



# Réalisation d'un banc de tests de sources d'ions

G. Gaubert

► **To cite this version:**

G. Gaubert. Réalisation d'un banc de tests de sources d'ions. Instrumentation and Detectors [physics.ins-det]. 2000. <in2p3-00271710>

**HAL Id: in2p3-00271710**

**<http://hal.in2p3.fr/in2p3-00271710>**

Submitted on 3 Mar 2009

**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 **DIPLÔME D'INGENIEUR C.N.A.M.**

en

**Instrumentation - Mesures**

par

**Gabriel GAUBERT**

---

***Réalisation d'un banc de tests  
de sources d'ions***

Soutenu le 21/09/2000

---

JURY

PRESIDENT : Pr. Juncar

MEMBRES : MM. Dujardin  
Leroy  
Bieth  
Boduch

**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

**Gabriel GAUBERT**

---

*Réalisation d'un banc de tests  
de sources d'ions*

---

## *Remerciements*

Je tiens tout d'abord à remercier mon maître de stage, monsieur Renan Leroy, et monsieur Marcel Lieuvin, responsable du secteur SPIRAL, qui m'ont accordé leur confiance pour la réalisation de ce projet.

J'exprime également ma reconnaissance à monsieur Philippe Dujardin, qui en tant que responsable de la filière Instrumentation-Mesure du CNAM, a su me conseiller tout au long de la réalisation de ce travail.

Je remercie également les membres du jury, le Professeur Juncar, messieurs Philippe Boduch et Claude Bieth d'avoir accepté de juger mon mémoire de fin d'étude.

Toute ma gratitude va également à mademoiselle Delphine Ribère, messieurs Yves Huguet, Guillaume Duteil, Jean-François Rozé et Cyril Berthe sans qui le banc de test n'aurait pas vu le jour.

Un merci tout particulier à monsieur Jean-Yves Pacquet qui depuis quelques années a su, dans la joie et la bonne humeur, transformer mon ignorance en compétence (du moins je l'espère).

Monsieur Claude Marry m'a apporté de nombreux conseils pour lesquels je le remercie vivement. Il en va de même pour monsieur Pascal Jardin, mademoiselle Nathalie Lecesne et monsieur Jean-Paul Rataud qui, de plus, ont accepté de relire ce mémoire en me faisant part de critiques pertinentes.

Je remercie également madame Marie-Geneviève Saint-Laurent et monsieur Antonio Villari pour les savoirs qu'ils m'ont transmis sur la Physique depuis quelques années.

De nombreux agents du GANIL ont contribué à l'avancement du projet, notamment le groupe Charges et Alimentations, le groupe Hyper-Fréquences et les services techniques et administratifs: je les en remercie tous.

Je ne manque pas de remercier mon fils Isidore qui a su ne pas me tenir rigueur pour mes nombreuses absences durant tout mon cursus au CNAM.

Enfin, je remercie mon épouse, Marie-Emmanuelle, qui m'a tant soutenu au cours de mes études en faisant preuve de patience et de compréhension et même si ces derniers temps, le mot «mémoire» était devenu tabou.

<b>Sommaire</b>
-----------------

INTRODUCTION .....	3
CHAPITRE I: PRESENTATION GENERALE.....	5
I.1. LE GANIL.....	5
I.1.1. Historique et missions .....	5
I.1.2. Domaines de recherche.....	5
I.1.3. Les équipements .....	8
I.2. SPIRAL .....	10
I.2.1. Historique des faisceaux d'ions radioactifs.....	10
I.2.2. Le projet Spiral .....	11
I.2.3. Description générale et objectifs .....	13
I.2.4. Description technique.....	14
I.2.5. L'Ensemble Cible-Source de production .....	14
I.3. LE BANC DE TESTS: CAHIER DES CHARGES FONCTIONNELLES .....	19
I.3.1. Connexions.....	19
I.3.2. Tests du fonctionnement de la source d'ions .....	20
I.3.3. Dégazage des cibles.....	20
I.3.4. Fonctions complémentaires .....	21
I.3.5. Définitions des équipements nécessaires .....	22
I.3.6. Eléments budgétaires.....	23
CHAPITRE II: CONCEPTION ET REALISATION.....	25
II.1. EQUIPEMENTS MECANIQUES .....	25
II.1.1. Châssis .....	25
II.1.2. Ensemble d'extraction.....	26
II.1.3. Dipôle.....	29
II.1.4. Ligne d'analyse .....	31
II.1.5. Vue générale mécanique .....	33
II.2. EQUIPEMENTS ELECTRIQUES.....	34
II.2.1. Principe Haute-Tension.....	34
II.2.2. Implantation des matériels électriques .....	37
II.2.3. Implantation des baies masse 0 V et Haute-Tension.....	38
II.2.4. Générateur HF.....	39
II.2.5. Plans de masse .....	42
II.3. REFRIGERATION .....	44
II.3.1. Description .....	44
II.3.1. Boîte cible .....	46
II.3.2. Chambre à plasma .....	46
II.4. SYSTEME DE VIDE.....	48
II.4.1. Choix des pompes .....	48
II.4.2. Calcul de vide.....	49
II.4.3. Implantation des équipements.....	54
II.4.4. Distribution des gaz .....	55

II.4.5. Procédure de gestion du vide et automatisme .....	57
II.4.6. Mise en service du système .....	59
II.5. SECURITE DES UTILISATEURS .....	59
II.5.1. Conditions de fonctionnement .....	59
II.5.2. Gestion des sécurités par l'automate .....	60
II.5.3. Environnement .....	61
II.5.4. Consignes .....	62
II.6. RESEAU DE COMMUNICATION .....	62
II.6.1. Principe général .....	62
II.6.2. Protocole JBUS .....	64
II.6.3. Commande/Contrôle des alimentations .....	66
II.6.4. Etalonnage Courant - Tension .....	67
II.7. COMMANDE/CONTROLE DU BANC .....	68
II.7.1. Présentation .....	68
II.7.2. Supervision de l'automate .....	69
II.7.3. Programme principal de commande/contrôle des équipements .....	70
CHAPITRE III: PRINCIPES DES TESTS ET RESULTATS .....	81
III.1. ANALYSE DU FAISCEAU D'IONS .....	81
III.1.1. Extraction et focalisation .....	81
III.1.2. Dipôle magnétique .....	82
III.1.3. Transport faisceau .....	83
III.1.4. Les spectres .....	84
III.2. RESULTATS DU PREMIER ECS TESTE .....	88
III.2.1. Connexions .....	88
III.2.2. Fonctionnement de la source .....	89
III.2.3. Dégazage de la cible .....	93
CHAPITRE IV: DOCUMENTATION .....	95
IV.1. GUIDE DE L'UTILISATEUR .....	95
IV.2. PROCEDURE DE TESTS .....	96
IV.3. GESTION DE CONFIGURATION .....	98
CONCLUSION .....	100
LISTE DES FIGURES .....	102
LISTE DES TABLEAUX .....	103
ANNEXES .....	104
ALBUM PHOTOS .....	113
BIBLIOGRAPHIE .....	120

---

## *Introduction*

Les faisceaux d'ions radioactifs s'avèrent aujourd'hui indispensables pour accéder à de nouvelles recherches en physique nucléaire. SPIRAL ou "Système de Production d'Ions Radioactifs Accélérés en Ligne", construit au GANIL à Caen, permet de produire de tels faisceaux.

L'ensemble cible-source (ECS) de SPIRAL est le point crucial du système: il produit des atomes radioactifs, puis les ionise pour former le faisceau d'ions radioactifs.

En fonctionnement, la réaction de production des atomes radioactifs génère un flux de neutrons intenses. Ce flux détériore les caractéristiques magnétiques des aimants permanents de la source d'ions et active également tous les matériaux présents dans la casemate.

Ainsi, la durée de vie d'un ECS est estimée à quinze jours et la casemate est un local où les rayonnements seront toujours présents. La mise en place d'un ensemble neuf est entièrement automatisée pour éviter tout travail sous rayonnement. La préparation de l'ECS neuf doit donc être optimale avant sa mise en place dans la casemate de production. Ceci nécessite la réalisation d'un banc de tests afin d'assurer les connexions, le fonctionnement de l'ECS et le dégazage des cibles.

Il existe au GANIL plusieurs bancs d'essais ou d'exploitation de sources d'ions mais aucun n'est adapté aux ECS de SPIRAL.

Le « Banc de tests des ECS » est donc un instrument de mesures complet dont la conception et la réalisation ont été confiées au groupe Cible-Source du GANIL. L'objectif est d'avoir un équipement dédié aux ECS, qui permet de statuer sur la qualité d'un ensemble neuf avant son exploitation dans la casemate de production de SPIRAL.

Ce projet s'est déroulé selon les étapes suivantes:

- définition du cahier des charges
- élaboration d'un plan de développement et besoins financiers
- achats des divers équipements et réception
- construction des ensembles mécaniques
- installations des équipements électriques et câblages
- programmation informatique du système de commande et contrôle et de l'automate

- 
- mise au point et étalonnages
  - élaboration des procédures de tests et d'utilisation du banc
  - tests du premier Ensemble Cible- Source

La responsabilité de ce projet m'a été confiée de la définition du banc jusqu'aux premiers essais. J'ai pris en charge la conception des ensembles mécaniques et des systèmes de réfrigération, la définition des principes électriques et des sécurités, la définition et la mise en place du système de vide, la programmation et la mise au point du système de commandes et contrôles. D'autres intervenants ont participé à la réalisation de ce travail comme le bureau d'étude mécanique pour la réalisation des plans, le groupe charges et alimentations, le groupe gestion des installations pour l'automatisme, le groupe hyper-fréquences et le support technique notamment pour les montages mécaniques des châssis.

Ce mémoire fait la synthèse du projet banc de tests en quatre chapitres.

Après avoir situé le projet SPIRAL au sein du laboratoire GANIL, le premier chapitre présente le banc de tests des ECS par son cahier des charges fonctionnelles.

La conception et la réalisation de la mécanique au système de commande/contrôle, font l'objet du deuxième chapitre.

L'analyse du faisceau d'ions aboutit à la réalisation de spectres caractéristiques de la source d'ions. Les principes de ces tests sont exposés dans le troisième chapitre. Les résultats du premier ECS testé y sont également présentés.

J'ai également été amené à rédiger un certain nombre de documents pratiques et techniques pour ce projet. Ils font l'objet du quatrième et dernier chapitre de ce mémoire.

---

## *Chapitre I: Présentation générale*

### I.1. Le GANIL

#### I.1.1. Historique et missions

Le Grand Accélérateur National d'Ions Lourds est en exploitation à Caen depuis 1983 [Bex90]. C'est un équipement commun à l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des particules (IN2P3) du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et à la Direction des Sciences de la Matière (DSM) du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA). C'est un laboratoire d'accueil qui, depuis 1994, est labellisé Grande Installation Européenne pour la recherche. Ainsi, plus de 700 chercheurs de cent laboratoires différents, dont 25% d'étrangers, sont accueillis chaque année sur le site par une quinzaine de physiciens permanents, pour effectuer leurs expériences.

Sa vocation est de contribuer à l'avancée des connaissances dans le domaine de la physique nucléaire, de la physique atomique et de la matière condensée, mais aussi en astrophysique et en biologie. En outre, le GANIL offre ses compétences scientifiques et techniques aux industries de pointe, dont les activités ne sont pas toujours directement liées à la physique nucléaire ou atomique.

#### I.1.2. Domaines de recherche

##### *\* De la physique nucléaire à l'astrophysique*

Toute matière est un assemblage d'atomes. Situé au coeur de l'atome, le noyau dans son état fondamental est « muet »: les forces de cohésion qui lient les nucléons (neutrons et protons) sont si intenses, la taille du noyau est si petite ( $10^{-14}$  m environ) qu'il ne peut être observé directement. Des collisions entre noyaux sont réalisées grâce aux faisceaux d'ions lourds rendant ainsi possible l'étude du comportement du noyau atomique. Aussi, les états dits extrêmes de la matière nucléaire peuvent prendre diverses formes; deux exemples, faisant l'objet d'études poussées au GANIL, peuvent plus particulièrement être cités:

- La multifragmentation des noyaux chauds:

---

Lors de la collision entre un « noyau projectile » et un « noyau cible », une fraction de l'énergie cinétique du noyau accéléré est dissipée sous forme d'énergie thermique, donnant naissance à des noyaux chauds (ou fortement excités), dont la température peut atteindre plus de cent milliards de degrés. Ceux-ci peuvent alors exploser en une multitude de noyaux de petite taille et de particules légères: c'est le phénomène de multifragmentation du noyau dont l'étude a pour objet la détermination de l'équation d'état de la matière nucléaire (relation entre température, pression et densité).

De tels noyaux sont présents dans notre univers; ils sont formés dans la phase de compression en fin de vie d'une étoile massive, prélude à son explosion en supernovae.

L'infiniment petit et l'infiniment grand se rejoignent donc ici dans les expériences réalisées au GANIL.

- Les noyaux exotiques:

Le second exemple concerne la production lors de collisions très violentes, de noyaux dits exotiques qui, contrairement aux noyaux stables constituant notre planète, sont caractérisés par un fort déséquilibre entre leur nombre de protons et de neutrons. Plus de 80 nouvelles espèces nucléaires radioactives ont ainsi été découvertes et étudiées au GANIL et ont fourni des informations essentielles pour la compréhension de la structure de la matière nucléaire, informations inaccessibles avec les noyaux stables.

Ces études sont aussi très corrélées à la cosmologie car certains noyaux exotiques sont le point de passage obligé pour la formation des éléments lourds qui composent notre monde, processus que l'on appelle nucléosynthèse stellaire.

*\* La physique atomique et de la matière condensée*

Les ions lourds multichargés constituent, avec leur très petit nombre d'électrons, des édifices atomiques aux propriétés singulières, tant par leur structure, que par leurs interactions avec les autres atomes: leur efficacité d'ionisation vis à vis des atomes cibles est très grande. L'étude de ces structures, ainsi que celle des phénomènes élémentaires de collision, relèvent de la physique atomique; elles présentent un intérêt sur le plan fondamental (discipline de l'électrodynamique quantique), mais également sur celui des applications dans les domaines de la physique des plasmas et de l'étude de l'interaction ion-matière. Lorsqu'il pénètre dans un solide,

---

c'est en effet par une succession d'interactions élémentaires de ce type qu'un ion accéléré va céder son énergie aux électrons du matériau. La physique de la matière condensée étudie la manière dont la dissipation de cette énergie induit des désordres aux échelles microscopiques: les ions lourds laissent dans leur sillage, un cylindre de matière transformée voire totalement désordonnée. Ce désordre modifie alors profondément les propriétés physiques des matériaux. Le Centre Interdisciplinaire de Recherche avec les Ions Lourds (CIRIL), laboratoire mixte CEA-CNRS se consacre à l'étude de l'interaction des ions lourds avec la matière. Tout en développant ses recherches propres, le CIRIL a pour vocation d'animer ce thème scientifique et de réaliser des équipements appropriés d'intérêt collectif. Il est implanté sur le site du GANIL et accueille plus de 300 chercheurs annuellement: expérimentateurs de Physique Atomique et de Physique de la matière condensée.

*\* La Biologie*

Dans le domaine des sciences du vivant, les ions lourds pourraient constituer de nouvelles voies pour la radiothérapie. En effet, les faisceaux d'ions lourds présentent sur les rayonnements conventionnels ( $\gamma$ , X et électrons en particulier) l'avantage d'être très sélectifs en ce qui concerne la localisation de la dose qu'ils déposent dans les tissus. Par ailleurs, le parcours des rayonnements dans la matière biologique est fonction de l'énergie des faisceaux utilisés; aux énergies délivrées par le GANIL, ce parcours, de quelques centimètres, permet de réaliser des expériences de haut intérêt pour la recherche biomédicale.

*\*Les applications industrielles du GANIL [cf. Annexe 1]*

Les faisceaux du GANIL sont également utilisés pour des applications industrielles, et une salle d'expériences spécifique leur est consacrée. Le Service des Applications Industrielles des Faisceaux (SAIF) est l'interlocuteur des industriels qui, tel MATRA MARCONI SPACE simulent au GANIL l'environnement spatial afin d'améliorer la résistance aux rayonnements cosmiques des composants électroniques embarqués sur des satellites. De même étudie-t-on avec EDF et le CIRIL les détériorations des cuves des réacteurs causées par l'irradiation neutronique.

### I.1.3. Les équipements

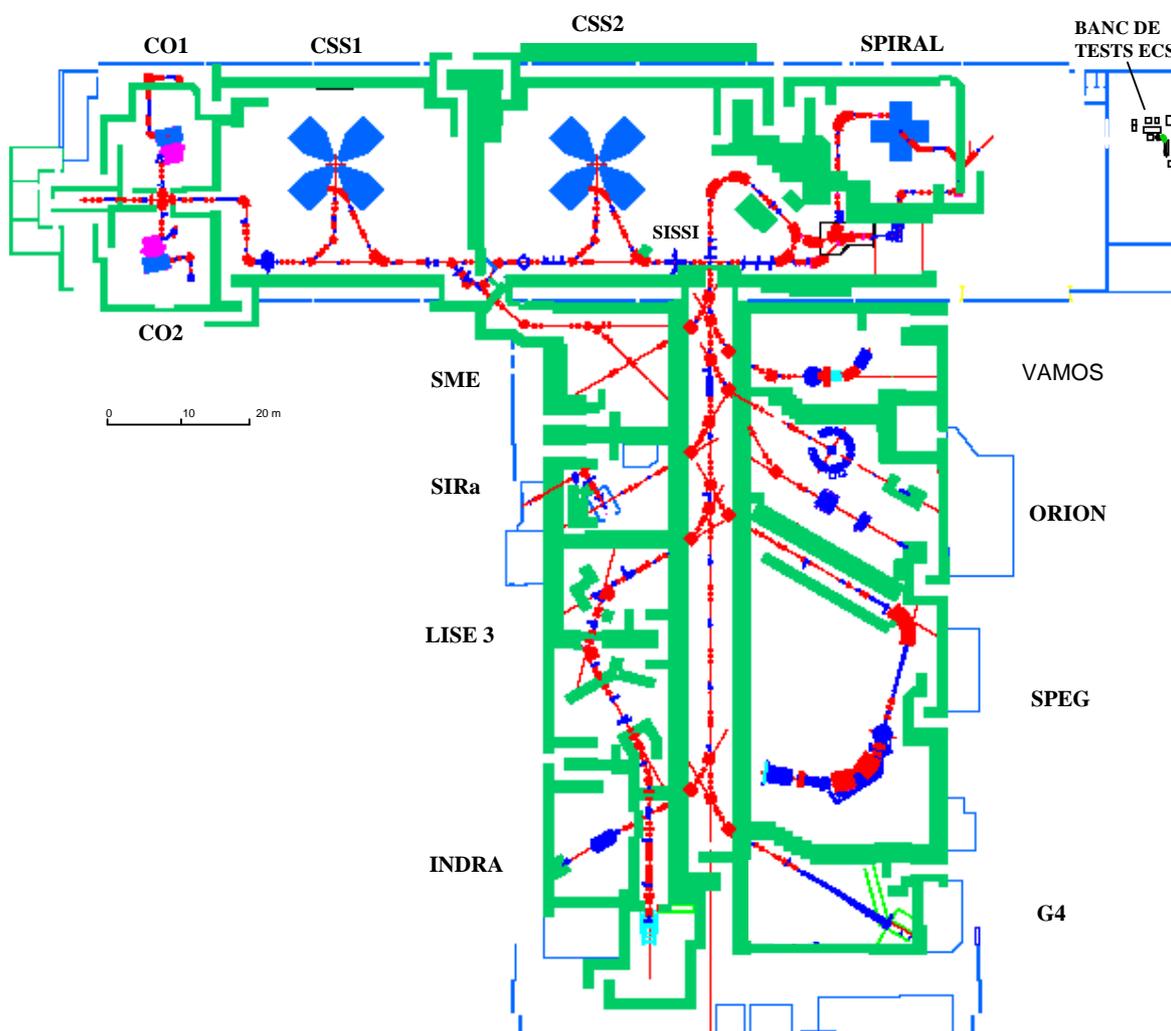


Figure 1: Vue schématique des accélérateurs et des aires expérimentales du GANIL

Le GANIL est constitué de trois cyclotrons C0, CSS1 et CSS2 couplés en série. Une source d'ions ECR [Sor94] produit un faisceau continu d'ions stables multichargés qui est regroupé en paquets de particules avant d'être accéléré dans un cyclotron compact C0. Il atteint alors l'énergie requise pour être injecté sur la première orbite du cyclotron à secteur séparés CSS1. Ce dernier accroît son énergie d'un facteur 13,6. Le second cyclotron CSS2 étant identique et couplé au précédent, l'accélération n'est possible que si la charge électrique des ions est augmentée. L'accroissement d'état de charge s'obtient en interposant sur le trajet du faisceau une

---

feuille de carbone très mince, un éplucheur d'ions, qui ne perturbe que très faiblement leur vitesse. CSS2 multiplie l'énergie des ions par un facteur 6,25.

A ce stade, le faisceau a atteint son énergie finale (la vitesse maximale des ions correspond environ au tiers de la vitesse de la lumière). Il est soigneusement aligné et adapté pour être analysé par le spectromètre  $\alpha$  à haute résolution, grâce auquel les ultimes vérifications et ajustements pourront s'effectuer, avant l'envoi des ions vers la salle où est installée l'expérience programmée.

Deux catégories de faisceaux sont disponibles simultanément: les faisceaux de haute énergie, et les faisceaux de moyenne énergie. Les premiers sont délivrés par le système accélérateur complet. Les seconds, accélérés uniquement par CSS1, sont délivrés en continu dans la salle SME (sortie moyenne énergie).

Aujourd'hui, GANIL peut fournir une grande gamme de faisceaux d'ions lourds différents, allant du  $^{12}\text{C}$  à  $^{238}\text{U}$  avec des énergies variant de 24 Mev/A pour les plus lourds à 96 Mev/A pour les plus légers. Les intensités disponibles vont de  $6 \cdot 10^9$  à  $2 \cdot 10^{12}$  pps (particules par seconde), ce qui correspond à une puissance maximale du faisceau de 400W.

Toutefois, certaines expériences nécessitent la production d'un faisceau d'ions secondaires radioactifs. Le dispositif SISSI (Source d'Ions Secondaires à Solénoïdes Intenses) permet de générer ces faisceaux secondaires pour tous les équipements expérimentaux du GANIL: une cible, interposée sur le trajet du faisceau primaire constitue une source d'ions secondaires (issus des collisions entre ions projectiles et noyaux cibles) émis à l'intérieur d'un cône, dont l'ouverture est modifiable à volonté, grâce à un système optique de lentilles supraconductrices. L'énergie et les qualités optiques du faisceau secondaire issu de ce système sont difficiles à maîtriser.

Avec l'entrée dans le troisième millénaire, l'achèvement du projet SPIRAL, actuellement en attente d'autorisations administratives de démarrage, permettra l'accélération de faisceaux d'ions radioactifs avec des qualités optiques optimales. La description de ce projet, au sein duquel s'inscrit le banc de tests des ECS, fait l'objet de la suite de cette présentation du laboratoire.

---

## I.2. SPIRAL

### I.2.1. Historique des faisceaux d'ions radioactifs

Le GANIL a été depuis quinze ans à la pointe de la physique avec ses faisceaux d'ions lourds [Spi94]. L'engouement et l'intérêt grandissant de la communauté scientifique internationale pour la physique avec faisceaux d'ions radioactifs ont poussé le laboratoire à engager des efforts majeurs dans cette direction.

L'étude des propriétés des noyaux atomiques loin de la vallée de stabilité est un sujet qui passionne les physiciens depuis quelques années. Les démarches pionnières entreprises au CERN (Suisse) depuis 1967 dans le projet ISOLDE ont permis d'étendre considérablement notre connaissance des noyaux éloignés de la vallée de la stabilité. Ainsi, plus de 65 isotopes de la table de Mendeleïv ont été produits par fragmentation d'une cible épaisse avec des protons de haute énergie. Les noyaux radioactifs diffusés hors de la cible puis ionisés dans une source d'ions ont été étudiés à très basse énergie (60 keV). Les masses, les valeurs de spin ou les moments magnétiques de nombreux nucléides ont ainsi pu être mesurés. ISOLDE a également permis de mettre pour la première fois en évidence de nouveaux modes de décroissance radioactive tels que l'émission retardée de protons, de neutrons, de particules  $\alpha$  ou autres particules légères. D'autres centres de recherche en Europe et en Amérique ont été créés pour étudier les noyaux radioactifs en utilisant la méthode ISOL (Isotopic Separation On Line). L'annexe 2 explicite quelle physique est abordée avec les faisceaux d'ions radioactifs.

L'étude des propriétés fondamentales de la matière nucléaire a connu une avancée importante en 1979 au laboratoire Bevalac de Berkeley (USA) lorsque la fragmentation d'ions lourds de faisceaux stables sur des cibles minces a été utilisée pour produire des noyaux radioactifs riches en neutrons d'énergie proche de celle du projectile. Des noyaux de temps de vie très courts ont été observés et des régions de plus en plus éloignées de la vallée de stabilité ont été atteintes. De nombreux développements de faisceaux d'ions radioactifs rapides ont suivi ces premiers résultats, notamment au GANIL avec SISSI, à GSI (Allemagne), à MSU (USA) et à Riken (Japon).

---

Parallèlement, on a construit des séparateurs de fragments dans ces installations délivrant des faisceaux secondaires d'ions radioactifs afin de maximiser leur production et leur pureté. Avec cette méthode, les meilleurs résultats sont obtenus pour les fragments dont la vitesse est proche de celle du projectile. La qualité du faisceau ainsi que son intensité chutent rapidement lorsque celui-ci est fortement ralenti. Le besoin d'étudier les propriétés des noyaux aux énergies inférieures à 30 MeV/A s'est fait ressentir au fur et à mesure des avancées accomplies, notamment en astrophysique ou dans l'étude de la structure nucléaire. Ainsi, un premier faisceau d'ions radioactifs post-accélérés a été produit à Louvain-la-Neuve (Belgique) en 1989 grâce à la fragmentation d'une cible épaisse<sup>1</sup> par un faisceau de protons. Les atomes radioactifs sont ionisés puis accélérés dans un cyclotron à une énergie inférieure à 1 MeV/A.

C'est dans ce contexte que s'inscrit SPIRAL, « Système de Production d'Ions Radioactifs Accélérés en Ligne », installation qui sera prochainement mise à la disposition des physiciens. SPIRAL a la particularité d'être le seul système de production d'ions radioactifs basé sur la fragmentation d'ions lourds sur une cible épaisse. Le fait de pouvoir créer divers faisceaux radioactifs en variant la nature du projectile tout en conservant une cible optimisée pour la production et la diffusion des nucléides à l'intérieur du matériau est un avantage majeur de cette méthode.

### I.2.2. Le projet Spiral

Cette nouvelle installation est principalement constituée d'un ensemble cible-source (ECS) de production d'ions radioactifs, suivi d'un cyclotron de moyenne énergie (CIME) qui accélère ces ions à des énergies comprises entre 1,7 et 25 MeV/A.

Les choix fondamentaux concernant le projet SPIRAL résultent de l'infrastructure existante de GANIL, c'est-à-dire:

- faisceaux de haute intensité / énergie,
- aires expérimentales déjà équipées,
- groupe de travail possédant une très bonne expérience des sources d'ions ECR (Electronic Cyclotron Resonance) et des cyclotrons.

---

<sup>1</sup> Contrairement à une cible mince, la cible épaisse arrête complètement le faisceau incident.

Comme le montre la figure 2 ci-dessous, SPIRAL est complètement intégré dans le GANIL actuel.

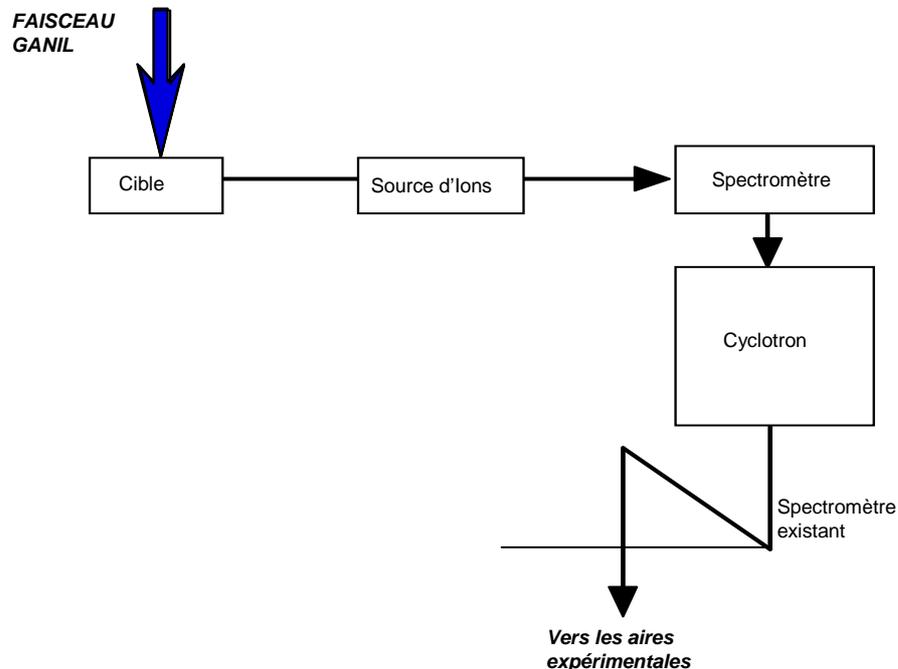


Figure 2: Schéma de principe du système SPIRAL

La grande variété de faisceaux d'ions lourds que le GANIL peut délivrer permet de produire de nouveaux noyaux instables avec une cible épaisse unique, spécialement étudiée pour optimiser la production et la diffusion des fragments.

Des améliorations ont été apportées aux équipements existants, notamment pour augmenter l'intensité des faisceaux primaires. En effet, les rendements de production des atomes radioactifs dans une cible étant relativement faibles (1% dans le meilleur des cas), les intensités de faisceaux primaires doivent être les plus élevées possibles pour créer des faisceaux secondaires d'intensité acceptable pour SPIRAL. C'est l'objet du projet THI (Transport des Hautes Intensités) en cours de finalisation au GANIL [Bar95]. L'intensité des faisceaux légers jusqu'à l'Argon sera multipliée par au maximum un facteur 15 pour atteindre au plus  $2 \cdot 10^{13}$  pps, pour une puissance maximale de faisceau autorisée de 6 kW. Pour atteindre ces objectifs il est nécessaire



#### I.2.4. Description technique

Spiral est composé de quatre parties essentielles:

- un ensemble de production des ions radioactifs (ou ECS: Ensemble Cible-Source), situé dans une casemate (CS1) en sous-sol. L'ECS est décrit plus précisément dans le paragraphe suivant car il est l'objet central du banc de tests.

- une ligne de faisceau, dite ligne Très Basse Energie (TBE), qui assure un premier tri des éléments produits puis l'adaptation du faisceau issu de la source à l'acceptance du post-accelérateur.

- un Cyclotron à Ions de Moyenne Energie (CIME), qui accélère le faisceau dans une gamme d'énergies comprises entre 1,7 et 25 MeV/A, et assure de plus un deuxième tri des éléments.

- une ligne de faisceau de Moyenne Energie (ME) qui conduit le faisceau extrait du cyclotron au spectromètre  $\alpha$ , avant d'être distribué dans les aires expérimentales actuelles du GANIL.

#### I.2.5. L'Ensemble Cible-Source de production

L'ECS de Spiral est placé dans une casemate (Figure 4) protégeant l'extérieur des radiations intenses (essentiellement neutroniques) émises lors de la production des atomes radioactifs. Les « Front-Ends »<sup>2</sup> Haute et Basse Energie (FEHE/FEBE) se situent de part et d'autre de l'ECS. Les derniers diagnostics (profils) de faisceaux primaires avant la cible sont dans le FEHE. Le FEBE est lui constitué d'un système d'extraction des ions radioactifs issus de la source et des éléments

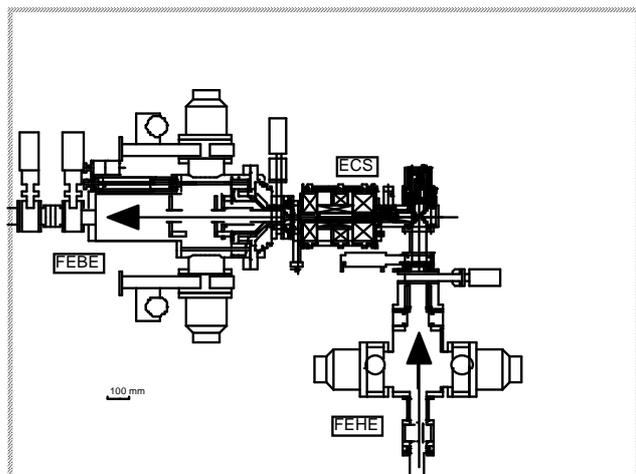


Figure 4: Casemate de production

<sup>2</sup> Ensemble de raccordement

d'optique pour adapter le faisceau à la ligne TBE. La mise en place de l'ECS sur le châssis est entièrement automatique pour éviter toute manipulation humaine dans cet environnement défavorable du point de vue radiologique.

L'ECS est composé de trois sous ensembles: la cible de production, la source d'ions et le plateau de connexion de l'ensemble sur le châssis dans la casemate.

#### LA CIBLE DE PRODUCTION:

Les faisceaux radioactifs de SPIRAL sont produits par des réactions nucléaires du faisceau primaire sur une cible épaisse de carbone située près de la source d'ions. Pour assurer une grande rapidité de diffusion des éléments radioactifs à travers le matériau, il est nécessaire de chauffer la cible en carbone aux environs de 2300°K. Le faisceau primaire, totalement arrêté dans la cible, y dépose son énergie qui localement est suffisante pour atteindre la bonne température (figure 5). La forme du pic de Bragg contribue au fait que la distribution de la température dans l'ensemble de la cible ne soit pas homogène. La cible développée pour SPIRAL est composée de lamelles de graphite de rayon croissant (figure 6). Grâce à sa forme conique, l'énergie déposée par les ions incidents est répartie sur plusieurs lamelles [Lec97]. Ceci permet de pallier le problème de surchauffe locale et d'homogénéiser la température. Les lamelles sont solidaires d'un axe central à travers

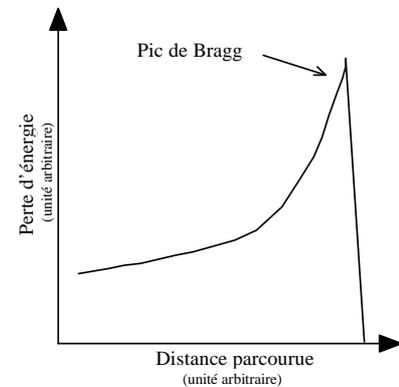


Figure 5: Perte d'énergie dans la matière en fonction du parcours des ions

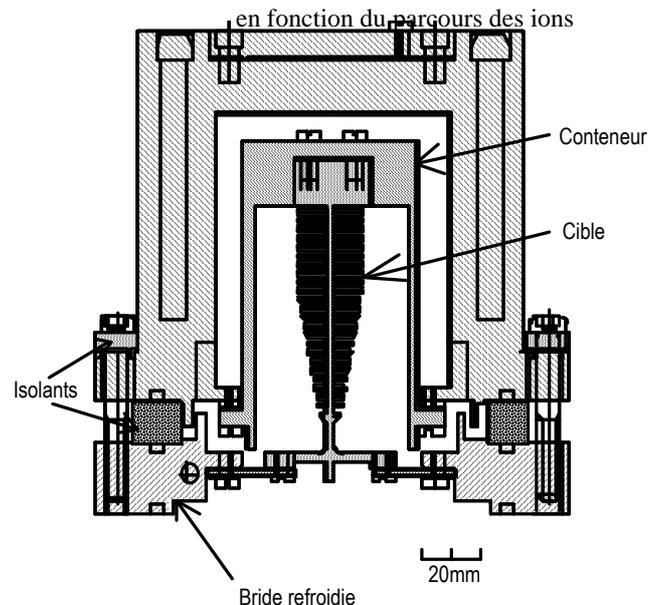


Figure 6: Cible pour l'Argon

lequel un courant ohmique peut circuler pour assurer un chauffage auxiliaire.

## LA SOURCE D'IONS

NANOGAN III est la source à aimants permanents développée pour ioniser les atomes radioactifs qui diffusent de la cible (Figure 7). Ses principales caractéristiques sont données en annexe 3. Elle permet de produire des ions multichargés (adaptés à l'injection dans le cyclotron CIME) avec une grande efficacité d'ionisation pour les gaz rares [Mau98].

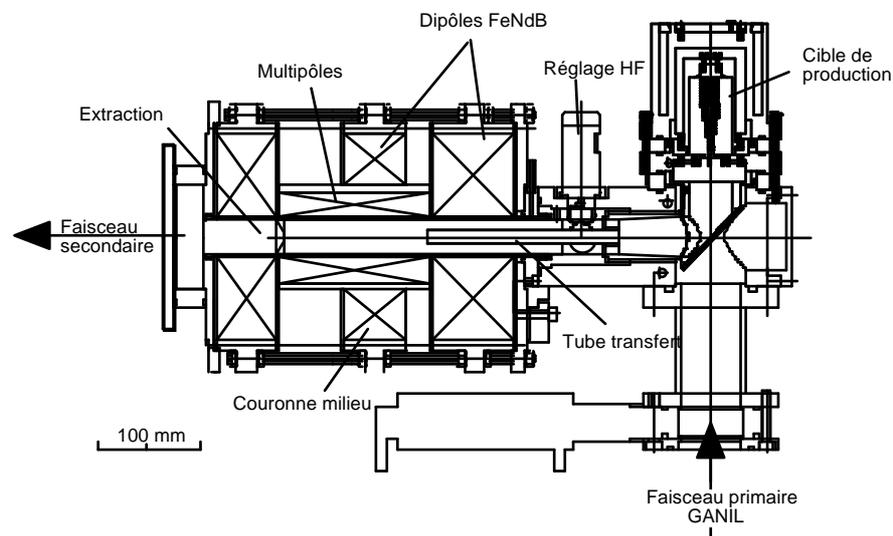


Figure 7: Vue en coupe de l'ensemble Cible-Source

Les atomes radioactifs produits dans la cible diffusent sous l'effet de sa température (2300 °K) et atteignent le plasma de la source contenant des électrons confinés par un champ magnétique. Ils sont alors ionisés sous l'effet combiné des électrons chauffés par une onde électromagnétique haute fréquence: c'est la « résonance électronique cyclotronique » dont le principe physique est explicité en annexe 4.

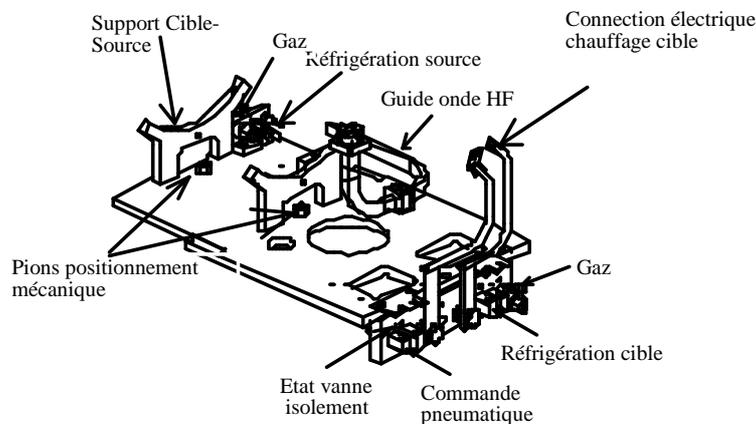
Les parois de la chambre à plasma et les zones de transfert de la cible vers la source sont refroidies, protégeant ainsi les aimants du chauffage par le plasma et sélectionnant les éléments produits par le système: seuls les gaz peuvent atteindre le plasma de la source.

Après leur sortie du plasma les ions positifs sont accélérés afin de former le faisceau secondaire. Un champ électrique est créé entre une électrode positive, dite électrode plasma, et une électrode d'extraction mise à la masse. L'espace inter-électrodes constitue le gap accélérateur. Le gap, ainsi que la tension d'extraction, jouent un rôle important dans les caractéristiques optiques du faisceau extrait.

## LE PLATEAU

La source et la cible sont assemblées sur un plateau (Figure 8) standardisé qui s'adapte automatiquement sur le châssis dans la casemate. Le plateau grâce à son connecteur est l'interface entre la source, la cible et l'instrumentation qui pilote l'ensemble. Il assure les adaptations mécaniques dans la casemate (alignements), les continuités électriques et pneumatiques, la réfrigération de la source et de la cible ainsi que la distribution des gaz dans la source.

L'Ensemble Cible Source (Figure 9) est le coeur de la production des ions radioactifs



du projet SPIRAL. Sa réalisation doit être optimale et rien ne peut être laissé au hasard avant sa mise en place dans la casemate. Le banc de tests est l'ultime point de contrôle des ECS avant leur exploitation.

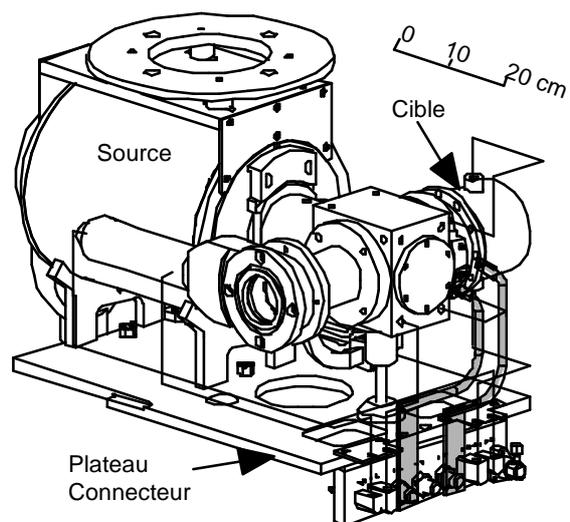


Figure 9: Vue d'ensemble d'un ECS

---

### I.3. Le banc de tests: cahier des charges fonctionnelles

La première démarche de ce projet a été de rechercher les fonctions que le banc de tests doit assurer. Ce travail a permis d'aboutir à la rédaction d'un cahier des charges fonctionnelles qui liste par ordre d'importance l'ensemble des fonctions ainsi que les contraintes qui s'y rapportent. Ci-dessous sont rapportés les principaux éléments de définition du banc de tests qui en ressortent.

#### I.3.1. Connexions

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, l'ECS est muni d'un plateau connecteur. Le plateau assure le positionnement de l'ECS sur le châssis de la casemate par ses piétements. Le connecteur du plateau s'enfiche par translation de l'ECS dans un connecteur femelle fixe. Le banc de tests doit donc reproduire le châssis mobile de la casemate et son connecteur fixe. Il existe également un deuxième connecteur fixe à reproduire qui concerne une arrivée de gaz et un circuit d'eau pour le refroidissement de la chambre à plasma. Un connecteur pour le guide d'onde (injection d'onde HF dans la source) est aussi nécessaire.

On vérifie ainsi l'alignement de l'ECS et des fiches des connecteurs.

Un panneau de refroidissement permet l'alimentation en eau du cube support cible et de la chambre à plasma de la source. On teste ainsi l'étanchéité de ces circuits.

De l'air comprimé alimente les fiches du connecteur de l'ECS reliées à la vanne « Haute Energie ».

Les continuités électriques sont également assurées par le connecteur fixe. Elles concernent le report des états de la vanne « Haute Energie » au système de commande contrôle, mais aussi l'alimentation en courant de la cible.

En ce qui concerne la mise sous vide de l'ECS et son étanchéité, il est nécessaire de reproduire un système de pompage similaire à celui de la casemate. C'est-à-dire un pompage primaire à travers les sas d'isolement et un pompage secondaire via les enceintes haute et basse

---

énergie. Une vanne de détection de fuite peut aussi être installée mais nous verrons dans le paragraphe suivant que le fonctionnement de la source peut parfois servir à la détection des fuites sur l'ECS lui-même.

### I.1.2. Tests du fonctionnement de la source d'ions

Dans la casemate, l'ECS est porté à un potentiel de 34 KV. Le banc de tests doit permettre la vérification de la tenue en tension. Ceci implique de rassembler sur une plate-forme Haute-Tension l'ECS et tous les équipements qui lui sont directement reliés. Un transformateur d'isolement alimente la plate-forme en énergie tout en l'isolant du secteur primaire.

Pour assurer la vérification des paramètres de fonctionnement de la source d'ions, un générateur haute fréquence (10 GHz) permet de générer le plasma. Deux entrées de gaz dans la source sont assurées comme dans la casemate par des vannes de régulation. Un système d'extraction des ions du plasma permet de mettre en forme le faisceau en sortie de source. Pour piloter l'ensemble, un système de commandes et contrôles est nécessaire.

Pour analyser le faisceau extrait, la ligne de faisceau est munie d'un dipôle électromagnétique (et de son alimentation) et d'un système de mesure du courant du faisceau (coupelle de Faraday). Ainsi, la fonction de tests du fonctionnement de la source d'ions sera remplie.

### I.1.3. Dégazage des cibles

Lorsqu'un faisceau est implanté dans une cible épaisse, les ions sont totalement arrêtés et déposent toute leur énergie. Ceci provoque un échauffement de la cible: jusqu'à 2000°C pour la cible de SPIRAL. Cette température est favorable à la diffusion des ions radioactifs produits mais elle favorise également la diffusion hors de la cible de corps prisonniers du matériau à température ambiante: eau, oxygène, azote ou autres impuretés. Le dégazage est si fort lorsque la cible est neuve que le fonctionnement de la source d'ions est compromis. Pour ioniser des ions radioactifs le plus tôt possible dès lors qu'un ECS neuf est installé dans la casemate, la cible doit donc être déjà dégazée. Après les tests, l'ECS est aéré avec un gaz inerte (argon) et

---

maintenu en l'état jusqu'à son transfert du banc de tests à la casemate. Ainsi la cible sera très rapidement utilisable.

Le banc de tests doit assurer cette fonction de dégazage grâce à une alimentation en courant qui permet le chauffage ohmique de la cible (jusqu'à 6 kW). Cette alimentation est au potentiel haute-tension de l'ECS, plus la polarisation du tube transfert (650 V). La plate-forme Haute-Tension doit donc être découplée du réseau électrique primaire par un transformateur d'isolement suffisamment dimensionné. Pour des raisons de compatibilité des matériels avec ceux de SPIRAL, un transformateur de 30KVA similaire à celui de la casemate devra être installé. Le surdimensionnement est en prévision de développements futurs d'ECS avec, par exemple, un tube de transfert chauffant pour la production d'ions radioactifs condensables.

#### I.1.4. Fonctions complémentaires

\* Tests des sources d'ions monochargés:

Une des évolutions probables de l'ensemble SPIRAL est la solution dite  $1+/n+$ . Cette méthode consiste à produire dans la casemate des faisceaux d'ions radioactifs monochargés ( $1+$ ) avec des ECS dont la source a une énergie d'ionisation qui n'autorise qu'une simple ionisation des atomes. Le faisceau d'ions  $1+$  est capturé dans le plasma d'une source d'ions multichargés ( $n+$ ) à l'extérieur de la casemate. Le principal avantage de cette méthode est d'effectuer une première sélection en masse avant la source d'ions multichargés, c'est à dire une diminution notable du nombre de polluants dans le faisceau d'ions radioactifs. Avec cette méthode, seul l'ECS aurait une durée de vie limitée dans la casemate, alors que la source  $n+$  aurait une durée de vie illimitée.

Pour analyser le faisceau extrait, le spectromètre de masse (dipôle) doit avoir une rigidité magnétique supérieure au dipôle actuel de SPIRAL: 0,315 T.m contre 0,136 T.m. Par exemple, ce spectromètre permettra de défléchir un ion de masse 240, de charge  $1+$ , pour une tension d'extraction de 20 kV.

C'est ce type de dipôle qu'il faut implanter sur le banc de tests pour satisfaire la fonction de tests des sources d'ions monochargés.

Dans un premier temps et pour des raisons budgétaires ce spectromètre n'a pas été acheté. Un dipôle disponible de rigidité magnétique plus faible (0,153 T.m) a été monté sur le banc de tests. Cependant cet aimant, prévu pour une autre installation, devra être remplacé. Le spectromètre initialement prévu sera intégré dans les investissements futurs pour le banc de tests.

**\*Maintenance du matériel de la casemate**

Pour des raisons budgétaires, le matériel du banc de tests doit, autant que faire se peut, servir de maintenance aux équipements de la casemate. Le fonctionnement de la casemate sera toujours prioritaire sur celui du banc de tests (moyennant bien entendu que des ECS pré-testés soient disponibles).

Cette fonction conditionne surtout les choix dans les matériels de vide (groupes de pompage turbomoléculaires, pompes primaires, vannes de dosage des gaz), les alimentations électriques (Haute-Tension, courant, vanne de gaz), les automates et interfaces électroniques de commande/contrôle.

**I.1.5. Définitions des équipements nécessaires**

La définition de l'ensemble de ces fonctions et contraintes permet de dresser un schéma de principe du banc et une première évaluation des équipements nécessaires. C'est ce que montre la figure 10 ci-après.

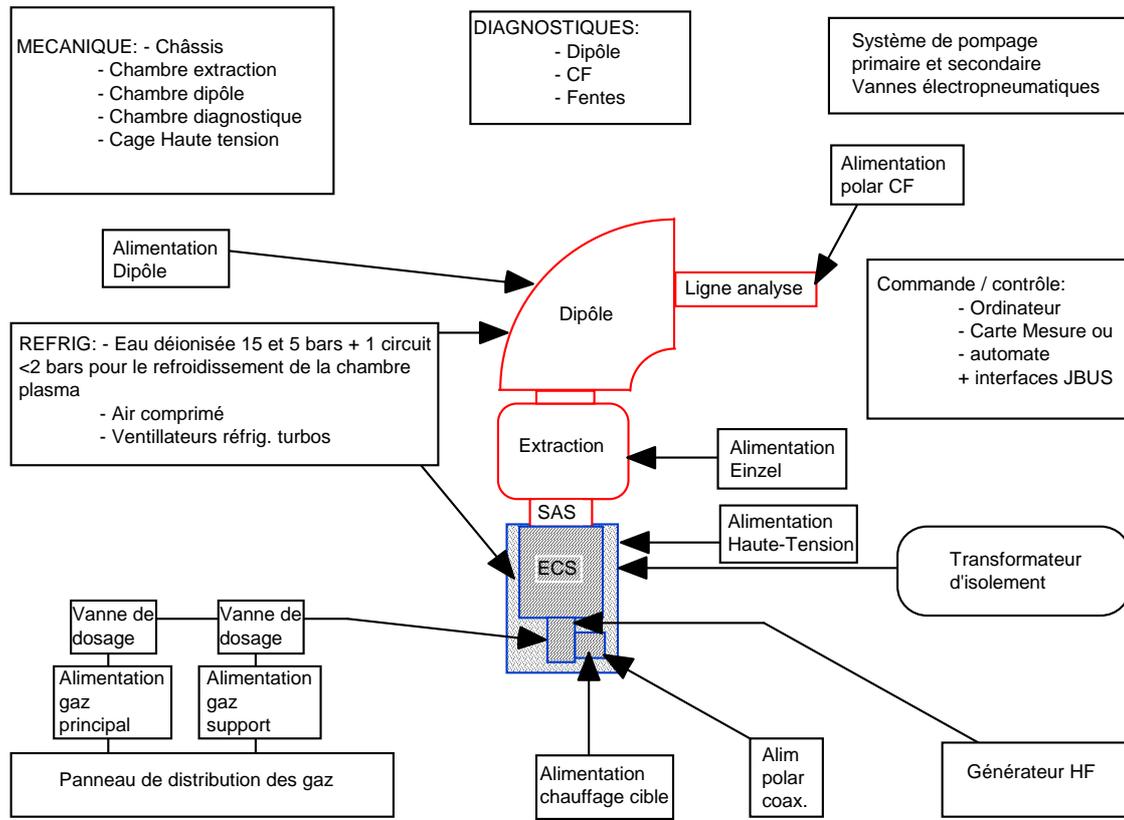


Figure 10: Schéma de principe du banc de tests

### I.3.6. Éléments budgétaires

L'ensemble des investissements engagés pour le banc de tests se monte à 1.258.000 FF. Le tableau 1 détaille les coûts engagés par sous-ensembles.

---

<b>Désignation</b>	<b>Coûts réalisés kF</b>
Vide	196
Alimentations	316
Transformateur	35
Diagnostiques	3.3
Réfrigération	15.7
Commande/Contrôle	223
Câblage/Montage	154
Distribution des gaz	22
Mécanique	293
<b>TOTAL</b>	<b>1258</b>

Tableau 1: Elements budgétaires

## Chapitre II: Conception et réalisation

### II.1.Equipements mécaniques

#### II.1.1.Châssis

Le châssis se décompose en deux sous-ensembles: le châssis mobile Haute Tension sur lequel l'ECS se positionne et le châssis fixe<sup>3</sup> sur lequel est placé le châssis mobile, la boîte d'extraction, le spectromètre de masse et la ligne d'analyse. Il est représenté sur la figure 11 ci-dessous.

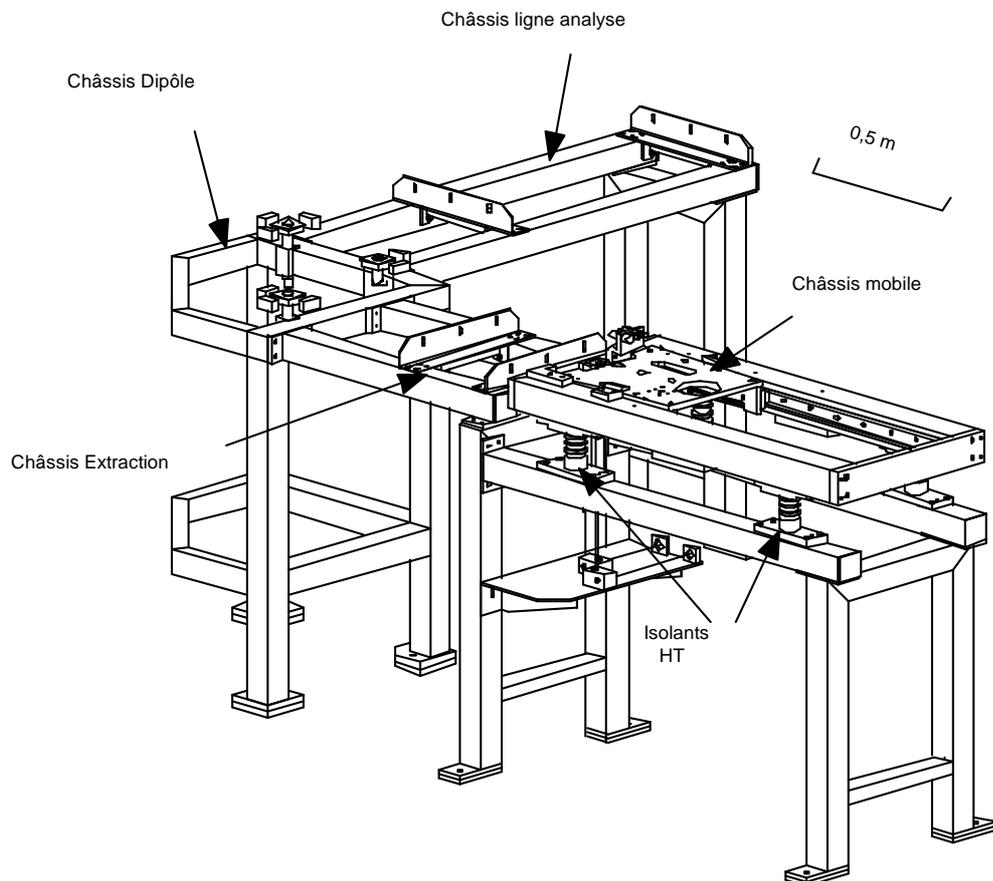


Figure 11: Plans des ensembles châssis

<sup>3</sup> Le châssis fixe est à la masse (ou 0 volt)

### \* Châssis mobile Haute Tension

Cet ensemble est très ressemblant à celui de la casemate de SPIRAL. C'est une des données critiques du cahier des charges puisqu'il permet d'assurer la première fonction du test des connexions de l'ECS dans la casemate. Il est isolé électriquement du châssis fixe par des plots en céramique (type EDF) qui permettent d'isoler les ensembles jusqu'à 90 kV.

Les deux vannes de dosage des gaz, ainsi que la fuite calibrée sont placées sur le connecteur fixe.

Le plateau mobile et le connecteur (photo figure 12) ont été montés et alignés par rapport à la ligne faisceau, à l'aide d'un ECS gabarit déjà utilisé dans la casemate de SPIRAL.

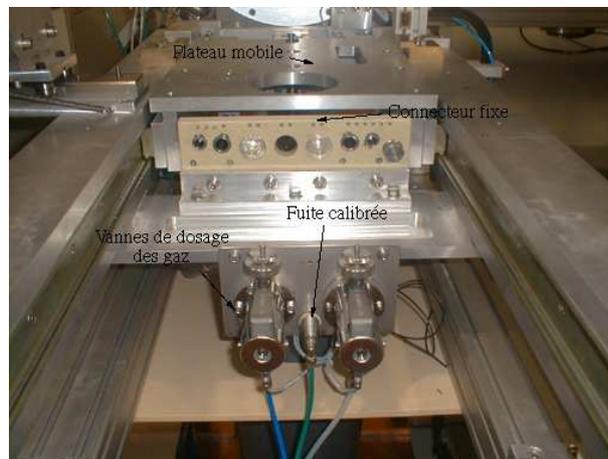


Figure 12: Détail châssis mobile et connecteur

Un jeu de vérins à vis permet la translation du plateau et les mouvements d'ouverture/fermeture de la vanne de sortie de source.

## II.1.2.Ensemble d'extraction

### a. Description

La boîte d'extraction est conçue pour fonctionner avec une tension de 34 kV sur l'ECS. Elle est découplée de l'ECS par un isolateur en alumine<sup>4</sup> ( $Al_2O_3$ ) sur lequel est fixé sa vanne d'entrée (elle même est donc portée au potentiel Haute-Tension).

<sup>4</sup> Le choix de ce matériau tient au fait qu'il est tout à fait adapté au fonctionnement sous vide. Ses taux de dégazages sont tout à fait négligeables en comparaison des isolateurs en plastique.

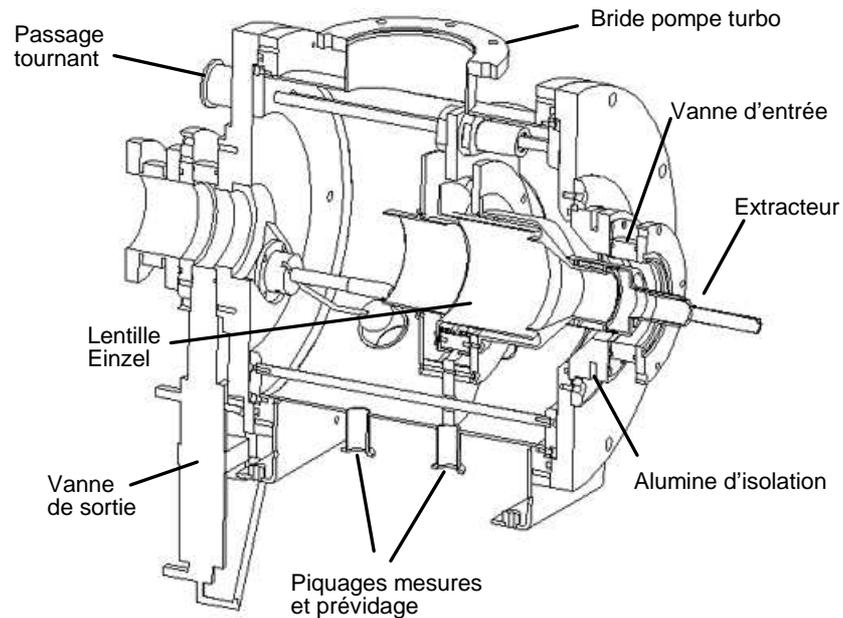


Figure 13: Boîte d'extraction

L'extraction du faisceau d'ions est assurée par une électrode reliée à la masse et sa focalisation est obtenue par une lentille de Einzel portée à un potentiel Haute-Tension réglable suivant la tension d'extraction utilisée.

L'électrode d'extraction et la lentille sont solidaires du point de vue mécanique, mais découplées électriquement par des entretoises en alumine. Une vis sans fin, reliée par un passage tournant sous vide, permet la translation de ces électrodes pour le réglage du gap avec l'électrode plasma de la source.

L'enceinte est équipée de plusieurs piquages pour l'installation des équipements de vide: pompes, vannes et capteurs.

#### b. Etalonnage du gap inter-électrodes

Lors du fonctionnement de la source, on cherchera à maximiser la transmission du faisceau jusqu'à la coupelle de Faraday. Le gap inter-électrode est un des principaux paramètres qui ait de l'influence sur la transmission (Cf. Chap III, §1).

La mécanique sous vide (extracteur et lentille Einzel) est reliée à un système de motorisation à l'extérieur de l'enceinte (figure 14) qui assure la translation des électrodes et la mesure du gap.

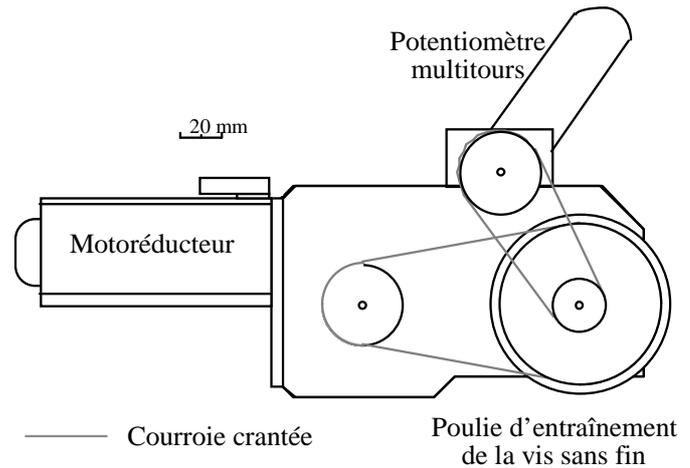


Figure 14: Motorisation des électrodes

Le rapport de réduction des poulies moteur / vis sans fin est de 0,52 tour pour 1 tour moteur. La vis sans fin sous vide qui entraîne l'extracteur et la lentille a un pas de 3 mm. Ainsi, 1 tour moteur génère un déplacement de 1,56 mm des électrodes.

Dans l'enceinte à vide, deux contacts de fin de course indiquent les butées avant et arrière de la mécanique (quelques millimètres avant les butées mécaniques).

Le potentiomètre est alimenté par une tension de référence de 10V. La figure 15, ci-après, relie les valeurs des tensions délivrées par le potentiomètre par rapport au gap.

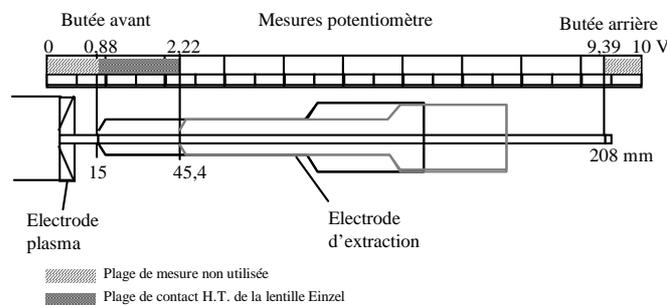


Figure 15: Etalonnage du gap inter-électrodes

Un écart du gap de 1mm génère sur le potentiomètre un écart de 0,05 V. La mesure de la tension est donnée à  $\pm 0,01$  V; ce qui correspond à une précision de  $\pm 0,2$  mm pour la mesure du gap.

Si l'électrode d'extraction est bien reliée à la masse sur toute la plage du mouvement, la lentille Einzel n'est, quant à elle, en contact avec la Haute Tension qui la polarise qu'entre 15 et 47 mm de gap. L'extraction du faisceau se fera donc toujours entre ces deux valeurs.

L'ensemble commande moteur, mesure du potentiomètre et fins de course sont gérés par l'automate principal via une carte moteur qui permet d'alimenter le moteur à courant continu ( $\pm 10$  V).

### II.1.3. Dipôle

#### a. Description

Le dipôle magnétique est un spectromètre de masse dont le champ magnétique est assuré par deux bobines. Elles sont composées de 60 spires chacune dans un conducteur en cuivre de section carré (7 x 7 mm) percé d'un trou (diamètre 4 mm) pour la circulation de l'eau de refroidissement.

La chambre à vide en acier inoxydable est enchâssée entre deux culasses en fer. Des piquages sont prévus pour l'alignement par visée du géomètre.

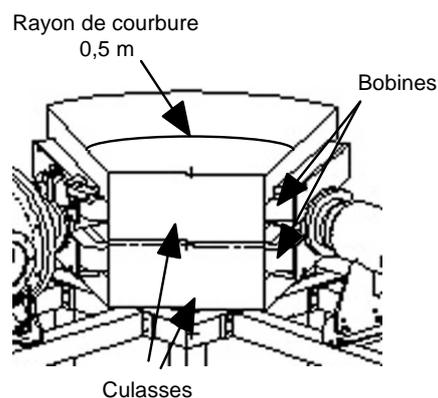


Figure 16: Vue d'ensemble du dipôle

Les caractéristiques du spectromètre ont été calculées d'après le cahier des charges. Elles sont récapitulées dans le tableau 2 ci-dessous.

Caractéristiques				Tolérances
- Rayon de courbure magnétique	$\rho$	m	0.50	$ \Delta\theta/\theta  < 10^{-3}$
- Angle de déviation	$\theta$	degré	90	
- Induction maximale utile	$B_{\max}$	Tesla	0.64	
- Induction minimale utile	$B_{\min}$	Tesla	0.05	
- Indice de champ	$n$		0	$ \Delta n  < 0.001$
- Coefficient de champ du 2ème ordre	$\beta$		0	$ \Delta\beta  < 0.01$
- Inclinaison de la face d'entrée	$\epsilon_e$	degré	26.57	$ \Delta\epsilon_e  < 0.5^\circ$
- Inclinaison de la face de sortie	$\epsilon_s$	degré	26.57	$ \Delta\epsilon_s  < 0.5^\circ$
- Rayon de courbure de la face d'entrée	$R_e$	m	$\infty$	$-0.05 < R_e^{-1} < 0.05$
- Rayon de courbure de la face de sortie	$R_s$	m	$\infty$	$-0.05 < R_s^{-1} < 0.05$
- Précision de repérage de la référence mécanique				
- radiale	$\pm\delta_x$	mm	0.1	
- verticale	$\pm\delta_y$	mm	0.1	
- longitudinale	$\pm\delta_s$	mm	0.1	
- Largeur de zone utile max. à 45°	$\pm l_u$	mm	85	
max. à 0° et 90°	$\pm l_u$	mm	60	
- Largeur max. de la chambre à vide	$\pm l$	mm	100	
- Hauteur d'entrefer	$\pm h$	mm	35	

Tableau 2: Caractéristiques du dipôle d'analyse

### b. Réfrigération

Pour assurer la stabilité du spectromètre de masse (courbe  $B=f(I)$ ) et protéger les bobines, il est nécessaire de les refroidir car elles sont parcourues par de forts courants électriques (jusqu'à 180 A). Un débit de 9 l/mn sous 15 bars est nécessaire.

La sécurité de l'ensemble est assurée par une série de bilames collés sur les différentes spires (65°C) et par un contrôle du débit d'eau au retour. Tout défaut détecté génère une interdiction de commande de l'alimentation en courant du dipôle.

## II.1.4.Ligne d'analyse

### a. Description

En sortie de dipôle le faisceau sélectionné se propage dans une enceinte à vide dite « ligne d'analyse ». Au point optique image du spectromètre de masse, un jeu de plaques verticales (mobiles manuellement) permet de réaliser une fente verticale sur le parcours du faisceau (Figure 17). Ce système permet de mesurer la largeur du faisceau dans le plan horizontal grâce à un régllet placé à l'extérieur de l'enceinte à vide. C'est également un outil pour augmenter la résolution des spectres<sup>5</sup>.

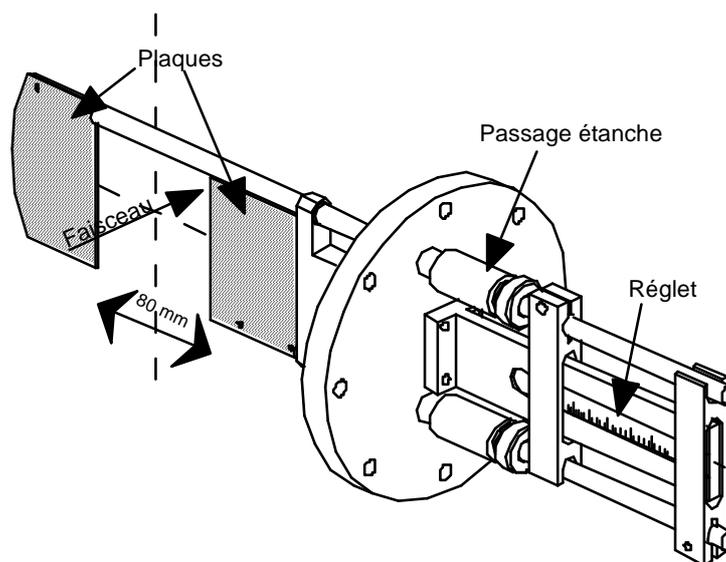


Figure 17: Fentes au point image du dipôle

La mesure du courant de faisceau analysé se fait en fin de ligne d'analyse par la recombinaison des ions dans une coupelle de Faraday. Le courant traverse une résistance de charge située entre la coupelle et la masse. La mesure de la différence de potentiel à ses bornes est proportionnelle au courant de faisceau déposé.

<sup>5</sup> Cf. Chap III: Analyse du faisceau d'ions

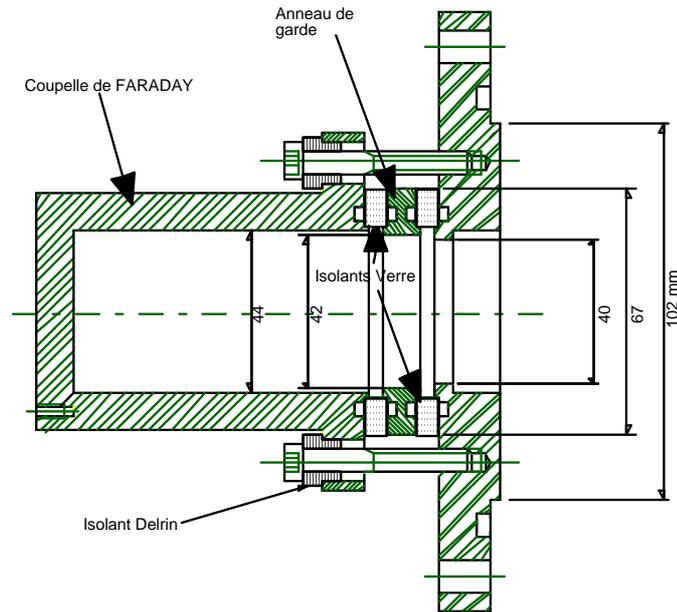


Figure 18: Vue en coupe de la coupelle de Faraday

C'est en fait une coupelle en cuivre, isolée électriquement de l'enceinte à vide par une bride en verre. Elle est munie d'un anneau de garde polarisé pour éviter la remontée dans la ligne des électrons arrachés à la matière lors de l'impact du faisceau au fond de la coupelle.

#### b. Mesure de l'intensité du faisceau

Selon que l'on se place avant ou après le dipôle d'analyse, on peut considérer deux types de courants ioniques: le courant total extrait (ou courant de la source) et le courant analysé.

Le courant total extrait,  $I_{\text{source}}$ , est la somme des courants ioniques de toutes les particules sortant du trou d'extraction (électrode plasma). Ce courant est mesuré sur l'alimentation Haute-Tension de la source de la manière suivante: une résistance de charge est placée en parallèle avec la source. En l'absence de faisceau, l'alimentation débite un certain courant dépendant de la tension appliquée. Si la source produit un faisceau, le courant débité par

---

l'alimentation est égal au courant précédent moins le courant dû aux électrons générés par l'équilibre de charge au sein de la source. Notons que dans le cas où le faisceau frappe l'électrode d'extraction, des électrons secondaires sont émis. Le courant lu sur l'alimentation Haute-Tension, attribué au faisceau total extrait, est alors faussé. Le cas idéal est celui où les conditions d'extraction sont telles qu'il n'y a aucune perte de faisceau sur les électrodes.

Le courant analysé,  $I_i$ , correspond au courant d'un seul état de charge (en fait, un seul rapport charge sur masse) dévié par le spectromètre de masse et mesuré au bout de la ligne d'analyse dans la coupelle de Faraday.

Les ions du faisceau analysé se recombinent dans la coupelle en cuivre en lui arrachant les électrons qui leur manquent. Le courant débité à travers la résistance de charge entre la coupelle et la masse crée une différence de potentiel proportionnelle au courant de faisceau déposé. La tension est mesurée sur une carte d'acquisition 0-10 Volts. Cette conversion linéaire se fait sur plusieurs gammes de mesure si on commute sur différentes résistances.

Les gammes de courant de faisceau analysé qui nous concerne pour le banc de tests vont de  $0,1 \mu\text{A}$  à  $0,1 \text{ mA}$ .

En pratique, avec la source NanoganIII, une résistance de  $100 \text{ k}\Omega$  permet de couvrir la mesure de tous les courants analysés pour aboutir au spectre.

#### II.1.5. Vue générale mécanique

La figure 19 ci-après, montre une vue d'ensemble des équipements mécaniques du banc de tests qui viennent d'être décrits.

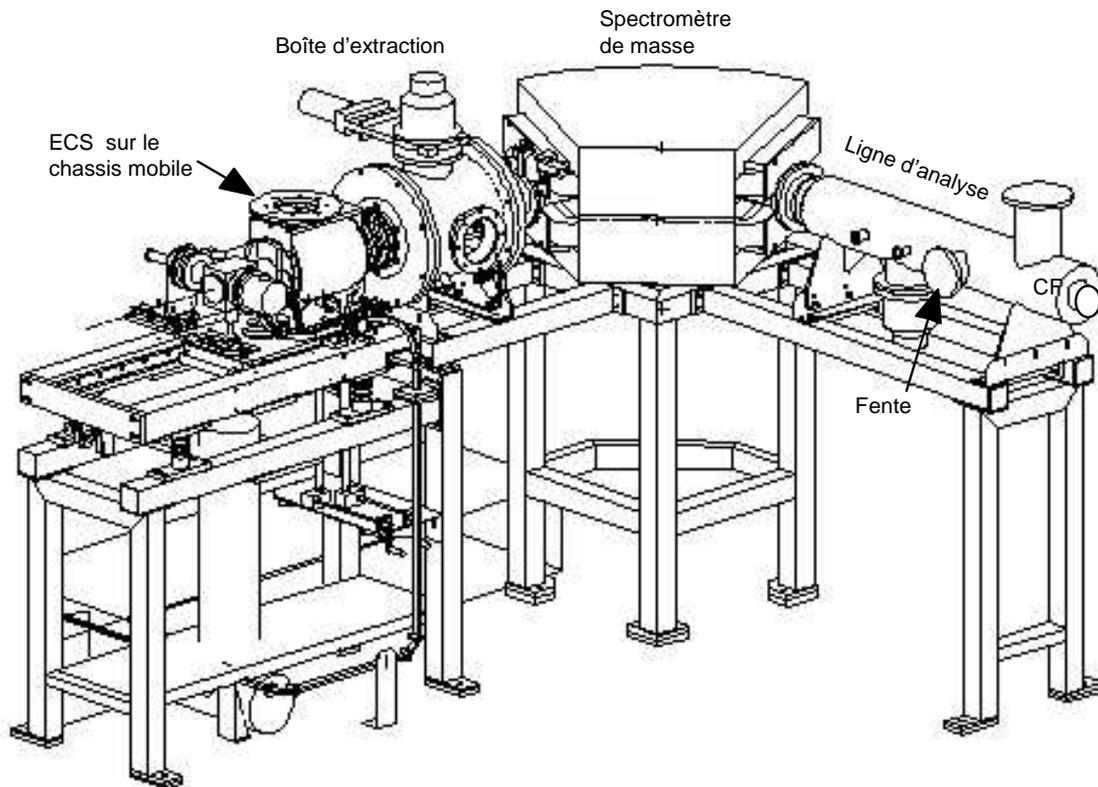


Figure 19: Vue générale mécanique

L'ensemble est monté dans le local « banc de tests » du bâtiment annexe de SPIRAL. La disposition spatiale du banc et des équipements est décrite dans les paragraphes suivants, notamment l'implantation des différents équipements électriques et les plans de masse.

## II.2. Equipements électriques

### II.2.1. Principe Haute-Tension

L'ECS étant porté au potentiel Haute-Tension, les équipements qui lui sont reliés se trouvent portés au même potentiel. Il est donc nécessaire de réaliser une plate-forme Haute-Tension, isolée du secteur primaire tout en disposant d'une puissance suffisante pour le chauffage de la cible. Comme le montre la figure 20, un transformateur d'isolement permet de réaliser ce

découplage tout en apportant la puissance alternative (30 KVA) nécessaire à l'alimentation en courant de la cible (A250.5) et de la baie Haute-Tension (A250.4).

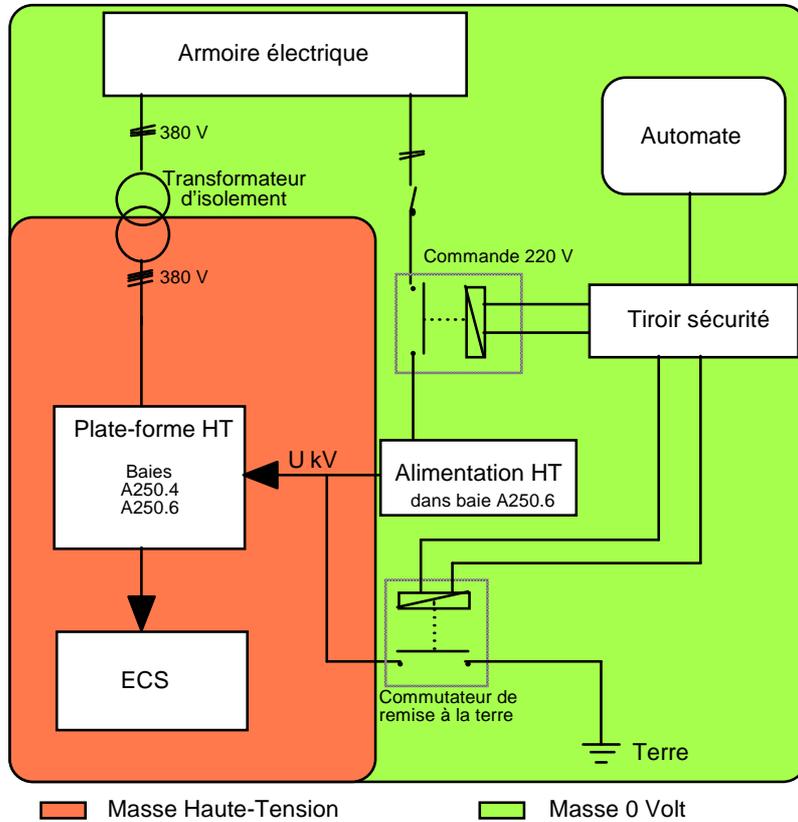


Figure 20: Principe de fonctionnement de la plate-forme Haute-Tension

Lorsque toutes les conditions de sécurité sont réunies pour le fonctionnement sous haute-tension, l'automate autorise la mise en marche (commande 220 V) de l'alimentation Haute-Tension via le « coffret de sécurité ». Dès lors que les conditions ne sont plus réunies, le commutateur de remise à la terre court-circuite la plate-forme Haute-Tension à la terre.

N'ayant pas trouvé dans le commerce de commutateur qui répondait à nos besoins, j'ai été amené à en développer un moi-même. Il fonctionne à l'aide d'un vérin qui actionne l'ouverture d'un couteau. La commande du vérin est faite à partir d'un distributeur électropneumatique. En position de repos, l'axe du vérin est rentré; la position de travail est obtenue en alimentant la bobine du distributeur. Le distributeur est alimenté en permanence en air, si celle-ci venait à manquer le vérin se positionnerait en repos. Les fins de course du vérin et la commande du distributeur sont gérées par l'automate via le tiroir de sécurité.

Pour stabiliser le débit de l'alimentation Haute-Tension une résistance de charge (ou bleeder) est installée en parallèle. Ici encore, il n'a pas été possible de trouver des résistances haute-tension dans le commerce qui puissent fonctionner aux tensions continues que l'on applique. La résistance de charge de  $34,25\text{ M}\Omega$  (mesurés) est obtenue par la mise en série de 102 résistances d'environ  $330\text{ K}\Omega$  ( $2\text{W}$ ,  $5\%$ ). Si la tension de travail est de  $30\text{ kV}$ , chaque résistance voit une différence de potentiel de  $300\text{ V}$  et le débit est d'environ  $0,9\text{ mA}$ .

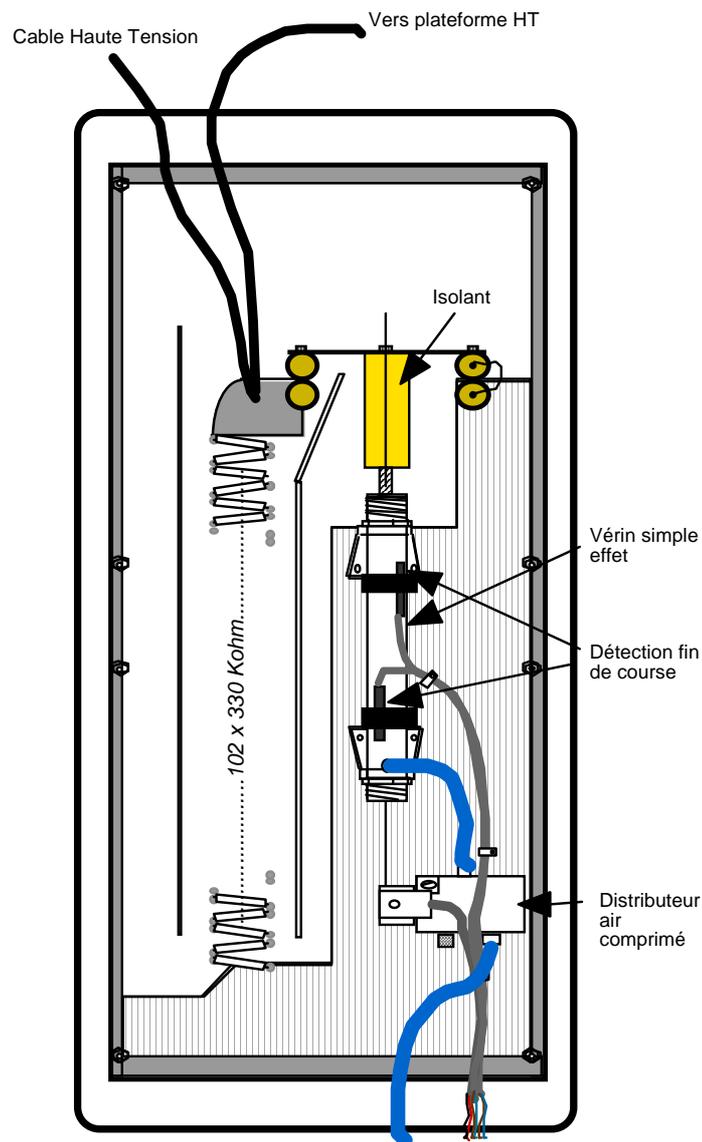


Figure 21: Commutateur de remise à la terre

## II.2.2. Implantation des matériels électriques

La figure 22 ci-dessous montre l'implantation des différents équipements électriques.

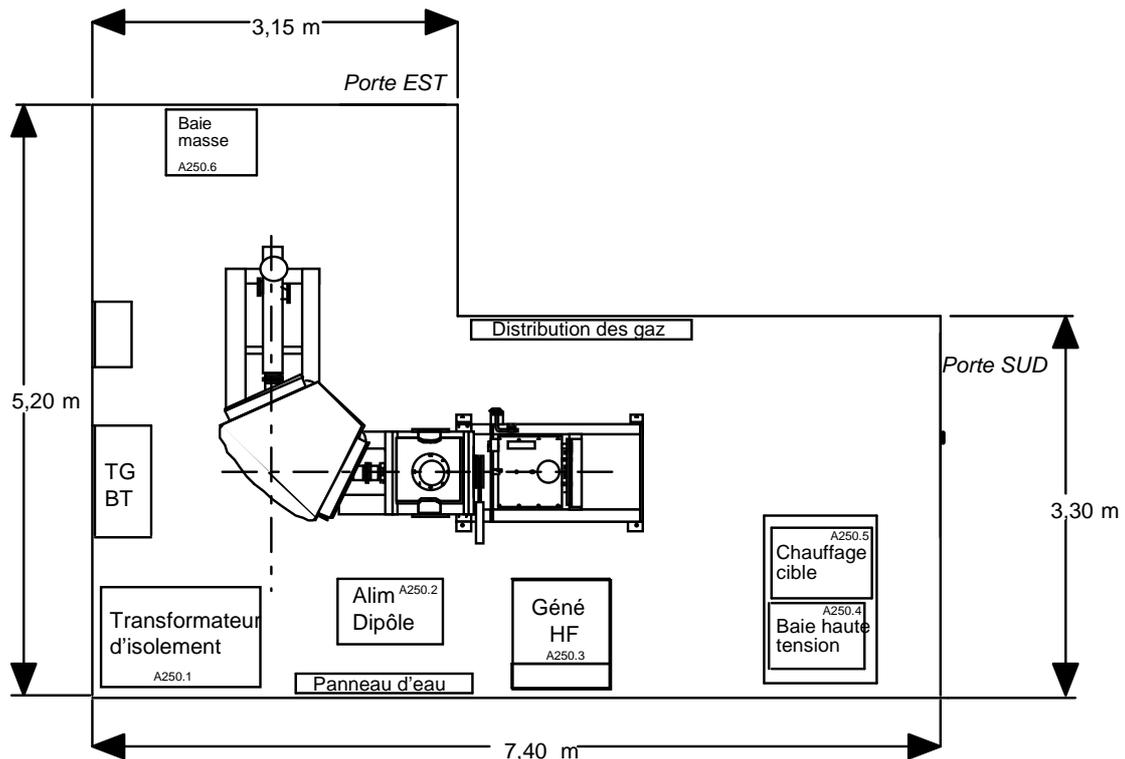


Figure 22: Implantation des équipements

Mis à part le tableau général basse tension (TGBT) qui alimente en électricité tout le bâtiment annexe de Spiral, on distingue dans le local banc de tests six sous-ensembles électriques principaux répertoriés A250.1 à 6.

Le transformateur d'isolement (A250.1) apporte la puissance alternative (380 Volts) nécessaire à la plateforme Haute-Tension. La carcasse est reliée à la masse 0 volt (terre) et le secondaire est porté au potentiel Haute-Tension (neutre relié masse haute-tension). L'isolement entre le primaire et le secondaire est de 55 kV.

---

L'alimentation dipôle (A250.2) génère un courant de 200 A sous 50 V dans les bobines du spectromètre de masse. La baie contient également son interface de commande comme nous le verrons au paragraphe 6.3 de ce chapitre.

Le générateur Hyper-Fréquence, alimenté à partir du TGBT, fournit à la source d'ions, via un guide d'onde, une onde à 10 GHz pouvant atteindre une puissance de 2,5 kW.

La baie chauffage cible (A250.5) contient l'alimentation en courant (puissance maxi de 10 kW) qui permet de chauffer la cible de l'ECS. Cette baie est portée au potentiel Haute-Tension avec cependant un écart de tension par rapport à la baie A250.4 qui correspond à la polarisation du tube de transfert des ions de l'ECS (jusqu'à 650 V).

Les équipements portés au potentiel de la masse Haute-Tension sont dans la baie A250.4. La baie A250.6 contient tous les équipements électriques reliés à la masse 0 volt.

### II.2.3. Implantation des baies masse 0 V et Haute-Tension

La figure 23 ci-dessous montre les équipements regroupés dans les baies A250.4 et A250.6.

Les deux baies contiennent, entre autres, chacune un automate. L'automate principal (dans la baie masse 0 Volt) est secondé par l'automate déporté (dans la baie Haute-Tension). Ils communiquent par un réseau de fibres optiques<sup>6</sup>. Ils sont programmés pour gérer le système de vide, les sécurités matériels (coffret sécurité eau) et les sécurités humaines (coffret sécurités général), les commandes et contrôles de la motorisation des électrodes et du générateur Hyper-Fréquence.

---

<sup>6</sup> Cf. § II.6. Réseau de communication.

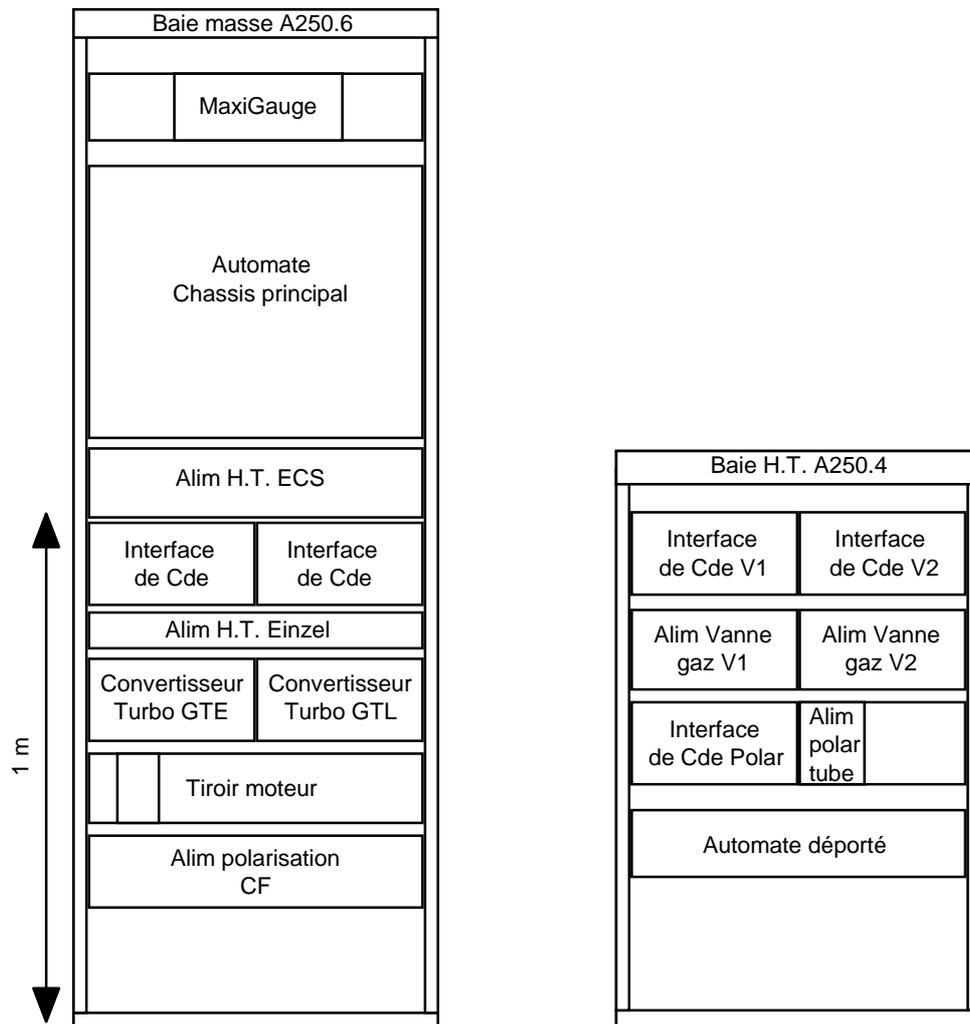


Figure 23: Faces avant des baies A250.4 et A250.6

#### II.2.4. Générateur HF

##### a. Description

L'émetteur Hyper-Fréquence est un générateur d'onde de fréquence fixe (10 GHz), dont la puissance peut atteindre 2,5 kW. L'onde est acheminée jusqu'à la source d'ions par un guide d'onde métallique.

La source NANOGAN III fonctionne avec un maximum de puissance Hyper-Fréquence injectée dans la chambre à plasma de 200 W. Si l'accord de la cavité Hyper-Fréquence

---

n'est pas optimal, tout ou partie de l'onde incidente peut être réfléchi dans le guide d'onde pour revenir sur l'émetteur<sup>7</sup>. L'émetteur fournit en continu une mesure de la puissance de l'onde incidente et de l'onde réfléchi.

Le guide d'onde est isolé de la Haute-Tension par une plaque de téflon à travers laquelle les pertes de puissance ne sont pas négligeables (40 à 50 %).

Une série de mesures a été réalisée afin de mesurer la puissance réellement injectée dans la source d'ions par rapport à la puissance incidente de l'émetteur.

#### b. Réfrigération

L'émetteur Hyper-Fréquence nécessite, selon le constructeur, trois circuits de réfrigération: 2, 5 et 15 l/mn. Chaque retour est contrôlé par un débitmètre. Les états de ces appareils sont regroupés sur le coffret dit « sécurité eau » et sont renvoyés à l'automate principal. Tout défaut interdit le fonctionnement de l'émetteur.

#### c. Commande et contrôle par l'automate

L'émetteur Hyper-Fréquence, contrairement aux autres équipements, ne dispose pas d'interface de commande en JBUS (Cf. § II.6.). C'est la raison pour laquelle c'est l'automate principal qui sert d'interface entre l'émetteur et le PC.

L'automate qui supervise le coffret de « sécurité eau » permet de mettre les circuits de réfrigération de l'émetteur en circulation.

Des conditions extérieures (sécurité), définie par l'automate conditionnent la mise en marche de l'émetteur.

Une sortie analogique de l'automate (0-10 V) permet la commande en puissance et le générateur en retour renvoie la mesure des puissances incidente et réfléchi.

---

<sup>7</sup> L'émetteur est muni d'un circulateur refroidi à l'eau permettant de dissiper la puissance réfléchi pour protéger le

#### d. Etalonnage en puissance

Le dispositif expérimental est décrit sur la figure 24 ci dessous.

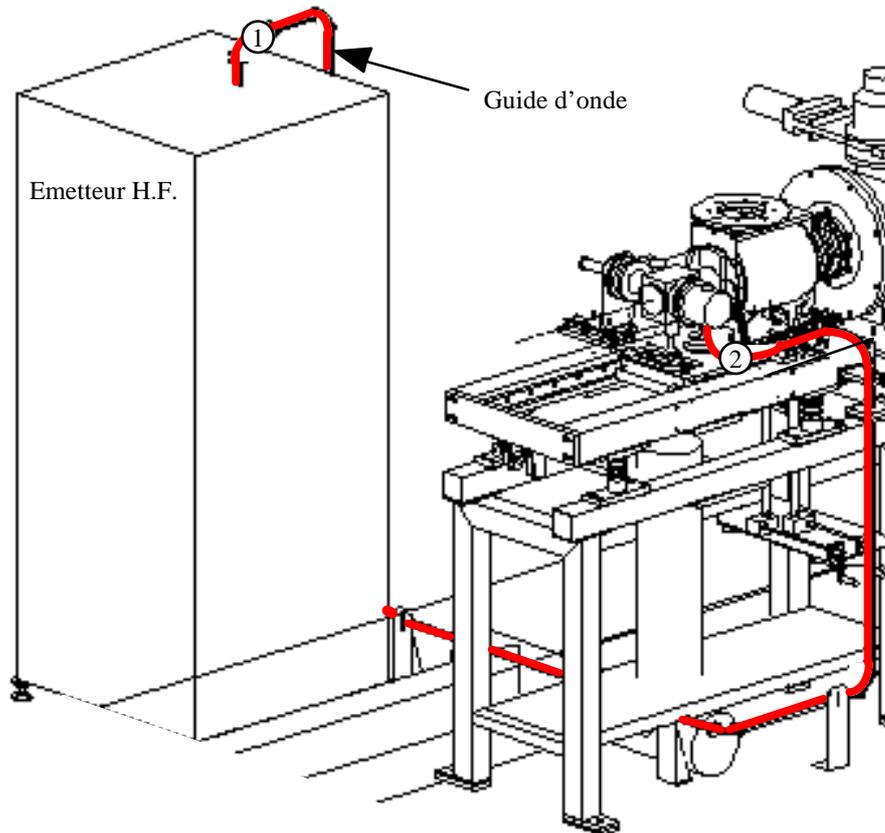


Figure 24: Dispositif d'étalonnage de l'émetteur Hyper-Fréquence

Une charge de dissipation de puissance est couplée au guide d'onde au point 1, ainsi qu'une sonde de mesure. On réalise la mesure à l'aide d'un wattmètre. Les valeurs obtenues sont comparées à la consigne de commande et à la lecture de puissance incidente interne à l'émetteur.

Dans un deuxième temps, la charge et la sonde sont placées au point 2. On mesure ainsi les pertes réelles dues au guide d'onde.

Les courbes présentées sur la figure 25 résument les résultats.

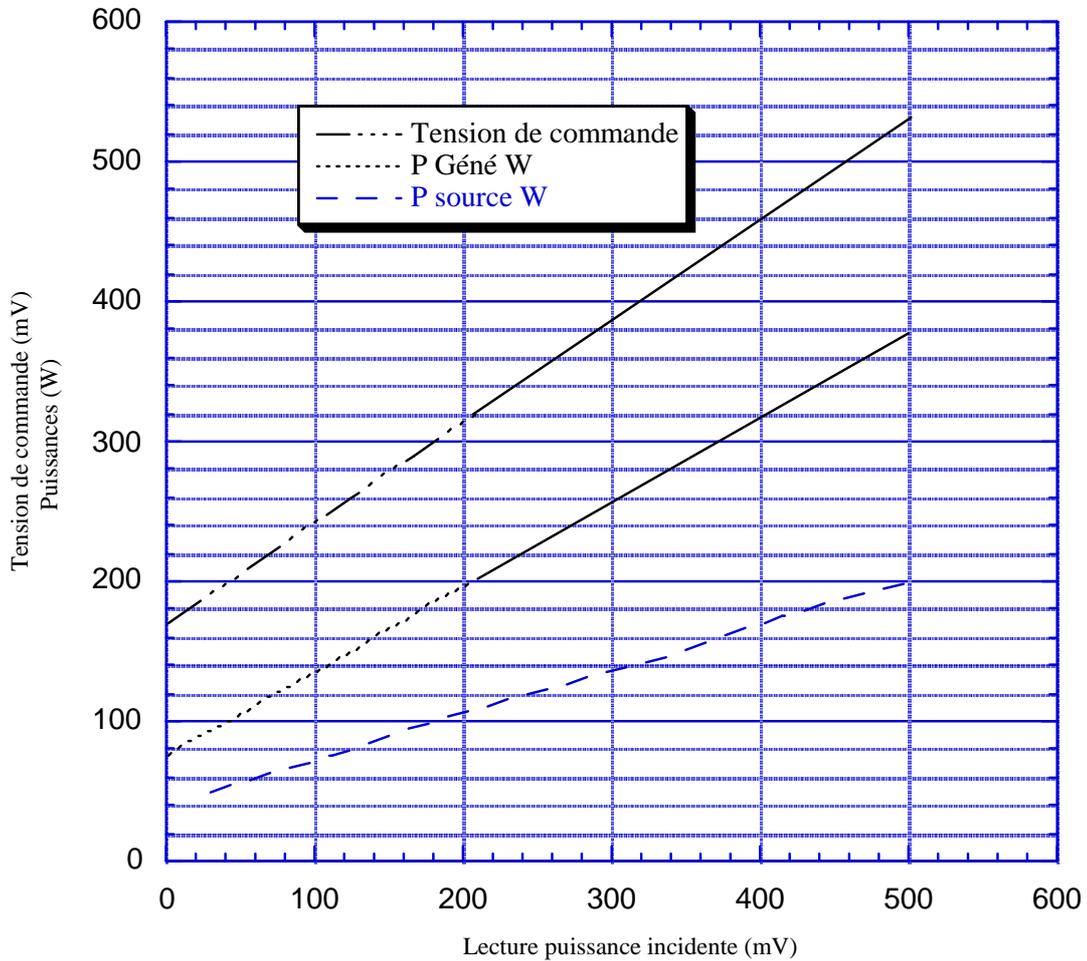


Figure 25: Etalonnage du générateur Hyper-Fréquence

### II.2.5. Plans de masse

Après la mise sous vide, le fonctionnement sous Haute-Tension de l'ECS nécessite la « formation » électrostatique des électrodes. Il est nécessaire de protéger les équipements de l'ensemble du banc. En effet, des dégazages des parois ou des entrées de gaz trop importantes peuvent provoquer des claquages. Ces claquages peuvent être la cause d'endommagements des

équipements. Un plan de masse commun à tous les équipements permet d'imposer un même potentiel de masse.

En effet, dans le cas des claquages, le spectre de fréquences  $f$  obtenues est large et les fréquences élevées ( $> \text{MHz}$ ). On sait que lorsque des courants HF sont induits dans un conducteur, le courant ne circule plus sur la section du conducteur mais sur sa périphérie. La section utile du conducteur  $S$  est alors réduite. Elle est le produit du périmètre  $w$  moyen et de l'épaisseur  $\delta$  de la zone de circulation

$$S = \delta \cdot w$$

Cette diminution de la section utile du connecteur entraîne une augmentation de sa résistance et donc des différences de potentiel entre les différents équipements, d'où influence des claquages dans les équipements et dommages éventuels. Il faut donc maximiser la surface du conducteur de masse pour minimiser sa résistance  $R_b$  à haute fréquence. Celle-ci peut être calculée par la formule

$$R_b = \frac{\rho}{\delta} \frac{l}{w} \text{ avec } \delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 f}}$$

Dans le cas d'un conducteur en cuivre,  $R_b = 270 \cdot 10^{-9} \cdot \sqrt{f} \cdot \frac{l}{w}$ .

Par exemple, à 100 Mhz, pour 10 m de conducteur en cuivre  $\delta \approx 10 \mu\text{m}$

pour une section ronde de  $75 \text{ mm}^2$ ,  $R_b = 0,87 \Omega$

pour un feuillard de  $15 \text{ cm} \times 0,5 \text{ mm}$ ,  $R_b = 0,09 \Omega$

En pratique, il est clair qu'il faut relier les masses des équipements par un conducteur de surface maximale et de longueur minimale.

Comme le présente la figure 26, l'ensemble des chassis et des équipements sont implantés sur un plan de masse continu en cuivre composé de plaques et feuillards soudés entre eux.

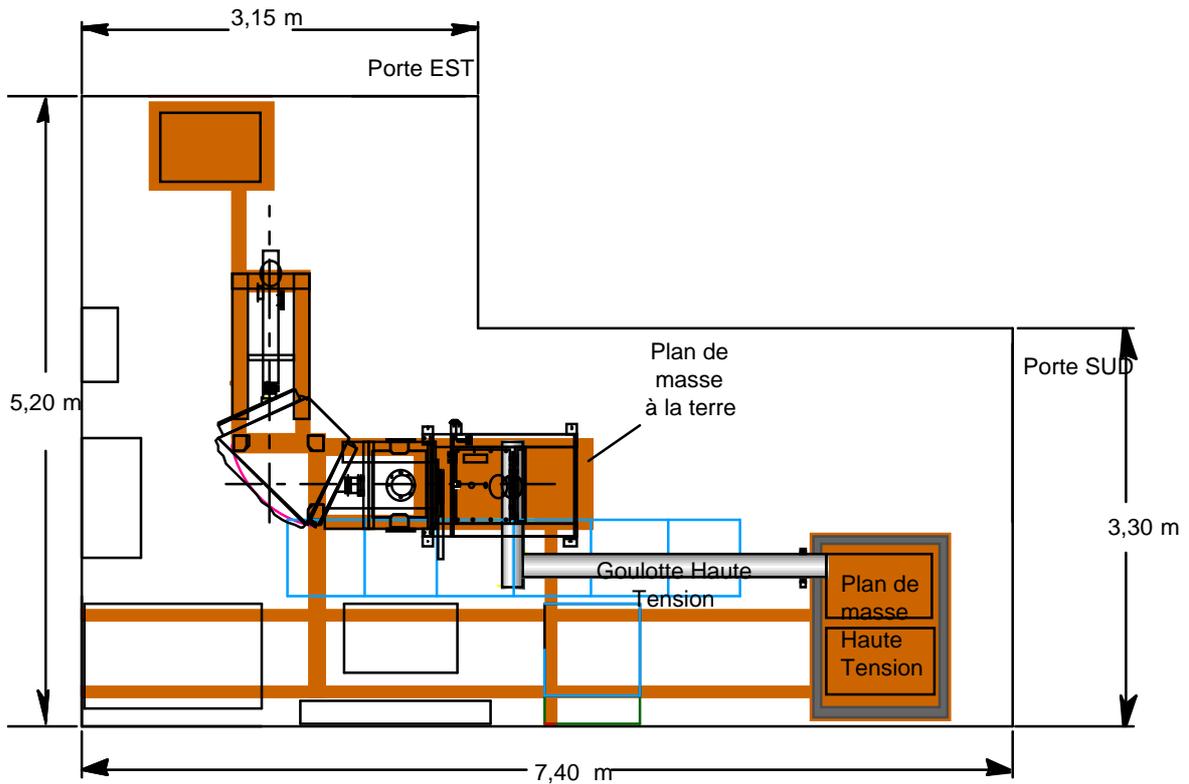


Figure 26: Plans de masse

Les équipements portés à la Haute-Tension sont également référencés par un plan de masse commun, dit plan de masse Haute-Tension, découplé du plan de masse à la terre par une plaque isolante en PVC. Une tresse de masse soudée sur le plan de masse Haute-Tension est reliée au châssis mobile à travers une goulotte isolante.

### II.3. Réfrigération

#### II.3.1. Description

De nombreux éléments du banc de tests nécessitent d'être refroidis. Comme nous l'avons vu précédemment, c'est le cas du dipôle et de l'émetteur Hyper-Fréquence. Sur l'ECS, la boîte cible et la chambre à plasma doivent également être refroidies.

La figure 27 ci-après présente le tableau général de distribution d'eau du banc de tests. Tout défaut de débit est renvoyé à l'automate (via un coffret dit « sécurité eau ») et génère la fermeture de l'électrovanne placée en tête du circuit 15 bars.

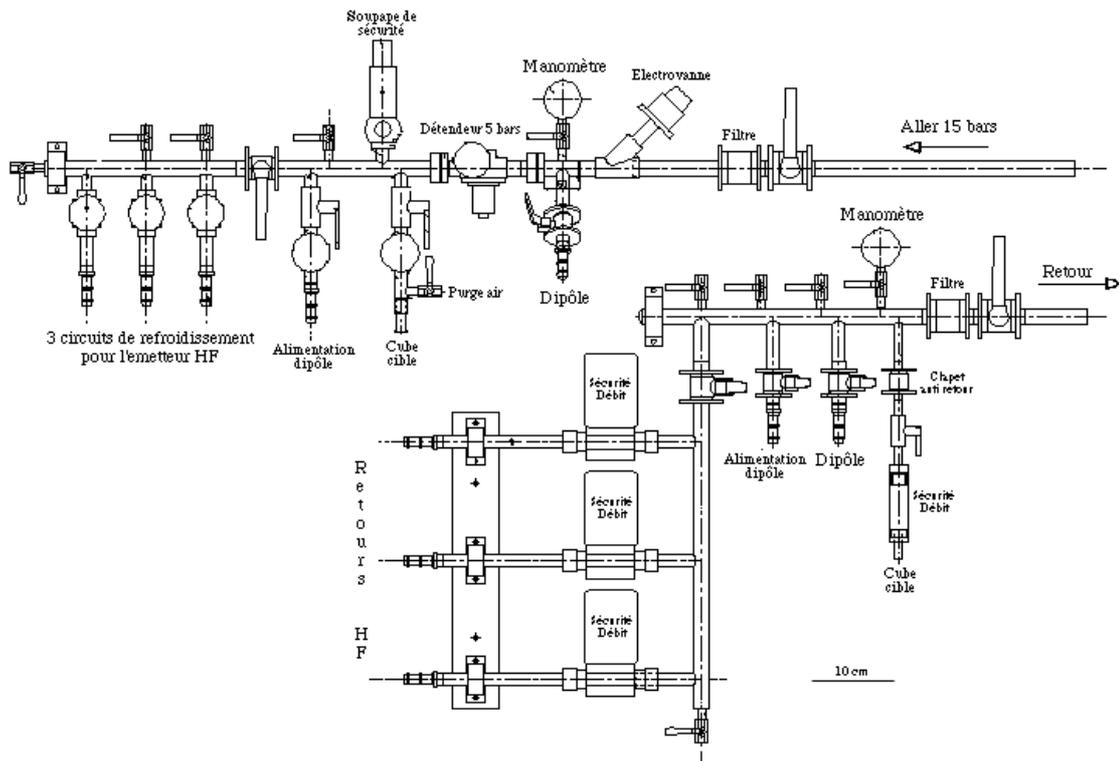


Figure 27: Panneau général de réfrigération

La formule suivante m'a permis de dimensionner les circuits de refroidissement (débits) de la boîte cible et de la chambre à plasma:

$$Debit (l/s) = \frac{P}{C \Delta T}$$

P: Puissance à dissiper en Watts

C: Capacité calorifique de l'eau ( $4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$\Delta T$ : élévation de température en °K (entre l'entrée et la sortie du circuit d'eau)

### II.3.1. Boîte cible

La cible de production, portée par chauffage ohmique à 2000°C (1800 W), est contenue dans une boîte en aluminium réfrigérée par une circulation d'eau sous 5 bars. A terme, les faisceaux primaires pour SPIRAL doivent atteindre une puissance de 6KW. Le système de réfrigération doit donc y être adapté. Ainsi, un débit de 2 litres/minute engendre un écart en température de 45°C entre l'eau du circuit aller et le retour. A 2 kW, l'élévation de température n'est que de 15°C.

La sécurité de ce circuit est assurée par un contrôle du débit (contact sec) et de la température du retour d'eau (bilame: contact sec à 75°C). Les contacts reliés en série sont gérés par l'automate: un défaut de débit ou de température interdit la commande de l'alimentation en courant de la cible.

Un ensemble de vannes permet d'injecter de l'air comprimé dans le circuit pour le purger avant la déconnexion de l'ECS. En effet, le connecteur n'est pas muni d'auto-obturateur sur les circuits de refroidissement.

### II.3.2. Chambre à plasma

Le plasma dans la source d'ions est entretenu par l'injection d'une onde Haute Fréquence de 10GHZ. La puissance de l'onde Hyper-Fréquence (200 Watts) chauffe les parois de la chambre à plasma. Il est impératif de protéger les aimants permanents de la source. Une élévation trop importante de la température de surface des aimants peut engendrer un déconfinement du plasma. Au delà de la température de Curie, les dégâts sur le circuit magnétique sont irrémédiables. Ainsi la chambre à plasma est faite de deux parois entre lesquelles l'eau circule pour assurer le refroidissement et protéger les aimants.

La pression d'épreuve de la chambre est de 4 bars. La pression maximum de travail ne doit pas excéder 2 bars en tenant compte d'un coefficient de sécurité raisonnable.

Le local du banc de tests est distribué uniquement par un circuit d'eau sous 15 bars. Il est nécessaire de détendre pour réfrigérer plusieurs équipements. Cependant, la perte de charge

totale ne permet pas de limiter la pression de retour en dessous de 3 bars. Il serait donc inutile de détendre le circuit à deux bars pour refroidir la chambre à plasma.

C'est pourquoi, pour fonctionner en toute sécurité, un système de réfrigération indépendant, porté à la haute tension est nécessaire. Le groupe de refroidissement décrit par la figure 28, est placé sur la plate-forme Haute Tension. La pompe délivre dans le circuit de la chambre à plasma 0.5 l/mn d'eau maintenue à 20°C par asservissement du compresseur à la température de l'eau contenue dans la cuve. La température de retour ainsi que le débit sont contrôlés en permanence. Un défaut détecté est envoyé à l'automate qui interdit alors la commande de puissance de l'émetteur Haute Fréquence.

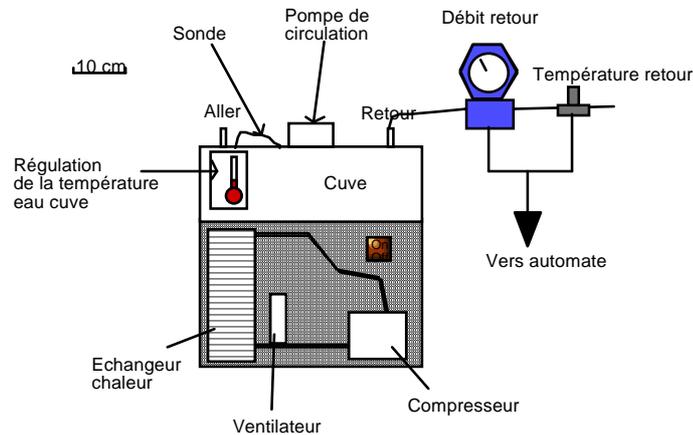


Figure 28: Groupe de réfrigération de la chambre à plasma

L'ensemble est déposé dans un bac en inox étanche de contenance supérieure à celle de la cuve.

Un système de vannes permet de purger le circuit avec de l'air comprimé (détendu à 2 bars maximum) avant la déconnexion de l'ECS.

---

## II.4. Système de vide

La source d'ions de l'ECS fonctionne sous vide ( $10^{-3}$  Pa). Les chambres d'extraction et d'analyse du faisceau doivent également être mise sous vide ( $10^{-5}$  Pa) afin d'éviter les recombinaisons électroniques des ions du faisceau avec les atomes de gaz présents dans les enceintes.

Le pompage d'une enceinte à la pression atmosphérique commence par des débits gazeux en régime turbulent, puis en régime visqueux. La durée de ce pompage préliminaire (également appelé prévidage) est assez brève (quelques minutes).

La zone de pression appelée vide poussé, ou « bon vide », n'est obtenue que par une série de phénomènes en régime moléculaire qui se contrecarrent les uns avec les autres. En effet, à n'importe quel moment pendant le pompage secondaire, la pression dans l'enceinte est le résultat d'un équilibre entre l'évacuation de gaz par pompage et des arrivées de gaz; par exemple: les dégazages, les flux de perméation, les faisceaux d'ions qui se recombinent, issus de l'ECS.

Un ensemble de calculs théoriques du vide aurait dû permettre de déterminer les matériels nécessaires pour le banc: type de pompe mécanique, type de pompe pour le vide secondaire.

En fait, d'autres éléments ont fait que ces matériels étaient imposés dès le départ de l'étude du banc.

### II.4.1. Choix des pompes

La casemate de SPIRAL a dans un premier temps été équipée de pompes mécaniques de 15 et 30 m<sup>3</sup>/h de la société Alcatel. Peu de temps après sont apparues sur le marché des pompes mécaniques à palettes à entraînement magnétique. Le risque de fuite d'huile au niveau des joints d'arbre des pompes est ainsi écarté.

Les flux de gaz à pomper dans la casemate sont contaminants et les huiles de pompes mécaniques fixent une partie des gaz pompés. Ainsi, pour éviter toute contamination par fuite d'huile, il a été décidé de remplacer les pompes initiales de la casemate par les pompes sèches.

Les enceintes du banc de tests ne contiennent que des gaz stables. Les pompes à huiles qui initialement équipaient la casemate y ont donc été installées.

Pour le pompage secondaire, le critère de maintenance des équipements de la casemate a imposé que les pompes turbomoléculaires soient identiques à celle de la casemate (Corps de pompe en aluminium pour limiter l'activation; débit volume de 550 l/s).

J'ai réalisé une série de calculs qui montrent que les pompes choisies répondent au cahier des charges de vide du banc.

#### II.4.2. Calcul de vide

Le tableau 3 résume les principales caractéristiques des enceintes à vide du banc de tests utilisées pour dimensionner les pompes.

		Enceintes	
		ECS + Boîte d'extraction	Dipôle + Ligne d'analyse
Volume	m <sup>3</sup>	0,06	0,05
Surface métallique <sup>8</sup> exposée au vide	m <sup>2</sup>	0,85	1,50
Surface d'élastomère <sup>9</sup> exposée au vide	m <sup>2</sup>	0,07	0,04
Pression de service	Pa	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>

Tableau 3: Caractéristiques des enceintes à vide

#### *\* Temps de pompage - Vide primaire*

Le temps nécessaire pour faire passer la pression dans une enceinte de l'atmosphère à une pression voulue s'appelle temps de pompage.

<sup>8</sup> Pour ces calculs on considère que les enceintes sont entièrement réalisées en acier inoxydable. Bien sûr, d'autres matériaux interviennent dans leur réalisation (cuivre, aluminium, tantale, alumine...) mais leur surfaces sont tout à fait négligeables quant aux dégazages qu'elles engendrent par rapport aux surfaces d'inox mises en oeuvre.

<sup>9</sup> Joints à vide en Viton.

La méthode de calcul utilisée est issue d'un cours pratique sur les techniques du vide [Ric95]. Le temps de pompage primaire T pour pomper un volume V, d'une pression P<sub>1</sub> à une pression quelconque P<sub>2</sub>, avec une vitesse de pompage S, est donné par la formule suivante.

$$T = \frac{V}{S} \cdot \ln \frac{P_1}{P_2}$$

La pompe primaire utilisée pour le prévidage des enceintes d'extraction a une vitesse de pompage de 15 m<sup>3</sup>/h. La pompe est reliée à l'enceinte par un tube d'un mètre de long et d'un diamètre de 2,5 cm. Cette conductance supplémentaire grève la vitesse de pompage d'environ 30 %. La vitesse effective de pompage passe donc à 10 m<sup>3</sup>/h.

La pompe primaire utilisée pour le prévidage de l'enceinte dipôle et analyse a une vitesse de pompage de 30 m<sup>3</sup>/h. Les raccordements (canalisation circulaire et pompe turbomoléculaire) ramènent cette vitesse à 15 m<sup>3</sup>/h.

Pour prévider les enceintes du banc de la pression atmosphérique jusqu'à 10<sup>-1</sup> Pa<sup>10</sup>, les résultats des temps de pompage sont les suivants:

- ECS + Extraction                      4 minutes
- Dipôle + Analyse                      14 minutes

Les temps obtenus sont courts; d'autant que les enceintes ne seront que très rarement aérées. Cela permet de passer très vite au pompage secondaire avec les groupes turbomoléculaires et donc d'éviter toute rétrodiffusion d'huile des pompes primaires vers les enceintes, garantie d'un vide « propre ».

#### \* Flux et Vide secondaire

La pression limite que peut atteindre le vide dans une enceinte est fonction des caractéristiques des pompes utilisées, mais également (surtout) des phénomènes d'entrée de gaz en continu dans l'enceinte. Ces phénomènes sont fonction de la nature des matériaux utilisés dans la fabrication des enceintes, mais aussi, et c'est notre cas, d'injection de gaz dans la source d'ions.

Passons alors en revue successivement:

- les dégazages des matériaux (métaux et élastomères)
- les phénomènes de perméation

---

<sup>10</sup> Par sécurité pour les pompes turbomoléculaires, les ensembles de pompes secondaires ne fonctionnent pas au dessus de 5 Pa.

- les flux de gaz issus de la source d'ions.

*- Dégazages des matériaux*

Le dégazage est en fait la combinaison de deux phénomènes: la désorption et la diffusion. Ces deux actions partent d'une quantité de gaz limitée et qui provient soit de couches adsorbées sur les parois de l'enceinte, soit des gaz diffusant de l'intérieur des matériaux. Lors du pompage, les taux de désorption et diffusion diminuent avec le temps au fur et à mesure de l'épuisement des quantités de gaz en jeu.

Pour simplifier, on considère que les matériaux utilisés dans les enceintes du banc de tests se résument à l'acier inoxydable et aux joints élastomères<sup>11</sup>. Le flux est obtenu en multipliant le taux de dégazage unitaire (donné dans la littérature) par la surface de matériau soumise au vide. Pour les joints à vide en élastomère, on considère que la surface exposée au vide est égale à la surface du demi tore. Le tableau 4 présente les flux de dégazage pour les deux enceintes.

	Enceinte ECS + Extraction			Enceintes Dipôle + Analyse		
Temps	1 heure	10 heures	100 heures	1 heure	10 heures	100 heures
Matériaux						
Inox	$5,11.10^{-7}$	$4,26.10^{-8}$	$1,28.10^{-8}$	$9,05.10^{-7}$	$7,54.10^{-8}$	$2,26.10^{-8}$
Elastomères	$1,28.10^{-8}$	$8,00.10^{-10}$	$1,60.10^{-10}$	$4,00.10^{-9}$	$2,50.10^{-10}$	$8,00.10^{-11}$
Flux total dégazage	$5,24.10^{-7}$	$4,34.10^{-8}$	$1,19.10^{-8}$	$9,09.10^{-7}$	$7,56.10^{-8}$	$2,27.10^{-8}$

Tableau 4: Flux de dégazages des matériaux en  $\text{Pa.m}^3.\text{s}^{-1}$

*- Perméation*

Cette action est initiée par l'adsorption de molécules ou d'atomes de gaz qui frappent les surfaces extérieures des enceintes. Si le matériau des parois a une solubilité finie, des atomes ou molécules adsorbés pénètrent à l'intérieur du matériau où ils diffusent dans le solide jusqu'à atteindre les surfaces intérieures, puis désorbent vers le vide.

Les matières plastiques et les élastomères sont perméables à tous les gaz. Ces matériaux ont des coefficients suffisamment importants pour être pris en compte. Pour les enceintes du banc, les flux de perméation calculés sont les suivants:

Extraction	$3,23 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Dipôle + Analyse	$2,10 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

- Injection de gaz

Lors du fonctionnement de la source d'ions, un flux constant de gaz est injecté. Ce gaz est ionisé dans le plasma puis extrait. Si la transmission approche 100%, on admet que le flux injecté dans la source est directement transféré à la ligne d'analyse (pour le faisceau d'intérêt) et dans la chambre du dipôle. En fait, la plus grande part du faisceau extrait se perd dans la chambre du dipôle et les ions se recombinent sur les parois. Les atomes de gaz n'ayant pas statistiquement de direction privilégiée, on peut faire l'approximation que 50 % du flux injecté dans la source remonte vers l'enceinte d'extraction et que le reste part vers la ligne d'analyse où ils sont pompés.

Pour le calcul, et c'est un cas majorant, la source d'ions NANOGAN III peut produire au maximum  $200 \mu\text{Ap}^{12}$ , ce qui correspond à un flux de  $4,6 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . On compte donc la moitié de ce flux pour chaque enceinte.

Le tableau 5 est un récapitulatif de tous les flux entrants dans les enceintes du banc de tests. On voit nettement, qu'après 100 heures de pompage, les flux de dégazage sont tout à fait négligeables et que le flux prépondérant dans le système est celui dû aux gaz injectés dans la source d'ions. Toutefois, il convient de prévoir des pompes capables de supporter des dégazages intempestifs, qui sont dans notre cas, essentiellement dus au bombardement ionique des parois dans la zone d'extraction du faisceau.

<sup>11</sup> Les joints élastomères sont pour l'essentiels en Viton. Au montage, ils sont tous graissés avec une graisse à vide (Apiezon) dont les taux de dégazages sont très faibles.

<sup>12</sup> La définition de l'unité Ampère-particule ainsi que la conversion en  $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  est donnée au paragraphe II6.5.b.

	<b>ECS + Extraction</b>		<b>Dipôle + Analyse</b>	
	Pa.m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	% du flux total	Pa.m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	% du flux total
Dégazage des matériaux (100 h)	1,19.10 <sup>-8</sup>	0,5	2,27.10 <sup>-8</sup>	1
Perméation	3,23.10 <sup>-7</sup>	12	2,10.10 <sup>-7</sup>	8
Gaz injectés dans la source	2,30.10 <sup>-6</sup>	87,5	2,30.10 <sup>-6</sup>	91
<b>Total du flux à pomper</b>	<b>2,63.10<sup>-6</sup></b>		<b>2,53.10<sup>-6</sup></b>	

Tableau 5: Flux totaux à pomper

Une fois toutes ces données collectées, il est possible de calculer la vitesse de pompage (S) des pompes secondaires nécessaire pour obtenir les pressions de service (Ps)

voulues, sachant que

$$S = \frac{\sum \text{Flux}}{P_s}$$

Dans notre cas, on trouve:

- ECS + Extraction  $S = 264 \text{ l.s}^{-1}$

- Dipôle + Analyse  $S = 253 \text{ l.s}^{-1}$

Nous disposons de pompes turbomoléculaires de débit volume de  $550 \text{ l.s}^{-1}$ . Le facteur 2 avec le résultat du calcul offre un certain confort de service notamment par rapport aux dégazages intempestifs ou au temps de pompage (bien que difficilement mesurable en secondaire). Par ailleurs, il est possible de faire le calcul inverse (c'est à dire en fixant la vitesse de pompage) pour obtenir la pression limite ( $P_{\text{lim}}$ ) que l'on peut espérer atteindre, soit

$$P_{\text{lim}} = \frac{\sum \text{Flux}}{S}$$

et on obtient pour les deux enceintes:  $P_{\text{lim}} = 5.10^{-6} \text{ Pa}$ .

Les pompes turbomoléculaires répondent donc pleinement au cahier des charges du vide du banc de tests.

### II.4.3. Implantation des équipements

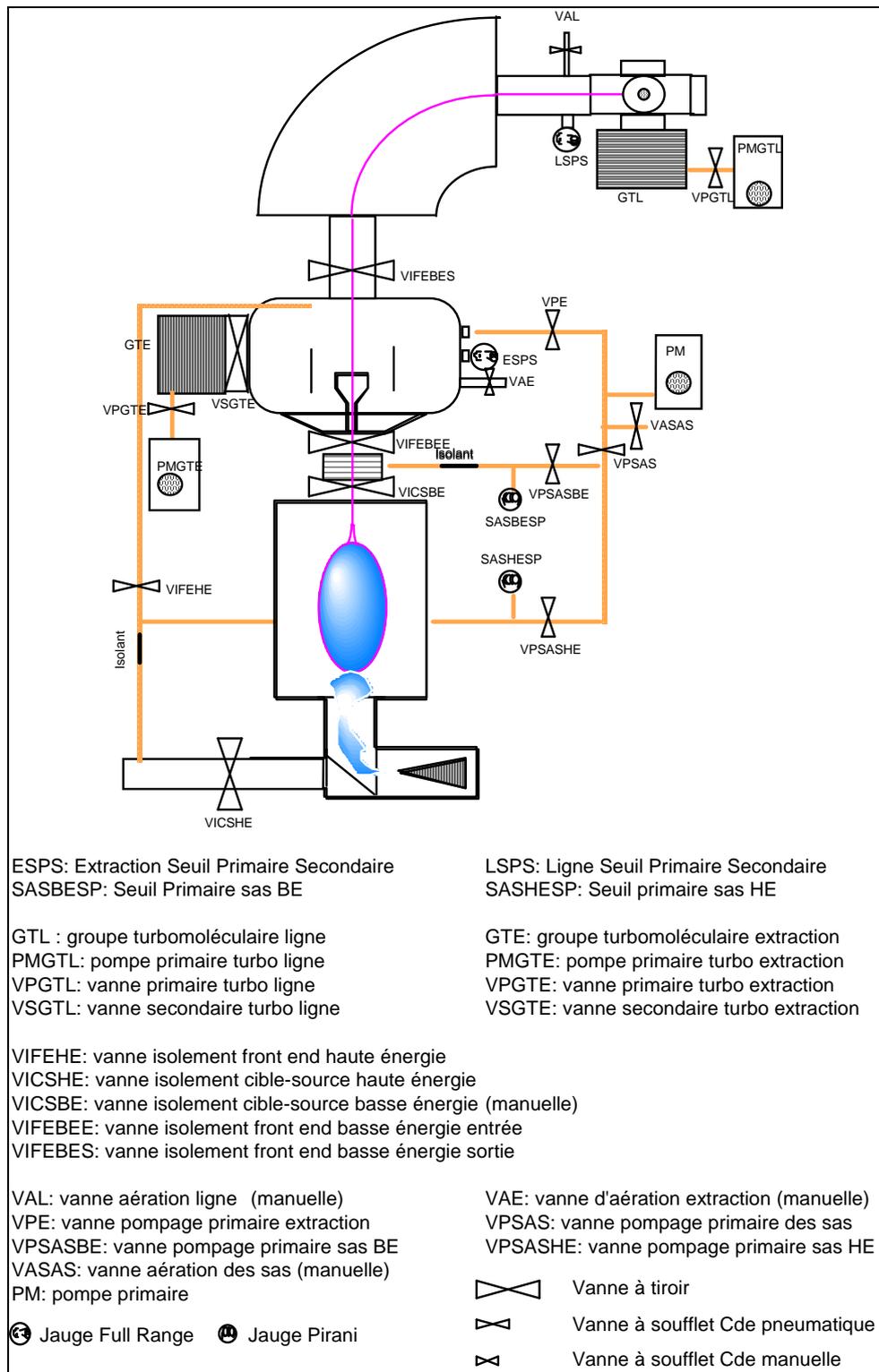


Figure 29: Schéma d'implantation du système de vide

La mesure des pressions est assurée par des capteurs de type Pirani (de 1000 hPa à  $10^{-3}$  hPa) pour le vide primaire et de type Penning (de  $10^{-3}$  à  $10^{-9}$  hPa) pour le vide secondaire.

Les jauges « FullRange™ » sont des capteurs intégrant une Pirani et une sonde Penning. Les mesures de vide sont explicitées plus amplement au paragraphe 4.5 de ce chapitre.

#### II.4.4. Distribution des gaz

##### a. Panneau de distribution

Pour tester le fonctionnement de la source d'ions, il est nécessaire d'injecter des gaz qui alimentent le plasma. Typiquement, on injecte un gaz dit « principal » (le gaz à ioniser) et un gaz « support » (en général de masse atomique plus petite), qui a pour rôle d'augmenter la densité du plasma, ce qui favorise l'ionisation du gaz principal.

Les deux gaz sont injectés à travers des vannes de dosages (Figure 12) dont on règle le débit. Un panneau de distribution permet d'alimenter ces vannes en gaz comme le montre la figure 56 en annexe 5.

##### b. Fuite calibrée

L'efficacité d'ionisation est mesurée à l'aide d'une fuite calibrée constituée d'une poudre compactée et délivrant un flux constant de particules. La fuite est fournie par le fabricant avec un certificat d'étalonnage à  $2,04 \cdot 10^{-6}$  mb.l/s d'équivalent air, pour une pression de 1000 mb en amont. Pour obtenir l'équivalent en hélium il faut appliquer un coefficient de 2,7, soit  $5,51 \cdot 10^{-6}$  mb.l/s.

Pour comparer ce flux avec les valeurs en courant obtenues dans le spectre, il est nécessaire de savoir quelle quantité d'électricité apporte le flux de gaz, c'est à dire convertir l'unité mb.l/s en Ampère-particule.

1 mole de gaz à 1000 mb occupe un volume de 22,4 l, contenant  $6,02 \cdot 10^{23}$  atomes pouvant apporter chacun une charge électrique de  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C s'ils sont monochargés.

Ainsi, un flux de 1 mb.l/s correspond à:

$$(6,02 \cdot 10^{23} \times 1,6 \cdot 10^{-19}) / (10^3 \times 22,4) = 4,3 \text{ Ampère.particule (Ap).}$$

ou encore  $10^{-6} \text{ mb.l/s} = 4,3 \mu\text{Ap}^{13}$

En technique du vide, on démontre que les conductances sont influencées par la nature du gaz, ou sa masse moléculaire.

Pour une canalisation, le rapport des conductances de deux gaz est inversement proportionnel à la

racine du rapport des masses moléculaires:  $\frac{C_{M_1}}{C_{M_2}} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$

Le flux étant proportionnel à la conductance on a donc:  $\phi_{M_2} = \sqrt{\frac{M_1}{M_2}} \phi_{M_1}$

avec  $C_{M_i}$ , conductance pour le gaz de masse  $M_i$

$M_i$ , masse moléculaire du gaz  $i$

$\phi_{M_i}$ , flux du gaz de masse  $M_i$

De cette formule on déduit le flux de la fuite installée sur le banc en fonction de différents gaz amont. Les valeurs sont rassemblées dans le tableau suivant

GAZ	Hélium $^4\text{He}$	Néon $^{20}\text{Ne}$	Argon $^{40}\text{Ar}$
$\phi$ ( $10^{-6}$ mb.l/s)	5,51	2,46	1,74
$\phi$ ( $\mu\text{Ap}$ )	23,70	10,60	7,49

Tableau 6: Flux calibrés de gaz

<sup>13</sup> Nous utiliserons préférentiellement le microAmpère-particule ( $\mu\text{Ap}$ ) car les courants dans le spectre exprimés en  $\mu\text{A}$  ne donnent pas directement une image du nombre de particules.

---

#### II.4.5. Procédure de gestion du vide et automatisme

L'ensemble du système de vide est contrôlé par un automate. Une procédure de gestion du vide a été élaborée pour déterminer les différentes séquences de mise sous vide, de mise en veille ou d'aération ainsi que les sécurités du système (Cf. annexe 6). Cette procédure a permis la programmation des séquences automatiques.

L'automate principal gère l'ensemble du système de vide. Il commande les vannes, les pompes primaires et turbomoléculaires par rapport à la lecture des mesures du Maxigauge™ (sorties analogiques) et l'état des relais.

Les pompes primaires sont actionnées à partir du « coffret vide » piloté par l'automate. Ce coffret regroupe, pour chaque pompe, un contacteur ainsi qu'un disjoncteur magnétothermique.

Les pompes turbomoléculaires sont alimentées à partir de convertisseurs qui eux mêmes sont commandés par l'automate.

Le synoptique de programmation des séquences de vide de l'automate est présenté sur la figure 30.

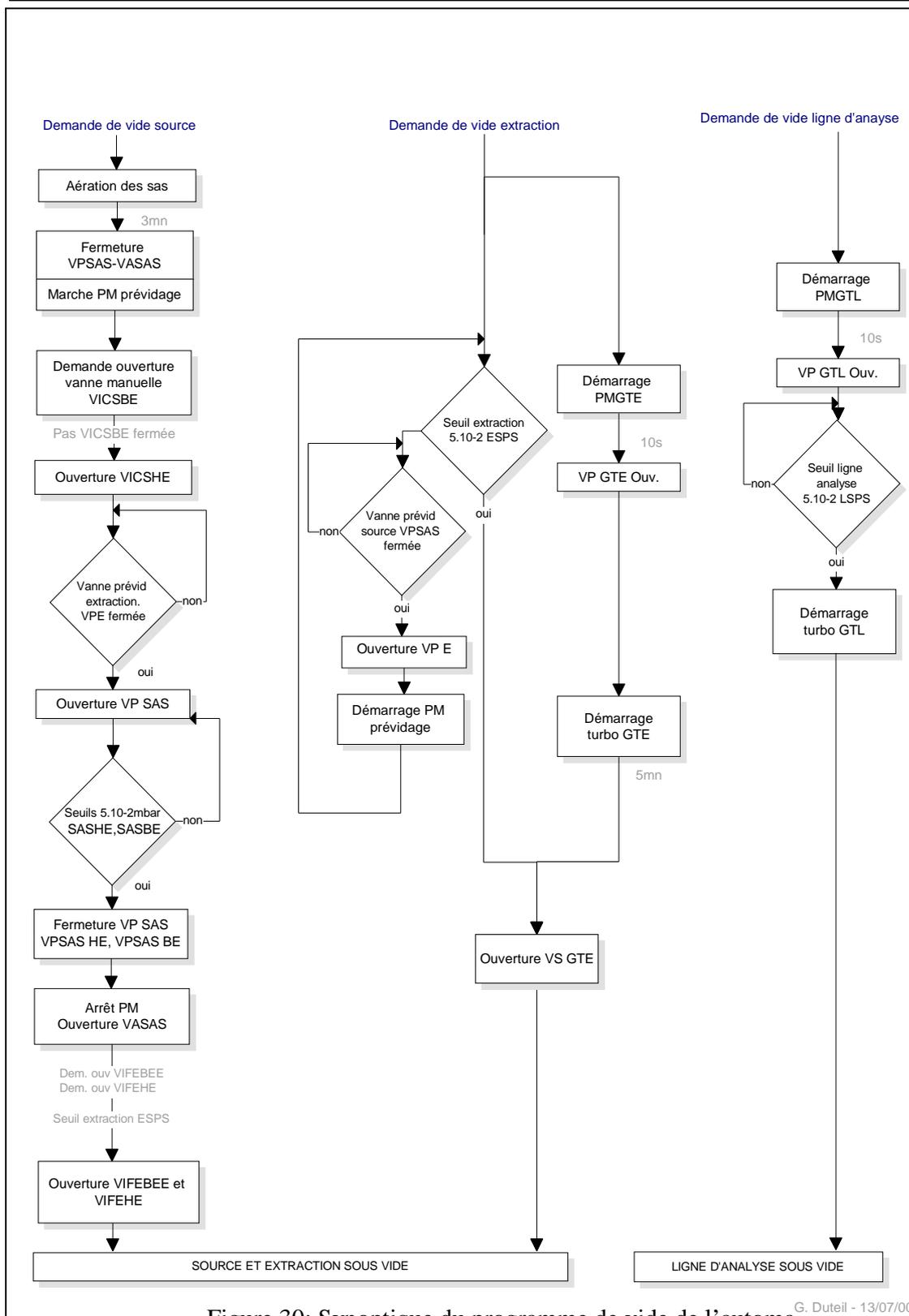


Figure 30: Synoptique du programme de vide de l'automate

#### II.4.6. Mise en service du système

Plusieurs capteurs assurent la mesure du vide pour le primaire et le secondaire. Ils sont reliés à un appareil de mesure (Maxigauge™) multivoies qui reconnaît le type de capteur. Il est également possible de programmer des seuils qui activent des relais.

Tous les capteurs sont calibrés en usine; il convient cependant de vérifier cette étalonnage selon une méthode donnée par le constructeur.

Les capteurs de mesure du vide primaire (type Pirani) sont calibrés par rapport à la pression atmosphérique (1000 hPa) pour le point haut et on vérifie qu'en pompage secondaire ils indiquent une valeur de pression inférieure à  $5 \cdot 10^{-2}$  Pa. Pour ce type de capteur, la mesure dépend de la nature du gaz. Ils sont d'abord réglés par rapport à l'air, mais il faut tenir compte d'une correction<sup>14</sup> dans le cas où les enceintes seraient aérées avec un gaz de nature différente.

Les capteurs de mesure du vide secondaire (type Penning) sont calibrés en usine et n'ont normalement pas à être repris.

#### II.5. Sécurité des utilisateurs

Le banc de tests utilise différentes formes d'énergie qui sont potentiellement dangereuses pour les utilisateurs (Haute-Tension électrique, courant électrique fort pour le chauffage cible, Hyper-Fréquences...); ainsi, un ensemble de conditions doivent être réunies pour assurer un fonctionnement en toute sécurité

##### II.5.1. Conditions de fonctionnement

➔ Les portes d'accès du banc en fonctionnement, sont condamnées et leur état est géré (fins de course électriques).

➔ Les clés sont consignées par un système de clés prisonnières dans un tiroir avec gestion de l'état (situé dans le local de commande).

➔ Les arrêts de sécurité sont actifs (c'est à dire non enfoncés)

---

<sup>14</sup> Il existe des abaques de correction pour différents types de gaz.

---

↳ La perche<sup>15</sup> de mise à la terre est en place et son état est géré

Si l'ensemble des conditions ne sont pas réunies, un commutateur court-circuite la Haute-Tension en la mettant à la terre et le secteur (220 V) nécessaire aux alimentations Haute-Tension et au générateur Hyper-Fréquence est coupé. Il y a également une recopie de tous les états du système vers l'automate afin de gérer la signalisation lumineuse de présence danger et les sécurités externes des alimentations.

### II.5.2. Gestion des sécurités par l'automate

L'automate supervise l'ensemble des sécurités du banc de tests.

↳ Il contrôle le « boîtier de sécurités eau ». Ce dernier regroupe les états des débitmètres des différents circuits ce qui permet à l'automate, en conséquence, de commander la vanne de coupure générale du panneau hydrolique, et également de superviser les différents états, notamment sur le programme de commande/contrôle.

↳ Il supervise le « coffret de sécurités général » (figure 31) qui se situe dans le local commande/contrôle. Ainsi, l'automate autorise ou non, la mise en route des différents équipements (Cf. Annexe 7).

---

<sup>15</sup> La perche de mise à la terre est utilisée lorsqu'on pénètre à nouveau dans le local de tests après fonctionnement sous haute-tension. Elle permet de s'assurer qu'aucun équipement n'est resté au potentiel.

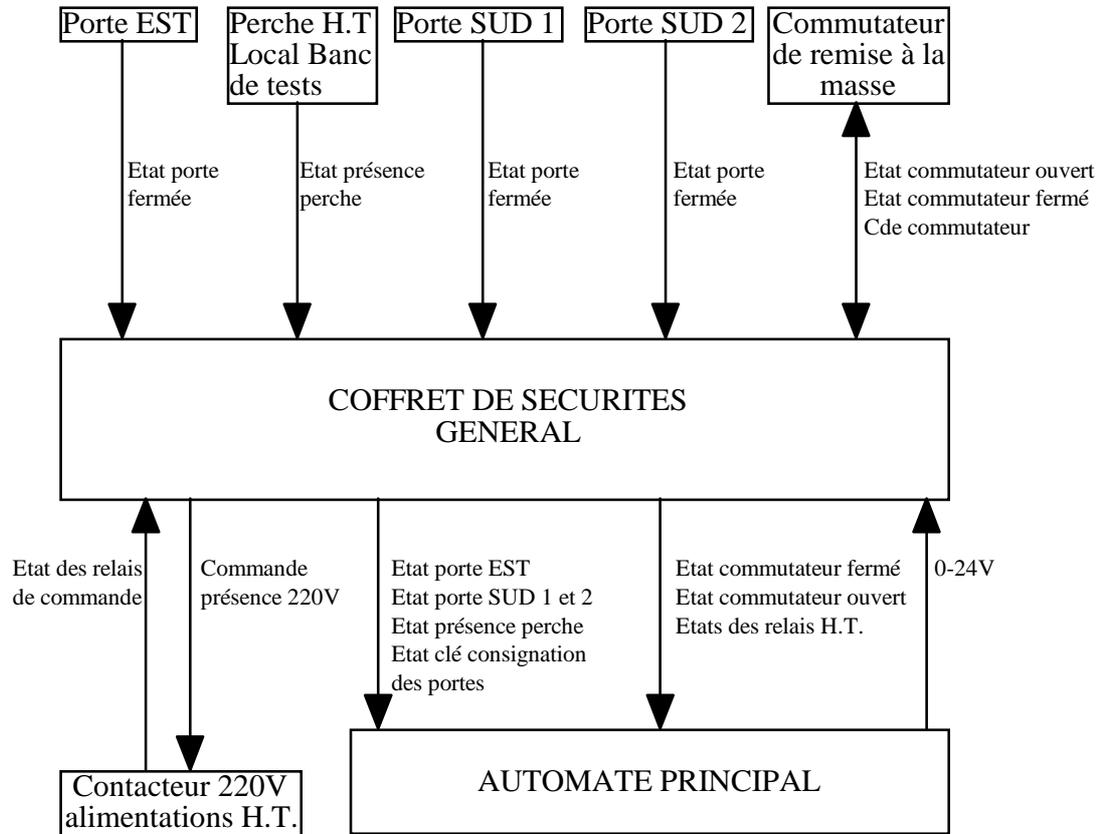


Figure 31: Principe du coffret de sécurités général

### II.5.3. Environnement

Toute la surface du banc de tests est recouverte d'un plafond grillagé (5x5cm), réalisé par des ensembles amovibles de 80 cm de large. Ce dispositif empêche les personnes de s'approcher des équipements sous haute-tension à moins d'un mètre. Une trappe coulissante est prévue au dessus du châssis de la source pour sa manutention.

Des signalisations lumineuses et étiquettes (Danger Haute-Tension, Accès interdit...) sont placées à l'extérieur du banc et sur les portes.

#### II.5.4. Consignes

Pour la sécurité de l'utilisateur, dès lors qu'il doit pénétrer dans le local de tests après fonctionnement sous Haute-Tension, une consigne de sécurité à suivre est affichée sur la porte. Elle est présentée par la figure ci dessous.

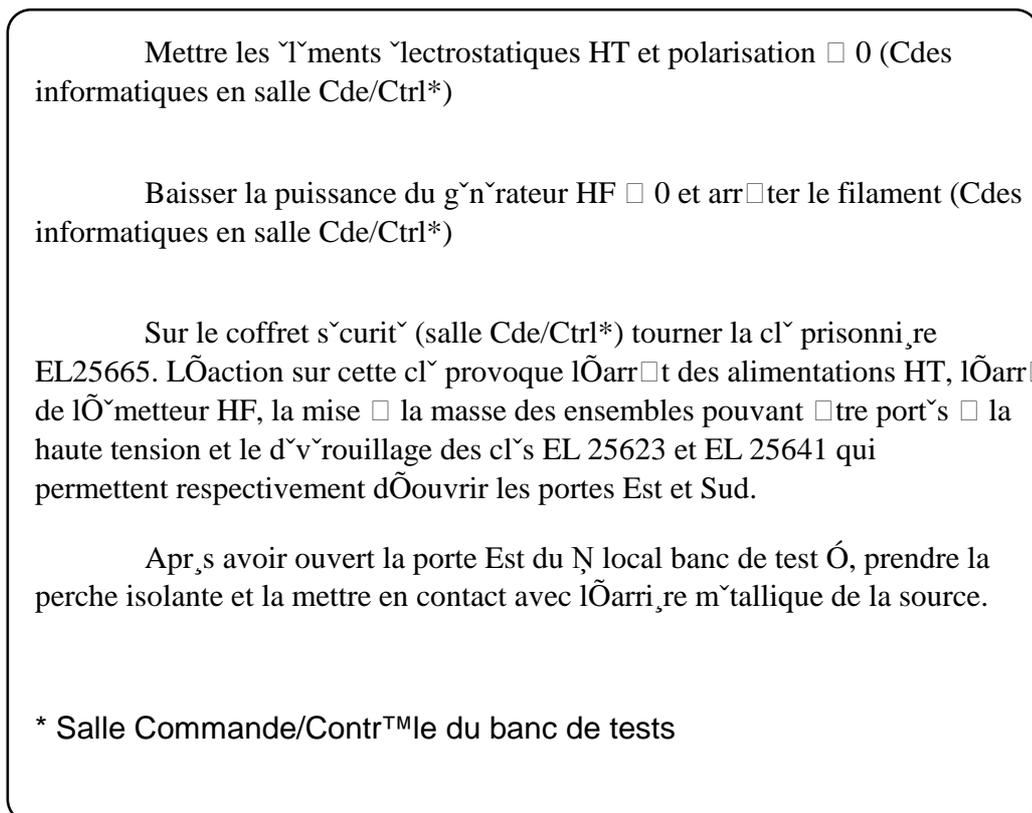


Figure 32: Consigne pour entrer dans le local banc de tests des ECS

### II.6. Réseau de communication

#### II.6.1. Principe général

Comme nous l'avons vu, les accès du local de tests sont complètement fermés lorsque le banc est en fonctionnement. Ainsi, tous les équipements sont commandables à distance par un ensemble informatique (PC et programmes spécifiquement développés) situé dans le local de Commande/Contrôle.

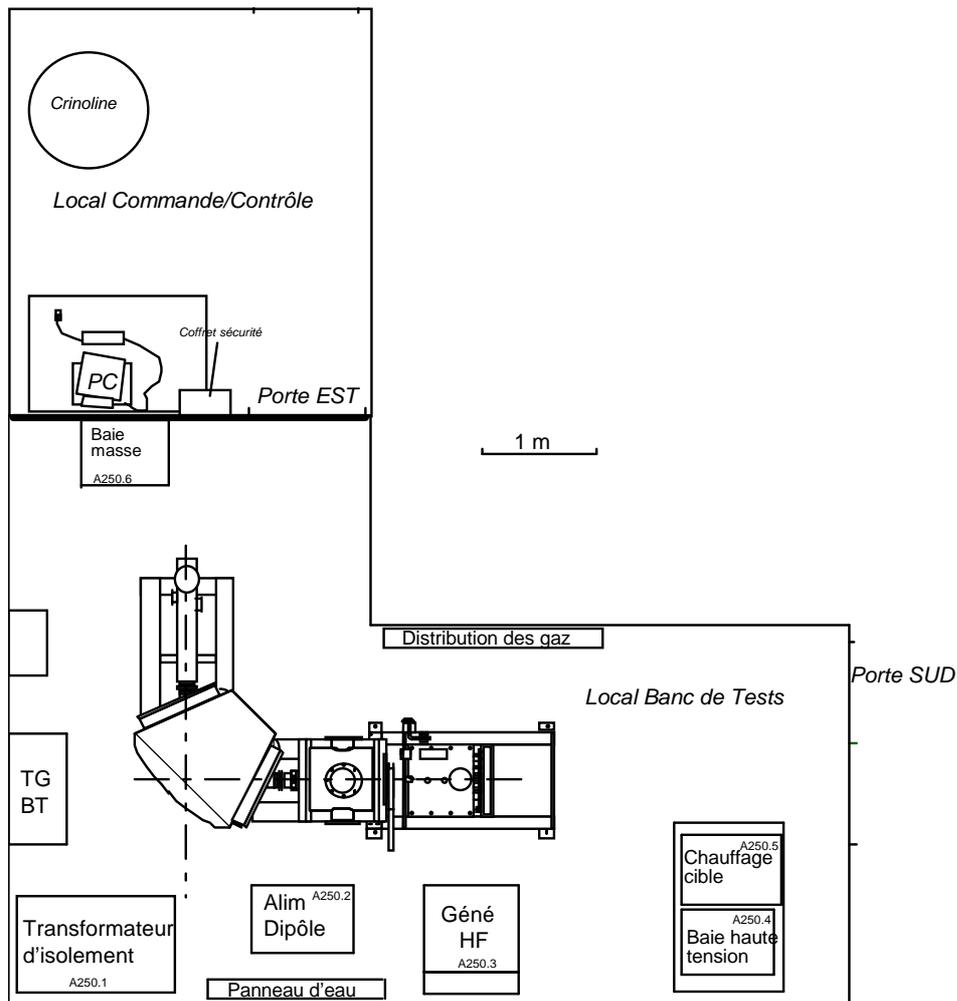


Figure 33: Situation des locaux

Comme nous l'avons vu précédemment, l'automate principal (dans la baie masse) gère l'ensemble du système de vide, la motorisation des électrodes, les commandes de l'émetteur Hyper-Fréquence et supervise les coffrets de sécurités. Un automate déporté (dans la baie Haute-Tension) le seconde et ils communiquent entre eux par un réseau de fibres optiques.

L'automate principal est relié au réseau de communication tout comme l'ensemble des interfaces de commandes des alimentations électriques; Le réseau utilise le protocole de communication JBUS. Les équipements portés à la Haute-Tension lui sont reliés par fibres optiques. Les données sont exploitées par les programmes informatiques de commande et contrôle (cf. paragraphe II.7). L'ensemble du réseau de communication est représenté sur la figure 34.

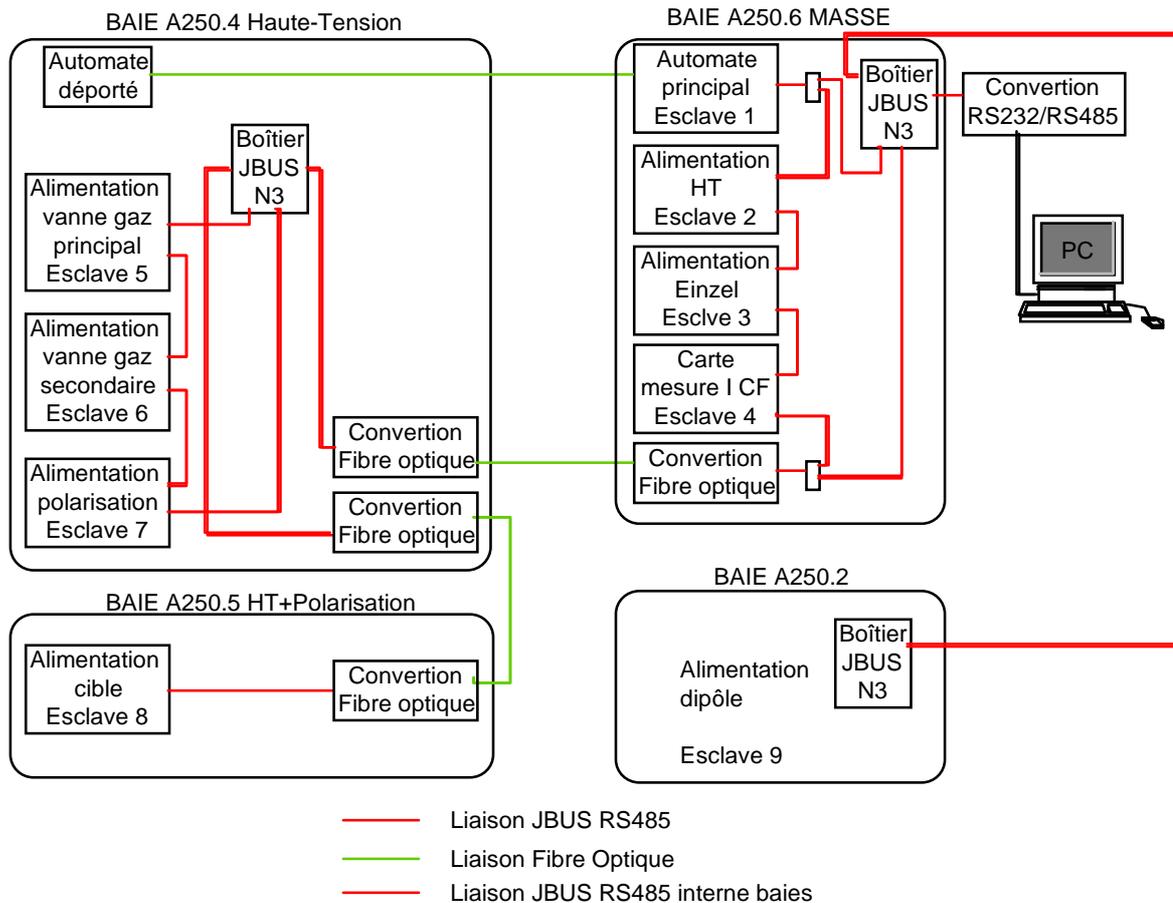


Figure 34: Réseau de communication

### II.6.2. Protocole JBUS

Le JBUS est un protocole de communication qui utilise comme support physique une liaison série standard du type RS485. Il est communément utilisé au GANIL dans des applications de commande et contrôle d'équipements. Un des principaux avantages de cette liaison des équipements à des systèmes informatiques est que les signaux peuvent transiter sur de grandes distances sans perte d'information.

Le principe repose sur un échange d'information de « maître » à « esclave ». Dans notre cas, le système informatique (PC+Programme de commande/contrôle) est le maître; les équipements à commander sont esclaves. Le support RS485 limite le nombre d'esclaves reliés en série à 32; le banc de tests lui, en compte 9.

Tout échange comporte deux messages (figure 35): une demande du maître entraîne une réponse de l'esclave.

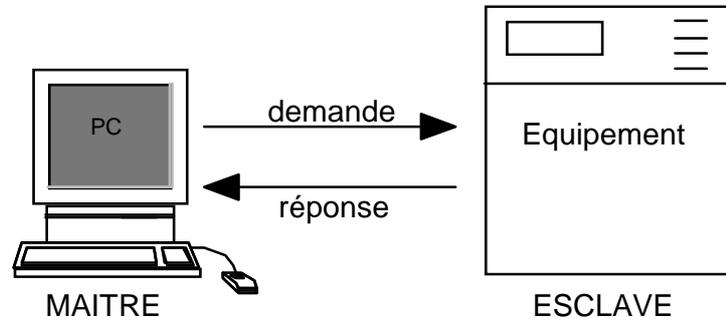
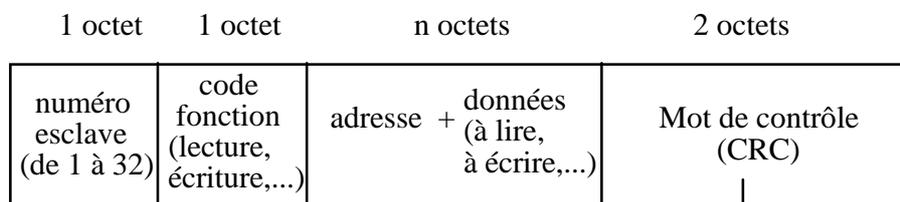


Figure 35: Principe JBUS

Tous les échanges d'informations sont à l'initiative du maître (l'esclave ne peut pas *prendre la parole* si on ne lui demande pas).

Chaque message ou trame contient quatre types d'informations (figure 36):

- le numéro d'esclave qui spécifie l'équipement destinataire.
- le code fonction; il permet de sélectionner une commande (lecture, écriture, bit, mot) et de vérifier si la réponse est correcte.
- le champ d'information contient les paramètres liés à la fonction: adresse bit, adresse mot, valeur bit, valeur de mot, nombre de bits, nombre de mots.
- le mot de contrôle; mot utilisé pour détecter les erreurs de transmission.



↓  
Calculé par l'émetteur de la trame, il est  
recalculé et vérifié par le récepteur

Figure 36: Trame d'information en JBUS

### II.6.3. Commande/Contrôle des alimentations

Toutes les alimentations sont reliées au réseau de commande/contrôle par des interfaces de commandes. Ces interfaces, développés au GANIL, sont configurés par rapport à chaque alimentation. Ils fixent le numéro d'esclave, les butées de commande (Tension - Courant maximum) et la vitesse de communication avec le réseau JBUS. L'interface mesure également les courants et tensions aux bornes de l'alimentation.

Le tableau 7 ci-dessous récapitule les adresses d'écriture et de lecture correspondantes aux ordres de commandes et contrôles ainsi que la signification des données convoyées par le réseau JBUS aux interfaces de commandes. Nous verrons au paragraphe II.7.3 comment ces adresses sont utilisées dans la programmation informatique.

adresse 0	alimentation ON	écrire 1 à cette adresse pour enclencher l'alimentation
adresse 1	alimentation OFF	écrire 1 à cette adresse pour pour couper la puissance
adresse 2	arrêt général	non utilisé pour le banc de tests
adresse 3	surveillance	non utilisé pour le banc de tests
adresse 4	fourchette de surveillance	non utilisé pour le banc de tests
adresse 5	rampe	non utilisé pour le banc de tests
adresse 6 et adresse 7	consigne n°1	Première valeur de consigne de l'alimentation. C'est un entier signé codé sur 32 bits: 7FFFFFFF → valeur max
adresse 8 et adresse 9	consigne n°2	non utilisé pour le banc de tests
adresse 10 et adresse 11	valeur principale	Lecture de la valeur principale. C'est un entier signé codé sur 32 bits: 7FFFFFFF → valeur max
adresse 12 et adresse 13	valeur secondaire	non utilisé pour le banc de tests
adresse 14	état de l'alimentation	bit 0 = 0 : puissance ON; bit 0 =1 puissance OFF
adresse 15 et adresse 16	défauts	non utilisé pour le banc de tests

Tableau 7: Adresses des commandes

Certaines alimentations ne peuvent être mise en route que lorsque certaines conditions extérieures sont réunies. L'information de défaut extérieur est cablée sur une entrée de

l'interface de commande (contact sec). Par exemple, l'alimentation en courant de la cible ne peut être commandée que si le système de réfrigération est opérationnel (débit). Le coffret de sécurité eau renvoie l'information de fonctionnement du circuit de réfrigération à l'automate dont une des sorties est reliée au « défaut charge » de l'interface de commande de l'alimentation en courant.

#### II.6.4. Etalonnage Courant - Tension

Les réflexions menées au début de l'étude du projet ont permis de définir un cahier des charges pour chaque alimentation électrique du banc. Le groupe « Charges et Alimentation » du GANIL a alors pris en charge l'achat de ces équipements. A la réception les alimentations ont été couplées à leur interface de commande respectif et testées.

Les principales caractéristiques sont rassemblées dans le tableau ci-dessous:

Alimentation	Commande	Tension max.	Courant max.	Stabilité en tension	Stabilité en courant
H.T. Source	Tension	40 kV	25 mA	$10^{-4}$	-
H.T. Einzel	Tension	20 kV	10 mA	$10^{-4}$	-
Polarisation source	Tension	650 V	10 mA	$10^{-4}$	-
Chauffage Cible	Courant	30 V	330 A	-	$10^{-3}$
Dipôle	Courant	57 V	350 A	-	$10^{-4}$
Vanne dosage des gaz	Tension	10 V	0,5 A	$10^{-3}$	-

Tableau 8: Caractéristiques des alimentations électriques

---

## II.7. Commande/Contrôle du banc

### II.7.1. Présentation

Les commandes et les contrôles (mesures, états) des équipements du banc de tests et de l'ECS se font à partir de programmes réalisés avec le logiciel LabVIEW® [Lab96].

Labview est un logiciel de développement d'applications comparable à la plupart des systèmes de développements en langage C ou BASIC. Cependant, LabVIEW se distingue des autres logiciels sur au moins un point important. En effet, la majorité d'entre eux s'articulent autour de langages à base de texte dont la programmation consiste à empiler des lignes de codes, tandis que Labview utilise un langage de programmation graphique, le langage G, pour créer un programme sous forme de diagramme.

Labview est un système de programmation à usage général qui comporte des bibliothèques de fonctions ainsi que des outils de programmation spécialement conçus pour l'acquisition de données et le contrôle d'instruments. Un programme Labview est appelé instrument virtuel (ou VI) car sa représentation et son fonctionnement ressemblent à un instrument classique.

Un VI comprend:

- une interface utilisateur interactive (face avant) qui reproduit le panneau avant d'un instrument physique. Elle se compose de boutons de commandes, de graphes ainsi que d'autres commandes et indicateurs.

- un diagramme de flux de données construit en langage G qui sert de code source.

- une icône connecteur qui répertorie tous ses paramètres si bien que d'autres VIs peuvent lui transmettre des données en le considérant comme un sous VI.

Des fonctions de lecture et d'écriture conformes au protocole de communication JBUS sont exploitées sous Labview pour dialoguer avec les différents équipements (esclaves) présents sur le réseau. Les données échangées entre le programme de commandes et contrôles et les équipements du banc transitent par le port série de l'ordinateur.

## II.7.2. Supervision de l'automate

L'automate du banc de tests ne dispose pas d'interface de supervision et de commande. C'est pourquoi, un programme de supervision virtuel (sous Labview), accessible sur l'ordinateur du local commandes/contrôles, donne en continu une vision des différents états des équipements (sécurité, état des vannes, des pompes, mesure du vide) et permet de commander les séquences de vide pour chaque enceinte et de suivre leur évolution. Ce programme est divisé en deux sous VIs dont les faces avant sont présentées sur les figures 37 et 38.

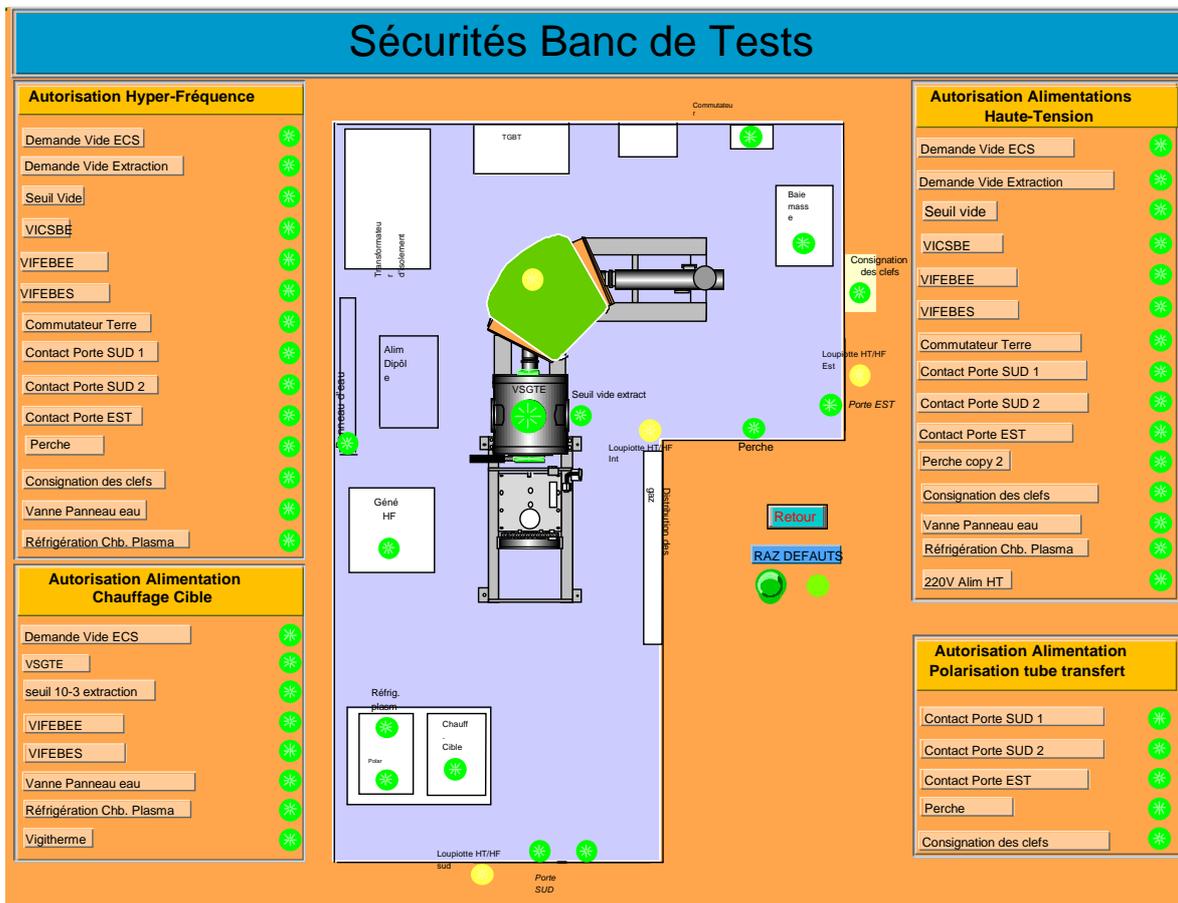


Figure 37: Face-avant du programme de supervision des sécurités

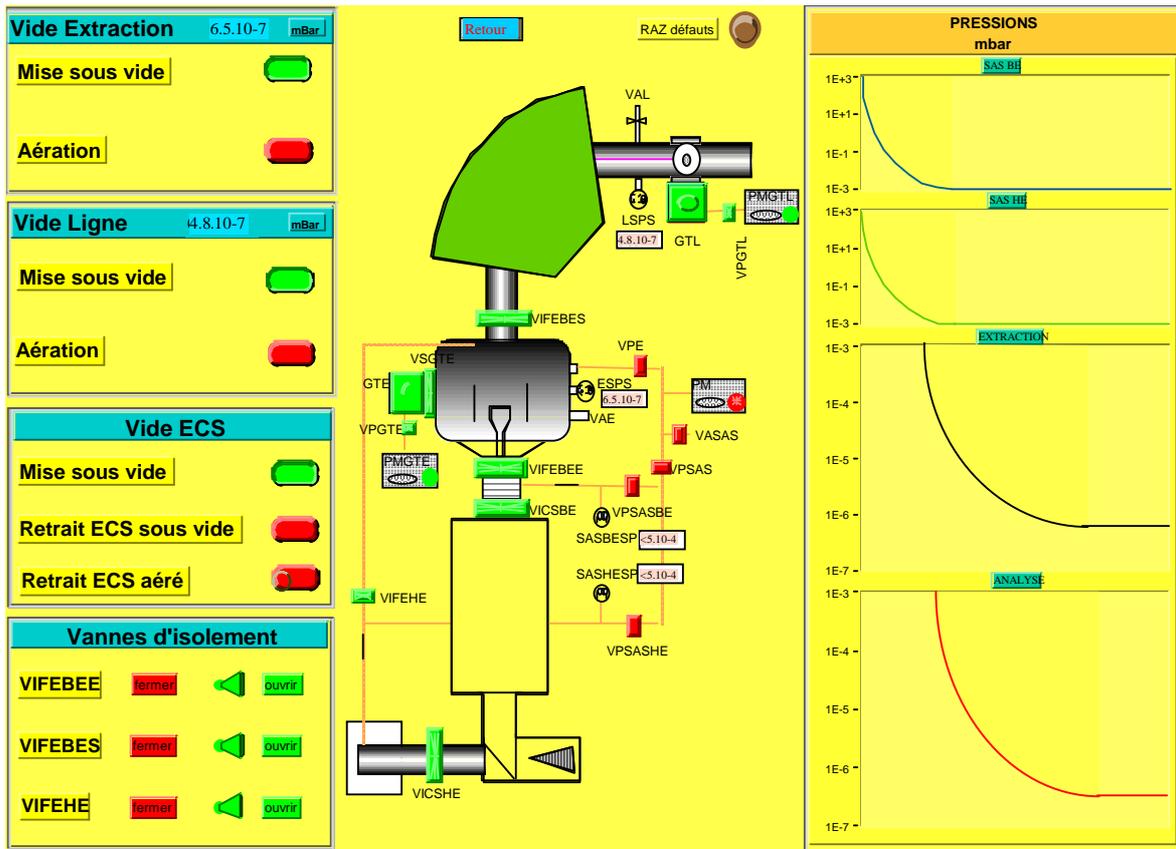


Figure 38: Face-avant du programme de supervision du vide

### II.7.3. Programme principal de commande/contrôle des équipements

Le programme principal de commandes et contrôles du banc de tests permet de faire fonctionner l'ECS et tous les équipements du banc nécessaire à l'analyse du faisceau. Il est composé de plusieurs sous VIs spécifiques aux commandes et contrôles de chaque équipement pris un à un. Chaque sous programme utilise des fonctions propres à Labview ou d'autres sous VIs développés spécifiquement, comme les fonctions de lecture et d'écriture selon le protocole de communication JBUS (cf. Tableau 7, § II.6.3). Le programme de commandes et contrôles de l'alimentation Haute-Tension présenté ci-dessous en est une illustration.

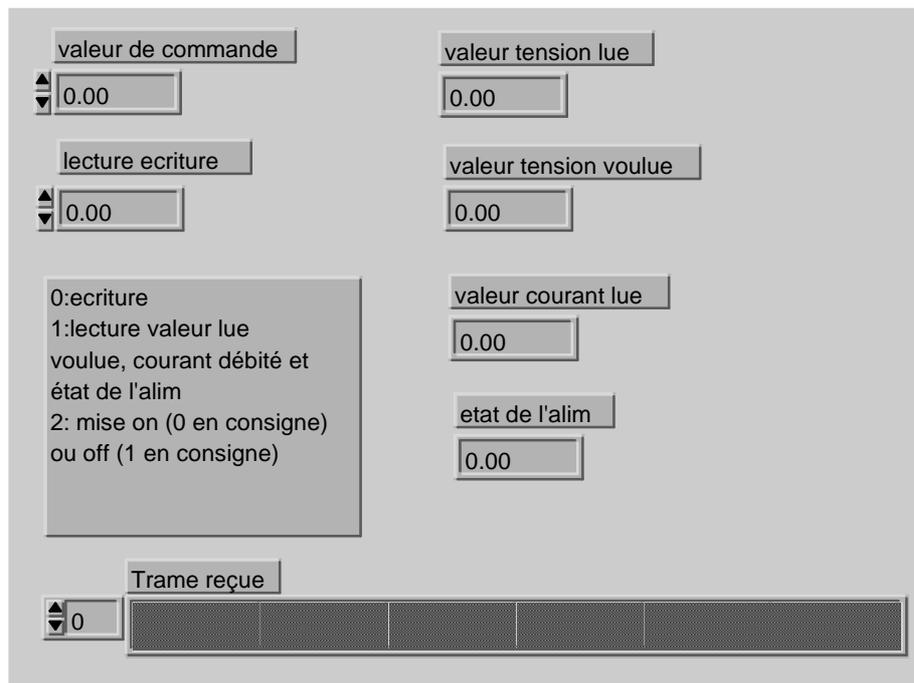


Figure 39: Face avant du programme de commande et contrôle de l'alimentation Haute Tension

Si le contrôleur digital « lecture écriture » est sur 0 et que la valeur de commande est aussi à 0, alors le programme écrit 1 à l'adresse 0 de l'interface de commande JBUS de l'alimentation Haute Tension. Ceci entraîne sa mise en marche. Si maintenant le contrôleur « lecture écriture » est sur 1, alors le programme commande la lecture de 5 mots à l'adresse 6 (cf. diagrammes ci-dessous) et affiche en retour les valeurs de tension, de courant et l'état de l'alimentation. Si l'alimentation est sous tension l'état lu est 0 (toute autre valeur indique un défaut).

Les diagrammes présentés ci-dessous sont l'illustration de la programmation graphique de ce VI. On remarque que le programme de lecture/écriture de l'alimentation Haute-Tension est composé des sous VIs fonction 3 et fonction 6 de lecture et d'écriture du JBUS.

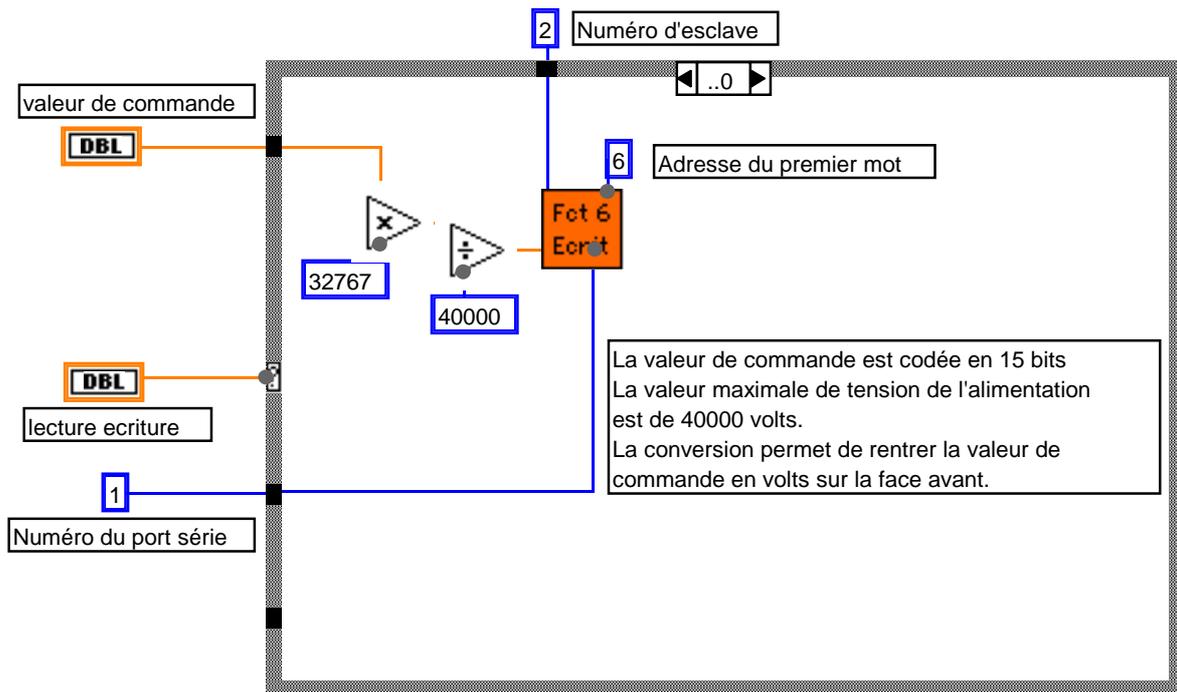


Figure 40: Diagramme de commande et contrôle de l'alimentation Haute Tension  
 Cas où lecture/écriture est égal à 0

La fonction 6 est le VI d'écriture d'information à un esclave sur le réseau JBUS. Elle est représentée ci-dessus par son icône. Comme nous l'avons vu précédemment l'icône est en fait un connecteur pour acheminer les différents types d'information dont ce sous VI à besoin pour fonctionner.

Dans ce cas, on envoie à l'esclave 2 (interface de l'alimentation Haute Tension), via le port série numéro 1 de l'ordinateur, la valeur de commande à l'adresse 6.





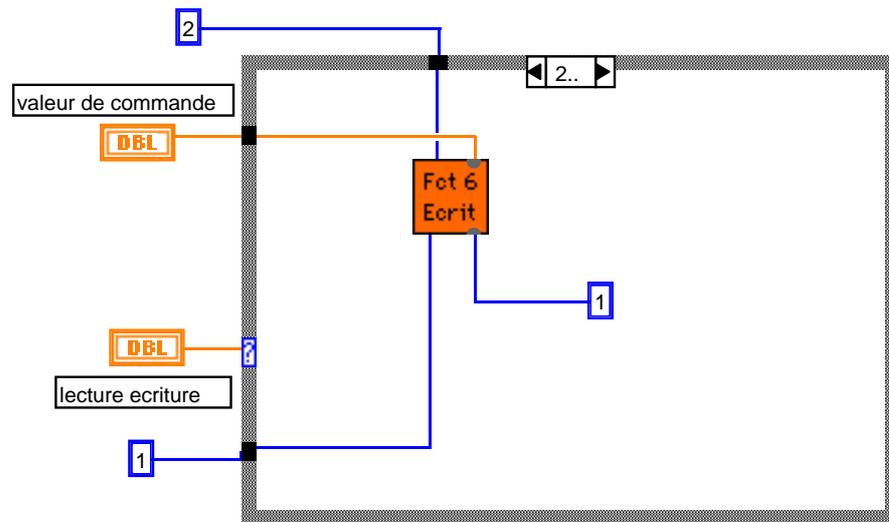


Figure 43: Cas où lecture écriture égal 2

Ce dernier cas permet d'écrire la commande de mise en marche ou l'arrêt de l'alimentation Haute Tension.

Le programme principal de commandes et contrôles du banc de tests utilise une trentaine de sous VIs principaux, dont la hiérarchie est représentée sur la figure 44.

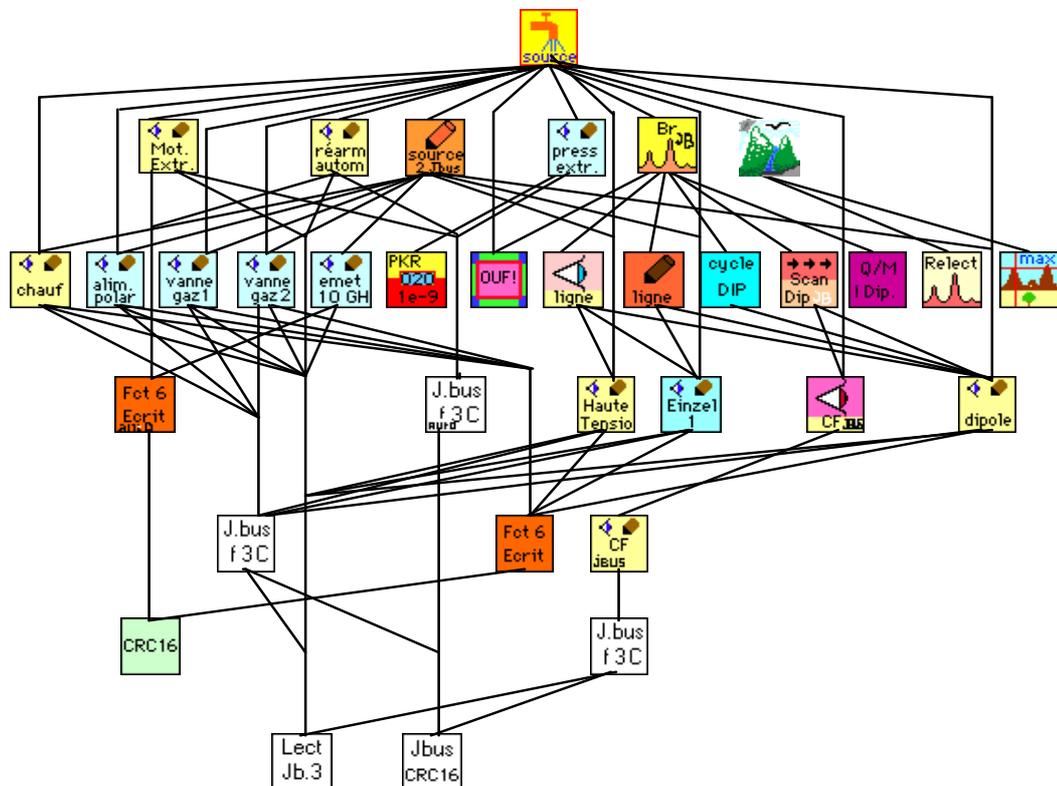


Figure 44: Hiérarchie du programme principal de commandes et contrôles

Leurs fonctions sont explicitées ci-dessous:



Programme de lecture et d'écriture pour l'alimentation en courant de la cible. Il en existe un similaire pour chaque alimentation comme nous l'avons vu dans l'exemple présenté précédemment.



Programme de lecture et d'écriture pour l'émetteur Hyper-Fréquence



Programme de lecture et d'écriture pour le réglage du gap inter-électrodes



Programme de lectures des défauts consignés par l'automate et écriture d'un réarmement



Programme de commande des alimentations



Programme de lecture de la pression dans l'enceinte d'extraction



Programme de lecture du courant ionique analysé dans la coupelle de Faraday



Programme permettant la réalisation des spectres



Programme de relecture d'un spectre qui permet de superposer le spectre actuel avec un spectre précédemment enregistré



Programme de lecture des valeurs des équipements de la ligne avant de faire un spectre



Programme de cyclage du dipôle avant de faire un spectre



Programme permettant la commande du dipôle et de lecture du courant ionique analysé permettant de tracer le spectre



Programme de remise à valeur des équipements après le spectre



Programme de relecture de spectres enregistrés comprenant les mesure de transmission et d'efficacité d'ionisation.



Programme de sauvegarde des paramètres de fonctionnement

L'ensemble de ces sous VIs réunis aboutissent à un programme principal unique qui permet de faire fonctionner le banc et l'ECS. La face avant de ce programme est présentée sur la figure 45 ci-après.



---

Quelques-unes des fonctionnalités de ce programme sont explicitées ci-dessous.

Le bouton «supervision automate» ouvre directement le programme présenté plus haut au § II.7.2.

Lorsque le bouton «contrôle des alimentations» est actif, l'état des alimentations est constamment comparé à l'état voulu (bouton on/off pour chaque alimentation). Si une alimentation vient à disjoncter ou si son interface de commande ne répond plus, un message d'alerte s'affiche à l'écran.

Les alimentations sont commandées par les boutons et les curseurs de commande ou en rentrant la valeur numérique voulue dans les contrôleurs prévus à cet effet.

Pour commander le dipôle de façon à analyser un ion de masse et de charge quelconque, il suffit de rentrer les valeurs de masse et de charge voulues et le programme renvoie la valeur de courant calculée par rapport à l'étalonnage du dipôle. Le courant généré dans la coupelle de Faraday par le faisceau d'ions analysé est constamment affiché dans le graphe déroulant au centre de la face avant du programme.

Le bouton «Histo courbe» donne accès à une série de courbes en fonction du temps où s'affichent les valeurs de la Haute Tension, du courant total Haute Tension, du courant dans la cible, de la résistance de la cible et de la pression dans l'enceinte d'extraction.

Le bouton «sauvegarde paramètres» permet d'enregistrer dans un fichier texte toutes les valeurs actuelles des différents équipements (alimentations, émetteur Hyper-Fréquence, gap inter-électrodes, courant de faisceau analysé, pression de l'enceinte d'extraction).

Le bouton «spectre» (cf. définition des spectres au Chapitre III, § 1.4) ouvre une page d'accueil pour définir les conditions de réalisation du spectre (valeur de départ et de fin du dipôle, nombre de points d'acquisition). Cette page permet de lancer l'acquisition proprement dite, au final affiche le spectre réalisé et propose son enregistrement pour son exploitation ultérieure.

Le bouton «rappel spectre» ouvre le programme de relecture de spectre (figure 46) enregistré dans une fenêtre où des curseurs et autres boutons permettent de calculer la transmission et l'efficacité d'ionisation.

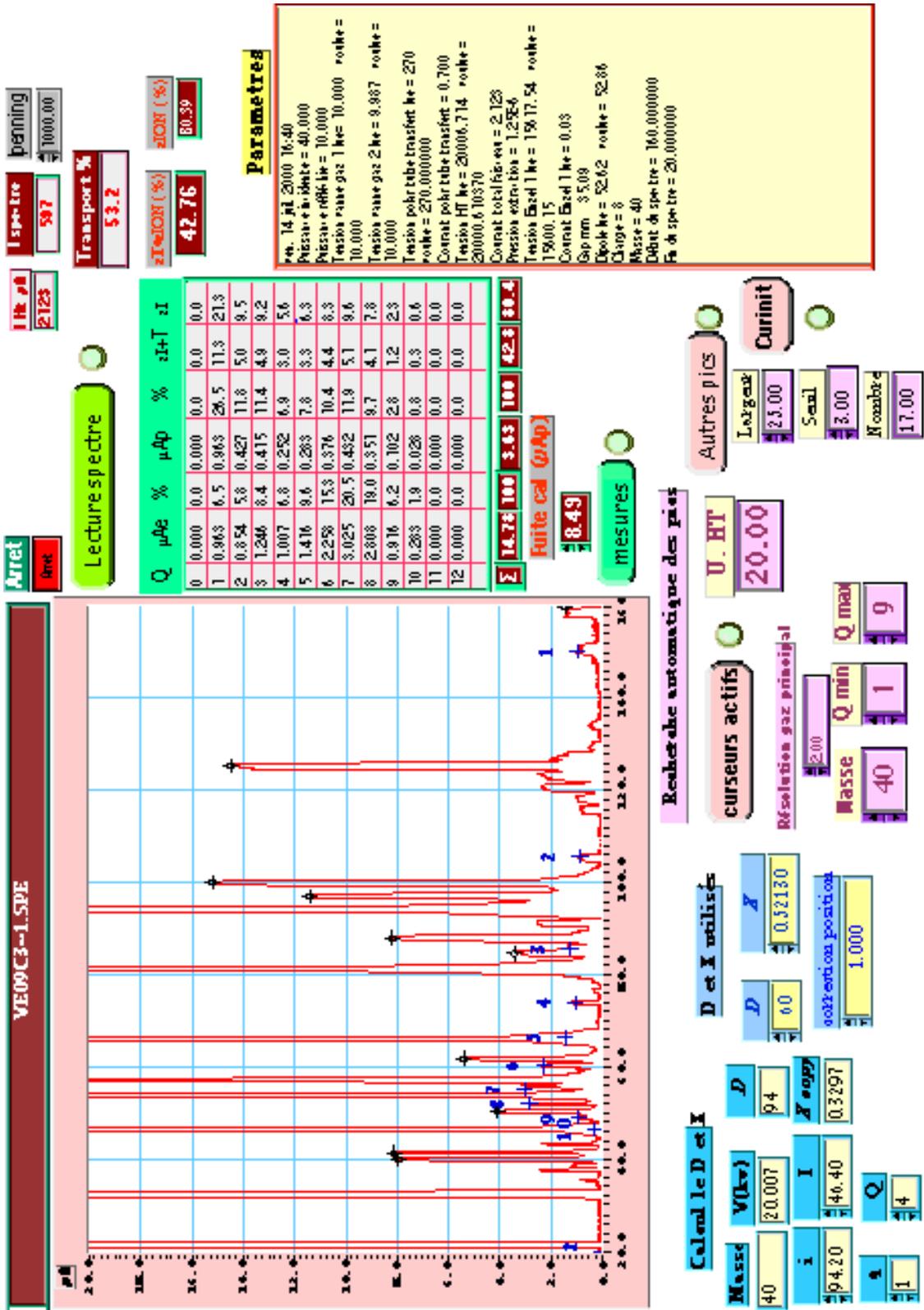


Figure 46: Face-avant du programme de relecture des spectres

---

<i>Chapitre III: Principes des tests et résultats</i>
---

### III.1. Analyse du faisceau d'ions

Le faisceau d'ions produit par la source est analysé afin de statuer sur l'efficacité globale.

#### III.1.1. Extraction et focalisation

La source est portée à un potentiel Haute-Tension positif par rapport à la masse. L'électrode d'extraction est reliée à la masse.

La configuration magnétique de la source d'ions est telle que des lignes de champ fuient par le trou de l'électrode plasma. Les électrons du plasma qui se déplacent préférentiellement le long des lignes de champ peuvent donc s'échapper de la chambre (Cf. Annexe 4). Ces électrons entraînent dans leur course des ions positifs, qui, dès qu'ils sont soumis au champ électrique entre l'électrode d'extraction et l'électrode plasma, se trouvent accélérés. C'est le point de départ du faisceau d'ions.

Pratiquement, différents effets électromagnétiques font que le faisceau n'est pas parfaitement parallèle au sortir de la source: c'est ce que l'on appelle l'émittance du faisceau. Le faisceau est focalisé dans l'extracteur puis diverge. Afin de le focaliser à nouveau et pour qu'il se conserve jusqu'au spectromètre de masse, il est nécessaire de le mettre en forme. C'est l'effet du champ électrique créé par la lentille Einzel qui est portée à un potentiel grossièrement égal à la moitié de la tension source. La figure 47 est un schéma de principe du système d'extraction et de focalisation.

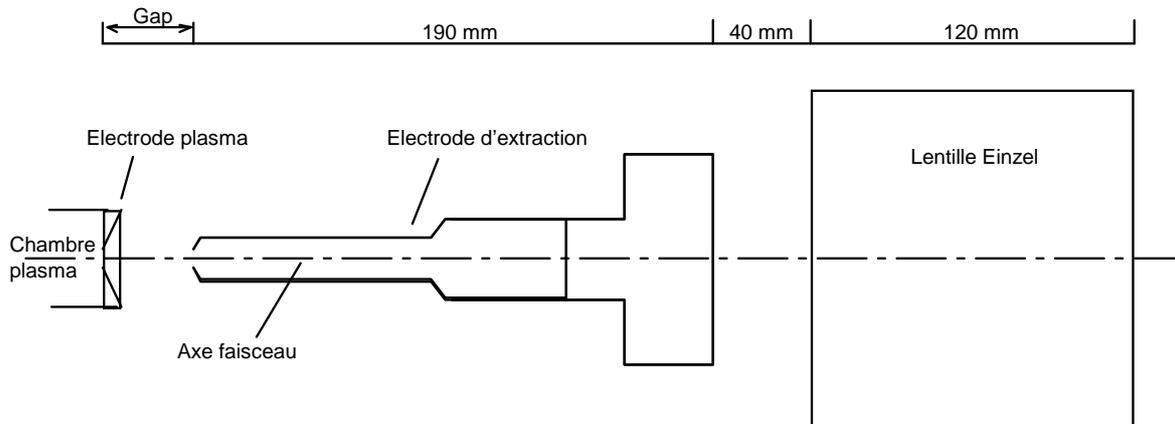


Figure 47: Système d'extraction et de focalisation du faisceau

Comme nous l'avons vu au paragraphe II.1.2, les électrodes d'extraction et einzel sont mobiles. Le gap peut donc être ajusté pour optimiser la transmission du faisceau jusqu'à la coupelle de Faraday. L'étalonnage du gap est précisé au paragraphe 3.1 du chapitre III.

### III.1.2. Dipôle magnétique

De la source d'ions sont extraits simultanément plusieurs types d'éléments. Il y a une certaine distribution en état de charge sur les différents éléments ionisés. Afin de séparer et de mesurer le courant de chacune de ces espèces, on utilise un spectromètre de masse basé sur un dipôle magnétique.

Le spectromètre fonctionne sur une application directe des équations de Laplace. On sait que toute particule chargée circulant dans un champ magnétique ( $\vec{B}$ ) est soumise à une force orthogonale ( $\vec{F}$ ) à la fois au champ magnétique et à sa vitesse ( $\vec{v}$ ).

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

Dans notre cas, les ions du faisceau soumis à cette force de Laplace, décrivent une trajectoire en arc de cercle. On montre facilement que les éléments peuvent être triés (figure 48) en faisant varier l'induction magnétique selon la formule:

$$B\rho = \sqrt{\frac{2mU_{source}}{q}},$$

avec  $m$ ,  $q$ , masse et charge des ions,  
 $\rho$ , le rayon de courbure magnétique  
 $U_{source}$ , la tension d'extraction des ions

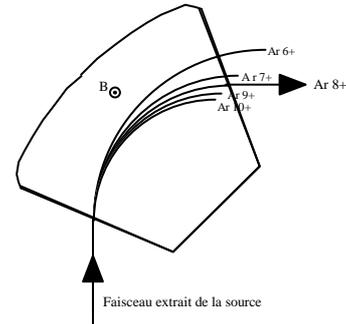


Figure 48: Sélection des ions dans le dipôle

Le tableau ci-dessous, extrait du tableau 2, rappelle quelques caractéristiques du dipôle du banc de tests.

- Rayon de courbure magnétique	$\rho$	m	0.50
- Angle de déviation	$\theta$	degré	90
- Induction maximale utile	$B_{max}$	Tesla	0.64
- Induction minimale utile	$B_{min}$	Tesla	0.05

Pour donner un ordre de grandeur, ce dipôle permettra de défléchir un ion de masse 240, de charge 1+, pour une tension d'extraction de 20kV, soit une rigidité magnétique de 0.315 T.m.

### III.1.3. Transport faisceau

Un calcul théorique du transport du faisceau, de l'extraction jusqu'à la coupelle de Faraday, a été réalisé. Pour simplifier, la charge d'espace n'a pas été prise en compte. La lentille Einzel a été simulée par un solénoïde d'effet similaire. L'émittance de la source a été fixée à  $140 \pi$  mm x mrad, ce qui est un cas maximisant. Le résultat du calcul permet de tracer les enveloppes du faisceau dans le plan horizontal et le plan vertical, c'est à dire l'évolution de son encombrement spatial. On note, sur la figure 49, que la taille maximale du faisceau le long du trajet autorise une transmission globale du faisceau de 100%.

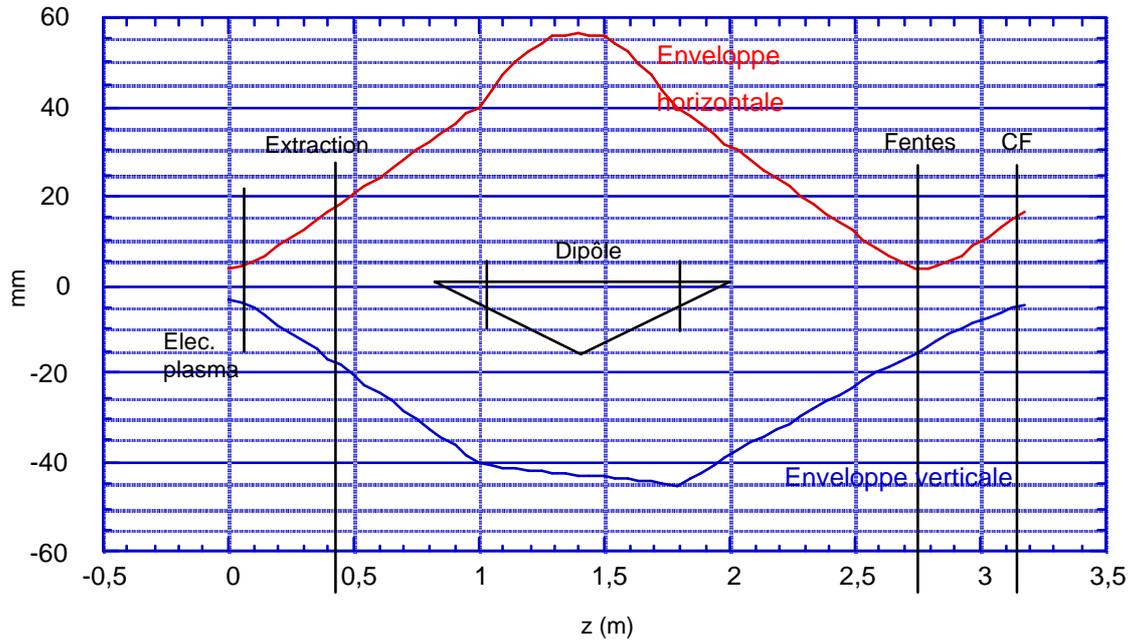


Figure 49: Enveloppes faisceau

### III.1.4. Les spectres

#### a. Généralités

D'après la formule de la rigidité magnétique du spectromètre de masse (§ III.1.2), on voit qu'en faisant varier l'induction magnétique, on balaye l'ensemble des rapports masse sur charge ( $m/q$ ) des ions contenus dans le faisceau extrait.

Pratiquement, on trace la courbe du courant de l'alimentation du dipôle en fonction du courant lu sur la coupelle de Faraday. C'est ce que l'on appelle le spectre d'analyse. Cette courbe est d'une utilité cruciale pour statuer sur le fonctionnement de la source d'ions.

On y distingue un ensemble de pics correspondant à l'intensité du courant pour un  $B\rho$  donné. Cependant, un même  $B\rho$  peut correspondre à deux ions différents. L'identification de chacun des pics peut être de ce fait ambiguë: par exemple, il n'est pas possible de séparer l' $^{40}\text{Ar}^{5+}$  de l' $^{16}\text{O}^{2+}$  car le rapport  $m/q$  (8) est identique. Le pic observé dans le spectre résulte donc de la somme des courants des deux ions.

Nous présentons ci-dessous un spectre de la source Nanogan III correspondant à un fonctionnement où de l'argon a été injecté.

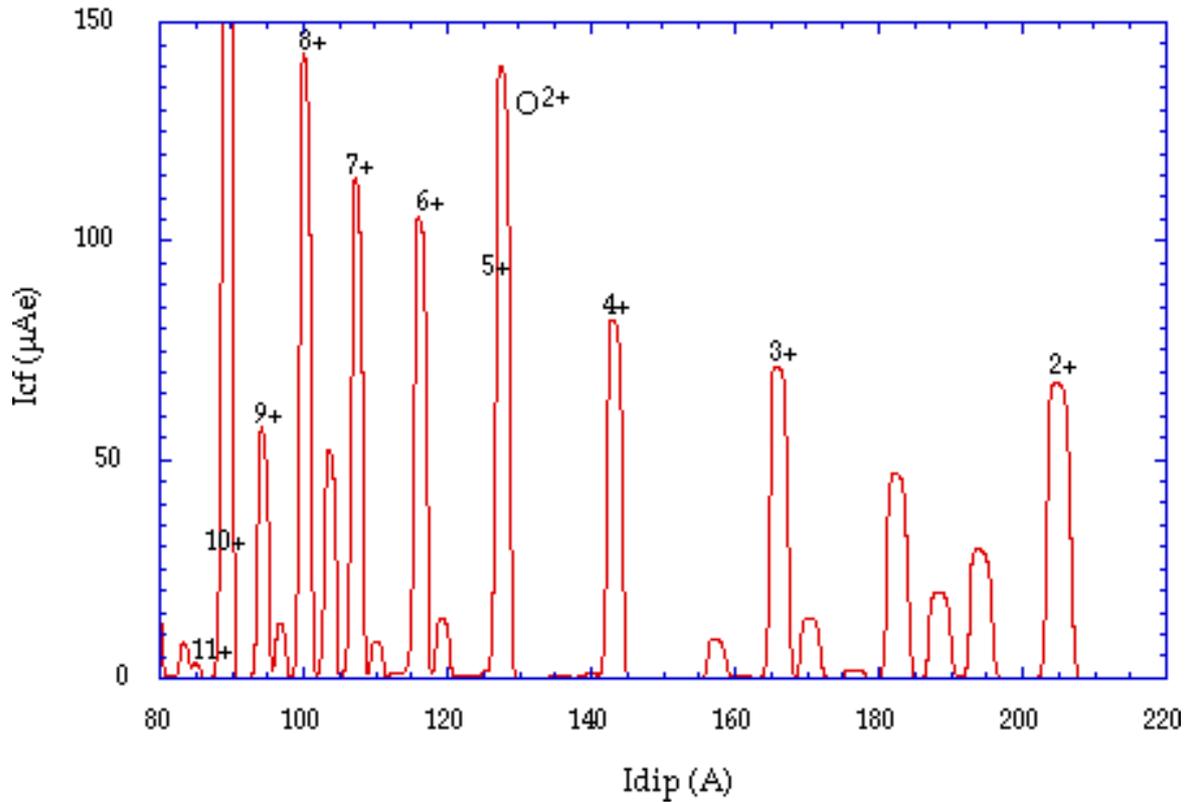


Figure 50: Spectre caractéristique d'Argon (source Nanogan III)

Les spectres sont exploités notamment pour:

➔ mesurer l'efficacité de transport  $\epsilon_t$  (ou transmission). Il s'agit du rapport de la somme des courants ioniques  $I_i$  d'un spectre complet par le courant total du faisceau fourni par la source

$I_{\text{source}}$  :

$$\epsilon_t = \frac{\sum_i I_i}{I_{\text{source}}}$$

➔ connaître les différents atomes présents à l'intérieur de la source et leur abondance, et par exemple diagnostiquer une fuite sur l'enceinte ECS.

➔ mesurer l'état de charge moyen  $\langle z \rangle$  de la source qui est un paramètre caractéristique du fonctionnement de la source. Il se calcule de la façon suivante:

$$\langle z \rangle = \frac{\sum_i (z_i \cdot I_i)}{\sum_i I_i}$$

avec  $z_i$ , état de charge de l'espèce  $i$

$I_i$ , courant de l'espèce  $i$  (la somme se fait sur tous les états de charge présents pour la même espèce)

➔ mesurer l'efficacité totale d'ionisation  $\epsilon_i$  d'une espèce et celle d'un état de charge donné. Ce paramètre est essentiel pour SPIRAL, car plus l'efficacité d'ionisation sera importante et plus faible sera la perte d'atomes radioactifs produits.

$$\epsilon_i = \frac{1}{\epsilon_t} \times \frac{\sum_q \frac{I^{q+}}{q}}{\phi_{\text{fuite calibrée}}}$$

avec  $\phi_{\text{fuite calibrée}}$ , flux de particules injectées en Ampère-particule

$\epsilon_t$ , l'efficacité de transport

#### b. Qualification de la source

Une procédure de tests a été mise au point pour aboutir à un procès verbal de validation de l'ECS testé. Ce document est rappelé dans le chapitre Documentation. Un des items est relatif à la qualification de la source d'ions.

Dans un premier temps, on vérifiera, après « nettoyage » de la source, la distribution des états de charge des ions argon<sup>16</sup>. Le tableau 9 donne les valeurs d'états de charge moyens qualifiants pour la source NANOGAN III.

	$\langle z \rangle$
<b>Ar</b>	<b>5,5</b>
Ne	3,7

Tableau 9:  $\langle z \rangle$  argon et néon; source Nanogan III

Si les premiers résultats sont probants, il est possible de réaliser la mesure d'efficacité d'ionisation. Il sera alors nécessaire d'optimiser le fonctionnement de la source en jouant par exemple sur la quantité de gaz support injecté (Hélium), la tension de polarisation du tube de transfert ou l'accord Hyper-Fréquence.

L'efficacité de transport sera également optimisée (réglage du gap inter-électrodes) et si elle n'atteint pas 100%, le calcul d'efficacité d'ionisation devra en tenir compte.

Pour Spiral, les critères de validation sont alors:

- ➔ en argon -  $\epsilon_i > 80\%$ 
  - abondance de l'état de charge  $\text{Ar}^{8+} \geq 10\%$  (en particules).
- ➔ en néon -  $\epsilon_i > 80\%$ 
  - abondance de l'état de charge  $\text{Ne}^{5+} \geq 10\%$  (en particules).

Dès lors que cette étape est franchie, les mêmes tests sont à réaliser après dégazage de la cible et à haute température (2000°C). Les critères de validation sont les mêmes; ce sont les réglages (gaz support notamment) qui seront différents.

L'ensemble des tests concernant la source d'ions en elle-même ne peuvent être réalisés que par du personnel qualifié. L'interprétation des spectres est toujours délicate et permet de diagnostiquer des problèmes multiples, par exemple, la dégradation d'un joint à vide (présence de fluor) ou une fuite d'eau sur les circuits de réfrigération débouchant côté vide.

<sup>16</sup> La cible en graphite développée pour les premiers faisceaux radioactifs de SPIRAL est dédiée à certains gaz rares.

### III.2. Résultats du premier ECS testé

L'ECS testé est l'ECS N°1 de SPIRAL, seul ensemble complet disponible lors du démarrage du banc de tests. La cible en graphite qu'il contient n'est cependant pas la cible définitive. En effet, cet ECS a également servi lors de tests de connexion/déconnexion dans la casemate de SPIRAL<sup>17</sup>. Une cible en graphite, ayant au préalable été chauffée pendant une vingtaine de jours à 2000°C, a été montée pour voir si elle résistait toujours après chauffage aux différentes manutentions lors de ces tests.

#### III.2.1. Connexions

L'alignement des connecteurs (plateau source et banc) assure parfaitement les continuités électriques ainsi que l'étanchéité des circuits de refroidissement et d'air comprimé.

En ce qui concerne les connexions aux enceintes à vide, les alignements sont également corrects mais une modification est nécessaire sur le système d'adaptation du banc côté haute énergie. En effet, la plaque support de la bride, plaquée par des ressorts sur la vanne haute énergie de l'ECS, est trop souple, ce qui entraîne un mauvais plaquage des deux brides (figure 51)

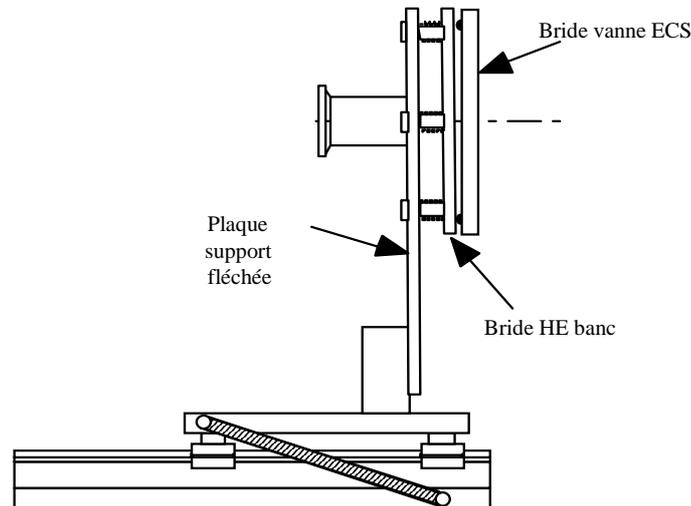


Figure 51: Défaut d'adaptation de la bride côté haute énergie

---

Une fois l'ECS mis sous vide c'est cependant le vide lui même qui plaque correctement les deux brides.

Un test d'étanchéité de l'ensemble à été réalisé à l'aide d'un détecteur de fuite à hélium et aucune fuite n'a été détectée.

### III.2.2. Fonctionnement de la source

Les premiers démarrages de la source ont été l'occasion de faire fonctionner le banc en grandeur nature pour la première fois.

Aucun défaut préjudiciable n'a été révélé mis à par quelques erreurs de câblages décelées dans la baies de l'alimentation en courant pour le chauffage de la cible. Le Groupe Charges et Alimentations a pu rapidement pallier ces problèmes.

Lors de ces tests, l'émetteur hyper-fréquence n'était pas piloté par le programme de commande et contrôle mais en local. En effet, une intervention du Groupe Hyper-Fréquences doit avoir lieu sur l'émetteur afin de permettre définitivement son pilotage par l'automate comme prévu au paragraphe II.2.4.

Après quelques heures de fonctionnement, la haute tension a pu atteindre sa valeur nominale. La formation électrostatique des électrodes à ainsi été obtenue jusqu'à 34 kV.

La valeur du courant de faisceau lu dans la coupelle de Faraday est légèrement faussée (+10%) du fait de l'insuffisance de la tension de polarisation de l'anneau de garde. L'alimentation, qui sera remplacée ultérieurement, ne peut fournir qu'une tension de 60 V alors qu'il en faudrait environ 300.

Conformément à la procédure en vigueur (Cf. chapitre IV) c'est tout d'abord le fonctionnement de la source en argon qui a été testé.

---

<sup>17</sup> Ce sont des tests de validation des ensembles mécaniques de transport et de levage automatiques pour la mise en place de l'ECS dans la casemate.

Après plusieurs heures de réglage<sup>18</sup>, nous avons constaté que le nombre d'ions  $H^+$ ,  $H_2^+$  et oxygène ne décroissait pas (Spectre sur la figure 52). La quantité de gaz présente dans la chambre à plasma est bien supérieure à la quantité optimale que la source peut ioniser.

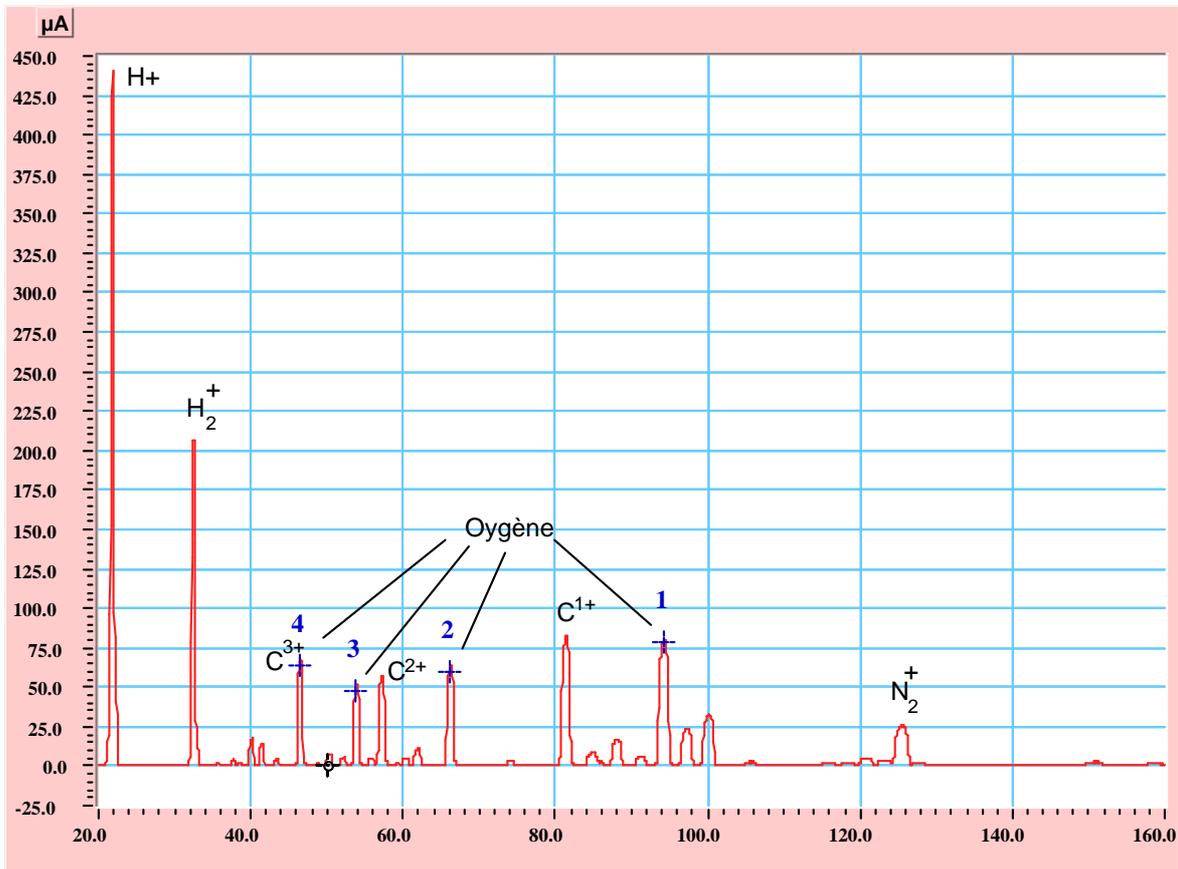


Figure 52: Spectre source de l'ECS N°1 après plusieurs heures de réglage

Il est clair que la source ne peut fonctionner correctement dans ces conditions. Pourtant, la détection de fuite n'a pas permis de localiser une quelconque fuite. Nous émettons alors deux hypothèses:

- la double paroi refroidie à l'eau de la chambre à plasma n'est pas étanche. Une microfuite entraînerait côté vide un « micro » glaçon qui s'évapore en permanence apportant un flux de gaz continu.

<sup>18</sup> Les paramètres sont consignés sur le PV de sortie de tests § III.2.4. La transmission du faisceau dans la ligne est supérieure à 80%.

- le joint d'étanchéité en bout de chambre de refroidissement non accessible lors de la détection à l'hélium fuit (Figure 53).

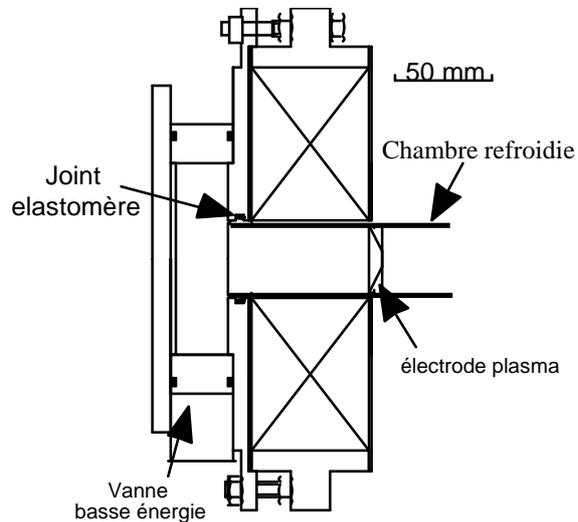


Figure 53: Situation du joint d'étanchéité en bout de chambre à plasma

Les tests de l'ECS ont été arrêtés à ce point car il est nécessaire de démonter la chambre de la source d'ions pour vérifier ces hypothèses. Nous envisageons également de tester cette source à nouveau avec une nouvelle chambre.

Cependant, en exploitant le même spectre que celui présenté ci-dessus, il est possible de vérifier la distribution des états de charge des ions argon. En effet, s'il était impossible d'injecter de l'argon par la vanne de dosage, ni même de l'hélium par la vanne de gaz secondaire (du fait des ions hydrogène et oxygène), un flux d'argon continu provenant de la fuite calibrée était injecté. La figure 54 présente un agrandissement du spectre précédent.

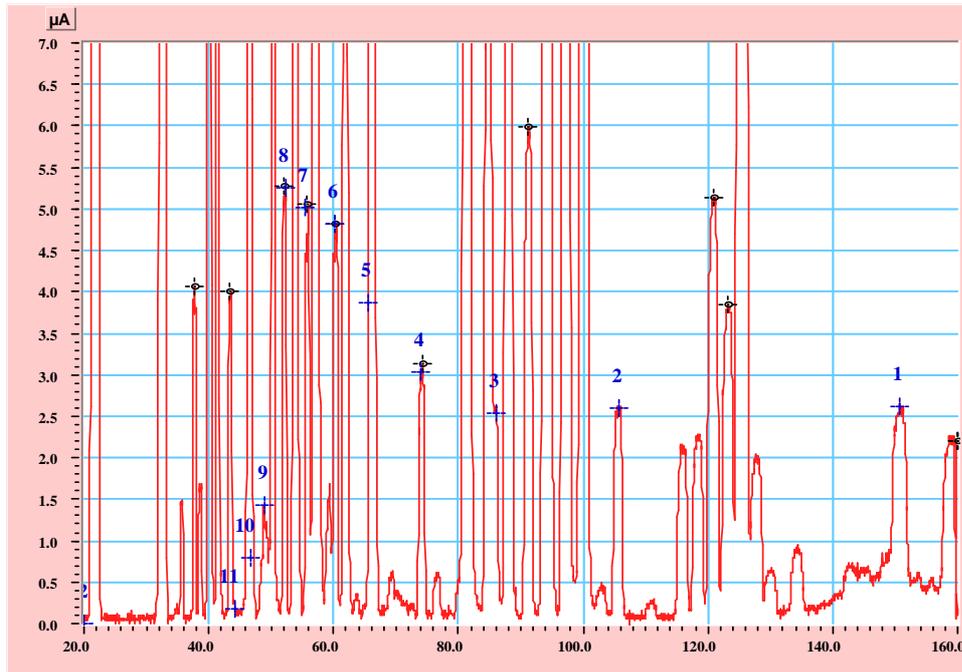


Figure 54: Pics d'argon issus de la fuite calibrée

Compte tenu de la densité de plasma présente dans la chambre, la distribution des états de charges des ions argon est satisfaisante. Le tableau suivant résume les mesures effectuées à partir de ce spectre.

Q	$\mu\text{Ae}$	%	$\mu\text{Ap}$	%	$\epsilon_{I+T}$	$\epsilon_I$
0	0.000	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0
1	2.618	8.1	2.618	30.0	31.7	34.4
2	2.594	8.1	1.297	14.9	15.7	17.0
3	2.538	7.9	0.846	9.7	10.3	11.1
4	3.034	9.4	0.758	8.7	9.2	10.0
5	3.867	12.0	0.773	8.9	9.4	10.2
6	4.819	15.0	0.803	9.2	9.7	10.5
7	5.017	15.6	0.717	8.2	8.7	9.4
8	5.255	16.3	0.657	7.5	8.0	8.6
9	1.434	4.5	0.159	1.8	1.9	2.1
10	0.793	2.5	0.079	0.9	1.0	1.0
11	0.183	0.6	0.017	0.2	0.2	0.2
12	0.000	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0
<input type="checkbox"/>	<b>32.15</b>	<b>100</b>	<b>8.72</b>	<b>100</b>	<b>105.8</b>	<b>114.6</b>

Q: état de charge de l'ion

$\mu\text{Ae}$ : micro-ampère électrique

%: pourcentage sur la somme des états de charge

$\mu\text{Ap}$ : micro-ampère particule

$\epsilon_{I+T}$ : efficacité de transmission et d'ionisation

$\epsilon_I$ : efficacité d'ionisation

Tableau 10: Mesure de l'efficacité d'ionisation

---

Comme nous l'avons vu précédemment la fuite calibrée délivre un flux de  $7,5 \mu\text{Ap}$ . Dans le spectre la somme est de  $8,72\mu\text{Ap}$ . Ce décalage vient de la surestimation de la mesure de l'intensité du faisceau et de l'apport éventuel d'argon par la fuite non détectée<sup>19</sup>.

Dans tous les cas on peut dire que l'efficacité d'ionisation totale avoisine les 100% ce qui laisse préjuger d'un confinement magnétique correct.

### III.2.3. Dégazage de la cible

La cible de l'ECS, non définitive, n'était pas à tester et il n'y avait pas lieu non plus de la faire dégazer.

Cependant, afin de tester l'alimentation de courant et le programme de commandes et contrôle de cette alimentation, nous avons testé le chauffage jusqu'à une puissance de 300 W.

Ces tests ont permis de montrer, notamment lorsque la haute-tension est présente sur l'ECS, que quelques claquages électrostatiques apparaissent sur l'ensemble de la baie contenant l'alimentation en courant.

Il est nécessaire maintenant de pallier ces problèmes pour protéger le matériel et notamment l'interface de commande de cette alimentation.

---

<sup>19</sup> Il y a 0,93% d'argon dans l'air.

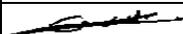
## III.2.4. PV de sortie de tests

<b>SPIRAL</b>	<b>PROCES VERBAL DE SORTIE DE TESTS</b>	Selon SPI/ECS/PP 004
Groupe Sources		ECS N°1
		PV N°1

TESTS (Cible froide)	VALIDATION		DEROGATION		OBSERVATION
	OUI	NON	OUI	NON	
Manutention (Préhenseur, pions de positionnement)	■				
Air comprimé	■				
Réfrigération	■				
Vide	■				
Tenue Haute-Tension (34 kV)	■				
Distribution états de charge Argon ( $^{8+}\text{Ar} > 10\%$ )		■			Optimisation impossible due à la présence d'une grande quantité de H et O
$\epsilon_{\text{ionis}}$ Argon > 80 %	■				
Distribution états de charge Néon ( $^{5+}\text{Ne} > 10\%$ )					non testé
$\epsilon_{\text{ionis}}$ Néon > 80 %					non testé

TESTS (Cible chaude)	VALIDATION		DEROGATION		OBSERVATION
	OUI	NON	OUI	NON	
Chauffage cible (source éteinte) choc thermique P= 2500 Watts pendant 1 minute					non testé
Dégazage cible: P= 2000 Watts pendant 120 heures					non testé
Distribution états de charge Argon ( $^{8+}\text{Ar} > 10\%$ )					non testé
$\epsilon_{\text{ionis}}$ Argon > 80 %					non testé

Paramètres optimum			
Cible froide		Cible chaude	
U HT	.....20 kV	U HT	.....kV
I HT	.....2,5 mA	I HT	.....mA
U polar	.....300 V	U polar	.....V
Gap inter-électrodes	.....28 mm	Gap inter-électrodes	.....mm
U Einzel	.....17,5 kV	U Einzel	.....kV
V gaz 1	.....10 V	V gaz 1	.....V
V gaz 2	.....10 V	V gaz 2	.....V
P HF incidente	.....50 W	P HF incidente	.....W
Réglage piston HF	.....+1 mm	Réglage piston HF	idem cible froide
U chauffage cible	sans objet	U chauffage cible	.....V
I chauffage cible	sans objet	I chauffage cible	.....A
R cible	sans objet	R cible	..... $\Omega$

Tests effectués par		Date	ECS N° validé	
Nom	Gaubert	19/07/00	OUI	NON
Visa			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

## *Chapitre IV: Documentation*

Plusieurs documents ont été rédigés pour faciliter l'utilisation du banc, la réalisation des tests qui permettent de valider les ECS, ou simplement de retrouver les différentes documentations constructeur des équipements.

### IV.1. Guide de l'utilisateur

Le document, rédigé dans le cadre du système d'Assurance Qualité<sup>20</sup> du secteur SPIRAL, présente les étapes nécessaires à la mise en route des équipements du banc (manutention, réfrigération, alimentations, vide) avant d'effectuer à proprement parler les tests de l'ECS. Son sommaire est présenté ci-dessous.

1. SCHEMA DES INSTALLATIONS	3
<b>1.1 LOCAUX ET EQUIPEMENTS</b>	<b>3</b>
<b>1.2 PANNEAU GENERAL D'EAU</b>	<b>3</b>
<b>1.3 PANNEAU DE DISTRIBUTION DES GAZ</b>	<b>4</b>
2. DEMARRAGE: PREPARATION AUX TESTS	5
<b>2.1 MANUTENTION - CONNEXION DE L'ECS</b>	<b>5</b>
<b>2.2 AIR COMPRIME</b>	<b>5</b>
<b>2.3 REFRIGERATION</b>	<b>5</b>
2.3.1 <i>Chambre à plasma</i>	5
2.3.2 <i>Réfrigération de la cible</i>	6
2.3.3 <i>Réfrigération du dipôle</i>	6
2.3.4 <i>Réfrigération de l'émetteur H.F.</i>	6
<b>2.4 ALIMENTATIONS ELECTRIQUES</b>	<b>7</b>
<b>2.5 SYSTEME DE VIDE</b>	<b>7</b>
2.5.1 <i>Généralités</i>	7
2.5.2 <i>Description des équipements de vide</i>	8
2.5.3 <i>Procédure automatique</i>	9
<b>2.6 DISTRIBUTION DES GAZ</b>	<b>10</b>

---

<sup>20</sup> Référence SPI/ECS/MO 009

---

<b>2.7 REGLAGE DES VANNES GAZ ET DE LA FUITE CALIBREE</b>	<b>10</b>
2.7.1 <i>Vannes de gaz</i>	10
2.7.2 <i>Fuite calibrée</i>	11
<b>2.8 SECURITES H.T.</b>	<b>12</b>
<b>2.9 COMMANDE/CONTROLE</b>	<b>12</b>
3. ARRET DE L'INSTALLATION	12
<b>3.1 COMMANDE/CONTROLE</b>	<b>12</b>
3.1.1 <i>Arrêt des équipements</i>	12
3.1.2 <i>Vide: isolation de l'ECS</i>	13
<b>3.2 ACCES LOCAL BANC DE TEST</b>	<b>13</b>
<b>3.3 AIR COMPRIME</b>	<b>13</b>
<b>3.4 REFRIGERATION</b>	<b>13</b>
3.4.1 <i>Purge circuit cible</i>	13
3.4.2 <i>Purge circuit chambre à plasma</i>	13
<b>3.5 MANUTENTION - DECONNEXION DE L'ECS</b>	<b>14</b>

Dès lors que le banc est mis en service, les tests des ECS peuvent débuter. Ils sont décrits dans une procédure particulière qui fait l'objet du paragraphe suivant.

#### IV.2. Procédure de tests

La procédure de tests<sup>21</sup> des ECS de SPIRAL est un document qui présente les différents tests à effectuer sur un ECS neuf, nécessaires à sa validation avant son utilisation dans la casemate de SPIRAL. Comme pour le guide de l'utilisateur du banc, son sommaire est détaillé ci-après.

---

<sup>21</sup> SPI/ECS/PP 004

## Sommaire de la procédure de tests

1. OBJET.....	3
2. ABREVIATIONS.....	3
3. DOMAINE D'APPLICATION.....	3
4. REFERENCES.....	3
5. GESTION DE LA PROCEDURE.....	3
6. PREPARATION.....	4
7. TESTS SOURCE D'IONS.....	4
<b>7.1 TENUE A LA HAUTE TENSION.....</b>	<b>4</b>
<b>7.2 DEMARRAGE DE LA SOURCE.....</b>	<b>4</b>
<b>7.3 EFFICACITE D'IONISATION DE L'ARGON.....</b>	<b>5</b>
<b>7.4 DISTRIBUTION DES ETATS DE CHARGE ET EFFICACITE D'IONISATION DU NEON.....</b>	<b>6</b>
8. TESTS CIBLE.....	7
<b>8.1 CHOC THERMIQUE CIBLE.....</b>	<b>7</b>
<b>8.2 DEGAZAGE.....</b>	<b>7</b>
9. TESTS CIBLE-SOURCE.....	7
10. PARAMETRES.....	7
11. ANNEXE.....	9

Au fur et à mesure que les tests sont effectués, on renseigne un Procès Verbal de tests (Cf. plus haut §III.2.4). Ce P.V. est joint au « Cahier signalétique de l'ECS », véritable carte d'identité de l'ensemble qui permet de suivre toutes les étapes de la vie de l'ECS. Cet historique est réalisé afin de pouvoir gérer le retraitement de l'ECS irradié.

### IV.3. Gestion de configuration

Les documents techniques relatifs aux équipements du banc sont classés et regroupés dans le local de commande/contrôle. Cela va du dossier de plans au dossier de câblage en passant par les documentations techniques des capteurs ou alimentations. La liste, présentée ci-dessous, permet de retrouver facilement la note technique recherchée.

<b>Registre</b>	<b>Titre</b>
Aide	Guide utilisateur du banc de tests Procédure de tests des ECS
Câblage	Carnet de câbles (Classeur contenant la liste des câbles, les fiches de câble et les différents schémas de principe ou câblage des équipements spécifiques)
Alimentations	Alimentation chauffage cible Powerten 30V-330A Alimentation vanne de gaz (version batterie) Transformateur d'isolement
Sécurité	Commutateur de remise à la masse Consignes pour entrer (SPI/BTECS/CP 001)
Mécanique	Dossier de plans (Cf liste page suivante)
Réfrigération	Plan panneau d'eau Description réfrig. chambre plasma Balzers Débitmètre Eletta Vanne de sécurité Danfoss
Cde/Ctrl	Automate Simantec S5 Convertisseur RS232 ->RS485 Convertisseur Fibre Optique Hirschmann
Vide	Schéma d'implantation du vide Fuite calibrée EDWARDS Panneau de distribution des gaz (Schéma) Single Gauge Balzers Maxi Gauge Balzers Jauge Pirani Balzers Jauge Full Range Balzers Détendeur Messer FM62 Vanne de dosage UDV 140 Balzers Vanne d'équerre EVA016S Balzers

	Vanne HV passage rotatif VAT DN160 Vanne HV VAT équerre DN25 Passage tournant Balzers Pompe Mécanique Pfeiffer DUO 2.5A Pompe Mécanique Alcatel 30M3 Pompe Mécanique Alcatel 15M3 Pompe turbomoléculaire VARIAN + Convertisseur
--	---

**Dossier de Plans**

Désignation	Référence	Rep.	Planch e	Format		
				A4	A3	A0
Banc de tests vue d'ensemble	M7/021.90/00				*	
Implantation des équipements					*	
Implantation BT (GO+Goulotte)	M7/021.97/01				*	*
Ensemble Châssis	M7/021.92/00				*	*
Boîte d'Extraction	M7/021.93/00				*	*
Soufflet BE	M7/021.4/12	49			*	
Châssis mobile ECS	M7/021.90/00		2		*	*
ECS ensemble montage des verrins	M7/021.3/00					*
Manoeuvre pour châssis ECS	M7/021.90/00		3		*	*
Ensemble dipôle	M7/021.91/00 à 04				*	*
Haute Energie	M7/021.96/00 à 01				*	*
Faraday	M7/021.95/00				*	*
Fentes	M7/021.94/00				*	*
Connecteur HT Einzel	M7/021.4/22	111,112		*		
Plans de masse	néant				*	
Montage connecteur Guide Onde	néant			*		
Montage goulotte + GO	néant				*	
Implantation des cales sous châssis	néant				*	
Faux plafond grillagé	SNM			*		

## *Conclusion*

Le banc de tests est un équipement essentiel pour assurer la validation des ECS avant leur mise en place dans la casemate de production de SPIRAL.

Sa conception et sa réalisation font intervenir de nombreux domaines techniques:

- Mécanique: les ensembles réalisés s'avèrent tout à fait adaptés aux tests des ECS (alignements, tenue au vide, tenue à la Haute-Tension électrique, transport du faisceau).
- Vide: les résultats des calculs pour le dimensionnement des pompes sont cohérents avec les mesures réalisées. Les domaines de pression obtenus assurent parfaitement le fonctionnement de l'ECS et du banc.
- Haute-Tension: la plateforme Haute-Tension répond au critère de tension de fonctionnement du cahier des charges (c'est à dire tests de l'ECS jusqu'à 34 kV). Cependant la baie de chauffage de la cible placée sur cette plateforme présente quelques défauts de câblages qui empêchent de référencer correctement en tension les équipements qu'elle contient.
- Hyper-Fréquence: l'émetteur hyperfréquences n'a pu être commandé qu'en local pour le démarrage des essais. Une intervention sur son câblage interne est nécessaire pour permettre sa commande et les mesures de puissance à distance sur le programme de commandes et contrôles.
- Automatisation: l'automate assure correctement ses fonctions quant au pilotage du système de vide et des sécurités. Nous avons cependant relevé un problème de dialogue entre l'automate et le programme de commandes et contrôles: le temps de réponse de l'automate sur le réseau JBUS est trop long en comparaison des temps de réponse des interfaces de commande des alimentations (150 ms contre 20 ms). Ceci ralentit considérablement le programme général de commandes et contrôles du fait des nombreuses questions/réponses avec l'automate.
- Informatique et réseau de communication: l'ensemble du réseau de communication fonctionne correctement mis à part le problème cité ci-dessus lié aux temps de réponse de l'automate. La programmation informatique a abouti à un programme de commande/contrôle (une seule face avant d'un instrument virtuel) qui permet de piloter l'ensemble des équipements. La tâche de relecture des spectres enregistrés, développée à part, permet de mesurer les efficacités de transport et d'ionisation.

Une fois les dernières mises au point assurées, l'ECS N°1 a pu être testé.

Le banc a permis de démontrer que cet ensemble n'est pas conforme aux critères de validation pour son exploitation dans la casemate de SPIRAL. En effet, il s'avère que même si la distribution des états de charge fournis par la source est correcte (ce qui prouve que la partie magnétique de la source d'ions est également bonne), un flux non négligeable de gaz (Hydrogène, Oxygène, Azote) alimente constamment le plasma. Dans ces conditions, la source d'ions ne peut fonctionner de façon optimale. La source doit donc maintenant être démontée afin de tester l'état de la chambre à plasma refroidie qui semble être à l'origine du défaut constaté.

Sur le plan technique, certaines améliorations doivent être apportées au banc de tests:

- mise à niveau de l'émetteur Hyper-Fréquence afin qu'il puisse être piloté par le programme de commandes et contrôles
- protection des équipements de la baie de chauffage de la cible contre les claquages
- remplacement de l'alimentation de polarisation de l'anneau de garde de la coupelle de Faraday afin de corriger l'erreur de mesure sur le courant de faisceau
- optimisation du programme de commandes et contrôles pour réduire le temps d'acquisition.

Sur le plan personnel, ce projet, aboutissement de mon cursus au CNAM, m'a permis de mettre à profit ma formation et de mieux cerner la fonction de l'ingénieur au sein de l'entreprise. C'est également un enrichissement très important du fait des nombreuses techniques abordées.

<b>Liste des figures</b>
--------------------------

FIGURE 1: VUE SCHEMATIQUE DES ACCELERATEURS ET DES AIRES EXPERIMENTALES DU GANIL .....	8
FIGURE 2: SCHEMA DE PRINCIPE DU SYSTEME SPIRAL.....	12
FIGURE 3: VUE SCHEMATIQUE DE SPIRAL .....	13
FIGURE 4: CASEMATE DE PRODUCTION.....	14
FIGURE 5: PERTE D'ENERGIE DANS LA MATIERE EN FONCTION DU PARCOURS DES IONS.....	15
FIGURE 6: CIBLE POUR L'ARGON.....	15
FIGURE 7: VUE EN COUPE DE L'ENSEMBLE CIBLE-SOURCE.....	16
FIGURE 8: PLATEAU ECS.....	17
FIGURE 9: VUE D'ENSEMBLE D'UN ECS .....	18
FIGURE 10: SCHEMA DE PRINCIPE DU BANC DE TESTS.....	23
FIGURE 11: PLANS DES ENSEMBLES CHASSIS .....	25
FIGURE 12: DETAIL CHASSIS MOBILE ET CONNECTEUR .....	26
FIGURE 13: BOITE D'EXTRACTION .....	27
FIGURE 14: MOTORISATION DES ELECTRODES .....	28
FIGURE 15: ETALONNAGE DU GAP INTER-ELECTRODES.....	28
FIGURE 16: VUE D'ENSEMBLE DU DIPOLE.....	29
FIGURE 17: FENTES AU POINT IMAGE DU DIPOLE.....	31
FIGURE 18: VUE EN COUPE DE LA COUPELLE DE FARADAY.....	32
FIGURE 19: VUE GENERALE MECANIQUE .....	34
FIGURE 20: PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA PLATE-FORME HAUTE-TENSION.....	35
FIGURE 21: COMMUTATEUR DE REMISE A LA TERRE.....	36
FIGURE 22: IMPLANTATION DES EQUIPEMENTS.....	37
FIGURE 23: FACES AVANT DES BAIES A250.4 ET A250.6.....	39
FIGURE 24: DISPOSITIF D'ETALONNAGE DE L'EMETTEUR HYPER-FREQUENCE.....	41
FIGURE 25: ETALONNAGE DU GENERATEUR HYPER-FREQUENCE .....	42
FIGURE 26: PLANS DE MASSE .....	44
FIGURE 27: PANNEAU GENERAL DE REFRIGERATION.....	45
FIGURE 28: GROUPE DE REFRIGERATION DE LA CHAMBRE A PLASMA .....	47
FIGURE 29: SCHEMA D'IMPLANTATION DU SYSTEME DE VIDE.....	54
FIGURE 30: SYNOPTIQUE DU PROGRAMME DE VIDE DE L'AUTOMATE .....	58
FIGURE 31: PRINCIPE DU COFFRET DE SECURITES GENERAL.....	61
FIGURE 32: CONSIGNE POUR ENTRER DANS LE LOCAL BANC DE TESTS DES ECS.....	62
FIGURE 33: SITUATION DES LOCAUX.....	63
FIGURE 34: RESEAU DE COMMUNICATION .....	64
FIGURE 35: PRINCIPE JBUS.....	65
FIGURE 36: TRAME D'INFORMATION EN JBUS .....	65
FIGURE 37: FACE-AVANT DU PROGRAMME DE SUPERVISION DES SECURITES .....	69
FIGURE 38: FACE-AVANT DU PROGRAMME DE SUPERVISION DU VIDE.....	70
FIGURE 39: FACE AVANT DU PROGRAMME DE COMMANDE ET CONTROLE DE L'ALIMENTATION HAUTE TENSION...	71
FIGURE 40: DIAGRAMME DE COMMANDE ET CONTROLE DE L'ALIMENTATION HAUTE TENSION .....	72
FIGURE 41: CAS OU LECTURE/ECRITURE EGAL 1, SEQUENCE DE LECTURE .....	73
FIGURE 42: CAS OU LECTURE/ECRITURE EGAL 1, SEQUENCE DE CONVERSION DES DONNEES.....	74
FIGURE 43: CAS OU LECTURE ECRITURE EGAL 2 .....	75
FIGURE 44: HIERARCHIE DU PROGRAMME PRINCIPAL DE COMMANDES ET CONTROLES .....	75
FIGURE 45: FACE-AVANT DU PROGRAMME DE COMMANDES ET CONTROLE DE L'ECS ET DU BANC DE TESTS .....	78
FIGURE 46: FACE-AVANT DU PROGRAMME DE RELECTURE DES SPECTRES.....	80
FIGURE 47: SYSTEME D'EXTRACTION ET DE FOCALISATION DU FAISCEAU .....	82
FIGURE 48: SELECTION DES IONS DANS LE DIPOLE .....	83
FIGURE 49: ENVELOPPES FAISCEAU.....	84
FIGURE 50: SPECTRE CARACTERISTIQUE D'ARGON (SOURCE NANOGAN III) .....	85
FIGURE 51: DEFAUT D'ADAPTATION DE LA BRIDE COTE HAUTE ENERGIE.....	88
FIGURE 52: SPECTRE SOURCE DE L'ECS N°1 APRES PLUSIEURS HEURES DE REGLAGE .....	90
FIGURE 53: SITUATION DU JOINT D'ETANCHEITE EN BOUT DE CHAMBRE A PLASMA.....	91

---

FIGURE 54: PICS D'ARGON ISSUS DE LA FUITE CALIBREE .....	92
FIGURE 55: CHAUFFAGE ECR DES ELECTRONS.....	109
FIGURE 56: PANNEAU DE DISTRIBUTION DES GAZ.....	110

<b>Liste des tableaux</b>
---------------------------

TABLEAU 1: ELEMENTS BUDGETAIRES .....	24
TABLEAU 2: CARACTERISTIQUES DU DIPOLE D'ANALYSE .....	30
TABLEAU 3: CARACTERISTIQUES DES ENCEINTES A VIDE .....	49
TABLEAU 4: FLUX DE DEGAZAGES DES MATERIAUX EN $\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ .....	51
TABLEAU 5: FLUX TOTAUX A POMPER .....	53
TABLEAU 6: FLUX CALIBRES DE GAZ .....	56
TABLEAU 7: ADRESSES DES COMMANDES .....	66
TABLEAU 8: CARACTERISTIQUES DES ALIMENTATIONS ELECTRIQUES.....	67
TABLEAU 9: <Z> ARGON ET NEON; SOURCE NANOGAN III.....	87
TABLEAU 10: MESURE DE L'EFFICACITE D'IONISATION .....	92
TABLEAU 11: CARACTERISTIQUES TECHNIQUES NANOGAN III .....	108

# ***ANNEXES***

## Annexe 1

### Domaine d'applications des faisceaux d'ions lourds rapides

Le GANIL dispose aux différentes étapes de l'accélération, de faisceaux d'ions lourds à des énergies variables. Le tableau ci-dessous indique, en fonction de ces énergies, les différentes applications possibles et les secteurs industriels concernés.

Energies	Parcours des ions dans la matière	Effets physiques	Applications possibles	Secteurs industriels
>20 MeV/A GANIL HAUTES ENERGIES	>50 $\mu\text{m}$ jusqu'au mm	- Défauts - Transformations structurales - Percolation	- Membranes spéciales - Surfaces émissives - Greffage polymères - Simulation (environnement spatial, latch up) - Transition isolant-conducteur - Adhésion	Biotechnologies Filtration Agroalimentaire Spatial Médical Nouveaux matériaux
5 - 15 MeV/A Sortie Moyenne Energie	10 - 50 $\mu\text{m}$	- Défauts - Transformations structurales	- Membranes microporeuses - Répliques métalliques - Micro-optique - Centres colorés dans les cristaux ioniques ou covalents - Verres anti-reflet - Simulation de l'endommagement - Greffage - Mélange ionique	Biotechnologies Filtration Métallurgie Médical Bijouterie Verriers, opticiens Nucléaire  Spatial
0,5 - 5 MeV/A Basses Energies	5 - 10 $\mu\text{m}$	- Défauts créés par ralentissement électronique et nucléaire - Pulvérisation électronique	- membranes - Traitement de surface - Greffage  - Matériaux pour la fusion  - Analyses matériaux et biologiques	Biotechnologies   Nucléaire Analyse de surface Pharmacie Biologie
100 KeV - 10 MeV (énergie totale) très basses énergies	< 5 $\mu\text{m}$	- Chocs élastiques prépondérants  - Transformations structurales Cristal -->amorphe	- Greffage superficiel - Traitement de surface et d'extrême surface - Polymère conducteurs  - Micro-électronique - Métallurgie • propriétés mécaniques • alliages spéciaux amorphes - Matériaux nouveaux mélange ionique	Biomatériaux Galvanoplastie  Plasturgie  Electronique Mécanique Métallurgie Prothèses métalliques Biomatériaux

Les bornes en énergie et les parcours des ions sont donnés à titre indicatif - L'énergie totale vaut  $A \times \text{MeV}$ , si A est la masse atomique de l'ion.

## Annexe 2

### La physique avec des faisceaux d'ions secondaires

La physique nucléaire est une science relativement récente si on considère qu'elle a débuté avec la découverte du noyau atomique par Rutherford en 1911 et du neutron en 1932 par Chadwick en Angleterre. Pendant ce temps, les noyaux stables, ont été intensivement étudiés afin de connaître l'interaction entre les différents nucléons. La radioactivité artificielle découverte en 1934 par I. et F. Joliot Curie marque le début de la synthèse et des études des noyaux exotiques. Ces noyaux se transforment en un autre noyau selon une loi exponentielle  $N=N_0e^{-\lambda t}$ . Cette transformation s'accompagne d'un dégagement d'énergie sous forme d'émission de particules légères comme des électrons, positrons, proton ou alpha.... Les théories prédisent que les noyaux radioactifs couvrent plus de 80% de la carte des noyaux. Notons ici les types d'études envisageables.

#### *Physique nucléaire: Découvrir la structure des nucléons des atomes*

Aujourd'hui, notre connaissance des nucléons formants les atomes repose essentiellement sur des données obtenues en étudiant un nombre très limité de noyaux stables ou proches de la stabilité et qui possèdent un nombre quasi équivalent de neutrons et de protons. Pourtant, la terre est seulement une « cendre froide de chaudrons cosmiques », telles les supernovae, au sein desquelles des milliers d'espèces nucléaires se forment. Ces noyaux instables, qui ne peuvent pas être observés sur terre, sont dits exotiques et leur étude requière de les créer en laboratoire.

Le noyau exotique est caractérisé par un déséquilibre entre le nombre de protons et celui de neutrons. On cherche à savoir alors quel est leur rôle respectif, à quelles propriétés les différentes combinaisons peuvent conduire, comment sont distribués les nucléons dans l'espace, ou encore jusqu'à quelle déformation ces objets quantiques peuvent se maintenir. La découverte récente et surprenante de noyaux entourés de matière neutronique (noyaux à halo) poussent les physiciens vers de nouveaux programmes expérimentaux utilisant les nouveaux faisceaux radioactifs produits par SPIRAL.

#### *Matière condensée: les marqueurs*

Lorsqu'un ion radioactif est implanté dans un matériau, les caractéristiques physiques des radiations qu'il émet (particules alpha, électrons, gamma) sont modifiées par l'environnement immédiat: le noyau radioactif devient alors un marqueur local à un niveau atomique. La grande efficacité des méthodes de détection permet de

n'utiliser qu'une très faible quantité d'isotopes radioactifs (de l'ordre de  $10^{10}$  à  $10^{14}$  par  $\text{cm}^3$  à comparer au  $10^{23}$  atomes par  $\text{cm}^3$  de la matière solide étudiée) surtout s'ils sont de courte période. Ces faibles quantités évitent les transformations du matériau par l'introduction des ions radioactifs. Les faisceaux radioactifs rendent donc possible l'étude des surfaces, des interfaces, des grains, des couches fines ainsi que les semi-conducteurs, les matières organiques et biologiques.

*Astrophysique nucléaire: comprendre l'univers*

Il est de nos jours convenu que les réactions nucléaires sont la source d'énergie des étoiles et par la même de leur luminosité. Les étoiles nous envoient encore plus d'informations par d'autres vecteurs que la lumière visible. Ce sont par exemple les rayonnements gamma d'isotopes radioactifs détectés par des satellites. Les compositions isotopiques des météorites sont des indices du déroulement de la nucléosynthèse. L'identification de ce cheminement de la nucléosynthèse requière la connaissance des propriétés des noyaux radioactifs produits dans les étoiles (masse, période radioactive, spectroscopie, etc.). Afin d'acquérir ces connaissances, un dialogue entre astrophysiciens et physiciens nucléaires est mené en parallèle de la réalisation de SPIRAL, ce qui devrait permettre de créer ces noyaux en laboratoire.

### Annexe 3

#### Caractéristiques techniques de la source NANOGAN III [Vi199]

NANOGAN III est une source d'ions de type ECR (Electronic Cyclotron Resonance). La haute fréquence (HF) de travail est de 10 GHz. Le confinement du plasma est assuré par un ensemble de couronnes magnétiques composées d'aimants permanent en FeNdB.

Champ magnétique maximum à l'extraction	0,67 T
Champ magnétique maximum à l'injection	0,86 T
Champ minimum	0,301 T
Ø Chambre plasma	36 mm
Ø Tube coaxial	10 mm
Ø Source	260 mm
Longueur Source	400 mm
Refroidissement	eau
Fréquence HF	10 GHz
Puissance HF	200 W
Ø électrode plasma	7 mm
Ø électrode d'extraction	11 mm
Gap inter électrode	15 - 50 mm
Tension d'extraction	7 à 34 KV

Tableau 11: Caractéristiques techniques NANOGAN III

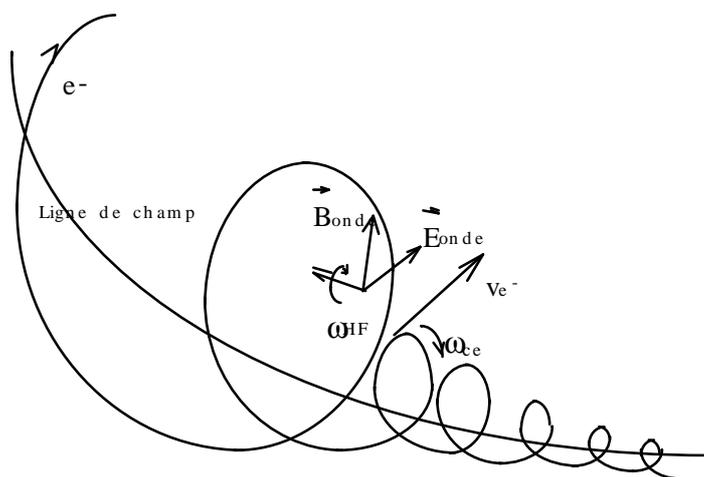
#### Annexe 4 Résonance Electronique Cyclotronique [Sor93]

Les sources ECR (Electronic Cyclotron Resonance) sont des dispositifs délivrant des ions multichargés. Dans la chambre de la source on confine un plasma (mélange de particules chargées et d'électrons) grâce à un champ magnétique. De ce plasma s'échappent des ions qui sont accélérés par une électrode portée à un potentiel électrique négatif. C'est le point de départ du faisceau d'ions.

L'ionisation des atomes ou des ions se produit pas à pas au sein du plasma par les collisions successives avec les électrons. Les électrons du plasma sont "chauffés", c'est à dire qu'ils acquièrent de l'énergie cinétique au cours de leur parcours par un phénomène de résonance de leur fréquence de giration avec une onde électromagnétique injectée dans le plasma. En effet, lorsqu'un électron de charge  $q_e$  et de masse  $m_e$ , se déplace dans un champ magnétique, sa trajectoire est hélicoïdale autour des lignes de champ. Sa fréquence de giration  $\nu_e$  est fonction du champ magnétique B.

$$\nu_e = \frac{q_e B}{2\pi m_e}$$

L'énergie cinétique de l'électron soumis à une onde électromagnétique d'hyperfréquence VHF,



peut être amplifiée si  $\nu_e = \nu_{HF}$  et si la vitesse est parallèle au champ électrique de l'onde: c'est le principe ECR (figure 55). L'électron acquiert l'énergie cinétique nécessaire pour ioniser les atomes qu'il rencontre. La résonance se produit donc dans la zone de champ qui a pour valeur:

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

Figure 55: Chauffage ECR des électrons  
où  $\omega = 2\pi\nu$

## Annexe 5

## Panneau de distribution des gaz

Un panneau de distribution permet d'alimenter chaque vanne de dosage et la fuite calibrée avec les différents gaz que l'on souhaite injecter dans la source d'ions. Il est muni d'une pompe mécanique de prévidage, ainsi que d'une sonde de vide primaire. L'utilisation de ce panneau est décrite dans le «Guide utilisateur du banc de tests ».

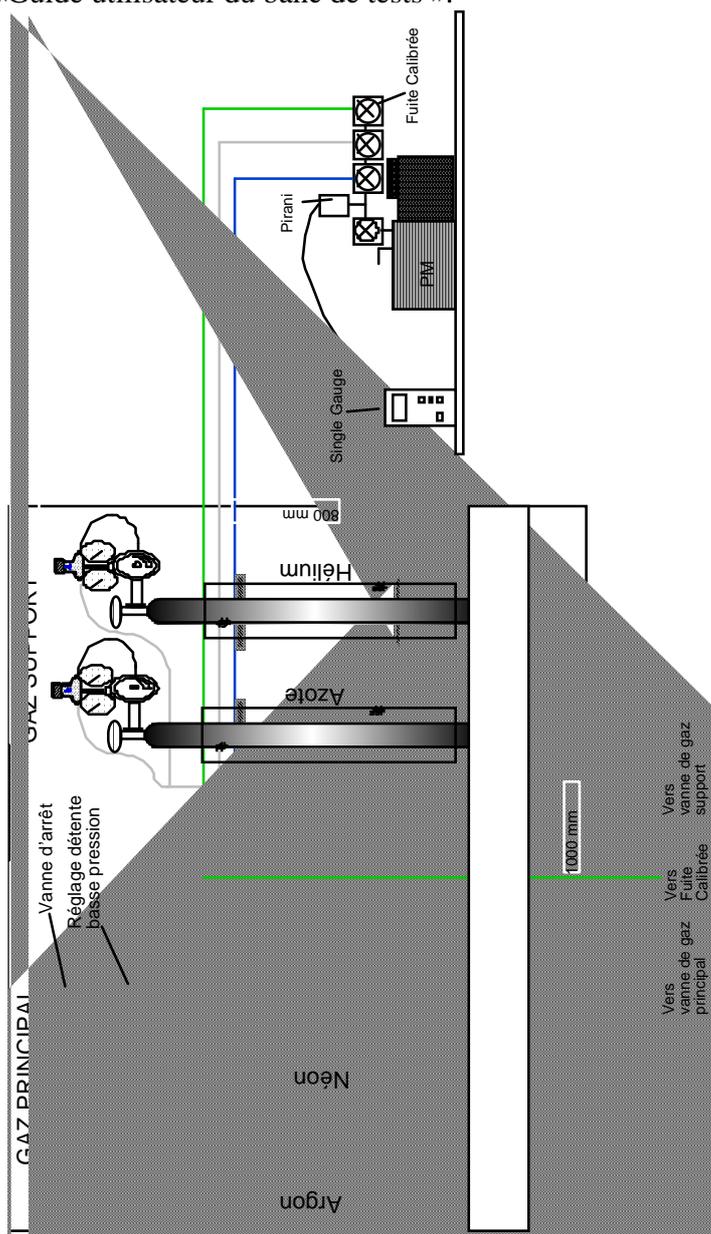


Figure 56: Panneau de distribution des gaz

## Annexe 6

### Procédure de gestion du vide

#### A. Enceinte Ligne d'analyse

##### A.1. Etat initial

VAL fermée (manuelle)

VIFEBES fermée

##### A.2. Mise sous vide (primaire/secondaire)

PMGTL démarrer et si protection thermique pompe primaire OK

VPGTL ouvrir

Si LSPS <  $5.10^{-2}$  mbar, seuil haut  $9.10^{-2}$  mbar

GTL démarrer

##### A.3. Aération

VIFEBES fermer

VPGTL fermer

GTL arrêter

PMGTL arrêter

ATTENDRE 1h00

VAL ouvrir (manuelle)

#### B. Enceinte extraction

##### B.1. Etat initial:

VAE fermée (manuelle)

VIFEBEE et VIFEBES fermées

VIFEHE fermée

VPE fermée

VASAS et VPSAS fermées

##### B.2. Mise sous vide primaire

PM démarrer

VPE ouvrir

Si ESPS <  $5.10^{-2}$  mbar

VPE fermer

PM arrêter (VASAS ouvrir)

##### B.3. Mise sous vide secondaire PMGTE démarrer et si protection thermique pompe primaire OK

VPGTE ouvrir

GTE démarrer

Si vitesse de rotation GTE=42000 tpm et ESP <  $5.10^{-2}$  mbar

VSGTE ouvrir

##### B.4. Sécurités

Si ESPS >  $9.10^{-2}$  mbar, fermer VSGTE

Electrodes reculer

VIFEBEE, VIFEBES fermer

##### B.5. Aération

VSGTE fermer

VIFEBEE fermer

VIFEBES fermer

VAE ouvrir (manuelle)

#### C. Enceintes SAS et ECS

##### C.1. Etat initial

VICSBE, VICSHE fermées

VIFEBEE, VIFEHE fermées

VPSAS, VPSASBE, VPSASHE fermées

VASAS ouverte

##### C.2. Vérification des SAS et de l'ECS (vide primaire)

PM arrêter

VPSASBE, VPSASHE ouvrir

VPSAS ouvrir

VASAS ouvrir

SASBESP, SASHESP >  $10^3$  mbar

VPSAS fermer

VASAS fermer

PM démarrer

VPSAS, VICSBE, VICSHE ouvrir

SASBESP et SASHESP <  $5.10^{-2}$  mbar

VPSAS, VPSASBE, VPSASHE fermer

PM arrêter, VASAS ouvrir

##### C.3. Mise sous vide secondaire de l'ECS

Si ESP <  $5.10^{-2}$  mbar

VIFEBEE et VIFEHE ouvrir

##### C.4. Condition pour VIFEBES ouverte

LSPS <  $5.10^{-5}$  mbar

ESPS <  $5.10^{-5}$  mbar

##### C.5. Retrait de l'ECS sous vide statique (1) ou aérée (2)

(1) Electrodes reculer

VIFEBEE et VIFEHE fermer

VICSBE, VICSHE fermer

VPSASBE, VPSASHE ouvrir

VPSAS ouvrir

ECS déconnecter

(2) Electrodes reculer

VIFEBEE et VIFEHE fermer

VPSASBE, VPSASHE ouvrir

VPSAS ouvrir

VICSBE, VICSHE fermer

ECS déconnecter

---

## Annexe 7

### Conditions de sécurité source

Pour un équipement, si l'ensemble des conditions listées ci-dessous n'est pas réuni, l'automate renvoie un «défaut charge» (contact sec) à son interface de commande qui inhibe sa mise en route.

#### Autorisation marche alimentations H.T.:

(HT source et einzel)

- Demande de vide dans l'ECS activée
- Demande de vide dans l'extraction activée
- $ESPS \leq 5.10^{-3}$  Pa
- Vanne VICSBE ouverte
- Vanne VIFEBEE ouverte
- Vanne VIFEBES ouverte
- Commutateur en position HT
- Contact 1 porte SUD activé
- Contact 2 porte SUD activé
- Contact porte EST activé
- Contact Perche en place
- Contact de consignation des clés dans le coffret
- Vanne du panneau d'eau commandée ouverte
- Sécurités réfrigération chambre plasma activée
- Boîtier d'alimentation 220 Volts des alimentation activé

#### Autorisation émetteur HF:

- idem sauf boîtier alimentation 220 Volts

#### Autorisation alimentation chauffage cible

- Demande de vide dans l'extraction activée
- Vanne VSGTE ouverte
- $ESPS \leq 5.10^{-1}$  Pa
- Vanne VIFEBEE ouverte
- Vanne VIFEBES ouverte
- Vanne du panneau d'eau commandée ouverte
- Sécurités réfrigération chambre plasma activée
- Protection thermique circuit d'eau inactive

#### Autorisation alimentation polarisation tube transfert:

- Contact 1 porte SUD activé
- Contact 2 porte SUD activé
- Contact porte EST activé
- Contact Perche en place
- Contact de consignation des clés dans le coffret

**Album photos**

Photo N° 1: Plan de masse



Photo N° 2: Vue d'ensemble mécanique



Photo N° 3: Vue d'ensemble et Panneau de réfrigération



Photo N° 4: Châssis Haute-Tension



Photo N° 5: Enceinte d'extraction et dipôle électromagnétique

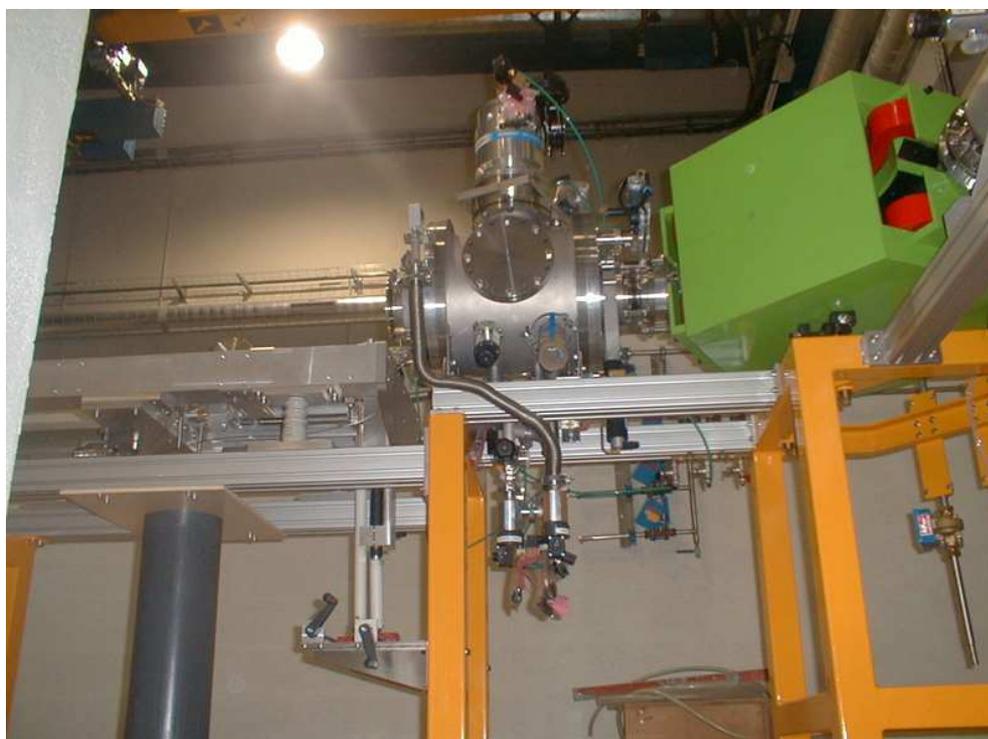


Photo N° 6: Idem, vue de dessous

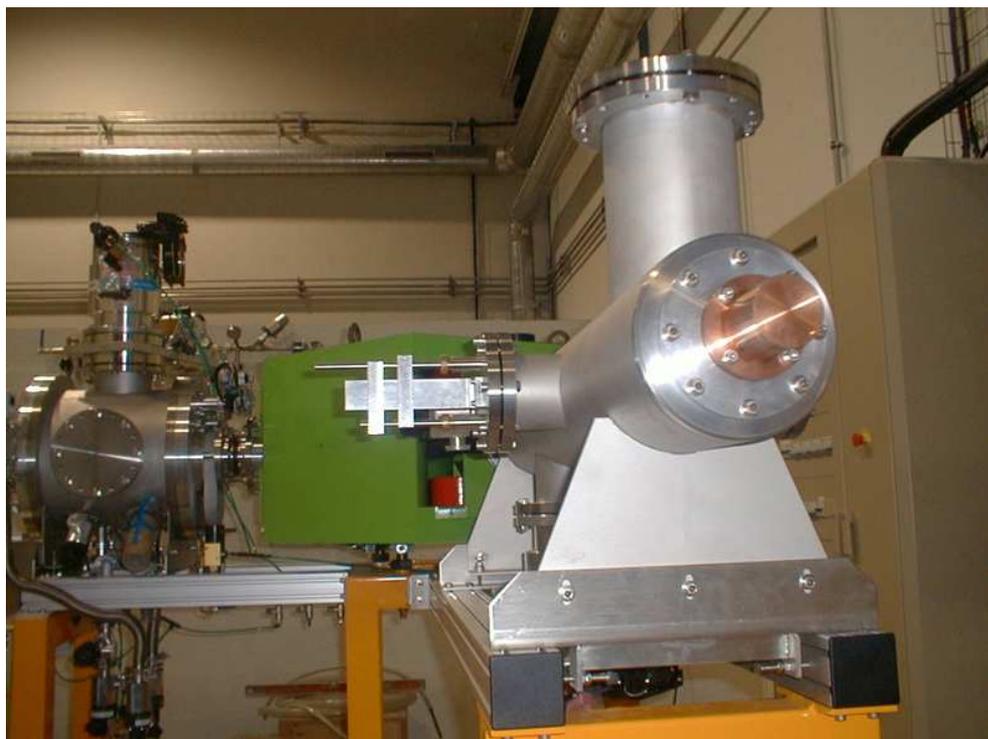


Photo N° 7: Ligne d'analyse: Fentes et coupelle de Faraday



Photo N° 8: Motorisation extraction



Photo N° 9: Châssis mobile: vue de dessous



Photo N° 10: Baie masse



Photo N° 11: Plate-forme Haute-Tension



Photo N° 12: Câblage baie masse



Photo N° 13: Câblage vide



Photo N° 14: Emetteur Hyper-Fréquence



Photo N° 15: Alimentation dipôle



Photo N° 16: Vue d'ensemble et ECS N°1



Photo N° 17: Local commandes et contrôles

**Bibliographie**

- [Bar95] E. Baron and the GANIL staff, Proc.14th International Conference on Cyclotrons and their Applications, IEEE, Cap Town, South Africa, Ed. J.C. Cornell (1995).
- [Bex90] M.BEX et al.,*GANIL, Grand Accélérateur National d'Ions Lourds*, Médiagraphic, CAEN, 1990.
- [Gui98] J. GUILLOT, *Mise en oeuvre de diagnostics spécifiques en vue du réglage du projet Spiral*, Mémoire pour obtenir le diplôme d'ingénieur Physicien de l'Ecole Nationale Supérieure de Physique de Grenoble, Septembre 1998.
- [Lab96] Labview, Manuel de l'utilisateur, National Instrument (1996).
- [Lec97] N. LECESNE, *Etude de la production d'ions radioactifs multichargés en ligne*, Thèse pour obtenir le grade de Docteur en Sciences de l'Université de Caen, octobre 1997.
- [Ler95] R. LEROY et al., *ECRIS Optimisation for on line production*, Proceedings of the 12th International Workshop on ECR Ion Sources, editeurs M. Sekiguchi and T. Nakagawa, Riken, Japan, p. 44, 1995.
- [Lie95] M. Lieuvain and the SPIRAL group, *Status of SPIRAL, The radioactive Beam Project at GANIL*, Proceedings of the 14th International Conference on Cyclotron and Their Applications, IEEE, Cap town, South Africa, edited by J.C. Cornell, p.651 - 658, 1995.
- [Man96] J. MANDIN, *Etude expérimentale et simulation des conditions d'extraction d'un faisceau d'ions multichargés d'une source à résonance cyclotronique électronique*, Thèse pour obtenir le grade de Docteur en Sciences de l'Université de Caen, décembre 1996.
- [Mau98] L. MAUNOURY, *Production de faisceaux d'ions radioactifs multichargés pour SPIRAL : Etudes et réalisation du premier ensemble cible-source*, Thèse pour obtenir le grade de Docteur en Sciences de l'Université de Caen, Novembre 1998.
- [Ric95] A. RICHARDT, A.M. DURAND, *La pratique du vide et des dépôts en couches minces*, Editions IN FINE, Paris, p.143, 1995.
- [Spi94] S.HARAR, D. GUERREAU, *The SPIRAL Radioactive Ion Beam Facility*, GANIL R94 02, Caen, 1994.
- [Sor93] Sortais P., *Sources ECR - Fonctionnement et performances*, document de travail, 1993.
- [Sor94] P. Sortais et al., Proc. 12th Int. Conf. on the Physics of Highly Charged Ions, Vienna (Autriche), 1994.
- [Vil99] A.C.C Villari, pages internet du GANIL, <http://www.ganil.spiral.fr>, Caen, 1999.

## RESUME ET MOTS CLES

Réalisation d'un banc de tests de sources d'ions

Mémoire d'ingénieur C.N.A.M., Caen 2000

---

La physique nucléaire a permis de comprendre de nombreuses propriétés des noyaux stables (masse, forme, structure nucléaire...) et d'élaborer des théories capables de reproduire ces propriétés. Les recherches des vingt dernières années dans ce domaine ont montré que le comportement des noyaux exotiques est souvent différent de ce que l'on peut extrapoler des théories sur les noyaux stables. Les noyaux exotiques représentent plus de 80% de la carte des noyaux. Les physiciens nucléaires ont vite exprimé le besoin d'utiliser des faisceaux d'ions radioactifs pour étudier leurs propriétés. C'est ainsi qu'a été décidée la construction d'un nouvel accélérateur au GANIL capable de fournir des faisceaux exotiques: c'est le projet SPIRAL ou "Système de Production d'Ions Radioactifs Accélérés en Ligne". Un faisceau d'ions stables de haute énergie provenant des accélérateurs du GANIL est stoppé dans une cible de graphite, provoquant des réactions nucléaires. Les atomes radioactifs produits diffusent hors de la cible portée à une température d'environ 2000°C et sont ionisés dans une source ECR (Electronic Cyclotron Resonance). Le faisceau extrait est enfin accéléré dans le cyclotron CIME (Cyclotron à Ions de Moyenne Energie) avant d'être distribué dans les salles expérimentales. De nombreux domaines de recherche fondamentale sont concernés par les expériences avec ces faisceaux radioactifs: Physique nucléaire (matière nucléaire diluée, cohésion des forces nucléaires, noyaux super-lourds, symétrie dans les noyaux, nombres magiques), théorie du modèle standard, astrophysique nucléaire, physique de la matière condensée, médecine...

L'ensemble cible-source (ECS) de SPIRAL est le point crucial du système: il produit des atomes radioactifs, puis les ionise pour former le faisceau d'ions radioactifs.

En fonctionnement, la réaction de production des atomes radioactifs génère un flux de neutrons intenses. Ce flux détériore les caractéristiques magnétiques des aimants permanents de la source d'ions et active également tous les matériaux présents dans la casemate de production.

Ainsi, la durée de vie d'un ECS est estimée à quinze jours et la casemate est un local où les rayonnements seront toujours présents. La mise en place d'un ensemble neuf est entièrement automatisée pour éviter tout travail sous rayonnement. La préparation de l'ECS neuf doit donc être optimale avant sa mise en place dans la casemate. Ceci nécessite la réalisation d'un banc de tests afin d'assurer les connexions, le fonctionnement de l'ECS et le dégazage des cibles.

Mots clés : SPIRAL - Cible - Source d'ions - Banc de tests - Alimentations - Hyper-Fréquence - Vide - Commande et Contrôle

Keywords : SPIRAL - Target - Ion Source - Tests bench - Power supplies - High Frequency - Vacuum - Command and control