

Université Paris Sud

Ecole Doctorale 534 MIPEGE

Discipline : Physique

Résumé de la thèse

Les Diagnostics faisceau de IFMIF / LIPAc : Les moniteurs de profils et de pertes du faisceau

Soutenue le 25 septembre 2012

par

Dipl.-Phys. Jan EGBERTS

Composition du jury :

Président du jury :	Prof. Patrick PUZO	(Université d'Orsay)
Rapporteurs de thèse :	Dr. Étienne BURTIN	(CEA Saclay - SPhN)
	Dr. Peter FORCK	(GSI)
Directeur de thèse :	Dr. Olivier NAPOLY	(CEA Saclay - SACM)
Responsable de thèse :	Dr. Jacques MARRONCLE	(CEA Saclay - SEDI)
Examineur :	Dr. Mariusz SAPIŃSKI	(CERN)

Abstract

The IFMIF accelerator will accelerate two 125 mA continuous wave (cw) deuteron beams up to 40 MeV and blasts them onto a liquid lithium target to release neutrons. The very high beam power of 10 MW pose unprecedented challenges for the accelerator development. Therefore, it was decided to build a prototype accelerator, the Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc), which has the very same beam characteristic, but is limited to 9 MeV only. In the frame of this thesis, diagnostics devices for IFMIF and LIPAc have been developed. The diagnostics devices consist of beam loss monitors and interceptive as well as non-interceptive profile monitors.

For the beam loss monitoring system, ionization chambers and diamond detectors have been tested and calibrated for neutron and γ radiation in the energy range expected at LIPAc. During these tests, for the first time, diamond detectors were successfully operated at cryogenic temperatures. For the interceptive profilers, thermal simulations were performed to ensure safe operation. For the non-interceptive profiler, Ionization Profile Monitors (IPMs) were developed. A prototype has been built and tested, and based on the findings, the final IPMs were designed and built. To overcome the space charge of accelerator beam, a software algorithm was written to reconstruct the actual beam profile.

Key words : diagnostics, IFMIF, LIPAc, nuclear fusion, residual gas, non-interceptive, profiler, IPM, space charge, loss monitor, ionization chamber, diamonds, SEM-grids

Resumé

IFMIF sera constitué de deux accélérateurs de deutons délivrant des faisceaux continus de 125 mA et d'énergie 40 MeV qui bombarderont une cible de lithium liquide. Face à cette très haute puissance faisceau de 10 MW, de nouveaux défis doivent être relevés pour le développement de tels accélérateurs. C'est pour cette raison qu'a été prise la décision de construire un accélérateur prototype, LIPAc (Linear IFMIF Prototype Accelerator) ayant les mêmes caractéristiques faisceau qu'IFMIF, mais avec une énergie limitée à 9 MeV. Dans le cadre de cette thèse, des instruments de diagnostics faisceau ont été développés pour IFMIF et LIPAc. Ces diagnostics concernent des moniteurs de pertes faisceau ainsi que des profileurs transverse de faisceau travaillant en mode intercepteur ou non.

Pour la surveillance des pertes faisceau, des chambres à ionisation et des détecteurs au diamant ont été testés et calibrés en neutrons et en γ dans la gamme en énergie de LIPAc. Lors de ces expériences, pour la première fois des diamants ont été testés avec succès à des températures cryogéniques. Pour les profileurs interceptant le faisceau, des simulations thermiques ont été réalisées afin d'assurer leur bon fonctionnement. Pour les profileurs n'interceptant pas le faisceau, des moniteurs basés sur l'ionisation du gaz résiduel (IPM) contenu dans le tube faisceau ont été développés. Un prototype a été construit et testé, puis s'inspirant de ce retour d'expérience les IPMs finals ont été conçus et construits. Pour contrecarrer la charge d'espace générée par le faisceau, un algorithme a été élaboré afin de reconstruire le profil réel du faisceau.

Mots clés : diagnostics, IFMIF, LIPAc, fusion nucléaire, gaz résiduel, non-interceptif, profileur, IPM, charge d'espace, moniteur de pertes, chambre à ionisation, diamants, SEM-grids

Chapitre 1

Introduction

Ce chapitre présente le contexte de cette thèse portant sur la conception des réacteurs de fusion nucléaire, le projet IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility) et son prototype LIPAc (Linear IFMIF Prototype Accelerator) pour lequel les diagnostics sont développés, le fonctionnement de tels accélérateurs et les diagnostics préconisés pour LIPAc ainsi que les raisons de leurs choix.

Dans cette période de pénurie d'énergie, le développement de nouvelles sources d'énergie est d'une grande importance. Les réacteurs de fusion nucléaire sont potentiellement capables d'assumer la charge de base du réseau électrique du futur. À la différence des réacteurs nucléaires actuels basés sur la fission, les réacteurs de fusion sont intrinsèquement sûrs tout en produisant de faibles niveaux de radioactivité. Hormis les réactions de fusion qu'il faut pouvoir maintenir de façon permanente, l'un des plus grands défis auxquels ces réacteurs seront confrontés est le bombardement neutronique diluvien que subissent les matériaux constituant ces réacteurs. Les réactions nucléaires induites par les neutrons dans ces matériaux fragilisent rapidement leurs structures et ceci de façon irréversible. Actuellement il n'existe pas de matériaux capables de soutenir de tels flux radiatifs sur une durée de temps raisonnable. Trouver des matériaux résistants à de telles conditions est l'un des objectifs sine qua non pour la construction des réacteurs de fusion du futur : relever ce défi est le but et l'ambition de IFMIF !

Pour caricaturer, IFMIF sera une source de neutrons extrêmement intense ($\sim 10^{17}$ neutrons/s) couplée à des cellules de tests d'irradiation neutronique dans lesquelles seront placés des échantillons de matériaux soumis également à des contraintes mécaniques (torsion...), thermiques... afin de tester leurs résistances à ces conditions extrêmes. La source de neutrons est constituée de 2 accélérateurs continus de deutons ($E=40$ MeV et $I=125$ mA) sur une cible de lithium liquide. Des réactions nucléaires se produisent sous l'impact des deutons sur les noyaux de lithium libérant de nombreux neutrons. Cette source neutronique s'apparentera de par son spectre en énergie et son intensité à l'environnement des réacteurs de fusion. L'accélérateur IFMIF consistera en une source d'ions de deutérium extraits à 100 keV qui seront mis en paquets (175 MHz) et accélérés jusqu'à 5 MeV par le RFQ (Radio Frequency Quadrupole), avant d'être injectés dans 4 modules accélérateurs constitués de cavités supraconductrices jusqu'à 40 MeV, pour enfin être acheminés jusqu'à la cible de lithium. Un des plus grands défis pour le développement d'un tel accélérateur est la très haute puissance de son faisceau de 10 MW et le fort courant continu de 125 mA. C'est pour cette raison qu'une étape de validation a été décidée ; elle consiste, côté accélérateur,

en la construction de LIPAc qui est un prototype à l'échelle 1 de IFMIF n'intégrant que les premiers éléments jusqu'au premier module accélérateur : l'énergie délivrée par les deutons ne sera donc que de 9 MeV. Les diagnostics pris en charge par le Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA) de Saclay sont :

- des profileurs de faisceau non intercepteurs basés sur l'ionisation du gaz résiduel,
- des profileurs intercepteurs qui mesurent les courants d'ionisation générés par les deutons sur des fils interceptant une faible fraction du faisceau,
- des transformateurs de courant qui mesure le courant du faisceau en mode pulsé ou continu,
- des moniteurs de pertes pour assurer la sécurité de l'accélérateur en mesurant les pertes du faisceau dans des chambres à ionisation,
- des moniteurs de micro-pertes constitués par des détecteurs en diamant placés dans les modules cryogéniques accélérateurs et dont le but est le réglage fin du faisceau.

Tous ces diagnostics, hormis les mesureurs du courant faisceau seront présentés dans le cadre de cette thèse.

Chapitre 2

Moniteurs de Pertes

Ce chapitre traite des deux types de moniteurs de pertes du faisceau, l'un dévolu à la sécurité de l'accélérateur et basé sur des chambres à ionisation et l'autre dont l'objectif est d'assurer le réglage fin de l'accélérateur en minimisant les pertes détectées dans des diamants. Ces deux aspects seront abordés dans les deux parties suivantes :

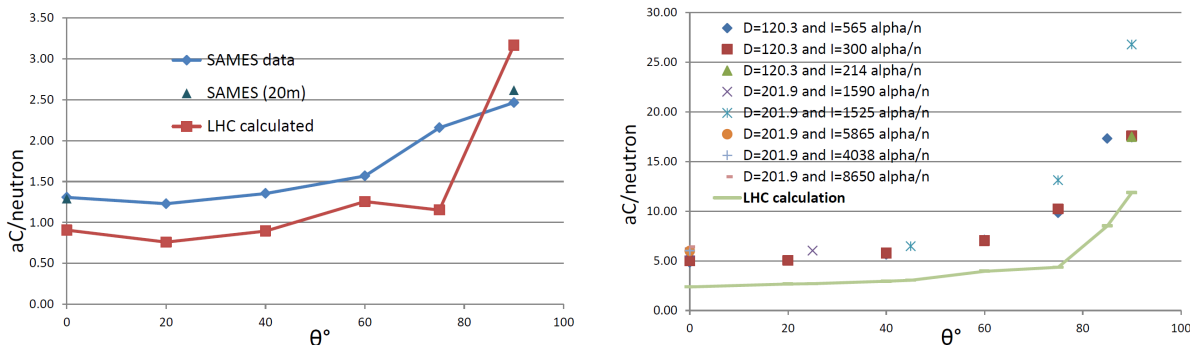
Les Chambres à Ionisation (IC)

Pour assurer la sécurité de LIPAc, le système de surveillance des pertes sera constitué d'un ensemble d'une quarantaine d'IC placées le long de l'accélérateur, depuis la partie aval du RFQ jusqu'à l'arrêt faisceau (Beam Dump ou BD). La forte puissance de LIPAc exige l'envoi d'un signal rapide en cas de défaillance de l'accélérateur vers MPS (Machine Protection System) en moins de $10 \mu\text{s}$ afin de stopper le faisceau rapidement ($< 30 \mu\text{s}$). Ce système de surveillance des pertes doit également pouvoir suivre l'évolution de ces pertes avec une résolution correspondant à des pertes de l'ordre de 1 W/m .

Les IC ont été choisies pour remplir cette fonction, essentiellement pour leur grande fiabilité, leur faible coût et une maintenance modeste. Ces IC sont celles utilisées au LHC (Large Hadron Collider) mais qui fonctionnent dans un tout autre domaine en énergie et avec des particules de nature différente. En effet, les seules particules qui franchiront les parois du tube faisceau sont les neutrons et les γ dans une gamme d'énergie de quelques keV à une dizaine de MeV.

Pour montrer que ces IC étaient bien adaptées pour jouer le rôle de moniteurs de pertes, l'une d'entre elles a été empruntée au LHC afin de mesurer expérimentalement sa réponse aux neutrons et aux γ . Ces calibrations ont été réalisées auprès d'un irradiateur de ^{60}Co , CoCase à Saclay (Cobalt Casemate) délivrant des γ d'énergie 1.25 MeV et auprès d'un "faisceau de neutrons" au CEA de Valduc (3 et 14.7 MeV). Les résultats sont en accord avec les réponses simulées des IC par les physiciens du LHC sur le domaine en énergie de LIPAc. Des courants de l'IC inférieurs à 2 pA ont pu être mesurés lors de ces tests, correspondant dans le pire des cas à des pertes de 1 W/m et garantissant ainsi cette possibilité. Pour les courants élevés, une bande passante proche de 50 kHz a été obtenue pour l'arrêt d'urgence du faisceau ($< 10 \mu\text{s}$ pour MPS).

La possibilité d'augmenter la sensibilité de ces IC a été étudiée. Pour cela des simulations avec Geant4 donnent des gains variant de 10 à 100 selon le gaz qui remplit



(a) Response Function pour les neutrons de 2.45 MeV . (b) Response Function pour les neutrons de 14.1 MeV.

FIGURE 2.1 – Response function de l’IC pour des neutrons mesurés à plusieurs angles d’incidence à l’accélérateur SAMES au CEA Valduc.

l’IC comme par exemple le trifluorure de bore (BF_3). Ce type de gaz étant par ailleurs toxique et corrosif, nous avons décidé de ne pas suivre cette piste.

L’électronique et le système d’acquisition qui piloteront ces moniteurs de pertes sont également présentés.

Détecteurs au Diamant

Le pilotage de LIPAc est d’une grande difficulté essentiellement due à la grande charge d’espace du faisceau de deutons. L’une des nouveautés envisagées par l’équipe de la dynamique faisceau pour mener à bien le réglage fin du faisceau est de minimiser son halo plutôt que d’optimiser la taille du cœur du faisceau. C’est pour cette raison que des moniteurs de micro-pertes de faisceau vont être installés pour la première fois dans un accélérateur.

Ces détecteurs au diamant seront placés dans le cryostat de l’accélérateur supraconducteur, à raison de 3 pour chacune des 8 mailles constituées d’une cavité, d’un solénoïde et d’un moniteur de position.

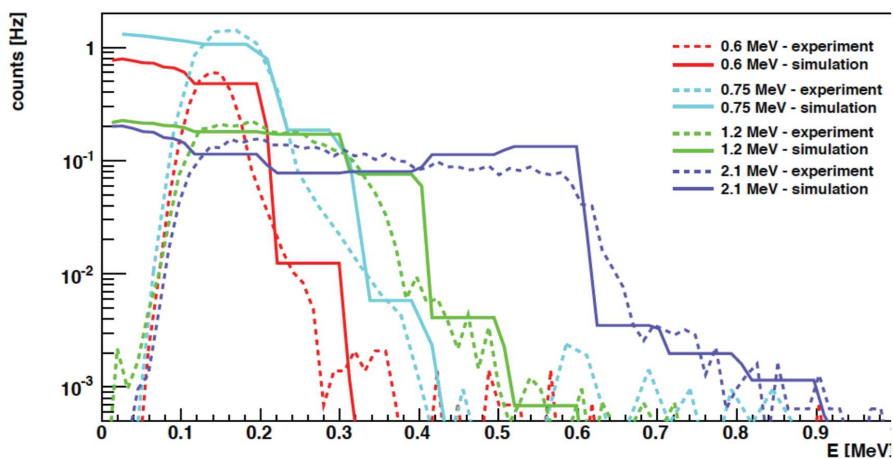


FIGURE 2.2 – Spectres d’énergie déposée dans un diamant pour 4 énergies de faisceaux de neutrons à B3 ; en traits continus les spectres simulés comparés aux spectres mesurés en pointillés.

Le fonctionnement des diamants n'a jamais été testé à température cryogénique, nous les avons donc plongés dans de l'azote et de l'hélium liquides au CEA Saclay tout en mesurant leurs réponses à une source de ^{252}Cf . En conclusion, l'utilisation des diamants à 77 K ainsi qu'à 4.2 K semble être possible.

De même que pour les IC, nous avons calibré les diamants en neutrons au CEA de Bruyères-le-Châtel. Un Van de Graaff accélère des protons et des deutons qui bombardent diverses cibles produisant des neutrons mono-énergétiques. Des γ sont également créés dont on s'affranchit par une mesure de temps de vol. Les résultats obtenus sont en bon accord avec les simulations réalisées au CEA Saclay (Fig. 2.2).

Le calcul des taux de comptage attendus lors du fonctionnement de LIPAc, ainsi que des bruits de fond, sont présentés et montrent la faisabilité de la détection des micro pertes par des diamants.

L'électronique rapide associée à un système d'acquisition est aussi abordée.

Chapitre 3

SEM-Grids

La mesure des profils transverses du faisceau en mode pulsé est l'objet de ce chapitre. Une grande sensibilité est requise pour de tels moniteurs puisque la longueur du pulse faisceau peut être aussi faible que $50 \mu\text{s}$. Une des solutions est d'intercepter une faible proportion du faisceau tout en veillant à définir la plage de fonctionnement pour ne pas brûler ou vaporiser les composants actifs du détecteur.

Pour cette raison, les moniteurs envisagés sont des Secondary Electron Emission grids (SEM-grids) basés sur l'émission d'électrons secondaires lorsque une faible proportion des deutons du faisceau est interceptée par les fils de ces moniteurs. Les principes et le fonctionnement de ces moniteurs seront d'abord décrits. Ensuite, une étude thermique permettant de définir les diamètres des fils selon la taille du faisceau, donc de l'emplacement du moniteur, sera présentée. Une argumentation donnera les limites de ces études en comparant par exemple les courants créés par émission secondaire et ceux qui apparaissent à haute température par émission thermique (ou thermo-ionique). Des hypothèses simplificatrices de calculs seront commentées, comme l'absence du traitement du pic de Bragg, la connaissance ou la méconnaissance du coefficient d'émissivité ϵ incitant à la prudence et donc à prendre des marges de sécurité dans la définition des fils de tungstène.

Une table résumant les températures maximales en fonction de la taille du faisceau permettra de rester lors de l'exploitation de LIPAc, dans les possibilités de fonctionnement des SEM grids, évitant par exemple de casser un fil sous l'effet d'une densité de puissance déposée trop importante.

Pour terminer, les 2 SEM-grids qui prendront place dans la Diagnostic Plate (DP) et en amont de l'arrêt faisceau seront décrits brièvement.

Chapitre 4

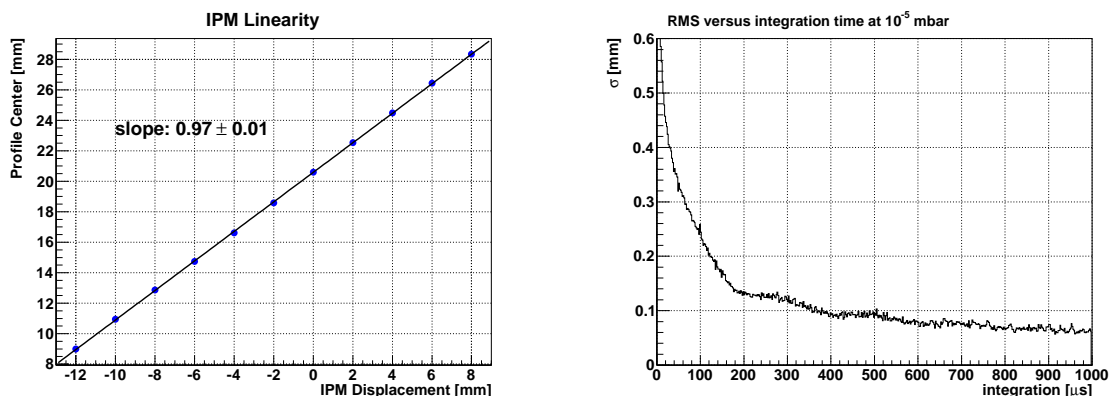
Profileurs à Ionisation du Gaz Résiduel

Cette partie est le fruit d'une recherche très poussée concernant la mesure de profils transverses du faisceau non intrusif. Ce type de moniteur est absolument essentiel pour la conduite du faisceau. Il doit être capable à la fois de mesurer des profils en mode pulsé, par exemple pour des longueurs de pulse d'une centaine de μs afin de prendre le relai des SEM-grids, mais aussi en mode continu : une dynamique de 10 000 apparaît déjà en supposant une intensité de faisceau constante.

Ce type de moniteurs représente un défi pour LIPAc et IFMIF expliquant les 2 programmes de R&D entrepris dans 2 laboratoires sur ce sujet :

- au CIEMAT de Madrid, où la technologie choisie est basée sur la fluorescence du gaz résiduel. On parle alors de Fluorescence Profile Monitor (FPM).
- Au CEA de Saclay, où l'on a privilégié l'ionisation du gaz résiduel ou IPM pour Ionization Profile Monitor.

L'IPM se présente sous l'aspect d'un détecteur à "plaques parallèles". Entre ces 2 plaques est établi un champ électrique. Sur l'une de ces plaques (mise à la masse) sont gravées des bandes conductrices (strips) reliées individuellement à une électronique. Lorsque le faisceau passe entre les 2 plaques, les ions et les électrons résultants de l'ionisation des molécules du gaz résiduel et des deutons dérivent sous l'effet du champ électrique vers les plaques. Des courants proportionnels à la taille transverse du faisceau sont alors mesurés sur les strips.



(a) Reconstruction de la position du centre du profil en fonction du déplacement transverse de l'IPM.

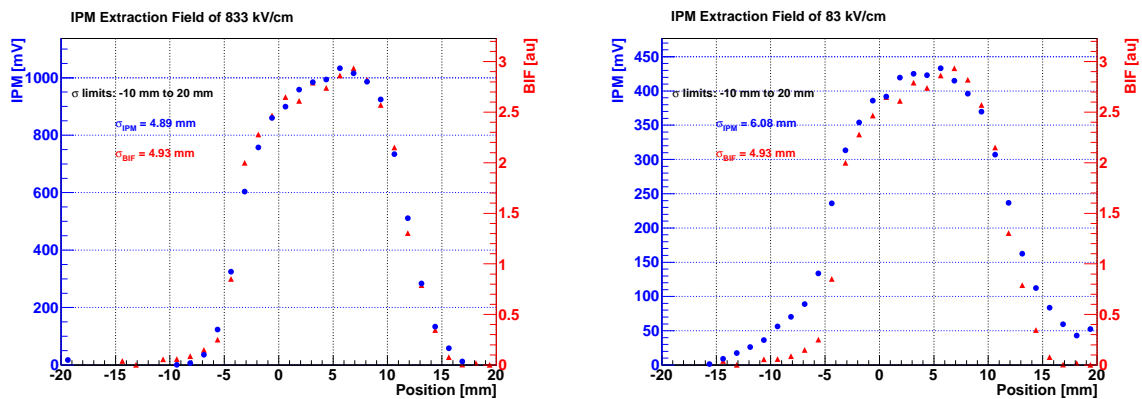
(b) Résolution de la position centrale du profil en fonction du temps d'intégration de l'électronique.

FIGURE 4.1 – Étude expérimentale de la linéarité du champ électrique dans l'IPM.

L'un des ingrédients essentiels pour la construction d'un IPM est l'uniformité du champ électrique. Celle-ci a été obtenue en concevant des dégradeurs de champ latéraux et 2 paires d'électrodes supplémentaires implantées à proximité des 2 plaques. Les paramètres de ces composants ont été déterminés en simulant l'IPM par une approche en éléments finis qui est développée dans cette partie. Un premier prototype de taille modeste $6 \times 6 \text{ cm}^2$ d'ouverture intégrant les résultats de ces études a été testé au GSI Darmstadt en mai et novembre 2010 et a donné d'excellents résultats comme :

- la bonne uniformité du champ électrique (Fig. 4.1(a)),
- la résolution de la position du profil : inférieure à $100 \mu\text{m}$ (Fig. 4.1(b))
- une bonne superposition des profils mesurés avec l'IPM et avec un FPM de GSI (Fig. 4.2)
- l'extrapolation de ces résultats aux conditions de LIPAc montrant que la mesure avec l'IPM est réalisable pour une intensité de deutons de 4.2 mA pour une pression de 10^{-7} mbar.

Ensuite, l'IPM a été testé sur la source SILHI de IPHI (proton de 90 keV pour un courant maximal de 100 mA) fin 2010 et a montré que l'on pouvait mesurer des profils en mode continu pour des intensités de 10.5 mA. Deux IPM doivent être installés sur LIPAc, l'un sur la Diagnostics Plate (DP) et l'autre en amont du Beam Dump (BD) correspondant à des ouvertures de 10×10 et $15 \times 15 \text{ cm}^2$ respectivement. De nouveaux calculs d'optimisation de champs électriques ont dû être développés; la tâche étant rendue ardue du fait des grandes ouvertures et du peu d'espace axiale dont nous disposons sur LIPAc. De nouvelles formes d'électrodes en arc de cercles ont été étudiées pour améliorer la configuration du champ électrique.



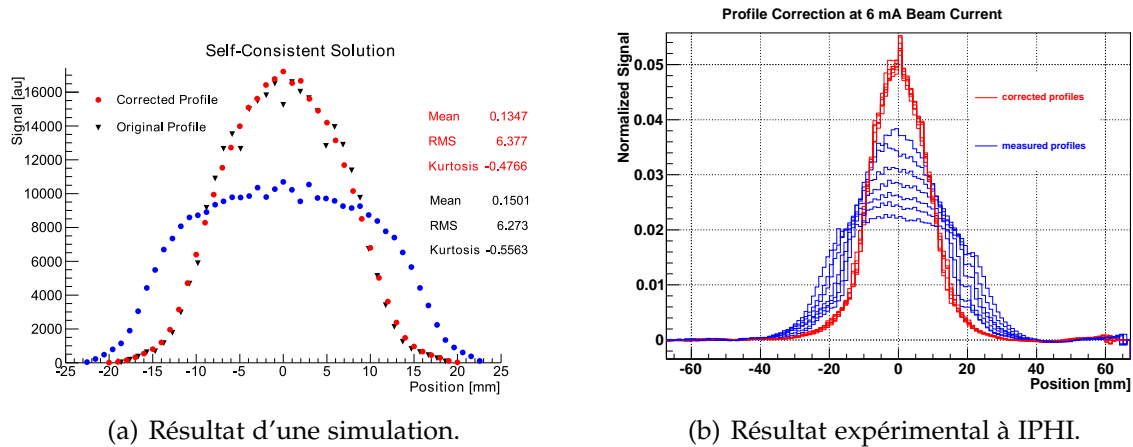
(a) Champ d'extraction de l'IPM : 833 V/cm.

(b) Champ d'extraction de l'IPM : 83 V/cm.

FIGURE 4.2 – Des profils d l'IPM comparés avec un profil d'un profileur BIF de GSI.

À partir de ces études, un prototype pour le BD a été construit et testé à IPHI. Ce profileur sera installé dans un environnement hautement radiatif (7 kSv/h pour les seuls neutrons), il est donc constitué de matériaux résistants aux radiations comme la céramique, le cuivre, époxy... Des profils ont été mesurés en courant continu jusqu'à 20 mA.

Un des problèmes auxquels ces profileurs seront confrontés est la forte charge d'espace du faisceau. Concrètement, cela se traduit par le fait que le champ électrique engendré par le faisceau n'est plus négligeable et va se superposer au champ électrique d'extraction. Il en résulte que les trajectoires des ions et des électrons ne sont plus linéaires, mais courbées. Dans notre cas, le profil du faisceau apparaîtra donc plus étalé qu'il ne l'est en réalité. Cet effet est d'autant plus grand que la taille du faisceau est faible et que son intensité est grande.



(a) Résultat d'une simulation.

(b) Résultat expérimental à IPHI.

FIGURE 4.3 – Résultat de l'algorithme pour corriger l'effet de charge d'espace.

Il existe des solutions pour contrecarrer cet effet comme augmenter le champ électrique, superposer un champ magnétique au champ électrique de façon à guider la trajectoire des électrons. . . mais elles requièrent dans le premier cas des valeurs beaucoup trop grandes et dans le second des encombrements spatiaux qui nous sont interdits. Un algorithme a donc été développé afin de faire une correction quasiment en ligne du profil mesuré en s'appuyant sur des paramètres de faisceau donnés par la dynamique faisceau. Cet algorithme est présenté en détail ainsi que sa sensibilité aux conditions initiales. Un premier test expérimental mené à SILHI a donné des résultats très encourageants (Fig. 4.3(b)).

Ce chapitre se conclura sur des perspectives et d'éventuelles améliorations.

Acronyms

B3	CEA Bruyères-le-Châtel
BF₃	boron trifluoride
BIF	Beam Induced Fluorescence
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives
CIEMAT	Centro para Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
cw	continuous wave
FPM	Fluorescence Profile Monitor
GSI	Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung
IC	Ionization Chamber
IFMIF	International Fusion Material Irradiation Facility
IPM	Ionization Profile Monitor
IPHI	Injecteur de Protons à Haute Intensité
LHC	Large Hadron Collider
LIPAc	Linear IFMIF Prototype Accelerator
MPS	Machine Protection System
RFQ	Radio Frequency Quadrupole
SAMES	Société Anonyme Machine ElectroStatique
SEM	Secondary Electron Emission