

Projet INPHO

Tâche I : « Mise en place des lignes – Faisceauologie »

Bilan de la phase I

S. Anselmetti^{*}, J.M. Baze^{*}, A. Brasseur⁺, M. Cazanou⁺, S. Cazaux^{*},
B. Coadou⁺, G. Congretel⁺, P. Contrepois^{*}, A. Curtoni⁺, J.F. Denis⁺,
M. Desmons⁺, M. Dorlot⁺, M. Fontaine^{*}, M. Jablonka⁺, J.L. Jannin^{*},
J.M. Joly[#], F. Lainé[&], J.C. Launay[#], A. Lotodé^{*}, M. Luong⁺, P. Mattéi^{*},
P. Nardin⁺, J.L. Perrin⁺, J.C. Saudemont^{*}, C. Veysière^{*}

^{*} DSM/DAPNIA/SIS

⁺ DSM/DAPNIA/SACM

[#] DSM/DAPNIA/SENAC

[&] DRT/LIST/DETECS/SSTM/L2MA

Sommaire

1. Introduction	3
2. Les améliorations de l'accélérateur de SAPHIR	3
2.1. Les améliorations réalisées au cours de la phase I.....	3
2.1.1. La distribution de la puissance.....	3
2.1.3. L'obtention du vide poussé.....	3
2.1.5. Les diagnostics	3
2.2. Les résultats obtenus.....	4
2.3. Quelques propositions pour la phase II	4
2.3.1. L'alimentation du canon	4
2.3.2. Le système de commande.....	4
2.3.3. L'alimentation haute tension	5
3. L'étude de lignes de transport pour le faisceau d'électrons.....	5
3.1. Le cahier des charges	6
3.1.1. Rapprocher la cible de conversion du colis.....	6
3.1.2. Générer un faisceau quasi-monochromatique	6
3.2. Les calculs de dynamique faisceau	6
3.2.1. Etude de faisabilité d'une ligne capable de transporter tous les électrons (ligne directe)	8
3.2.2. Etude de faisabilité d'une ligne de sélection en énergies (ligne déviée)	8
3.3. L'implantation des lignes	8
4. Les réalisations	10
4.1. Le matériel disponible.....	10
4.2. Les principales réalisations mécaniques	11
4.3. Le contrôle commande	13
4.4. La mise en service de la ligne directe	13
4.5. Les résultats obtenus.....	15
4.6. Quelques propositions pour la phase II	15
5. Conclusion.....	15
6. Références.....	16
Annexe : Résumé des caractéristiques initiales de l'accélérateur de SAPHIR	17

1. Introduction

Le projet INPHO a pour objectif l'optimisation de l'installation SAPHIR pour la mesure par photofission des colis de déchets anciens des sites civils du CEA contenant des transuraniens^[1]. Une fois optimisé, ce procédé d'analyse non destructive pourra se révéler utile au tri de ces déchets en MA, FA, voire TFA.

Un des volets de ce projet est l'amélioration des qualités du faisceau issu de l'accélérateur linéaire de SAPHIR avant la conversion de l'énergie des électrons en photons^[2]. Cette amélioration des performances passe à la fois par des aménagements sur l'accélérateur lui-même et par l'étude et la réalisation de lignes de transport des électrons sous vide.

Dans le présent document, nous passerons d'abord en revue les améliorations réalisées sur l'accélérateur dès la phase I du projet et nous résumerons les résultats qu'elles ont permis d'obtenir quant aux performances de la machine.

Nous décrirons ensuite les différents aspects de l'étude de deux lignes de transport sous vide depuis les calculs de dynamique faisceau jusqu'à l'implantation des différents éléments en passant par la conception d'un contrôle commande.

A la suite de la décision prise d'interrompre l'étude des neutrons prompts^[3], des deux lignes étudiées, seule la ligne directe a été réalisée entièrement. Nous décrirons en détails cette ligne dont la présence a contribué au succès des résultats expérimentaux de mesure des neutrons retardés.

2. Les améliorations de l'accélérateur de SAPHIR

Un résumé des caractéristiques initiales de la machine est présenté en annexe de ce document. Dans ce paragraphe, nous ferons d'abord état des opérations réalisées durant la phase I du projet ainsi que des résultats qu'elles ont permis d'obtenir. Nous passerons ensuite en revue quelques propositions d'améliorations supplémentaires destinées à accroître encore les performances de la machine et à lui assurer une plus grande fiabilité.

2.1. Les améliorations réalisées au cours de la phase I

Les sous-paragraphe suivants décrivent les améliorations apportées à certains des éléments de l'accélérateur qui nécessitaient une intervention.

2.1.1. La distribution de la puissance

Auparavant, la répartition de la puissance était 3/4 sur la 2^{ème} section, 1/4 sur la 1^{ère} section avec un déphaseur sur la partie basse puissance. Pour modifier l'énergie moyenne du faisceau, le seul paramètre sur lequel on pouvait agir était la puissance envoyée dans l'ensemble des deux sections, cette opération nécessitant de corriger à chaque fois le déphasage.

Un atténuateur a été interposé sur le bras d'alimentation de la 2^{ème} section. Ceci a permis de résoudre les problèmes de difficulté de réglage. La première section étant toujours alimentée à pleine puissance, il suffit maintenant de régler l'atténuation de la puissance dans la deuxième section pour obtenir l'énergie moyenne de faisceau désirée.

2.1.3. L'obtention du vide poussé

Le matériel de pompage n'était pas optimisé.

Le vide était assuré par une pompe turbo-moléculaire de 250 l/s associée à une pompe primaire qui fonctionnait en permanence. Cependant, un piquage existait sur la machine. Nous y avons inséré une pompe ionique de 200 l/s disponible au SACM avec son alimentation et sa vanne d'isolement. L'ancien groupe de pompage est conservé pour être utilisé lors des opérations de prévidage.

Par ailleurs, une vanne, à commande manuelle, sensée isoler l'accélérateur du système de transport, était défectueuse. Nous l'avons remplacée par une électrovanne au standard CF40 également disponible au SACM.

2.1.5. Les diagnostics

Il n'y avait pas de diagnostic direct sur la machine. Les diagnostics utilisés étaient indirects : la mesure du courant était effectuée en envoyant sur un oscilloscope le courant collecté sur la cible de

conversion. Des mesureurs de courant, développées au SACM pour d'autres projets, ont été adaptés au faisceau de SAPHIR. Ceux-ci ont été montés sur la ligne décrite au paragraphe 4.

2.2. Les résultats obtenus

La photo de la figure 1 représente l'accélérateur après les modifications.

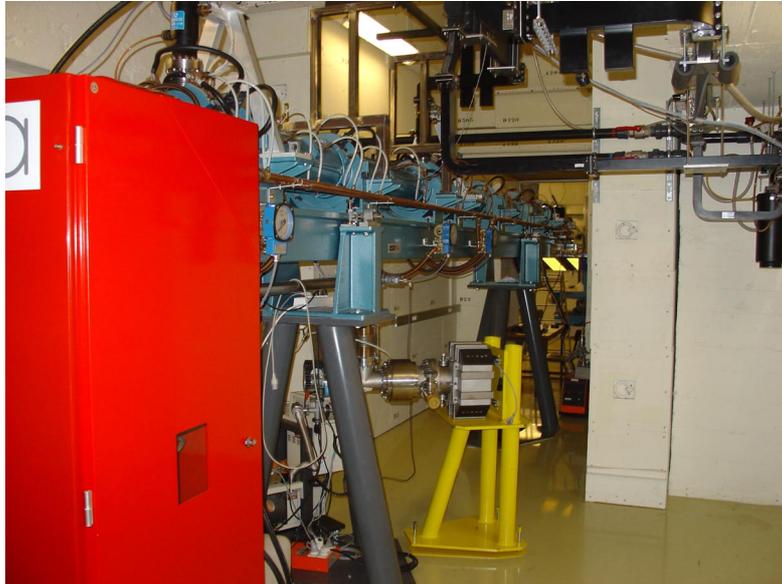


Figure 1 : L'accélérateur linéaire après installation de la pompe ionique et de l'atténuateur.

La pression dans la machine est mesurée par deux jauges situées, l'une à l'entrée, l'autre à la sortie du linac. Avant améliorations, celle-ci était de $\sim 10^{-6}$ torr. A l'heure actuelle, le vide limite est à une pression de $\sim 7.10^{-8}$ torr.

Par ailleurs, la machine est devenue plus stable et plus commode à régler avec un spectre énergétique plus étroit. La figure 2 compare deux spectres, l'un mesuré avant l'installation de l'atténuateur, l'autre après. Sur cette figure, on observe un rétrécissement du pic principal mais surtout une diminution importante des pics secondaires spécialement du côté des hautes énergies.

2.3. Quelques propositions pour la phase II

Même si les résultats précédents sont satisfaisants, le système pourrait se voir encore amélioré à la fois du point de vue de ses performances que de sa fiabilité. Dans les paragraphes suivants, nous allons passer en revue quelques unes des propositions d'amélioration dont certaines avaient déjà été émises dès le lancement de la phase I du projet et d'autres ont découlé de l'analyse des conditions opératoires.

2.3.1. L'alimentation du canon

Le canon à électrons est de type diode, l'anode étant à la masse et la cathode à chauffage direct. Il n'existe pas, jusqu'à présent, de réglage indépendant de l'intensité dans le pulse, le chauffage du filament étant assuré par des impulsions prélevées sur le modulateur du klystron via un transformateur.

Une alimentation du canon, indépendante de l'alimentation des sections, permettrait à la fois de régler l'intensité du faisceau et de compenser le phénomène de beam-loading généré dans les sections, ce qui devrait conduire à diminuer la largeur du spectre, notamment du côté des hautes énergies.

2.3.2. Le système de commande

Le système utilisé est ancien, basé sur des pré-réglages stockés, les réglages fins étant effectués manuellement, au moyen de potentiomètres.

Ce système désuet pourrait être efficacement remplacé par un contrôle commande piloté par PC.

2.3.3. L'alimentation haute tension

L'alimentation du klystron se fait actuellement via une armoire haute tension, refroidie à l'eau. L'expérience montre que le vieillissement de ses composants constitue un risque majeur quant à la fiabilité de la machine compte tenu notamment des problèmes liés au délai de leur approvisionnement en cas de panne.

L'acquisition d'une alimentation haute tension de nouvelle génération, pilotée au moyen d'un PC qui gèrerait également la sécurité et la carte chrono devrait rendre l'ensemble plus fiable.

Par ailleurs, il n'y a pas sur SAPHIR de thyatron de "secours". Les délais d'approvisionnement de ce composant étant très longs (plusieurs mois) il serait judicieux d'en approvisionner un.

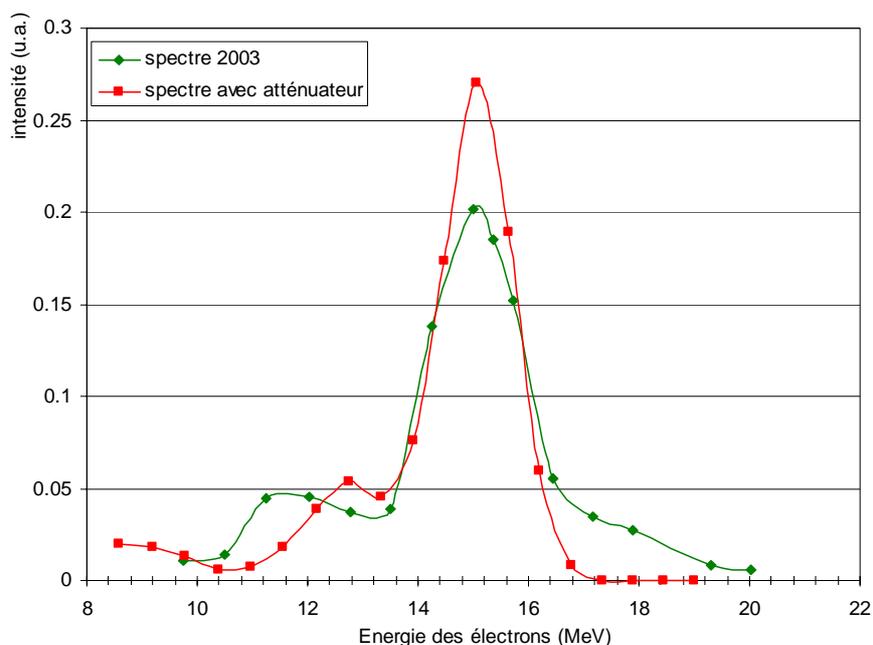


Figure 2 : Exemple de spectres obtenus avant et après l'installation de l'atténuateur^[4].

3. L'étude de lignes de transport pour le faisceau d'électrons

En parallèle aux améliorations de la machine, il nous a été demandé d'étudier la faisabilité de lignes de transports des électrons du faisceau.

Aux besoins de la physique, qui sont présentés dans les deux sous-paragraphes suivants, sont venues s'ajouter des contraintes spécifiques au projet.

La principale de ces contraintes était mécanique : l'implantation des deux lignes devait tenir compte de l'encombrement de la salle expérimentale par l'ensemble convoyeur de colis. De plus, on devait pouvoir utiliser l'une des lignes sans avoir à démonter l'autre.

Par ailleurs, en vue de minimiser les coûts et les délais d'approvisionnement, il nous a été demandé d'intégrer, dès l'étude, le plus possible de matériel récupéré des démantèlements de certaines INB (ALS, LURE) tels que des éléments magnétiques, du matériel de vide, des alimentations et des cartes électroniques pour le contrôle commande. . .

Enfin, ayant constaté que les éléments de SAPHIR ne correspondaient plus aux standards mécaniques actuels pour le vide poussé, nous avons décidé de dimensionner l'ensemble des lignes au standard CF40, ce qui impliquait de modifier le piquage existant en sortie de machine.

Dans ce paragraphe, après avoir rappelé quel était le cahier des charges initial, nous présenterons les résultats des simulations de dynamique faisceau correspondants pour terminer par l'implantation des lignes dans la salle expérimentale qui en découle.

3.1. Le cahier des charges

Le cahier des charges était double, correspondant à des objectifs de physique bien distincts. L'un des objectifs était de diminuer la distance entre la cible de conversion et le colis sans perdre de courant, l'autre était d'envoyer sur ce même colis un faisceau quasi-monochromatique. Ceci nous a conduits à étudier la faisabilité de deux lignes de transport différentes, l'une des lignes devant pouvoir être utilisée sans avoir à démonter l'autre.

3.1.1. Rapprocher la cible de conversion du colis

La distance entre le colis et la cible de conversion où sont générés les photons est un paramètre important des conditions expérimentales. Des simulations MCNP^[4] ont démontré que réduire cette distance devait contribuer à améliorer significativement la limite de détection notamment en augmentant le signal utile. Or, l'encombrement du convoyeur empêchait de générer les photons de conversion au plus près du colis.

C'est pourquoi, il nous a été demandé de construire une ligne sous vide capable de transporter la plus grande proportion possible des électrons issus du linac.

3.1.2. Générer un faisceau quasi-monochromatique

La mesure des neutrons prompts nécessitait, quant à elle, un faisceau de faible dispersion en énergie.

Les données qui nous ont été communiquées étaient les suivantes : l'énergie du faisceau devait pouvoir varier entre 10 et 30 MeV, avec une dispersion totale de l'ordre de 100 keV, et une transmission du courant au bout de la ligne d'environ 1%. Par ailleurs, l'énergie, la dispersion et le courant arrivant sur le colis devaient pouvoir être déterminés de façon très précise.

Il s'agissait donc de construire une ligne achromatique répondant à l'ensemble de ces spécifications et assortie d'un contrôle commande, outil indispensable pour maîtriser tous les paramètres.

3.2. Les calculs de dynamique faisceau

La définition de lignes de transport passe systématiquement par des calculs de dynamique de faisceau. Des codes spécifiques au calcul du transport de faisceaux d'électrons (transport, parmela) ont donc été utilisés pour vérifier la faisabilité des deux lignes avant toute poursuite de l'étude. Ce paragraphe présente le résultat des calculs finalisés pour chacune des lignes.

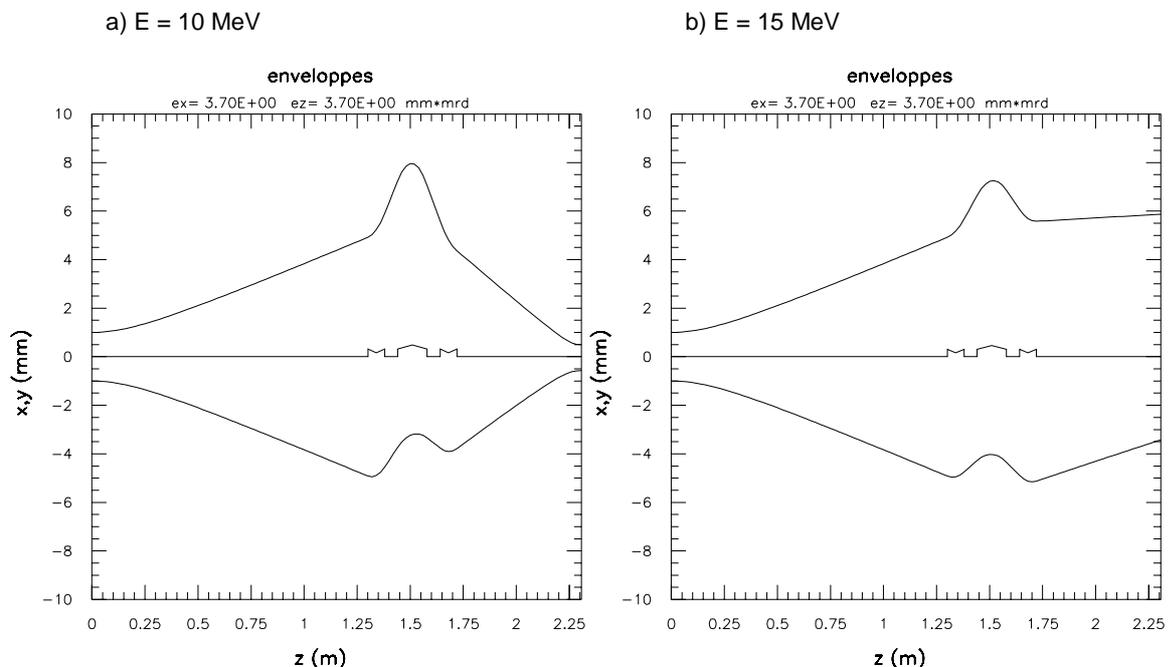


Figure 3 : simulation du transport des électrons dans la ligne directe depuis la sortie de l'accélérateur linéaire (à gauche) jusqu'à la cible de conversion en tungstène (à droite). L'enveloppe a représente le comportement des électrons de 10 MeV, l'enveloppe b celle des électrons de 15 MeV.

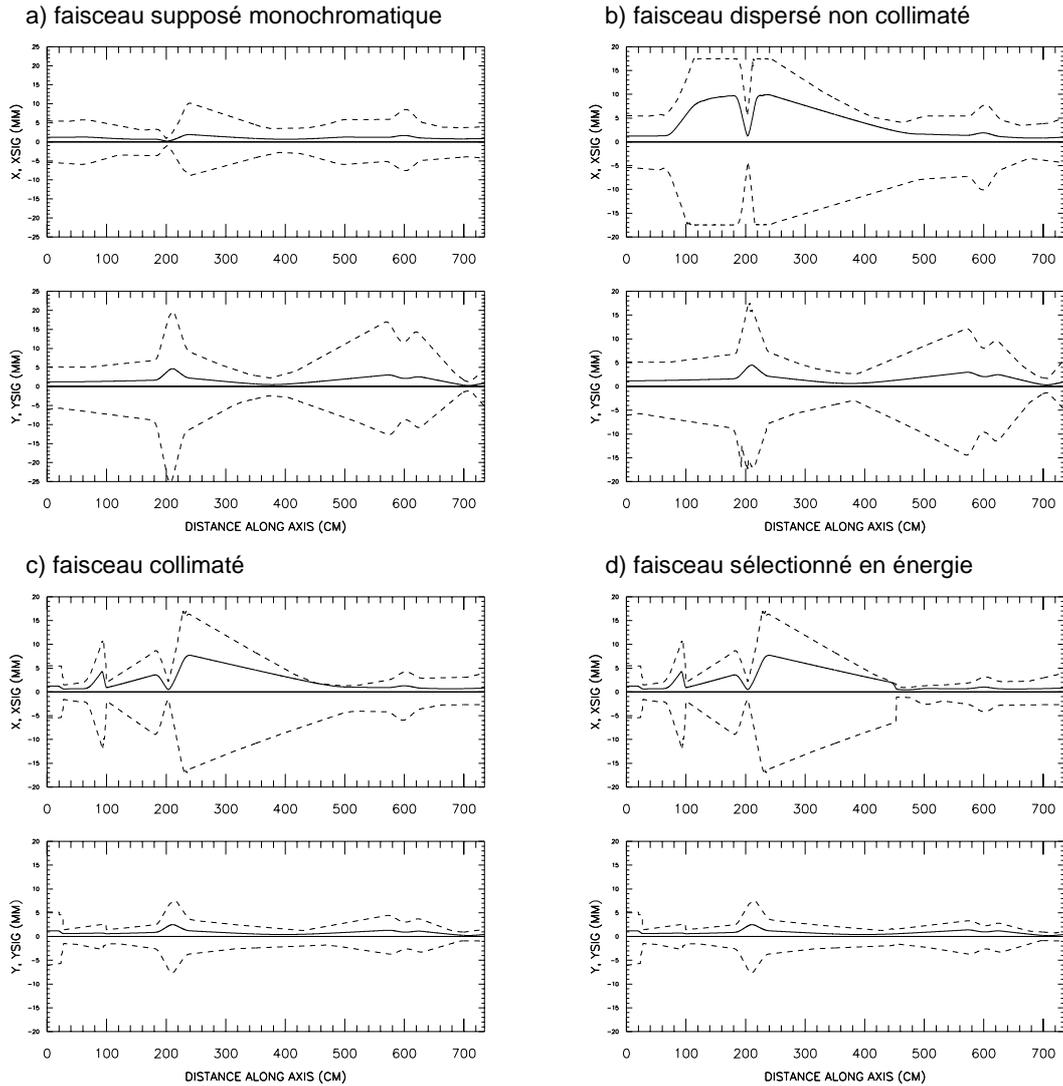


Figure 4 : simulation du transport d'électrons de 10 MeV dans la ligne de sélection en énergie depuis la sortie de l'accélérateur linéaire (à gauche) jusqu'à la fenêtre de sortie en aluminium (à droite) : a) faisceau supposé monochromatique, b) faisceau dispersé sans collimation, c) faisceau collimaté, d) faisceau sélectionné en énergie.

$n_p = 299(5000)$ $z = 729.17$ $E_{ref} = 10.00$ $E_{moy} = 9.98$ MeV $\sigma_x = 0.79$ mm
 $\varepsilon_N(x,y)_{in./fin.} = 62.80 / 32.25, 62.30 / 21.77$ $\sigma_\phi = 76.62$ $\sigma_E = 45.3$ keV

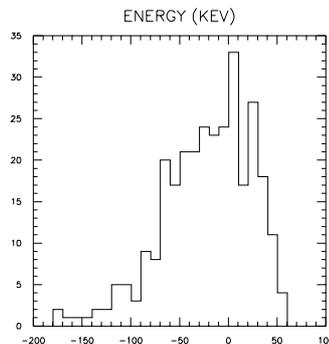


Figure 5 : Spectre des électrons arrivant sur la cible. La dispersion en énergie demandée est réalisable avec la ligne proposée.

3.2.1. Etude de faisabilité d'une ligne capable de transporter tous les électrons (ligne directe)

Dès l'énoncé des besoins, il nous est apparu qu'il était impossible de focaliser tous les électrons du faisceau sur la cible étant donné leur grande dispersion en énergie. Par contre, tout triplet composé de quadrupoles est capable de focaliser un faisceau monoénergétique sur une cible. Les simulations de transport de faisceau effectuées (avec le programme transport) nous ont démontré qu'en choisissant de focaliser les électrons les moins énergétiques, il était possible de guider correctement la quasi totalité du faisceau issu du linac moyennant un seul triplet. Parmi les triplets disponibles pouvant être utilisés dans la gamme d'énergies autour de 15 MeV, notre choix s'est porté sur un dispositif qui avait été développé pour l'injecteur de TTF et qui était le plus rapide à approvisionner.

La figure 3 représente l'enveloppe de faisceaux monochromatiques à 10 MeV et à 15 MeV pour un même réglage du triplet. Les hypothèses sur le faisceau à la sortie de l'accélérateur étaient les suivantes : émittance non normalisée du faisceau $\varepsilon = 3.7 \pi \text{ mm.mrad}$, taille du faisceau $\phi = 2 \text{ mm}$. On constate que, si l'on focalise les électrons de 10 MeV (enveloppe a), alors, les électrons de 15 MeV sont correctement guidés jusqu'à la cible (enveloppe b). Dans l'exemple représenté, la taille du faisceau sur la cible mesure alors 12 mm environ suivant l'axe horizontal et 8 mm environ suivant l'axe vertical.

3.2.2. Etude de faisabilité d'une ligne de sélection en énergies (ligne déviée)

Lorsqu'un faisceau présente un spectre énergétique très étendu, comme c'est le cas sur SAPHIR, un moyen de réduire cette dispersion est de sélectionner l'énergie souhaitée en montant une fente à la sortie d'un aimant de déviation. Compte tenu de la disposition de la salle expérimentale (figure 7), l'angle de déviation ne pouvait être trop important. Notre choix s'est porté sur un dipôle du LURE à 25° qui pouvait être utilisé correctement dans la gamme d'énergies qui nous intéresse. Pour des raisons de commodité, nous avons choisi de ramener l'axe du faisceau parallèlement aux rails du convoyeur, ce qui nécessitait un dipôle identique au premier également disponible au LURE. Cependant, la présence du convoyeur (figure 7) nous a contraints à éloigner les deux aimants l'un de l'autre de quelques mètres ($\sim 4.3 \text{ m}$).

Pour obtenir une ligne achromatique, dont la propriété est de transporter un faisceau indépendamment de son énergie, il faut insérer un triplet entre les deux aimants. Les spécifications de quadrupoles développés pour ELSA se sont révélées compatibles avec nos besoins. Ce choix nous permettait en outre d'économiser le temps et les coûts liés à l'étude d'un triplet spécifique.

Cependant, l'éloignement des dipôles dans une zone dispersive, imposé par l'encombrement de la salle, génère des tailles de faisceau très importantes. C'est pourquoi nous avons décidé de diminuer arbitrairement l'émittance du faisceau dans la ligne déviée au moyen de deux collimateurs situés, l'un devant, l'autre derrière l'aimant de déviation. Ainsi il devient possible de minimiser les risques d'impacts d'électrons sur les tubes à vide, source de bruit de fond actif difficile à maîtriser. Dans cette optique, le second collimateur aurait pu consister en un système de fentes qui aurait servi à la fois à agir sur les dimensions du faisceau et à sélectionner son énergie : la présence simultanée de la ligne directe interdit une telle utilisation (voir figure 7). Le positionnement de la fente a donc dû être reporté plus loin dans la ligne, juste devant le deuxième dipôle. Enfin, pour focaliser le faisceau sur le colis, il faut utiliser un second triplet. Un triplet qui répondait à nos spécifications était disponible au LURE.

La figure 4 représente le transport de faisceaux d'électrons de 10 MeV (calculé avec le programme parmela) pour un même réglage des éléments magnétiques. Les hypothèses sur le faisceau à la sortie de l'accélérateur sont les mêmes que précédemment : émittance non normalisée du faisceau $\varepsilon = 3.7 \pi \text{ mm.mrad}$, taille du faisceau $\phi = 2 \text{ mm}$. On constate qu'un faisceau d'électrons monochromatique (enveloppe a) serait transporté et focalisé correctement sur le colis alors qu'une partie du faisceau dispersé (enveloppe b) se perd dans les tubes faisceau dès la sortie du dipôle et jusque dans le premier triplet. L'introduction de collimateurs permet de remédier à ce problème (enveloppe c). L'insertion d'une fente horizontale réglable positionnée juste devant le second dipôle (enveloppe d) permet d'obtenir une dispersion en énergie dans la gamme demandée (figure 5).

3.3. L'implantation des lignes

Après avoir démontré par le calcul la faisabilité des deux lignes avec les éléments dont on dispose et en précisant les spécifications des éléments à approvisionner, nous avons obtenu le synoptique présenté sur la figure 6.

Ce synoptique a servi de base, à la fois pour l'approfondissement des études mécaniques et pour l'établissement du cahier des charges du contrôle commande qui seront présentés dans le paragraphe suivant.

La figure 7 représente l'implantation des lignes dans la salle expérimentale de SAPHIR. On constate que, si la ligne directe est représentée intégralement, seuls quelques éléments de la ligne déviée figurent sur le plan. En effet, alors que l'étude de la ligne directe a été menée à bien jusqu'au bout, l'étude des détails de la ligne déviée a été interrompue par la présentation des résultats remettant en cause la faisabilité de la mesure des neutrons prompts^[3].

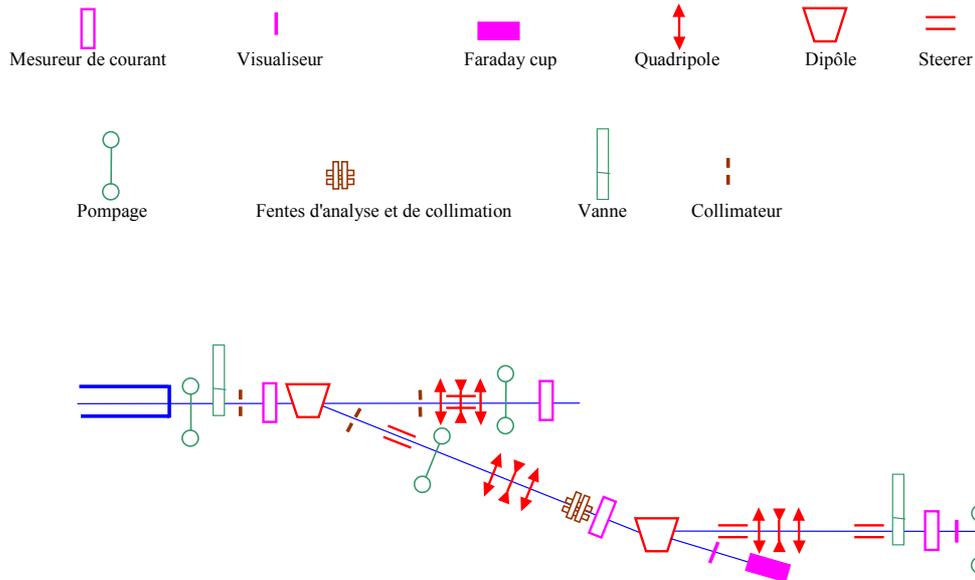


Figure 6 : synoptique des lignes à implanter auprès de l'installation SAPHIR

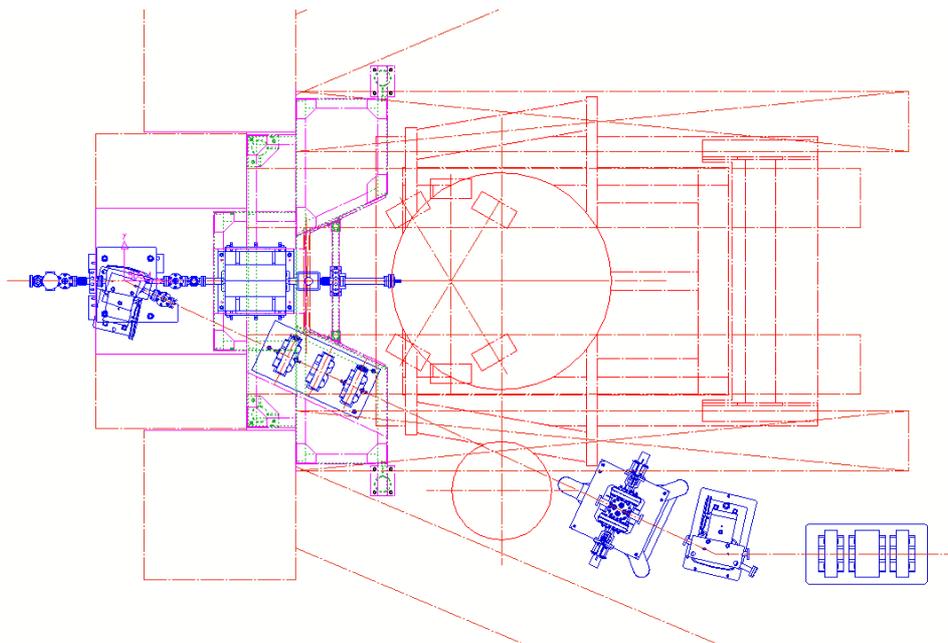


Figure 7 : l'implantation des lignes dans la salle expérimentale de SAPHIR : en rouge figurent les murs de la salle expérimentale et l'ensemble convoyeur de colis, en bleu, les éléments des lignes de transport.

4. Les réalisations

La remise en question de l'intérêt de la mesure des neutrons prompts^[3] a interrompu l'avancement des opérations sur la ligne déviée. C'est pour cette raison, notamment, que le contrôle commande qui aurait dû lui être associé n'a pas été réalisé. Cependant un certain nombre de développements avaient déjà été effectués qui seront présentés ici, en même temps que les réalisations effectuées pour la ligne directe.

La ligne directe complète est représentée en 3D sur la figure 8.

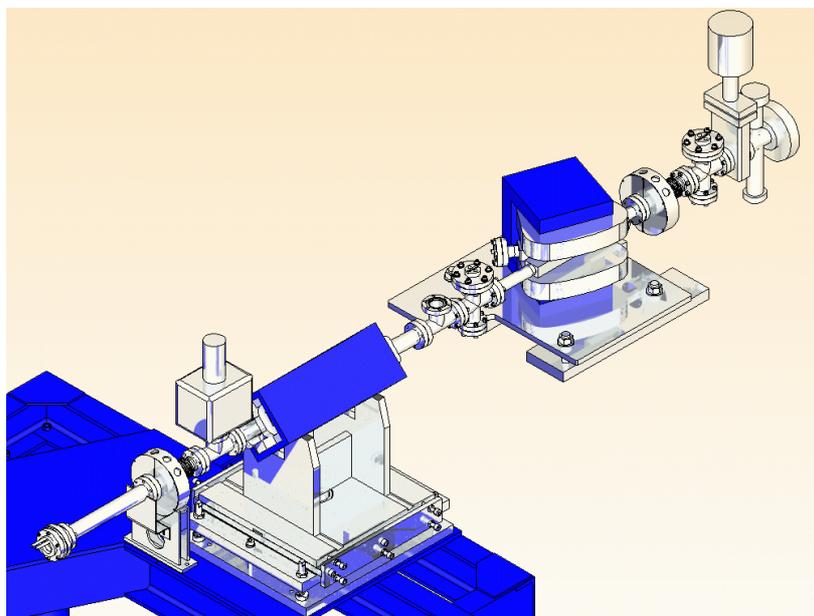


Figure 8 : vue 3D de la ligne de transport de faisceau montée en sortie de l'accélérateur.

Elle est constituée des éléments suivants (de droite à gauche sur la figure 8, la partie la plus à droite se situant à la sortie du linac), le tout étant au standard CF40 :

- un piquage sur lequel est montée une jauge et qui assure le passage au standard CF,
- une électrovanne,
- un collimateur refroidi à l'eau et isolé de la masse,
- un mesureur de courant,
- une chambre à vide dans le dipôle avec sortie à 25° pour les mesures de spectre,
- un 2^{ème} collimateur identique au précédent,
- un piquage pour le pré-vidage de la ligne,
- un triplet équipé de steerers pour le guidage des électrons,
- une pompe ionique,
- un 2^{ème} mesureur identique au précédent.
- un ensemble fenêtre de sortie + cible de conversion des électrons aux photons.

4.1. Le matériel disponible

Parmi tous ces éléments, certains étaient disponibles. C'est le cas de l'électrovanne, des mesureurs, du triplet, de la pompe ionique, des tés et tubes faisceaux. De même, pour le contrôle commande, les baies d'alimentations et l'ensemble des cartes d'électronique ont été récupérés après le démantèlement de l'accélérateur MACSE.

Avant montage, tous ces éléments ont été testés, voire adaptés aux besoins du projet. C'est ainsi que nous avons constaté que le triplet et les mesureurs pouvaient être utilisés tels quels pour la ligne directe, alors que l'utilisation des autres éléments nécessitaient des adaptations.

Dans le synoptique (figure 6), nous voyons que des mesureurs identiques à ceux de la ligne directe étaient prévus sur la ligne déviée. Cependant, sur cette seconde ligne, ils devaient pouvoir mesurer un courant 100 fois plus faible. Le signal devait donc être amplifié et filtré avant d'être envoyé sur un

oscilloscope. Les tests effectués ont démontré que, après amplification, on pouvait mesurer correctement le signal attendu.

4.2. Les principales réalisations mécaniques

Dans le souci de faciliter la maintenance des lignes, nous avons été conduits à modifier la première pièce située à la sortie de l'accélérateur. Il s'agit d'un piquage utilisé à la fois pour assurer le pompage et pour mesurer la pression à la sortie de la machine. Derrière cette pièce, tout est au standard CF, ce qui simplifie considérablement la maintenance (insertion rapide de matériel de rechange) et la réalisation d'éventuelles modifications ultérieures (par exemple, insertion d'un système de visualisation du faisceau).

Dans ce paragraphe, nous présentons en détails les éléments qui ont nécessité le plus d'étude.

Les collimateurs.

Les collimateurs sont des pièces dont le rôle principal est de délimiter les dimensions transverses du faisceau. La figure 9 représente une vue 3D éclatée ainsi qu'une photo d'un des collimateurs développés pour INPHO.

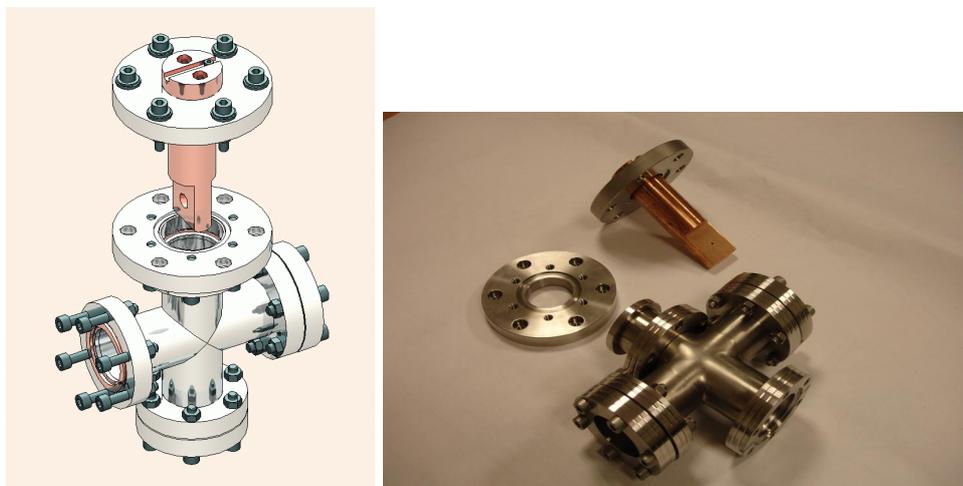


Figure 9 : vue 3D et photo d'un des collimateurs de la ligne directe.

Dans les conditions opératoires normales, seule une partie du faisceau est interceptée par la masse du collimateur. Néanmoins, pour les calculs d'optimisation du refroidissement, nous avons retenu l'hypothèse où le faisceau serait complètement intercepté par la masse en cuivre. Ainsi, la totalité de la puissance du faisceau devait pouvoir être évacuée. Des calculs thermiques ont permis d'optimiser le refroidissement à l'eau de ces collimateurs.

Par ailleurs, nous souhaitons pouvoir mesurer le courant intercepté. C'est pourquoi le corps du collimateur est monté sur sa bride par l'intermédiaire de manchons isolants.

Enfin, dans un souci de commodité de maintenance, le corps du collimateur peut être à volonté extrait ou inséré dans la ligne faisceau par intervention sur une seule bride.

L'ensemble fenêtre de sortie + cible de conversion des électrons aux photons

La figure 10 représente une vue 3D ainsi qu'une photo de l'ensemble fenêtre de sortie + cible de conversion.

Cet ensemble assure deux fonctions distinctes. D'une part, une fenêtre en aluminium assure l'étanchéité de la ligne sous vide. Celle-ci est suffisamment mince pour permettre la sortie des électrons dans l'air. Par ailleurs, sur la même pièce est montée une cible en tungstène qui joue le rôle de convertisseur de photons. L'ensemble a été réalisé aussi compact que possible pour minimiser le parcours des électrons dans l'air. Néanmoins, la partie convertisseur est isolée de la masse de l'ensemble pour permettre une lecture du courant collecté sur la cible.

Des calculs thermiques ont également été effectués, l'hypothèse retenue étant, comme pour les collimateurs, que le circuit de refroidissement devait être capable d'évacuer la totalité de l'énergie du faisceau.

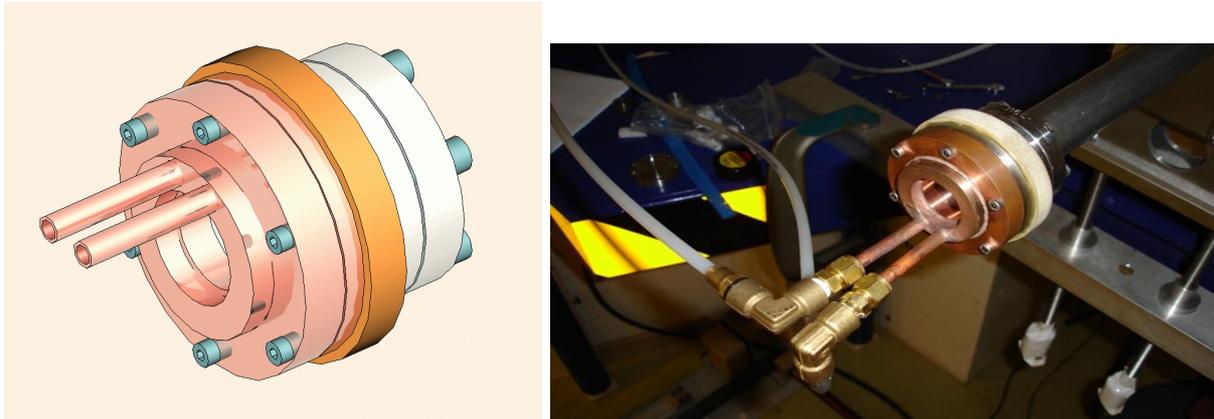


Figure 10 : vue 3D et photo de l'ensemble fenêtre de sortie + convertisseur.

Le 1^{er} triplet de la ligne déviée.

L'étude d'éléments magnétiques pouvant se révéler longue et coûteuse, notre choix s'est porté sur l'achat de quadrupoles identiques à ceux développés à la DAM pour ELSA et commercialisés par SEF. Ceux-ci sont prévus pour être refroidis à l'eau. Cependant, pour les valeurs de gradients dont nous avons besoin, déterminés par les simulations de dynamique faisceau, ces éléments n'avaient pas besoin d'être refroidis autrement que par convection naturelle. Ces mêmes simulations nous ont également permis de déterminer avec précision la valeur de l'entraxe entre 2 quadrupoles successifs pour pouvoir assurer l'achromatisme de la ligne.

La figure 11 représente un plan du triplet assemblé, monté sur son support et aligné en usine.

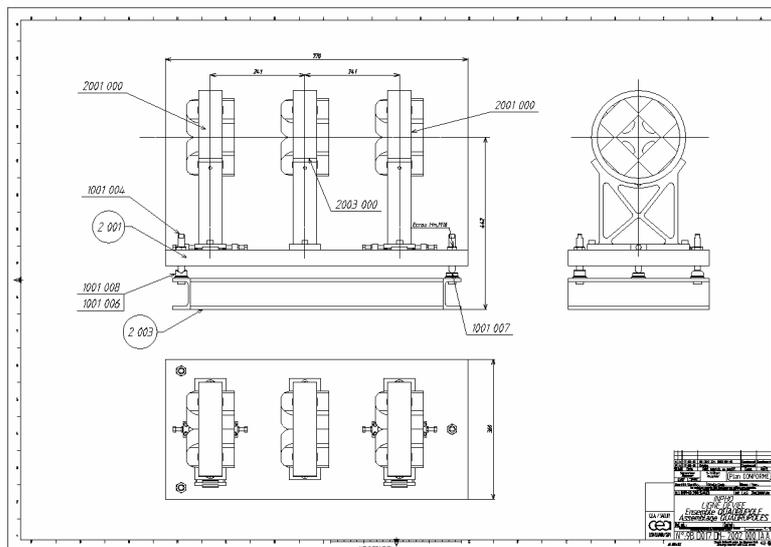


Figure 11 : plan des quadrupoles SEF montés en triplets pour INPHO.

La fente de sélection en énergies

L'élément clé de la ligne de sélection en énergie est le système de fente (figure 12).

La sélection des électrons doit être réalisée sous vide, tout en étant réglable pour répondre aux exigences des expérimentateurs. C'est pourquoi, les deux palettes en cuivre constituant la fente sont montées sur des bras dont la translation est motorisée, chacune des palettes pouvant être manœuvrée indépendamment de l'autre. Le mouvement de translation des bras est guidé par deux arbres pour chaque palette, l'étanchéité au vide étant assurée au niveau de soufflets.

Le refroidissement du corps de la fente a été optimisé pour que le système puisse supporter 10% de la puissance du faisceau en sortie de machine (c'est la valeur maximale que l'on attend à cet endroit de la ligne déviée au vu des simulations de dynamique faisceau). Les palettes étant mobiles, l'eau qui

assure le refroidissement circule dans des soufflets prévus pour suivre le mouvement tout en restant étanches.

Par ailleurs, des potentiomètres linéaires positionnés sur les arbres fournissent l'information du positionnement des palettes ce qui permet, au niveau du contrôle commande, de remonter à la largeur de la fente et donc à la dispersion en énergie du faisceau à cet endroit. Les moteurs choisis sont des moteurs pas-à-pas pilotables à distance.

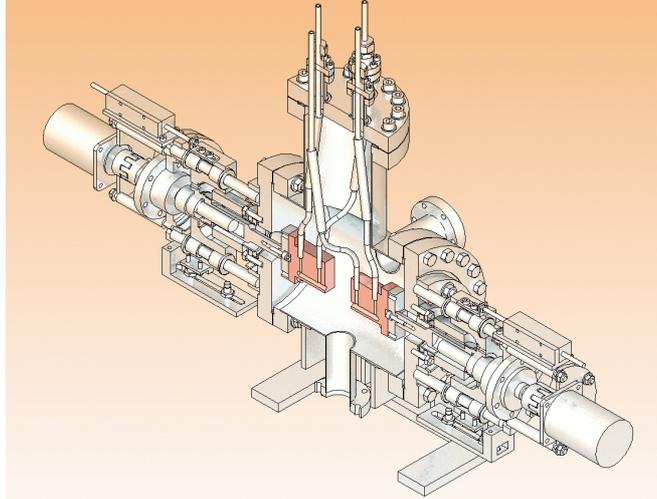


Figure 12 : coupe 3D du système de sélection en énergie.

4.3. Le contrôle commande

La décision de se munir d'un contrôle commande découlait des besoins exigés par la mesure des neutrons prompts. Il nous est alors apparu évident de prévoir un contrôle commande pour piloter l'ensemble des deux lignes. Cette décision a, du reste, été soutenue par le fait que la quasi-totalité du matériel électronique et informatique était disponible et que l'investissement correspondant était considérablement allégé. Ce paragraphe décrit le contrôle commande développé pour la phase I du projet^[5,6].

Le système est constitué de deux baies ventilées. La figure 13 représente de façon schématique la face avant des baies. L'une d'elles a été câblée pour recevoir les deux alimentations des quadropoles du triplet TTF, ainsi que les deux alimentations des steerers horizontal et vertical et le contrôle de l'électrovanne^[5]. Dans l'autre baie est monté un châssis VME intégrant : un contrôleur MVME muni du système temps réel VxWorks, une carte d'entrée analogique 32 voies, une carte de sorties analogiques 16 voies, une carte d'entrées/sorties digitales 96 voies ainsi qu'un ensemble de borniers de raccordement ADAS. Le nombre important d'entrées/sorties découle du fait que le système anticipe les besoins pour la ligne déviée.

Le système est conçu pour fonctionner en mode local ou à distance.

Dans ce second mode de fonctionnement l'ensemble est piloté par un PC superviseur pentium IV à 3.2 GHz, 1024 Mo de SDRAM et disque dur de 80 Go, configuré à l'aide de la distribution Scientific Linux, le système informatique choisi étant EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System)^[6].

La figure 14 montre l'interface utilisateur. Celle-ci a été développée sous forme synoptique dans un souci de commodité d'utilisation.

4.4. La mise en service de la ligne directe

Dès que l'ensemble du matériel nécessaire a été disponible (tests, approvisionnements), les expériences de physique en cours ont été interrompues pour permettre la mise en place de la ligne. Cette mise en place inclut le montage mécanique, avec les précautions liées au montage en vide poussé, les différents raccordements électriques et fluides, ainsi que l'alignement.

La ligne ainsi obtenue apparaît sur la photo de la figure 15.

Faces avant (2 baies 19")

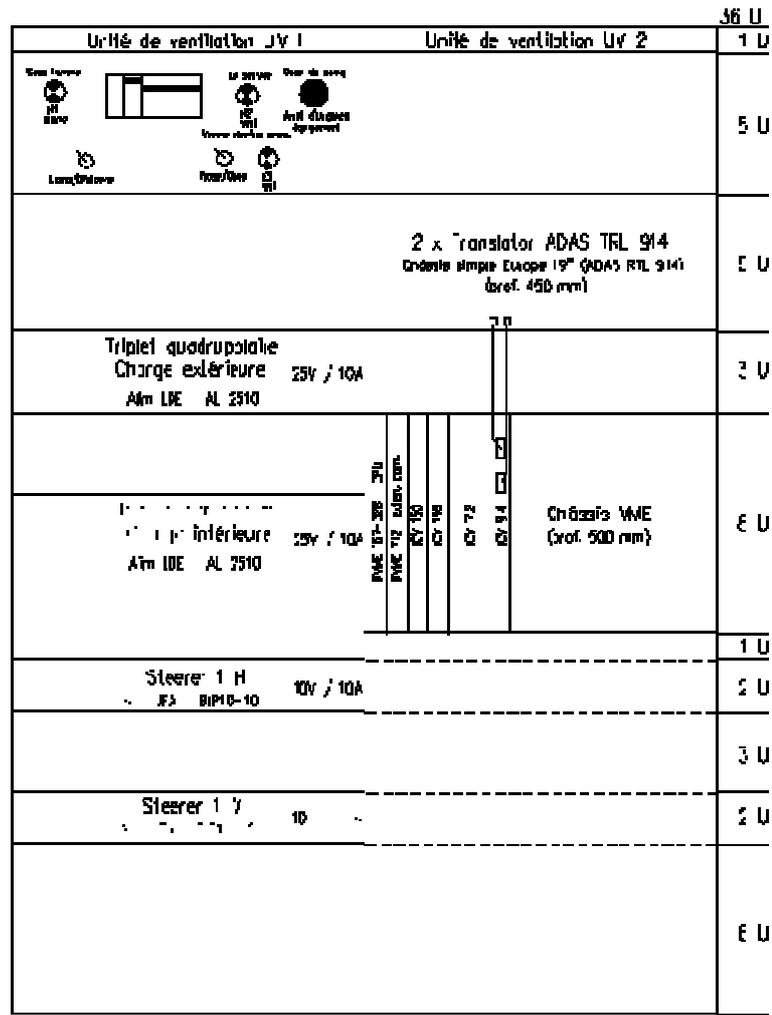


Figure 13 : représentation schématique des faces avant des baies du contrôle commande^[5].

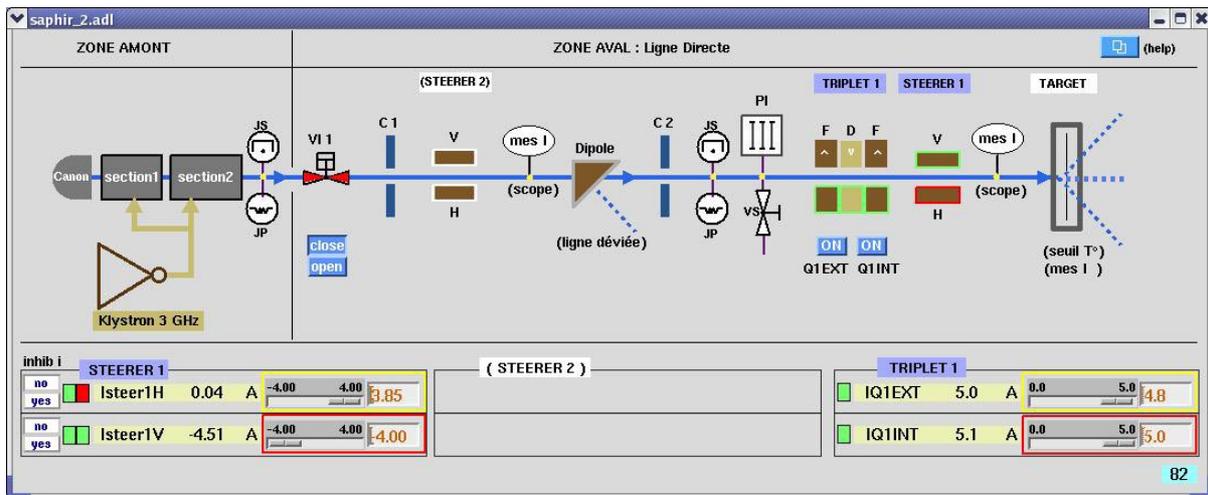


Figure 14 : interface utilisateur du contrôle commande de la ligne directe^[6].

Un certain nombre de tests ont alors été effectués pour s'assurer du bon fonctionnement de l'ensemble tels que des tests de fuites, des tests sur le contrôle commande et les réglages du faisceau au moyen du triplet et des steerers en s'appuyant sur les différents éléments de diagnostics de la ligne (optimisation du passage dans les collimateurs, optimisation du courant collecté sur la cible de conversion).

4.5. Les résultats obtenus

En comparant des résultats expérimentaux obtenus sur un colis maquette avant et après l'installation de la ligne^[4], on constate que la présence de celle-ci (associée aux modifications de la machine) a contribué à diminuer de manière significative la limite de détection du système.



Figure 15 : photo de la ligne directe montée, connectée et alignée.

4.6. Quelques propositions pour la phase II

L'étalonnage de l'aimant utilisé pour les mesures de spectre n'a jamais été effectué depuis l'installation de la machine SAPHIR. De plus, les modifications apportées sur l'installation ont pu influencer sur ses caractéristiques (modifications de l'environnement magnétique). Par ailleurs, les résultats expérimentaux montrent des décalages par rapport à ceux des mesures réalisées avant les modifications du système^[4] dont la seule explication plausible est une mauvaise estimation de l'énergie. Il semble donc indispensable de prévoir un étalonnage du dipôle pour valider les mesures de spectre énergétique lors des prochaines campagnes de mesures.

Par ailleurs, un système de visualisation du faisceau d'électrons, escamotable, positionné juste devant la cible de conversion fournirait une information supplémentaire pour le réglage du faisceau avant son impact avec la cible. On pourrait, par exemple, installer un OTR dont la réponse serait compatible avec la gamme d'énergie et le courant utilisés.

5. Conclusion

Pour mener à bien la phase I du projet INPHO (diminuer d'un facteur 10 la limite de détection des actinides dans un colis de déchets), il était nécessaire à la fois d'apporter quelques améliorations à l'accélérateur de SAPHIR, et d'installer à la sortie de cet accélérateur une ligne de transport de faisceau destinée à rapprocher au maximum la cible de conversion du colis de déchets à analyser. Dans le présent document, nous avons décrit l'ensemble des opérations réalisées par les équipes du SACM et du SIS de DSM/DAPNIA impliquées dans le projet en collaboration avec le laboratoire L2MA de DRT/LIST/DETECS/SSTM. L'objectif de la phase I a été atteint en partie grâce à ces réalisations.

Devant les résultats expérimentaux encourageants obtenus, et en vue d'atteindre les objectifs plus ambitieux de la phase II du projet, le document propose également quelques améliorations supplémentaires à apporter pour accroître encore les performances du système et lui assurer une plus grande fiabilité.

6. Références

- [1] « Etudes pour l'optimisation de l'installation de mesure par photofission « SAPHIR ». Application à la détection de transuraniens dans les colis de déchets nucléaires « EBLIS ». Henri Safa, Note technique DAPNIA/SDA/D/03.122/NT.
- [2] « Définition des tâches, planning et responsabilités pour le projet INPHO » Compte-rendu de réunion DIMRI/SIAR/04-058.
- [3] « Réunion d'avancement INPHO » Compte-rendu de réunion DETECS/SSTM/05-287.
- [4] « Optimisation théorique et expérimentale de la méthode de dosage des actinides par photofission associée à la détection des neutrons retardés (INPHO-Phase I) » Bénédicte Poumarède, Mehdi Gmar, François Tola, Frédéric Lainé, Rapport DETECS/SSTM/RAP/05-030
- [5] « INPHO ligne directe – notice d'utilisation générale » DAPNIA/SIS 05/410 al, Ange Lotodé, 31 août 2005.
- [6] « Contrôle commande projet INPHO (phase 1) » Pierre Mattei, 7 juillet 2005.

Annexe : Résumé des caractéristiques initiales de l'accélérateur de SAPHIR

Energies de faisceau de 15 à 30 MeV

Courant de 0 à 150 mA

Fréquences de répétition jusqu'à 400 Hz (multiples et sous-multiples de 50 Hz)

En fait la machine n'est jamais utilisée au-dessus de 50 Hz.

1. *canon*

type diode :

anode à la masse

cathode à chauffage direct

HT = -40 kV

chauffage filament 30 A, 5 V (150 W) : impulsions 9 kV prélevées sur modulateur klystron puis transfo
n = 4.45

2. *structure accélératrice*

fréquence 3 GHz

mode $\pi/2$

impédance interne 70 M Ω

section 1 : 2291 mm, 91 cavités dont 76 accélératrices et 15 dissipatrices

1ères cavités = groupeur

section 2 : 3508 mm, 133 cavités, les dernières étant dissipatrices.

3. *source HF*

1 klystron TH 2042 à 2 sorties recombinaées

puissance crête : 12.8 MW à 400 Hz

HT du pulse klystron : 200 kV

modulateur à lignes à retard et thyatron

alimentation HT : 17 kV refroidie à l'eau.

4. *guides hyperfréquence*

répartition de la puissance : 3/4 sur section 2 (8.25 MW), 1/4 sur section 1 (2.75 MW)

1 déphaseur sur la partie basse puissance

pas d'atténuateur

guides sous SF6 à 2 bars

fenêtres en céramique

5. *vide - groupe de pompage*

turbo 250 l/s + primaire

2 jauges Bayard-Alpert

vide limite sur alim. pompe 10^{-7} torr soit $\sim 10^{-6}$ torr dans la machine.

pas de vanne efficace

possibilité installation pompe ionique 200l/s sur piquage existant.

6. *focalisation et centrage*

focalisation :

3 solénoïdes (section 1) + 4 solénoïdes (section 2) alimentés en série (150 A) , refroidis à l'eau.

centrage :

2 groupes de 2x2 demi-bobines à 90° (section 1) + 3 groupes de 2x2 demi-bobines à 90° (section 2)

7. *système de commande*

système ancien à base de pré réglages stockés (potentiomètres)

8. *diagnostics*

pas de diagnostic sur la machine

mais diagnostics indirects

mesure du courant sur la cible de conversion (signal envoyé sur oscilloscope)

mesure d'énergie par réponse de pastille d'uranium (réaction gamma-n)