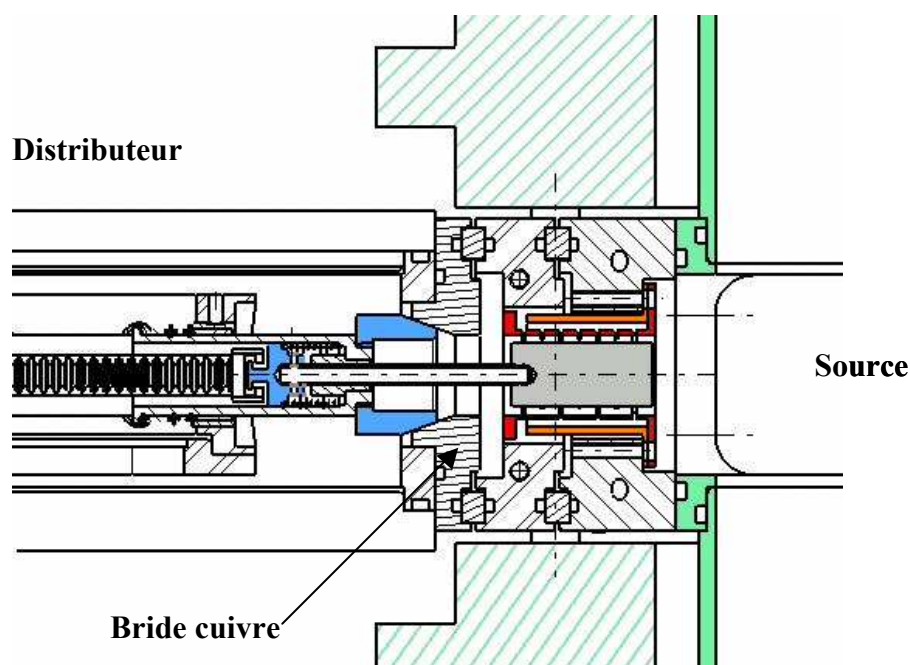


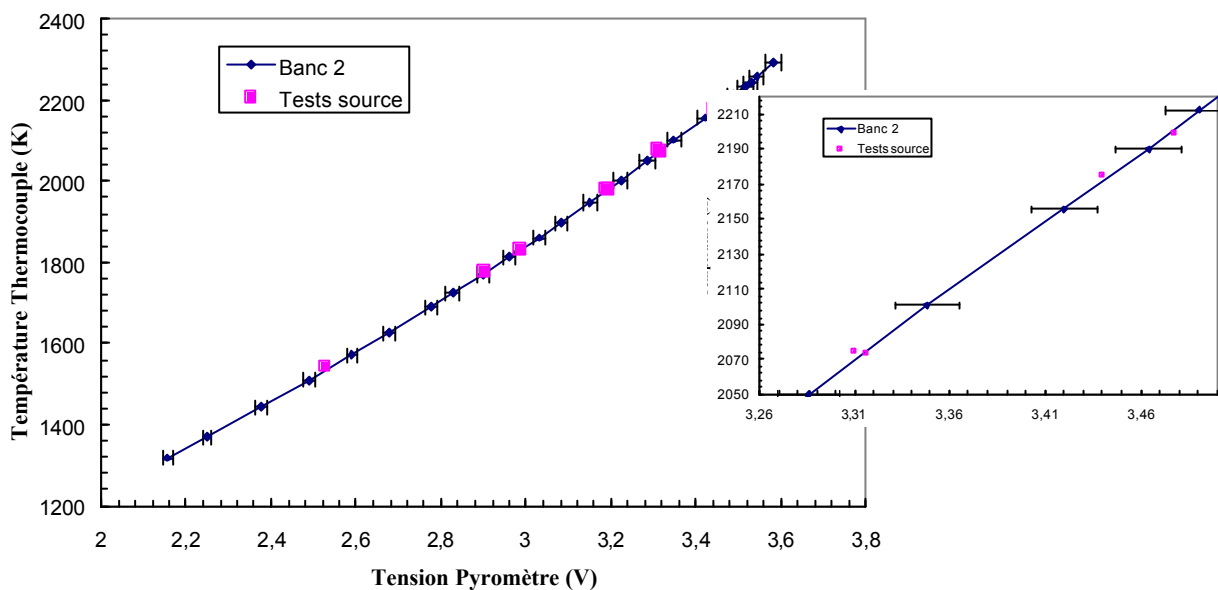
Figure V.2 : Vue d'ensemble : la cible est placée dans le four et le cône du porte cible est en contact avec la bride cuivre du four.

### V.1.2.2 Mesure de la température en présence du distributeur

Lors des essais thermiques, la température a été contrôlée par le pyromètre. Avant de retirer le thermocouple pour installer le distributeur, il était nécessaire d'établir pour le banc de test, la table de correspondance de la tension de sortie du pyromètre avec la température

indiquée par le thermocouple. L'annexe V.1 fourni cette table ainsi que les mêmes résultats obtenus sur le banc de chauffage. On peut observer que ces mesures sont très sensibles aux conditions de montage (angles différents, distance de visée différente ...), elles peuvent mener à d'importantes erreurs si l'on ne prend pas soins de ré-évaluer cette relation tension-température à chaque nouvelle installation du pyromètre.

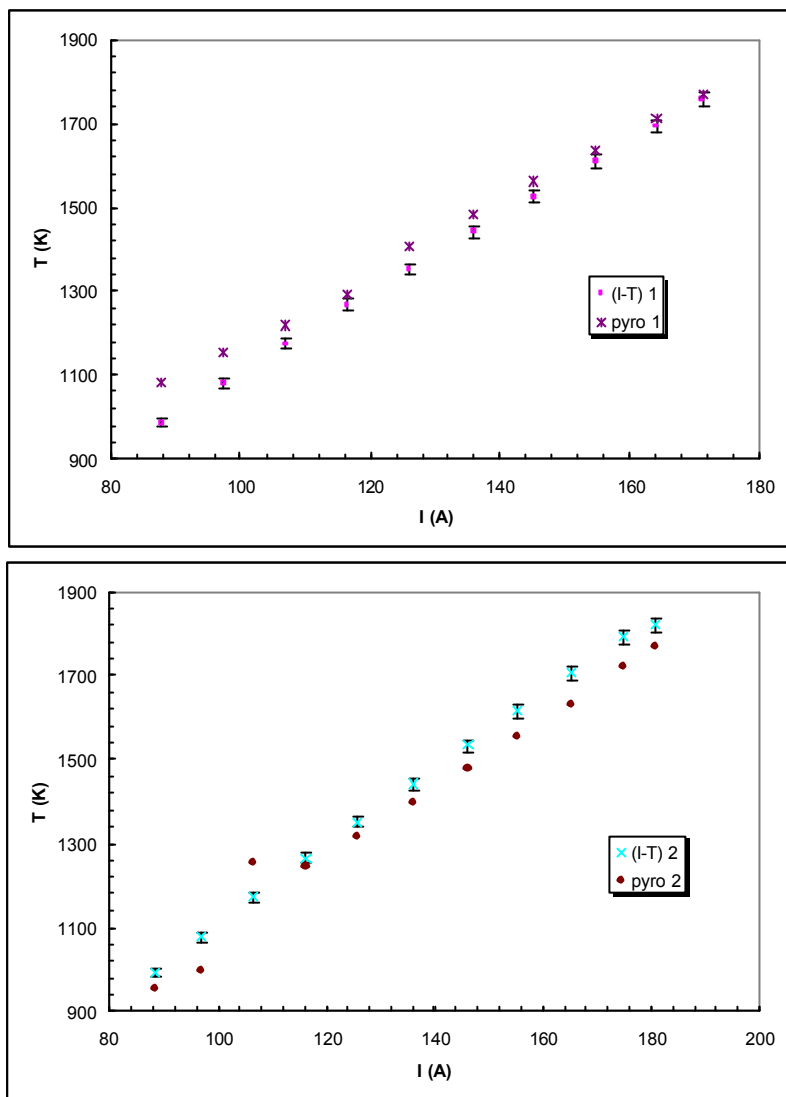
Les mesures données par le pyromètre semblent en revanche présenter une bonne reproductibilité comme l'illustrent les résultats des figures V.3 et V.4. Sur ces graphiques, la seconde série de points représente les mesures réalisées sur une durée de 15 jours lors des tests d'efficacité de la source (Chapitre III). Tous les points sont largement compris dans les barres d'erreur de notre courbe de référence.



Figures V.3 et V.4 : Courbe de référence thermocouple-pyromètre réalisée sur le banc2 et utilisation de celle ci lors des mesures d'efficacités. La figure V.4 est un agrandissement d'une partie de la courbe V.3.

Les figures V.5 et V.6 présente une comparaison entre les températures mesurées avec le pyromètre et celles issues de la caractéristique courant-température thermocouple (I,T). Cette caractéristique, obtenue une première fois sur le banc de test de chauffage, a été tracée de nouveau avant de retirer le thermocouple. Ici ce n'est pas le changement de banc de test qui a imposé cette mesure mais l'usure du four ayant servi pour toute la campagne de test.

Ces figures représentent respectivement l'avant dernière et la dernière montée en température. Elles mettent en évidence un désaccord léger mais croissant dans le temps entre les deux méthodes d'évaluation de la température.



Figures V.5 et V.6 : Comparaison entre la température de la cible donnée par le pyromètre et par la caractéristique (I,T) pour les deux dernières mesures réalisées.

Les résultats présentés précédemment (figure V.3 et V.4) concernant la reproductibilité des mesures effectuées par pyromètre permettent de supposer que ces dernières ne sont pas en cause dans l'évolution observée sur les figures V.5 et V.6. Aussi, et bien que celle-ci ait été ré-évaluée, la nouvelle caractéristique (I,T) ne permet donc pas de rattraper l'erreur due à l'usure du four.

Ces derniers résultats nous renseignent sur l'évolution rapide de l'état du four que l'on peut supposer en fin de vie. En effet, la caractéristique réalisée sur le banc de chauffage est restée fiable durant une longue période et la détérioration de cette fiabilité s'accompagne d'une évolution rapide et croissante de la valeur de la résistance. L'annexe II.4 retrace l'évolution de la résistance du four au cours des essais. Lors des deux derniers essais, la résistance à froid valait  $104 \text{ m}\Omega$ , soit un rapport de 1,6 avec la résistance initiale.

L'utilisation simultanée du pyromètre a donc permis de mettre en évidence la dérive de la caractéristique (I,T) et d'évaluer l'écart en température engendré par l'usure du four.

Ces données permettent également d'évaluer la durée de validité de la caractéristique (I,T). Lors de la mesure de la seconde caractéristique, la valeur de la résistance avait évolué d'un facteur 1,15 et le four avait été utilisé pendant une durée de 250 à 290 heures. Ces deux paramètres (résistance et durée d'utilisation) fournissent donc un ensemble de critères qui permettent de borner la validité de la caractéristique (I,T).

## V.2 BILAN GLOBAL DES TESTS

Au terme de ce séjour au GANIL, il est utile de présenter un état des lieux du travail accompli et des tests réalisés. Ces tests ont permis de valider ou d'invalider certains choix et de modifier ces derniers en conséquence.

### V.2.1 CE QUI A ETE FAIT

La première étape a consisté à définir la nature des cibles à tester et des ions radioactifs à implanter. A partir des caractéristiques en énergie, en intensité et en géométrie des faisceaux fournis par SISSI, il a été possible de dimensionner les cibles, sans préjuger de leur forme exactes.

La cible à tester est introduite dans un four couplé à la source RCE de type MONO1000. Les dimensions de ce four en carbone ont été déterminées en fonction de celles de la cible (afin d'homogénéiser la température dans la cible) et de l'environnement de four. Après le test d'un premier four, une seconde version a été dessinée afin de mieux répondre aux exigences d'homogénéité de la température dans le four lui-même. Cette dernière version n'a pas fait l'objet d'essais. A l'issue de ce même test, le réflecteur qui entourait le four a subi de profondes modifications. A l'origine en carbone, le réflecteur présentait une surface de conduction vers les zones froides des brides trop importante pour donner satisfaction. Le réflecteur actuel est constitué d'une feuille de tungstène roulée dont on a limité les contacts vers les zones froides. L'ensemble four-réflecteur modifié permet de porter une cible de carbone à une température de 2300 K pour une puissance électrique de 2500 W. La résistance électrique du four est d'environ 55 m $\Omega$  à température ambiante. Cette valeur a tendance à augmenter au cours du temps avec l'« usure » du four due à une évaporation du carbone. Une courbe caractéristique reliant l'intensité du courant traversant le four à la température dans la cible mesurée par thermocouple a été établie et permet de retrouver la température de la cible à partir des caractéristiques de l'alimentation du four. La qualité de cette courbe de référence a tendance à se dégrader dans le temps avec l'évolution de la résistance du four. Une mesure

complémentaire par pyromètre a permis d'évaluer cette dégradation en fonction de la valeur de la résistance. On a pu ainsi vérifier que la mesure de la résistance du four à froid permettait de juger de l'état de celui ci, ce qui a également permis de dégager des critères de validité de la caractéristique (I,T).

Parallèlement à la caractérisation du four, on a montré qu'il était possible d'obtenir une indication fiable de la température par mesure pyrométrique, sans connaître l'émissivité de la cible. Il était également intéressant d'utiliser conjointement le pyromètre et le thermocouple pour tenter d'obtenir des valeurs d'émissivité des cibles étudiées. Cette mesure qui imposait le ré-étalonnage du pyromètre n'a pas pu aboutir pour des raisons de délais.

La source d'ionisation MONO1000 a été testée en efficacité d'ionisation pour les gaz rares. Une première version de cette source a été « raccourcie » afin de diminuer les temps d'effusion dans l'enceinte. La comparaison des performances avec des résultats antérieurs correspondant à d'autres sources du même type n'a pas donné satisfaction. La version « raccourcie » a donc été abandonnée pour revenir à la forme « classique ».

Les mêmes mesures d'efficacité d'ionisation ont été réalisées en présence du four chaud afin d'évaluer l'influence de celui ci sur les efficacités. Les résultats montrent une efficacité constante (et sensiblement égale à l'efficacité « à froid ») jusqu'à une température de 1800 K environ. Au delà, les efficacités d'ionisation ont tendance à chuter. Cependant, ce comportement a pu être attribué à la désorption de gaz par la cible dans la source et s'atténue donc avec le temps.

Des mesures de temps d'ionisation de atomes dans la source ont également été réalisées. Ces mesures donnent des temps moyen d'ionisation à 50% qui varient de 115 à 144 ms pour les gaz rares. Ces temps beaucoup plus courts que les temps de diffusion attendus permettent une mesure simple de ces derniers.

Le distributeur a été monté avec deux porte-cibles d'essai, et testé dans le dispositif en mouvements et en température. La tenue en température des matériaux a validé le choix de ceux-ci. Les porte-cibles ont fait l'objet d'une reprise (jeu d'une bague non conforme) afin d'éviter le grippage. Les modifications restent à faire.

Toutes les pièces du dispositif ont donc été réalisées et ont fait l'objet d'au moins un test.

### V.2.2 CE QU'IL RESTE A FAIRE

Avant l'installation et l'utilisation du dispositif dans la casemate de SIRa il reste donc :

- à finaliser le réflecteur en tungstène testé et à fabriquer les fours définis au chapitre IV

- 
- à valider les corrections apportées aux porte-cibles afin d'assurer les mouvements à l'intérieur du distributeur.
  - à valider la tenue en températures des matériaux du porte cible sur la gamme 1800 2300 K.
  - à vérifier éventuellement l'influence du distributeur sur les efficacités d'ionisation de la source
  - à définir la géométrie finale des cibles et à valider leur système de fixation sur le porte-cible ( pour les cibles en feuilles minces de tungstène et tantale).



## CONCLUSION

L'objectif de ce travail était l'étude, la réalisation et le test d'un dispositif susceptible de mesurer et comparer en une expériences les propriétés de diffusion et effusion d'atomes radioactifs dans différentes cibles pour des installations de type ISOL. Dans cette expérience à venir, un faisceau d'ions radioactifs sélectionné en amont est implanté dans une cible. Cette cible est chauffée afin d'accélérer la diffusion des atomes radioactifs hors de celle ci. Les atomes effusent alors jusqu'à une source d'ionisation (source RCE). L'ionisation de ces atomes permet enfin leur transport jusqu'aux systèmes de détection et d'analyse. Un distributeur de cibles permet le changement de cible pour une nouvelle série de mesures.

La source d'ionisation a été caractérisée en terme d'efficacité d'ionisation pour des gaz rares en tenant compte de la proximité du four et de son influence. Le système a également fait l'objet de mesures de temps de transformation atome-ion. La température des cibles peut être imposée par le réglage du courant d'alimentation du four et connue avec une incertitude de 1%. Ces résultats doivent permettre aux physiciens en charge de l'expérience d'extraire des données enregistrées en ligne les paramètres de diffusions d'atomes radioactifs dans différentes matrices cibles.

Outre les mesures comparatives des différents carbones, prévues dans un premier temps, on peut imaginer que ce dispositif de comparaison des performances des cibles puisse à l'avenir être employé pour

- tester différentes matrices constituées d'oxydes métalliques dans le but de faire « sortir » les éléments radioactifs sous forme moléculaire [Gib-0.3].
- tester différentes géométries de cibles pour un même matériau dans les mêmes conditions expérimentales

Il pourrait également être intéressant de développer par la suite un four en tungstène dans le but d'étudier la diffusion dans une gamme de températures supérieures à 2300 K.

De par la richesse des thèmes abordés et la nature des responsabilités qui m'ont été confiées, ce projet m'a énormément apporté tant sur le plan des connaissances scientifiques que sur celui de l'appréhension du métier d'ingénieur. Le suivi de toutes les étapes de ce projet, sa réalisation ainsi que la possibilité de le faire progresser ont concouru à rendre cette tâche exaltante.





## Annexes

<b>ANNEXE I.1 : DIPOLE MAGNETIQUE.....</b>	<b>125</b>
<b>ANNEXE II.1 : PROFIL DU FAISCEAU PRIMAIRE JUSQU'A SIRA.....</b>	<b>127</b>
<b>ANNEXE II.2 : TABLEAU COMPARATIF DES MATERIAUX POUVANT ETRE UTILISES COMME PARTIE CHAUFFANTE.....</b>	<b>129</b>
<b>ANNEXE II.3 : CALCUL DE LA RESISTANCE ELECTRIQUE DU FOUR.....</b>	<b>131</b>
<b>ANNEXE II.4 : DUREE DE VIE DU FOUR EN FONCTION DE LA TEMPERATURE.....</b>	<b>133</b>
<b>ANNEXE II.5 : SIMULATIONS SYSTUS DES TEMPERATURES DU BLOC FOUR.....</b>	<b>135</b>
<b>ANNEXE II.6 : SCHEMAS DU PORTE CIBLE.....</b>	<b>137</b>
<b>ANNEXE II.7 : PRINCIPES D'UNE SOURCE ECR. CARACTERIS TIQUES DE MONO1000.....</b>	<b>139</b>
<b>ANNEXE III.1 : GESTION DU VIDE.....</b>	<b>141</b>
<b>ANNEXE III.2: MESURE DES TEMPS D'IONISATION : REPONSE A UN PULSE DE GAZ.....</b>	<b>143</b>
<b>ANNEXE IV.1: PRINCIPE DU PYROMETRE OPTIQUE.....</b>	<b>147</b>
<b>ANNEXE IV.2: FICHE TECHNIQUE LANDINSTRUMENT.....</b>	<b>157</b>
<b>ANNEXE IV.3: EMISSIVITES SPECTRALES DU TUNGSTENE [HAN-99].....</b>	<b>158</b>
<b>ANNEXE IV.4: PROBLEMES RENCONTRES AVEC LE PYROMETRE.....</b>	<b>159</b>
<b>ANNEXE IV.5: CONSTAT DE RUPTURE DU FOUR.....</b>	<b>163</b>
<b>ANNEXE IV.6: CARACTERISTIQUE COURANT-TEMPERATURE DE LA CIBLE.....</b>	<b>167</b>
<b>ANNEXE V.1: CONVERSION MESURE DU PYROMETRE- TEMPERATURE DU THERMOCOUPLE.....</b>	<b>169</b>
<b>ANNEXE V.2 : DEVIATION DU FAISCEAU PRIMAIRE PAR LE CHAMP MAGNETIQUE DE LA SOURCE.....</b>	<b>171</b>
<b>ANNEXE V.3: ALBUM PHOTO.....</b>	<b>173</b>
<b>ANNEXE VI: PLANS D'ENSEMBLE.....</b>	<b>177</b>



## ANNEXE I.1 : Dipôle magnétique

Un dipôle magnétique sert à dévier le faisceau d'ions ou à séparer ses constituants par leur rapport masse sur charge. Dans ce dernier cas, et associé à un dispositif d'analyse, on parle de spectromètre de masse.

Le champ magnétique est assuré par deux bobines constituées de conducteurs cuivre de section carré, creux afin de permettre un refroidissement par circulation d'eau, nécessaire à la stabilité de la relation  $B = f(I)$ . La chambre à vide est enchâssée entre deux culasses en fer [Gau-00].

A l'entrée dans le dipôle, les ions de charge  $q$  subissent la force de Lorentz :

$$\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

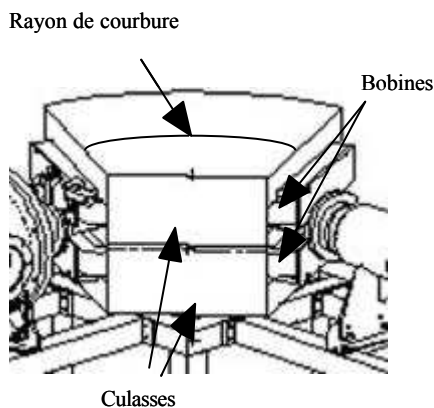
Le champ magnétique étant orthogonal à la vitesse des ions incidents, l'équation précédente peut s'écrire :

$$m \frac{v^2}{\rho} = qvB \quad \text{où } \rho \text{ est le rayon de courbure de la trajectoire,}$$

soit encore :

$$B\rho = \frac{p}{q}$$

1)



2)

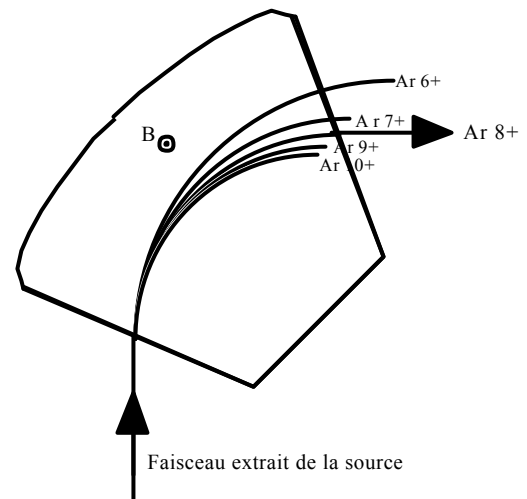


Figure 1 et 2 : Vue d'ensemble du dipôle et déviation d'un faisceau par le champ magnétique [Gau-00]

Cette expression peut être utilisée quelque soit le régime de vitesse des particules. Lorsque la vitesse est importante,  $p$  doit être évaluée selon son expression relativiste C'est le cas pour des ions de hautes énergies qui traversent les dipôles de l'ALPHA ( $v \approx 0,4.c$ ).

Dans le cas du banc de test du Hall D, les ions accélérés sous une différence de potentiel  $V$  pénètrent dans le dipôle avec une vitesse :

$$v = \sqrt{\frac{2qV}{m}}$$

Par exemple, sous une tension de 14 kV, les ions  $^{40}\text{Ar}^{1+}$  ont une vitesse de  $2,59 \cdot 10^5$  m/s.

La déviation du faisceau peut alors s'écrire :

$$B\rho = \sqrt{\frac{2mV}{q}}$$

A chaque rapport  $m/q$  correspond un rayon de courbure particulier qui permet la sélection de l'ion.

Le dipôle du banc 2 du Hall D possède un angle de  $102^\circ$ , un rayon de courbure de 0,35 m. Son maximum de champ est de 0,33 T soit un  $(B\rho)_{\text{max}} = 0,115$  T.m. C'est la variation de l'intensité du dipôle ( de 20 à 265 A) qui permet de fixer la valeur du champ.

La résolution du dipôle est défini de la manière suivante :

$$R = \frac{C_d}{4\Delta x}$$

$C_d$  est le coefficient de dispersion transversale, en m (dans le cas présent  $C_d = 4\rho$ ) et  $\Delta x$  est l'enveloppe du faisceau (en m) [Mau-98].

Pour une enveloppe de faisceau de  $\pm 4$  mm, on obtient une résolution de 87,5.

On peut comparer cette résolution à la résolution globale du spectromètre défini sur les pics du spectre obtenu par la relation:

$$R = \frac{m}{\Delta m}$$

$m$  est la masse de l'espèce étudiée et  $\Delta m$  est la largeur à mi hauteur du pic correspondant dans le spectre. On obtient alors  $R \approx 65$ .

Cette résolution est faible comparée aux résolutions de 10000 des spectromètres de masse utilisés en chimie organique, mais elle est suffisante pour nous permettre de séparer les raies des espèces de faibles masses en présence dans la source d'ionisation  $1+$  qu'est MONO1000.

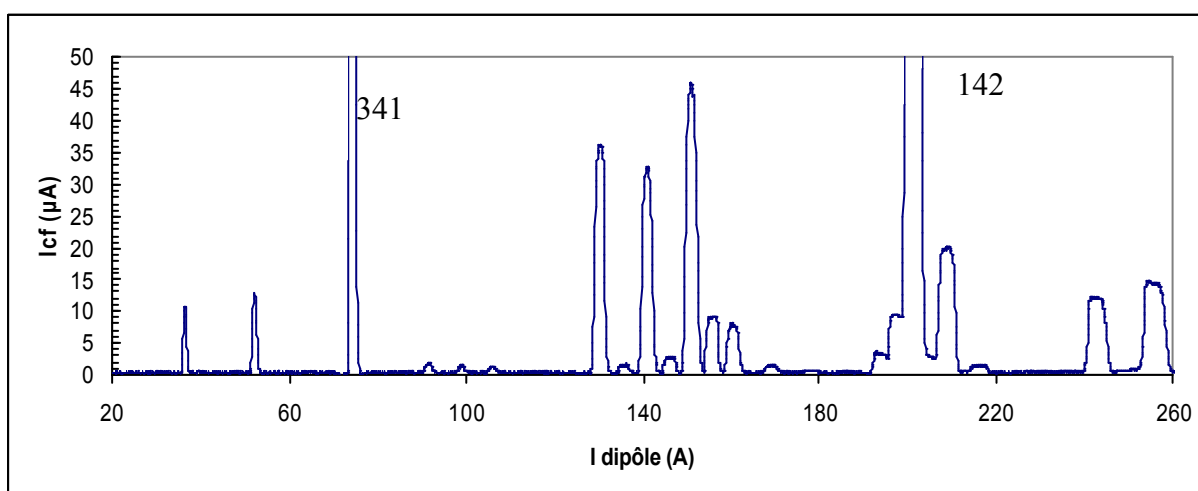


Figure3 : exemple de spectre obtenu avec le spectromètre du HallD

## ANNEXE II.1 : Profil du faisceau primaire jusqu'à SIRa

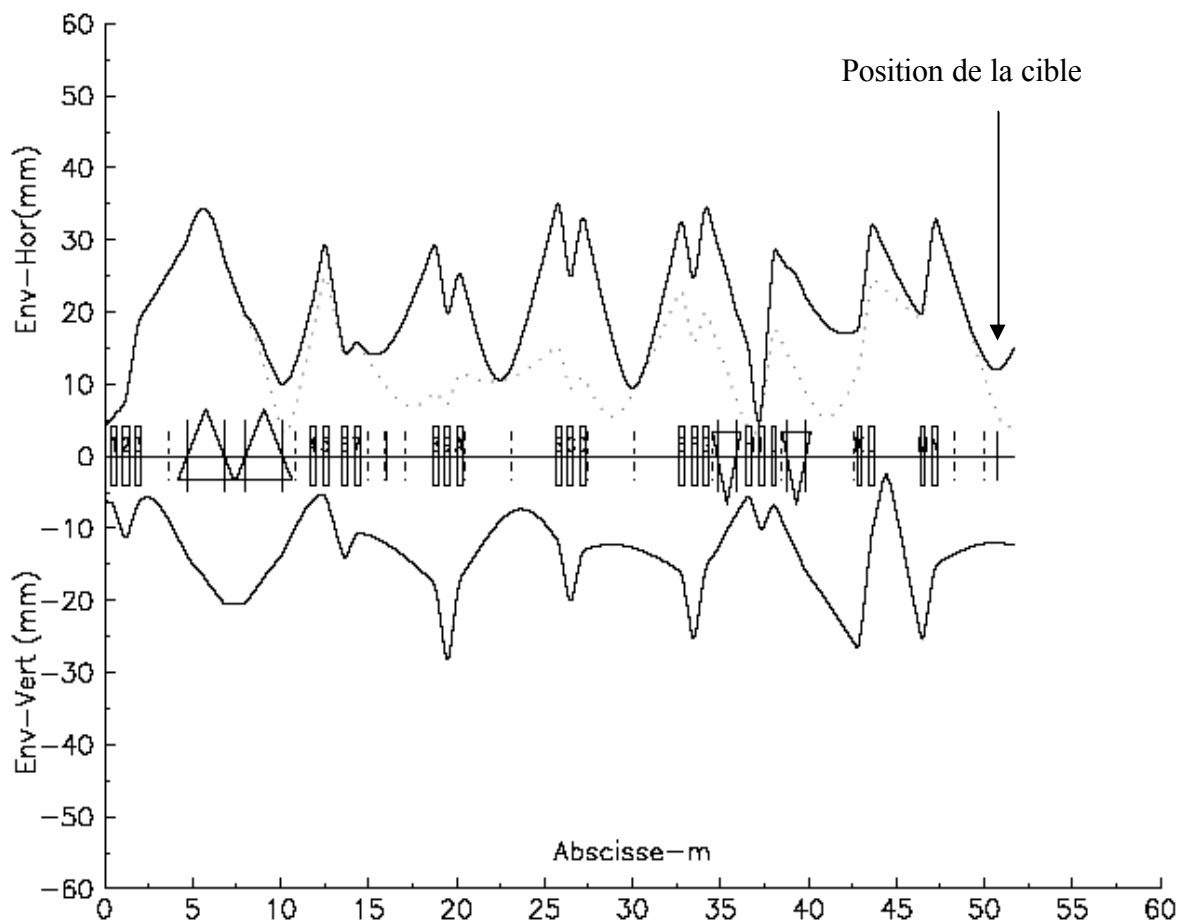
La figure suivante présente le profil du faisceau depuis SISSI jusqu'à la cible du dispositif dans la casemate de SIRa. (Calculs réalisés par F. Chautard, GANIL) La page suivante donne le plan des différents équipements présents sur la ligne en amont de la casemate, ainsi que la ligne d'analyse en aval.

—degradeur a D2 — 12 x 12 mm sur cible

Faisceau secondaire SISSI avec degradeur

$E_{H,V} = 32.00 \times 32.00 \pi$  mm\*mrd  $E_{N,V,W} = 4.40 \times 6.15$  mm  $\Delta W/W = 4.000$  pm

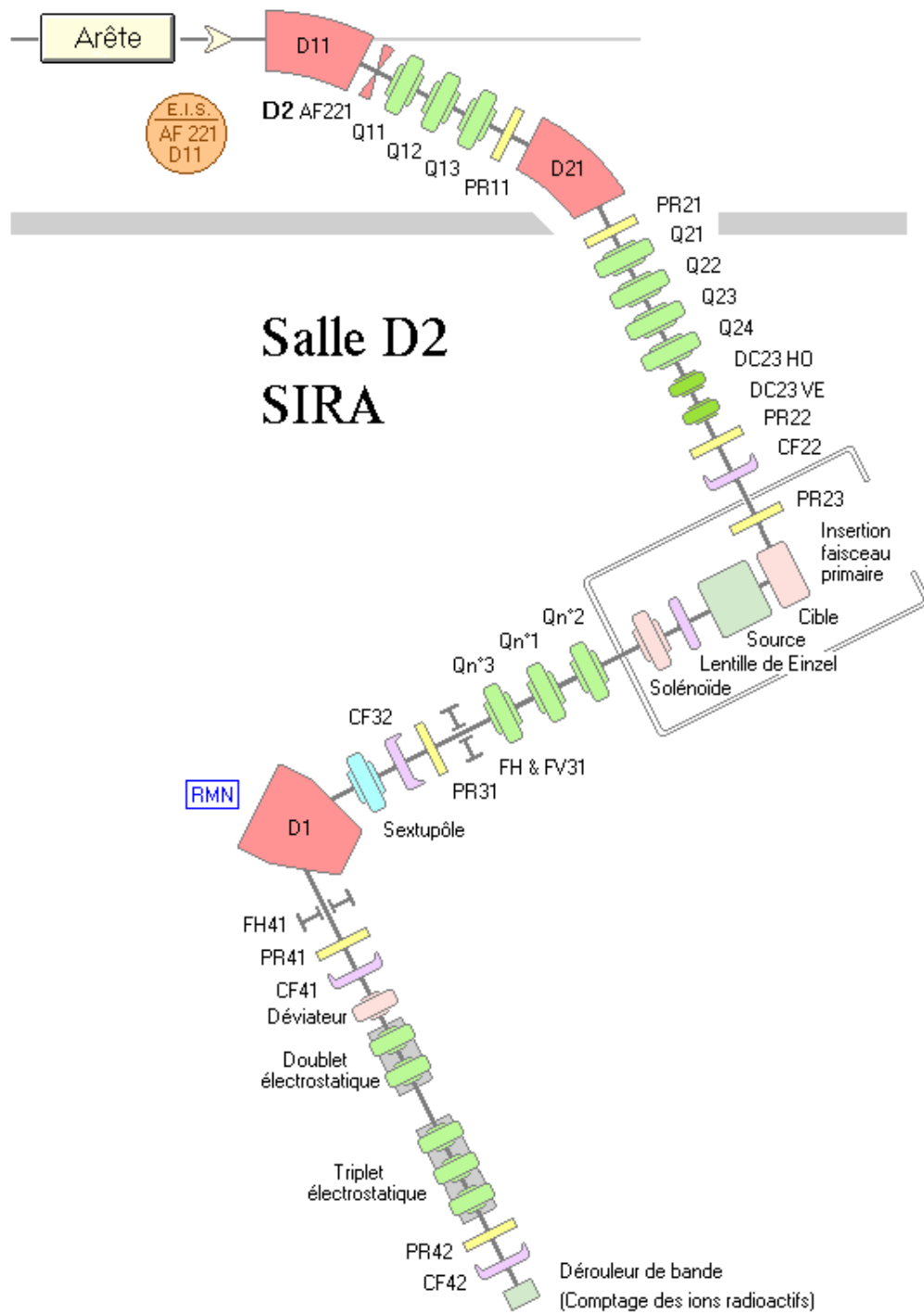
17-MAR-03 14z50z14 Fich. don. -degd2.dat



G Quad. -T/m.  $B_{max}$  Sol. -T a  $B \cdot \rho = 2.88000$  T\*m

1) L3Q31 +5.6000	7) L3Q44 +4.9021	D)ARQ16 +7.6502	J)D2Q13 +13.3000
2) L3Q32 -12.0922	B)ARQ11 +7.7081	E)ARQ21 +7.6502	K) D2Q21 -9.8255
3) L3Q33 +5.6000	9)ARQ12 -12.2938	F)ARQ22 -12.1666	L) D2Q22 +8.2609
4) L3Q41 -1.1937	A)ARQ13 +7.7081	G)ARQ23 +7.6502	M) D2Q23 -10.9944
5) L3Q42 +9.3011	B)ARQ14 +7.7081	H)D2Q11 +13.3000	N) D2Q24 +8.6446
6) L3Q43 -10.0530	C)ARQ15 -12.2938	I)D2Q12 -14.0000	

Responsable : M. ALVES CONDE



# Salle D2 SIRA

Mise à jour 07-11-02

## ANNEXE II.2 : Tableau comparatif des matériaux pouvant être utilisés comme partie chauffante

Nom	formule	Pt fusion °C	Pvap (mb) à 2000°C	densité à 20°C g/cm <sup>3</sup>	cap cal (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	cond therm (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	résistivité (10 <sup>-6</sup> Ohm.m)	
Carbure de Tantale	TaC	3880	3,50E-07	13,9	240 (300 2000K)	60		Très cassant
Carbone (graphite)	C	3727	1,50E-04	2,3	712	240 (400K)	13	
Carbure de Zirconium	ZrC	3540		6,9				
Tungstène	W	3410	8,30E-10	19,3	133	173	0,05	
Rhénium	Re	3180	7,40E-08	21	138	48	0,18	
Carbure de Titane	TiC	3140	1,40E-05	4,9	17	710	2	
Oxyde de Thorium	ThO <sub>2</sub>	3050	3,20E-04	9,9				
Nitrure de Bore	BN	3000	> 1	2,3	800	260	2.10e18	
Osmium	Os	3000	4,30E-06	22,6	131	87,6	0,08	
Tantale	Ta	2996	8,50E-09	16,6	140	57,5	0,13	ductile à chaud
Carbure de Tungstène	W <sub>2</sub> C	2860	2,30E-06	17,1	300 (25°C)	50	0,1	
Oxyde de Hafnium	HfO <sub>2</sub>	2812	1,50E-04	9,7	1120 (20 à 1000°C)	42	1300 500 (1100°C)	
Carbure de Silicium	SiC	2700	1,20E-01	3,2	1000°C)	13 (1200°C)	50000 (1500°C)	
Dioxyde de Zirconium	ZrO <sub>2</sub>	2700	3,00E-05	5,6	500 790 (1600°C)	1,9 2,3 (1600°C)	50000 (1500°C) 6600 (2000°C)	



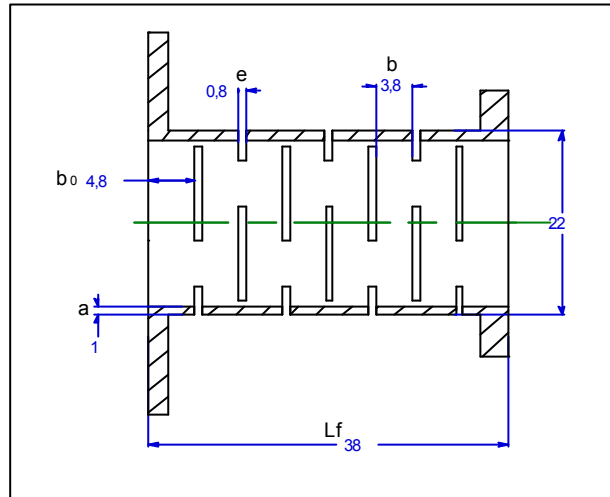


### ANNEXE II.3 : Calcul de la résistance électrique du four

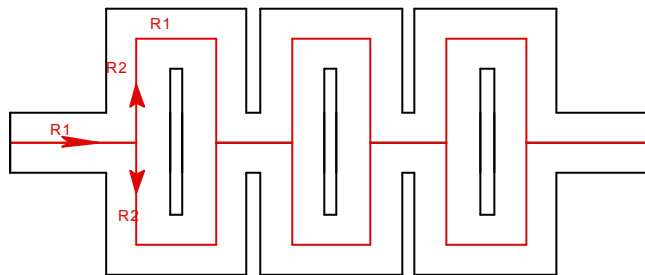
#### Description :

Une série de  $n$  fois trois fentes radiales forme trois circuits électriques de même résistance en parallèle.

#### Schéma :

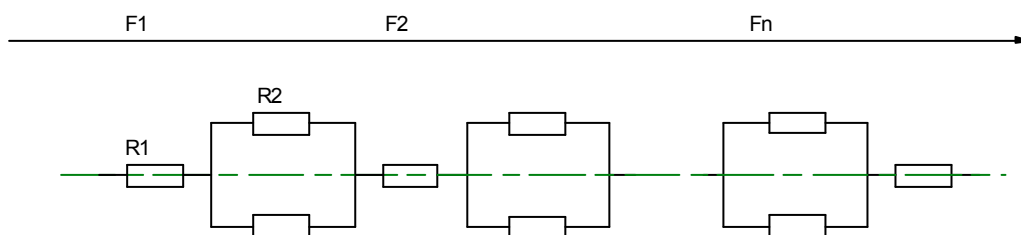


Un circuit électrique se présente donc sous la forme suivante :



#### Schéma électrique équivalent :

$R1$  est la résistance équivalente à un parcours élémentaire longitudinal  
 $R2$  est la résistance équivalente à un parcours élémentaire latéral



### Calcul de la résistance équivalente d'un chemin :

L est le chemin parcouru et S la section traversée

$$L = L_1 + L_2 + L_3$$

Et pour la résistance :

$$R = \rho \left( \frac{L_1}{S_1} + \frac{L_2}{S_2} + \frac{1}{2} \frac{L_3}{S_3} \right)$$

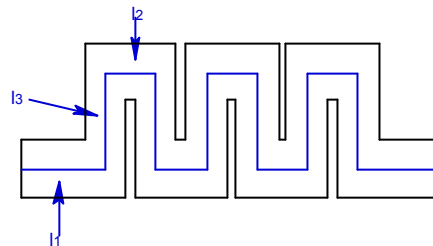
R a été calculée avec les approximations suivantes :

$$1/ \quad S_2 = S_1 = (31.5/360) * \pi * (Rf^2 - (Rf \cdot a)^2) \\ = 0.274 \cdot a \cdot (2Rf \cdot a)$$

$$2/ \quad b_0 = b$$

qui permettent d'écrire:

$$\begin{aligned} L_1 &= 2l_1 = 2(b + e + b/2) \\ &= 3b + 2e \\ L_2 &= (n-2) \cdot b \\ &= (n-2) \cdot (b + e) \\ L_3 &= (n-1) \cdot b \\ &= (n-1) \cdot \frac{\pi}{3} \cdot (Rf - 0.5 \cdot a) \\ S_3 &= a \cdot b \end{aligned}$$



Résultat :

La feuille de calcul ci-dessous permet de calculer la résistance équivalente du four en fonction du nombre de fentes et de la largeur de celles ci.

RESISTANCE D'UN FOUR CYLINDRIQUE A FENTES				Résultats:																																																																			
<b>Description:</b> Une série de n fois trois fentes radiales forment 3 circuits électriques de même résistance en parallèle.																																																																							
Longueur du four (m)	lf =	0,038	Matériau :	Carbone																																																																			
Rayon ext du four (m)	Rf =	0,011	Résistivité (Ohm.m) :	0,000013	par défaut																																																																		
Nombre de fentes :	n =	7	autre valeur ?	non																																																																			
			Épaisseur du four (m) :	0,001																																																																			
e : largeur des fentes b : largeur d'un "circuit" R : résistance totale des 3 circuits en //																																																																							
				<table border="1"> <thead> <tr> <th>e</th> <th>b</th> <th>R (Ω)</th> <th>R(un circuit)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.0002</td><td>0.0046</td><td>0.0599</td><td>0.1796</td></tr> <tr><td>0.0004</td><td>0.0044</td><td>0.0611</td><td>0.1833</td></tr> <tr><td>0.0006</td><td>0.0042</td><td>0.0624</td><td>0.1873</td></tr> <tr><td>0.0008</td><td>0.0041</td><td>0.0639</td><td>0.1917</td></tr> <tr><td>0.001</td><td>0.0039</td><td>0.0655</td><td>0.1965</td></tr> <tr><td>0.0012</td><td>0.0037</td><td>0.0672</td><td>0.2017</td></tr> <tr><td>0.0014</td><td>0.0035</td><td>0.0692</td><td>0.2075</td></tr> <tr><td>0.0016</td><td>0.0034</td><td>0.0713</td><td>0.2138</td></tr> <tr><td>0.0018</td><td>0.0032</td><td>0.0736</td><td>0.2209</td></tr> <tr><td>0.002</td><td>0.0030</td><td>0.0763</td><td>0.2288</td></tr> <tr><td>0.0022</td><td>0.0028</td><td>0.0792</td><td>0.2376</td></tr> <tr><td>0.0024</td><td>0.0027</td><td>0.0825</td><td>0.2476</td></tr> <tr><td>0.0026</td><td>0.0025</td><td>0.0864</td><td>0.2591</td></tr> <tr><td>0.0028</td><td>0.0023</td><td>0.0908</td><td>0.2723</td></tr> <tr><td>0.003</td><td>0.0021</td><td>0.0959</td><td>0.2876</td></tr> </tbody> </table>				e	b	R (Ω)	R(un circuit)	0.0002	0.0046	0.0599	0.1796	0.0004	0.0044	0.0611	0.1833	0.0006	0.0042	0.0624	0.1873	0.0008	0.0041	0.0639	0.1917	0.001	0.0039	0.0655	0.1965	0.0012	0.0037	0.0672	0.2017	0.0014	0.0035	0.0692	0.2075	0.0016	0.0034	0.0713	0.2138	0.0018	0.0032	0.0736	0.2209	0.002	0.0030	0.0763	0.2288	0.0022	0.0028	0.0792	0.2376	0.0024	0.0027	0.0825	0.2476	0.0026	0.0025	0.0864	0.2591	0.0028	0.0023	0.0908	0.2723	0.003	0.0021	0.0959	0.2876
e	b	R (Ω)	R(un circuit)																																																																				
0.0002	0.0046	0.0599	0.1796																																																																				
0.0004	0.0044	0.0611	0.1833																																																																				
0.0006	0.0042	0.0624	0.1873																																																																				
0.0008	0.0041	0.0639	0.1917																																																																				
0.001	0.0039	0.0655	0.1965																																																																				
0.0012	0.0037	0.0672	0.2017																																																																				
0.0014	0.0035	0.0692	0.2075																																																																				
0.0016	0.0034	0.0713	0.2138																																																																				
0.0018	0.0032	0.0736	0.2209																																																																				
0.002	0.0030	0.0763	0.2288																																																																				
0.0022	0.0028	0.0792	0.2376																																																																				
0.0024	0.0027	0.0825	0.2476																																																																				
0.0026	0.0025	0.0864	0.2591																																																																				
0.0028	0.0023	0.0908	0.2723																																																																				
0.003	0.0021	0.0959	0.2876																																																																				

## ANNEXE II.4 : Durée de vie du four en fonction de la température

La figure 1 présente les mesures du taux d'évaporation sur différents carbones, réalisées à différentes températures. Par définition le taux d'évaporation s'exprime de la façon suivante [Lan-98]:

$$R = \frac{m}{S.t} \quad [ \text{kg/m}^2.\text{s} ]$$

où  $m$  est la masse du solide déjà évaporée,  $S$  sa surface et  $t$  le temps.

En considérant un four cylindrique d'épaisseur  $e$ , un calcul rapide du temps nécessaire à l'évaporation totale du four mène à :

$$\tau = \frac{\rho.e}{2R}$$

où  $\rho$  est la masse volumique du matériau.

La mesure des taux d'évaporation permet donc d'estimer par la suite la durée de vie du four. Cette durée de vie, comme on peut le voir au § II.4.1.3, dépend fortement de la température.

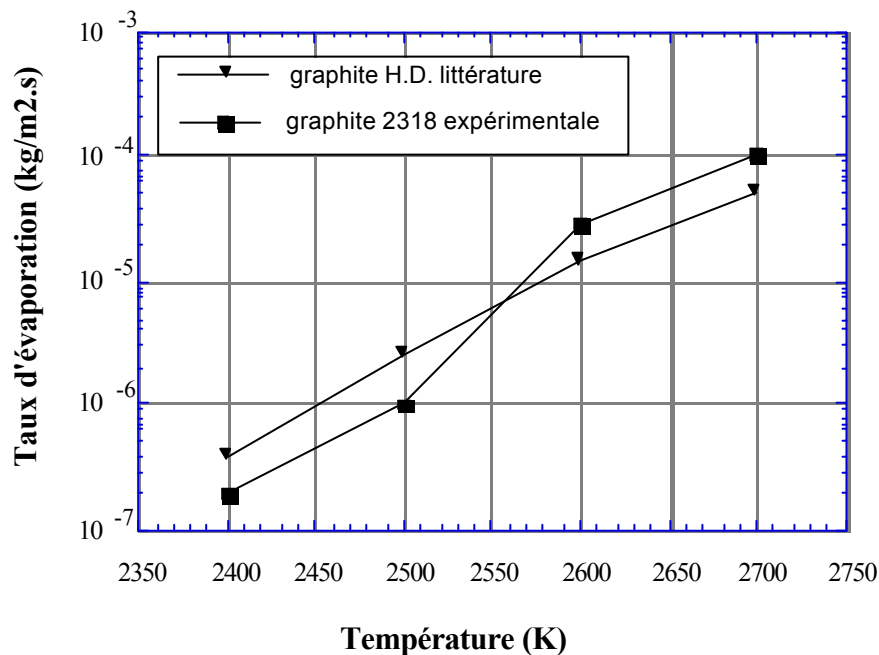


Figure 1- Taux d'évaporation en fonction de la température [Lan-01], [Fou-97].

Données utilisées :

$$\rho(\text{graphite}) = 1900 \text{ kg/m}^3$$

Épaisseur du four : 1 mm

Lorsque le carbone s'évapore, les sections du conducteur diminuent et la résistance augmente. C'est ce que l'on peut observer sur la figure 2, où sont représentés plusieurs mesures de l'évolution de la résistance en fonction de la température, à différents stades de la « vie » du four.

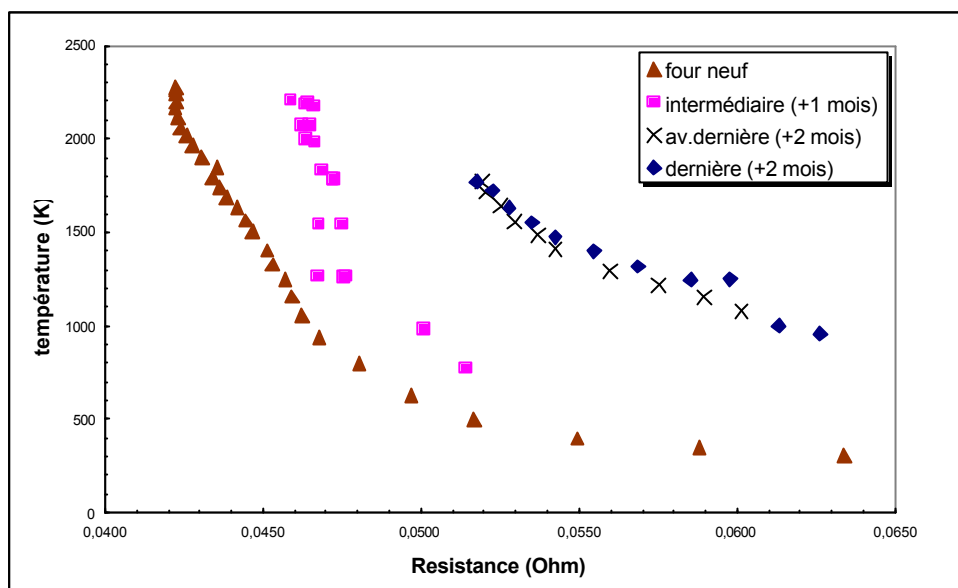


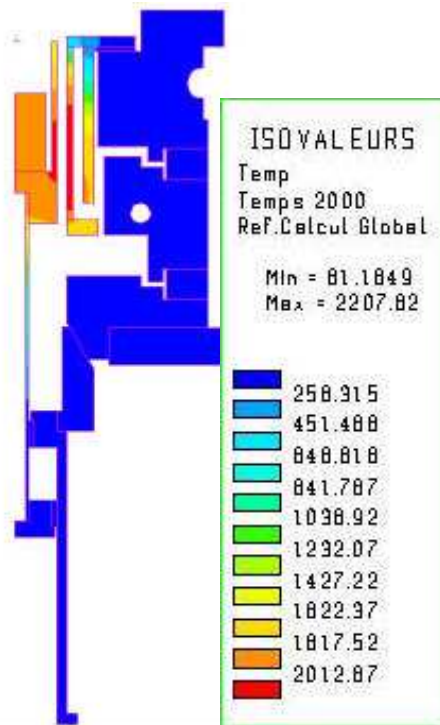
Figure 2 : Evolution de la résistance du four au cours du temps en fonction de la température de la cible. La courbe intermédiaire représente un ensemble de valeurs enregistrées sur une durée d'un mois. Les dernières mesures sont réalisées au pyromètre

## ANNEXE II.5 : Simulations Systus des températures du bloc four

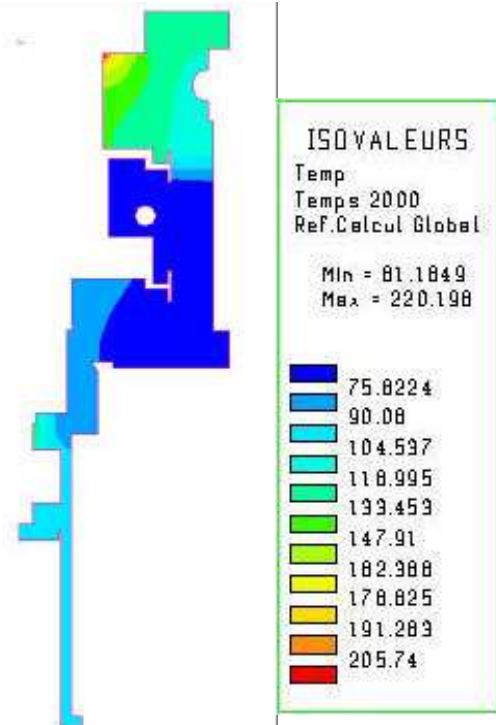
Récapitulatifs des résultats présentés dans le rapport de S.Tanguy [Tan-03].

Pièce	matériaux	Température max. en °C	Température min en °C
Cible	Carbone	2024	1909
Four	Carbone	2220	155
Cibles: Tmoy(cas 1)= 1962°C ; Tmoy(cas 2)= 1980°C			
Conteneur	Carbone	2099	1514
Réflecteur	Carbone	1849	144
Tige	Molybdène	1960	129
Bague 1	Carbone	173	147
Bague 2	Carbone	127	126
Attache	Inox	132	127
Guidage	Inox	162	112
Cône	Aluminium	113	105
Couronne	Aluminium	75	66
Guidage femelle	Cuivre	82	65
Alumine 13		70	65
Alumine 15		116	70
Bride four	Aluminium	74	61
Carter four	Aluminium	220	108

Environnement général



Points chauds sur la carcasse





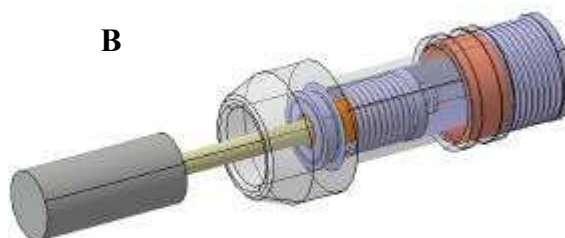
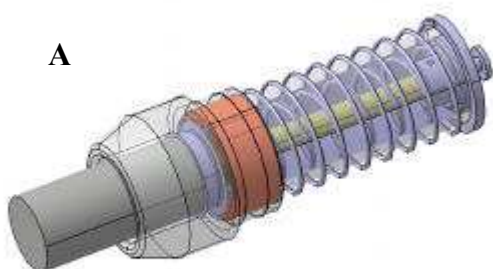
---

**ANNEXE II.6 : Schémas du porte cible**

---

A, B et C : Schémas et photo d'un porte-cible et de son mouvement télescopique.

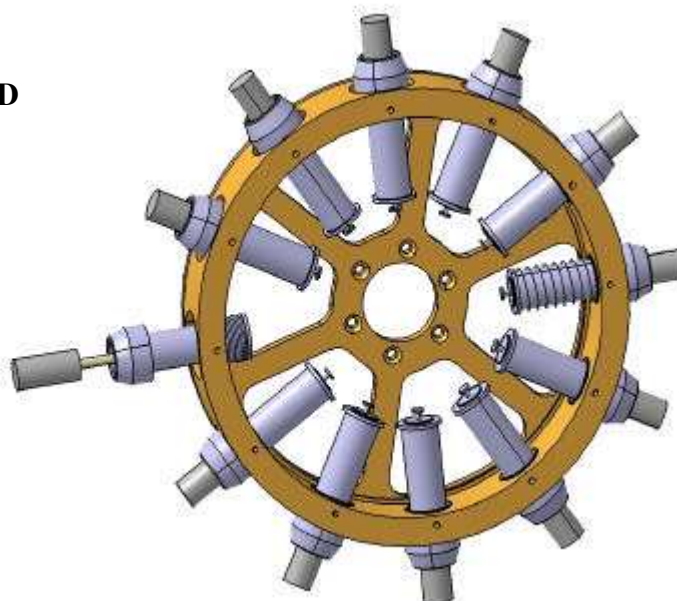
D : Insertion des 12 porte-cibles dans couronne de rotation.



**C**



**D**







## ANNEXE II.7 : Principes d'une source ECR. Caractéristiques de MONO1000

Le principe d'une source à Résonance Cyclotronique Electronique R.C.E [Ge1-96] est basé sur l'existence d'un plasma (gaz de particules chargées, ions et électrons) confiné par un champ magnétique et chauffé par un onde électromagnétique grâce au phénomène de résonance (cyclotronique électronique) [Wo1-95]

### Le confinement

Le confinement du plasma est assuré par un puit magnétique dans lequel les particules sont piégées par un effet de miroir. Dans le cas de MONO1000, cette structure magnétique est assurée par deux couronnes d'aimants qui permettent de créer un champ axial et un champ radial à deux maxima et un minimum (figure 1)

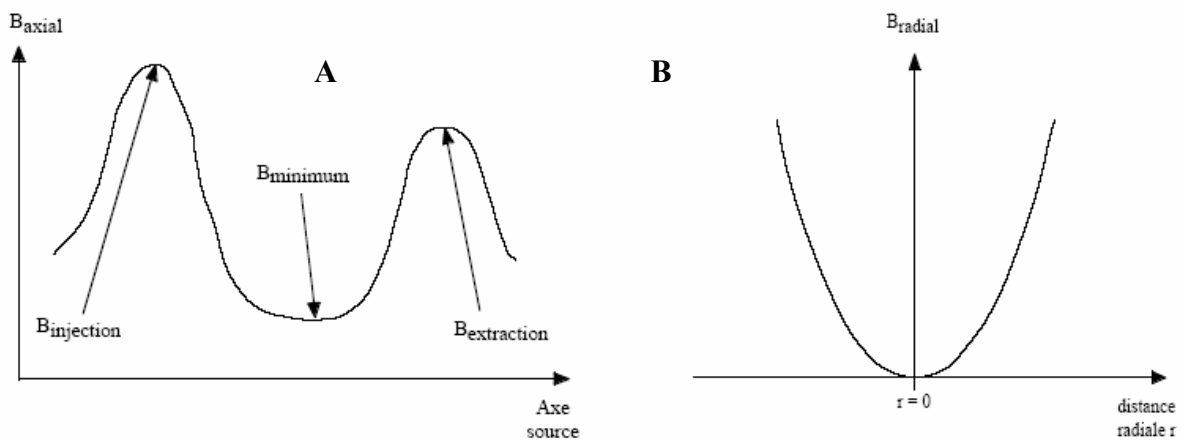


figure 1 : A- Champ magnétique axial B- Champ magnétique radial

Le champ magnétique crée a donc un minimum au centre et croît jusqu'aux parois de la source. Cette structure est souvent appelée « structure à minimum  $|B|$  ». Ce confinement agit principalement sur les électrons, mais en raison des interactions coulombiennes présentes dans un plasma, piéger les électrons revient à piéger les ions.

Effet miroir :

Un électron plongé dans un champ magnétique est soumis à la force de Lorentz ( $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$ ) qui lui fait adopter une trajectoire hélicoïdale autour de la ligne de champ. Dans ce mouvement, l'énergie cinétique et le moment magnétique de l'électron sont conservés :

$$\begin{cases} E_c = E_{//} + E_{\perp} = \frac{1}{2} m_e (v_{//} + v_{\perp})^2 \\ \mu_e = \frac{E_{\perp}}{B} \end{cases}$$

Les composantes // et  $\perp$  sont les composantes parallèles et orthogonales aux lignes de champ. Lorsque le champ magnétique s'intensifie, la composante transverse de l'énergie cinétique augmente également. Par conservation de l'énergie cinétique, cela entraîne une diminution de la composante parallèle de l'énergie cinétique, ainsi que de  $v_{//}$ . Lorsque  $E_{//}$  s'annule l'électron est repoussé en sens inverse vers les lignes de champ décroissant. C'est l'effet de miroir magnétique qui permet le confinement. Le rapport miroir R est un paramètre important des sources RCE :

$$R = \frac{B_{\max}}{B_{\min}}$$

Il doit être le plus grand possible et au moins égal à 2 pour augmenter le temps de confinement des électrons dans le plasma.

### *Chauffage des électrons par résonance cyclotronique*

L'ionisation est en grande partie réalisée par interaction ion-électron ou atome-électron. Pour que l'atome soit ionisé, il faut que l'énergie des électrons qu'il rencontre soit plus grande que son potentiel d'ionisation.

Les électrons en mouvement hélicoïdal autour des lignes de champ ont une pulsation cyclotron  $\omega_c$ , de la forme :

$$\omega_c = \frac{qB}{m_e}$$

Une onde électromagnétique hyper fréquence  $\nu_{HF}$  injectée dans le plasma entre en résonance avec la fréquence cyclotron de l'électron à chaque fois que celui ci traverse une zone de champ telle que :

$$B_{rés} = \frac{2\pi m_e}{q_e} \nu_{HF}$$

Selon que les deux fréquences sont en phase ou non, l'électron peut gagner ou perdre de l'énergie. Mais l'électron confiné traversera de nombreuses fois la zone de résonance et globalement gagnera de l'énergie.

La source MONO1000 fonctionne avec une onde HF de 2,45 GHz, ce qui conduit à un champ résonant à 0,087 T.

La puissance HF utilisée va de 20 à 200 W.

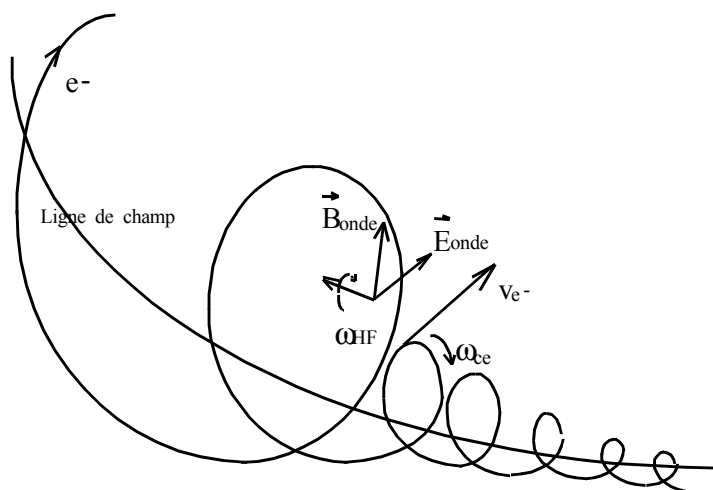
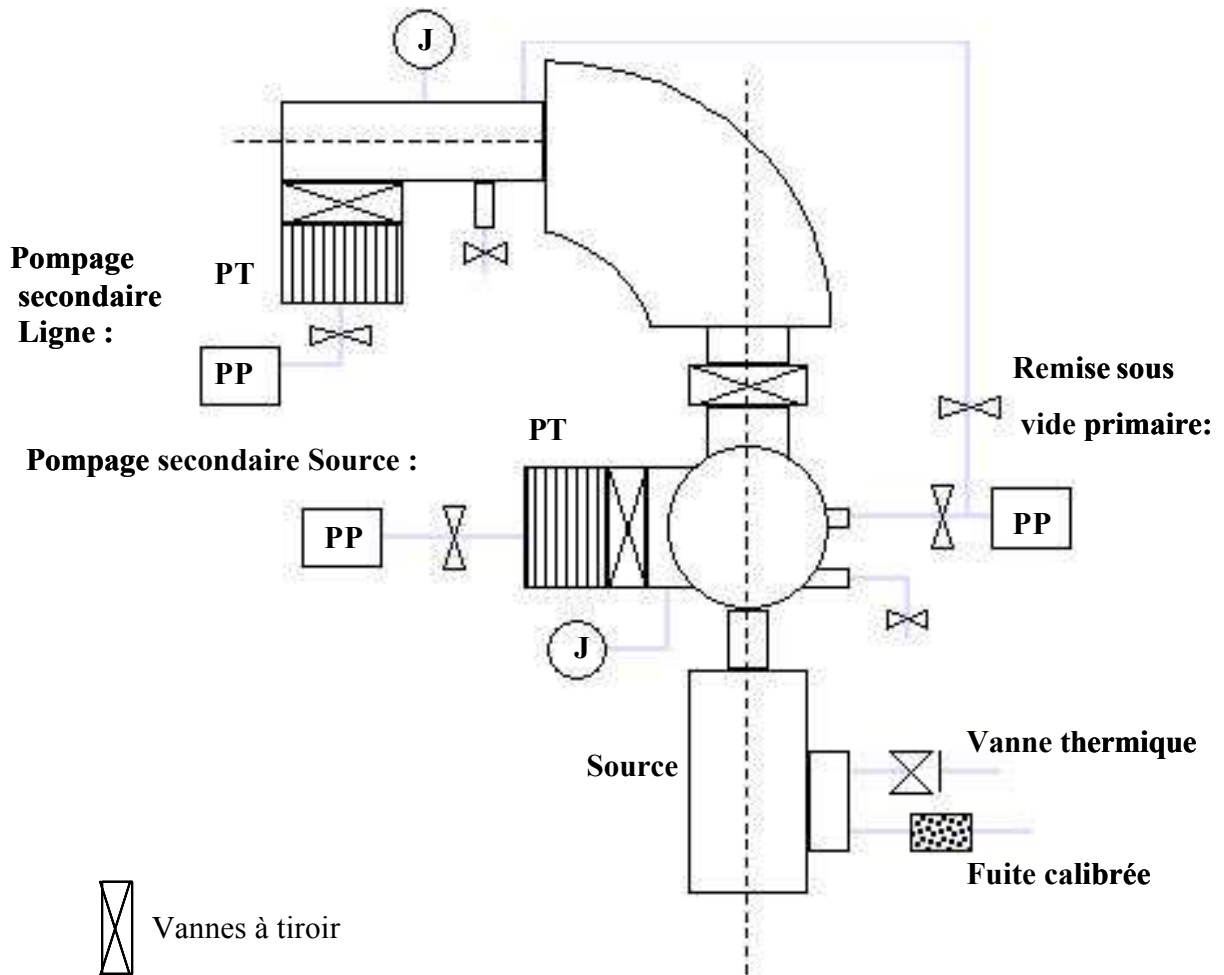




Figure 2: Chauffage ECR des électrons

## ANNEXE III.1 : Gestion du vide

Ce schéma récapitule la gestion du vide du banc de test du Hall D ainsi que l'injection de gaz dans la source.



 Vannes à tiroir

 Vannes à soufflet

J : Jauges de pression (Pirani et Penning)

PP : Pompes primaires

PT : Pompes turbomoléculaires



---

**ANNEXE III.2: Mesure des temps d'ionisation : réponse à un pulse de gaz**


---

Le comportement de la source déduit de l'expérience par P. Jardin et al. [Jar-03] permet de considérer pour la source une fonction de transfert du premier ordre qui peut s'écrire de la manière suivante (en variables de Laplace) :

$$T_1(p) = \frac{1}{p+\lambda}$$

La vanne rapide électromagnétique, que l'on peut considérer en première approximation comme un circuit «L-R »,se comporte également comme un «passe bas » du premier ordre [Zhi-95], [Poh-02] dont la fonction de transfert peut s'écrire :

$$T_2(p) = \frac{1}{p+\alpha}$$

Dans la mesure où les temps caractéristiques de la vanne et de la source sont beaucoup plus grands que la durée d'injection du gaz, on peut considérer cette injection comme une véritable impulsion d'amplitude A.

Le signal de sortie s'écrit donc de la façon suivante :

$$S(p) = T_1(p).T_2(p).A$$

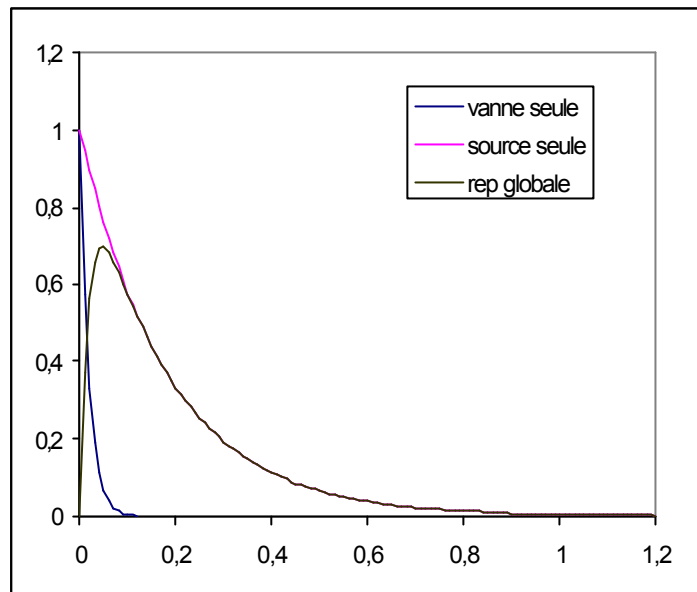
. Le plasma de la source ne reçoit donc pas directement l'impulsion mais la réponse conjuguée de la vanne et de l'effusion du gaz à travers la source à cette impulsion. A la sortie de la source, on obtient alors un signal temporel de la forme suivante :

$$S(t) = L^{-1}[S] = A \frac{1}{\lambda - \alpha} (e^{-\alpha t} - e^{-\lambda t})$$

où  $L^{-1}$  est la transformée inverse de Laplace.

La figure 1 illustre la réponse  $S(t)$  dans le cas suivant :  $A = 1$  ;  $\alpha = 60$  et  $\lambda = 5.8$

Figure 1 :



On observe que l'on peut rapidement considérer qu' en première approximation la décroissance n'est guidée que par l'exponentielle dont la constante est la plus faible.

Dans l'exemple précédent, utiliser l'expression approchée suivante :

$$S(t) \propto e^{-\lambda t}$$

à partir de  $t = 0.083$  s revient à commettre une erreur sur  $S$  inférieure à 1%

En superposant ce modèle aux réponses obtenues, on obtient un bon accord (coefficient de corrélation de 0.998), comme l'illustrent les figures 2 et 3.

Les exemples précédents permettent de faire deux observations :

- 1) On obtient pour l'ensemble du processus fermeture de la vanne et effusion du gaz une constante de temps qui varie entre 10 et 20 ms.
- 2) La différence entre la constante de temps de la vanne et celle de la source permet de mesurer directement la constante de temps de la source dans la phase décroissante de la réponse globale.

Figure 2 :

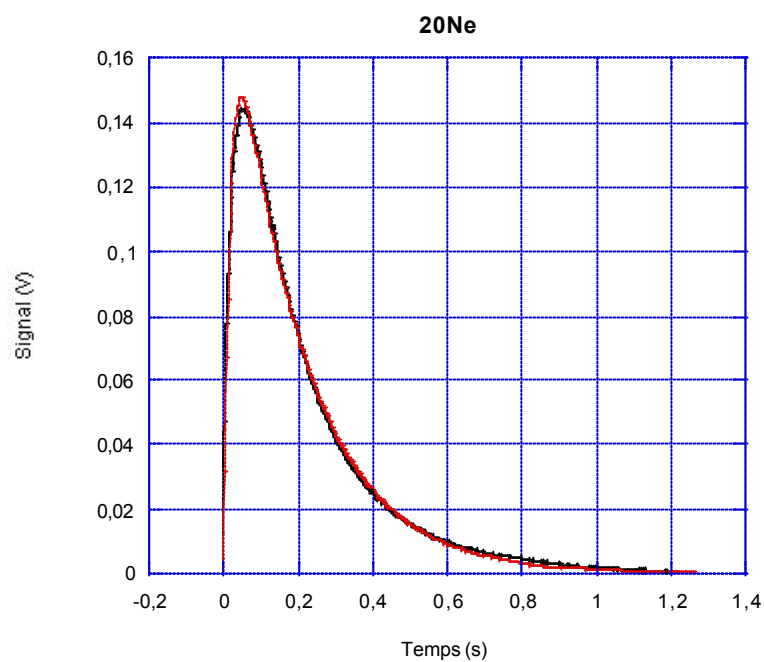
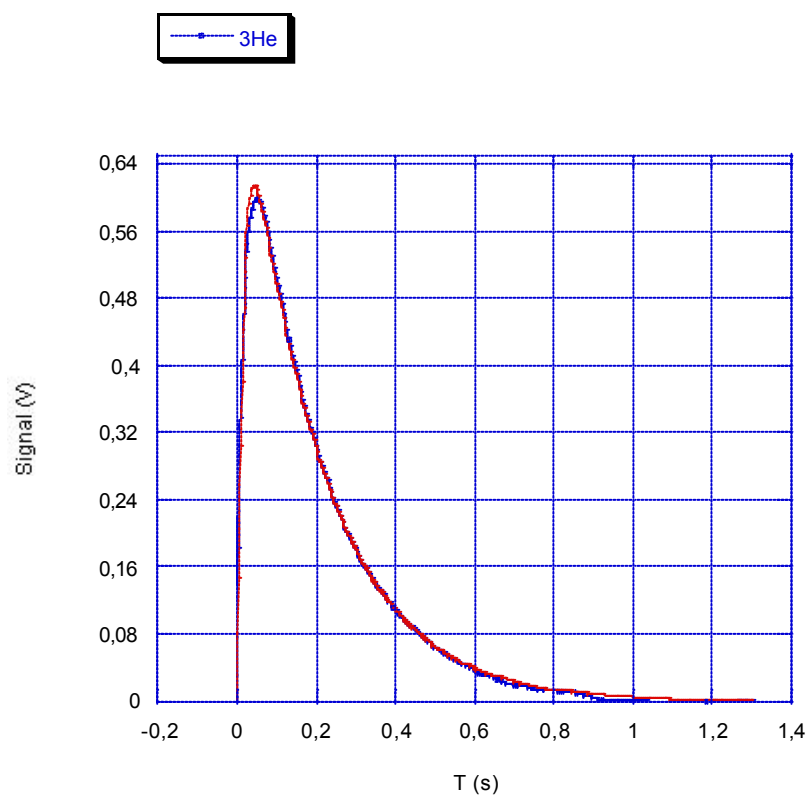


Figure 3 :







## ANNEXE IV.1: Principe du pyromètre optique

### 1 Notions de base et définitions

Les grandeurs qui interviennent dans ce paragraphe ont été rassemblées dans le tableau suivant [Cab-90]:

Grandeur	Symbole	Unités
Longueur d'onde	$\lambda$	m
Angle solide	$\Omega$	sr
Surface émissive	S	m <sup>2</sup>
Flux spectral	$\Phi_\lambda$	W/m <sup>1</sup>
Flux total	$\Phi$	W
Luminance spectrale	$l_\lambda$	W.m <sup>-3</sup> .sr <sup>-1</sup>
Luminance totale	$L = \int_0^\infty l_\lambda d\lambda$	W.m <sup>-2</sup> .sr <sup>-1</sup>
Exitance spectrale	$m_\lambda = \int_{2\pi} l_\lambda d\Omega$	W.m <sup>-3</sup>
Exitance totale	$M = \int_0^\infty \int_{2\pi} l_\lambda d\lambda d\Omega$	W

### 2 Pyromètre mono-chromatique

#### 2-1- Principe de mesure de la température avec un pyromètre

Le pyromètre chromatique mesure pour une longueur d'onde et une température données le flux spectral émis par une surface  $\Delta S$  dans un angle solide  $\Delta\Omega$  tel que

$$\Phi_\lambda = \int_{\Delta S \Delta\Omega} l_{\lambda,S} d\Omega dS \quad (1)$$

Cette mesure dépend donc

- des conditions de visée et de la géométrie de la source
- de la taille du point de visée du pyromètre dans son plan focale (on suppose que la source émettrice est dans ce plan)
- de la répartition de la luminance spectrale sur la surface S
- de la luminance spectrale de la source à la longueur d'onde choisie.

#### 2-2- Rayonnement du corps noir

La luminance spectrale  $l_{\lambda,T}^\circ$  en fonction de la température, établie par Planck pour un corps noir situé dans une enceinte fermée isotherme s'exprime de la façon suivante

$$l_{\lambda,T}^\circ = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \quad (2)$$

Avec  $C_1 = 1,19106 \cdot 10^{-16}$  W.m<sup>2</sup>.sr<sup>-1</sup> et  $C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$  mK.

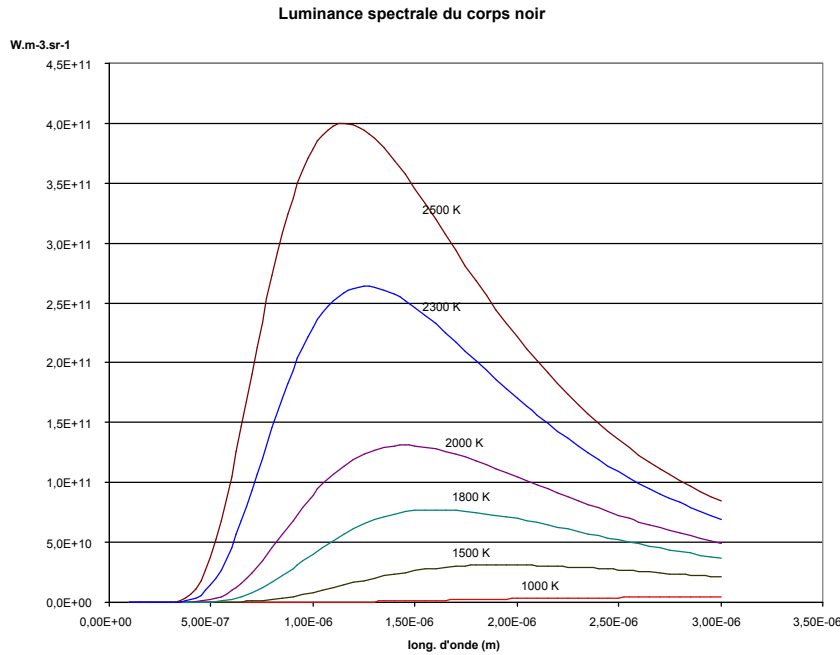


Figure 3- Luminance spectrale pour différentes températures

Dans le cas où  $\lambda T \ll C_2$ , la luminance spectrale peut s'écrire

$$\ell_{\lambda,T}^{\circ} = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} \quad (3) \quad (\text{approximation de Wien})$$

Dans le cas où  $\lambda T \gg C_2$ , la luminance spectrale peut s'écrire

$$\ell_{\lambda,T}^{\circ} = \frac{C_1}{C_2} \frac{T}{\lambda^4} \quad (4) \quad (\text{approximation de Rayleigh})$$

Dans le cas de ce travail, le pyromètre utilisé est réglé une longueur d'onde de l'ordre de  $\lambda = 1,1 \mu m$ . Pour que l'approximation de Wien soit applicable, il faut que

$$T \ll \frac{C_2}{\lambda} = 13080 K \quad (5)$$

Si on considère que la température maximale à mesurer est de l'ordre de 2300K, et que cette dernière doit être inférieure au minimum d'un facteur 10 à  $C_2 / \lambda$ , l'approximation ne semble pas justifiée.

Cependant, le pyromètre dont nous disposons est conçu de telle sorte qu'il fournit une température déduite de la luminance en utilisant cette approximation. Ce pyromètre ne pouvant pas être remplacé, son utilisation nécessite de connaître l'erreur qu'il induit sur la mesure de la température.

### **2-3- Evaluation de l'erreur commise sur la mesure de la température en utilisant l'approximation de Wien.**

L'erreur commise sur la détermination de la température en utilisant l'approximation de Wien peut s'écrire :

$$\Delta T_{Wien} = T - T_{Wien}$$

A partir d'une luminance spectrale  $\ell_{\lambda,T}^{\circ}$ , la température est déterminée à l'aide de la relation (2) ou (3) donc

$$\ell_{\lambda,T}^{\circ} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}$$

d'où l'on tire l'expression de  $T_{Wien}$  en fonction de  $T$ .  $\Delta T_{Wien}$  devient alors

$$\Delta T_{Wien} = T - \frac{C_2}{\lambda \ln \left( \frac{C_2}{\lambda T} - 1 \right)}$$

La figure suivante représente l'erreur  $\Delta T_{Wien}$  pour des longueurs d'onde de 0,85  $\mu\text{m}$  et 1,1  $\mu\text{m}$ . A 2300 K,  $\Delta T_{Wien}$  est égale à 1,5 K. Comparativement aux erreurs estimées dans les paragraphes suivants, cette erreur peut être négligée. Dans ce qui suit, nous nous placerons donc dans le cadre de l'approximation de Wien.

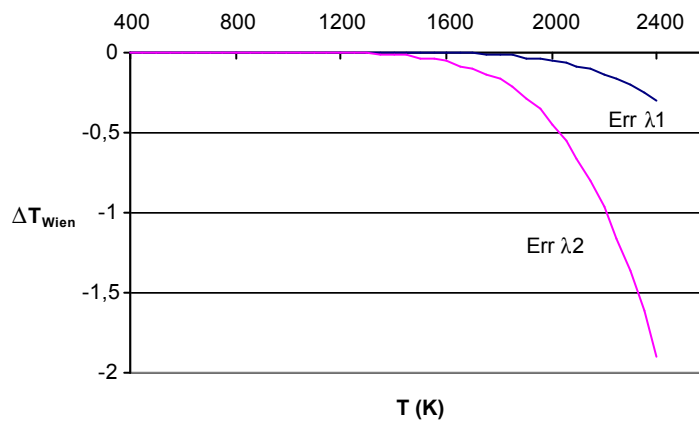


Figure 4- Tracé de  $\Delta T_{Wien}$  en fonction de  $T$  pour  $\lambda_1=0,85 \mu\text{m}$  et  $\lambda_2=1,1 \mu\text{m}$ .

## **2-4- Rayonnement des corps réels**

Par rapport à la mesure de la température d'un corps noir, la mesure de la température des corps réels par pyrométrie est affectée par l'effet de l'émissivité  $\epsilon_{\lambda,T}$  du corps considéré sur sa luminance :

$$\ell_{\lambda,T} = \epsilon_{\lambda,T} \cdot \ell_{\lambda,T}^{\circ} \quad (6)$$

### 2-5- Température de luminance

$\varepsilon_{\lambda,T}$  étant comprise entre 0 et 1, si une source présente une luminance  $\ell_\lambda$  à une température  $T$ , un corps noir présentera à la même longueur d'onde  $\lambda$  la même luminance pour une température  $T^\circ$ , inférieure à  $T$ . A partir des expressions (2) et (6) on établit la relation

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T^\circ} + \frac{\lambda}{C_2} \ln \varepsilon_\lambda \quad (7)$$

$T^\circ$  est appelée la température de luminance.

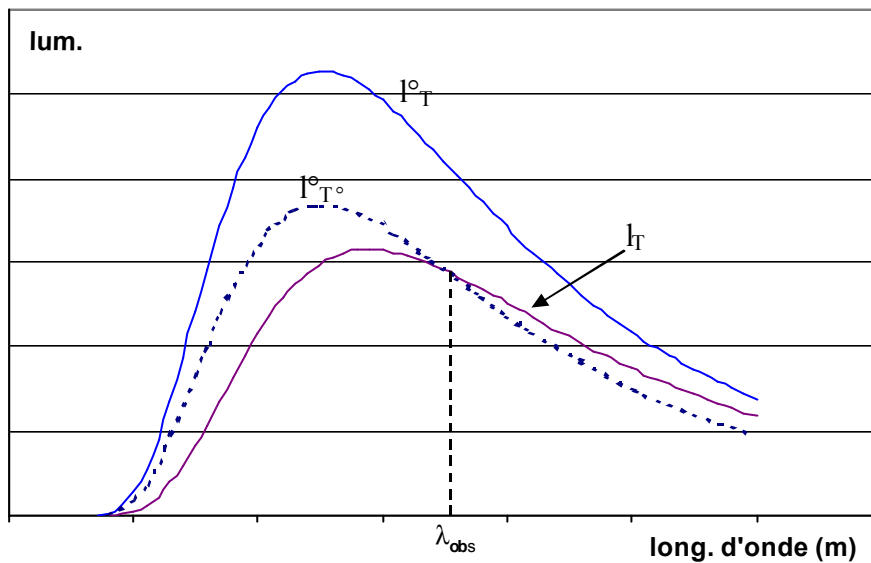


Figure 5- Dans ce cas la mesure consiste à égaliser la luminance observée avec celle issue d'une lampe de référence à la température  $T^\circ$ .

### 2-6- Incertitude sur la détermination de $T$ due à l'incertitude sur la mesure de la luminance $\ell_\lambda$ :

Dans l'expression (7), le terme  $\frac{\lambda}{C_2} \ln \varepsilon_\lambda$  est indépendant de la luminance spectrale donc

$\Delta T / T^2 = \Delta T^\circ / T^{\circ 2}$ . La dérivation de l'expression (3) par rapport à  $d\ell_\lambda^\circ$  conduit à

$$\Delta T = \frac{\lambda T^2}{C_2} \frac{\Delta \ell_\lambda^\circ}{\ell_\lambda^\circ} \quad (8)$$

Dans le cas d'une mesure de la température d'une source par superposition (mesures visuelles) d'un filament chaud, le rapport  $\frac{\Delta \ell_\lambda^\circ}{\ell_\lambda^\circ}$  est estimé à 2 % [Cab-90].

### **2-7- Incertitude sur la détermination de $T$ due à l'erreur sur la connaissance de la longueur d'onde $\lambda$ .**

La dérivation de l'expression (7) par rapport à  $\lambda$  conduit à

$$\Delta T = T \left( 1 - \frac{5\lambda T}{C_2} \right) \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \quad (9)$$

Pour établir cette expression,  $\varepsilon_\lambda$  a été considérée comme indépendante de  $\lambda$  (voir paragraphe suivant).

Selon la qualité du pyromètre, le rapport  $\frac{\Delta \lambda}{\lambda}$  peut varier de 5 % à 20 % [Cab-90]

### **2-8- Incertitude sur la détermination de $T$ due à l'erreur sur la connaissance de l'émissivité $\varepsilon_\lambda$ .**

L'incertitude sur la détermination de  $T$  due à une erreur sur l'émissivité  $\Delta \varepsilon_\lambda$  se déduit de la dérivation de l'expression (7) par rapport à  $\varepsilon_\lambda$  :

$$\Delta T = \frac{\lambda T^2}{C_2} \frac{\Delta \varepsilon_\lambda}{\varepsilon_\lambda} \quad (10)$$

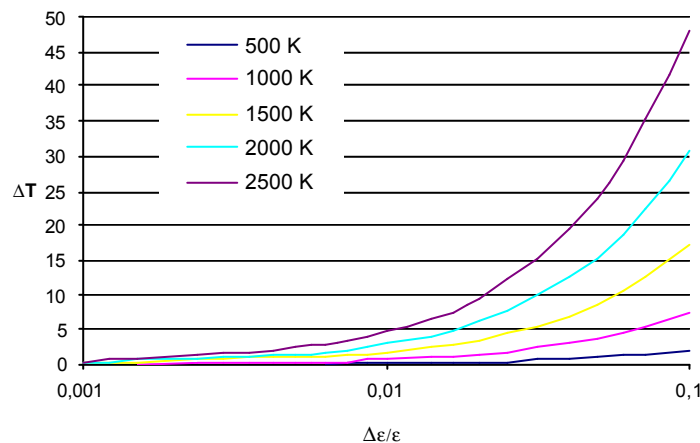


Figure 6- Influence de l'erreur d'émissivité

### 3 Pyromètre bi-chromatique

**3-1-** Dans le cas d'un pyromètre bi-chromatique, on détermine la température à partir du rapport  $R$  de la luminance à deux longueurs d'onde distinctes  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  :

$$R(T) = \frac{\ell_{\lambda_2, T}}{\ell_{\lambda_1, T}} \quad (11)$$

Les figures suivantes montrent l'allure de la luminance et du rapport de ces luminances en fonction de la température.

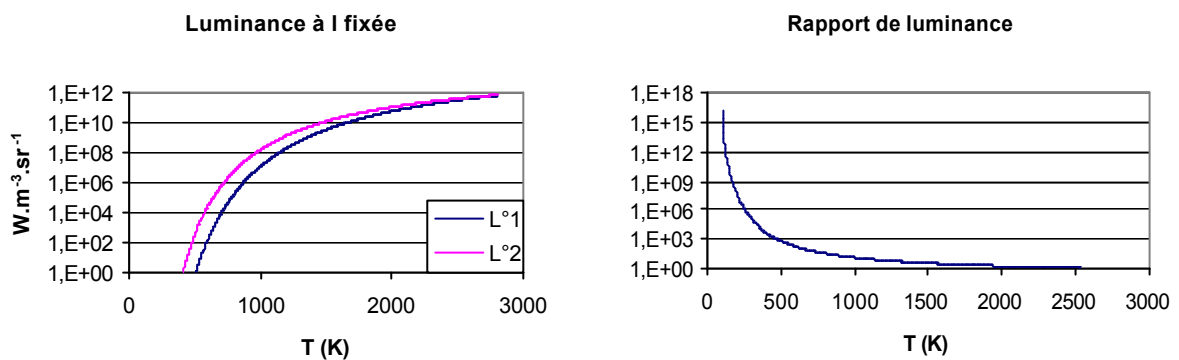


Figure 8- luminances  $L^{\circ}_1$  à  $0,85 \mu\text{m}$ ,  $L^{\circ}_2$  à  $1,1 \mu\text{m}$  et le rapport  $L^{\circ}_2/L^{\circ}_1$ .

Par rapport à l'utilisation d'un pyromètre monochromatique, l'utilisation d'un pyromètre bi-chromatique affranchit la détermination de la température de la mesure de la valeur absolue de la luminance, mais elle dépend toujours de la déformation de la répartition spectrale de la luminance (par rapport à celle du corps noir) due à l'émissivité.

### 3-2- Température de couleur

La température de couleur est déterminée à partir du rapport des luminances mesurées aux deux longueurs d'ondes  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  :

$$\frac{\varepsilon_{\lambda_2, T} \ell_{\lambda_2, T}^{\circ}}{\varepsilon_{\lambda_1, T} \ell_{\lambda_1, T}^{\circ}} = \frac{\ell_{\lambda_2, T_C}^{\circ}}{\ell_{\lambda_1, T_C}^{\circ}} = R^{\circ}(T_C) \quad (12)$$

$T_C$  est la température fournie par le pyromètre en supposant que la source étudiée est un corps noir.

### 3-3- Corps gris

Un corps dont l'émissivité est constante quelle que soit la longueur d'onde est appelé corps gris. La température de couleur est alors égale à la température réelle.

### **3-4- Détermination de la température réelle à partir de la température de couleur**

Le rapport (12) peut aussi s'écrire

$$\frac{\varepsilon_{\lambda_2, T} \ell_{\lambda_2, T}^\circ}{\varepsilon_{\lambda_1, T} \ell_{\lambda_1, T}^\circ} = R_\varepsilon(T) R^\circ(T) \quad (13)$$

où  $R_\varepsilon(T)$  est égal au rapport des émissivités à la température  $T$  et où  $R^\circ(T)$  correspond au rapport des luminances à la température  $T$  pour un corps noir. Pour obtenir, il suffit donc de poser

$$R^\circ(T) = \frac{R^\circ(T_C)}{R_\varepsilon(T)} \quad (14)$$

Dans l'approximation de Wien, le rapport  $R^\circ(T)$  s'écrit

$$R^\circ(T) = \frac{\ell_{\lambda_2, T}^\circ}{\ell_{\lambda_1, T}^\circ} = \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{-5} e^{-\frac{C_2}{T} \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)} \quad (15)$$

d'où l'on tire

$$T = \frac{T_C}{1 - T_C \alpha \ln R_\varepsilon(T)} \quad (16) \quad \text{où } \alpha = -\frac{1}{C_2 (\lambda_2^{-1} - \lambda_1^{-1})} = 2,600 \cdot 10^{-4} K^{-1}$$

L'expression analytique de la température  $T$  en fonction de la température mesurée  $T_C$  et de  $\alpha$  apparaît difficile à exprimer, compte tenu de la forme de  $R_\varepsilon(T)$  (voir annexe données W). Pour déterminer, il semble plus simple soit de calculer cette valeur à partir de la mesure de  $T_C$  et de la valeur de  $R_\varepsilon(T)$  répertoriée dans la littérature pour le matériau source, soit, au cours de la mesure d'ajuster le rapport jusqu'à l'obtention de  $T$ . Dans les deux cas, le rapport  $R_\varepsilon(T)$  est supposé connu.

La connaissance précise de  $R_\varepsilon(T)$  pour la détermination de la température est donc primordiale.

### **3-5- Incertitude sur la détermination de $T$ due à l'erreur sur la connaissance de $R_\varepsilon(T)$ :**

L'incertitude relative sur la température en fonction de l'erreur relative sur la connaissance de  $R_\varepsilon(T)$  est égale à

$$\frac{\Delta T}{T} = \alpha T \frac{\Delta R_\varepsilon}{R_\varepsilon} \quad (17)$$

Une erreur relative de 1 % sur le rapport des émissivités  $R_\varepsilon(T)$  induit une incertitude sur la détermination de  $T$  de 14K à  $T = 2300K$ . Pour comparaison, dans le cas de la pyrométrie optique, mono-chromatique, une erreur relative de 1 % sur la valeur de l'émissivité n'entraînait qu'une incertitude de 4 K sur la détermination de  $T$ .



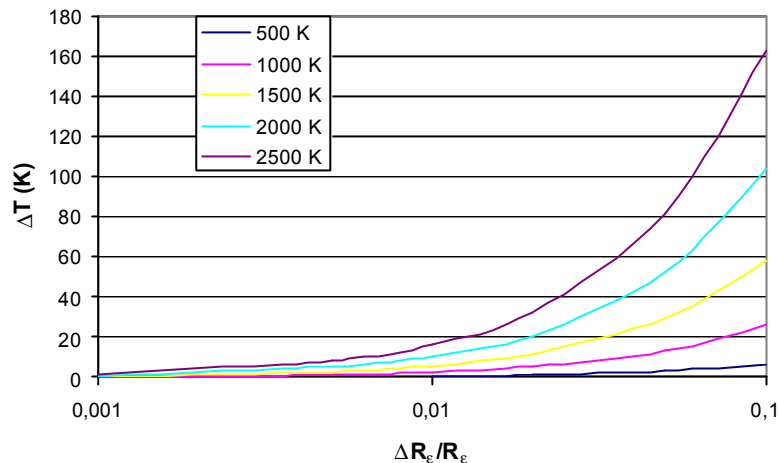


Figure 9- Incertitude sur la mesure de la température en fonction de l'erreur commise sur le rapport d'émissivité.

### **3-6- Incertitude sur la détermination de $T$ due à l'incertitude sur la connaissance de la luminance**

Un calcul similaire à celui réalisé pour un pyromètre monochromatique mène à la relation suivante :

$$\Delta T = \frac{T_2}{C_2} \frac{1}{\lambda_2^{-1} - \lambda_1^{-1}} \frac{\Delta R^0}{R^0} \quad (18)$$

Dans le cas présent d'un pyromètre à cellule silicium, les mesures ont permis d'évaluer cette erreur à 2 °C.

### **3-7- Incertitude sur la détermination de $T$ due à l'erreur sur la connaissance de la longueur d'onde.**

Le même type de calcul que celui qui a été mené pour un pyromètre monochromatique conduit à la relation suivante :

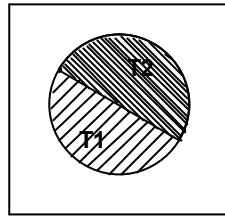
$$\Delta T = T \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \quad (19)$$

(en supposant que les erreurs relatives sur les longueur d'onde sont identiques).

Mais cette relation conduit à des erreurs très importantes à haute température, de sorte que l'on est amené à émettre quelques doutes sur la pertinence de ce calcul dans ce cas précis.

### **3-8- Effet de la répartition de la luminance à la surface de la source sur la détermination de la température.**

Supposons que le point de visée du pyromètre à la surface de la source soit un disque divisé en deux parties égale mais de température différentes  $T_1$  et, avec. Supposons aussi pour simplifier que la source est un corps gris.



Disque de visée  
du pyromètre

Le rapport des luminances sera égal à :

$$R(T_1, T_2) = \frac{\ell_{\lambda_2, T_1} + \ell_{\lambda_2, T_2}}{\ell_{\lambda_1, T_1} + \ell_{\lambda_1, T_2}} \quad (20)$$

Toujours dans l'approximation de Wien,  $R(T_1, T_2)$  peut s'écrire

$$R(T_1, T_2) = R(T_2) \frac{1 + A}{1 + A'}$$

avec

$$A = e^{\frac{C_2}{\lambda_2} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} \quad \text{et} \quad A' = e^{\frac{C_2}{\lambda_1} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)}$$

Si  $T_2 > T_1$  et  $\lambda_2 > \lambda_1$  alors  $\frac{1 + A}{1 + A'} > 1$ . Sur la figure suivante,  $T_2$  est fixée à 2000 K et  $T_1$  varie entre 1990 K et 1000 K. Pour chaque couple  $(T_2, T_1)$ , on calcule la température que l'on déduirait de l'expression (15), c'est à dire en supposant que la température est uniforme sur la surface de visée.

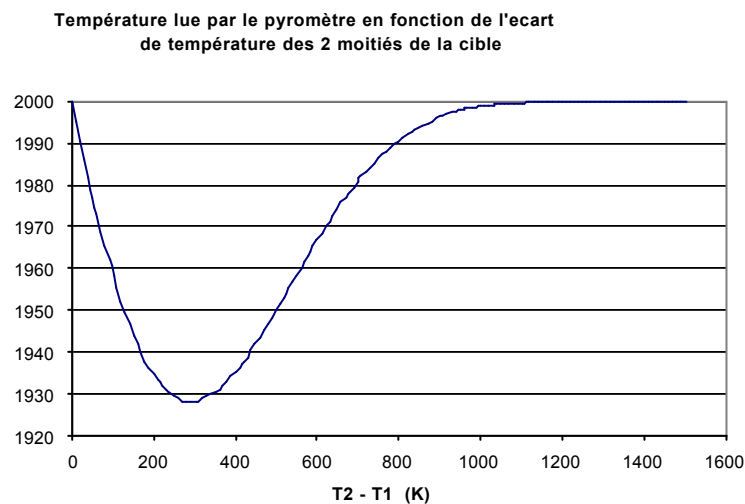


Figure 10 - Tracé de  $T$  en fonction de  $(T_2 - T_1)$  pour  $T_2 = 2000K$ .

Ces résultats montrent que la mesure effectuée correspond en grande partie à la zone la plus chaude. Ceci est particulièrement vrai si les écarts de température sont soit très faibles, soit très importants. La mesure est donc insensible à l'environnement de la cible qui se trouve porté à des températures bien plus faibles. D'autre part, les modélisations thermiques laissent apparaître une différence radiale de température entre le centre du disque de visée et la périphérie de la cible, de l'ordre de 5°C [cf. Chap. II]. On mesure donc bien la température de la zone la plus chaude de la cible en regard du pyromètre.

### **3-9- Influence des éléments situés sur la trajectoire de visée**

On dispose de la courbe de transmission spectrale du hublot

En revanche, on ne connaît pas la transmission du système optique, ni la sensibilité du récepteur, ni les pertes dans la fibre optique. On est donc faute de mieux contraint de faire l'hypothèse que dans la gamme spectrale I.R. de travail du pyromètre, ces paramètres varient suffisamment peu pour que l'on puisse négliger leurs effets. La mesure du rapport des signaux issus de chaque filtre permet alors de s'affranchir des paramètres de transmission. Dans ce cas, la relation exprimée au § IV.1.2 se résume à :

$$R_{\lambda_1, \lambda_2}(T) = \frac{Y(\lambda_1, T)}{Y(\lambda_2, T)} = \frac{\ell_{\lambda_2}(T)}{\ell_{\lambda_1}(T)} \quad (21)$$

## ANNEXE IV.2: Fiche technique LandInstrument

### Pyromètre Land Infra Red System 4

Pyromètre bichromatique , longueurs d'onde effectives : 0,85 et 1,1  $\mu\text{m}$ .

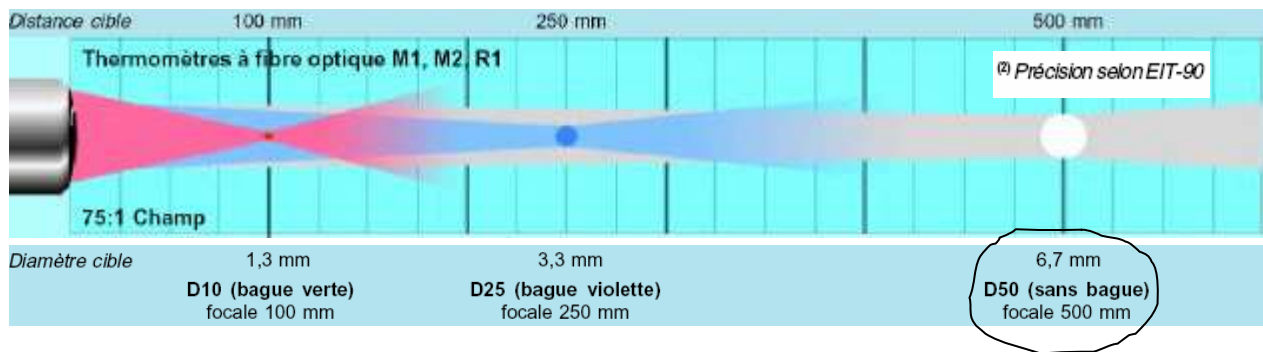
Correction du rapport d'émissivité : de 0,8 à 1,25 (par une commande linéaire en courant 4-20mA)

Fibre optique 7m

Tête optique Focale 500 mm

Diamètre de la zone de visée : 6,7 mm (=focale/champ)

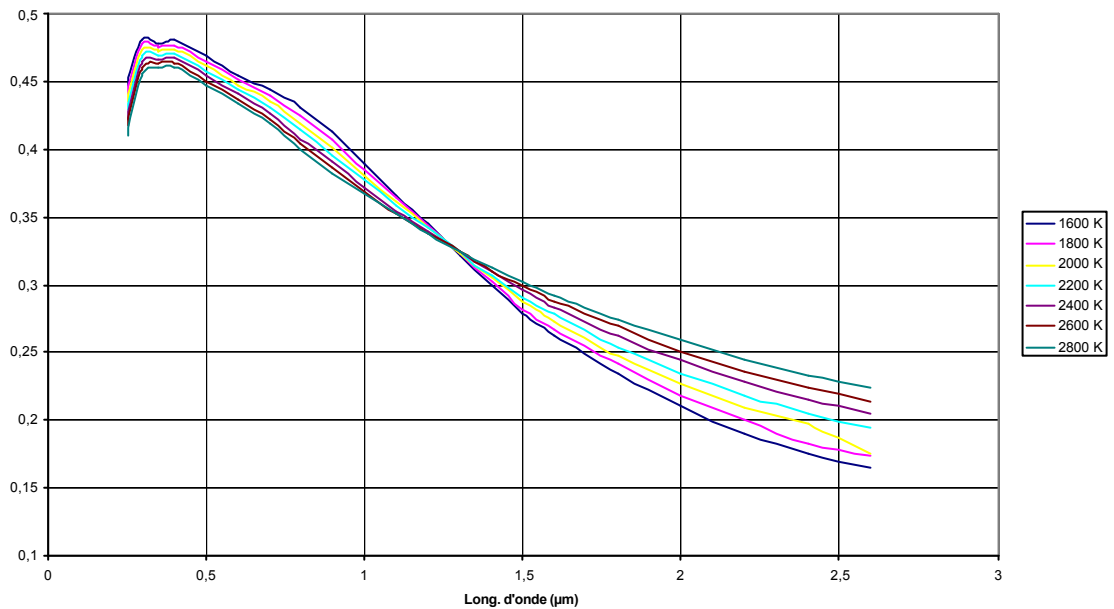
THEE	Modèle	Gamme de température	Longueur d'onde	Champ	Température ambiante	Temps de réponse <sup>(1)</sup>	Interchangeabilité	Répétabilité	Précision <sup>(2)</sup>	Stabilité
	R1 1000/2600CYL	1000 à 2600°C	0,85 à 1,1 $\mu\text{m}$	75:1	0 à 50°C	15 ms	0,45%K	2K	1,1% K	<0,1%K/K



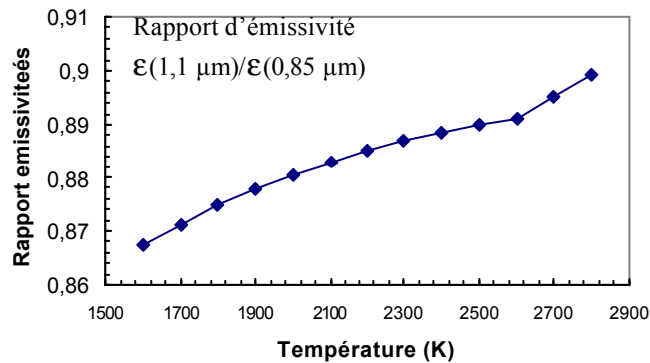
## ANNEXE IV.3: Emissivités spectrales du tungstène [Han-99]

$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	1600 K	1800 K	2000 K	2200 K	2400 K	2600 K	2800 K
0,25	0,448	0,442	0,436	0,429	0,422	0,418	0,411
0,3	0,482	0,478	0,474	0,47	0,465	0,461	0,456
0,35	0,478	0,476	0,473	0,47	0,466	0,464	0,461
0,4	0,481	0,477	0,474	0,471	0,468	0,464	0,461
0,5	0,469	0,465	0,462	0,458	0,455	0,451	0,448
0,6	0,455	0,452	0,448	0,445	0,441	0,437	0,434
0,7	0,444	0,44	0,436	0,431	0,427	0,423	0,419
0,8	0,431	0,425	0,419	0,415	0,408	0,404	0,4
0,9	0,413	0,407	0,401	0,396	0,391	0,386	0,383
1	0,39	0,385	0,381	0,378	0,372	0,369	0,367
1,1	0,366	0,364	0,361	0,359	0,355	0,352	0,352
1,2	0,345	0,344	0,343	0,342	0,34	0,338	0,337
1,3	0,322	0,323	0,323	0,324	0,324	0,325	0,325
1,4	0,3	0,302	0,305	0,306	0,309	0,31	0,313
1,5	0,279	0,282	0,288	0,291	0,296	0,299	0,302
1,6	0,263	0,267	0,273	0,278	0,283	0,288	0,292
1,8	0,234	0,241	0,247	0,254	0,262	0,269	0,274
2	0,21	0,218	0,227	0,235	0,244	0,251	0,259
2,2	0,19	0,2	0,209	0,218	0,228	0,236	0,245
2,4	0,175	0,182	0,197	0,205	0,215	0,224	0,233
2,6	0,164	0,174	0,175	0,194	0,205	0,214	0,224

Emissivité spectrale du Tungstène



Tungstène



#### ANNEXE IV.4: Problèmes rencontrés avec le pyromètre

Les premières mesures réalisées ont consistées à comparer les indications données par le thermocouple et celles fournies par le pyromètre, puis de régler le rapport d'émissivité afin de faire correspondre les deux indications.

Cependant, il est apparu dès les premières mesures que l'on n'obtenait pas les résultats attendus. Comme l'illustre la figure 1 suivante, à une température donnée par le thermocouple, le réglage du rapport d'émissivité mène à des résultats totalement différents de ceux auxquels on pourrait s'attendre à partir des données de la littérature sur le tungstène.

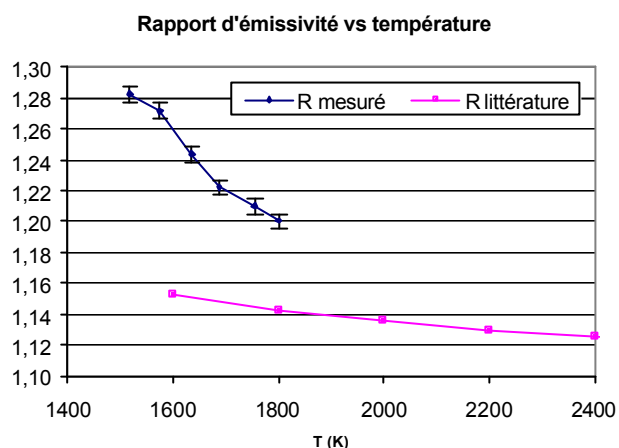


Figure 1 :  $R$  mesuré correspond au réglage de  $R$  tel que la température affichée par le pyromètre corresponde à la température donnée par le thermocouple.

Afin de mieux comprendre ce comportement, il est intéressant d'observer la réponse du pyromètre lorsque l'on fait varier le rapport d'émissivité à température constante. Les courbes de la figure 2 illustrent ce résultat.

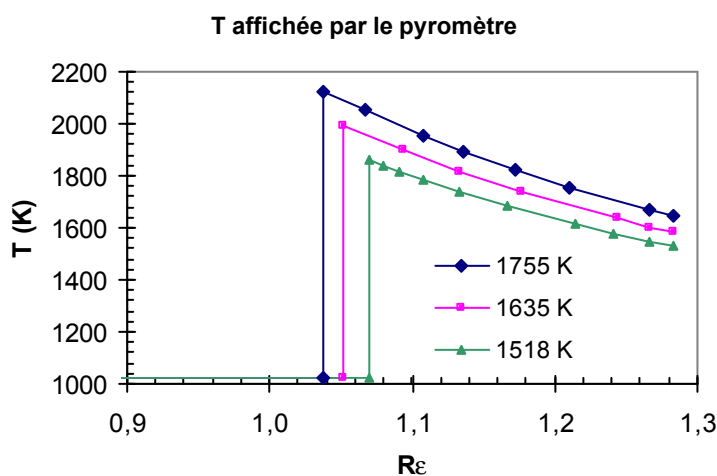


Figure 2 : Température affichée par le pyromètre lorsque l'on fait varier le rapport d'émissivité à température constante (contrôlée par le thermocouple).

On peut observer que le pyromètre ne déclenche qu'à partir d'un certain seuil du signal électrique traduisant le rapport des luminances aux deux longueurs d'onde effectives. Le réglage du rapport d'émissivité se ramène au réglage du gain d'un amplificateur de ce signal. Dans le cas présent, il semble que par ce réglage non seulement on ajuste le véritable rapport d'émissivité mais aussi que l'on rattrape par un gain artificiel le manque de lumière reçue par un instrument ayant subi les outrages du temps. Ce gain dépendant à la fois de la température et des émissivités, il paraît parfaitement illusoire d'obtenir de cette manière une mesure convenable du rapport d'émissivité. Pour mener à bien ces mesures, il est nécessaire de ré-étalonner la chaîne de mesure. Cet étalonnage n'a pas pu être réalisé par manque de temps car il imposait le renvoi au fabricant pour une longue période ou de trouver un corps noir susceptible de monter à 2300 K.

Parmi les informations manquantes sur le pyromètre, figure la bande spectrale des filtres et la longueur d'onde moyenne sur chaque bande. Le constructeur donne pour ces deux longueurs d'onde moyennes les valeurs de 0,85  $\mu\text{m}$  et 1,1  $\mu\text{m}$ . On ne connaît donc ni l'incertitude sur ces valeurs, ni la largeur des bandes respectives. La figure 3 suivante permet d'avoir une indication à ce sujet. La courbe « mesure » représente la température affichée par le pyromètre lorsque l'on fait varier le rapport d'émissivité à la température de 1518 K (1245°C). La courbe « res. attendu » représente les résultats auxquels on s'attendait à partir de la littérature. Cette courbe théorique est la représentation graphique de l'équation :

$$T = \frac{T_C}{1 - T_C \alpha \ln R_e(T)} \quad \text{avec} \quad \alpha = -\frac{1}{C_2 (\lambda_2^{-1} - \lambda_1^{-1})} = 2,600 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$$

La courbe « correction correspond à cette même courbe théorique dont on a ajusté le coefficient de manière à ce que la courbure corresponde à la courbe mesurée.

On a alors  $\alpha' = 8 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$

$$\text{Soit : } \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} = \alpha' C_2$$

$$\text{Soit encore : } \frac{\lambda_m}{\Delta \lambda} = \alpha' C_2 \quad \text{avec } \lambda_m = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \quad \text{et } \Delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1$$

approximation acceptable dans la mesure où  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont suffisamment proches

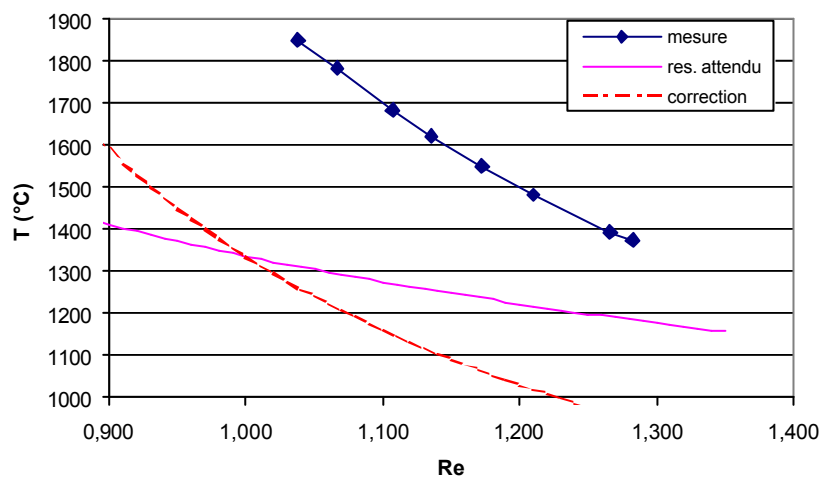


Figure 3 : Température affichée par le pyromètre en fonction du rapport d'émissivité pour  $T=1518 \text{ K}$  (1245°C)-température thermocouple.

Plusieurs hypothèses s'offrent alors à nous :

- 1) les longueurs d'onde moyennes sur chaque bande spectrale ne correspondent pas aux valeurs données :

$\lambda_m$  reste inchangé et l'on obtient alors :  $\Delta\lambda = 8,26 \cdot 10^{-8} \text{ m}$

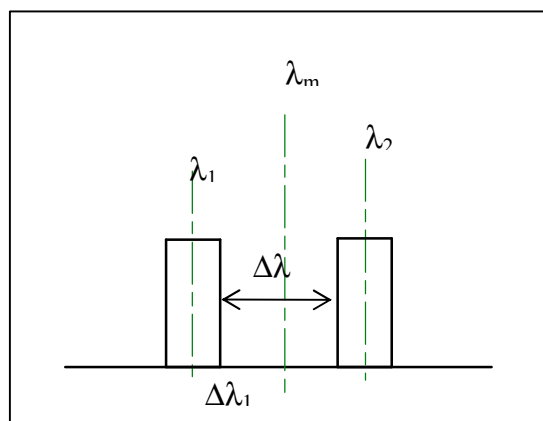
soit :  $\lambda_1' = 9,33 \cdot 10^{-7} \text{ m}$

$\lambda_2' = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ m}$

L'écart entre les deux longueurs d'onde de travail est plus faible et la sensibilité au rapport d'émissivité est plus grande. Ainsi, autour de 2300 K une incertitude de 5 % sur le rapport d'émissivité entraîne une incertitude de 210 K sur la température.

- 2) La largeur de chaque bande spectrale joue un rôle prépondérant :

Utilisons un modèle extrêmement simpliste, uniquement destiné à dégager un ordre de grandeur. On considère deux bandes spectrales « rectangulaires » centrées respectivement sur  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  et de largeur respectives  $2\Delta\lambda_1$  et  $2\Delta\lambda_2$



Ce résultat nous permet alors d'estimer la largeur spectrale de chaque bande

Dans ce cas, en écrivant  $\Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2 = \lambda_2 - \lambda_1 - \Delta\lambda$

Où encore  $p(\lambda_1 + \lambda_2) = \lambda_2 - \lambda_1 - \Delta\lambda$

Où  $p$  est demi-largeur relative de chaque bande (que l'on suppose identique dans les deux cas)

On obtient :  $p = 8,6 \cdot 10^{-2}$

Soit encore  $\frac{2\Delta\lambda_i}{\lambda_i} = 2p = 17,2 \%$  pour chaque bande spectrale.

Cette largeur est compatible avec des valeurs citées par certains auteurs[ Cab-90] et constitue une source d'erreur importante mais difficile à évaluer.





## ANNEXE IV.5: Constat de rupture du four

---

Le four s'est rompu lors de mesures visant à établir la relation puissance électrique fournie au four vs température de la cible.

Lors de la rupture, les paramètres étaient les suivants :

Température de la cible : 2370 K

Courant débité par l'alimentation : 306.8 A

Puissance fournie au four : 4229 W.

Remarque : l'amorce s'est vraisemblablement produite au changement de consigne de puissance à  $P=3880$  W et à  $T=2300$  K. La valeur de la résistance et la température de la cible ont alors augmenté jusqu'à la rupture du four, ce malgré une diminution brutale de la consigne à 100 A.

### Démontage du four :

#### - Retrait de la cible :

On note un dépôt uniforme de couleur sombre (carbone) sur le porte cible et sur le tube de tantale.

La cible de carbone a pris une couleur grisée uniforme.



*Fig1 et 2 : cible carbone et porte cible*



#### - La tape du four :

Le clip en acier qui avait pour fonction de maintenir le porte cible et de l'empêcher de glisser éventuellement dans la source a fondu, ce qui permet d'estimer la température dans cette zone à 1670 K au moins.

On ne remarque en revanche pas de points de fusion sur la tape (inox) qui était refroidie par une circulation d'eau, mais d'importants dépôts en feuilles fines



*Fig3 : tape du four dans laquelle on incère le porte cible*

Les alumines et les joints EPDM à proximité ne semblent pas avoir souffert de la chaleur.

- Sur les brides du four, on observe également d'importants dépôts de carbone. Les brides elles-mêmes, en aluminium ne semblent pas avoir été touchées. Les alumines et les joints sont également en bon état.



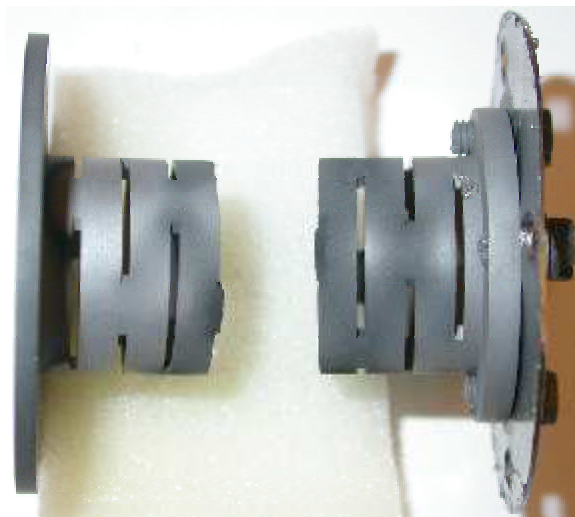
*Fig 4 : la bride avant (en regard de la source) du four*

- Les pièces en carbone :

Le disque de papyex utilisé pour fixer l'arrière du four, ainsi que les différentes vis en carbone ne sont pas altérées.

Le réflecteur est également intact.

La rupture du four s'est produite au milieu de celui-ci, à la hauteur de la 4<sup>ème</sup> fente.



*Fig5 : four carbone*

Les zones où ont eu lieu la rupture présentent un pincement.  
La photo suivante est un agrandissement de l'une des zones de rupture.



*Fig 6 : agrandissement d'une zone de rupture*

Cette zone du four est la plus chaude. En ces points, une température trop élevée a dû provoquer une évaporation importante, ce qui a réduit la section du conducteur, et à son tour provoqué la hausse de température et le phénomène d'emballement.



**ANNEXE IV.6: Caractéristique Courant-Température de la cible**

Température thermocouple (K)	Puissance four (w)	I (A)	R (mΩ)
673	165	58,1	49,0
785	226	69,7	46,6
885	284	78,9	45,6
990	355	89,2	44,6
1079	415	97,8	43,4
1171	487	107,0	42,5
1265	570	116,6	41,9
1293	595	119,3	41,8
1407	726	132,5	41,4
1486	833	142,1	41,2
1572	951	151,7	41,3
1655	1072	161,0	41,4
1699	1138	165,6	41,5
1762	1241	172,9	41,5
1807	1327	178,8	41,5
1872	1456	187,4	41,5
1907	1525	192,0	41,3
1949	1618	198,0	41,3
1979	1689	202,3	41,3
2005	1753	205,9	41,3
2053	1872	212,9	41,3
2081	1951	217,2	41,4
2115	2046	222,1	41,5
2146	2134	226,8	41,5
2175	2224	231,4	41,5
2195	2286	234,4	41,6
2223	2379	239,0	41,6
2248	2462	243,0	41,7
2271	2541	246,6	41,8
2284	2609	249,6	41,9

En raison de l'usure excessive du four en fin de test, un second tableau à été établi pour la gamme de température utilisée

T thermocouple (K)	Courant (A)
774	67,7
982	87,5
1150	104,7
1264	116,5
1350	125,5
1480	140,3
1544	147,5
1778	176,0
1799	178,6
1830	182,5
1982	201,3
1995	203,3
2073	213,2
2125	214,5
2175	222,0
2186	224,7
2199	227,5
2208	229,4

Incertitudes :

T : 1%

I : 0,4%

## ANNEXE V.1: Conversion mesure du pyromètre- Température du thermocouple

Banc de chauffage	
T thermocouple (K)	Sortie pyro (V)
pour R=18,58 mA	
310	0,831
320	0,831
330	0,831
561	0,831
649	0,831
787	0,831
906	0,831
982	0,831
1065	0,831
1131	0,831
1195	0,831
1238	0,831
1285	0,831
1338	2,268
1388	2,372
1431	2,461
1461	2,522
1479	2,562
1522	2,649
1558	2,718
1584	2,767
1625	2,843
1656	2,898
1691	2,960
1734	3,039
1761	3,086
1787	3,131
1824	3,195
1850	3,252
1883	3,304
1904	3,345
1937	3,398
1934	3,399
1970	3,460
1995	3,498
2027	3,548
2045	3,577
2064	3,605
2084	3,635
2096	3,657
2115	3,686
2141	3,725
2161	3,752
2182	3,784
2217	3,833
2247	3,871
2269	3,900
2298	3,931
2342	3,991

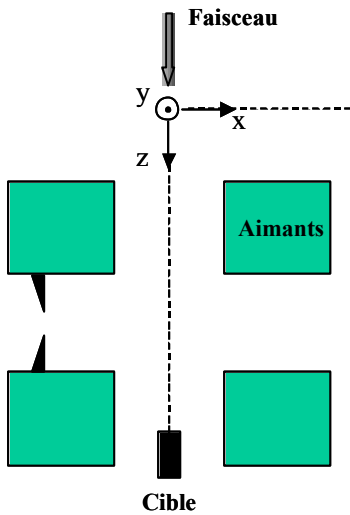
Banc 2	
T thermocouple (K)	Sortie pyro (V)
pour R=18,58 mA	
1319	2,157
1371	2,249
1444	2,376
1511	2,489
1572	2,591
1626	2,677
1689	2,777
1722	2,827
1771	2,898
1812	2,96
1861	3,031
1898	3,084
1949	3,151
2002	3,224
2050	3,286
2101	3,348
2156	3,42
2190	3,464
2212	3,491
2233	3,516
2242	3,528
2255	3,542

La table de conversion dépend du montage et doit donc être établie à chaque installation du pyromètre sur un banc de test.





**ANNEXE V.2 : Déviation du faisceau primaire par le champ magnétique de la source**



Avant de frapper la cible, les ions du faisceau primaire traversent la source. Dans cette zone, ils sont soumis au champ magnétique fort produit par les aimants. Il est donc important d'évaluer la déviation du faisceau lorsqu'il atteint la cible. La figure 2 présente le module du champ sur l'axe z et le champ moyen utilisé pour ce calcul. Sur cette figure, l'origine du repère correspond au centre de la source. Pour le calcul, il est plus simple de choisir comme origine le point à partir duquel les ions commencent à subir ce champ moyen (figure 1).

Pour cela, on considère un ion incident se déplaçant selon l'axe z, sans composantes radiales de vitesse.

Figure 1 : Situation du faisceau incident et origine du repère

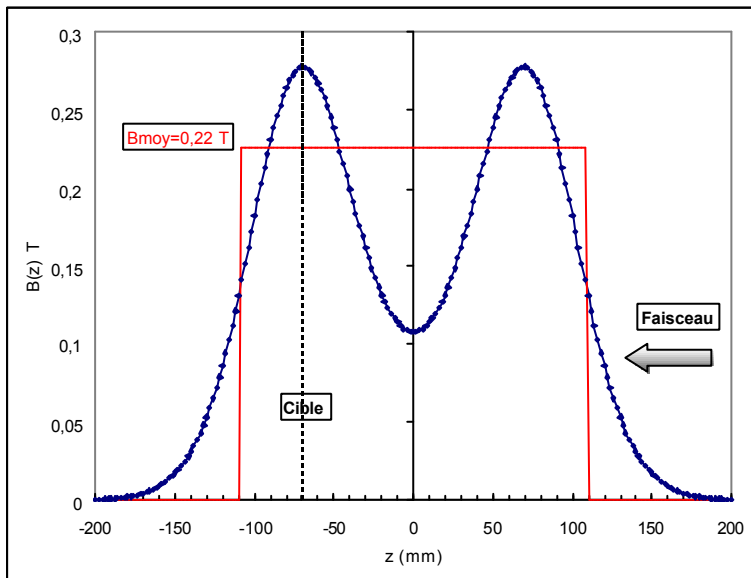


Figure 2 : Champ sur l'axe z  $B(z)\cdot\vec{x}$  et champ moyen utilisé pour le calcul. La distance entre l'entrée de la zone où existe le champ et la cible est de 180 mm.

Un ion de masse  $m$  et de charge  $Q$  est soumis à la force de Lorentz  $F = Q\vec{v} \wedge \vec{B}$

L'équation de la dynamique s'écrit :

$$m \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{pmatrix} = Q \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} B \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

On utilise ici un champ moyen pour simplifier les calculs.

L'origine des temps correspond à l'entrée dans la zone de champ. A  $t = 0$ , la vitesse de l'ion vaut  $v = v_0 \vec{z}$  et dépend de la masse et de l'ion considéré.

La résolution du système d'équations mène aux solutions horaires suivantes :

$$\begin{cases} y(t) = \frac{m\omega_0}{QB} \left( 1 - \cos\left(\frac{QB}{m}t\right) \right) \\ z(t) = \frac{m\omega_0}{QB} \sin\left(\frac{QB}{m}t\right) \end{cases}$$

ce qui permet d'obtenir l'équation de la trajectoire suivante :

$$z^2 + \left( \frac{m\omega_0}{QB} - y \right)^2 = \left( \frac{m\omega_0}{QB} \right)^2 \quad \text{trajectoire circulaire de rayon } \frac{m\omega_0}{QB}$$

Exemple :

La courbe suivante (Figure 3) décrit dans ce modèle simplifié la déviation selon l'axe y d'un faisceau d' $^{36}\text{Ar}^{18+}$  d'énergie 95 MeV/A. Le faisceau atteint la cible avec une déviation verticale d'environ 1,5 mm.

Pour une cible de 6 mm de rayon, cette déviation n'est pas totalement négligeable et doit probablement être prise en compte dans le réglage du faisceau.

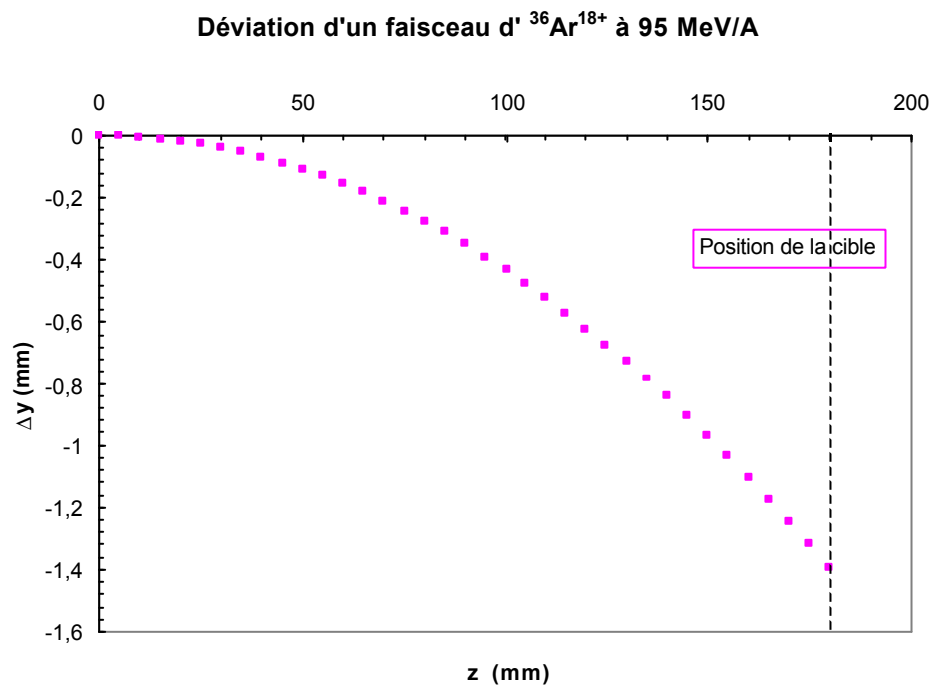
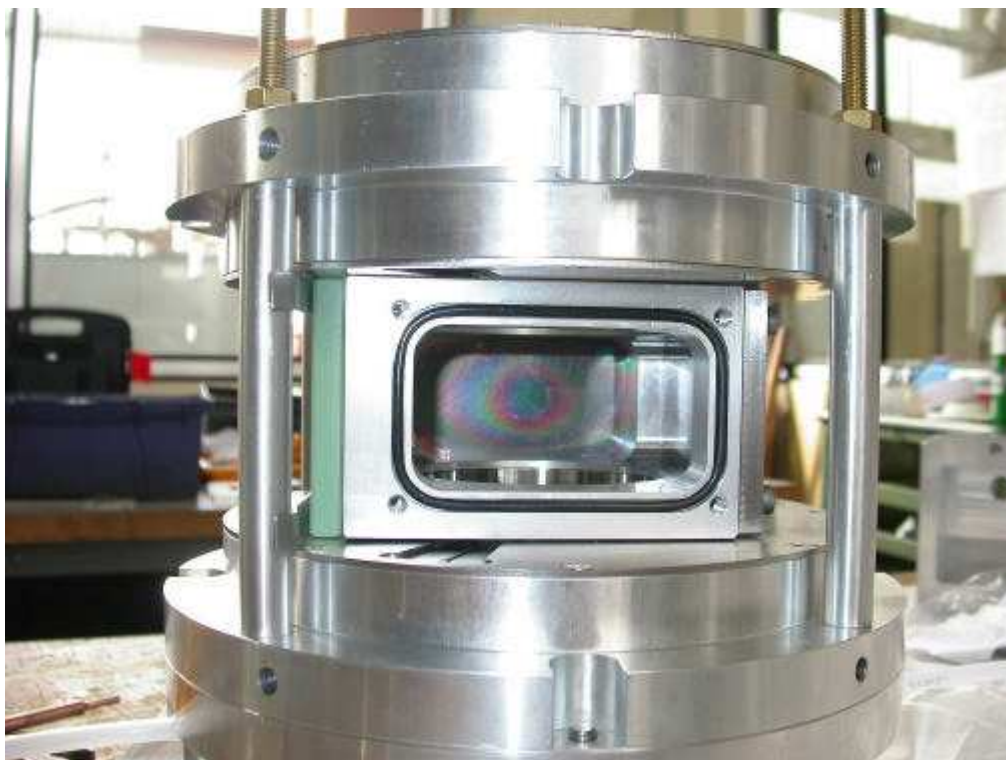
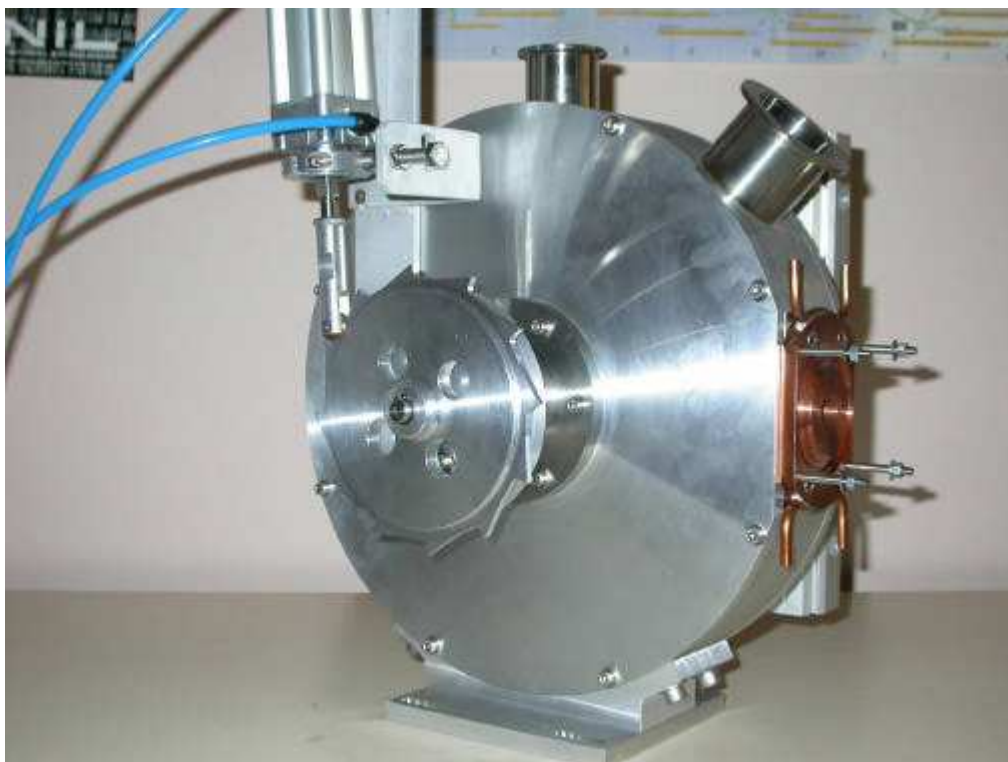


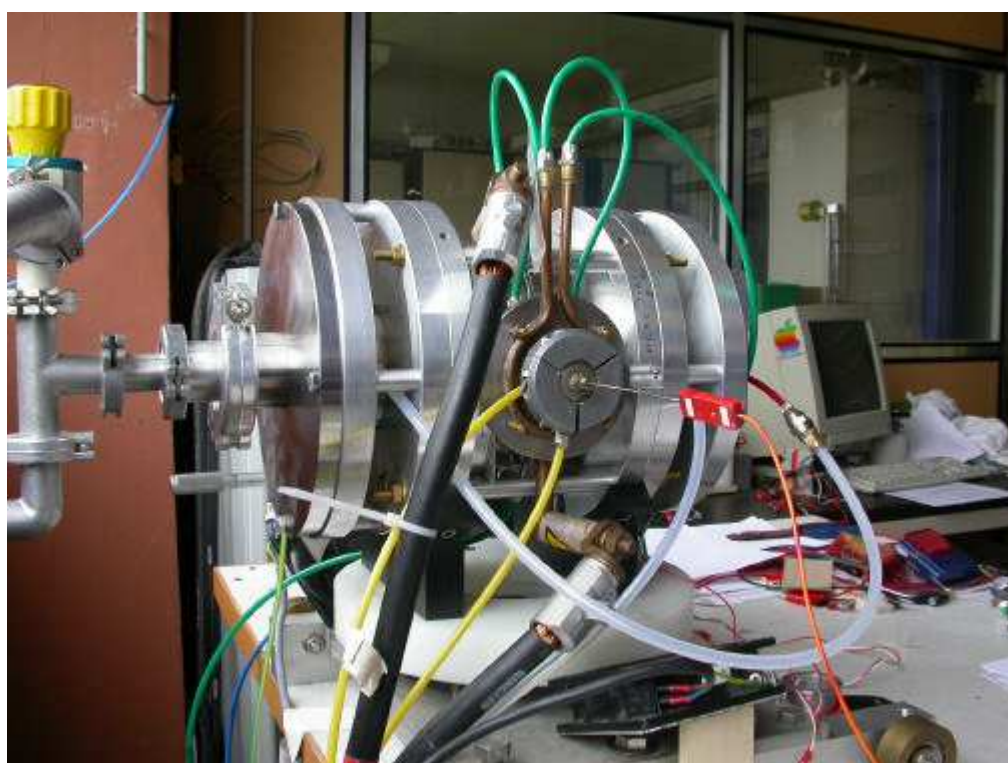
Figure 3

**ANNEXE V.3: Album photo**

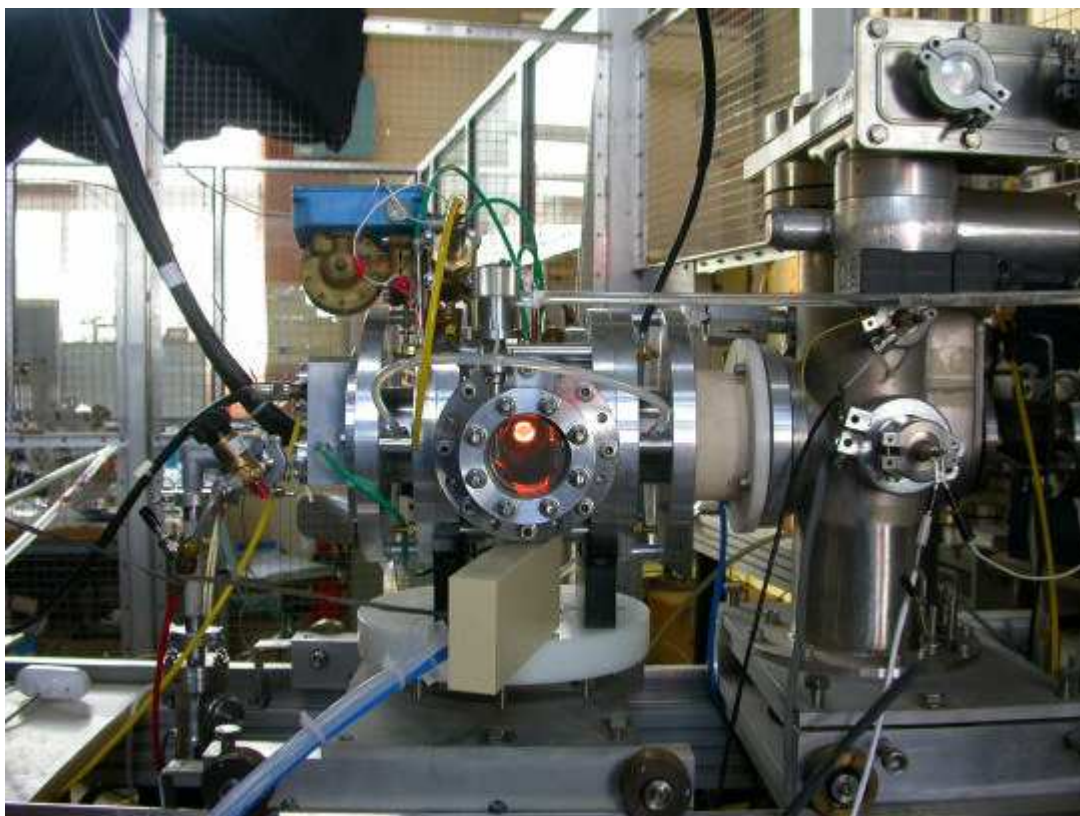
Montage de la source MONO1000



Réception du distributeur. Le vérin appuie sur la roue dentée qui assure la rotation des cibles



Banc de chauffage. Le four et son dispositif de refroidissement sont fixés à la source. On distingue également le thermocouple, les amenées de courant du four et le pompage de l'enceinte.



Banc de test source du Hall D. A travers le hublot de visée du pyromètre, on distingue la cible test chauffée dans le four.

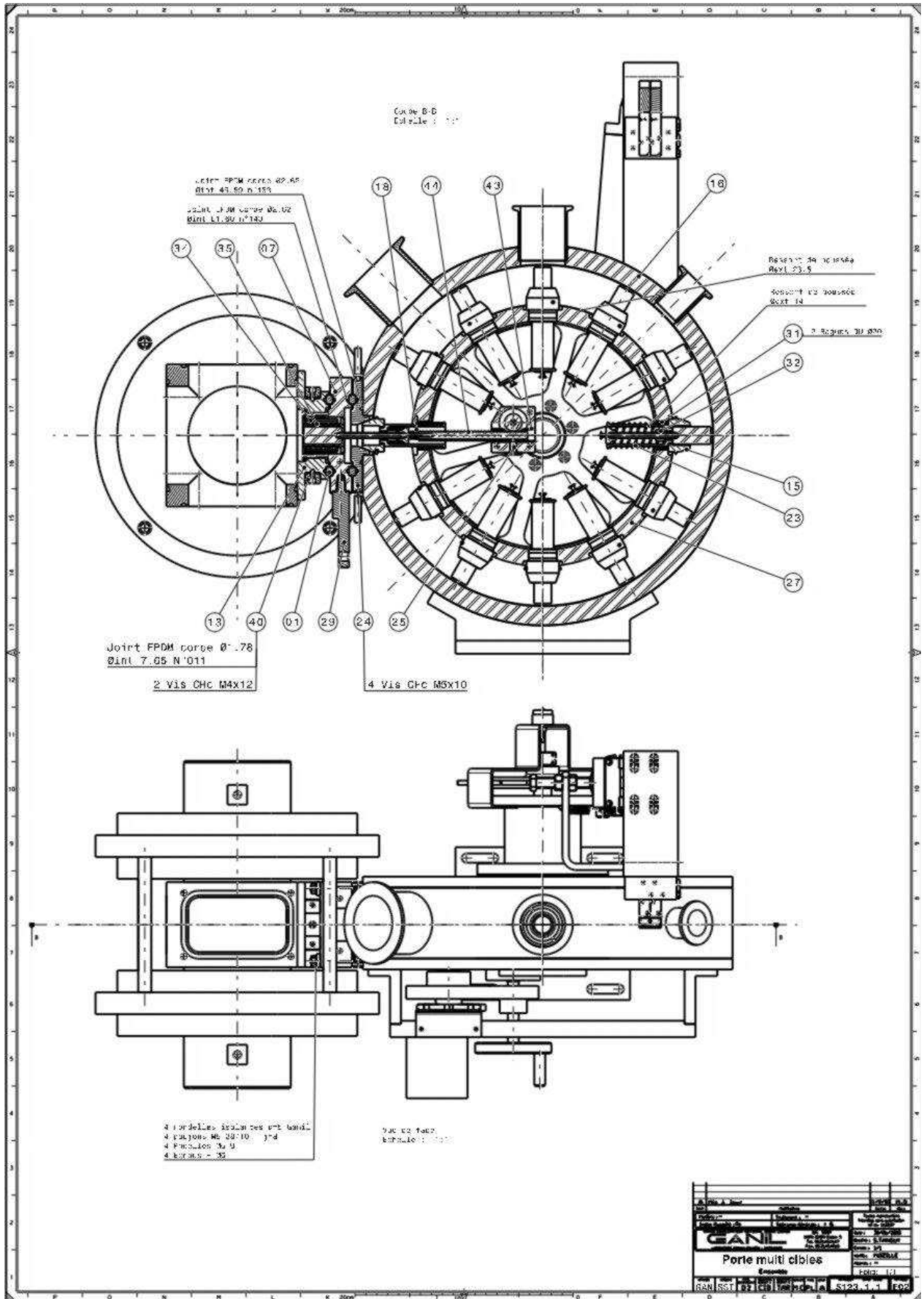


Cible chaude vue à travers le plasma de la source...













## Références bibliographiques

- [Ask-71] Askill; Phys. Status Solidi 43 (1971) 1.
- [Bey-77] Beyer, Novgorodov; ZfK-328, Rossendorf 328 (1977) 1.
- [Bey-03] G.J. Beyer et al., *The role of diffusion in ISOL targets for the production of radioactive ion beams*, NIM B204 (2003) 225-234.
- [Bie-74] Biersack, Fink; Proc. Symp. Fusion Technology, 8Th, EUR-5182 1 (1974) 907.
- [Bou-02] C. Bourgeois, *Interactions particules- matière*, cours DEA MIP, université Denis Diderot Paris VII, 2002
- [Bre-67] Brehm; Thesis, Cornell Univ. New York 1 (1967) 1.
- [Bur-72] G. Burns, W. Hurst, *Studies of the performance of W-Re type thermocouples*, National Bureau of Standards, Washington, D.C., 1972.
- [Cab-90] F. Cabannes, *Pyrométrie optique*, Techniques de l'ingénieur, R2610, 1990.
- [Car-04] <http://www.carbonelorraine.com/>
- [Cor-94] R. Corwin, A Rodenburgh II, *Temperature error in radiation thermometry caused by emissivity and reflectance measurement error*, Applied Optics, vol 33, n°10,1994.
- [Den-97] C.J. Densham, C Thwaites, J.R.J.Bennett, *Critical parameters for the delay time of a RIB target*, NIM B126(1997) 154-159.
- [Fin-74] Fink; Thesis, Free University Berlin 1 (1974) 1.
- [Fou-97] P. Foury et al., *Graphite target for the SPIRAL project*, NIM in Physics Research B126 (1997), 113-116.
- [Fuj-81] M. Fujioka et al., *Diffusion of radioisotopes from solids in the form of foils, fibers and particles*, NIM in Physics Research 186 (1981) 409-412.
- [Gau-98] G. Gaubert, *Les aimants permanents en terres rares. Application aux sources d'ions ECR.*, CNAM, examen probatoire, 1998.
- [Gau-00] G. Gaubert, *Réalisation d'un banc de tests de sources d'ions*, Mémoire ingénieur CNAM en Instrumentation-Mesures, soutenu le 21/09/2000.
- [Gel-96] R. Geller, *Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR Plasmas*, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1996.

- [Gib-03] S. Gibouin, *Contributions à l'étude de la production de faisceaux d'ions radioactifs par la méthode ISOL*. Thèse de doctorat (19 mai 2003), GANIL, université de Caen.
- [Goo-04] Goodfellow, <http://www.goodfellow.com/>
- [Gui-94] P. Guiraldenq, *Diffusion dans les métaux*, Techniques Ingénieur, M55, 1994.
- [Har71] Harding, Mortlock, Price; Phil. Mag. 23 (1971) 399.
- [Har-72] Harding, Price; Phil. Mag. 26 (1972) 253.
- [Han-99] CRC Handbook of Chemistry and Physics, 80<sup>th</sup> edition, 1999.
- [Has-72] Hashimoto, Hama, Shirasaki; J.Appl.Phys. 43 (1972) 4828.
- [Her-95] D. Hernandez et al., *Bicolor pyroreflectometer using an optical fiber probe*, Rev. Sci. Instrum. 66(12), Dec. 1995.
- [Hue-92] M. Huetz-Aubert, *Rayonnement thermique des matériaux opaques*, Techniques de l'Ingénieur, A1520, 1992.
- [Jar-02] P. Jardin et al., Mono 100: *A simple and efficient 2.45 GHz ECRIS using a new magnetic structure concept*, Rev. Sci. Inst. 73(2002) 789-791
- [Jar-03] P. Jardin et al., *Optimization of ECR singly-charged ions sources for the radioactive ion beam production*, NIM B204 (2003) 377-381.
- [Jar-04] P. Jardin et al., *Atom to ion transformation time in singly charged ECRISs*, NIM B225(2004) 374-382.
- [Jou-91] A. Joubert et al., *The SISSI Project: An Intense Secondary Ion Source Using Superconducting Solenoid Lenses*, IEEE Particle Accelerator Conference, San Francisco, USA, Vol. 1, 1991, P 594-97.
- [Kir-86] R. Kirchner, O. Klepper, D. Marx, G.E. Rathke and B. Sherill, Nuclear Instruments and Methods A 247 (1986) p 265-280.
- [Kir-87] R. Kirchner, *An ion source with bunched beam release*, NIM B26 (1987) 204-212.
- [Kir-92] R. Kirchner, *On the release and ionisation efficiency of catcher-ion-source-systems in isotope separation on line*, NIM B70 (1992), 186-199.
- [Lan-01] F. Landré-Pellemoine, *Production de faisceaux d'ions radioactifs par la méthode ISOL pour SIRAL*, thèse de l'université de Caen, GANIL T0103.
- [Lan-04] Land Instruments International, <http://www.landinst.com/>.
- [Lec-97] N. Lecesne, *Etude de la production d'ions radioactifs multichargés en ligne*, thèse de l'université de Caen, GANIL T9708, 1997.
- [Lem-03] F. Lemagnen, *Développement d'un four à évaporation haute température*, Comm. Privée, 2003.
- [Ma-LANL] S. Maloy et al., *Analysis of a clad tungsten target after irradiation in a 800 MeV proton beam*, Los Alamos National Laboratory, 2001.

- [Mau-98] L. Maunoury, *Production de faisceaux d'ions radioactifs multichargés pour SPIRAL : Etude et réalisation du premier ensemble cible-source*, thèse de l'université de Caen, GANIL T9801.
- [Pac-02] J.Y. Pacquet et al., MONO 1001, GANIL rapport interne R0207, Dec. 2002.
- [Poc-04] POCO graphite Inc, <http://www.poco.com>
- [Poh-02] J. Pohl, Modelling and simulation of a fast 2/2 switching valve, Linköping University, Sweden, 2002.
- [Sci-96] Ph. Chomaz in *Noyaux atomiques et radioactivité*, Dossier Pour la science, Oct. 1996.
- [Shi-73] Shirasaki, Hama; Chem. Phys. Lett. 20 (1973) 361.
- [Sor-94] P.Sortais et al., *Recent progress in making highly charged ion beams*, Proceedings of the 7th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions, Vienna, 1994.
- [Spi-04] SPIRAL, <http://www.ganil.fr/research/developments/spiral/index.html>
- [Sri-04] Logiciel SRIM, <http://www.srim.org/SRIM/SRIM2003.htm>
- [Sys-04] Logiciel SYSTUS, ESI Group, Engineering Systems International, PAM – system International.
- [Tan-03] S. Tanguy, *Conception d'un porte multi cible et validation de calculs numériques par des expériences*, rapport de DESS Génie mécanique et productique, université de Lorient, 2003.
- [Tar-01] Optimized release from ISOL targets, TARGISOL, IHP-INF-00-1
- [Tar-04] TARGISOL database, <http://www.targisol.csic.es/>
- [The-04] Thermocoax, <http://www.thermocoax.com/>
- [Toy-04] Toyo Tanso USA, Inc., <http://www.ttu.com/>
- [Vil-02] Villari A.C.C., *First results at SPIRAL-GANIL*, International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Techniques Related to their Applications.14 (EMIS –14), Victoria (CN), 6-10 mai 2002, Nuclear Instruments and Methods B 204 (2003) 31
- [Wol-95] B.Wolf, Handbook of ion Sources, CRC press, 1995.
- [Zhi-95] Zhi-Gang Shen et al, Fast electromagnetic gas valve ,1995 Meas. Sci. Technol. 6 324-328







- Réalisation d'un dispositif de test de cibles pour la production d'ions radioactifs par la méthode ISOL

Mémoire d'ingénieur C.N.A.M., Caen 2005

---

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un programme européen visant à optimiser le temps de relâchement d'atomes des systèmes de production d'ions radioactifs de type ISOL (Isotope Separator On Line). Il a pour but à la fois le développement de faisceaux d'éléments nouveaux et l'amélioration en intensité et pureté des faisceaux déjà existants.

Dans la méthode ISOL, un faisceau primaire d'ions entre en collision avec les noyaux d'une cible solide et épaisse (les ions incidents sont arrêtés dans la cible). Les noyaux incidents se fragmentent et donnent lieu à des noyaux radioactifs, également stoppés dans la cible. Une fois leur cortège électronique reconstitué, ils diffusent en dehors de la cible. Pour accélérer le processus de diffusion, la cible est fortement chauffée. Sortis de la cible, les atomes radioactifs effusent jusqu'à une source d'ions dans laquelle ils sont ionisés. En sortie de source, ils sont accélérés pour former un faisceau et sont transportés jusqu'aux aires expérimentales.

Compte tenu du nombre important de paramètres qui gouvernent les phases de diffusion et d'effusion dans cette technique, celles-ci font l'objet d'études particulières. Afin d'apporter les connaissances nécessaires à la conception et à l'optimisation des futurs dispositifs de production d'ions radioactifs en ligne, il est nécessaire de développer une base de données sur les caractéristiques de diffusion des atomes dans les matériaux cibles.

Dans ce but, le GANIL a conçu et réalisé un nouveau dispositif permettant de tester au cours d'une même expérience plusieurs couples de faisceaux primaires et de cibles, et ainsi d'augmenter de façon significative la vitesse d'obtention de résultats. Les mesures sont réalisées à la suite les unes des autres pour les différents couples projectile-cible, ce qui assure qu'elles sont effectuées dans des conditions expérimentales très proches. La comparaison des résultats sera donc peu affectée par le doute lié à la difficulté de reproduire des conditions expérimentales identiques.

L'ensemble est constitué d'un système d'analyse (ioniseur basé sur une source à Résonance Cyclotronique Electronique associé à un spectromètre de masse), d'un four destiné à fixer la température de la cible à étudier, et d'un distributeur de cibles. L'ensemble a été testé et caractérisé (hors faisceau primaire).

---

Mots clés Cibles - Source d'ions - Diffusion - Effusion - Four haute température - Vide - Spectromètre de masse.

.....

Keywords :Targets - Ion source - Diffusion - Effusion - High temperature oven - Vacuum - Mass spectrometer