

Partie 1

Spiral2, une extension du
GANIL existant

1. Qu'est ce que Spiral2

1.1 Le GANIL avant Spiral2

1.2 Une réponse aux exigences de la physique nucléaire actuelle

1.2.1 Historique

1.2.2 Les performances recherchées

1.2.3 Présentation de l'installation SPIRAL2

1.3 Les projets associés, en bref

1.3.1 Les débuts : PARRNe

1.3.2 La photofission : ALTO

1.3.3 Le futur :EURISOL

1.1 Le GANIL avant Spiral2

Le GANIL (Grand Accélérateur d'Ions Lourds) est un laboratoire national installé en périphérie de Caen en Normandie depuis 1983 [WEBGANIL09]. Il est à la fois géré par la DSM/CEA^a et l'IN2P3/CNRS^b. Ce laboratoire commun, fort de son installation (cf. **Figure 1-3**), permet de répondre aux demandes des physiciens dans le domaine de la recherche fondamentale en physique nucléaire, atomique et biophysique^c. A l'heure actuelle, le GANIL a la capacité de produire des faisceaux de noyaux lourds stables (du Carbone à l'Uranium) à des énergies s'échelonnant entre 24 MeV/nucléon et 95 MeV/nucléon ainsi que des faisceaux de noyaux radioactifs communément appelés faisceaux exotiques.

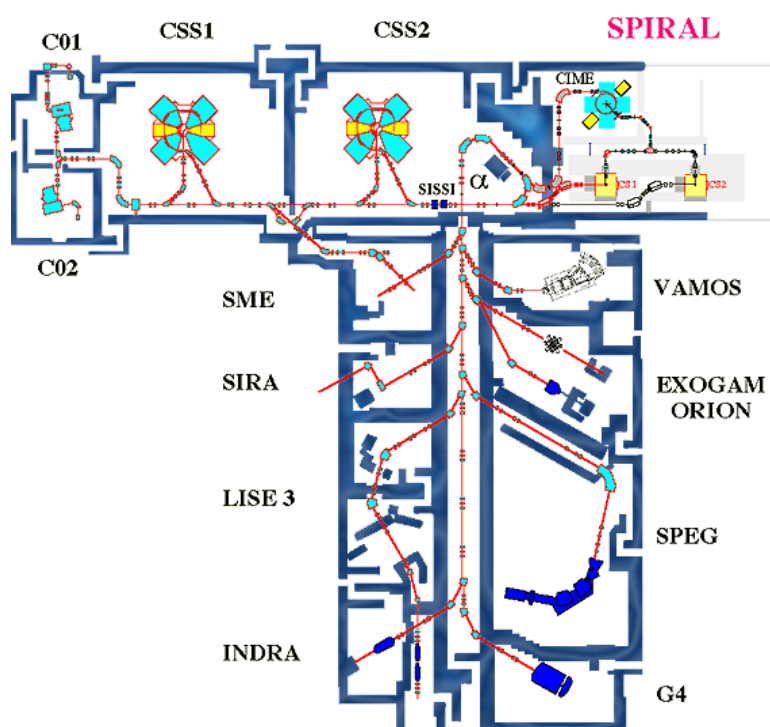


Figure 1-3 : Vue générale de l'installation actuelle au GANIL.
Figure extraite de [WEBGANIL09].

Ces faisceaux sont accélérés, en cascade, par plusieurs cyclotrons (cf. **Figure 1-3**) selon l'énergie recherchée. La première accélération est effectuée par deux cyclotrons compacts (C01 et C02), en aval des sources d'ions. Le faisceau est ensuite envoyé dans le cyclotron CSS1. En sortie, il est possible de diriger le faisceau vers les salles de physique (SME) ou de l'injecter dans le deuxième cyclotron CSS2 après avoir augmenté le rapport

^a La DSM (Direction des Science de la Matière) est le pôle de recherche fondamentale en physique et en chimie du CEA (Commissariat à l'énergie Atomique) <http://www-dsm.cea.fr/fr/La-DSM>

^b L'IN2P3 (Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules) a pour mission de promouvoir, fédérer et coordonner les activités de recherche dans les domaines de la physique nucléaire et des hautes énergies pour le compte du CNRS (Centre National de Recherche Scientifique) <http://www.in2p3.fr/>

^c Une liste exhaustive des activités du GANIL est disponible sur [WEBGANIL09].

charge/masse des particules en arrachant des électrons. Ce dernier distribue le faisceau soit vers les salles de physique via le spectromètre^a α , soit vers SPIRAL^b, zone de production de noyaux exotiques. Cette méthode de production en ligne, type ISOL^c, consiste à créer des noyaux exotiques à partir d'un faisceau primaire, puis à les ré-acceler. Dans le cas de SPIRAL, l'accélération est effectuée grâce au cyclotron CIME^d. Les noyaux exotiques sont obtenus en cassant les noyaux lourds du faisceau primaire sur une cible de carbone (cf. **Figure 1-4**). Les fragments de fission du faisceau primaire sont extraits vers la source ECR^e, qui ionise et fait diffuser les noyaux exotiques vers la post-accelération dans le cyclotron CIME.

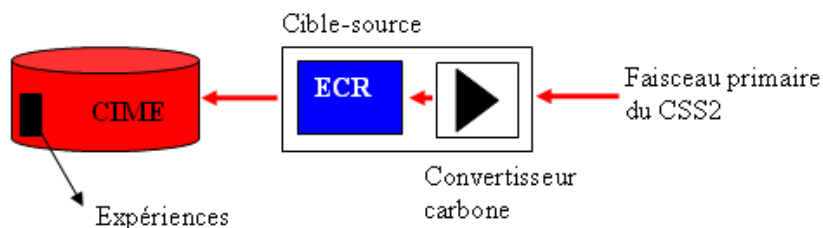


Figure 1-4 : Méthode de production des isotopes radioactifs type ISOL. Figure extraite de [WEBGANIL09].

SPIRAL ne permet que la production d'isotopes des éléments suivants : He, N, O, F, Ne, Ar et Kr. Cette limite provient des sources ECR actuellement installées, ne pouvant diffuser que des éléments légers non métalliques.

^a Spectromètre de masse : effectue une séparation des éléments ayant un rapport charge/masse différent à l'aide d'un champ magnétique.

^b SPIRAL : Système de Production d'Ions Radioactifs en Ligne

^c ISOL : Séparateur d'Isotopes En Ligne

^d CIME : Cyclotron d'Ions à Moyenne Energie

^e ECR : Electron Cyclotron Resonance source

1.2 Une réponse aux exigences de la physique nucléaire actuelle

1.2.1 Historique

Afin de combler la demande grandissante venant des physiciens, il a été décidé, en 1998, de débiter une étude visant à augmenter non seulement la diversité mais aussi la masse des isotopes radioactifs pouvant être produits ainsi que l'intensité du faisceau exotique. Ceci impliquait dans un premier temps une amélioration de la méthode de production des noyaux exotiques. Un faisceau de deutons^a est accéléré par les cyclotrons du GANIL et envoyé dans une cible de carbone. Des neutrons très énergétiques sont créés par spallation et viennent fissionner une cible d'uranium enrichie. Cette solution fut abandonnée pour des raisons de sûreté. En 2000, deux autres alternatives furent envisagées :

- la photofission : fission de l'uranium par des photons produits par rayonnement continu de freinage ou bremsstrahlung^b à partir d'un faisceau d'électron.
- l'accélération d'un faisceau de deutons de 5 mA à 40 MeV (soit 200 kW) par un accélérateur linéaire à haute intensité LINAG^c.

La deuxième solution fut retenue car elle offre l'opportunité d'accélérer différents types de particules en donnant une meilleure ouverture sur de futures améliorations [GANIL06]. Le projet Spiral2 a été présenté au ministère de la recherche en juin 2004 et signé en mai 2005.

1.2.2 Les performances recherchées

A puissance nominale, Spiral2 vise un taux de fission s'élevant à 10^{14} fissions/s, plaçant cette installation en tête des machines en fonctionnement en termes de taux de production. Des noyaux exotiques de masses entre 60 et 140 nucléons pourront être produits à des taux compris entre 10^6 et 10^{11} particules par seconde (cf. **Figure 1-5**). Ces faisceaux d'isotopes radioactifs pourront être accélérés à des énergies de l'ordre de 7 MeV/nucléon et jusqu'à un maximum de 20 MeV/nucléon par le cyclotron CIME. Ainsi, la quête des éléments super-lourds et l'étude d'une grande partie des éléments riches en neutrons, en dehors de la vallée de stabilité sera possible (cf. **Figure 1-6**).

Mais Spiral2 ouvrira d'autres portes. En effet, en plus des deutons, celui-ci permet d'accélérer tout type d'élément ayant un rapport charge/masse égal à un tiers voire un sixième [GANIL06]. Il pourra porter ces éléments à respectivement 14.5 MeV/nucléon et 8.5 MeV/nucléon à des courants voisins de 1mA au maximum.

^a Deuton : noyau composé d'un proton et un neutron

^b Bremsstrahlung : Rayonnement électromagnétique émis lorsque qu'une particule chargée est freinée dans un matériau

^c LINAG : LINear Accelerator at Ganil

Ainsi, Spiral2, véritable installation pluridisciplinaire, trouvera également des applications en science des matériaux (usine à neutrons), en biologie et médecine (création d'isotopes radioactifs pour la thérapie et imagerie médicale) et en astrophysique.

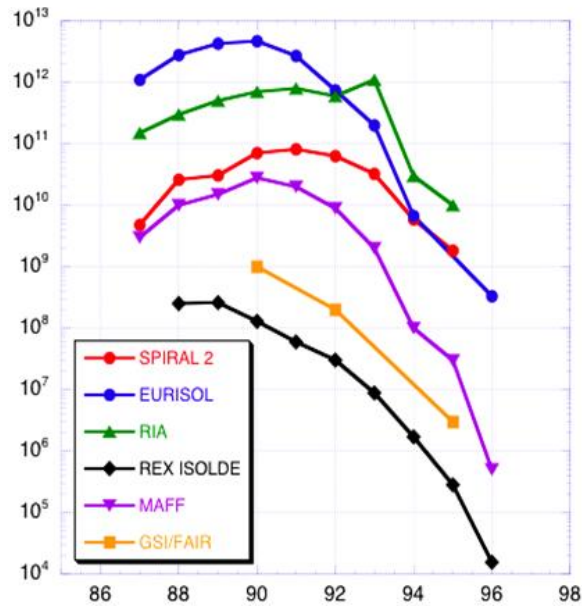


Figure 1-5 : Taux de production (particules par seconde) du Krypton en fonction du nombre de nucléons pour différents projets. Figure extraite de [FERDINAND08]

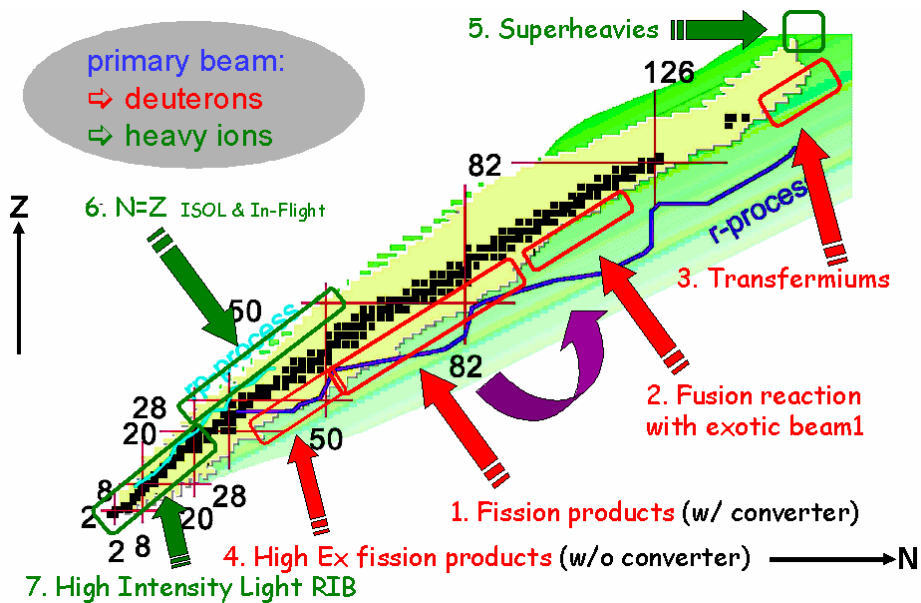


Figure 1-6 : Eléments pouvant être produits par l'installation Spiral2 avec différents procédés (encadrés verts et rouges). Figure extraite de [GANIL06]

1.2.3 Présentation de l'installation

Après un bref aperçu des possibilités offertes par l'installation Spiral2, voyons succinctement les modifications devant être apportées à l'installation existante au GANIL. Cette extension consiste en l'aménagement de deux nouveaux bâtiments (cf. **Figure 1-7a**). Le premier, le bâtiment accélérateur, héberge l'accélérateur linéaire supraconducteur, décrit dans le chapitre suivant, ainsi que les salles de physiques exploitant directement le faisceau d'ions lourds stables (cf. **Figure 1-8**). Le deuxième, appelé bâtiment production, reliant le bâtiment accélérateur à celui du Ganil existant, accueillera toute la partie cible-source (cf. **Figure 1-7b**) pour la production d'isotopes radioactifs, c'est-à-dire un convertisseur carbone, une cible d'uranium enrichie, différentes sources d'ions, un séparateur de masse, et des salles de physique basse énergie.

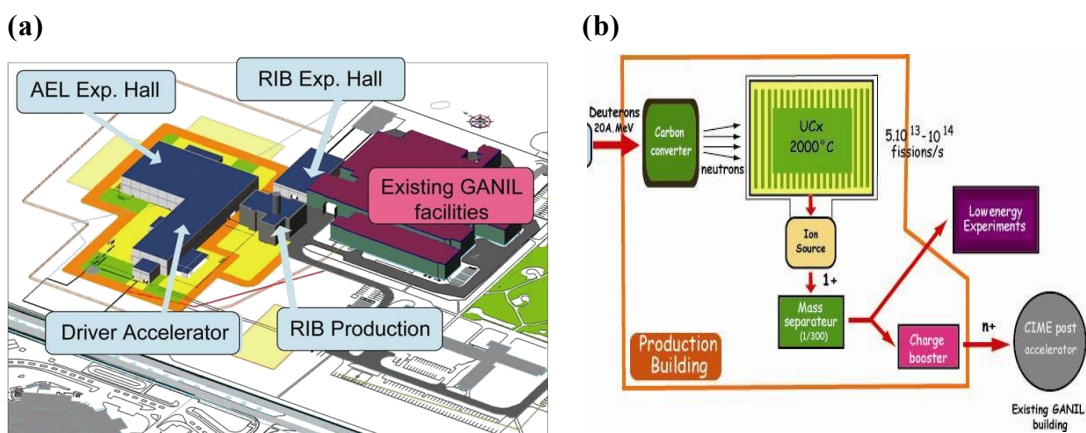


Figure 1-7 : (a) : vue artistique du Ganil existant (violet) et de l'extension SPIRAL2 (bleu). (b) Détail de l'ensemble cible-source installé dans le bâtiment production. Figures extraites de [FERDINAND08]

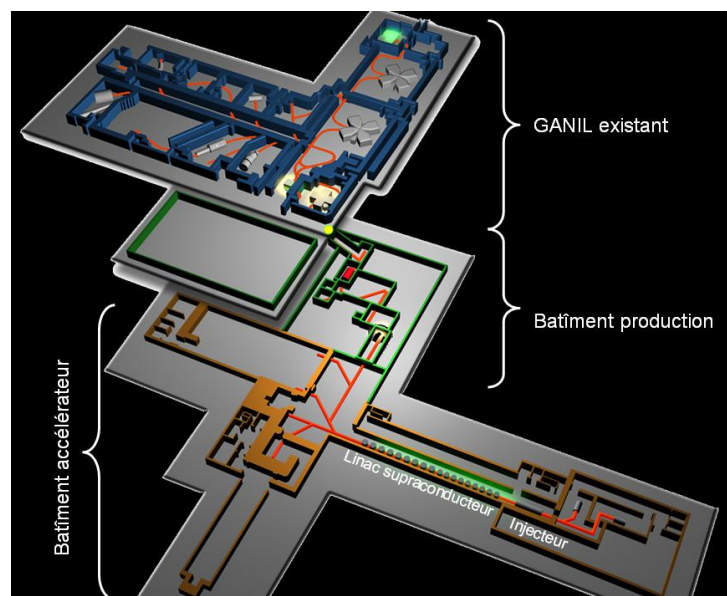


Figure 1-8 : Vue générale de l'aménagement intérieur des bâtiments. En bas le bâtiment hébergeant l'accélérateur et des salles de physique (ions lourds stables à haute énergie). Au dessus, le bâtiment de production avec l'ensemble cible source et salles de physique (isotopes radioactifs à basse énergie). Plus haut, le bâtiment du Ganil existant.

1.3 Autres projets associés, en bref

1.3.1 Les débuts : PARRNe^a

Afin de démontrer la faisabilité du procédé ISOL à partir d'un faisceau de deutons et d'établir une table des taux de production de différents isotopes radioactifs, quatre laboratoires se sont associés pour la construction d'un séparateur en ligne PARRNe [IPN00]. Ce projet a été installé aux cotés de l'accélérateur électrostatique TANDEM à l'IPN^b d'Orsay, fournissant un faisceau de deutons de 1 μ A. PARRNe2, venant augmenter la capacité de production de PARRNe, consiste à ajouter une source plasma à haute température permettant la production d'isotopes plus lourds [IPN02].

1.3.2 La photofission : ALTO^c

ALTO vient compléter l'installation PARRNe2 installé à l'IPN d'Orsay. Il s'agit d'une partie de l'injecteur du LEP^d adaptée à l'installation de l'IPNO. Il a permis d'augmenter d'un facteur 100 le taux de production de noyaux exotiques précédemment obtenus par un faisceau de deutons délivré par le TANDEM. ALTO, accélérateur linéaire peut fournir un faisceau d'électron de 10 μ A à 50 MeV. Il permet d'étudier la production d'isotopes radioactifs par photofission, solution non retenue pour le projet Spiral2, et de poursuivre le travail d'optimisation sur l'ensemble cible-source de Spiral2. Sa capacité de production est environ 100 fois inférieure à ce qu'atteindra Spiral2.

L'accélérateur a été conditionné à énergie nominale et à 100 nA en juin 2006 [LESREL06]. La montée en courant, dépendant des autorisations des autorités de sûreté, a atteint aujourd'hui 10 μ A.

1.3.3 Le futur : EURISOL^e

EURISOL (pour EUROpean Isotope Separator On Line) est un projet européen, impliquant une vingtaine de laboratoires dans 14 pays d'Europe [BLUMENFELD08]. Ce projet, en phase d'étude, vise à construire, d'ici 2020, tout un ensemble d'accélération et de production d'isotopes radioactifs, surpassant d'un facteur 100 les capacités de production de Spiral2, soit un taux de 10^{16} fissions/secondes. La solution technique retenue est un accélérateur linéaire supraconducteur portant un faisceau de proton à 1 GeV, pour une puissance de 5 MW, soit 25 fois plus que Spiral2 (cf **Figure 1-9**). Un convertisseur à circulation de mercure est bombardé par le faisceau de proton pour produire un flux de

^a PARRNe : Production d'Atomes Radioactifs Riches en Neutrons

^b IPN : Institut de Physique Nucléaire

^c ALTO : Accélérateur Linéaire auprès du Tandem d'Orsay

^d LEP : synchrotron à électron démantelé aujourd'hui laissant place au synchrotron à proton, le LHC (Large Hadron Collider).

^e EURISOL EUROpean Isotope Separation On-Line

neutrons intense par spallation. Une cible de carbure d'uranium est installée en aval, où sont créés les isotopes radioactifs par fission. Ceux-ci sont accélérés à nouveau par un accélérateur linéaire supraconducteur, capable d'élever l'énergie de certains isotopes à 150MeV/nucléons.

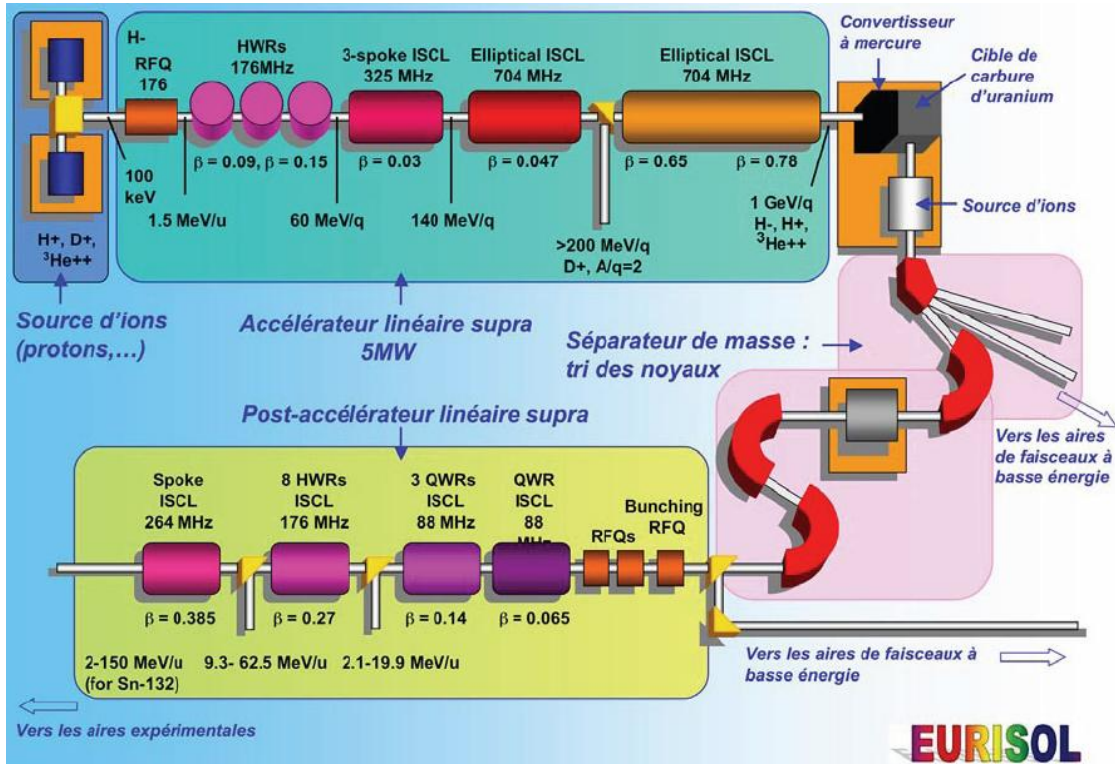


Figure 1-9 : vue schématique de la future installation Eurisol.
Figure extraite de [BLUMENFELD06]

2. L'accélérateur linéaire

2.1 Pourquoi le choix d'un accélérateur linéaire supraconducteur

- 2.1.1 Les différents types d'accélérateurs existant et leur capacité d'accélération
- 2.1.2 Mise en concurrence et justification du choix pour Spiral2
- 2.1.3 Vue d'ensemble

2.2 L'injecteur

- 2.2.1 Les sources d'ions
- 2.2.2 La section basse énergie : le conditionnement du faisceau

2.3 L'accélérateur supraconducteur et les cryomodules B

- 2.3.1 Les boîtes à vannes et cryostat
- 2.3.2 Les cavités accélératrices
 - 2.3.21 *Présentation générale*
 - 2.3.22 *Présentation mécanique*
 - 2.3.23 *Présentation électromagnétique*
- 2.3.3 Les coupleurs de puissance
- 2.3.4 Le système d'accord en fréquence
 - 2.3.41 *Son rôle*
 - 2.3.42 *Le système d'accord des cavités $\beta=0.12$ Spiral2*
- 2.3.5 Les systèmes annexes
 - 2.3.51 *Les systèmes de pompage*
 - 2.3.52 *Les diagnostics*

2.1 Pourquoi le choix d'un accélérateur linéaire supraconducteur

2.1.1 Les différents types d'accélérateurs existant et leur capacités d'accélération

Depuis la fin des années 20, avec la construction de la première structure accélératrice, le milieu des accélérateurs de particules n'a cessé de s'enrichir. Leur utilisation de plus en plus courante et dans des domaines de plus en plus variés a poussé les scientifiques à construire des structures accélératrices très diversifiées. Chaque type a ses propres spécificités, atouts et inconvénients. C'est pourquoi il est essentiel de connaître avant tout les paramètres importants : énergie, intensité, polyvalence, fiabilité, mode de fonctionnement pulsé ou continu, dimensions et bien entendu son coût. Nous tenterons d'élaborer une liste non exhaustive des différentes structures accélératrices les plus courantes en présentant, pour chacune d'elle, leur domaine d'application ainsi que quelques ordres de grandeurs des principaux paramètres. Trois grandes familles d'accélérateurs peuvent être définies en premier lieu : les linéaires ou linacs^a (électrostatiques, structures RF^b non supraconductrices et supraconductrices), les circulaires à orbite fermée^c (synchrotrons) et circulaires à orbite ouverte^d (cyclotrons, FFAG, synchro-cyclotron). Le tableau suivant (cf **Tableau 1-1**) récapitule succinctement leurs différentes caractéristiques. Aucune description n'est faite ici, il conviendra de se référer à [CERN94] pour plus de détails.

^a Linac : LINear Accelerator

^b RF : Radio Fréquence, champ électromagnétique oscillant à des fréquences s'échelonnant de quelques MHz à quelques GHz.

^c Circulaire à orbite fermée : les particules décrivent un cercle durant toute l'accélération. Le rayon reste constant.

^d Circulaire à orbite ouverte : le rayon de courbure augmente au fil de l'accélération. Les particules décrivent une spirale.

Tableau 1-1 : Les différentes technologies existantes pour l'accélération de particules

Type	Applications	Points forts	Energie maximale	Mode d'accélération	Limitations ou contraintes	Dimensions (longueur ou diamètre)	Exemples
Electrostatique	Domestique médical, recherche	Simple, fiable, polyvalent	Qq dizaines de MeV	Continu	Potentiels électriques très élevés. Claquages destructifs, courant faisceau	De qq centimètres à plusieurs dizaines de mètres	Van de Graaf, Tandem Sources
Linac non supraconducteur	Recherche	Fiable, maîtrisé	Pas de limite	Pulsé pour limiter les dissipations ohmiques	Dissipations thermiques, accélération de noyaux légers.	Gain moyen en énergie de l'ordre de 2 MeV/m	Alto, Linac4, DTL
Linac supraconducteur	Recherche	Intensité très élevée, acceptance, rendement RF	Pas de limite	Pulsé ou continu	Nécessite une usine cryogénique, champ accélérateur.	Gain moyen en énergie de l'ordre de 5 MeV/m	Spiral2, ISAC SNS
Synchrotrons	Recherche Source de lumière	Energie maximale et intensité élevées.	De plusieurs GeV à qq TeV	Pulsé car cycle d'accélération	Energie d'injection élevée, champs et fréquence rampés	qq centaines de mètres à plusieurs dizaines de kilomètres	LEP, LHC, ESRF
Cyclotrons	Médical, recherche, industries	Fiable, industrialisable, polyvalence	Qq dizaine de MeV	continu	Perte de synchronisme pour les particules relativistes	Qq centimètres à qq mètres	Ganil, Triumf, PSI
Synchrocyclotrons	Médical, recherche	Energie plus élevée que cyclotron	Qq centaines de MeV	Pulsé car cycle d'accélération	Fréquence rampée	Qq mètres	CPO
FFAG (Fixed Field Alternating Gradient)	Médical, recherche	Acceptance, Intensité très élevée	Qq centaines de MeV	Quasi-continu (plusieurs kHz)	Conception des aimants très délicate, Energie d'injection élevée	Qq mètres	Mark 2 et 5 KEK.

2.1.2 Mise en concurrence et justification du choix pour Spiral2

Ayant connaissance des différentes structures accélératrices existantes, nous pouvons justifier pourquoi la solution d'un accélérateur linéaire supraconducteur a été retenue pour Spiral2. En prenant uniquement en considération les besoins définis par les physiciens, l'accélérateur doit :

- Permettre de générer un flux de neutrons continu et suffisant afin d'atteindre le taux de fissions escompté de 10^{14} fissions/secondes.
- Accélérer des deutons jusqu'à une énergie d'environ 40 MeV.
- Accélérer diverses espèces plus massives à plus de 10 MeV/ nucléons.

Le premier critère limite considérablement le choix parmi les différents accélérateurs possibles. En effet un taux de fission de 10^{14} fissions/secondes continu signifie qu'il faut au minimum un courant continu de deutons de quelques mA en considérant les sections efficaces des réactions [GANIL06]. Ainsi d'après le **Tableau 1-1**, on s'aperçoit très rapidement que seules les structures électrostatiques, RF supraconductrices, cyclotrons ou FFAG sont capables d'accélérer un courant continu de particules. Les deux critères suivants, viennent définitivement exclure l'utilisation d'un accélérateur électrostatique, incapable d'atteindre de telles énergies pour des espèces aussi massives. Les FFAG, quant à eux, souffrent de la complexité du design des aimants. Ils sont en théorie des candidats potentiels mais leur réelle capacité d'accélération n'a été que très peu expérimentée. Finalement les cyclotrons, accélérateurs pourtant fiables et bien maîtrisés sont pénalisés par la difficulté de l'extraction du faisceau à de telles puissances (jusqu'à 200 kW) pouvant entraîner une forte activation des matériaux sujets aux pertes faisceau ainsi que par leur manque d'évolutivité comparé aux accélérateurs linéaires.

Ainsi les cavités accélératrices supraconductrices sont les candidates les plus appropriées de nos jours pour répondre aux besoins de Spiral2.

Cependant, comme énoncé dans le **Tableau 1-1**, l'utilisation de la technologie supraconductrice complexifie largement non seulement la conception de l'accélérateur mais aussi son utilisation future. Lorsque l'on parle de supraconductivité dans le domaine des accélérateurs, ceci impose de travailler à la température de l'hélium liquide, c'est à dire en dessous de 4.2K (soit -269°C). L'installation requiert donc un liquéfacteur d'hélium et tout un système pour la gestion des fluides cryogéniques. De telles conditions de température impliquent également l'isolement thermique des cavités à l'intérieur de cryostats pour diminuer au maximum les pertes avec l'extérieur, et réduire ainsi au maximum le coût de l'usine cryogénique.

Les cavités accélératrices, nous le verrons plus en détail dans le chapitre 2 , sont des systèmes résonants ayant un facteur de qualité très élevé. Ceci les rend extrêmement sensibles à la moindre perturbation extérieure (variation de pression, vibrations extérieures, variation de température). Tout l'environnement des cavités accélératrices supraconductrices doit être étudié et contrôlé afin de ne pas altérer leurs performances.

La construction d'un tel accélérateur est un réel défi technologique. Un lourd travail de R&D a été effectué à ce jour, ayant montré, après avoir testé plusieurs cavités dans les modules accélérateurs, que les performances demandées ont été atteintes.

2.1.3 Vue d'ensemble

Un accélérateur linéaire, quelque soit son application, est divisé en plusieurs parties, ayant chacune une fonction bien précise. Chaque partie, est composée d'une ou plusieurs mailles, se répétant au besoin. L'accélérateur linéaire supraconducteur Spiral2, d'environ 65 mètres de long est lui divisé en 4 parties (cf. **Figure 1-10**): les sources d'ions (A), la partie pré-accelération et conditionnement du faisceau (B), une partie moyenne énergie (C) et une dernière partie haute énergie (D). Chaque partie sera brièvement décrite dans la partie suivante.

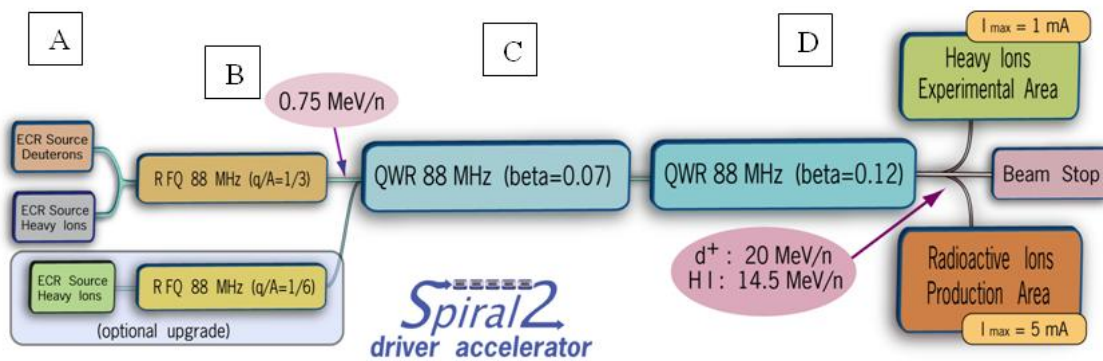


Figure 1-10 : décomposition de l'accélérateur Spiral2 en 4 parties. Figure extraite de [JUNQUERA06]

La construction de l'accélérateur a été divisée en plusieurs lots, répartis entre plusieurs laboratoires français (cf **Figure 1-11**). Des collaborations ont été également établies avec différents partenaires étrangers.

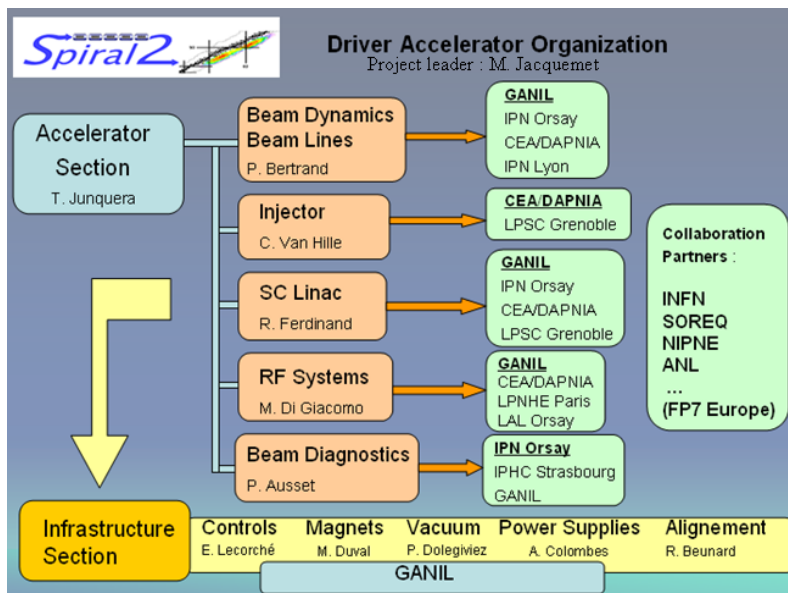


Figure 1-11 : répartition des tâches pour la construction de l'accélérateur et responsables. Figure extraite de [JUNQUERA08]

2.2 L'injecteur

Le terme d'injecteur comprend les sources d'ions et la partie de pré-accelération et conditionnement du faisceau. Toute cette partie est coordonnée par le CEA/DAPNIA.

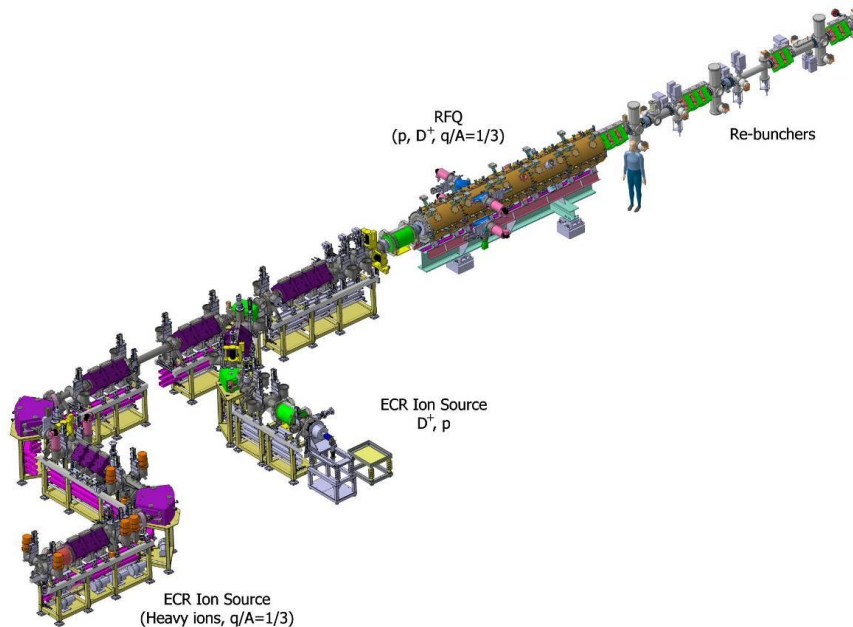


Figure 1-12 : Injecteur Spiral2. Figure extraite de [FERDINAND08]

2.2.1 Les sources d'ions

Les sources d'ions seront au nombre de deux dans un premier temps. Une source est dédiée à la production de deutons et protons et la seconde (cf **Figure 1-13a**) à la production d'ions plus lourds, ayant comme rapport charge sur masse de un tiers (ex : O^{6+} , Ar^{12+} , ...).

Une extension possible, serait l'ajout d'une source produisant des ions ayant un rapport charge sur masse de un sixième (ex : Ca^{8+} , Kr^{14+} , ...) [GANILO6].

Les sources utilisées seront des sources dites ECR^a. Un plasma de gaz est confiné à l'aide d'un champ magnétique intense créée par deux bobines et un aimant multipolaire (cf **Figure 1-13b**). L'ionisation des atomes du plasma est obtenue en injectant une onde électromagnétique de quelque GHz. Des électrons sont accélérés jusqu'à quelques keV et arrachent les électrons des atomes. Les ions ainsi produits sont extraits du plasma à l'aide d'un champ électrostatique de quelques dizaines de kVolts.

^a Electron Cyclotron Resonance source

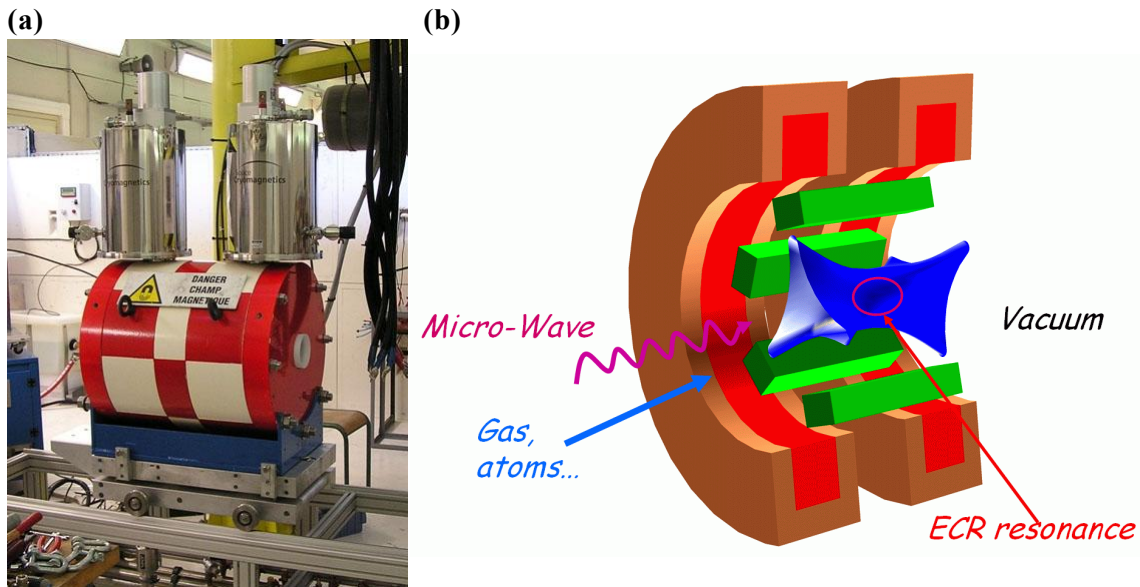


Figure 1-13 : (a) : Source ECR Spiral2 pour les ions $q/A = 1/3$. (b) : Schéma de principe d'une source ECR. Les bobines (orange) et les aimants (vert) confinent le plasma (bleu). L'onde électromagnétique (rose) entraîne l'ionisation du plasma. Figure extraite de [FERDINAND08]

2.2.2 La section basse énergie : le conditionnement du faisceau

Après l'étage de production d'ions, il est nécessaire d'adapter le faisceau de particules sortant de la source au mode d'accélération de la structure. Le flux de particules étant continu en sortie de source, et les cavités accélératrices ne pouvant accélérer les particules que dans certaines phases, une structure intermédiaire de conditionnement du faisceau est insérée. Celle-ci permet de convertir le flux continu en paquets avec un cycle de répétition égal à la fréquence des cavités accélératrices.

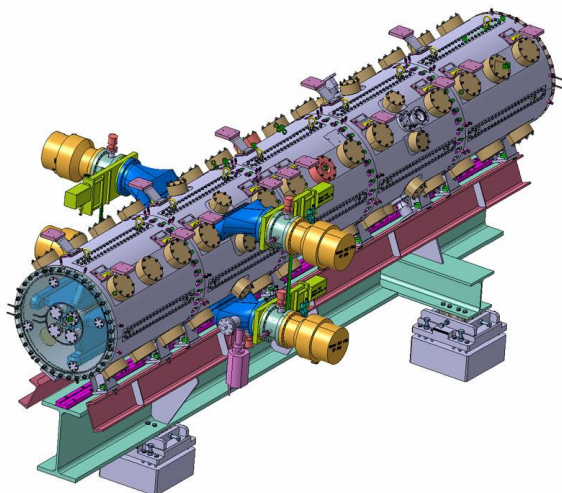
Pour Spiral2, cette opération est effectuée à l'aide d'un RFQ^a (cf. **Figure 1-14a**). Cette structure faite en cuivre, est alimentée par une onde électromagnétique d'une fréquence de 88 MHz. Cet élément cylindrique est divisé en quatre tronçons longitudinaux formant quatre pôles. Leur polarisation, inversée par rapport à leurs deux voisins, permet de créer un moment transverse quadripolaire au centre. Ceci a pour effet de focaliser le faisceau afin de compenser la force de répulsion entre les ions du faisceau tous chargés positivement.

En plus de la focalisation, le RFQ a pour but de pré-accélérer et de diviser le faisceau en paquets. Ceci est obtenu par ondulation des pôles. (cf **Figure 1-14b**). Un champ électrique avec une composante longitudinale est créée, forçant les particules à se regrouper (les particules en retard par rapport à la particule au centre de l'ondulation sont accélérées, celles en avance sont freinées).

En sortie du RFQ, trois éléments supplémentaires appelés re-buncher (cf **Figure 1-12**) maintiennent le faisceau en paquet et l'adaptent aux conditions d'entrée de l'accélérateur supraconducteur.

^a RFQ : Radio Frequency Quadrupole

(a)



(b)

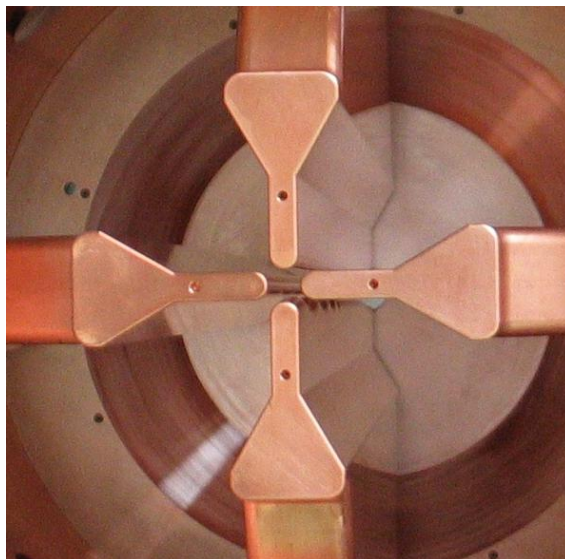


Figure 1-14 : (a) : Vue générale du RFQ Spiral2. (b) : Photo intérieure du RFQ Spiral2. Vue sur les quatre pôles produisant le champ quadripolaire. L'ondulation des pôles est visible.

2.3 L'accélérateur supraconducteur et les cryomodules B

La dernière partie de l'accélérateur se décompose en deux motifs (cf **Figure 1-15**). Le premier, est composé de 12 modules supraconducteurs (cryomodule A) comprenant chacun une cavité supraconductrice. Entre chaque module, deux quadripôles et une boîte de diagnostic faisceau sont installés. Les quadripôles, composés d'aimants quadripolaires, focalisent le faisceau dans le plan transverse. Les boîtes de diagnostics comprennent chacune un système de pompage ainsi que l'instrumentation permettant de contrôler la position, la forme du faisceau et le courant de particule.

Le deuxième motif, est composé de sept modules accélérateurs (cryomodule B), comprenant cette fois-ci deux cavités supraconductrices. Les éléments de focalisation et les boîtes de diagnostics sont disposés entre chaque module. On remarque que dans cette partie de plus haute énergie les quadripôles sont plus espacés. La vitesse des particules accélérées étant plus élevée, la distance entre les éléments de focalisation peut donc être augmentée.

Le choix d'utiliser des éléments de focalisation « chauds » à la place d'aimants supraconducteurs intégrés dans les cryomodules facilite la maintenance, limite les erreurs d'alignement et permet l'intégration d'une partie de l'instrumentation de diagnostic du faisceau.

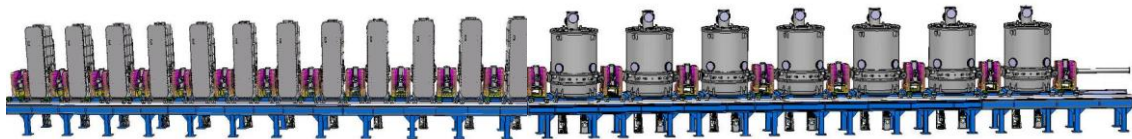


Figure 1-15 : vue d'ensemble de l'accélérateur supraconducteur composé de 12 cryomodules A, 7 cryomodules B et 20 quadripôles de focalisation. Sa longueur est d'environ 35 mètres. Figure extraite de [FERDINAND08]

Toute la suite de la présentation se limitera à la description du cryomodule B, système sur lequel toute l'étude décrite dans ce manuscrit a été faite. Chaque sous-partie du cryomodule est passée en revue par la suite.

2.3.1 Les boîtes à vannes et cryostat

Comme expliqué précédemment, chaque module accélérateur doit être refroidi à la température de l'hélium liquide à une pression absolue de 1150 mbar c'est à dire environ 4.3K. La gestion de l'alimentation en fluide cryogénique est assurée à l'aide d'une boîte à vannes (cf **Figure 1-16**). Chaque cryomodule est géré par une boîte à vanne. Ce choix a été fait afin de faciliter l'exploitation de la machine. En effet, en cas de panne d'un cryomodule, celui-ci peut être isolé, réchauffé et réparé sans avoir besoin d'arrêter la circulation d'hélium liquide du reste de l'accélérateur. Ceci permet également une mise en froid progressive de la machine. Chaque cryomodule est descendu en température, très rapidement, l'un après l'autre, afin de limiter certains phénomènes susceptibles de dégrader les performances accélératrices des cavités (cf **Partie 4, L'effet 100K**).

Les boîtes à vannes gèrent l'approvisionnement de deux circuits de refroidissement en parallèle, en fonction de la consommation du module. Le premier circuit est la boucle d'hélium liquide circulant en légère surpression (~ 150 mbar) par rapport à la pression atmosphérique. Il doit maintenir les cavités à 4.3K tout en gardant une pression très stable et ceci pour des puissances dissipées par les cavités accélératrices de 10 Watts environ au champ nominal. Ceci implique une régulation très fine de l'ordre de plus ou moins 1 mbar pour les variations rapides (< 1 s) et de plus ou moins 15 mbar pour les variations plus lentes (> 5 minutes) afin de ne pas perturber le bon fonctionnement des cavités. Le deuxième circuit, hélium gaz à environ 60K pressurisé à 15 bars, intercepte une partie de la charge thermique provenant de l'interface du cryomodule et de la boîte à vannes. Il réduit notablement la consommation du circuit primaire en interceptant le rayonnement thermique provenant des surfaces à la température ambiante, et la charge par conduction des différents éléments en contact avec la cavité : coupleur de puissance, système d'accord, tirants de maintien.

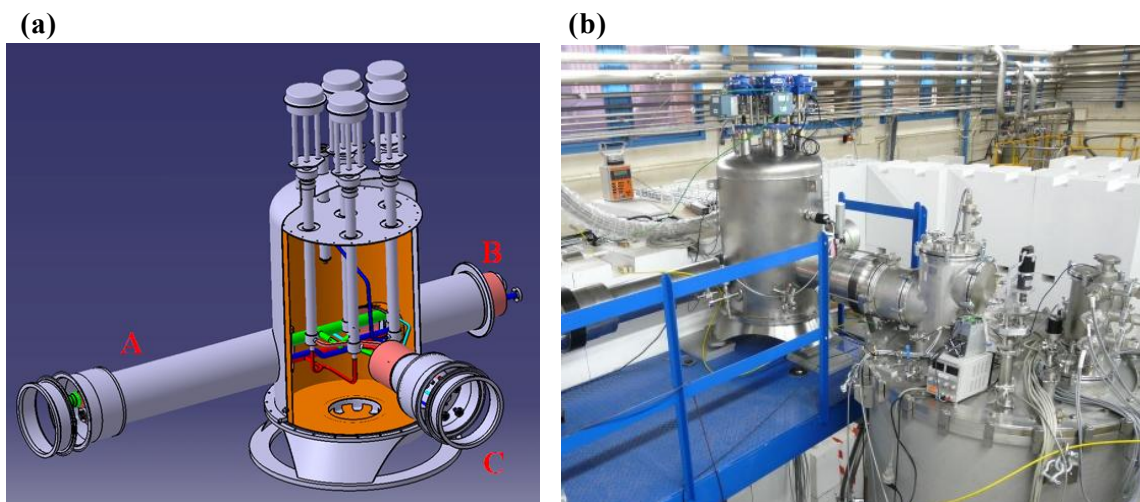


Figure 1-16 : (a) : boîte à vannes Spiral2. Le bras A (B) est relié à la boîte à vanne précédente (suivante), le bras C au cryomodule. (b) : Photo d'une boîte à vanne reliée à son cryomodule. Prise dans la salle de test Spiral2 à l'IPN d'Orsay, décembre 2007 lors du test de qualification.

Le cryomodule associé est placé en contrebas de la boîte à vannes. Le circuit secondaire à 60K, à l'intérieur du cryomodule consiste en un serpentin circulant tout autour d'un écran en cuivre entourant totalement le circuit primaire à 4.2K (cf **Figure 1-17a**). Des thermalisations, bandes de cuivre, relient le circuit secondaire aux éléments formant un

pont thermique entre le 300K et le 4K. Ils sont placés à l'endroit où la pièce avoisine 60K afin d'intercepter un maximum de flux venant du 300K sans pour autant ajouter un flux vers le 4K [SAUGNAC08].

Pour ce qui est du circuit primaire (cf **Figure 1-17b**), celui-ci est composé, dans le sens de circulation d'hélium, d'un réservoir tampon de 26 litres (A), de deux voies de remplissages (B et C) et du réservoir entourant la cavité, appelé aussi tank hélium (D). Une mesure de niveau du réservoir tampon est possible grâce à une sonde supraconductrice insérée dans celui-ci. L'hélium liquide arrive depuis la boîte à vanne (1).

En fonctionnement normal, si de l'hélium liquide est détecté dans le réservoir (A), le remplissage est effectué par le haut, c'est à dire que l'hélium arrive directement dans le réservoir, alimentant par le haut le piquage central des deux tanks hélium (C). Ainsi le niveau dans le réservoir est régulé en continu à 40% via la boîte à vanne.

Lors d'une mise en froid, le remplissage s'effectue par le bas (B) afin de profiter des vapeurs froides, pré-refroidissant le tank hélium et le réservoir tampon. Le circuit (E), permet d'établir l'équilibre entre le réservoir tampon et le tank hélium (principe des vases communicant). La position du réservoir tampon par rapport au tank hélium assure la présence d'hélium liquide jusqu'en haut de la cavité lorsque le niveau est bas dans le réservoir. L'évacuation des gaz s'effectue par les deux piquages supérieurs du tank hélium et débouche sur le haut du réservoir hélium, pour repartir vers la boîte à vannes. La tubulure du circuit primaire a été dimensionnée de sorte que les pertes de charges du gaz restent négligeables et que le nombre de Reynolds^a reste inférieur à 3000. Ceci permet non seulement qu'aucune augmentation de la pression ne perturbe le fonctionnement de la cavité et que l'écoulement reste laminaire (aucune vibration causée par des turbulences).

Des soupapes et disques de ruptures sont présents sur le circuit hélium et le vide d'isolement afin de protéger l'intégrité du cryostat en cas où la pression dépasserait 1500 mbars absolue.

Afin de réduire les pertes par rayonnement, plusieurs couches de super-isolation^b sont disposées autour de l'écran cuivre et du circuit primaire. Les pertes statiques du cryomodule seul ont été évaluées dans cette configuration à environ 11 Watts pour le circuit primaire et 60 Watts pour le secondaire en considérant les pertes par conduction et rayonnement [SAUGNAC08]. Les pertes par convection sont totalement négligeables grâce au vide d'isolement.

L'enceinte à vide du cryomodule, faite en acier inoxydable, est démontable en quatre parties afin de faciliter le montage en salle blanche et l'intégration de tous les éléments :

- La platine supérieure où sont suspendus les cavités, l'écran cuivre et le réservoir tampon.
- La rehausse supérieure.

^a Nombre de Reynolds : ce nombre adimensionnel noté Re est utilisé en mécanique des fluides afin d'évaluer la nature de l'écoulement. Celui-ci est dit laminaire lorsque les forces de viscosités sont très supérieures aux forces d'inertie du fluide. Dans le cas contraire, l'écoulement est dit turbulent. La transition laminaire-turbulent s'effectue pour un nombre de Reynolds entre 2300 et 3000.

^b Super-isolation : empilement de feuilles de mylar® aluminisées séparées par un espaceur polymère. Les feuilles aluminisées, ayant un coefficient de réflexion important, renvoient le rayonnement thermique. L'espaceur polymère réduit notablement la conduction thermique entre chaque couche réfléchissante. Il est d'usage de superposer une vingtaine de couches sur les écrans thermiques à 80K et une quinzaine de couches sur les parties à 4K.

- La rehausse intermédiaire, traversée par le tube faisceau et fermée par deux vannes tout métal. Les tirants latéraux et les brides de pompage pour le vide d'isolement et des coupleurs sont également fixés sur cette partie.
- Le fond du cryomodule, où sont fixés les coupleurs de puissances.

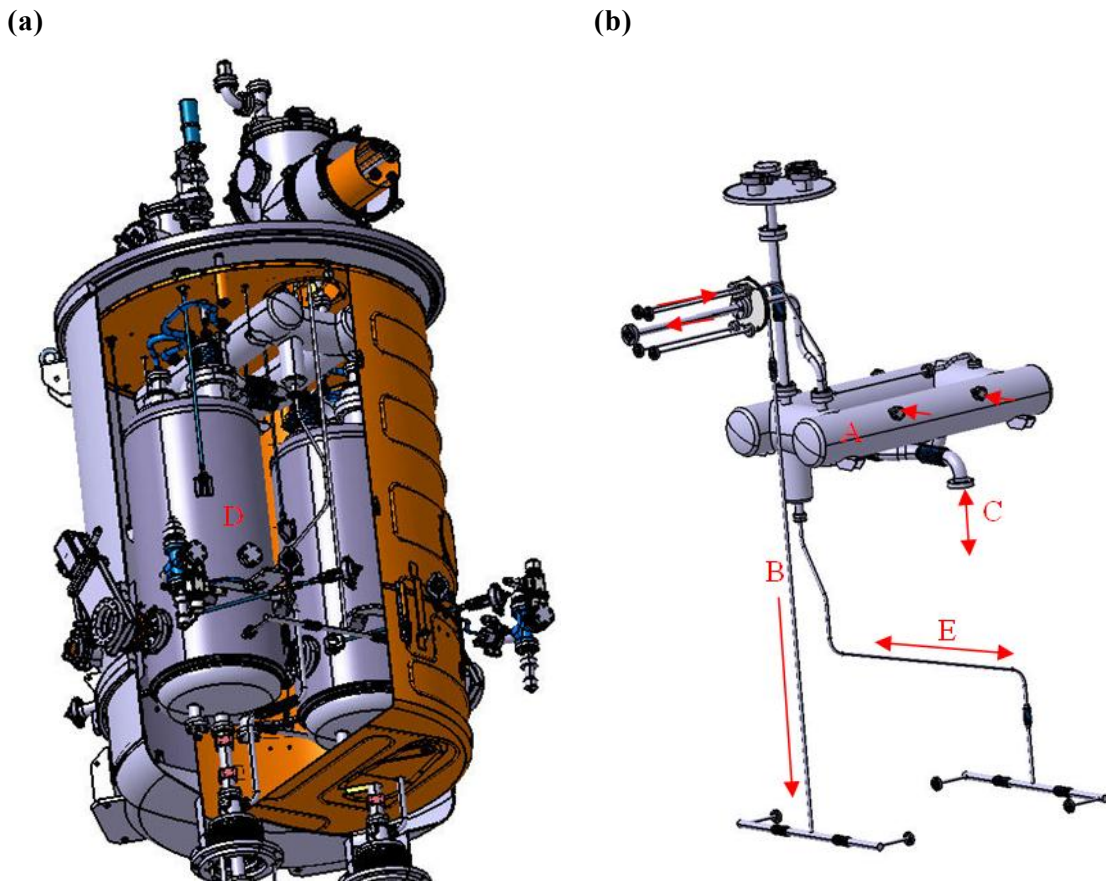


Figure 1-17 : (a) : Vue intérieure du cryomodule B. Le circuit secondaire parcourt en serpentins l'écran en cuivre recouvrant l'ensemble du circuit primaire. (b) : Vue du circuit primaire isolé. Les flèches représentent le sens de circulation possible de l'hélium. Figure extraite de [SAUGNAC08].

2.3.2 Les cavités accélératrices Spiral2

2.3.21 Présentation générale

Cette partie, comme énoncé précédemment, ne traite que de manière descriptive de chaque composant du cryomodule. Ainsi aucune justification technologique sur les cavités accélératrices n'est abordée ici. Cependant, comme énoncé auparavant, il est nécessaire d'utiliser la technologie supraconductrice. Ceci implique l'utilisation du Niobium, actuellement seul matériau supraconducteur adapté aux cavités accélératrices (cf. **partie 2, Les matériaux supraconducteurs utilisables pour l'accélération de particules**). Les cavités accélératrices choisies, que ce soit pour les cryomodules A et B, sont appelées cavité quart-d'onde. Elles ont été développées pour accélérer des ions lourds, c'est à dire, des particules ayant une vitesse bien inférieure à celle de la lumière aux énergies requises. Celles-ci autorisent également l'utilisation de fréquences relativement basses tout en ayant un encombrement limité. Opérer à basse fréquence réduit notablement les pertes causées par la résistance de surface (cf. **partie 2, Résistance de surface réelle**). Les cavités Spiral2 sont accordées à la fréquence de 88.0525 MHz.

2.3.22 Présentation mécanique

Le choix de la fréquence a défini la taille de la cavité. La longueur d'onde λ à cette fréquence est définie par le rapport de la vitesse de la lumière c par la fréquence f , c'est-à-dire $\lambda = c/f = 3.41\text{m}$. Une quart d'onde a donc une dimension d'environ un quart de la longueur d'onde soit 0.85 m. Elle se représente grossièrement comme une ligne coaxiale de 380 mm de diamètre et 980 mm de hauteur, où le conducteur interne est en court-circuit avec le conducteur extérieur d'un côté, et en circuit ouvert de l'autre. La noix à l'extrémité du bras intérieur (stem), traversé par un cylindre creux, matérialise avec les deux tubes extérieurs le tube faisceau. Plus de détails sur la conception et l'optimisation de la cavité sont disponibles dans [OLRY08].

La cavité est ouverte par sept piquages ayant chacun un rôle bien précis :

- Deux piquages, placés horizontalement sur la partie latérale de la cavité, définissent le tube faisceau.
- Deux piquages sur la partie supérieure permettent l'insertion de systèmes d'accord en fréquence.
- Un piquage central sur la partie inférieure permet l'insertion de l'antenne du coupleur électromagnétique de puissance (cf. **Figure 1-21**)
- Deux piquages décentrés sur la partie inférieure permettent l'installation d'antennes de diagnostics, mesure effective du champ électromagnétique dans la cavité.

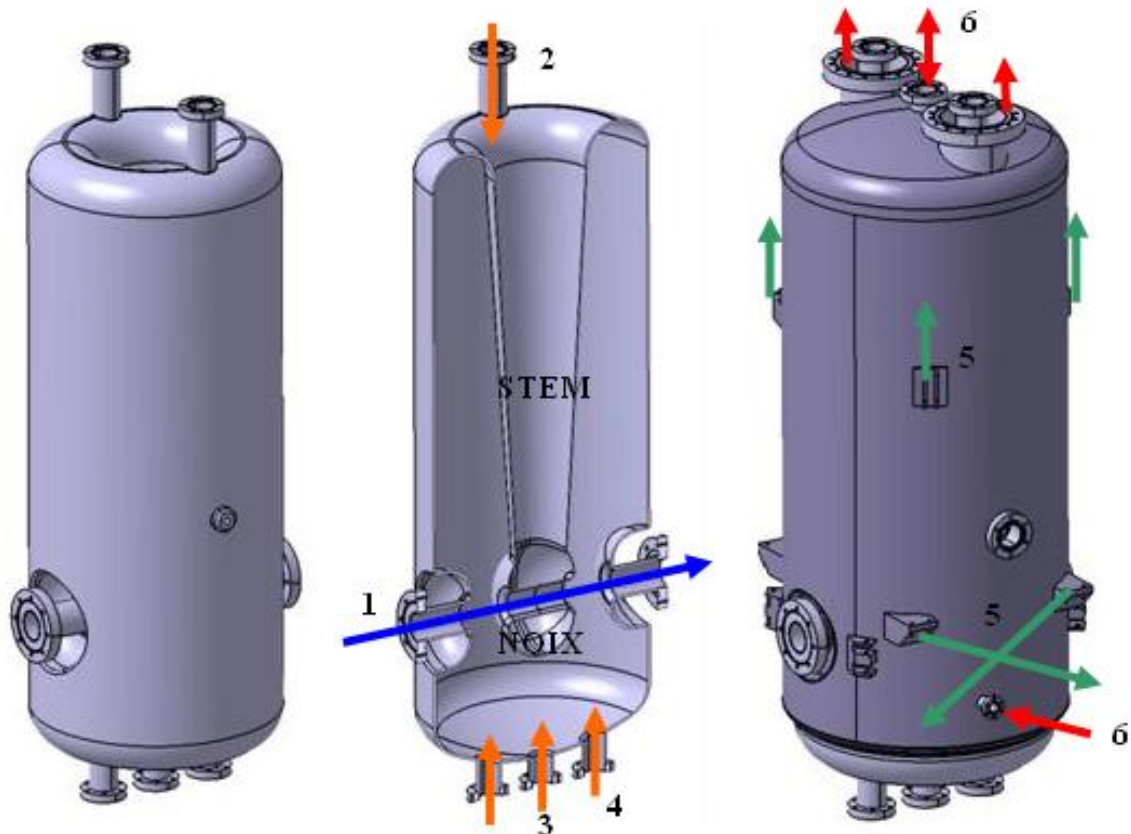


Figure 1-18 : cavité accélératrice supraconductrice type B du projet Spiral2. De gauche à droite : vue complète de la cavité, tranche verticale dans l'axe faisceau et vue de la cavité habillée du tank hélium. La flèche bleue (1) représente l'axe faisceau. En orange (3 et 4), les différents piquages pour l'équipement de la cavité (système d'accord, antennes). En vert, points de fixation de la cavité (5). En rouge (6), le sens de circulation d'hélium

Afin de refroidir efficacement la cavité à l'aide d'hélium liquide tout en limitant les dissipations, la cavité n'est pas totalement immergée dans le liquide. La cavité est habillée d'un réservoir l'entourant en partie, espacé d'environ 14 mm (cf **Figure 1-18**). Le fond de la cavité n'est pas recouvert par le tank afin de réduire les coûts de fabrication. Il a été montré que la conduction thermique suffisait à garder le fond suffisamment froid malgré la charge thermique apportée par le coupleur de puissance et les dissipations du champ électromagnétique [SAUGNAC06]. Le tank est en titane, matériau ayant un coefficient de dilatation thermique^a très proche de celui du Niobium et une masse volumique peu élevée. Les contraintes dues aux rétreints thermiques sont donc limitées.

Chaque cavité est maintenue dans le cryomodule à l'aide de 7 tiges creuses en acier inoxydable reliées au tank hélium (cf **Figure 1-19a**). Trois tirants fixés sur la platine supérieure du cryomodule maintiennent la cavité verticalement et quatre autres tirants, permettent de stabiliser la cavité dans le plan horizontal. Les sept attaches du côté du cryomodule ressortent à l'extérieur. Le réglage de la longueur des tirants est possible à l'aide d'écrous. Ainsi les cavités peuvent être alignées en fonctionnement.

L'alignement des cavités est réalisé à l'aide de deux mires fixées sur le tank hélium et d'un inclinomètre et deux autres mires intégrées dans l'enceinte du cryomodule (cf **Figure 1-19b**). Des lunettes de visée, installées sur le bâti, permettent de vérifier

^a Coefficient de dilatation thermique : exprimé en K^{-1} , il relie la variation relative de la longueur d'un matériau en fonction de la variation de la température.

l'alignement des quatre mires. Le projet a fixé une tolérance de +/- 1mm sur l'alignement des cavités, cryomodules et bâti [APD06].

Les cavités sont équipées toutes les deux d'un blindage magnétique passif. Elles sont totalement entourées d'un matériau à très forte perméabilité magnétique^a, Cryoperm©, un matériau gardant ses propriétés magnétiques à froid. Nous verrons dans la partie 3, l'importance d'un tel blindage sur des cavités supraconductrices. Le champ magnétique terrestre, à lui seul peut augmenter les dissipations de la cavité de plusieurs Watts. Le blindage n'étant pas totalement défini, aucun détail n'est donné ici.

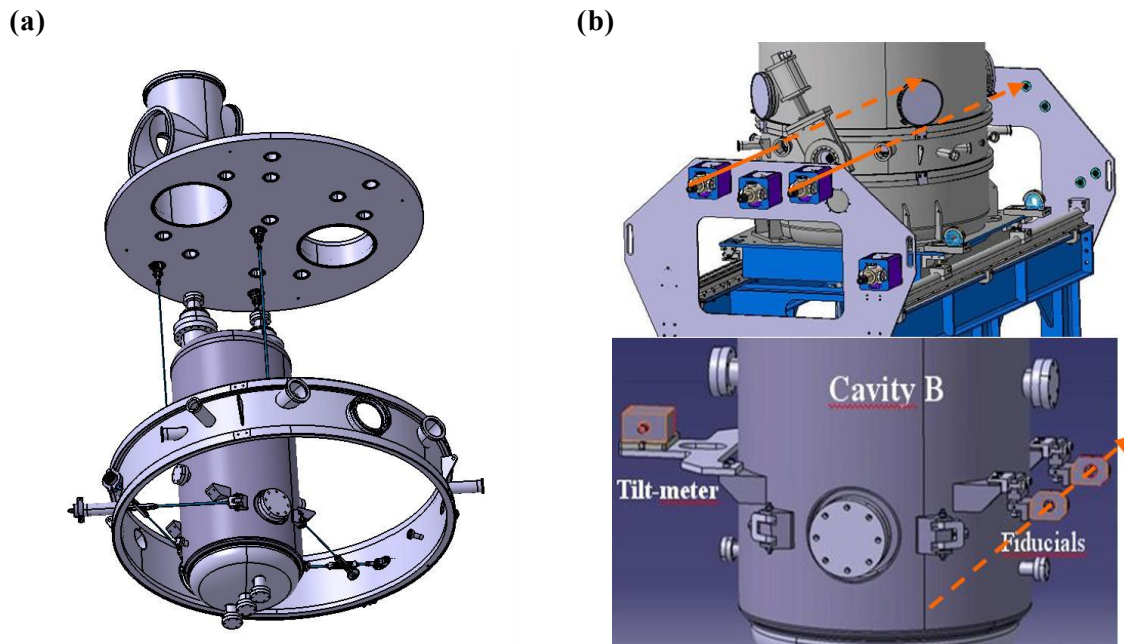


Figure 1-19 : (a) : Fixation d'une cavité à l'intérieur du cryomodule par 7 tiges réglables (3 verticales et 4 horizontales). (b) Outillage d'alignement des cavités installées sur la cavité et le cryomodule. Des lunettes de visée permettent d'aligner les quatre mires d'une cavité et du cryomodule. Figures extraites de [SAUGNAC08].

2.3.23 Présentation électromagnétique

Les cavités accélératrices installées dans les cryomodules type B ont été développées à l'IPN d'Orsay^b. Le champ accélérateur nominal des cavités type B, dont nous donnerons la définition dans la partie 2, est de 6.5 MV/m. A ce champ, chaque cavité doit dissiper une puissance inférieure à 10 Watts [APD06] afin de limiter la puissance et donc le coût de l'usine cryogénique.

Leur géométrie a été inspirée de celle des cavités quart-d'onde d'Argonne^c et de l'INFN Legnaro^d [OLRY08]. Des modifications importantes ont été apportées afin d'en modifier la fréquence de résonance, soit 88.0525 MHz pour le projet Spiral2, et de les adapter à des particules ayant une vitesse avoisinant 12% de la vitesse de la lumière. De

^a Perméabilité magnétique : exprimé en H/m, il représente la capacité d'un matériau à canaliser les lignes de champ magnétique.

^b IPN d'Orsay : Institut de Physique Nucléaire d'Orsay. UMR 8608. <http://ipnweb.in2p3.fr>

^c Argonne National Lab : <http://www.anl.gov/>

^d INFN Legnaro : Istituto Nazionale di Fisica Nucleare de Legnaro. www.infn.it

plus, un lourd travail d'optimisation a été effectué pour que les champs pics électriques (noté E_{pk}) et magnétiques (noté B_{pk}) restent en dessous de respectivement 40 MV/m et 80 mT^a lorsque la cavité est au champ nominal. Ceci nous permet de définir deux rapports E_{pk}/E_{acc} et B_{pk}/E_{acc} , valeurs très facilement accessibles lors des simulations électromagnétiques. Les valeurs énoncées précédemment imposent donc $E_{pk}/E_{acc} < 6.15$ et $B_{pk}/E_{acc} < 12.3$ mT/MV/m.

Le développement de ces cavités a été fait à l'aide des codes électromagnétiques MAFIA et MicroWave Studio^b. Aucun détail des différentes optimisations géométriques n'est donné ici, cependant un résumé est disponible sur [OLRY08].

Finalement, le meilleur compromis trouvé donne $E_{pk}/E_{acc} = 4.8$ et $B_{pk}/E_{acc} = 9.4$ mT/MV/m, valeurs très acceptables afin de garantir de bonnes performances.

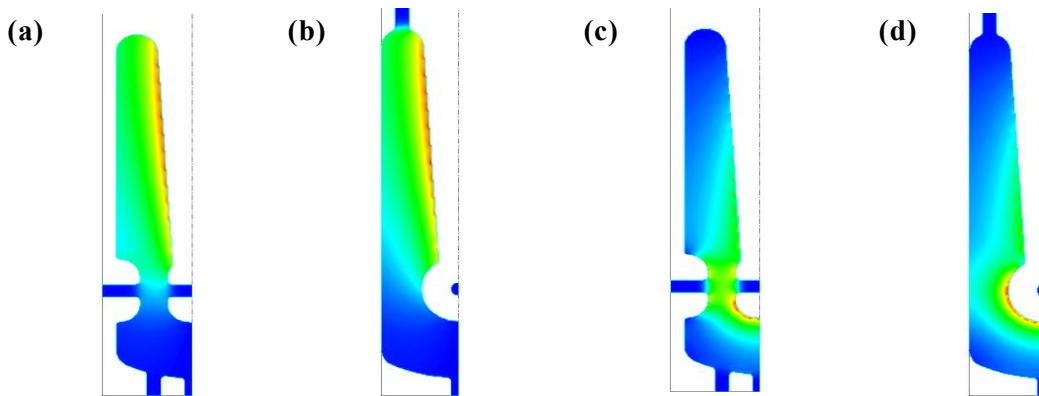


Figure 1-20 : De gauche à droite, répartition du champ magnétique dans la cavité dans l'axe faisceau (a) et perpendiculairement à l'axe (b). Répartition du champ électrique dans la cavité dans l'axe faisceau (c) et perpendiculairement à l'axe (d). Les champs les plus intenses sont représentés en rouge et les moins intenses en bleu. Réalisées avec CST Microwave studio.

Nous pouvons récapituler les différents paramètres de la cavité $\beta = 0.12$ Spiral2 :

Tableau 1-2 : Récapitulatif des différents paramètres de la cavité

β optimal (v/c)	0.12	E_{pk}/E_{acc}	4.8
Fréquence ^c	88.0525 MHz	B_{pk}/E_{acc}	9.4 mT/MV/m
$\beta \cdot \lambda = L_{acc}$	0.41 m	r/Q	515 Ω
Champ accélérateur nominal normalisé par rapport à $\beta \cdot \lambda$	6.5 MV/m	Pertes maximales au champ nominal (Q_0 associé minimal)	10 Watts ($1.38 \cdot 10^9$)
Résistance BCS à 4.2K	~ 3 n Ω	Résistance équivalente de surface maximale pour $P < 10$ W	34 n Ω
G	47	$K = (r/Q)^{1/2}/L_{acc}$	55.4 Ω/m
Tension nominale	2.66 MV	Diamètre tube	44 mm

^a Ces objectifs sont certes loin des limites théoriques et mêmes des performances obtenues de nos jours en laboratoire mais ils sont malgré tout considérés comme ambitieux dans le cadre d'une série et d'une exploitation de machine au regard de l'état de l'art actuel.

^b Mafias et MicroWave Studio : <http://www.cst.com>

^c Le mode à 88 MHz correspond au premier mode de résonance. Le deuxième mode est lui aux environs de 251 MHz.

2.3.3 Les coupleurs de puissance

Cette partie critique du cryomodule a été développée par le service accélérateur du LPSC de Grenoble^a. A noter que le coupleur de puissance est identique quel que soit le type de cryomodule afin de réduire au maximum le prix de revient et de faciliter la maintenance. Son rôle est de transmettre à la cavité étant à 4.2K, la puissance électromagnétique provenant de l'amplificateur de puissance RF par des guides d'onde coaxiaux, étant à 300K. Nous voyons ici toute la difficulté de conception du coupleur de puissance. Il doit à la fois transmettre parfaitement au maximum 12.8 kWatts de puissance électromagnétique en continu tout en amenant sur la cavité une puissance thermique par conduction inférieure à 1 Watt. La transmission de l'onde électromagnétique dans la cavité est effectuée à l'aide d'une antenne en cuivre creuse (1), insérée par le port coupleur (cf. **Figure 1-18**), port central sur le bas de la cavité). L'antenne est mise en contact électrique avec l'âme du guide d'onde (type coaxial) en traversant une céramique (4) (cf. **Figure 1-21a**). Celle-ci permet de séparer le vide cavité de l'atmosphère extérieure. Une manchette en acier inoxydable d'une épaisseur de 0.7 mm (2) recouverte sur la face intérieure par un dépôt de cuivre de 20 microns joue le rôle de conducteur externe. Deux thermalisations^b sur le circuit primaire à 4.2K et le circuit secondaire à 60K interceptent le flux thermique provenant du 300K.

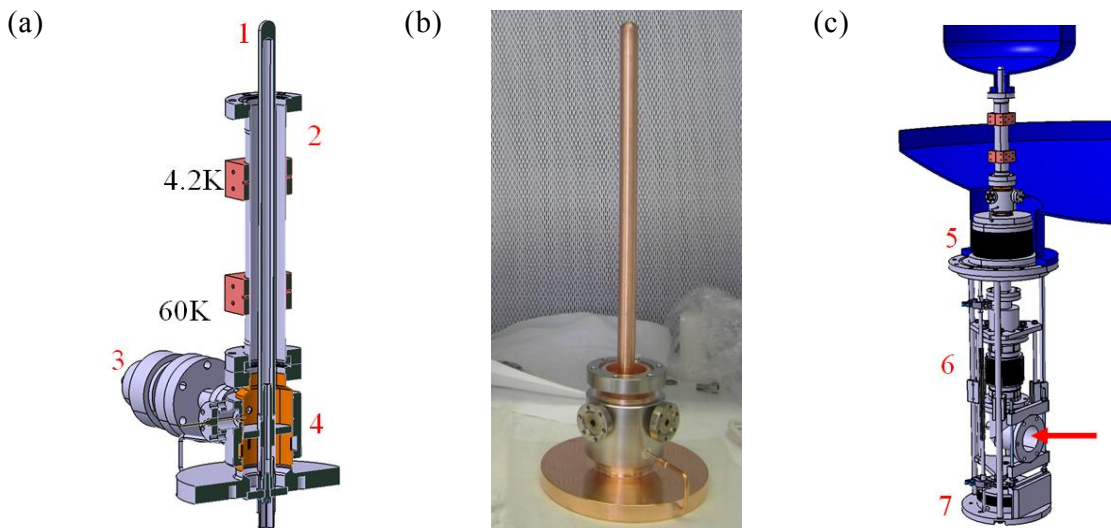


Figure 1-21 :De gauche à droite : (a) Vue intérieure de la partie supérieure du coupleur de puissance avec l'antenne, la manchette et la céramique. (b) Photographie du prototype du coupleur Spiral2. (c) Vue d'ensemble de la partie supérieure du coupleur avec les interfaces cryomodules et cavité. En rouge, entrée de l'onde électromagnétique.

Le coupleur, du côté vide cavité, est équipé d'une jauge à vide (3) et d'un « pick-up d'électron »^c. Ces deux systèmes contrôlent en permanence le bon comportement du coupleur en fonctionnement et lors du conditionnement du coupleur. Toute remontée du vide ou émission d'électron surpassant un seuil préalablement défini ($\sim 200 \mu\text{A}$) détectée

^a LPSC Grenoble : Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologie de Grenoble. UMR 5821. <http://lpsc.in2p3.fr>

^b Il a été décidé que la thermalisation à 4.2K devait être retirée afin de soulager la charge thermique sur le circuit hélium.

^c Pick-up d'électron : petite antenne insérée dans le vide cavité et proche de la céramique afin d'intercepter et de contrôler les électrons pouvant être émis des surfaces internes.

par un module de sécurité (« security box ») coupe immédiatement la puissance RF pour éviter tout dégât sur la céramique.

La partie inférieure du coupleur (cf. **Figure 1-21c**), est composée d'un système de compensation barométrique (7). Il empêche le déplacement du coupleur sous l'effet des forces de pression lorsque le vide d'isolement du cryostat s'établit.

Plusieurs soufflets métalliques ont été installés :

- Le premier soulage les contraintes lors de l'installation du coupleur causées par un alignement imparfait entre les ports coupleur de la cavité et du cryomodule (5).
- Le second encaisse les rétreints thermiques lors de la mise en froid (6).

Le couplage de l'antenne du coupleur avec la cavité est déterminé afin d'avoir une transmission de puissance maximale (et donc une réflexion quasiment nulle) avec un faisceau de deutons de 5 mA. Ainsi, pour les cryomodules B, le couplage des cavités doit être de $1.1 \cdot 10^6$ avec une tolérance de plus ou moins $3 \cdot 10^5$. Ceci correspond à un enfoncement de l'antenne de 16.6 mm^a.

^a Géométriquement, le couplage avec la cavité et donc l'impédance du couplage dépend de la longueur et du diamètre de l'antenne [BIARROTTE00].

2.3.4 Système d'accord en fréquence

Le système d'accord choisi pour ce type de cavité n'est pas conventionnel pour des cavités supraconductrices. Il est notamment très novateur et a nécessité plusieurs études électromagnétiques et mécaniques afin de montrer qu'il répond aux exigences du projet (cf. **parties 3, Tests du système d'accord en fréquence** et **partie 4, Discussion et stratégie pour le choix du plongeur**). A son origine, lors de la phase d'Avant Projet Détaillé (APD), le système prévu était un système d'accord par déformation élastique (cf. **Figure 1-22a**). Le système appuie sur les parois de la cavité, afin d'en modifier le volume interne et donc la fréquence de résonance. Des études faites sur la variation de la fréquence en fonction de la contrainte exercée ont montré qu'un tel système ne pouvait répondre aux exigences [SAUGNAC06].

C'est pourquoi, le système choisi est un système d'accord par insertion (cf. **Figure 1-22b**). Un plongeur en Niobium est inséré par un piquage du dessus (cf. **Figure 1-18**). Celui-ci modifie le volume interne de la cavité et donc la fréquence de résonance de la cavité. Sa pénétration dans le volume de la cavité permet de corriger les erreurs statiques. La correction des autres perturbations est effectuée en diminuant ou en augmentant la profondeur de pénétration à l'aide d'un système de translation.

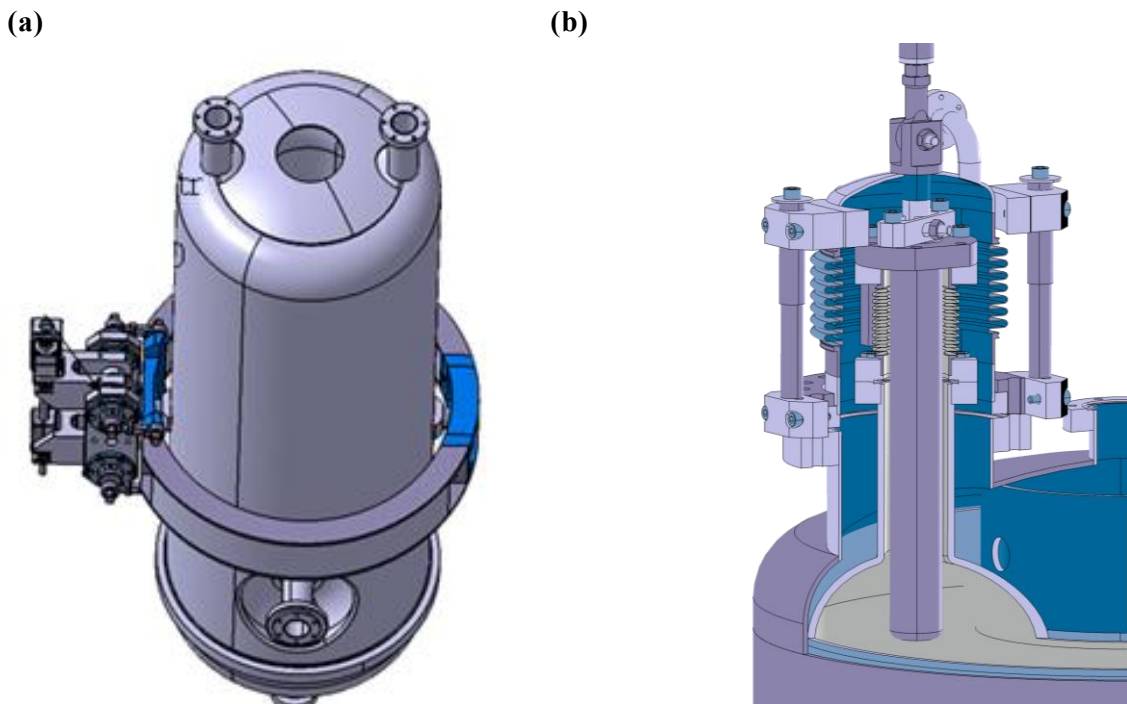


Figure 1-22 : (a) : Système d'accord par déformation prévu à l'origine. Le système contraint la cavité pour modifier son volume résonant. (b) : Système d'accord par insertion. Un plongeur en Niobium modifie le volume résonant de la cavité.

Le plongeur mobile est une solution très utilisée et bien maîtrisée pour les cavités chaudes en cuivre [SCHWARZ98], [RIMMER01]. Les champs de fuite présents au niveau des ouvertures entraînent des dissipations additionnelles négligeables comparées à la puissance dissipée dans la cavité. Cependant, l'utilisation d'un tel système pour une cavité supraconductrice peut entraîner des complications. En effet, les fuites de champ sur les parties non supraconductrices (soufflets, brides, ...) peuvent engendrer une dissipation

additionnelle non négligeable au regard de la puissance dissipée par la cavité. Les capacités de liquéfaction de fluides cryogéniques étant limitées par la puissance de l'usine cryogénique, il ne peut être accepté que les cavités supraconductrices voient leur dissipation augmentée de plusieurs dizaines de pourcents. Il est donc essentiel de caractériser en conséquence le système d'accord.

Le plongeur est une pièce de Niobium massive sans soudures (cf. **Figure 1-23b**). Etant creux, il est refroidit efficacement par l'hélium liquide du circuit primaire. Un système de cloche montée sur un soufflet fait la liaison avec celui-ci. Le plongeur est mis en contact avec la cavité par un soufflet en acier inoxydable. Sa course est limitée à environ 8 millimètres. Une sortie de dégazage relie la cloche au réservoir tampon du cryomodule. Le déplacement du plongeur est assuré par un moteur pas à pas installé à l'extérieur sur la platine supérieure du cryomodule. Une tige, thermalisée sur l'écran cuivre, transmet le mouvement jusqu'au plongeur. Le mouvement de rotation du moteur est converti en translation via une vis sans fin. Les forces de pression d'environ 35 kg (entre le bain d'hélium à la pression atmosphérique et les parties sous vide) ont tendance à faire remonter le plongeur en position haute. Afin de maintenir sa position en fonctionnement il faut que le système de translation soit irréversible. Ceci est obtenu grâce à l'utilisation d'un système de démultiplication (réducteur et vis sans fin). Le facteur obtenu est d'environ $1 \mu\text{m}/\text{pas}$ apportant également une régulation très fine de la fréquence ($\sim 1 \text{ Hz}$).

La longueur de chaque plongeur est adaptée à chaque cavité selon leur désaccord statique. La pénétration maximale du plongeur dans la cavité est fixée à 150 mm depuis le haut du port et le diamètre est de 30 mm au maximum.

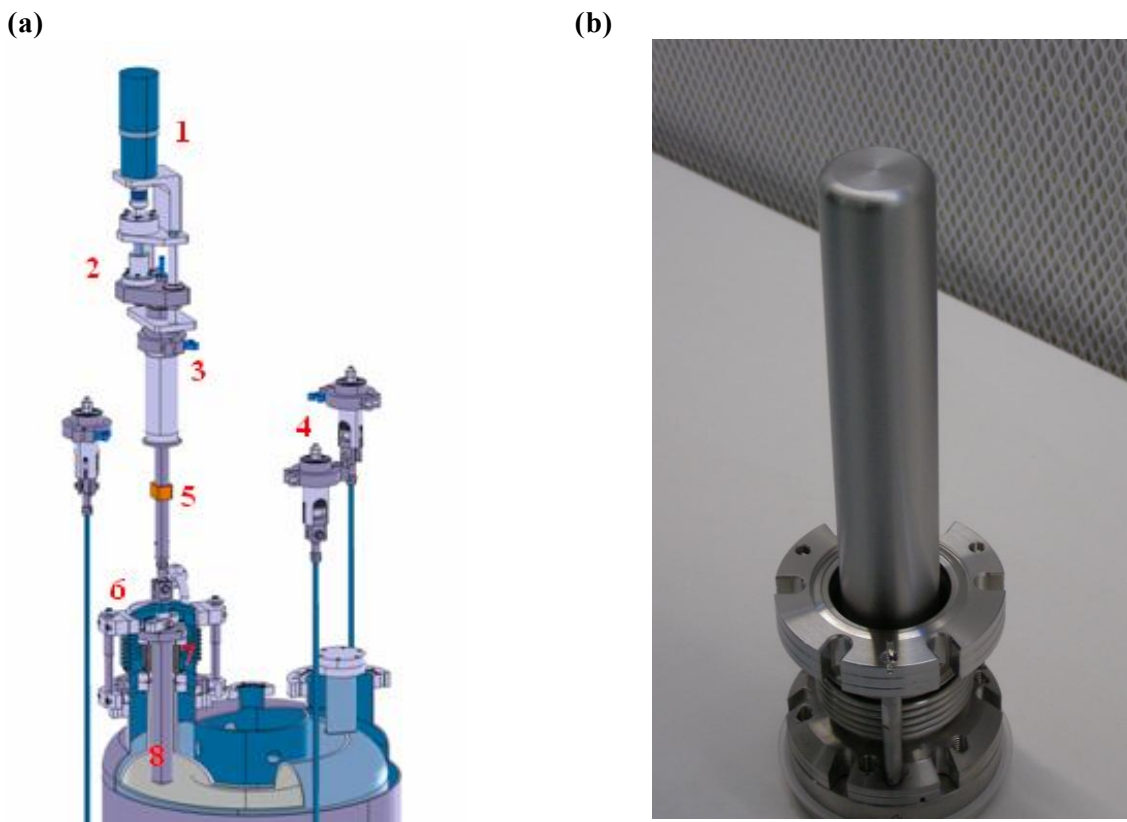


Figure 1-23 : (a) : Vue d'ensemble du système d'accord avec de haut en bas, le motoréducteur (1), la vis sans fin (2), la fixation sur la platine supérieure (3), les trois tirants de maintien vertical (4), la tige thermalisée (5), la cloche de fermeture (6), les deux soufflets (7) et le plongeur en niobium (8). (b) : Photographie du plongeur en niobium équipé du soufflet en acier inoxydable le reliant au port de la cavité. Trois tiges de guidages sont installées pour n'autoriser que la translation du plongeur.

2.3.5 Les systèmes annexes

2.3.5.1 Les systèmes de pompage

Deux systèmes de pompages sont nécessaires dans un premier temps. Un ensemble pompe à vis et pompe turbo-moléculaire, mobile, est installé pour le vide d'isolement des cryomodules (cf. **Figure 1-24b**) et des boîtes à vanne. Le vide dans le tube faisceau et donc des cavités et coupleurs est géré par un ensemble pompe à membrane et pompe turbo-moléculaire installés sur la croix de diagnostic insérée entre les quadripôles (cf. **Figure 1-24a**).

Une fois à froid, le cryopompage assure le maintien des vides d'isolement. Seuls les groupes de pompage sur le tube faisceau sont gardés au niveau des sections chaudes entre chaque cryomodule.

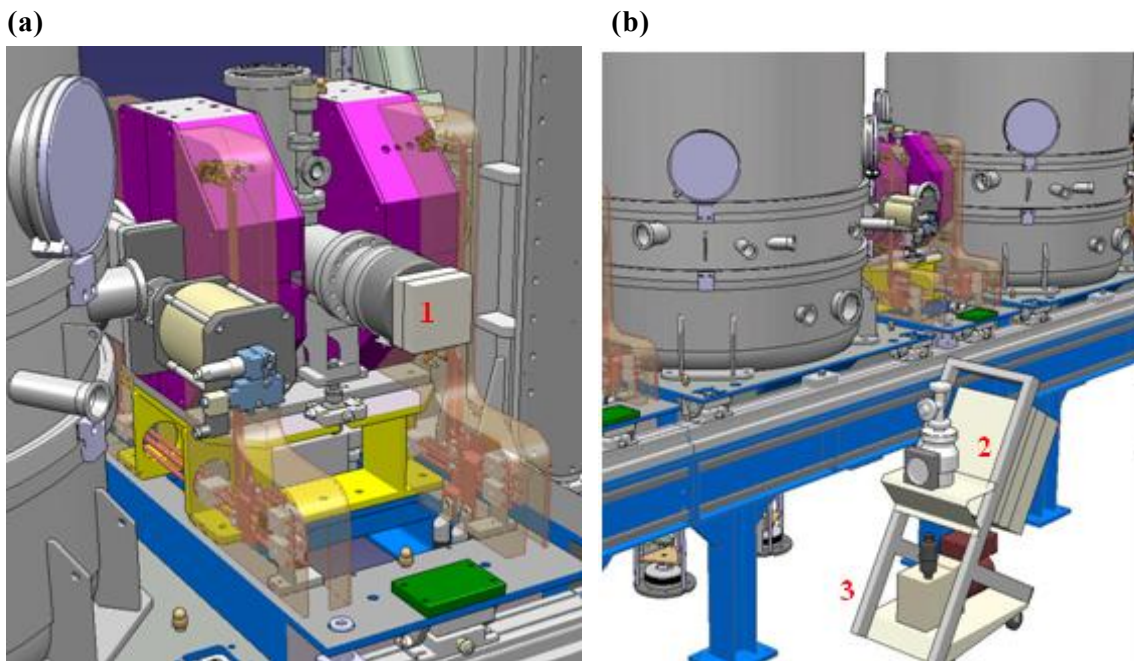


Figure 1-24 : (a) Groupe de pompage turbo-moléculaire (1) inséré entre deux quadripôles. Il assure le vide dans le tube faisceau au niveau des sections chaudes entre chaque cryomodule. Le cryopompage des cavités maintient le vide du tube faisceau à l'intérieur de chaque cryomodule. (b) : Groupe de pompage mobile composé d'une pompe primaire à vis (2) et d'une pompe secondaire turbo-moléculaire (3). Utilisé pour le pompage à chaud des cryomodules, il est retiré lorsque le cryomodule est froid. Le vide est ensuite assuré par cryopompage. Figures extraites de [FERDINAND08].

2.3.5.2 Les diagnostics

Que ce soit durant la phase de prototypage et de qualification ou en exploitation, il est nécessaire de suivre l'évolution de différents paramètres lors du fonctionnement de la machine. Certains diagnostics sont simplement informatifs, c'est à dire passifs. Ils permettent de suivre quelques paramètres ou de pouvoir localiser et identifier un dysfonctionnement ou une panne éventuelle. D'autres, quant à eux, sont des diagnostics indispensables à la régulation cryogénique du cryomodule. Le tableau suivant récapitule les principaux diagnostics installés sur le cryomodule (cf **Tableau 1-3**).

Tableau 1-3 : inventaire non exhaustif de l'instrumentation nécessaire sur le cryomodule

Emplacement	Grandeur mesurée	Type de capteur	Rôle	Action sur
Boite à vannes	Pression	Jauge à vide combinée Leybold	Vide d'isolement de la boite à vanne	/
	Température	Sonde Cernox	Température d'entrée et de sortie hélium	/
Enceinte à vide	Pression	Jauge à vide combinée Leybold	Vide d'isolement cryomodule	/
Vannes	Position	Contacteur	Etat d'ouverture ou fermeture d'une vanne	/
Croix diagnostique tube faisceau	Pression	Jauge à vide combinée Leybold	Suivi du vide tube faisceau et cavité	Fermeture vannes faisceaux. Arrêt faisceau
Piquage latéral cryomodule	Pression	Jauge à vide combinée Leybold	Suivi du vide coupleur	Security box
Cavité	Température	Sonde type Cernox	Suivi des températures de la cavité	/
Ecran cuivre	Température	Sonde type Platine	Régulation chaufferettes + Suivi	Réchauffage écran
Réservoir tampon hélium	Température	Sonde type Cernox	Régulation en mode économie d'énergie	Vanne circuit remplissage haut
	Pression	Capteur de pression	Suivi et régulation de la pression du bain d'hélium	Security box (quench), vanne dégazage circuit hélium
	Niveau	Sonde supraconductrice + ponctuelles	Régulation en fonctionnement et changement de mode de remplissage	Vannes circuits remplissage haut et bas