

Accélérateurs

► **Projet ETOILE d'hadronthérapie par ions carbone**

J.-M. De Conto, J. Collot. Collaboration Université Claude Bernard Lyon 1/Université Joseph Fourier/IN2P3/CEA-DSM

An expertise of the european projects is under way to optimize the collaborations around the Rhône-Alpes hadrontherapy project. They will be followed by additionnal technical studies.

Ce centre de traitement des tumeurs cancéreuses sera basé sur un synchrotron accélérant les ions carbonés jusqu'à une énergie finale de 400 MeV/uma, ce qui correspond à une pénétration de 27 cm dans les tissus. Trois salles de traitement sont prévues, avec, en option pour l'une d'elles, une tête rotative isocentrique. Le budget du centre est de 88 M€ hors taxes (prix novembre 2001) pour le scénario avec tête rotative. L'année 2001 s'était terminée par la présentation de l'avant-projet sommaire aux autorités régionales.

ETOILE présente de nombreux points communs avec les projets allemand (Heidelberg) et italien (Pavie) en termes de sous-ensembles. L'injecteur est commun, le synchrotron est celui adopté par les Italiens, la distribution du faisceau aux salles est voisine du système allemand, par exemple.

Un groupe d'expertise UCBL/CEA/ESRF/IN2P3/IPNL a été mis en place courant 2003. Sa principale mission est d'analyser les projets d'Heidelberg et Pavie, notamment au niveau du synchrotron, de façon à guider, du point de vue technique, les futures décisions de collaboration qui devraient être prises rapidement par la direction du projet. L'objectif est de bénéficier au maximum des études détaillées déjà menées par les autres projets en termes de délais, de coûts et de dossiers d'appels d'offre. La seconde mission, prévue pour 2004, portera sur des études techniques complémentaires et l'aide à la définition de l'organisation de la future équipe projet.

► **SPIRAL**

Service Accélérateur, SSI, SERM. Collaborations IPNO, CEA/DSM/SACM, CEA/DIF/DPTA/SP2A, GANIL.

LPSC is involved in SPIRAL2 project, for ion sources, RF couplers design, beam dynamics and project coordination.

Durant l'année 2003, le LPSC a apporté une contribution à l'avant-projet détaillé (APD) de SPIRAL 2, au niveau des sources (deutons, ions légers, transformation d'état de charge « $1+/n+$ »), de la dynamique de faisceau, des coupleurs de puissance pour les cavités supraconductrices ainsi qu'au niveau de la coordination de la section « accélérateur » du projet.

Accélérateur : Dynamique de Faisceau pour SPIRAL2

J.-M. De Conto, E. Froidefond. Collaborations CEA/DSM/SACM, GANIL, IPNO

High Energy Beam Transport design, as well as interaction with residual gas have been studied. The design of a density uniformization system has been made.

La contribution du LPSC porte sur la définition des lignes de distribution du faisceau primaire, et notamment dans le cas des deutons de 40 MeV à 5 mA moyens. La simu-

lution particulière a permis de valider les structures proposées par le GANIL. L'étude du grossissement d'émittance ainsi que de l'échange de charge a montré que ces phénomènes sont négligeables dans l'accélérateur linéaire supraconducteur (là où les pertes deviennent inacceptables). D'autre part, une structure basée sur des éléments de focalisation non-linéaires (octupôles) a été proposée pour uniformiser la distribution de puissance sur la cible (dans le plan vertical uniquement).

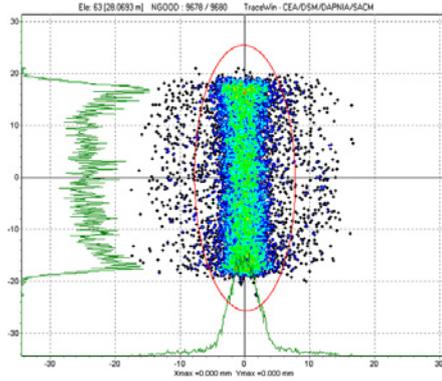


Figure 1 : Distribution du faisceau sur la cible, uniformisée en vertical. La cible tourne selon un axe vertical et le dépôt de puissance est alors homogène dans les deux dimensions.

Coupleurs de puissance des cavités supraconductrices de SPIRAL 2

M. Fruneau, J.-M. De Conto, A. Garrigue, Y. Gomez-Martinez, E. Vernay, F. Vezzu
Collaboration P. Balleyguier (CEA/DIF/DPTA/SP2A Bruyères le Chatel)

RF power couplers for the superconducting linac of Spiral 2 are under development. RF and thermal calculations for the 88 MHz, quarter-wave resonators have been made. Issues of the critical points of the coupler design have been studied.

Les coupleurs servent à transférer la puissance RF des amplificateurs aux cavités accélératrices supraconductrices des cryomodules de l'accélérateur de deutons. Ils doivent assurer ce transfert depuis la température ambiante jusqu'à 4 K et l'étanchéité entre le vide de l'accélérateur et l'atmosphère. De plus, ils peuvent éventuellement permettre un couplage variable pour une bonne adaptation de l'amplificateur aux cavités en fonction de la tension d'accélération demandée et de l'intensité du faisceau.

Dans une première étape, les coupleurs ont été prévus pour des cavités demi-onde à 176 MHz, puis pour des cavités quart d'onde à 88 MHz.

L'étude initiale, inspirée de celle de TESLA, basée dans notre cas sur l'utilisation d'une seule fenêtre cylindrique en alumine à température ambiante, assurant l'étanchéité entre l'atmosphère et le vide, a été reprise pour satisfaire ces nouvelles conditions. Le conducteur central en cuivre est à la température ambiante et son enfoncement variable dans le résonateur modifie le couplage. Un soufflet sur le conducteur externe permet le déplacement du conducteur central du coupleur et du connecteur RF. Le conducteur externe et le soufflet sont en acier inoxydable cuivré électrochimiquement.

Les études RF sur le couplage ont été menées simultanément au LPSC avec le logiciel HFSS et à Bruyères le Chatel avec le logiciel MAFIA. À partir de ces calculs, les études thermiques aux conditions maximum de puissance ont montré que la température de l'extrémité d'antenne pouvait atteindre 330 K. Des études préliminaires, dans une géométrie cylindrique ont montré que le risque de multipactor pouvait être exclu. Après concertation avec des entreprises pour la partie mécanique et pour le cuivrage, les processus de fabrication et les tests préliminaires ont été définis pour la réalisation des éléments les plus critiques d'un premier coupleur prototype courant 2004. Des tests en puissance sont prévus début 2005 sur un banc qui devra être étudié et financé.

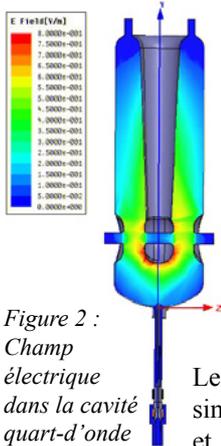


Figure 2 : Champ électrique dans la cavité quart-d'onde à 88 MHz.

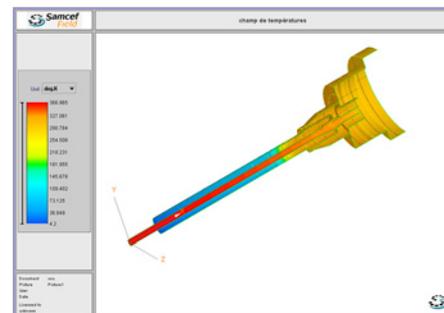


Figure 3 : Températures dans le coupleur.

► Accélérateurs de protons pulsés de haute intensité

M. Fruneau, J.-M. De Conto, Y. Gomez-Martinez. Collaboration CEA/CERN/IAP-FU/IN2P3/INFN/RAL/GSI

LPSC participates to the HIPPI Joint Research Activity, within the 6th European Framework Programme, in the RF and beam dynamics domains.

L'année 2003 a vu la mise en place de l'activité associée (Joint Research Activity) HIPPI (High Power Pulsed Proton Injector) dans le cadre du 6^e PCRD, et qui se déroulera sur cinq ans. Le LPSC aura pour charge la coordination du lot de travaux (Work Package) numéro 2 portant sur les structures accélératrices à température ambiante. Les contributions scientifiques prévues portent sur la conception d'un nouveau type de cavité, pour lequel une thèse est prévue, une contribution à la suite des études commencées sur le DTL d'IPHI, les coupleurs pour cavités supraconductrices, et la dynamique de faisceau.

► Collaboration avec Thomson Tubes and Displays

J.-M. De Conto, R. Poux (stagiaire DESS), Thomson Tubes and Displays (Genlis)

An industrial collaboration has been set up with Thomson Tubes and Displays for modelling and optimizing electrons guns for television tubes.

Une collaboration a été entreprise autour de la modélisation des canons à électrons de tubes image de télévision. En 2002, une formation à l'optique électronique a été donnée aux ingénieurs de Thomson à Genlis (Côte d'Or). En 2003, un stage de DESS a porté sur la modélisation de la zone de formation du faisceau, qui intègre la thermique de la cathode (énergie initiale des électrons), la charge d'espace longitudinale et transverse (qui caractérise le courant extrait) et la focalisation des premières électrodes. Ce premier modèle, qui a permis de définir les conditions initiales du faisceau, et de reproduire les mesures, devra être étendu au canon complet, et jusqu'à l'écran. Cette étude demandera la modélisation d'éléments complexes (lentilles multi-faisceau) et devra intégrer les non-linéarités. Cette collaboration sera basée sur une thèse CIFRE et un accord de collaboration.

► IPHI : tests en puissance de la maquette du DTL

*M. Fruneau, J.-M. Carreta, J.-M. De Conto, A. Fontenille, E. Froidefond, M.-L. Lombard, D. Marchand, R. Micoud, G. Pétryszyn, M. Planet, J.-C. Ravel, SREM, P. Balleyguier^a, G. Congretel^a, P.-E. Bernaudin^b, R. Hajdas^c, E. Montesinos^c, M. Vretenar^c
Collaborations ^aCEA/DIF/DPTA/SP2A Bruyères le Chatel, ^bCEA/DAPNIA/SACM Saclay, ^cCERN/AB/RF*

High power tests of the short DTL model have been done in a test vault at CERN Geneva. The model has been built by the CEA and the 50 kW 352 MHz amplifier has been provided by the CERN. The LPSC was in charge of the installation, data logging and RF control and measurements. After power conditioning, 43 kW were delivered to the cavity. Accelerating voltage measurements by the end point of the X rays proved to be effective up to 30 kW.

Introduction

Le projet IPHI (Injecteur de Protons de Haute Intensité) est un projet CEA-IN2P3/CNRS concernant la partie basse énergie pour des accélérateurs de protons, pouvant atteindre 1 GeV, plusieurs dizaines de mA continus, dans le cadre de plusieurs applications : réacteurs commandés par accélérateurs, incinérateurs, sources de spallation, production d'ions exotiques.

Dans cet ensemble, un accélérateur linéaire à 352 MHz de type DTL (Drift Tube Linac) amène le faisceau de 5 MeV à 11 MeV. Il comporte 51 tubes de glissement. Une maquette comportant 3 tubes de glissement équipés de quadripôles a été réalisée par le CEA pour valider les solutions techniques retenues pour le DTL à partir d'essais en puissance RF en continu sans faisceau : acier inoxydable cuivré intérieurement et extérieurement, répartition des circuits de refroidissement, joints RF.

Un tube de glissement vide et deux tubes de glissement équipés de modèles différents de quadripôles (à conducteurs creux et à conducteurs pleins) ont servi à comparer ces deux technologies.

Après des essais à basse puissance à Saclay, la maquette a été testée, sur une place-test aménagée dans le hall du CERN/PS équipée d'un générateur 50 kW à tétrode.

Dans le cadre d'un accord entre le CEA, l'IN2P3 et le CERN, le LPSC a eu la charge de l'implantation au CERN, de réalisation de la partie RF à bas niveau, des mesures des tensions accélératrices, de l'acquisition des paramètres RF et thermiques et des mesures de déplacement des tubes de glissement. Conjointement avec le groupe du CEA, le LPSC a participé à la campagne de mesures

Installation

Le LPSC a étudié et réalisé l'implantation au CERN de la maquette : supports, raccordements aux fenêtres et guides 352 MHz, outillages de manutention et centrage des tubes de glissement, circuits de refroidissement, construction de la casemate et de la porte blindée, câblages, intégration des mesures de déplacement et de tension.

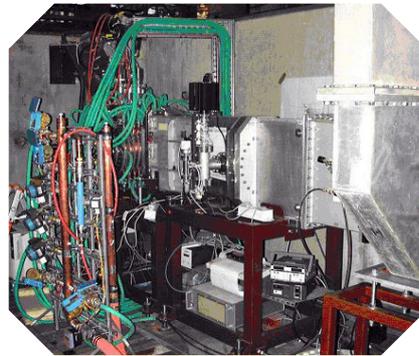


Figure 4 :
La maquette
du DTL dans
la place-test
au CERN.

Acquisition

Le système d'acquisition des mesures réalisé sous Labview et contrôlé par PC, a permis la mesure des températures par thermocouples de tous les points critiques de la maquette, des paramètres RF (fréquence, niveaux et puissances), des débits hydrauliques ainsi que des tensions et courants des quadripôles. Il a été très utile dans la vérification des puissances et dans la validation des solutions retenues pour le refroidissement de la cavité et des quadripôles.

RF bas niveau

Les régulations d'accord de fréquence, de niveau, les mesures RF et les dispositifs de pulsation pour le conditionnement en puissance de la cavité ont été testés sur une maquette simple (pill-box) à bas niveau au laboratoire. Cet ensemble a ensuite été inséré dans la chaîne de puissance au CERN.

Campagne de mesures

Après mise en place et tests sous vide à 300 W de la maquette et contrôle des asservissements, l'amplificateur 50 kW préalablement remis en service et testé sur charge à eau a été raccordé à la maquette. La montée en puissance en pulsé à 40 kW puis le passage progressif en continu ont pu être faits après reprise de l'étanchéité et de la géométrie d'un des tubes de glissements. Les essais en puissance ont permis de valider la tenue en tension des tubes accélérateurs, la technologie de la maquette et de retenir la technologie des quadripôles à conducteurs pleins.

Mesure des tensions accélératrices

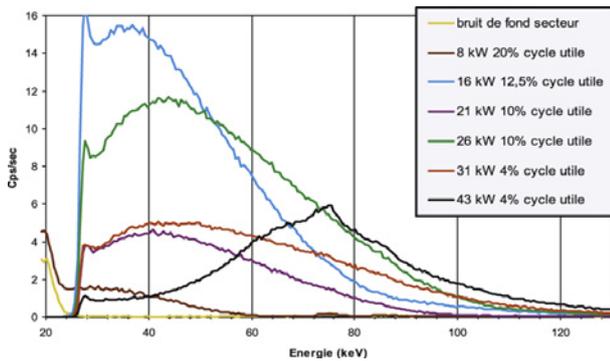


Figure 5 : mesure des tensions par l'énergie maxi des X.

Indépendamment des prises de tension étalonées du résonateur, une mesure par détecteurs Germanium de l'énergie maximum des rayons X émis dans les espaces accélérateurs a permis la mesure directe des tensions accélératrices et de contrôler les paramètres RF de la cavité. À moins de 30 kW de puissance crête, les mesures de tensions sont bien exploitables et montrent la pertinence de la méthode. Cependant au-delà, le flux de rayons X est trop important pour la détection. Une collimation et un blindage réduisent ce taux mais entraînent la production de rayonnement de freinage qui dégrade la linéarité. L'éloignement

du détecteur qui aurait permis de pallier cet inconvénient n'a pas été possible en raison des dimensions réduites de la casemate.

Mesures de déplacement des tubes de glissement

Compte tenu des très hautes intensités à accélérer (jusqu'à 100 mA moyens), la focalisation dans le DTL est très forte avec des ouvertures très réduites. Ceci conduit à des tolérances d'alignement d'axes magnétiques de l'ordre de cinq centièmes de millimètre. La marge tolérée pour les déformations dues aux dilatations d'origine thermique est donc d'environ 3 centièmes. Un dispositif optique classique de mesure n'a pu être mis en œuvre (impossibilité de positionner des mires en matériau isolant dans des zones de champ électrique). Le LPSC a proposé et développé un système interférométrique simple. À l'aide d'un faisceau laser, on mesure la variation de position verticale d'un fil conducteur horizontal situé dans les tubes de glissement. Cette méthode a permis de montrer que les déformations restaient dans les tolérances. Un système de mesure magnétique « à froid » basé sur un fil tendu resterait à développer pour aligner les axes magnétiques lors du montage du DTL.

GENEPI

M. Fruneau, S. Albrand, J.-M. Carretta, J.-M. De Conto, A. Fontenille, E. Froidefond, A. Garrigue, M.-L. Lombard, M. Luffroy, D. Marchand, R. Micoud, S. Muggéo, A. Patti, G. Pétryszyn, M. Planet, J.-C. Ravel, J.-P. Richaud, J.-P. Scordillis, C. Vescovi, C. Konte et le groupe de physique des réacteurs
 Collaborations CEA-Cadarache, SPEX/LER et SPEX/LPE

GENEPI 1 has been moved from Grenoble to the MASURCA reactor in Cadarache. The first coupling with a deuterium target to the reactor in 2001 has been followed by experiments with tritium targets in November 2002 in the scope of the MUSE experimental program on accelerator driven reactors. The accelerator is now operated by the MASURCA team with remote supervision from Grenoble. Experiments with deep modulation of the beam pulse frequency required modifications of the electronics to prevent the fall of the safety rods.

GENEPI 2 has been built at the LPSC and is running since the end of 2003. Like GENEPI 1 it is a pulsed 250 keV deuteron accelerator devoted to production of neutrons for the PEREN project. The beam may be focused on two target positions located either in a light material block (Carbon or Teflon) or lead block already used with GENEPI 1. Major differences concern the beam optics and neutron production monitoring by silicon detectors in line of sight of the target.

● GENEPI 1

Introduction

À partir de la fin 2001, l'accélérateur GENEPI 1 a été exploité sur le réacteur MASURCA à Cadarache dans le cadre du programme MUSE, première expérience d'une installation dédiée à l'étude des réacteurs pilotés par accélérateurs dans le cadre du GDR GEDEPEON (précédemment GEDEON).

GENEPI (GÉNérateur de NEutrons Pulsés Intense) accélère des deutons à 250 keV qui produisent des impulsions de neutrons (600 ns à mi-hauteur) sur une cible deutérée ou tritiée au cœur du réacteur expérimental MASURCA. Il a été conçu, construit, qualifié puis exploité au LPSC de 1996 à 1999.

Après sa mise en place à Cadarache au premier semestre 2000, les autorités de sûreté ont autorisé une mise en service par étapes ainsi que les modifications de chargement du réacteur pour aboutir en novembre 2001 au premier couplage avec le réacteur légèrement sous-critique et une cible deutérée (MUSE 4). Le programme expérimental commencé avec le couplage avec cible deutérée en configuration SC0/1086 cellules s'est poursuivi avec cible tritiée en configuration SC0/1108 cellules en novembre 2002.

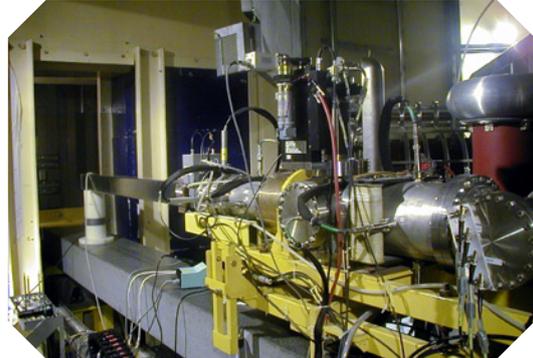


Figure 6 : GENEPI 1 dans le local accélérateur, avant la rentrée dans le cœur de MASURCA. (Courtoisie CEA Cadarache)

Fonctionnement

Depuis la première mise en service, les seules interventions notables ont été un changement de filament et des joints du duoplasmatron, le remplacement d'une pompe turbomoléculaire et d'une carte électronique de commande.

Dès le redémarrage à Cadarache, l'intensité crête au bout de doigt de gant est de 50 mA et la largeur à mi-hauteur, confirmée par la détection des particules diffusées est de 500 ns. Ceci correspond à un courant moyen de 30 μ A à la fréquence de 1 kHz.

Exploitation

L'équipe de Cadarache, après une période de formation, a désormais la charge de l'exploitation de GENEPI. La télésurveillance depuis le LPSC a permis le suivi de l'accélérateur et, à plusieurs reprises, le diagnostic d'incidents de fonctionnement, réduisant ainsi les interventions directes.

Modulation de fréquence

L'intensité du faisceau et donc la production de neutrons peuvent être contrôlées en modifiant les paramètres de la source, mais la méthode privilégiée est le contrôle de la fréquence des impulsions qui conserve leur forme. Pour les études sur les neutrons retardés du réacteur, la fréquence doit varier entre deux valeurs extrêmes (typiquement 300 Hz et 4 kHz). Ceci est fait via une entrée de modulation sur le tiroir de commande. Alors que la décroissance de la fréquence est sans contrainte, le tiroir en limite la montée qui doit se faire avec des temps de doublement plus longs que celui des neutrons dans le réacteur pour éviter la chute des barres de sécurité. De plus, la pente de montée du courant moyen sur cible (dérivée logarithmique) est surveillée ; une sécurité agit préventivement en remettant la fréquence à sa valeur minimum, en cas de fausse manœuvre ou à la suite de claquages, lors de remontées rapides du courant de faisceau.

● GENEPI 2

Construction

La construction d'un deuxième générateur de neutrons pulsés, GENEPI 2, destiné aux expériences au LPSC pour le projet PEREN a été décidée en novembre 2001, les premières grosses commandes ont été passées dès la fin 2001. La majeure partie des études a eu lieu en 2002 parallèlement aux premiers lancements en fabrication. Le premier montage du duoplasmatron a été suivi par les premiers tests début 2003. Le premier faisceau à 200 keV à la sortie du tube accélérateur a été obtenu en mars et sur la cible en position finale en septembre. Les massifs de graphite et de plomb sont en place et les premières expériences avec une cible deutérée ont débuté dès décembre.

Pour réduire les délais de fabrication et les temps de développement, GENEPI 2 est une adaptation de GENEPI 1 au cahier des charges demandé par la physique : mêmes caractéristiques générales du faisceau : deutons pulsés à 250 keV, impulsion crête de 50 mA,

durée d'impulsion meilleure que 500 ns. Les modifications essentielles ont concerné les deux positions de la cible, la première à l'emplacement de deux massifs « légers » de graphite ou de téflon, la deuxième dans le massif de plomb précédemment utilisé pour GENEPI 1.

L'utilisation des mêmes équipements permet également une meilleure utilisation des équipements et pièces de rechange.

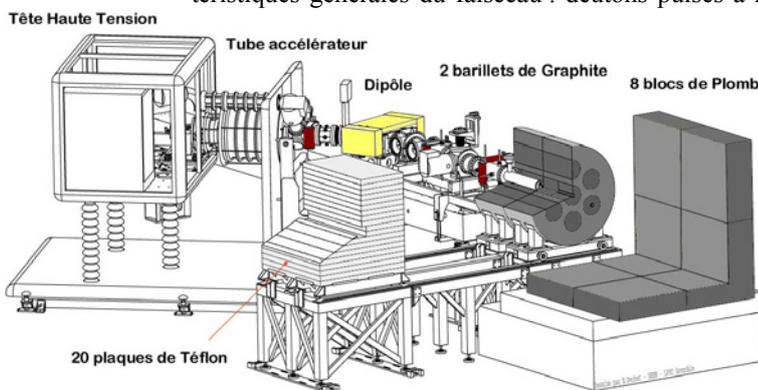


Figure 7 : Vue schématique de GENEPI 2, avec le doigt de gant court dans le bloc de graphite.

Mécanique

GENEPI 2 a repris l'emplacement de GENEPI 1 dans l'alvéole A et réutilisé la même tête haute tension ainsi que la poutre en granit support de la voie de faisceau.

Après l'aimant de déviation, des quadrupôles électrostatiques assurent une focalisation à l'emplacement des massifs « légers » ou au cœur du massif de plomb. Des chariots permettent de mettre en place l'empilement des plaques de téflon ou les deux cylindres du massif de graphite. Comme précédemment, le massif de plomb est constitué de huit blocs de 8 tonnes chacun. Deux pontes de 1 tonne et 500 kg permettent la manutention des éléments de l'accélérateur et des blocs « légers ».

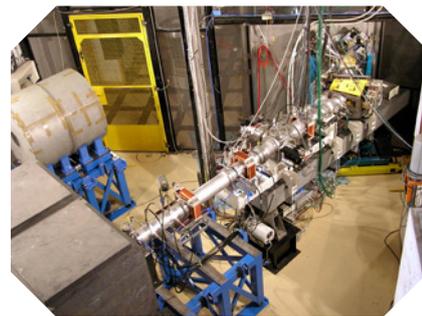


Figure 8 : GENEPI 2 avec cible dans le massif de plomb ; les barillets graphite sont à l'arrière-plan.

Optique de transport

L'optique de transport de GENEPI 1 a été recalculée pour amener le faisceau aux deux points cibles prévus. Dans chaque cas, le dernier quadrupôle est situé à 1 m environ de la cible. On a veillé à la normalisation technologique de ces quadrupôles. Des séries de mesure de profils et d'émittances ont été réalisées aux deux emplacements des cibles et à des points intermédiaires : sortie du tube accélérateur et sortie de l'aimant. Les premières mesures de transmission sont bonnes, des calculs complémentaires devront être faits pour l'améliorer et mieux maîtriser la forme du faisceau sur la cible.

Détection

Le monitoring de la production de neutrons est assuré par la détection des particules alphas de la réaction d-T ou des protons produits avec la même intensité que la réaction d-d. Le détecteur silicium est en vue directe de la cible neutronigène, il est monté directement sur le doigt de gant de la cible. Le rapport particules détectées/neutrons est simplement calculé à partir de la géométrie de la détection et est bien reproductible.

Durée de l'impulsion

Une première série d'essais a permis de réduire la durée de l'impulsion de faisceau en agissant sur l'impulsion d'arc du duoplasmatron. La ligne à décharge LC qui définit la durée de l'impulsion d'arc a été remplacée par des câbles coaxiaux 50 Ω en parallèle pour une meilleure adaptation d'impédance à l'arc. On a également ajusté leur longueur pour modifier la durée de l'arc. Des largeurs inférieures à 400 ns ont été obtenus avec 6 câbles de 40 m sans réduction de l'intensité crête.

De plus, un « court-circuiteur » d'arc, en cours de développement permet d'améliorer le front descendant.

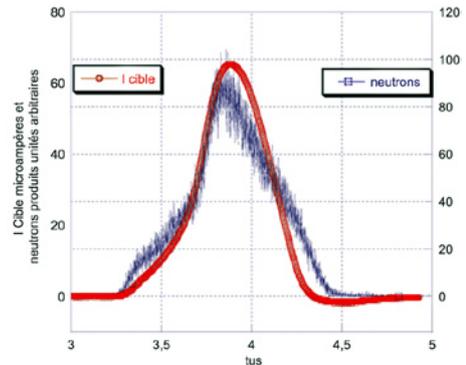


Figure 9 : Réduction de la largeur de l'impulsion de faisceau avec 6 câbles de 40 m.