



LABORATOIRE DE L'ACCÉLÉRATEUR LINÉAIRE

IN2P3-CNRS et Université PARIS-SUD

Centre Scientifique d'Orsay - Bât 200 - B.P. 34

91898 ORSAY Cedex (France)

Département Accélérateurs

Tél. : +33 1 64 46 84 30

Fax : +33 1 64 46 85 00

Secr. +33 1 64 46 83 12

Web PHIL :

<http://phil.lal.in2p3.fr>

Web LAL :

<http://www.lal.in2p3.fr>



PHIL : PHoto Injecteur au LAL

Orsay, mardi 27 juillet 2010

MEMO TECHNIQUE :	
COMPTE RENDU :	
DIVERS :	X

N° NOTE DPT A :	2010-003
N° NOTE PHIL :	2010-007

Caractérisation et optimisation des faisceaux d'électrons produits par le PHotoInjecteur du LAL (PHIL)

S Levassor

Version électronique disponible :
<http://phil.lal.in2p3.fr/spip.php?rubrique92>

Diffusion : Chercheurs et Ingénieurs DPT ACC



**UNIVERSITÉ
PARIS-SUD 11**

*LICENCE 3
DEPARTEMENT PHYSIQUE ET APPLICATIONS*

ANNEE UNIVERSITAIRE 2009-2010

RAPPORT DE STAGE

**Caractérisation et optimisation des faisceaux
d'électrons produits par le PHotoInjecteur du Lal
(PHIL)**

PRESENTE ET SOUTENU PAR STEPHANE LEVASSOR

**REALISE AU LABORATOIRE DE L'ACCELERATEUR LINEAIRE
SOUS LA TUTELLE DE CHRISTELLE BRUNI ET PIERRE LEPERCQ**

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Alessandro Variola, directeur du département accélérateur et Hugues Monard (chef du projet PHIL) pour m'avoir reçu au sein de leur équipe, et pour les remarques et l'inspiration qu'ils m'ont apportés.

Je remercie Bernard Mouton, responsable de l'informatique, pour toute son aide et le travail qu'il a fourni pour rendre efficace mon adaptation au travail sous linux, mais aussi pour m'avoir permis de visiter SOLEIL, le synchrotron situé à Saclay.

Je remercie également Julien Brossard (responsable diagnostic sur PHIL), pour tout le temps qu'il a consacré à m'expliquer le processus de traitement des données et à leur analyse concernant la mesure des dimensions transverses du faisceau.

Merci à Olivier Dadoun et Freddy Porier pour leur aide en informatique, ainsi qu'à Isabelle Sokolsky et aux membres du service du personnel, pour les questions administratives et pratiques qui ont rendu plus agréable mon séjour au LAL.

Je tiens à remercier Achille Stocchi, enseignant-chercheur au LAL, ainsi que mes responsables de stage à l'université, Jean Luc Raimbault et Claudie Mory pour leur aide dans la recherche de ce stage.

Je témoigne naturellement toute ma gratitude à mes deux tuteurs : Christelle Bruni et Pierre Lepercq pour leur disponibilité, leur sympathie, leur patience dans chacune de leur explications, ainsi que leur aide dans la rédaction de ce rapport qui est l'aboutissement d'une expérience aussi captivante qu'instructive.

Je remercie enfin toutes les personnes du département, dont j'ai apprécié la bonne humeur et les observations qui m'ont permis de m'intégrer rapidement.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	3
I. PHIL : un banc de test pour photo-injecteur	4
1. Introduction à la dynamique faisceau	4
2. Introduction au photo-injecteur	4
3. Présentation de PHIL, et ses objectifs	5
II. Simulations et optimisation des caractéristiques du faisceau d'électrons	9
1. Présentation du logiciel ASTRA (A Space Charge Tracking Algorithm).....	9
2. Détermination des conditions de simulations.....	11
3. Optimisation des caractéristiques du faisceau par détermination des champs de focalisation	14
a) Optimisation à 0.1nC.....	14
b) Comparaison avec les résultats obtenus à 0.3nC	18
III. Expériences sur PHIL	21
1. Conditionnement : principe et réalisation.....	21
2. Principes de mesures : dimensions transverses, charge, et énergie du faisceau	21
3. Comparaisons des résultats expérimentaux avec les résultats obtenus en simulations	23
a) Comparaison des dimensions transverses en fonction du champ magnétique de B3	23
b) Comparaison de la charge obtenue en fin de machine.....	24
CONCLUSION GENERALE SCIENTIFIQUE	25
CONCLUSION GENERALE SUR LE STAGE	26
ANNEXES	27
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	35
REFERENCES	36

INTRODUCTION GENERALE

Actuellement en Licence 3 Physique et Applications à l'université d'Orsay, un stage de deux mois dans un laboratoire de recherche en physique m'a été proposé.

Ayant déjà effectué un stage et un CDD en entreprise, j'ai souhaité intégrer un laboratoire de recherche pour avoir une vision concrète de ce domaine d'activité.

Il m'a ainsi été offert la possibilité de participer aux activités du Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, or je suis depuis quelques années très intéressé par les actualités et les records établis par le Large Hadron Collider. Ce stage a donc été pour moi la source d'une grande motivation car elle m'a permis de m'initier de façon pédagogique à la physique des accélérateurs.

J'ai donc pu étudier non pas l'accélérateur linéaire, puisqu'il est en cours de démantèlement, mais le PHotoInjecteur du LAI (PHIL).

Il s'agit d'un injecteur d'électrons suivi de quelques éléments de diagnostics et de focalisation. Le but d'un photoinjecteur étant de fournir un faisceau d'électrons de haute brillance, il correspondrait en fait à la première partie d'un accélérateur de particules.

La photoinjection consiste à récupérer les électrons émis par un matériau photoélectrique (photocathode) lorsqu'il est excité par un laser.

Des alternatives à la photo-cathode existent, telles que les cathodes thermo-ioniques (téléviseurs à tubes cathodiques), où les électrons sont émis par échauffement du matériau. Néanmoins, les qualités du faisceau obtenu par ces sources d'électrons sont limitées et ne satisfont pas les exigences des applications les plus modernes. De nos jours, les applications des photoinjecteurs sont aux contraires nombreuses telles qu'en médecine grâce à l'utilisation de lasers à électrons libres, ou dans les collisionneurs pour étudier la physique des particules...

PHIL pourra à terme être utilisé par divers laboratoires extérieurs en rapport avec ces domaines d'études.

Mon stage a pour objet l'optimisation du faisceau d'électrons de PHIL, et cette tâche nécessite de réaliser des simulations puis de les vérifier en expériences.

Le présent rapport détaille dans ce sens le fonctionnement et les objectifs de PHIL, puis explique le principe de nos simulations, des expériences ; et enfin, la critique de la comparaison des deux méthodes.

I. PHIL : un banc de test pour photo-injecteur

1. Introduction à la dynamique faisceau

Les particules sont repérées par 6 variables dynamiques associées au paquet d'électrons : 3 variables de position (x, y, z) où x, y et z représentent les coordonnées verticale, horizontale et longitudinale par rapport à l'axe du banc d'essai, et 3 variables de quantités de mouvement Px, Py et Pz.

Les particules occupent une certaine surface dans chaque espace des traces (x, px), (y, py), (z, pz). Cette surface définit l'émittance du faisceau qui n'est autre que le produit de la dimension du faisceau par la divergence. A titre d'exemple, l'émittance transverse est donnée par :

$$s = \sqrt{\left(\langle u^2 \rangle \cdot \left\langle \left(\frac{P_x}{m_0 c} \right)^2 \right\rangle - \left\langle u \cdot \left(\frac{P_x}{m_0 c} \right) \right\rangle^2 \right)} \quad [1]$$

Ici, les variables x et y ayant un rôle identique pour un faisceau présentant une symétrie cylindrique, on utilise la variable u pour désigner indifféremment x ou y.

Avec u, la position des électrons par rapport au centre du paquet, $p_x = \frac{du}{ds}$ (similaire à la quantité de mouvement des électrons); et $m_0 c^2$ n'est autre que l'énergie d'un électron au repos.

L'écart quadratique moyen de la distribution de P_x définit la dispersion en énergie du faisceau

2. Introduction au photo-injecteur

Dans un accélérateur de particules, les particules chargées sont accélérées par des champs électromagnétiques, tandis que le transport s'effectue par des champs magnétiques (de focalisation et de courbure et de guidage)

Le Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL) utilise un photoinjecteur comme source de paquets d'électrons suivi d'aimants pour transporter le faisceau jusqu'aux diagnostics.

Historiquement les premières sources d'électrons étaient dites « thermoioniques », le champ accélérateur était continu à l'inverse des photoinjecteurs qui utilisent un signal haute fréquence. Le principe repose sur l'émission d'électrons par chauffage d'un matériau. Un champ électrique permet de récupérer et d'accélérer les électrons émis... Toutefois, la brillance de ces sources, même avec les plus grandes densités de courant fournit par les cathodes, n'était pas assez satisfaisante pour les besoins de plus en plus exigeants des sciences modernes.

Le LAL utilise un photoinjecteur à la place de la source thermo-ionique ce qui assure des qualités de faisceau supérieures (haute brillance, faible émittance), ce qui est essentiel pour diverses applications.

Le principe du photoinjecteur repose sur l'effet photo-électrique, c'est-à-dire qu'un laser va être envoyé sur une cathode qui va émettre des électrons. Un champ électrique pulsé accélère les électrons.

Le faisceau d'électron créé à la cathode possède une émittance minimale, appelée émittance thermique qui dépend des caractéristiques du faisceau laser et de l'énergie thermique.

Le phénomène d'émission photoélectrique se produit dans un délai extrêmement petit inférieur à 10^{-9} s après l'éclairage, ce qui rend possible l'émission d'impulsions de quelques picosecondes.

De façon générale, il est nécessaire de porter les électrons à une vitesse proche de celle de la lumière pour éviter une dégradation rapide des qualités du faisceau le long de la machine.

Les applications actuelles de photoinjecteurs peuvent concerner des domaines de recherche qui ne sont pas toujours liés. Par exemple, Tesla (situé au centre allemand DESY à Hambourg) est un projet de couplage d'un photo-injecteur et d'un laser à électron libre.

Un Laser à Electron Libre (LEL) est une source de lumière de longueur d'onde pouvant être ajustée très finement sur une très large gamme, allant de l'infrarouge lointain (térahertz) aux rayons X. On peut également disposer d'impulsions laser d'intervalle court et précis, ce qui rend cette technologie à la fois performante et polyvalente.

Il y a aussi d'autres projets tels que le développement de la production de rayons X pulsés par la diffusion Compton, et le système de radiolyse pulsée pour les études sur la physique des rayonnements et de la chimie.

Un photo-injecteur comprend intrinsèquement une photo-cathode, destinée à produire des électrons en utilisant l'effet photo-électrique. La source lumineuse utilisée est un laser avec une longueur d'onde spécifiquement déterminée pour exciter au mieux la photo-cathode.

Un photoinjecteur comprend aussi une cavité comprenant deux ouvertures : une pour laisser entrer la source de puissance (le champ accélérateur) et une antenne par laquelle le faisceau d'électrons va sortir de la cavité.

La géométrie de la cavité permet l'application du mode TM₀₁₀ à l'onde électromagnétique ce qui confère une composante longitudinale au champ électrique parallèle à la propagation des électrons et des composantes seulement transverses au champ magnétique.

Les électrons, sans vitesse initiale vont atteindre une vitesse proche de celle de la lumière.

Une grande partie des performances d'un photo-injecteur réside dans la synchronisation entre le champ accélérateur et la traversée des paquets d'électrons dans la cavité. L'énergie du faisceau récupéré dépend directement de cette synchronisation.

3. Présentation de PHIL, et ses objectifs

Mon stage s'est déroulé au département accélérateur rattaché au Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL), unité mixte de recherche du CNRS (via l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules) et de l'Université Paris-Sud 11.

Le LAL a pour domaines de recherche prioritaires : la physique des particules et des accélérateurs en général mais aussi en astrophysique, en R&D des instruments de mesures, traitement informatique des données, mécanique, etc...

Mon stage porte sur l'accélérateur PHIL dont on va détailler le fonctionnement.

Les objectifs de PHIL sont de développer des sources d'électrons de fort courant et très faible divergence et les technologies qui leurs sont associées pour deux raisons : d'abord récupérer le faisceau pour les utilisateurs (recherche par des laboratoires extérieurs), et aussi pour utiliser l'accélérateur comme outil de formation (stages, thèses, post-doc).

PHIL est actuellement en phase de pérennisation de l'installation, de reproduction des paramètres du faisceau, et d'installation de nouveaux diagnostics. Certains paramètres liés à la qualité du faisceau vont être plus ou moins favorisés au dépend d'autres, en fonction du type d'exploitation de PHIL par les utilisateurs. Nous avons étudié l'optimisation des paramètres du photo-injecteur et de la ligne de transport du faisceau. Pour cela, des simulations de la dynamique du faisceau sont nécessaires afin de préparer l'expérience et pour comparer ensuite les résultats

théoriques et expérimentaux. Durant notre stage, une panne importante étant survenu au niveau du modulateur, le temps d'accès au faisceau a été restreint.

Suite aux conclusions tirées des diverses simulations et manipulations au cours du stage, nous devons être en mesure de proposer des solutions pour améliorer le transport du faisceau.

Notre collaboration avec les mécaniciens (responsables du dessin industriel) nous a permis d'obtenir les différents schémas présentés ci-dessous montrant le photoinjecteur dans sa configuration actuelle. Les mécaniciens sont joignables a tout moment par le SERA dès qu'un doute sur certaines cotes (par exemple) est mis en évidence.

On peut voir sur la figure 1, de gauche à droite les éléments qui nous concernent particulièrement : c'est-à-dire le canon Alphax, la première bobine (désignée en tant que n°3 dans le rapport), l'écran YAG à 1.927m et la seconde bobine (dite n°5).

La chambre à vide où circule le faisceau est bien sur visible dans son ensemble, depuis la cathode jusqu'à la cage de faraday.

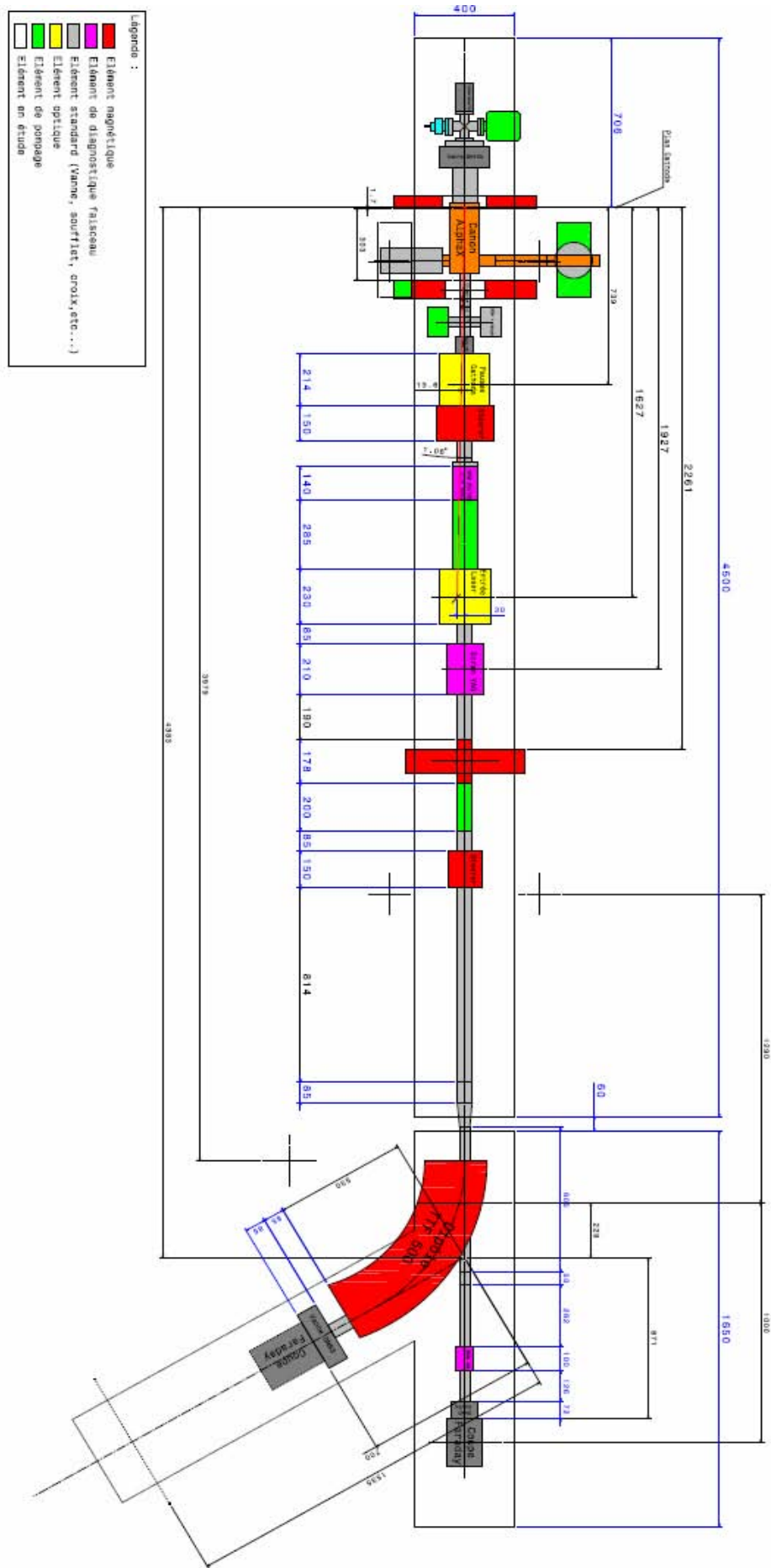


Figure 1 : Représentation cotée de l'accélérateur PHIL. [2]

Pour être toujours efficace, la qualité d'usinage de la cavité (canon Alphax) est très importante tout comme la pureté du cuivre qui la compose afin de minimiser la résistance électrique et donc les pertes d'énergie par effet joule. La cavité de PHIL est en cuivre et doit être régulée en température pour contrer les effets de dilatation thermique exercés sur la cavité au cours du fonctionnement de l'accélérateur. Or la forme de la cavité détermine sa fréquence de résonance, et donc de fonctionnement, sa régulation thermique est donc primordiale.

La longueur de la cavité est d'environ 14cm et elle est constituée de deux cellules et demie. La dimension longitudinale (suivant l'axe Z) d'une cellule correspond à la demi-longueur d'onde du champ accélérateur. La dimension radiale (suivant l'axe r) d'une cellule détermine la fréquence de résonance du champ qui est de 3GHz pour le canon AlphaX (voir schéma du canon AlphaX en annexe).

Le faisceau en passant dans la cavité où est introduit le champ électrique va pouvoir atteindre une énergie de quelques MeV. (PHIL : <10 MeV, actuellement : 4-5MeV) Les éléments de pompes sont nombreux sur la machine et sont indispensables pour maintenir un vide de l'ordre de 10^{-9} mbar. Le steerer est un dispositif permettant de corriger la trajectoire du faisceau. La fin de machine est composée de deux voies : une directe et une déviée par un dipôle magnétique, elles permettent de faire alternativement des diagnostics différents qui sont détaillés dans la partie III.2. Elle n'est pas visible sur la figure, mais la photo-cathode utilisée est en cuivre. Il faut savoir qu'une photo-cathode idéale a un bon rendement quantique, c'est-à-dire qu'elle émet un grand nombre d'électrons par rapport au nombre de photons incidents. A plus long terme, une photo-cathode en tellure de césium sera installée sur PHIL, ce matériau possédant, un rendement quantique plus élevé, permettra d'obtenir des faisceaux d'électrons avec des charges plus importantes (actuellement la maximum atteint est de l'ordre de 150pC).

De même la partie source de puissance n'est visible que sur la figure 27. La source de puissance est composée d'un amplificateur, d'un klystron et d'un modulateur. Le signal émis par le klystron est transmis jusqu'à la cavité HF (canon) par un guide d'onde rectangulaire dans le cas de PHIL. La puissance actuelle obtenue par le klystron est de 10MW, ce qui fournit un champ accélérateur de 90MV/m en crête et environ 27 MV/m en moyenne à l'intérieur de la cavité. Enfin une pièce est entièrement dédiée au laser.

On a pu observer au cours des expériences que le laser utilisé au LAL est très instable au niveau de l'énergie restituée, et c'est un problème majeur puisqu'il va rendre les caractéristiques des paquets également instables.

II. Simulations et optimisation des caractéristiques du faisceau d'électrons

1. Présentation du logiciel ASTRA (A Space Charge Tracking Algorithm)

Nous avons utilisé le code Astra afin de reproduire et de prévoir le comportement du faisceau dans PHIL. Ce logiciel a été conçu par les équipes du Deutsches Elektronen Synchrotron à Hambourg.

ASTRA traque les particules déterminées par (x, y, z, p_x, p_y, p_z) en considérant les forces de charges d'espace et les champs électriques et magnétiques des éléments de l'accélérateur. Ces données servent dans un second temps à calculer la valeur des paramètres caractérisant la qualité du faisceau.

L'observation des résultats de ces simulations offre l'avantage de pouvoir anticiper d'éventuels problèmes au cours de manipulations, ou de mettre en évidence par comparaison avec les résultats expérimentaux des phénomènes incompris sur PHIL, qui reste une machine à caractériser.

Ce code a besoin de deux fichiers d'entrées permettant de définir l'ensemble des paramètres liés à l'accélérateur ainsi qu'aux calculs. Le premier fichier décrit la distribution initiale de particules et le second décrit les éléments de la machine, permet la visualisation des résultats dans différents plans...

Le premier fichier.in (INPUT) où l'on définit les paramètres liés à la distribution initiale est en fait un fichier.ini (INITIAL) de sortie d'un autre programme appelé GENERATOR qui simule la distribution des électrons à leur émission de la cathode. On doit choisir le type de particules à simuler, le nombre d'entre-elles à prendre en compte pour les calculs, la charge des paquets d'électrons, les dimensions transverses, l'émittance thermique...

Le fichier des particules aléatoirement générées (distribution initiale de particules) avec leur position et quantité de mouvement dans les trois dimensions, est une donnée d'entrée d'ASTRA. La syntaxe du deuxième fichier se décompose en paragraphes qui correspondent à un type d'élément présent sur la machine.

- Le premier paragraphe permet de choisir quels types de fichiers de résultats on souhaite observer et sur quelle longueur de l'accélérateur on effectue les calculs. Les résultats se présentent toujours sous forme de tableaux de données. Certains enregistrent les données liées aux particules du paquet (coordonnées, quantités de mouvements...) dans un type de fichier. Un autre type de fichier .Xemit va recueillir des données comme l'émittance ou les dimensions du faisceau sur l'axe transverse X, les fichiers.Yemit sur l'axe Y et de même pour Z.
- Le second paragraphe permet d'utiliser une fonction spéciale, qui permettra une fois les calculs effectués, de visualiser l'influence d'un paramètre sur un autre. Habituellement, chaque paramètre est observé selon l'axe de la chambre à vide, mais de cette façon on pourra par exemple tracer la charge en fonction de la phase.
- Le troisième paragraphe permet de prendre en compte les forces de charges d'espaces dans les calculs et de contrôler la façon dont elles sont prises en compte (système de grille avec maillage plus ou moins fin selon la position dans le paquet d'électrons). Il s'agit en fait d'une option qui simule la répulsion Coulombienne des électrons à l'intérieur du paquet d'électrons.
- Le quatrième paragraphe sert à entrer les dimensions du tube faisceau le long de la machine. Comme on le verra, la forme et les cotes du tube faisceau influent de manière significative sur la plupart des paramètres.

- Enfin, les cinquième et sixième paragraphes sont destinés aux paramètres du champ accélérateur (voir figure2) et des bobines magnétiques (voir figures 3 et 4). On lit d'abord le fichier où est enregistré le profil normalisé du champ, on fixe sa valeur et sa position sur l'axe de la machine.

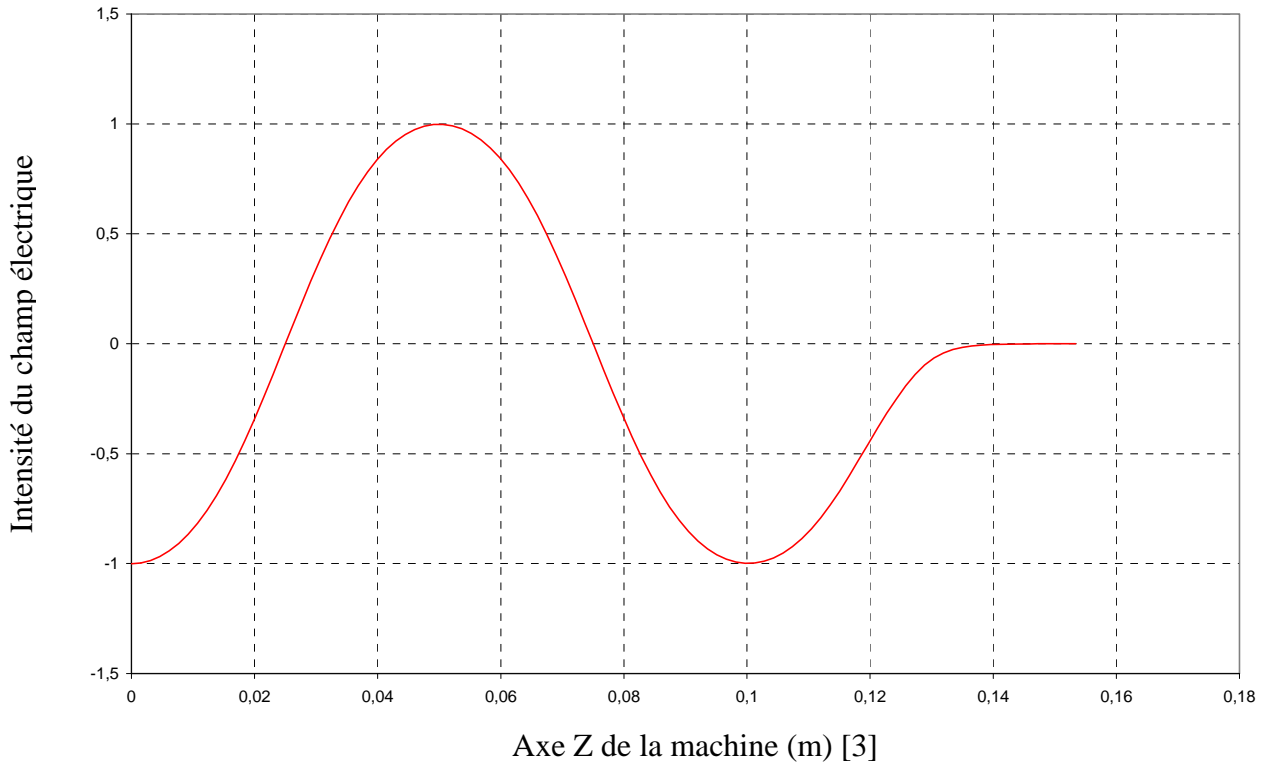


Figure 2 : Champ Electric accélérateur normalisé dans la cavité

On indique les valeurs des champs magnétiques focalisant de B3 et B5, la fréquence de résonance de la cavité, le déphasage du champ E accélérateur par rapport à l'impulsion laser, etc. On remarque que les profils des distributions (figures 4 et 5) ne sont pas identiques, car les deux bobines n'ont pas la même fonction (cf. II.2, p.14).

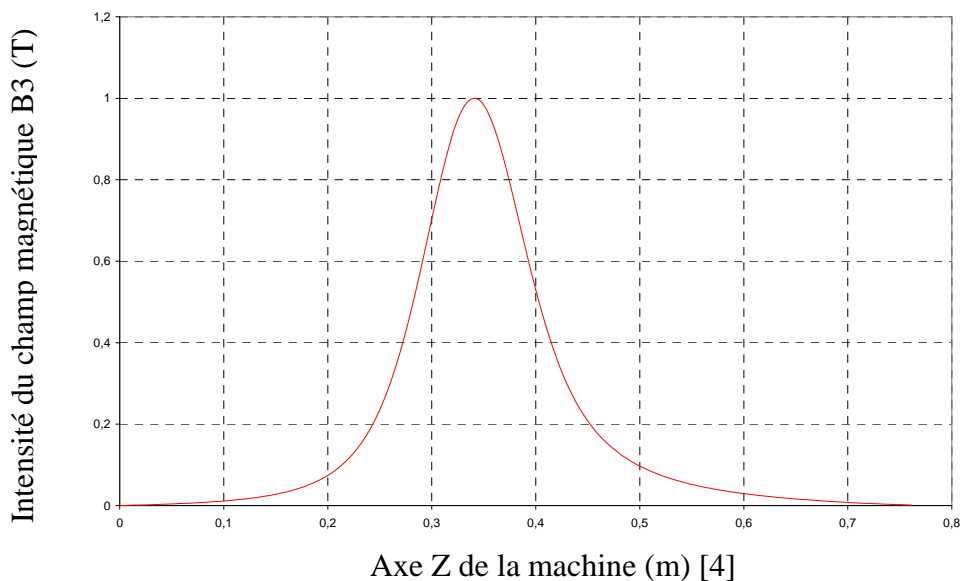


Figure 3 : Distribution du champ normalisé à 1 Tesla du solénoïde de sortie de canon (0.34m)

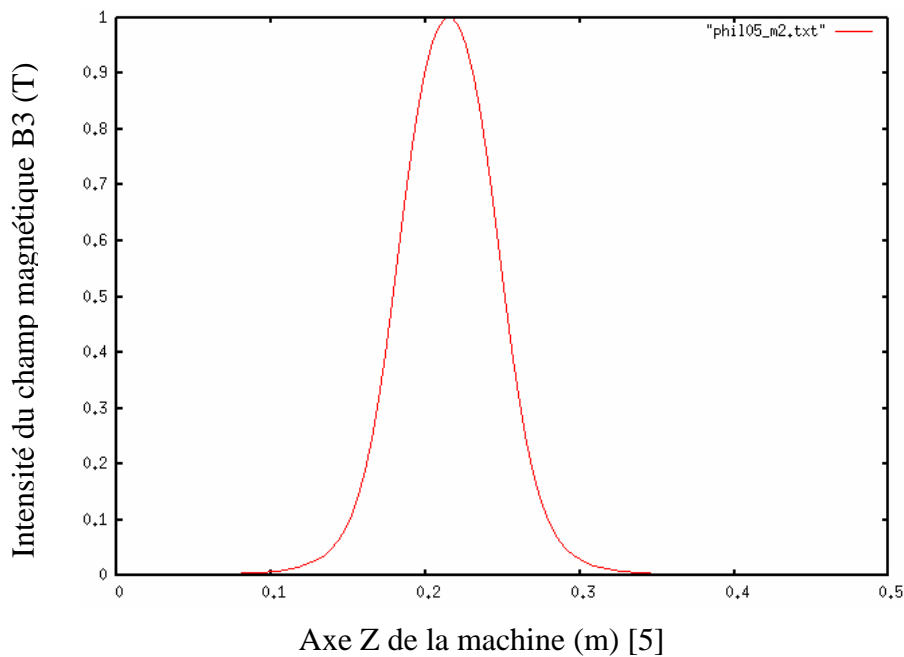


Figure 4 : Distribution du champ normalisé à 1 Tesla de la bobine de focalisation (située à 2.1m de la cathode)

On peut maintenant exécuter ASTRA, et une fois les résultats obtenus, on les visualise par différents moyens qui sont : GNUPLOT, PAW (2 logiciels sous linux) et EXCEL. L'utilisation d'ASTRA et des logiciels de visualisation (à part EXCEL) nous a permis de nous familiariser avec l'environnement Linux.

Au fur et à mesure de l'avancement du stage nous avons complexifié les fichiers d'entrées en ajoutant des éléments sur la ligne afin que les comparaisons faites avec les expériences soient cohérentes. Avant chaque ajout, nous avons attendu de nous familiariser avec le dernier élément pour avoir une bonne compréhension de l'effet de celui-ci sur le comportement du faisceau.

2. Détermination des conditions de simulations

Les calculs ont été effectués pour deux champs accélérateurs, mais malheureusement le temps limité d'utilisation de la machine ne nous a permis de confronter seulement celui fixé à 70MV/m avec les simulations.

L'ensemble des calculs a été fait pour une charge de 0.1nC et 0.3nC, on va ainsi pouvoir comparer les effets d'une densité électronique plus importante dans le paquet.

Le logiciel ASTRA traque les particules en donnant les coordonnées des particules dans l'espace des phases. L'émittance est par exemple calculée en moyennant certaines de ces coordonnées, ce qui laisse penser que si le nombre de particules pris en compte est trop faible, le résultat n'aura aucune signification. L'idéal serait donc de prendre en compte toutes les particules présentes dans le paquet d'électrons à modéliser mais ceci est inconcevable puisque la durée des calculs augmente dans le même sens et de façon non négligeable. J'ai étudié l'évolution de l'émittance en fonction du nombre de particules pris en compte afin de déterminer une valeur minimale de particules pour obtenir des résultats rationnels.

Pour les premières simulations nous avons choisi 1000 particules, mais de cette façon, on faisait une erreur d'environ 15% sur les valeurs de l'émittance (même ordre de grandeur pour la plupart des paramètres). La valeur de 4000 offre finalement un bon compromis entre statistique et temps de calcul.

La phase de référence influe sur l'ensemble des résultats, il fallait donc suivre une procédure reproductible pour rendre de futures simulations comparables avec celles-ci. La méthode consiste à choisir la phase qui maximise l'énergie du faisceau.

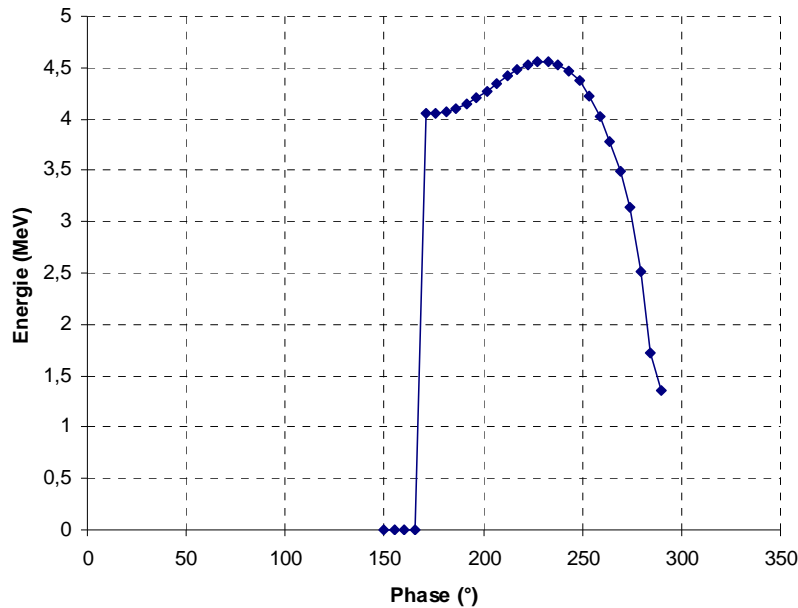


Figure 5 : Energie = f (Phi) [6]

Il s'agit d'un « zoom » de 0 à 280° mais l'allure de la courbe ne présentait pas d'irrégularité dans son ensemble. La valeur choisie correspond à l'énergie cinétique maximale obtenue : de 4.55MeV à 233 °.

Expliquons d'abord pourquoi l'énergie varie en fonction de la phase du champ accélérateur avec l'impulsion laser.

Le champ électrique accélérateur présent dans la cavité est alternatif sinusoïdal comme le montre la Figure6.

On sait que l'énergie des électrons augmente lorsque leur vitesse augmente par la relation suivante :

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + mc^2$$

On sait aussi, que la force de Lorentz est proportionnelle au champ électrique :

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

Dans la cavité accélératrice, le champ électrique \vec{E} n'a qu'une composante suivant l'axe Z de la machine (cette composante s'annule à la sortie du canon). La force appliquée aux électrons par la relation précédente justifie donc l'accélération des électrons.

Si la phase entre le champ électrique et l'impulsion laser est optimale, le paquet d'électrons va être soumis au champ décrit par la courbe bleue représentée sur la figure6. En sachant que le champ est alternatif et que les électrons ont un temps de vol non négligeable dans la cavité, la phase est optimisée pour que le paquet d'électrons ne voit qu'un champ positif accélérateur égal à 1 en crête (à multiplier par un coefficient puisqu'il s'agit du champ normalisé).

Si la phase n'est pas adaptée le paquet d'électrons verra plus de champ décélérateur et moins de champ accélérateur et surtout moins intense (courbe rouge), les électrons seront moins accélérés et donc moins énergétiques.

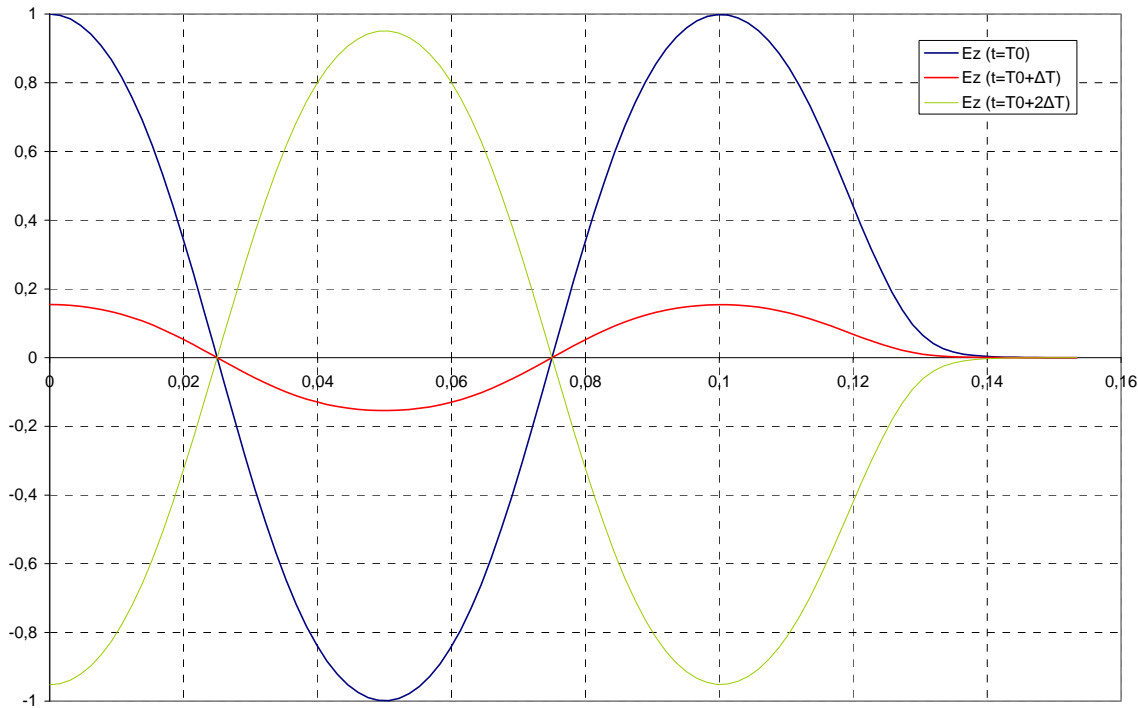


Figure 6 : Profil du champ Electric en fonction du temps [7]

Nos simulations ont montré que la taille du spot laser sur la cathode a beaucoup d'influence sur les qualités globales du faisceau. Les dimensions transverses du faisceau sont de façon générale, diminuées lorsque le point d'émission des électrons est réduit du fait d'un spot laser de taille inférieure. On a aussi constaté que l'émittance est réduite pour les mêmes raisons, elle est en moyenne divisée par 20 lorsque la taille est 5 fois plus faible (voir figures 7 et 8). Globalement, les qualités du faisceau sont donc dégradées lorsque la taille du spot augmente.

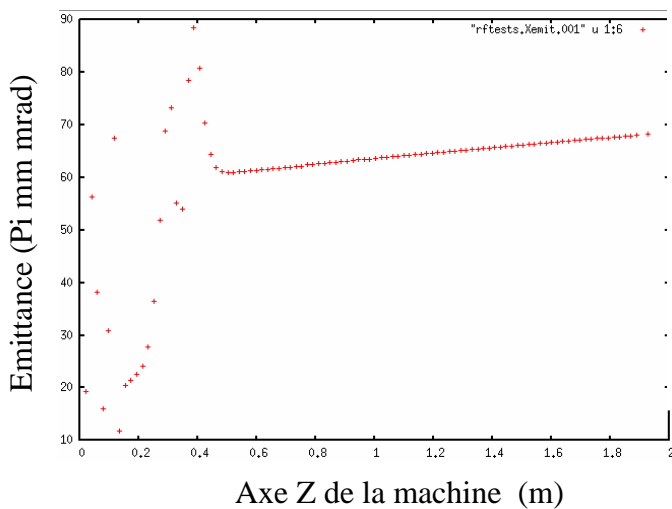


Figure 7 : Emittance du faisceau sur les 2 premiers mètres de la machine avec une taille de spot égale 2.5mm [8]

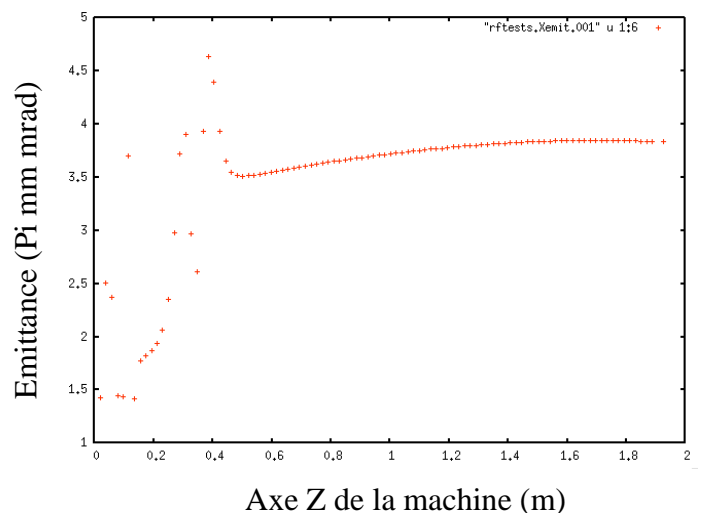


Figure 8 : Emittance du faisceau sur les 2 premiers mètres de la machine avec une taille de spot égale 0.5mm [9]

Nous avons aussi étudié l'influence de l'émittance thermique et nous avons constaté une augmentation sensible de l'émittance du faisceau mais négligeable sur les autres paramètres.

3. Optimisation des caractéristiques du faisceau par détermination des champs de focalisation

a) Optimisation à 0.1nC

Sur PHIL, une première bobine (n°3) a été placée à 34 cm en aval de la cathode afin de compenser l'augmentation de l'émittance et de faciliter le transport du faisceau le long de la machine, car sans élément de focalisation, le faisceau diverge.

Dans les faits, l'émittance augmente dans le solénoïde et revient à sa valeur d'entrée (du solénoïde) alors que les dimensions transverses du faisceau sont réduites.

On a aussi remarqué que l'augmentation de l'émittance n'est pas linéaire à travers un solénoïde (cf. Figure 12) formant un pic d'émittance.

Ceci est dû à la modification des quantités de mouvements des particules qui vont mettre un certain temps pour redevenir stables.

La valeur de champ adéquate sera celle qui stabilise l'émittance au niveau de l'écran YAG. Pour optimiser le champ de la bobine 3, on fait calculer ASTRA pour obtenir la dispersion en énergie, l'énergie, la charge, la longueur des paquets, et dans le plan vertical et horizontal l'émittance et la taille du spot et tout cela en fonction du champ de la bobine 3.

Nous avons choisi de minimiser les dimensions transverses puisque nous avons un diagnostic dédié à cette mesure contrairement à l'émittance.

Les figures 9, 10 et 11 résument le comportement de quelques paramètres en fonction du champ magnétique de B3 :

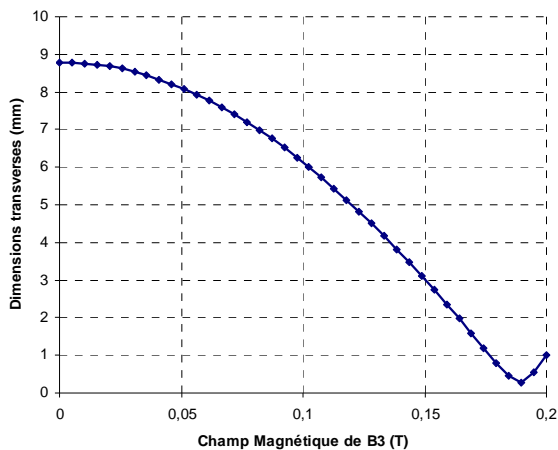


Figure 9 : Dimensions transverses du faisceau à l'écran en fonction du champ de la bobine 3 [10]

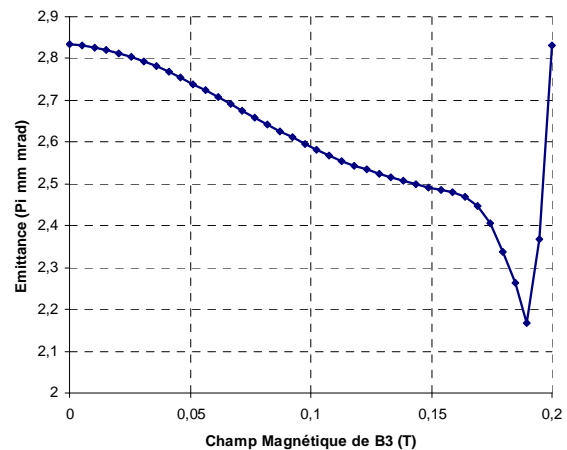


Figure 10 : émission à l'écran en fonction du champ de bobine 3 [11]

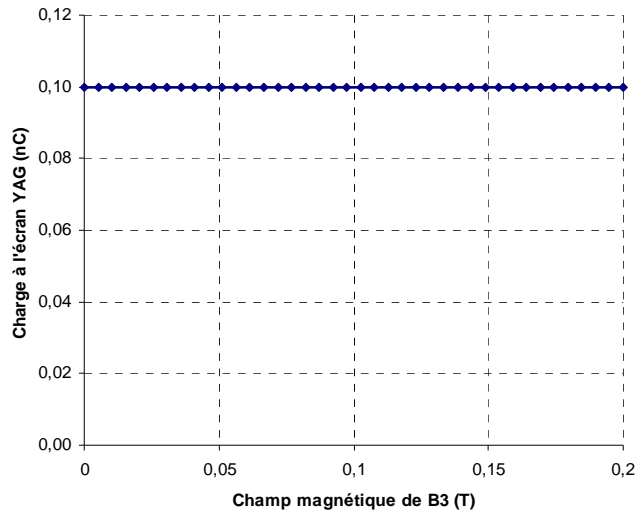


Figure 11 : Charge récupérée à l'écran en fonction du champ de bobine 3 [12]

Sur la figure 11, la charge transmise est totale (à l'écran YAG) quelque soit la valeur du champ magnétique de B3. La valeur du champ qui minimise les dimensions transverses du faisceau est de 0.19T, un faisceau de 0.3 mm est ainsi obtenu. J'ai ajouté un graphe de l'émittance indiquant que la valeur de champ qui minimise les dimensions transverses, minimise dans ce cas, aussi l'émittance.

Ensuite, on vérifie les courbes d'émittance verticale et horizontale en fonction de Z pour observer la compensation d'émittance (voir figure 12)

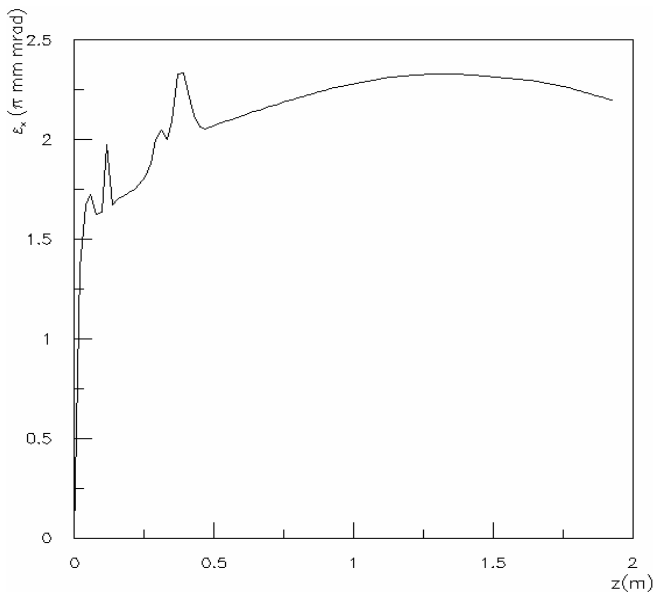


Figure 12 : Emittance transverse en fonction de z [13]

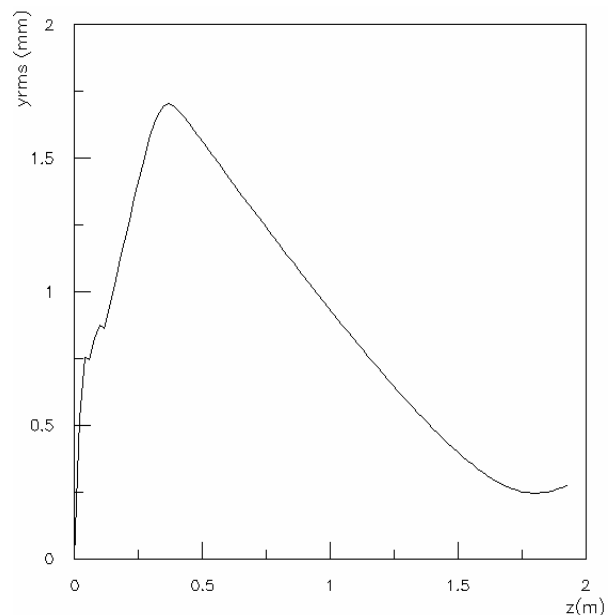


Figure 13 : Dimensions transverses en fonction de z [14]

La figure 13 n'indique pas de discontinuité des dimensions transverses particulière le long de la machine et on retrouve bien la valeur de 0.3 mm au niveau de l'écran (2m environ). La figure 12 ne montre pas une parfaite compensation au niveau de l'écran, mais compte tenu de l'échelle et du fait que l'on ne connaît pas le niveau de compensation en manipulations, on estime que la valeur de 0.19T est convenable.

Une seconde bobine (n°5) de focalisation est installée en milieu de machine et sert à optimiser les qualités du faisceau avant que celui-ci ne soit récupéré par les futurs utilisateurs.

La même méthode est utilisée pour fixer le champ de B5, à part que le champ de B3 est maintenant figé. Cette fois-ci la valeur choisie sera celle qui optimise le faisceau en bout de machine.

Cette bobine agit de la même façon sur le faisceau que la première mais elle est optimisée différemment puisque son objectif n'est pas le même.

En définitive, nous avons trouvé que la valeur 0.083T imposée à B5 minimisait les dimensions transverses du faisceau. Un faisceau de 1.34mm est obtenu en fin de machine avec une émittance de 1.92 Pi mm mrad.

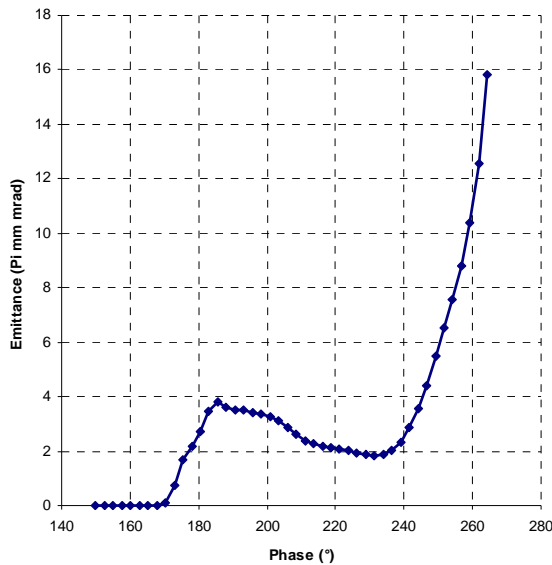


Figure 14 : Emittance du faisceau en fonction de la phase [15]

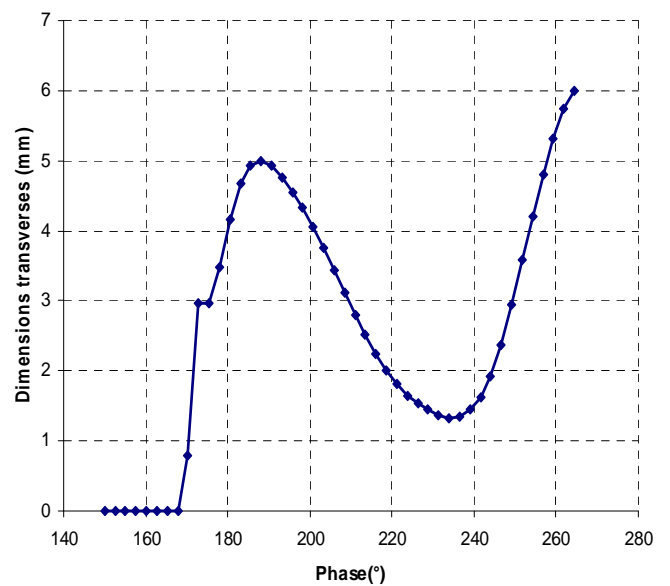


Figure 15 : Dimensions transverses du faisceau en fonction de la phase [16]

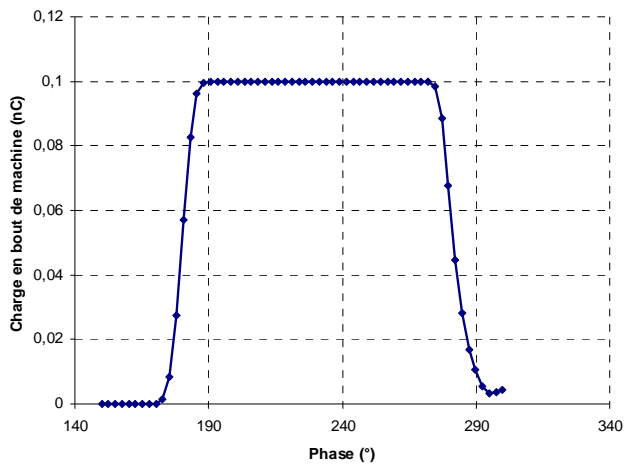


Figure 16 : Transmission de la charge en bout de machine en fonction de la phase [17]

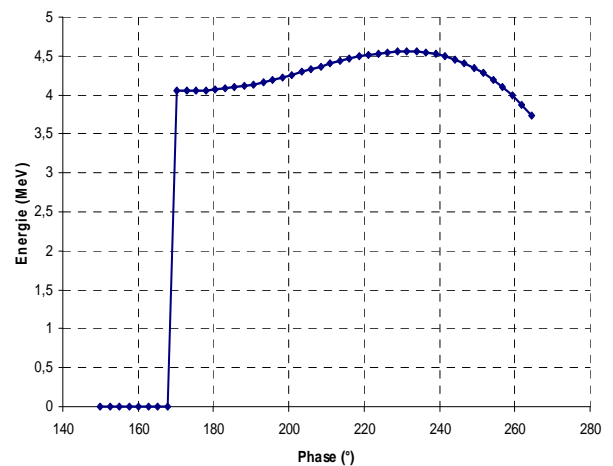


Figure 17 : Energie du faisceau en fonction de la phase [18]

L'évolution des paramètres en fonction de la phase en bout de ligne est le résultat final de l'optimisation pour 70 MV/m. Il faut se placer à 233° si l'on veut conserver le maximum d'énergie, ou choisir une autre valeur dans une plage qui maintient la charge dans tous les cas, mais en favorisant d'autres paramètres au dépend de l'énergie si l'on veut optimiser un peu plus un paramètre.

Comme nous l'avons dit précédemment, la phase modifie l'énergie du faisceau, or des particules d'énergie différentes réagissent différemment au passage des bobines de focalisation. A une énergie plus élevée la modification des quantités de mouvement des particules est plus faible au passage des bobines de focalisation qu'à une énergie plus faible.

Or on observe l'effet inverse sur les graphes précédent, les dimensions minimales du faisceau sont obtenues pour l'énergie maximale, de même pour l'émission. Cela est dû au fait qu'ici, les champs magnétiques des bobines ont été optimisés pour l'énergie maximale.

Il arrive donc un phénomène similaire à celui que l'on avait observé lorsqu'on se familiarisait avec l'influence l'énergie sur le faisceau (voir figure 18). Dans cet exemple, l'énergie correspondant à la courbe bleue est donc correcte pour focaliser le faisceau sur l'écran YAG. La raison pour laquelle les dimensions transverses augmentent sur la Figure 15 est dû à une diminution de l'énergie et donc à l'accentuation des effets de focalisation, le faisceau est du coup focalisé trop tôt sur l'axe de la machine. Et comme il diverge naturellement, les dimensions du faisceau sont plus grandes en fin de machine, qui est autre que le point où ont été tracé les graphes des Figures 14, 15, 16 et 17. L'émission étant liée aux dimensions transverses des particules dans le paquet d'électrons, il se pose le même problème... La pointe observée de 200 à 240°, sur le graphe d'énergie correspond donc aux meilleures qualités de faisceau.

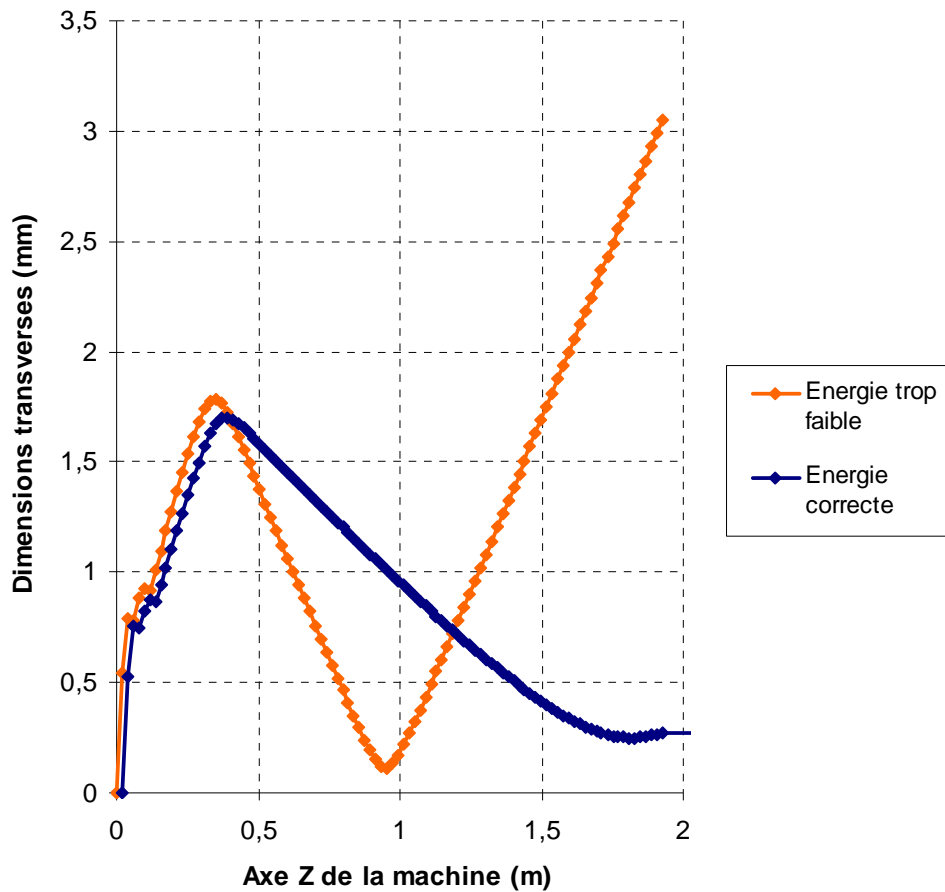


Figure 18 : Modification du point de focalisation à optique fixée pour deux valeurs d'énergie : 4.6MeV et 3.9 MeV dans des conditions différentes du cas optimisé que l'on aborde dans cette partie. [19].

b) Comparaison avec les résultats obtenus à 0.3nC

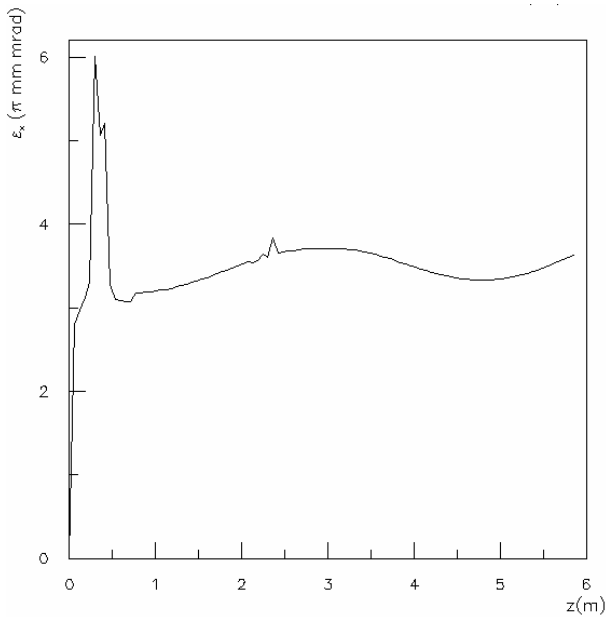


Figure 19 : Emittance transverse optimisée en fonction de Z, à 0.3nC [20]

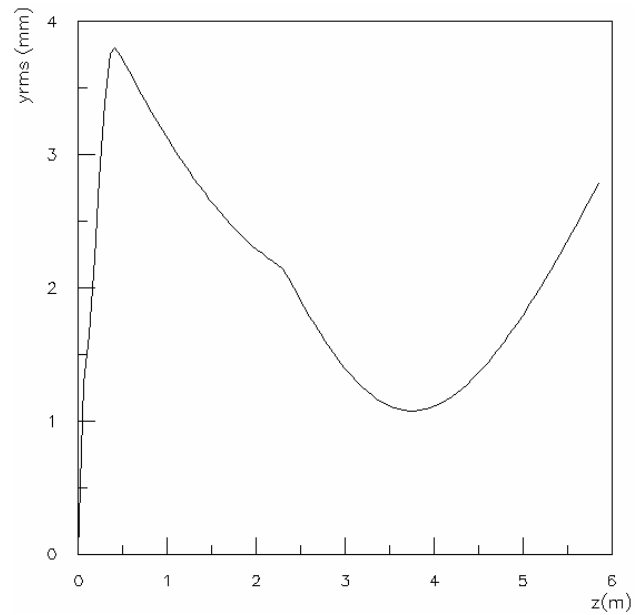


Figure 20 : Dimensions transverse optimisées en fonction de Z, à 0.3nC [21]

Ces résultats des figures 18 et 19 sont à comparer avec ceux des figures 14 et 15 après optimisation à 0.1nC (à 233°), où l'on avait obtenu un faisceau de 1.34mm avec une émittance de 1.92 Pi mm mrad.

On constate qu'à 0.3nC les qualités du faisceau obtenues sont moins bonnes : l'émittance a doublée et les dimensions transverse sont passées de 1.34 à 2.8 mm en fin de machine.

Ces différences sont attribuables aux forces de charges d'espaces qui traduisent la force de repoussement des électrons dû à la loi de Coulomb :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q^2|}{distance^2}$$

Figure 21 : Force de charges d'espace entre deux électrons

On peut donc estimer que plus le rapport charge / longueur des paquets est élevé, et plus les effets des charges d'espace seront importants. Les effets du repoussement vont dilater les paquets d'électrons (pouvant aller jusqu'à l'explosion du paquet) tout en augmentant l'émittance.

Initialement nous aurions dû étudier les effets dans des conditions extrêmes de fortes charges et de faible durée d'impulsion mais le temps nous à manqué.

Ces raisons sont d'ailleurs la justification de la position de la première bobine, qui a pour but de compenser l'augmentation d'émittance dès l'émission des électrons par la photo-cathode.

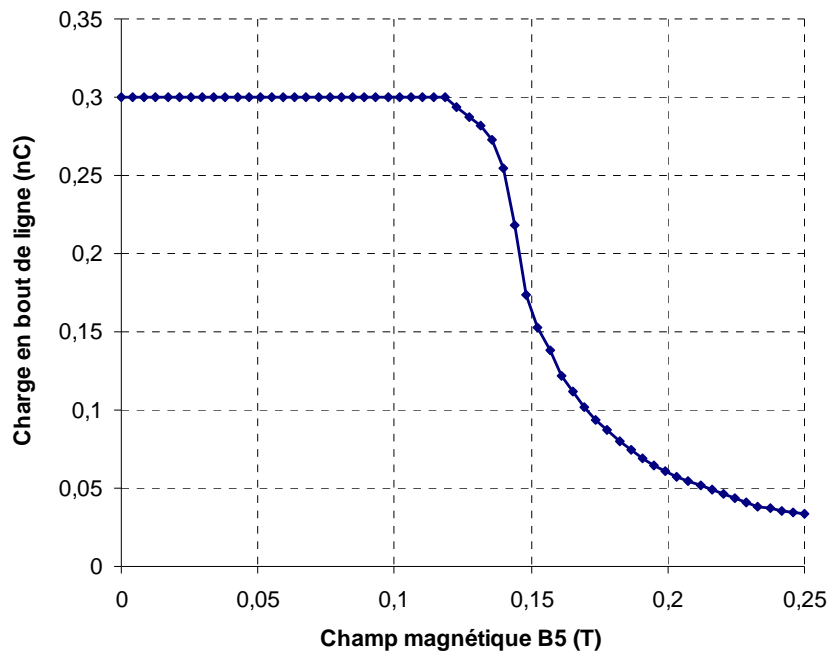


Figure 22 : Transmission de la charge en bout de ligne en fonction de B5 à 0.3nC [22]

Une autre conséquence des forces de charges d'espaces est que l'on a observé une diminution de la densité électronique du paquet d'électrons en fin de machine lorsque l'on a fait varier B5 (voir figure22). Cela signifie que les dimensions transverses du faisceau (au-delà de $B5 = 0.12T$) auraient été supérieures ou du moins égales aux dimensions de la chambre à vide en un point de la machine. Les électrons situés sur la partie externe du faisceau seraient alors perdus sur la paroi, diminuant la charge totale du paquet.

Il paraît donc nécessaire d'indiquer avec précision comment ASTRA modélise la chambre à vide.

La liste des dimensions transverses (appelées aussi « ouvertures ») successives de la chambre à vide ne nous ayant pas été donnée, nous avons donc dû récolter les informations nécessaires auprès des mécaniciens, puis rédiger le fichier de modélisation.

Une fonction disponible sur la dernière version d'Astra permet de prendre en compte des géométries plus avancées. En effet, jusqu'à maintenant l'unique géométrie disponible était cylindrique hors comme on peut le voir sur le schéma en coupes de PHIL (Figures 28,29), certaines portions de la chambre à vide sont coniques ou carrés. Le fichier d'ouvertures proposé ici (Figure 31), prenant en compte le profil conique de la chambre à vide au niveau de l'antenne du canon et le profil carré au niveau du dipôle magnétique proposé en annexe est le premier à avoir été utilisé pour modéliser PHIL .

Toutefois on s'est rendu compte qu'il n'y avait à priori pas de modification du comportement du faisceau notamment au niveau des pertes de charges par rapport à un fichier d'ouvertures qui modélisait un profil cylindrique dont le rayon variait en « escalier » à la place d'un cône. Même remarque pour la section carrée qui était jusqu'à présent modélisée par un profil cylindrique.

III. Expériences sur PHIL

1. Conditionnement : principe et réalisation

Suite à une panne importante sur PHIL qui a nécessité le démontage du système de puissance, le reconditionnement de ce dernier a été effectué le 9 Juin dernier. Le programme de reconditionnement commence par une vérification préalable de la fréquence de résonance de la cavité. Celle-ci n'étant atteignable que lorsque la température nominale de fonctionnement de la cavité (précise à quasiment 0.1°C près) est relevée. La température de la cavité étant imposée depuis la salle de contrôle via un système de régulation.

L'étape suivante consiste à monter progressivement la puissance entrante dans le canon jusqu'à atteindre la valeur « nominale » de fonctionnement. Le problème est que plus la puissance injectée est importante, plus la température de la cavité augmente, or le système de thermalisation n'est pas adapté pour ce canon et du coup l'obtention et la stabilisation des températures est assez longue. Or nous avons vu dans le paragraphe sur la présentation de PHIL, que les variations de températures influent sur la géométrie de la cavité et donc sur sa fréquence de résonance.

2. Principes de mesures : dimensions transverses, charge, et énergie du faisceau

A terme un autre objectif est de compléter la machine PHIL au niveau des éléments de diagnostic faisceau. Or la mesure des paramètres se déduit à partir d'autres mesures, par exemple : les dimensions transverses du faisceau donnent des informations sur l'émittance. L'installation d'un système autorisant la mesure de la taille du faisceau était donc logique dans un premier temps.

Pour cela l'utilisation d'écrans phosphorescents YAG a été retenue. Le principe repose sur l'émission de photons par excitation de l'écran via les électrons du faisceau. Les images sont enregistrées en salle de contrôle, et sont ensuite traitées. Un programme MATLAB spécialement conçu pour traiter une grande quantité d'images permet d'obtenir la taille du faisceau en analysant les photos. Le principe repose sur l'ajustement gaussien du profil de l'image du faisceau sur les axes vertical et horizontal. Les dimensions rms en X et Y sont ainsi calculées et tracées comme le montre la figure 24.

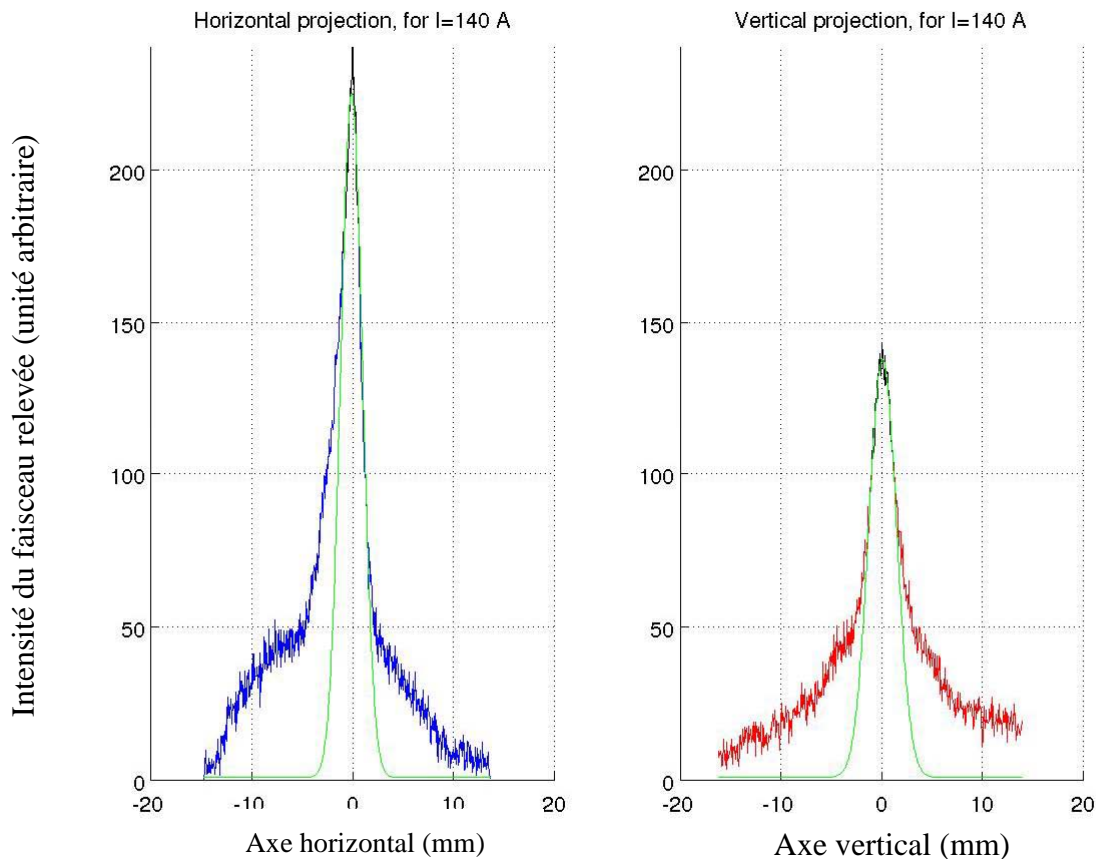


Figure 23 : Projection de l'intensité des photos représentant le faisceau en fonction de la position au centre du faisceau à 70MV/m, et $B_3 = 140A$ (voir courbes d'équivalence champ-ampères p.33; rappel 1Tesla= 10^4 Gauss) [23]

La fin de machine est composée de deux voies : une directe et une déviée par un dipôle magnétique. Elles permettent de faire alternativement des diagnostics différents. La voie directe munie d'une cage de Faraday, permet une mesure de la charge des paquets observés. La transmission de charge est consultable dans la salle de contrôle via un oscilloscope, une soustraction du courant (d'obscurité) résiduel lorsque l'on coupe le laser était nécessaire à chaque point de mesure.

La voie déviée est également pourvue d'une cage de faraday, mais grâce à un système de fentes portées par des translateurs, on peut « balayer » les particules du faisceau des moins énergétiques au plus énergétiques (d'une extrémité au centre du faisceau) et tracer $Q = f(E)$. Ainsi, plus la forme de la courbe obtenue sera piquée et plus la dispersion en énergie sera faible.

Expérimentalement, nous avons pu calculer l'énergie du faisceau en mesurant le champ électrique en bout de machine. La valeur obtenue était de 4.3 MeV, à comparer aux 4.5 MeV estimés en simulation, la mesure paraît donc satisfaisante.

Les hypothèses de départ ont aussi été mesurées : la puissance entrante dans le canon était de 6 MW, le gradient accélérateur de 70 MV/m, le champ magnétique du dipôle (voie déviée) était de 214 G (soit 0.0214T).

3. Comparaisons des résultats expérimentaux avec les résultats obtenus en simulations

a) Comparaison des dimensions transverses en fonction du champ magnétique de B3

La simulation s'est effectuée avec des conditions similaires à l'expérience, c'est-à-dire avec un gradient accélérateur de 70MV/m, et une charge des paquets égale à 0.1nC

On a ainsi obtenu un maximum d'énergie à 4.55 MeV avec une phase de 233°.

J'ai donc réalisé plusieurs simulations pour différentes valeurs de champ magnétique de B3. La figure 9 résume les dimensions transverses du faisceau en fonction du champ magnétique de B3. On y observe une taille transverse du faisceau de 9mm lorsque $B3 = 0T$, et on peut noter que la décroissance des dimensions transverses entre 0.08T et 0.185T est presque linéaire. Lorsque $B3 = 0.0185T$ les dimensions verticales et horizontales (sensiblement équivalentes) sont égales à 0.25 mm.

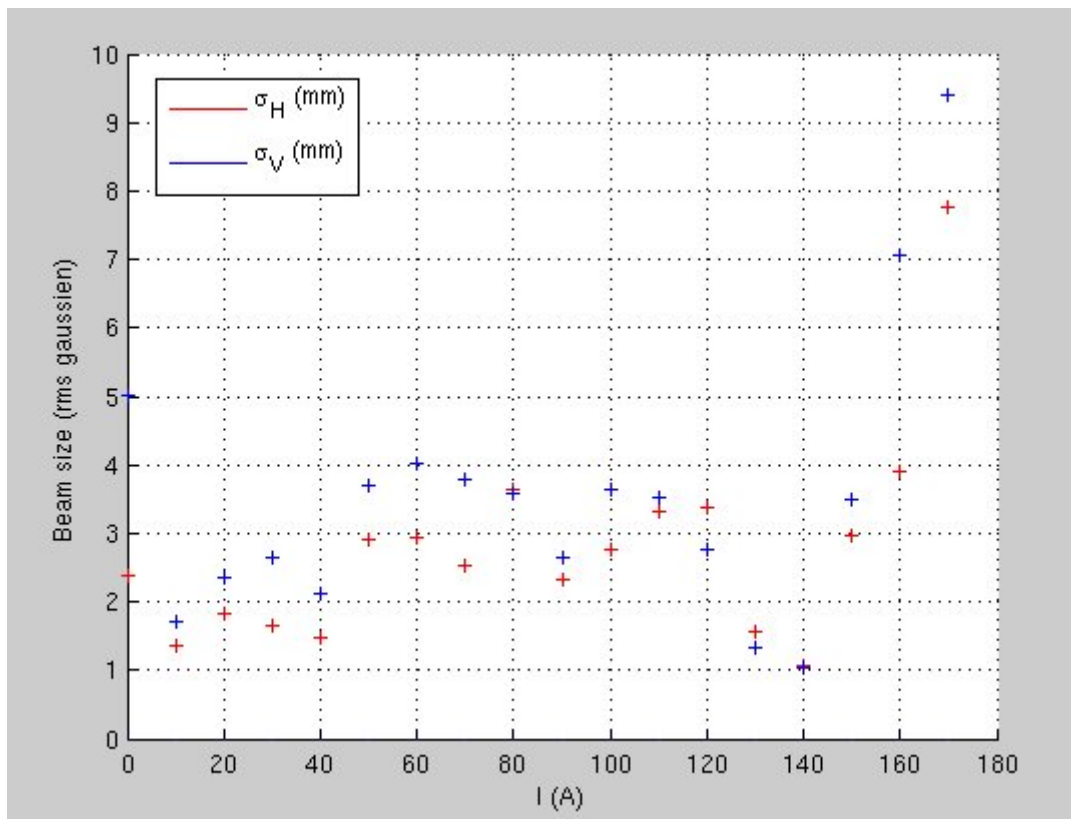


Figure 24 : Dimensions transverses du faisceau au niveau de l'écran YAG en fonction du champ magnétique de B3 (résultats d'expérience) [24]

Expérimentalement, la valeur du courant imposée à la bobine 3 qui minimise les dimensions du faisceau est de 140A. Contrairement aux simulations, on n'impose pas la valeur du champ magnétique de B3, mais le courant d'alimentation de la bobine. On a donc observé un faisceau de 1.2 mm, soit une valeur presque 5 fois plus élevée qu'en simulations.

La différence obtenue est attribuable aux erreurs de mesures, mais pas uniquement celles concernant la taille du faisceau. A savoir, la mesure de la taille du faisceau sur la cathode par exemple, le fait est que l'on est pas certains d'imposer à la machine nos hypothèses de départ.

Néanmoins la valeur de 140A correspond bien à celle obtenue en simulation, c'est-à-dire : 0.185T.

On peut ajouter, que l'allure des courbes est similaire entre 0.1 et 0.2T. Remarquons également les différences obtenues en expérience entre les dimensions verticale et horizontale du faisceau. Ceci est dû aux réglages de la caméra (saturation des images) pendant les captures photos et aux défauts du faisceau. Comme la présence d'un halo sur la plupart des mesures, ce qui perturbe le processus d'ajustement gaussien (voir les défauts observés sur les figures 32,33).

b) Comparaison de la charge obtenue en fin de machine

La simulation s'est effectuée avec des conditions similaires à l'expérience, c'est-à-dire avec un gradient accélérateur de 70MV/m, et une charge des paquets égale à 0.1nC. On a ainsi obtenu un maximum d'énergie à 4.55 MeV avec une phase de 233°.

La courbe bleue correspondant aux simulations représente les résultats des simulations. L'allure de la courbe obtenue forme un « plateau », indiquant que toute la charge initiale, soit 0.1nC est récupérée à 5.851m de 190 à 272°.

En expérience, nous ne sommes pas parvenus à obtenir la même allure de courbe. Il y a effectivement des pertes de charges importantes puisqu'on n'observe pas de plateau sur la courbe mais plutôt un pic ainsi qu'un second lobe. Ceci reste un phénomène à caractériser, même si l'on peut supposer que la cause provienne d'une dispersion en énergie réelle supérieure à ce que calcul ASTRA, ce qui signifierait une augmentation des dimensions transverses du faisceau pour une petite variation de phase (et donc d'énergie), le faisceau perdrait donc des charges parce qu'il "taperait" sur une paroi de la chambre à vide.

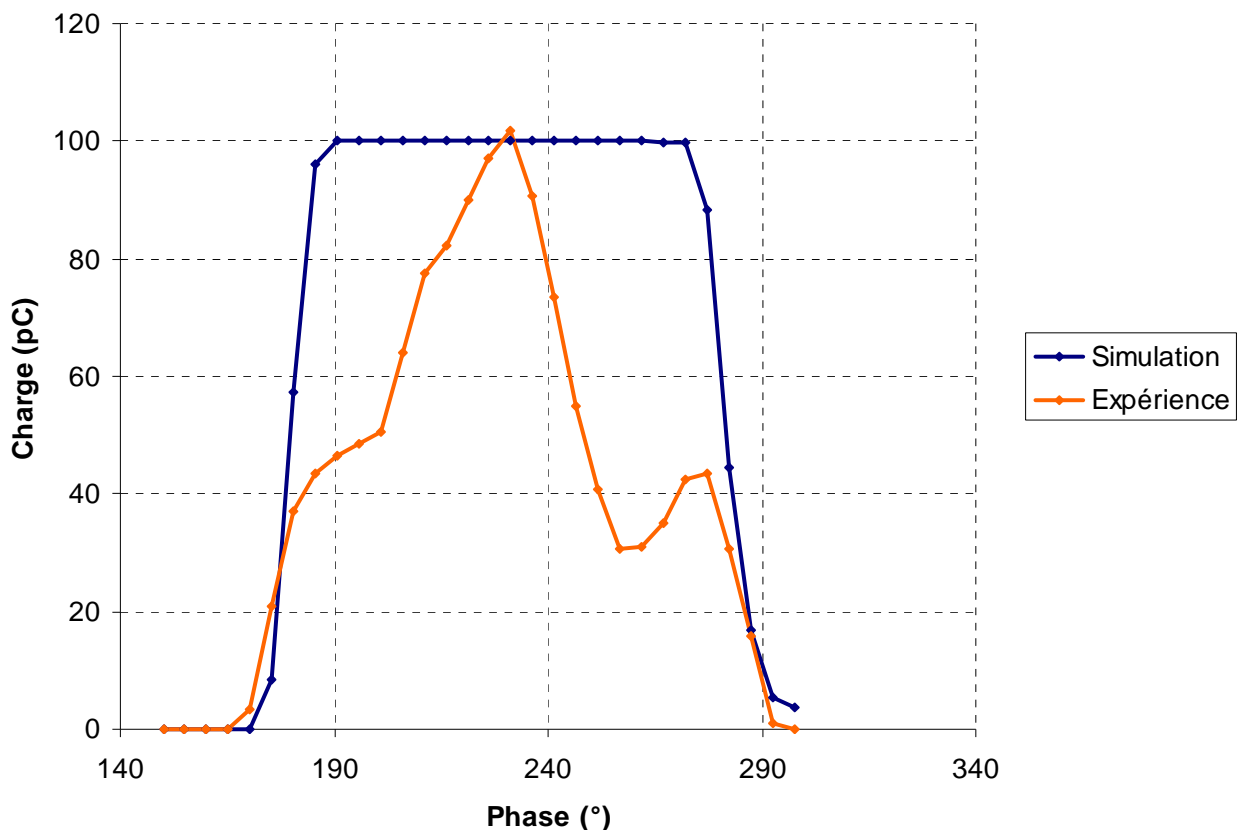


Figure 25 : Charge récupérée à 5.851m en fonction de la phase 0 [25]

CONCLUSION GENERALE SCIENTIFIQUE

Ma compréhension actuelle du comportement du faisceau a nécessité plusieurs semaines d'apprentissage. J'ai dans un premier temps effectué des recherches bibliographiques (thèses...) pour m'initier à la physique des accélérateurs. La suite du stage s'est majoritairement composée de simulations pour me familiariser avec l'action des éléments de la machine sur le faisceau en fonction de leur paramétrage. J'ai pu estimer l'importance de ceux-ci et donc me pencher sur les plus importants, notamment l'optimisation des champs magnétiques de focalisation ainsi que la rédaction du fichier de modélisation de la chambre à vide utilisé dans ASTRA.

On rappelle que les résultats expérimentaux (y compris ceux qui n'ont pas été présentés ici) révèlent la présence de pertes de charges relativement conséquentes dans la machine par rapport à ce que l'on obtient en simulation. L'allure de la courbe de la charge relevée en fin de ligne en fonction de la phase montrait effectivement un plateau en simulation, alors qu'en expérience il ne paraissait n'avoir qu'une valeur de la phase permettant de mesurer 0.1nC au diagnostic.

De plus, on a remarqué que les dimensions transverses du faisceau obtenues en manipulation sont (au point de focalisation optimale) trois fois plus grandes qu'en simulation.

Nous supposons que les hypothèses de départ sont sous estimées, telles que la taille du spot laser sur la cathode, l'émittance thermique... Mais l'écart mesuré peut aussi provenir d'un problème mécanique, ou en tout cas du comportement du faisceau lui-même. On pourrait éventuellement mettre en cause la description de PHIL dans ASTRA (voir conditions de simulation figure 30).

Il reste à trouver les moyens de vérifier nos hypothèses concernant les différences observées. Une mesure de la dispersion en énergie permettrait de vérifier que les pertes de charges s'expliquent bien par une valeur trop élevée de ce paramètre.

Des nouveaux diagnostics seront bientôt ajoutés, à savoir une mesure plus précise de la charge, et un second écran au niveau du dipôle ; ils permettront de déterminer, voir de localiser les problèmes éventuels liés au faisceau. Un système de mesure de l'émittance est également en cours de développement.

La comparaison des résultats obtenus en simulations avec ceux obtenus expérimentalement a donc permis de mettre en évidence des écarts qui sont utiles pour approfondir la caractérisation de la machine.

CONCLUSION GENERALE SUR LE STAGE

Ces deux mois passés LAL m'ont d'abord permis de me faire une idée plus moderne de ce que je pensais de la recherche scientifique. J'ai été agréablement surpris par le côté manuel que certains postes requiert et par l'esprit d'équipe nécessaire à l'aboutissement du projet.

La recherche de réponses à mes questions concernant mes résultats ou le fonctionnement global de la machine, ont rendu ce stage plus convivial grâce à des contacts réguliers avec plusieurs personnes du département.

Je pourrais dire que mon unique regret est de ne pas avoir eu la possibilité d'effectuer plus d'expériences sur PHIL, mais vu la quantité de données que nous avons pu récupérer et à autant d'informations que nous avons pu en tirer, je suis finalement très satisfait.

Le fait que ces informations aient servis pour la validation d'un nouveau diagnostic (j'ai pu participer à la première mesure de dispersion en énergie avec la fente) et de certaines hypothèses, aidant ainsi l'équipe à avancer au moins un tout petit peu plus, a rendu ce travail très gratifiant pour moi.

Enfin, en faisant notamment appel à des notions d'électromagnétisme et de physique (des accélérateurs), ce stage m'a donné une vision concrète de ces domaines et surtout l'envie d'approfondir mes connaissances dans ceux-ci.

ANNEXES

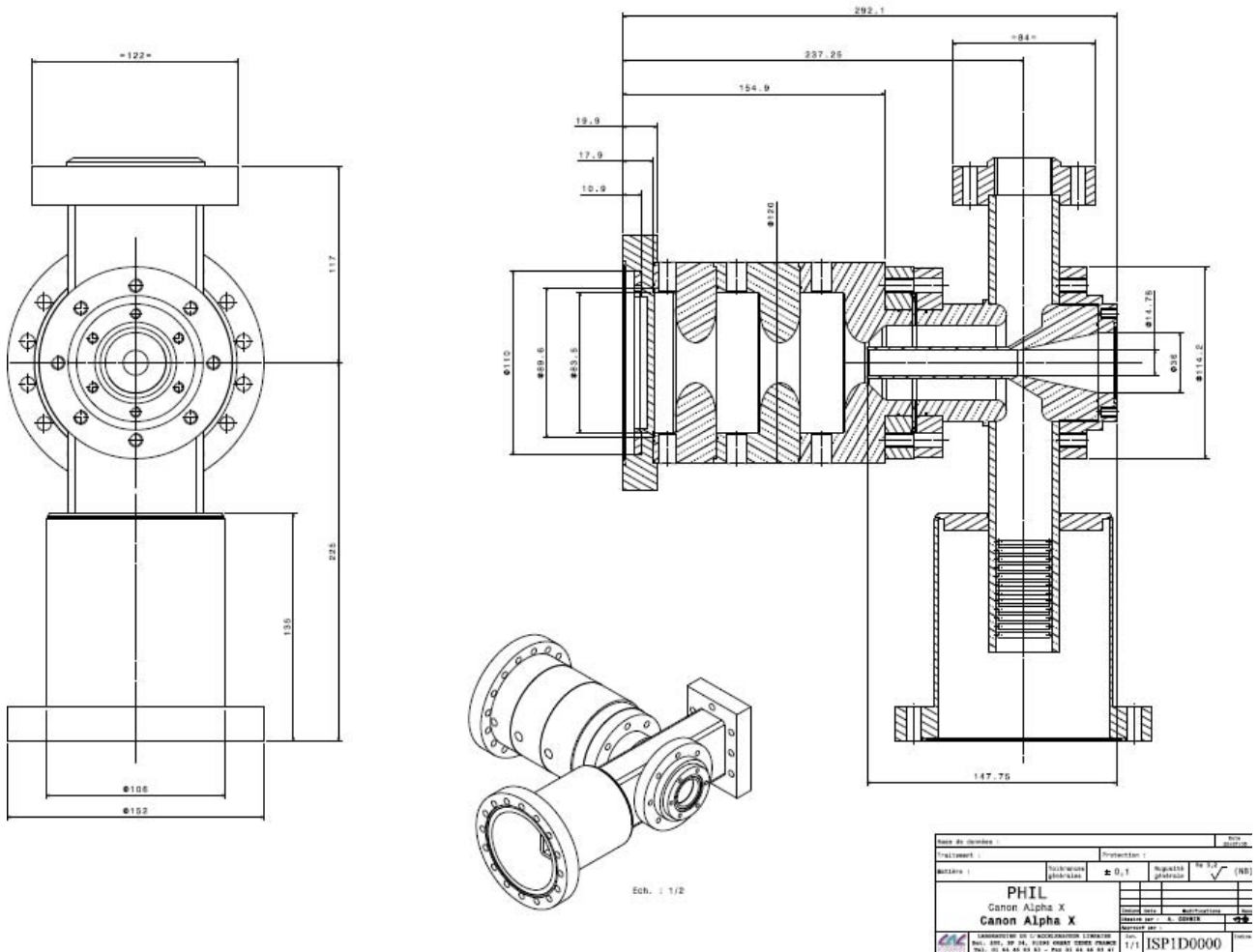


Figure 26 : Schéma du canon alphaX [26]

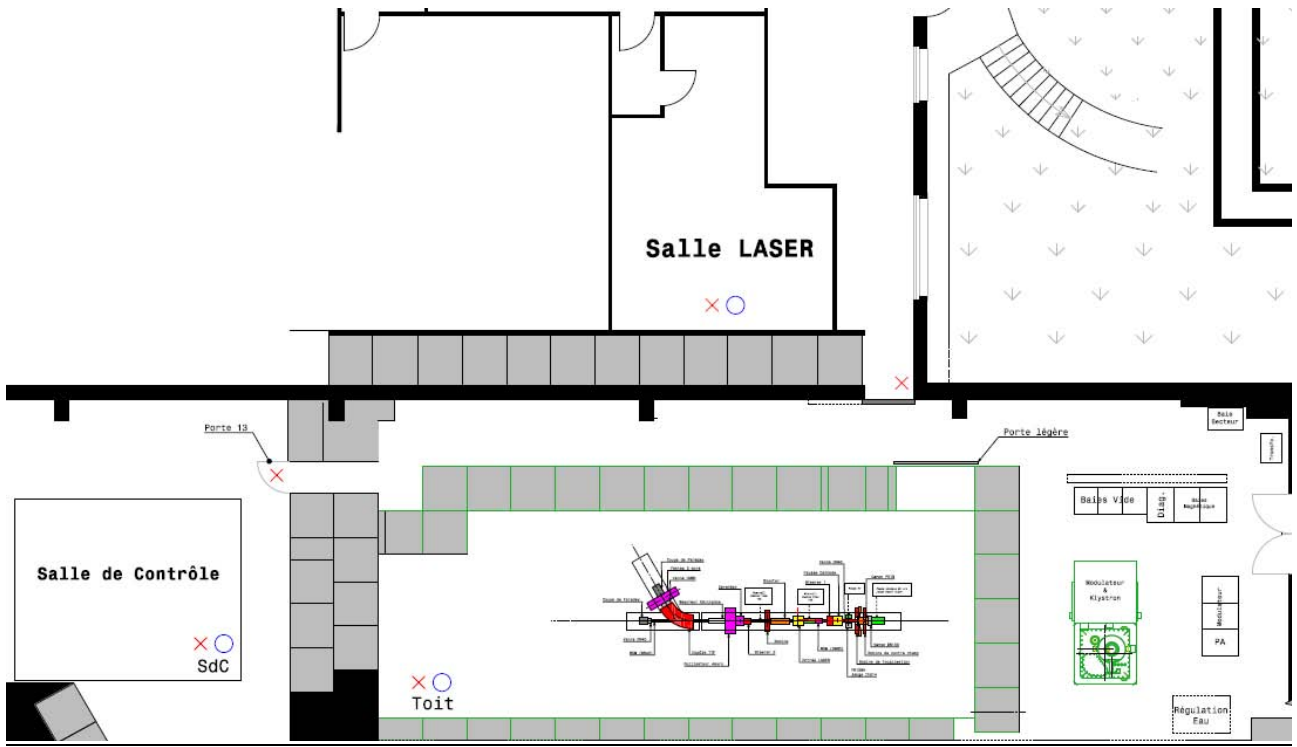


Figure 27 : L'implantation de PHIL dans le laboratoire [27]

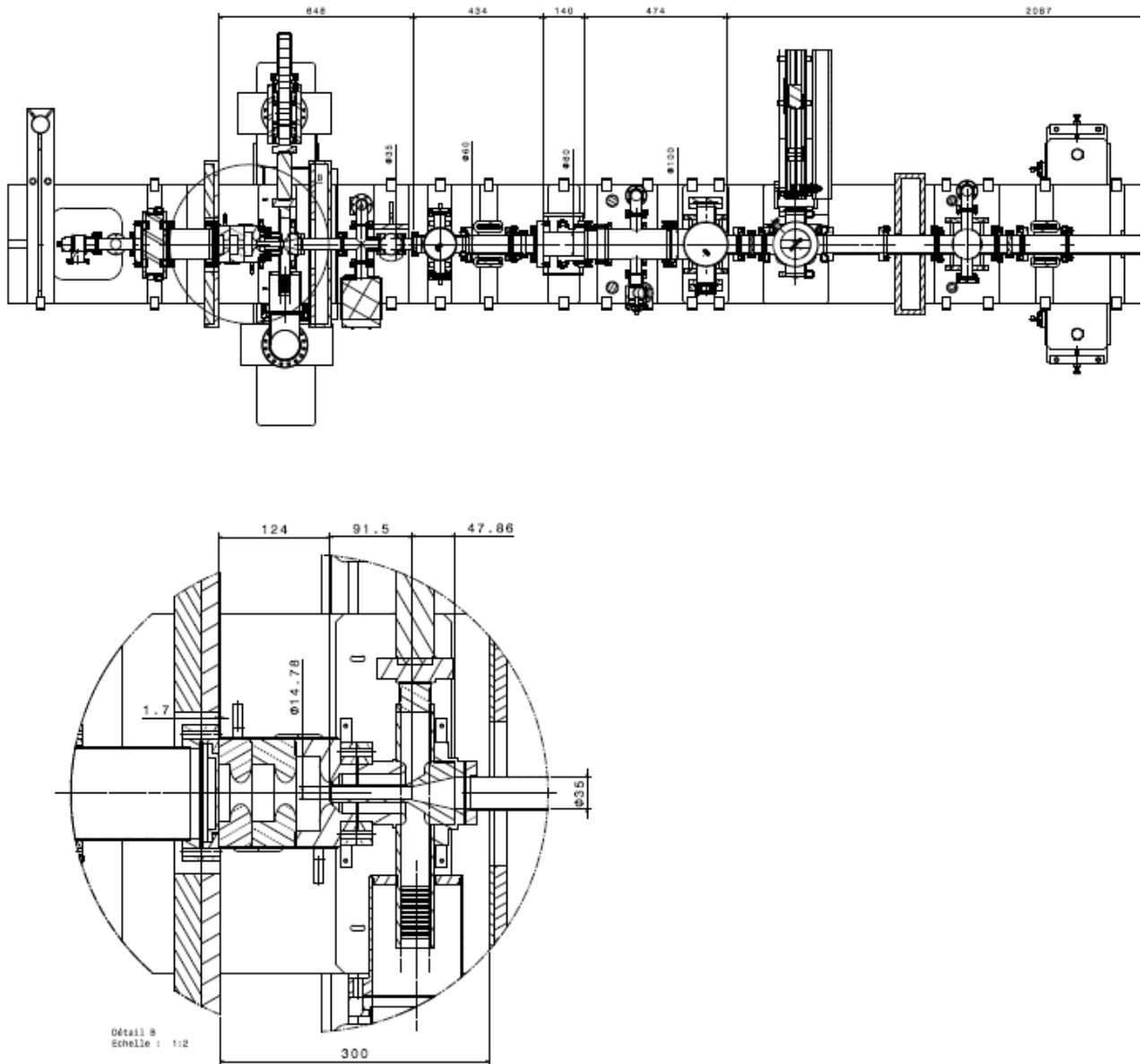


Figure 28 : Schéma de la ligne PHIL avec les ouvertures (sections transverses) de la chambre à vide (1ère partie) [28]


```

&NEWRUN
  Head='Charge extraction vs. phase; 70MV/m 1nC'
  RUN=1,
  Loop=F, Nloop=2
  Distribution = 'gentests.ini', Xoff=0.E-3, Yoff=0.0
  Lmagnetized=.F
  EmitS=.T
  PhaseS=.T
  TrackS=.T
  RefS=.T
  Qbunch=0.1
  TcheckS=.T
  CathodeS=.T
  TRACK_ALL=.T, PHASE_SCAN=.F, AUTO_PHASE=.F
  check_ref_part=.F,
  ZSTART=0.0, ZSTOP=5.851,
  Zemit=100
  Zphase=20
  H_max=0.01
  H_min=0.001
/

&CHARGE
  Loop=F
  LSPCH=T
  Nrad=10, Nlong_in=10
  Cell_var=2.0
  min_grid=0.4D-6
  Max_scale=0.05
  Max_count=100
  Lmirror=.T
/

&Aperture
  LApert= .True.
  file_aperture(1)= 'aperture.xml'

/

&CAVITY
  Loop=.F,
  LEFIELD=.T
  FILE_EFIELD(1) = 'ezcanonicalphax2.dat',
  Nue(1)=2.99855, MaxE(1)=70.0, Phi(1)=233.0, C_pos(1)=0.0,
/

&SOLENOID
  Loop=F
  LBFIELD=.T,
  FILE_BFIELD(1)='file_for_ASTRA_JB.dat', MaxB(1)=0.185,
  S_pos(1)=0.E-3, S_xoff(1)=0.0, S_yoff(1)=0.0,
  FILE_BFIELD(2)='phil05_m2.txt', MaxB(2)=0.09,
  S_pos(2)=2.098, S_xoff(2)=0.0, S_yoff(2)=0.0,
/

```

Figure 30 : Les conditions de simulation dans un fichier d'entrée ASTRA

```

<aperture-list>

  <circle z="0" name="drift tube1">
    <r>0.012</r>
  </circle>

  <circle z="0.126" name="drift tube2">
    <r>0.00739</r>
  </circle>

  <cone z="0.217" name="antenne canon">
    <r>0.0074</r>
    <slope>0.21</slope>
  </cone>

  <circle z="0.265" name="drift tube4">
    <r>0.0175</r>
  </circle>

  <circle z="0.648" name="drift tube5">
    <r>0.030</r>
  </circle>

  <circle z="1.082" name="drift tube6">
    <r>0.040</r>
  </circle>

  <circle z="1.222" name="drift tube7">
    <r>0.050</r>
  </circle>

  <circle z="1.696" name="drift tube8">
    <r>0.030</r>
  </circle>

  <rectangle z="3.907" name="dipôle">
    <x1>-0.0175</x1>
    <y1>-0.0175</y1>
    <x2>0.0175</x2>
    <y2>0.0175</y2>
  </rectangle>

  <circle z="4.396" name="drift tube10">
    <r>0.0175</r>
  </circle>

  <circle z="5.251" name="drift tube11">
    <r>0.050</r>
  </circle>

  <null z="5.851" />

</aperture-list>

```

Figure 31 : Fichier d'apertures.XML avec section conique et carrée prise en compte

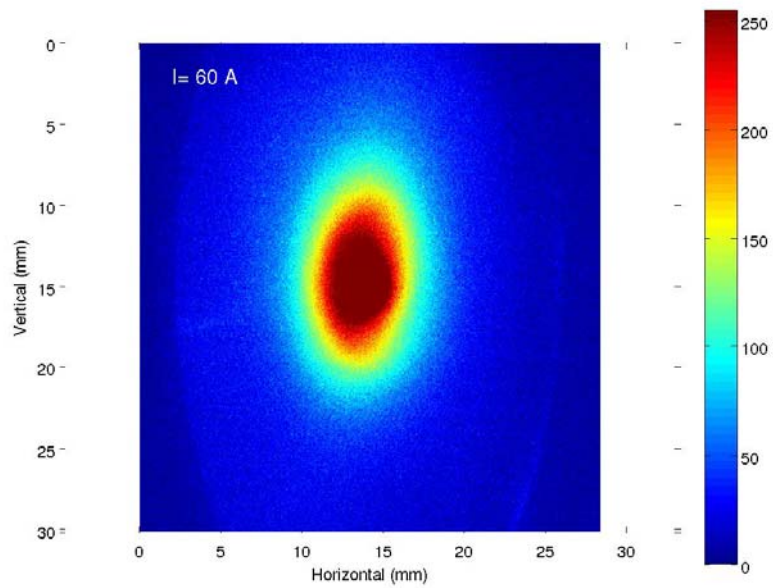


Figure 32 : Image saturée et inutilisable du faisceau [30]

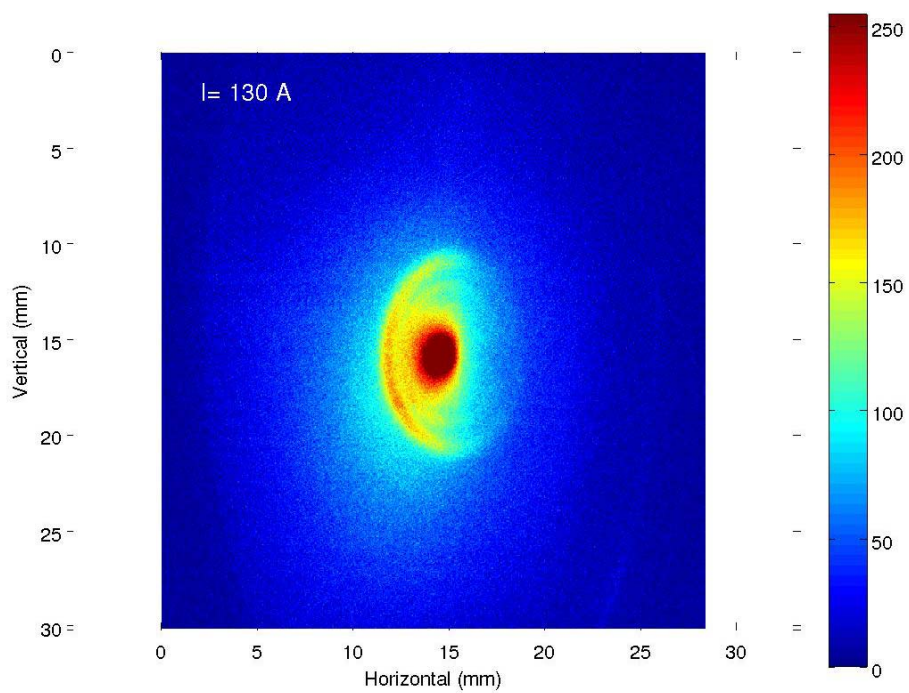


Figure 33 : Image du faisceau sur l'écran YAG pour $I = 60 \text{ A}$
 L'ajustement gaussien est parfois perturbé par un halo, dont l'origine reste indéterminée. [31]

**Courbe B(I) de la bobine de sortie canon obtenue avec les simulations
Poisson**

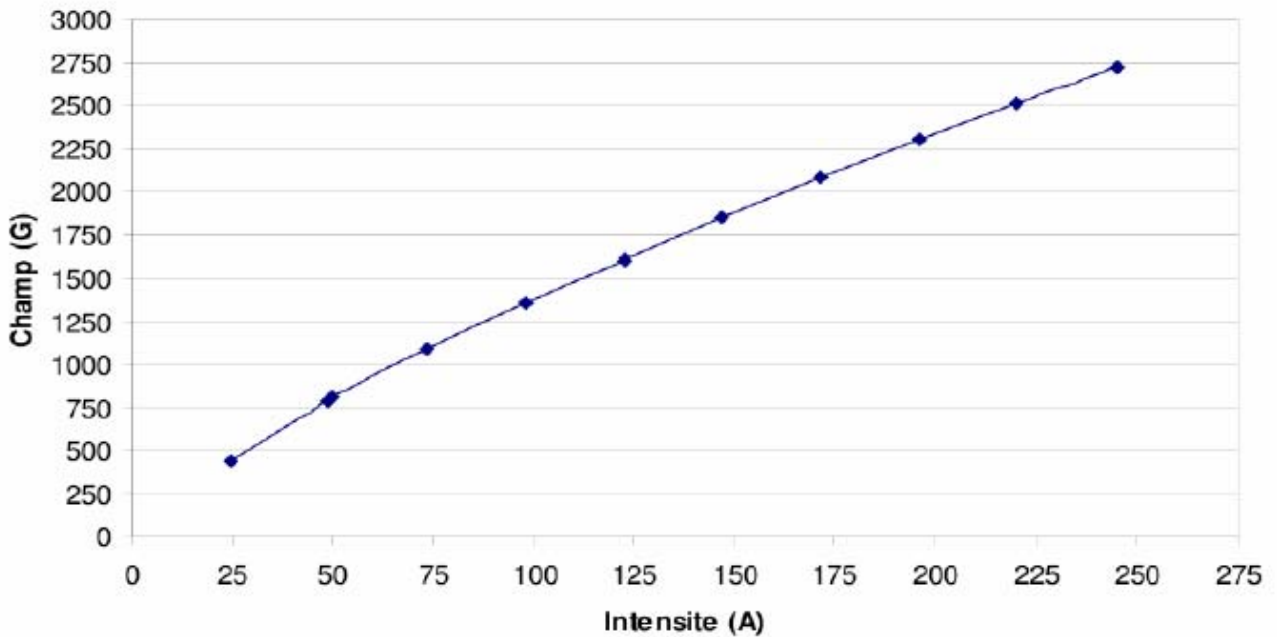


Figure 34 : Courbe d'équivalence du champ magnétique de B3 (Gauss) avec le courant d'alimentation (A) [32]

B(G) pour la bobine de focalisation de PHIL

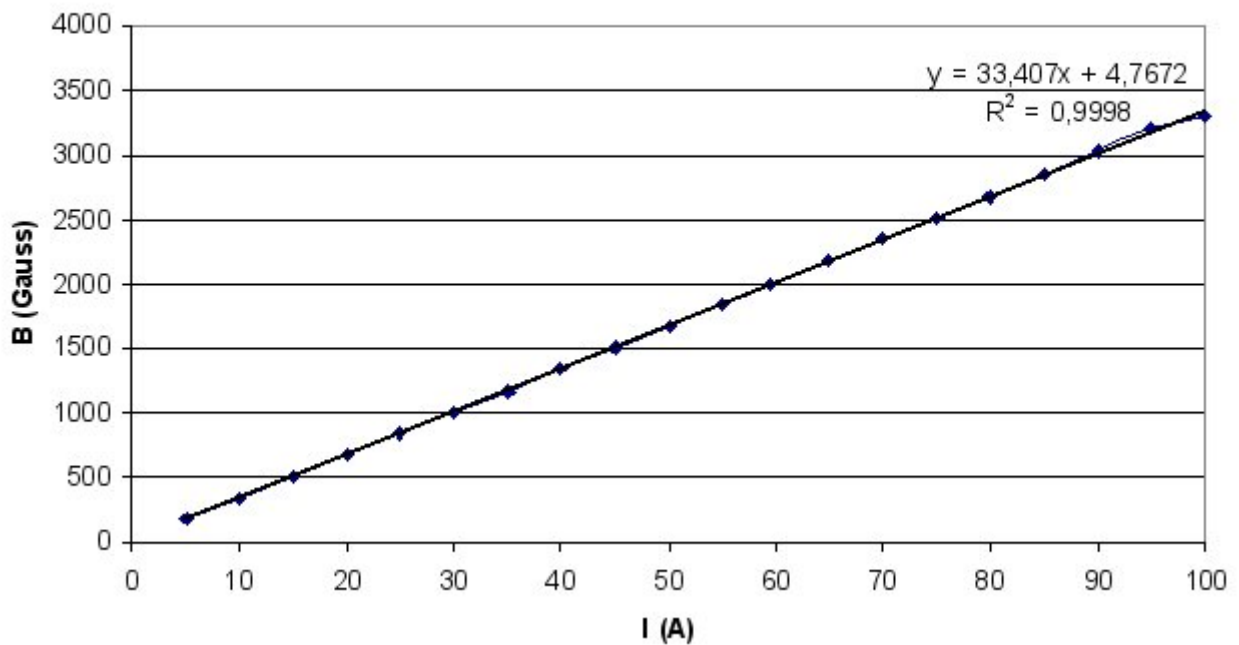


Figure 35 : Courbe d'équivalence du champ magnétique de B3 (Gauss) avec le courant d'alimentation (A) [33]

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Représentation cotée de l'accélérateur PHIL. [2].....	7
Figure 2 : Champ Electric accélérateur normalisé dans la cavité	10
Figure 3 : Distribution du champ normalisé à 1 Tesla du solénoïde de sortie de canon (0.34m)	10
Figure 4 : Distribution du champ normalisé à 1 Tesla de la bobine de focalisation (située à 2.1m de la cathode).....	11
Figure 5 : Energie = f (Phi) [6]	12
Figure 6 : Profil du champ Electric en fonction du temps [7].....	13
Figure 7 : Emittance du faisceau sur les 2 premiers mètres de la machine avec une taille de spot égale 2.5mm [8]	13
Figure 8 : Emittance du faisceau sur les 2 premiers mètres de la machine avec une taille de spot égale 0.5mm [9]	13
Figure 9 : Dimensions transverses du faisceau à l'écran en fonction du champ de la bobine 3 [10].	14
Figure 10 : emittance à l'écran en fonction du champ de bobine 3 [11]	14
Figure 11 : Charge récupérée à l'écran en fonction du champ de bobine 3 [12]	15
Figure 12 : Emittance transverse en fonction de z [13]	15
Figure 13 : Dimensions transverses en fonction de z [14].....	15
Figure 14 : Emittance du faisceau.....	16
Figure 15 : Dimensions transverses du	16
Figure 16 : Transmission de la charge en bout de machine en fonction de la phase [17].....	17
Figure 17 : Energie du faisceau en fonction de la phase [18]	17
Figure 18 : Modification du point de focalisation à optique fixée pour deux valeurs d'énergie : 4.6MeV et 3.9 MeV dans des conditions différentes du cas optimisé que l'on aborde dans cette partie. [19].....	18
Figure 19 : Emittance transverse optimisée en fonction de Z, à 0.3nC [20].....	19
Figure 20 : Dimensions transverses optimisées en fonction de Z, à 0.3nC [21].....	19
Figure 21 : Force de charges d'espace entre deux électrons	19
Figure 22 : Transmission de la charge en bout de ligne en fonction de B5 à 0.3nC [22]	20
Figure 23 : Projection de l'intensité des photos représentant le faisceau en fonction de la position au centre du faisceau à 70MV/m, et B3 = 140A (voir courbes d'équivalence champ-ampères p.33; rappel 1Tesla=10 ⁴ Gauss) [23]	22
Figure 24 : Dimensions transverses du faisceau au niveau de l'écran YAG en fonction du champ magnétique de B3 (résultats d'expérience) [24].....	23
Figure 25 : Charge récupérée à 5.851m en fonction de la phase 0 [25].....	24
Figure 26 : Schéma du canon alphaX [26].....	27
Figure 27 : L'implantation de PHIL dans le laboratoire [27].....	28
Figure 28 : Schéma de la ligne PHIL avec les ouvertures (sections transverses) de la chambre à vide (1ère partie) [28]	29
Figure 29 : Schéma de la ligne PHIL avec les ouvertures (sections transverses) de la chambre à vide (2ème partie) [29].....	30
Figure 30 : Les conditions de simulation dans un fichier d'entrée ASTRA.....	31
Figure 31 : Fichier d'ouvertures.XML avec section conique et carrée prise en compte.....	32
Figure 32 : Image saturée et inutilisable du faisceau [30]	33
Figure 33 : Image du faisceau sur l'écran YAG pour I = 60A.....	33
Figure 34 : Courbe d'équivalence du champ magnétique de B3 (Gauss) avec le courant d'alimentation (A) [32].....	34
Figure 35 : Courbe d'équivalence du champ magnétique de B3 (Gauss) avec le courant d'alimentation (A) [33].....	34

REFERENCES

[1] P.4 : Thèse de Christian Travier : "Etude, réalisation et expérimentation d'un CANon hyperfréquence DEclenché par un LAser subpicoseconde (CANDELA), 1995 : Formule de l'émittance statistique

[2;26;27;28 ;29] P. 7,27,28,29,30 : Mécaniciens responsable du dessin industriel Matthieu Jorre (en particulier) : Schémas de PHIL

[3;4;5] P.10,11 : Pierre Lepercq et Christelle Bruni : Profils des champs Electric et Magnétiques

[23;24 ;30 ;31 ;32 ;33] P. 22,23,33,34 : Julien Brossard (responsable diagnostic de PHIL) :

- Graphe de la Projection de l'intensité des photos représentant le faisceau en fonction de la position au centre du faisceau
- Graphe des dimensions transverses en fonction du champ de B3.
- Courbes d'équivalence entre les champs magnétiques de B3 et B5 en fonction des courants d'alimentation respectifs des bobine

[8;9] P.14 : Thomas Williams, Colin Kelley : Figures obtenues grâce au logiciel linux GNUPLOT

[13;14;20;21] P.15,19 : Conseil Européen pour la recherche Nucléaire (CERN) : Figures obtenus grâce au logiciel PAW (Physics Analysis Workstation)

[6;7;0-12;15-18 ;19 ;22 ;25] P. 12,13,15,17,18,20,24 : Microsoft : Graphes obtenus grâce au logiciel EXCEL