



SPIRAL-2

SECTION ACCELERATEUR

CONFIGURATION DE BASE

DE LA LIGNE MOYENNE ENERGIE

(LME)

V2.0

Rédacteurs :

D. Uriot, CEA Saclay
P. Bertrand, GANIL
J-L. Biarrotte, IPN Orsay

20 Juin 2007

EDMS n°I-010934/1 Version 2.0

SOMMAIRE

0	Préambule	4
1	Paramètres généraux de la ligne moyenne énergie	5
1.1	Caractéristiques générales de la LME	5
1.2	Conditions faisceaux en sortie RFQ	6
1.3	Modes de fonctionnement.....	6
2	description de la ligne lme	7
2.1	Plan de la ligne LME	8
2.2	Sous section 1	8
2.3	Sous section 2	9
2.4	Sous section 3	10
2.5	Sous section 4	10
3	Optique dans les lignes moyenne energie	11
3.1	Hypothèses de calculs.....	11
3.2	Méthode de réglage	11
3.3	Optique pour les deutons	13
3.4	Optique pour les ions $q/A=1/3$	18
3.5	Optique pour les Protons	23
3.6	Optiques possible pour les ions $q/A=1/6$	28
3.7	Fonctionnement en mode isolateur de paquet.....	30
3.8	Le Banc de Tests Intermédiaires (B.T.I.) - Optiques préliminaires pour le B.T.I.	32
3.9	Tolérances sur les erreurs d'alignement et de champ	37
4	Recommandation des experts de la Revue technique	40
4.1	Membres du comité de revue.....	40
4.2	Introduction	40
4.3	Dynamique faisceau	40
4.4	Isolateur de paquets (chopper).....	40
4.5	Quadripôles.....	41
4.6	Groupeurs (bunchers)	42
4.7	Fentes (scrappers).....	42
4.8	Remarques générales et conclusions.....	42
5	Conclusion.....	43
	ANNEXE 1 - Plan A0 de la ligne LME	44
	ANNEXE 3 - Paramètres de fonctionnement de la LME	45
	ANNEXE 4 - Spécifications des quadripôles de la LME	47
	ANNEXE 5 - Spécifications des regroupeurs de la LME.....	51
	Références	56

Figure 1	: Plan de ligne LME de l'accélérateur SPIRAL-2.....	5
Figure 2	: Plan général et perspective de la ligne LME de l'accélérateur SPIRAL-2.....	8
Figure 3	: Distribution du faisceau de deutons 5 mA à la sortie du RFQ.....	13
Figure 4	: Enveloppes à 3 rms issues d'un calcul multiparticulaire du faisceau de deutons 5 mA.....	14
Figure 5	: Optique nominale pour un faisceau de deutons 5 mA de 100.000 particules.....	15
Figure 6	: Distribution du faisceau de deutons 5 mA à la sortie de la LME	15
Figure 7	: Evolution des émittances norm. rms (gauche) et des pertes faisceau le long de la ligne (droite) pour l'optique nominale des deutons.	16
Figure 8	: Distribution du faisceau de deutons 0 mA à la sortie du RFQ	16
Figure 9	: Enveloppes à 3 rms issues d'un calcul multiparticulaire du faisceau de deutons 0 mA.....	17
Figure 10	: Distribution du faisceau de deutons 0 mA à la sortie de la LME	17
Figure 11	: Distribution du faisceau d'ions $q/A=1/3$ à 1 mA à la sortie du RFQ.	18
Figure 12	: Enveloppes à 3 rms issues d'un calcul multiparticulaire du faisceau d'ions $q/A=1/3$ à 1 mA.....	19
Figure 13	: Optique nominale pour un faisceau d'ions $q/A=1/3$ à 1 mA (100.000 particules).....	20
Figure 14	: Distribution du faisceau d'ions $q/A=1/3$ à 1 mA à la sortie de la LME.....	20

Figure 15 : Evolution des émittances norm. rms (gauche) et des pertes faisceau le long de la ligne (droite) pour l'optique nominale des ions $q/A=1/3$ à 1 mA.	21
Figure 16 : Distribution du faisceau d'ions $q/A=1/3$ à 150 μA à la sortie du RFQ.	21
Figure 17 : Enveloppes à 3 rms issue d'un calcul multiparticulaire du faisceau d'ions $q/A=1/3$ à 150 μA	22
Figure 18 : Distribution du faisceau d'ions $1/3$ à 150 μ à la sortie du de la LME.	22
Figure 19 : Distribution du faisceau de protons 5 mA à la sortie du RFQ.	23
Figure 20 : Enveloppes à 3 rms issues d'un calcul multiparticulaire du faisceau de protons 5 mA.	24
Figure 21 : Optique nominale pour un faisceau de protons 5 mA de 50.000 particules.	25
Figure 22 : Distribution du faisceau de protons 5 mA à la sortie du de la LME.	25
Figure 23 : Evolution des émittances norm. rms (gauche) et des pertes faisceau le long de la ligne (droite) pour l'optique nominale des protons.	26
Figure 24 : Distribution du faisceau de protons 100 μA à la sortie du RFQ.	26
Figure 25 : Enveloppes à 3 rms issues d'un calcul multiparticulaire du faisceau de protons 100 μA	27
Figure 26 : Distribution du faisceau de protons 100 μA à la sortie de la LME.	27
Figure 27 : plan général de la ligne d'ions $q/A=1/6$	28
Figure 28 : Enveloppes à 3 rms issue d'un calcul multiparticulaire du faisceau d'ions $q/A=1/6$ à 1 mA.	29
Figure 29 : Distribution du faisceau d'ions $1/6$ à 1 mA à la sortie de la LME.	29
Figure 30 : Section chopper de la ligne LME.	30
Figure 31 : Optique (enveloppe à gauche et multiparticulaire à droite) pour les deutons 5 mA déviés.	31
Figure 32 : Proportion du faisceau transmis en fonction de la tension appliquée au chopper.	31
Figure 33 : Répartition des diagnostics le long du B.T.I.	33
Figure 34 : Encombrement en mm des différents éléments.	33
Figure 35 : Perte de faisceau le long du B.T.I.	35
Figure 36 : densité de puissance sur le bloc d'arrêt du B.T.I.	35
Figure 37 : Position rms du centroïde pour les deutons (gauche) et les protons (droite).	39
Figure 38 : Position rms du centroïde pour les $q/A=1/3$ (gauche) et les ions $q/A=1/6$ (droite).	39
Tableau 1 : Courant et puissance suivant les espèces.	6
Tableau 2 : Paramètres d'entrée suivant les espèces.	6
Tableau 3 : Paramètres du chopper pour une transmission inférieure à 1 pour 1000 particules.	31
Tableau 4 : Tolérances sur les amplitudes des erreurs pour les éléments magnétiques durant l'PAD.	37
Tableau 5 : Tolérances sur les amplitudes des erreurs pour les diagnostics durant l'APD.	37
Tableau 6 : Tolérances sur les amplitudes des erreurs pour les éléments et diagnostics de la LME finale.	38
Tableau 7 : Bilan des champs requis pour les « steerers » (100 simulations).	38

0 PRÉAMBULE

Ce document est la version V2 de la « configuration de base » de la ligne moyenne énergie de SPIRAL2. Elle fait suite à la version V1 et elle est enrichie des recommandations des experts suite à la revue technique du 2 Mai 2007 ainsi que des réponses apportées. Elle contient également de nouveaux calculs d'optique tenant compte de la consolidation du linac [12]

Les spécifications générales de l'accélérateur, déjà précisées dans le document « configuration de base des lignes basse-énergie » [1], ne sont pas reproduites ici.

→ *Historique de ce document*

Partant de l'étude APD [2,3,4], le groupe optique ainsi que les équipes techniques ont produit un certain nombre de notes et communications concernant la ligne LME proprement dite [5,6,...,12]. Certaines modifications ont été effectuées, en particulier :

- Prise en compte de l'épaisseur de la plaque de sortie du RFQ (35mm)
- Utilisation de regroupeurs à 3 gaps, permettant d'agrandir l'ouverture faisceau sans détériorer le TTF.
- Utilisation de 3 regroupeurs au lieu de 4, afin de réduire le coût.
- Augmentation du nombre de dispositifs interceptifs, permettant d'éliminer le halo, et de protéger l'isolateur de paquet, avant injection dans le LINAC.
- Prise en compte plus précise de la connexion de la future ligne $q/A=1/6$
- Prise en compte plus précise de l'isolateur de paquets
- Allongement de l'arrêt faisceau associé à l'isolateur de paquets.
- Prise en compte du banc de test intermédiaire (BTI)
- Prise en compte de la consolidation du linac.

→ *Accès au présent document et à ses références*

Le présent document est disponible sous le numéro de référence : **I-010934/1**, sur le serveur EDMS de l'IN2P3 au sein du projet SPIRAL2. <https://edms.in2p3.fr/document/I-010934/1>. Les optiques de références LME_v2 correspondant à ce document y sont incluses.

La liste des références correspond à des documents qui pour la plupart sont accessibles sur ce même serveur EDMS. Les personnes n'ayant pas accès à ce serveur peuvent s'adresser à l'équipe consolidation (bertrand@ganil.fr, biarrott@ipno.in2p3.fr, duriot@cea.fr) pour se les procurer.

→ *Remarques*

Ce document est centré sur la dynamique faisceau, à partir de laquelle sont élaborés les choix techniques et choisis les meilleurs compromis. Nous avons pris soin, au cours de cette consolidation, de vérifier que les divers éléments étaient réalisables à des coûts raisonnables. Du fait que le comportement du faisceau est déterminé par les éléments électro-magnétiques, nous avons fait figurer en annexe les caractéristiques techniques des quadripôles et des regroupeurs choisis.

→ *Personnes ayant participé à ce travail*

Outre les membres de l'équipe « dynamique faisceau/consolidation », de nombreuses personnes ont travaillé sur la ligne moyenne énergie, en particulier :

F. Daudin, M. Duval, M. Di Giacomo, G. Ledem, P. Ausset, R. Duperrier et leurs collaborateurs ainsi que l'équipe de Strasbourg pour ce qui concerne le BTI.

1 PARAMETRES GENERAUX DE LA LIGNE MOYENNE ENERGIE

1.1 Caractéristiques générales de la LME

→ Fonctions de la LME

La ligne moyenne énergie de l'injecteur remplit quatre fonctions principales :

- Recueillir le faisceau groupé et accéléré fourni par le RFQ (deutons, ions $q/A=1/3$ ou protons), et le transmettre en entrée du LINAC dans les conditions optimales d'adaptation transverse et longitudinale.
- Eviter et/ou éliminer le halo transverse afin de protéger les équipements sensibles de la LME et minimiser les pertes dans le linac
- Permettre la connexion ultérieure d'une ligne moyenne énergie pour le faisceau d'ions $q/A=1/6$.
- Permettre l'installation d'un isolateur de paquet et de l'arrêt faisceau associé (7.5 kW).

→ Implantation générale de la ligne LME

Comme déjà observé lors de l'APD, les quatre fonctions principales de la ligne LME lui confèrent une longueur d'environ 8 mètres, pour les raisons suivantes :

- Le faisceau sort du RFQ avec une taille transverse et une taille longitudinale très petites, et avec une force de charge d'espace importante, surtout dans le cas des deutons et protons à l'intensité maximum.
- L'encombrement du futur dipôle de connexion de la ligne $q/A=1/6$ correspond à un « drift » assez important.
- L'encombrement du futur isolateur de paquet correspond lui aussi à un « drift » important.
- L'encombrement de l'arrêt faisceau associé à l'isolateur de paquet est important.
- Il faut maintenir le faisceau groupé jusqu'au LINAC, et les regroupeurs ont un encombrement longitudinal de l'ordre de 300mm, bride à bride.
- Il faut focaliser le faisceau dans l'un des plans transverses pour passer dans l'isolateur de paquet sans l'endommager.
- Il faut prévoir l'emplacement des pompes à vide, des fentes et des diagnostics.

L'on aboutit ainsi à l'implantation telle que décrite dans le schéma ci-dessous, dont le plan de référence détaillé est disponible dans l'annexe 1, et peut être imprimé aux formats A4, A3, A2, A1 ou A0.

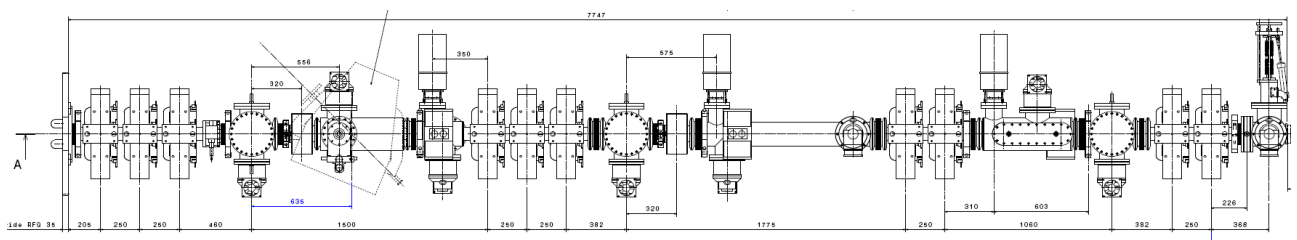


Figure 1 : Plan de ligne LME de l'accélérateur SPIRAL-2.

Chaque élément de la ligne (aimants, diagnostics, chambres à vide, supports...) nécessite une étude mécanique détaillée pour aboutir à des dossiers de fabrication. Pour ces études, outre la conception et le dessin, liés à la fonction de l'objet, il faut prendre en compte 3 fonctions complémentaires qui sont : le supportage, le réglage et l'alignement. Le supportage est défini pour assurer une hauteur de l'axe faisceau de 1500 mm, comme pour les lignes LBE.

→ Vide le long de la LME

Le vide requis dans la LME est de 10^{-8} hectopascal, comme préconisé lors de l'APD.

Sept emplacements pour les pompes sont prévus le long de la ligne LME, comme indiqué sur le plan en annexe 1.

→ **Sécurité, sûreté et radioprotection**

Les aspects sécurité/sûreté/radioprotection font l'objet d'une étude spécifique, en particulier pour l'élaboration du document RPRS. Une étude préalable a été effectuée par l'équipe accélérateur [7]. Hormis les risques classiques, le risque principal pour la ligne moyenne énergie est lié à la production de neutrons par le faisceau de deutons, en particulier sur les fentes, les arrêts faisceau, dont celui associé à l'isolateur de paquet, sur lequel la totalité du faisceau peut être arrêtée en fonctionnement nominal (7.5 KWatts). Une étude est en cours, en collaboration avec les équipes de sûreté et de radioprotection, pour le choix des matériaux qui pourront être utilisés pour les éléments interceptifs.

Dans le cas où l'on veut pénétrer dans la zone LME, le faisceau sera stoppé au niveau de la salle basse énergie, avec les EIS prévus à cet effet.

1.2 **Conditions faisceaux en sortie RFQ**

→ **Energie et puissance faisceau**

Dans tous les cas, le RFQ produit des faisceaux en paquets ayant une énergie moyenne par nucléon déterminée :

$$W = 0.731835 \text{ Mev/nucleon } (\beta=0.039483)$$

Par contre les puissances faisceau moyennes sont différentes, selon le type de faisceau accéléré et l'utilisation de la pulsation source ou du hacheur LBE :

Type faisceau	protons	deutons	Ions q/A=1/3	(ionsq/A=1/6)
Intensité max (mAe)	5	5	1	(1)
Puissance max (kW)	3.75	7.5	2.2	(1.1)

Tableau 1 : Courant et puissance suivant les espèces.

→ **Emittances en sortie RFQ**

Les caractéristiques des faisceaux en sortie RFQ, selon les types de particules accélérées et différentes intensités, ont été regroupées dans le document EDMS I-010234, sous forme de fichiers de particules. Ces distributions de particules sont données juste avant la plaque de sortie du RFQ, elles correspondent donc aux distributions en sortie du code TOUTATIS. Il apparait clairement que les faisceaux à faible courant présentent des émittances transverses plus faibles et des émittances longitudinales plus élevées. Plus la charge d'espace est élevée plus l'écart est important. Ce qui signifie qu'à faible charge d'espace, bien que les faisceaux aient des tailles plus réduites, il est vraisemblable que des pertes longitudinales apparaissent si le design du linac ne tient pas compte de ces différences.

	$\epsilon_{xx'}$ rms.norm pi.mm.mrad	$\epsilon_{yy'}$ rms.norm pi.mm.mrad	$\epsilon_{zz'}$ rms.norm pi.mm.mrad	α_x	β_x mm/pi.mrad	α_y	β_y mm/pi.mrad	α_z	β_z mm/pi.mrad
Protons 5mA	0.2386	0.2350	0.3657	-2.7519	0.3163	1.1449	0.6485	0.4152	0.6485
Deutons 5mA	0.1733	0.1774	0.2978	-2.3235	0.3401	1.1543	0.1278	0.2195	0.7373
q/A=1/3 1mA	0.1957	0.2045	0.4357	-1.9193	0.3049	0.9477	0.1086	0.2671	0.5974
Protons 0 mA	0.1175	0.1377	0.5271	-1.9298	0.2300	0.8027	0.0780	0.1717	0.3592
Deutons 0mA	0.0977	0.1058	0.4912	-2.1371	0.3077	1.1931	0.1090	0.2062	0.4750
q/A=1/3 0mA	0.2081	0.1982	0.4798	-1.7969	0.2796	0.9309	0.1091	-0.1577	0.4885

Tableau 2 : Paramètres d'entrée suivant les espèces.

1.3 **Modes de fonctionnement**

On considère 3 modes de fonctionnement :

Mode réglage : le faisceau est haché en utilisant selon les cas la source ECR, le hacheur LBE et/ou la pulsation HF du RFQ, afin de permettre l'utilisation des profileurs et régler ainsi la LME et le linac.

Mode montée en puissance ; on augmente la puissance faisceau le long de la machine, en augmentant le cycle utile et en raffinant le réglage par minimisation des pertes le long de la machine à l'aide des diagnostics de perte faisceau, les diagnostics non interceptifs et les scrappers.(les diagnostics interceptifs de type profileurs à fils sont alors en position « hors »)

Mode faisceau mono-paquet : le faisceau est à pleine puissance jusqu'à l'arrêt faisceau associé à l'isolateur de paquet, et seule une petite fraction des paquets est transmise jusqu'au linac sous forme de paquets (1 paquet sur 100, 1 paquet sur 10000.)

Un document spécifique concernant le commissioning et les modes de réglage faisceau sera fourni ultérieurement.

2 DESCRIPTION DE LA LIGNE LME

Dans la solution retenue la ligne est composée de :

- 10 quadripôles équipés d'un steerer vertical ou horizontal.
- 3 regroupeurs.
- 3 jeux de fentes verticale et horizontale de nettoyage réglables et indépendantes.
- 3 jeux de profileurs à fils vertical et horizontal.
- 1 mesure d'émittance dans les 2 plans.
- 1 DCCT pouvant être placé à deux positions différentes.
- 1 cage de faraday
- 1 FCT (courant et mesure d'extension de phase).
- 7 emplacements dédiés au pompage.

Le choix du type des éléments résulte d'un compromis entre la dynamique faisceau et la faisabilité des dits éléments. Une attention toute particulière a été portée sur la simplification et la réduction des coûts. C'est pourquoi tous les quadripôles sont identiques. Les 3 regroupeurs le sont aussi, ainsi que les 3 jeux de fentes verticales et horizontales. Le diamètre de la chambre est fixé à 80 mm le long de la ligne, excepté au niveau des espaces dédiés à l'isolateur et à l'arrêt faisceau associé. L'ouverture des regroupeurs est de 60 mm.

2.1 Plan de la ligne LME

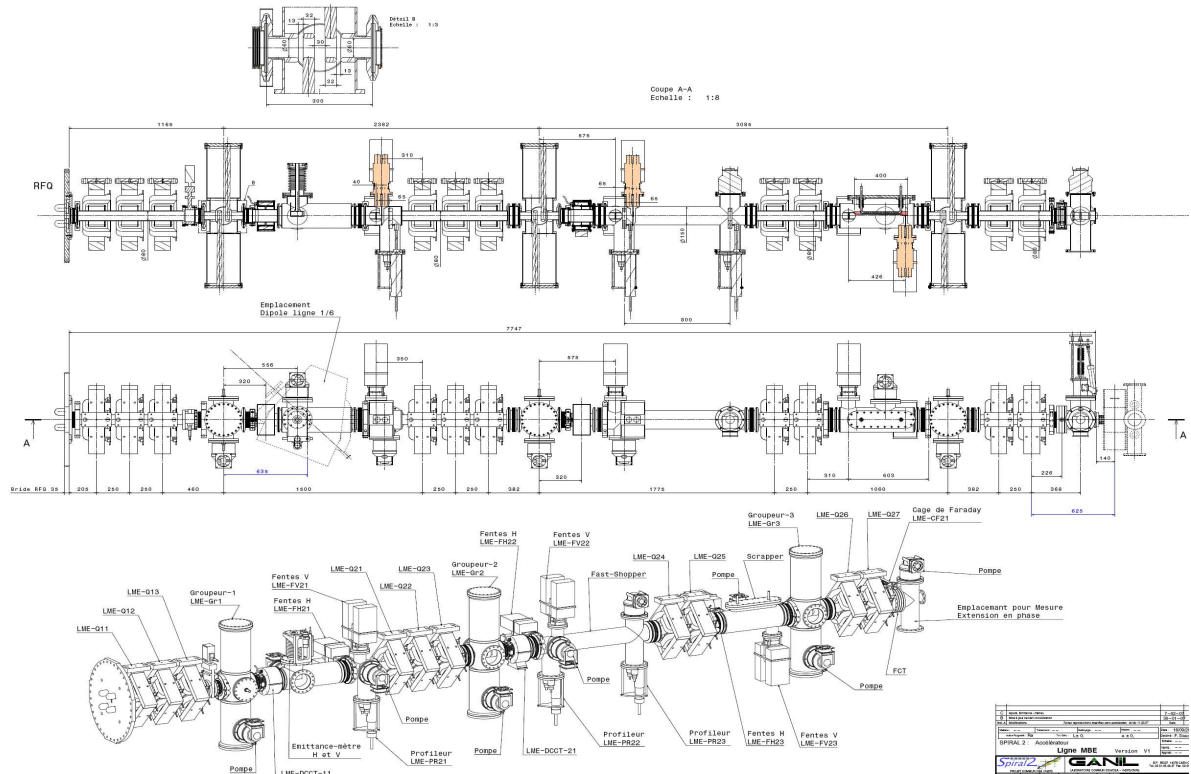
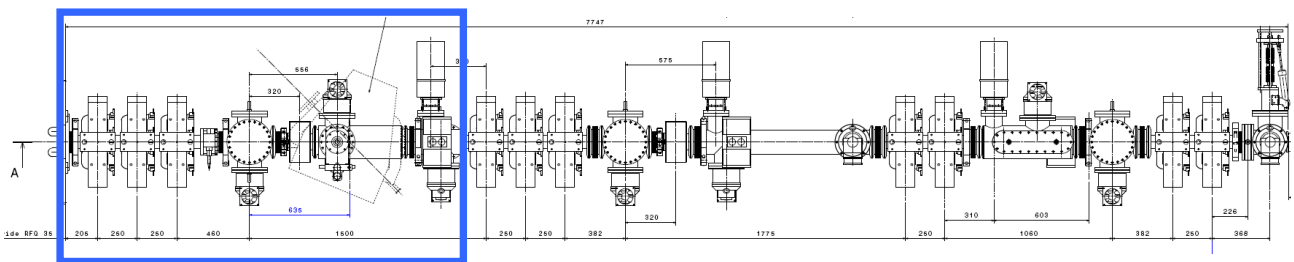


Figure 2 : Plan général et perspective de la ligne LME de l'accélérateur SPIRAL-2.

2.2 Sous section 1



Cette première sous section de la ligne LME est composée des éléments successifs suivants :

- Le triplet de quadripôles numéro 1 (F-D-F)
- Le regroupeur numéro 1
- le « drift » $q/A=1/6$
- la boîte de diagnostics numéro 1

Le premier triplet de quadripôle a pour fonction de donner au faisceau une enveloppe transverse raisonnable pour son transport dans la LME. Il est immédiatement suivi du premier regroupeur qui limite l'extension en phase du faisceau. Ce début de ligne est nécessairement très compact du fait des forces de charge d'espace qui s'exercent en sortie du RFQ, aussi bien en transverse qu'en longitudinal. Cette section est conçue pour permettre le franchissement du « drift $q/A=1/6$ » dans de bonnes conditions.

Le champ maximum du regroupeur 1, de l'ordre de 94 kV, est donné pour les ions $q/A=1/3$. Cependant, pendant la phase de commissioning avec le BTI en « position 1 », il sera nécessaire de monter jusqu'à 190 kV, pour effectuer les mesures d'émission longitudinale du RFQ par la méthode des 3 gradients [8]. Ceci sera possible en utilisant les

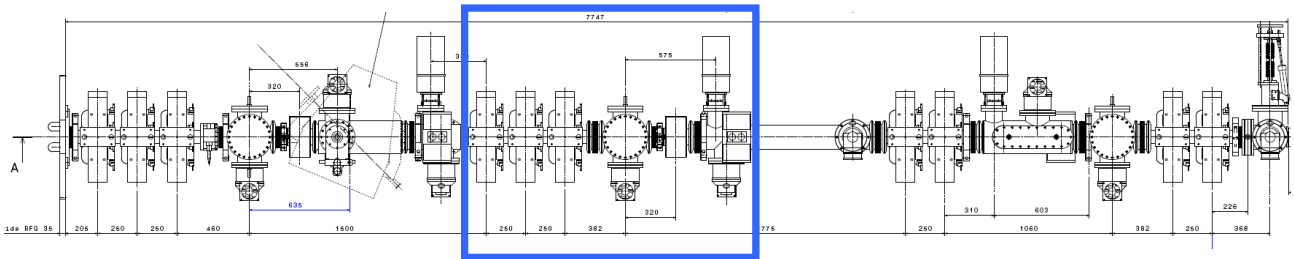
modules amplificateurs des regroupeurs 2 et 3, et en fonctionnant en mode pulsé, de façon à limiter la puissance du regroupeur.

Le « drift » qui suit le 1^{er} regroupeur correspond à l'emplacement du futur dipôle de connexion pour la ligne $q/A=1/6$. Une préétude de la ligne $q/A=1/6$ a été nécessaire pour établir la taille de ce « drift » : quatre configurations de dipôles ont été testées, et simulées avec faisceau d'ions $q/A=1/6$ ayant des caractéristiques en émittances raisonnables. Nous avons opté pour une longueur de « drift » permettant l'insertion d'un dipôle de 45° et de rayon 600mm.

Avant l'installation de la ligne $q/A=1/6$, ce « drift » pourra être utilisé avantageusement, en insérant un émittancemètre, le transformateur d'intensité aval, ou tout autre diagnostic au plus près du RFQ.

La boîte de diagnostics sera utilisée aussi bien pour le réglage des faisceaux deutons-ions $q/A=1/3$ -protons que pour celui des faisceaux provenant de la ligne $q/A=1/6$. Outre des profileurs, des fentes réglables sont prévues pour nettoyer le faisceau transversalement (protection du triplet 2 et du 2^{ème} regroupeur). Ces fentes devront accepter de l'ordre de 150 Watts (en vertical et en horizontal) en fonctionnement continu.

2.3 Sous section 2



La deuxième sous section est composée des éléments successifs suivants :

- le triplet de quadripôles numéro 2 (D-F-D)
- le regroupeur numéro 2
- le diagnostic DCCT
- la boîte de diagnostics numéro 2

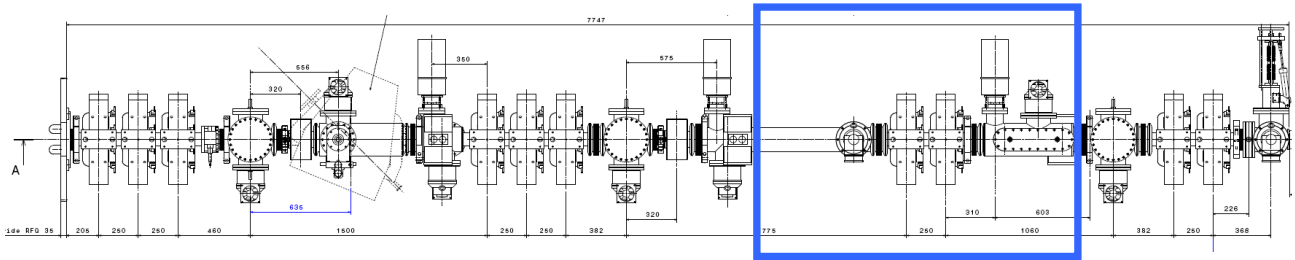
Le triplet numéro 2 a pour fonction de focaliser le faisceau, en particulier dans le plan vertical, pour permettre le passage entre les électrodes de l'isolateur de paquet situé en aval.

Le 2^{ème} regroupeur, situé juste après le triplet permet de maintenir le faisceau groupé. Il assure cette fonction aussi bien pour les faisceaux deutons- $q/A=1/3$ -protons que pour les faisceaux futurs $q/A=1/6$. Sa tension maximum, dictée par le faisceau $q/A=1/6$, est de 65 kV.

Le DCCT a pour fonction de mesurer le courant faisceau en continu ou en pulsé. Il aurait été préférable de le placer au plus près du RFQ pour éviter toute ambiguïté dans l'interprétation de sa transmission. Cependant, ce DCCT pourra être placé dans le « drift $q/A=1/6$ » dans un premier temps. Dans les 2 cas, les éléments magnétiques sont assez éloignés du dispositif, de sorte que son blindage ne doit pas poser de problème particulier.

La boîte de diagnostics qui suit immédiatement le DCCT sera utilisée aussi bien pour le réglage des faisceaux deutons, d'ions $q/A=1/3$, de protons que pour celui des faisceaux provenant de la ligne $q/A=1/6$. Outre des profileurs, des fentes réglables sont prévues pour nettoyer le halo transverse et protéger l'isolateur de paquet situé en aval. Ces fentes devront accepter de l'ordre de 150 Watts en fonctionnement continu. La fente verticale est placée au plus près de l'isolateur de paquets.

2.4 Sous section 3



Cette sous-section est composée des dispositifs suivants :

- L'isolateur de paquet (appelé parfois « supprimeur de paquets », ou « fast chopper »)
- le doublet de quadripôles numéro 1
- Le bloc d'arrêt « faisceau dévié » et un jeu de fentes réglables

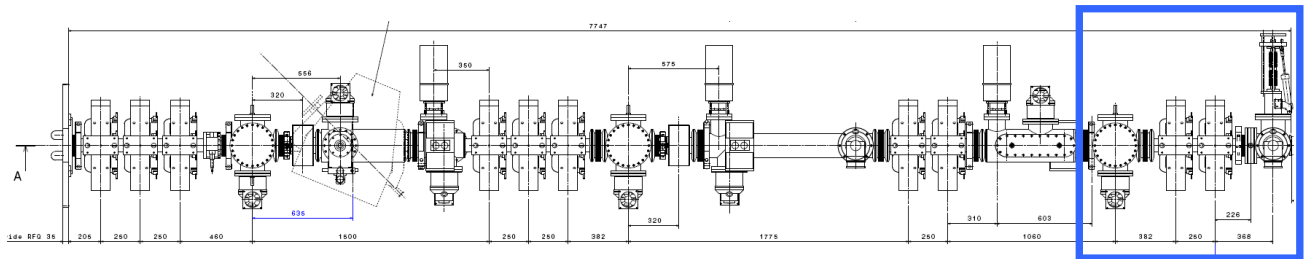
L'isolateur de paquet et son électronique représentent un challenge technologique. Les choix techniques ne sont pas arrêtés, mais il est nécessaire à ce stade du projet de figer l'encombrement longitudinal et l'écartement des électrodes, en concertation avec l'équipe HF. Un emplacement de 650 mm a été réservé pour accueillir l'isolateur.

Le doublet de quadripôles numéro 1 a pour fonction de maintenir le faisceau focalisé, tout en favorisant la déviation du faisceau « choppé » vers le bloc d'arrêt faisceau. La difficulté est de bien séparer verticalement les paquets déviés et non déviés.

Le bloc d'arrêt pour faisceau dévié doit supporter 7.5 KWatts en continu, compte tenu des cyclages demandés par les utilisateurs. L'encombrement longitudinal a été porté à 400 mm de façon à minimiser la densité de puissance déposée, par unité de surface. Ceci constitue la limite maximum du point de vue de la dynamique faisceau. Une façon de diviser par 2 la puissance déposée consisterait à dévier le faisceau alternativement vers le haut et vers le bas. L'équipe RF étudie cette possibilité. De plus, l'écartement entre les blocs haut et bas devra être ajustable verticalement.

Une fente horizontale est placée avant le bloc d'arrêt, et de plus, pendant la période de fonctionnement sans bloc d'arrêt, ce dernier sera remplacé par une fente verticale réglable acceptant 150 Watts.

2.5 Sous section 4



Cette dernière sous section de la ligne LME est composée des éléments suivants :

- Le 3^{ème} et dernier regroupeur
- Le doublet de quadripôles numéro 2
- La boîte de diagnostics numéro 3

Associé aux deux regroupeurs précédents, le dernier regroupeur assure le réglage de l'adaptation longitudinale en entrée du LINAC. La tension maximum du 3^{ème} regroupeur, dictée par les ions $q/A=1/6$, est de 120 kV.

Le dernier doublet de quadripôles, associé au premier doublet de quadripôles du LINAC, assure l'adaptation transverse en entrée de celui-ci.

La dernière zone de diagnostics comprend un FCT et une cage de Faraday. Celle-ci permet de régler la ligne LME sans transmettre le faisceau au LINAC. La puissance maximum que doit accepter cette cage de Faraday est de 7.5 KWatts.

3 OPTIQUE DANS LES LIGNES MOYENNE ENERGIE

3.1 Hypothèses de calculs

L'optique de la ligne moyenne énergie a été simulée en utilisant les codes TRACEWIN et PARTRAN, développés par le CEA Saclay [9]. TRACEWIN permet d'effectuer les calculs d'enveloppe au premier ordre, tandis que PARTRAN traite les simulations multi-particulaires, utiles notamment pour le traitement des aberrations induites par les dipôles (ligne $q/A=1/6$). Les effets de charge d'espace sont traités via la routine 3D PICNIC. Les simulations multi-particulaires sont effectuées avec au moins 100 000 particules, et les distributions initiales correspondent aux résultats issus des calculs de la LBE consolidée et du RFQ (sauf pour les ions $q/A=1/6$).

Dans les figures présentées, les enveloppes sont tracées de façon arbitraire à 3 fois la taille rms, ce qui correspond à environ 99% du faisceau pour une distribution gaussienne.

TraceWin et Partran permettent également de simuler les procédures de réglage de la ligne en incluant les différents diagnostics et leurs correcteurs associés. Simuler les lignes telles qu'elles seront réglées permet ainsi de valider l'ensemble des étapes du « commissioning » ainsi que les choix et emplacements des diagnostics nécessaires. L'ensemble des études d'erreurs réalisées sur le projet intègre ces procédures automatiques de réglage.

Les cartes de champ électromagnétiques 3D des regroupeurs ont été calculées avec le logiciel MicroWave Studio.

Les cartes de champs magnétiques 3D des quadripôles ont été calculées avec le logiciel TOSCA (Vector fields).

L'ensemble des calculs présentés en multiparticules (100 000) a été effectué avec ces cartes de champs, et avec les distributions issues du RFQ.

3.2 Méthode de réglage

Quelque soit le type de faisceau transporté, la procédure de réglage de la ligne LME est effectuée par étapes successives. Toutes se réalisent par l'optimisation d'éléments magnétiques en fonction d'informations issues de diagnostics faisceau. Pour le réglage de l'alignement du centroïde du faisceau, un seul « steerer » par quadripôle a été considéré. Tous les quadripôles en sont équipés et par convention, un « steerer » nommé B_Y donne un angle en X' , et un « steerer » B_X un angle en Y' .

L'ensemble des étapes décrites ci-dessous s'effectuera avec une durée de pulse faisceau compatible avec les profileurs à fils équipant la ligne. Le courant crête du pulse sera celui au courant nominal.

→ Etape 1

Réglage de la tension et de la phase du groupeur LME-GR1, puis du groupeur LME-GR2, puis du groupeur LME-GR3 avec la mesure de phase en fin de LME (LME-FCT21) ou les mesures de temps de vol du linac. La tension cible est une valeur précalculée ou tabulée. Les cavités groupeurs fonctionnent en régime continu. La phase synchrone est fixée à -90° .

→ Etape 2

Ajustement du triplet (LME-Q11, LME-Q12 & LME_Q13) de manière à obtenir un faisceau rond ($X_{rms}=Y_{rms}$) et le plus petit possible sur les profileurs LM-PR21.

[Diagnostic_10 dans le fichier TRACEWIN]

→ **Etape 3**

Ajustement des déviateurs LME-DEVH11 et LME-DEVV11 afin d'aligner le centre du faisceau sur le profileur LME-PR21.

[Diagnostic_18 dans le fichier TRACEWIN]

→ **Etape 4**

Ajustement du triplet (LME-Q21, LME-Q22 & LME-Q23) de manière à obtenir les tailles rms X & Y respectivement identiques sur les profileurs LME-PR22 & LME-PR23. De plus la taille X_{rms} est fixée à 2.6 mm. Cela permet ainsi de créer un faisceau quasi parallèle à l'intérieur de l'isolateur de paquet.

[Diagnostic_11 dans le fichier TRACEWIN]

→ **Etape 4**

Réglage du doublet (LME-Q24 & LME-Q25) aux valeurs pré-calculées selon les espèces. Ces valeurs optimisées permettent d'amplifier au maximum l'angle de séparation induit par l'isolateur de paquet. Il faut noter, que pour le cas particulier des deutons et des protons ou la tension de l'isolateur de paquet n'est pas critique, le second quadripôle LME-Q25 est donc fixé de manière à participer au mieux à l'injection dans le linac.

→ **Etape 5**

Ajustement du triplet (LME-Q26, LME-Q27 & premier doublet du linac) de manière à adapter le faisceau au linac. En parallèle les amplitudes des 3 regroupeurs seront ajustées pour adapter le plan longitudinal du faisceau au linac.

[Diagnostic_15 dans le fichier TRACEWIN]

→ **Etape 6**

Ajustement des steerers By de LME-Q11 et Bx de LME-Q12 afin d'aligner le centroïde du faisceau sur le profileur LME-PR21.

[Diagnostic_18 dans le fichier TRACEWIN]

→ **Etape 7**

Ajustement des steerers Bx de LME-Q21, By de LME-Q22 et Bx de LME-Q23 afin d'aligner le centroïde du faisceau sur les profileurs LME-PR22 et LME-PR23.

[Diagnostic_19 dans le fichier TRACEWIN]

→ **Etape 8**

Ajustement des steerers By de LME-Q26 et Bx de LME-Q27 afin d'aligner le centroïde du faisceau sur le BPM de la première période du linac.

[Diagnostic_20 dans le fichier TRACEWIN]

→ **Etape 9**

Ajustement des fentes de nettoyages en s'aidant des différentes mesures d'intensité disponibles (DCCT, FCT et cage de Faraday). La puissance dissipée par fente ne doit pas excéder 150 W pour 5 mA de faisceau.

3.3 Optique pour les deutons

→ Optique nominale à 5 mA

L'optique nominale pour les deutons 5 mA est illustrée sur la Figure 4 et la Figure 5. Les calculs ont été ici effectués en utilisant des cartes de champ 3D pour l'ensemble des éléments (excepté les déviateurs). Le faisceau d'entrée utilisé est la distribution issue du RFQ (Figure 3). La transmission totale est de 90.5%, avec 9.3% du faisceau intercepté dans les différentes fentes de nettoyage de la ligne (Figure 7). Ces fentes ont pour rôle de nettoyer le halo du faisceau pour protéger les cavités, l'isolateur de paquet et limiter le plus possible le halo injecté dans la partie supraconductrice. On remarque leurs efficacités sur la Figure 5, notamment vers la position 2.4 m, à laquelle le faisceau est clairement nettoyé d'une partie significative de son halo. Quelques pertes sont observées dans le premier triplet correspond aux particules décrochées en énergie à la sortie du RFQ, elles représentent une puissance à évacuer inférieur au Watt. Aucune augmentation d'émittance significative n'est observée dans le transport de la LME (Figure 7). La Figure 6 représente la distribution du faisceau à la sortie de la LME.

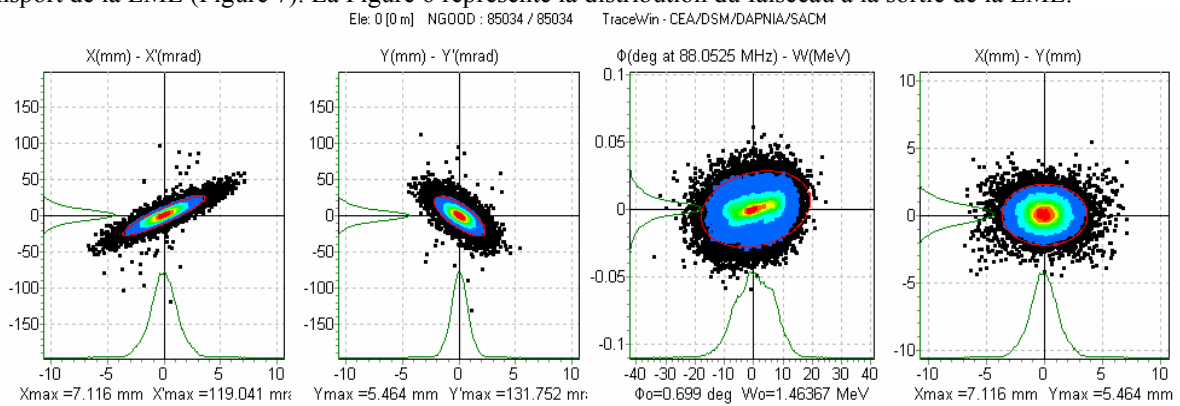


Figure 3 : Distribution du faisceau de deutons 5 mA à la sortie du RFQ.

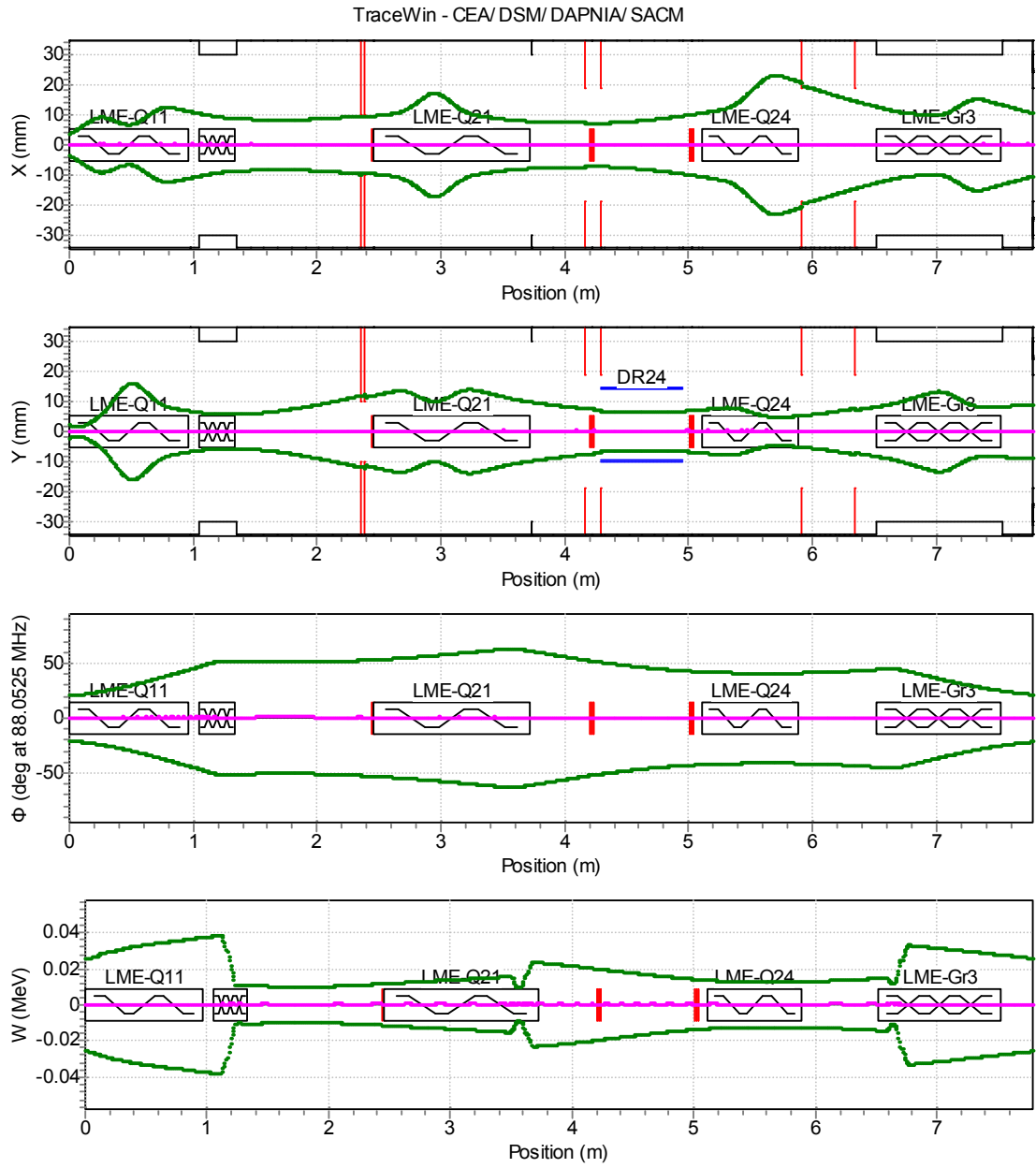


Figure 4 : Envelopes à 3 rms issues d'un calcul multiparticulaire du faisceau de deutons 5 mA.

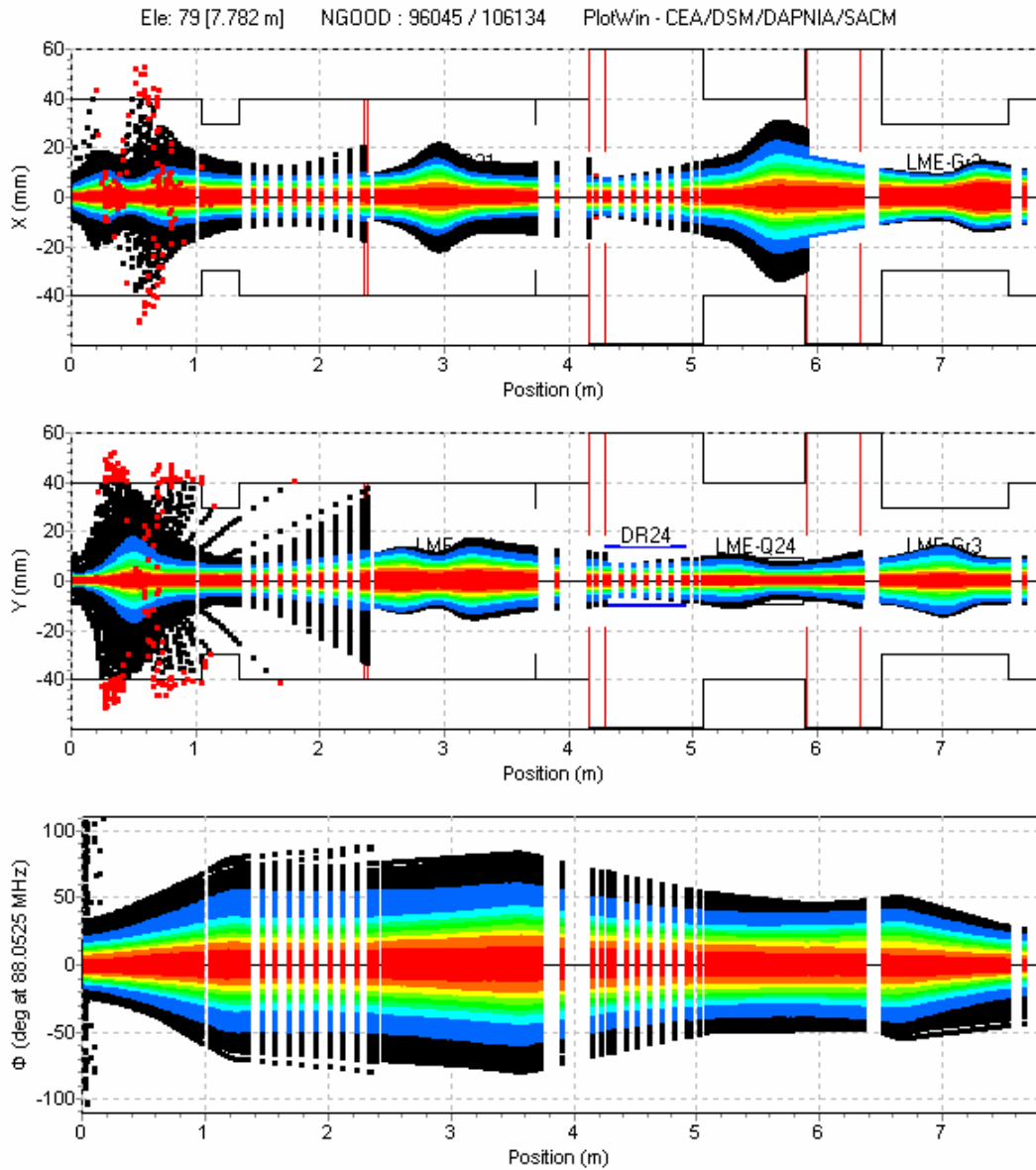


Figure 5 : Optique nominale pour un faisceau de deutons 5 mA de 100.000 particules

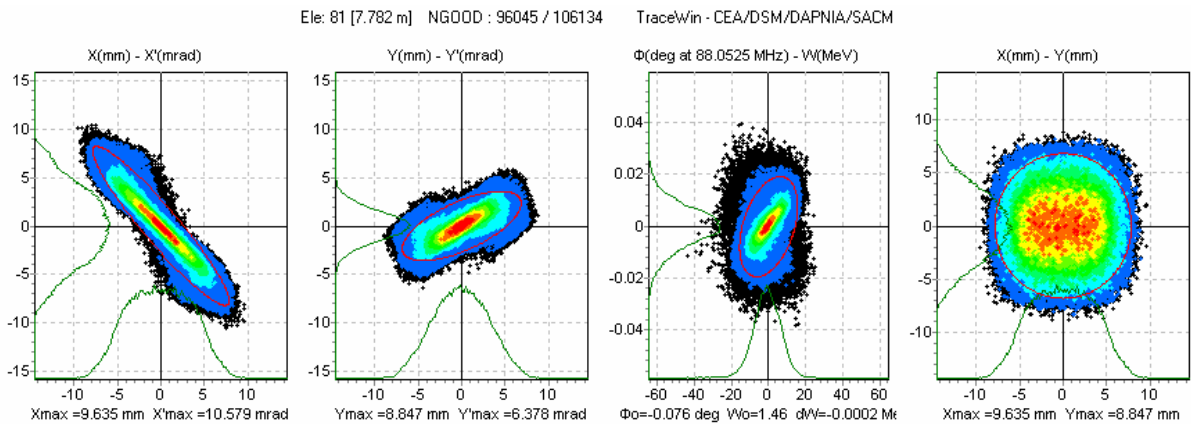


Figure 6 : Distribution du faisceau de deutons 5 mA à la sortie du de la LME

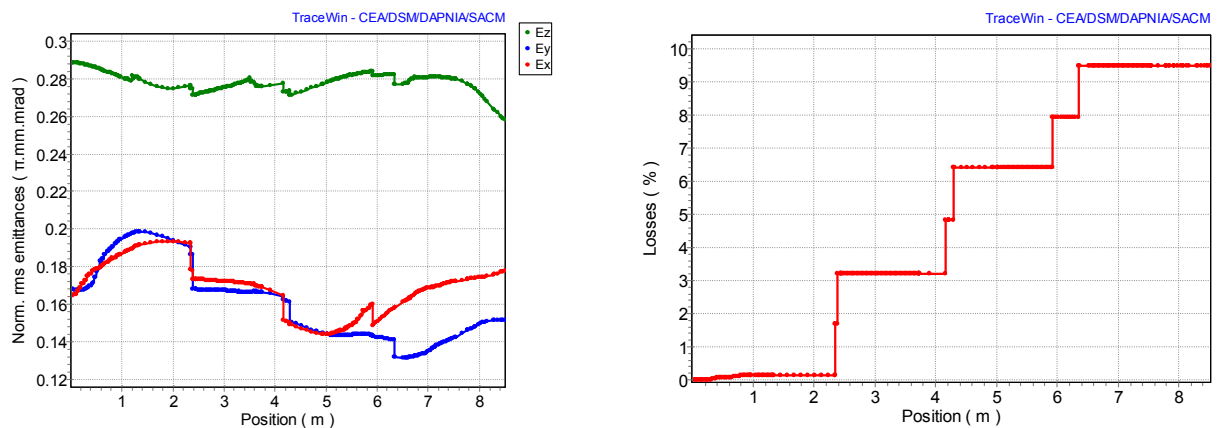


Figure 7 : Evolution des émittances norm. rms (gauche) et des pertes faisceau le long de la ligne (droite) pour l'optique nominale des deutons.

→ Optique à 150 μA

L'optique nominale pour les deutons 150 μA est illustrée sur la Figure 9. On observe Figure 8 que l'émittance longitudinale rms normalisée en sortie du RFQ est supérieure à celle du faisceau 5 mA : 0.49 au lieu de 0.28 $\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ norm. Les émittances transverses rms normalisées sont par contre plus faibles que dans le cas 5mA : 0.25 à 0.3 $\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$. On observe aucune perte significative et aucune augmentation d'émittance. On peut toutefois redouter l'apparition de pertes longitudinales dans le linac. Une solution qu'il faudra explorer dans ce cas pourrait être de réduire l'acceptance du RFQ en baissant sa tension, de manière à décroître l'émittance longitudinale à sa sortie grâce aux pertes que cela engendrera. La Figure 10 représente la distribution du faisceau à la sortie de la LME.

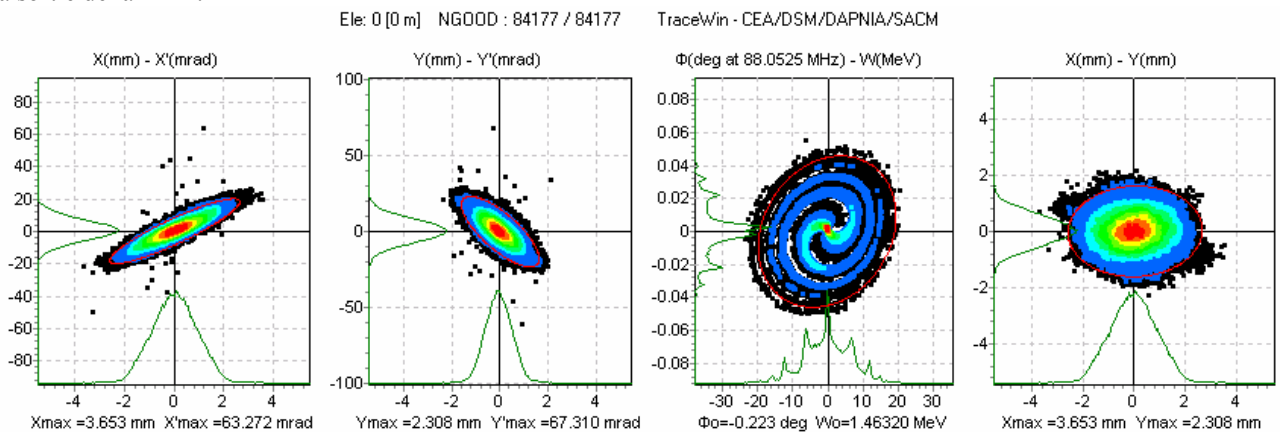


Figure 8 : Distribution du faisceau de deutons 0 mA à la sortie du RFQ

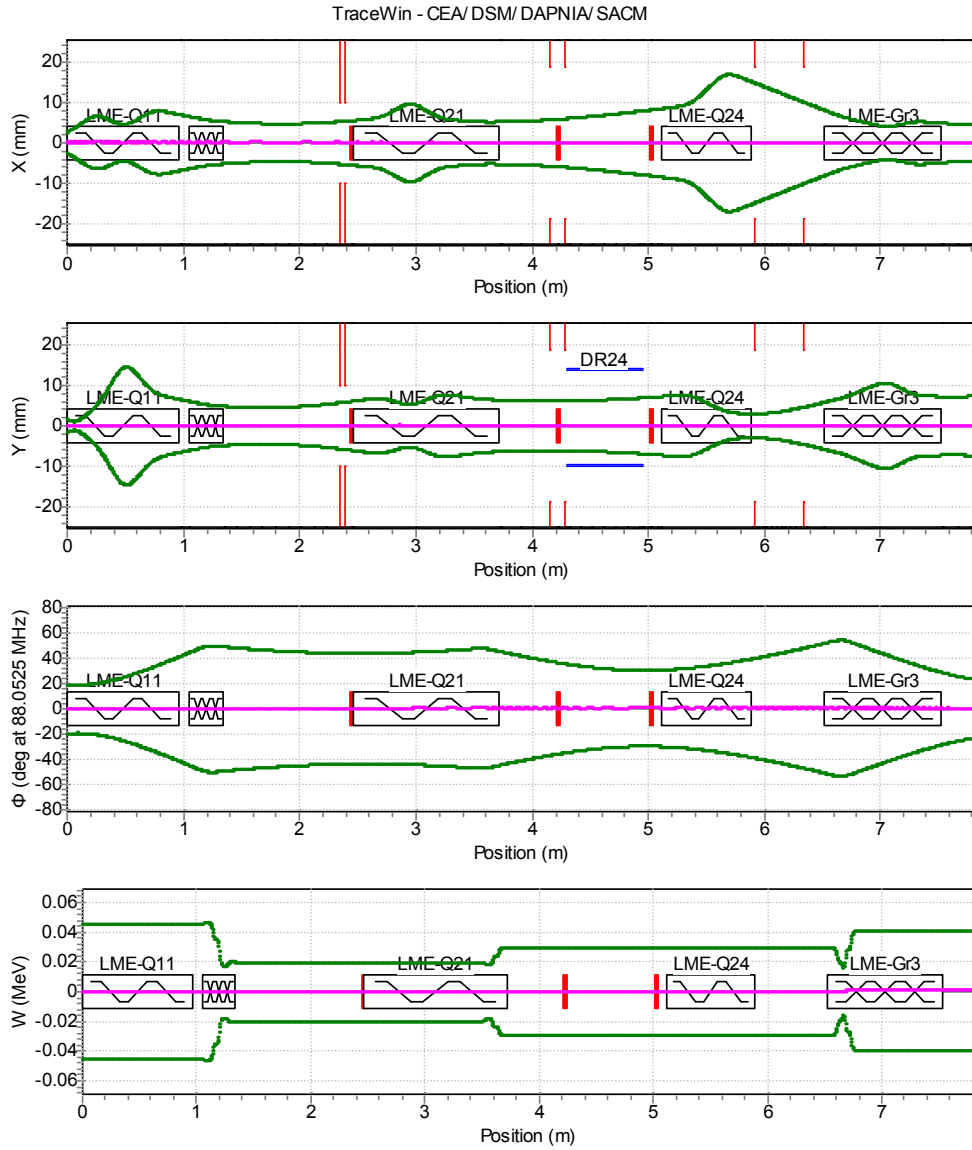


Figure 9 : Envelopes à 3 rms issues d'un calcul multiparticulaire du faisceau de deutons 0 mA

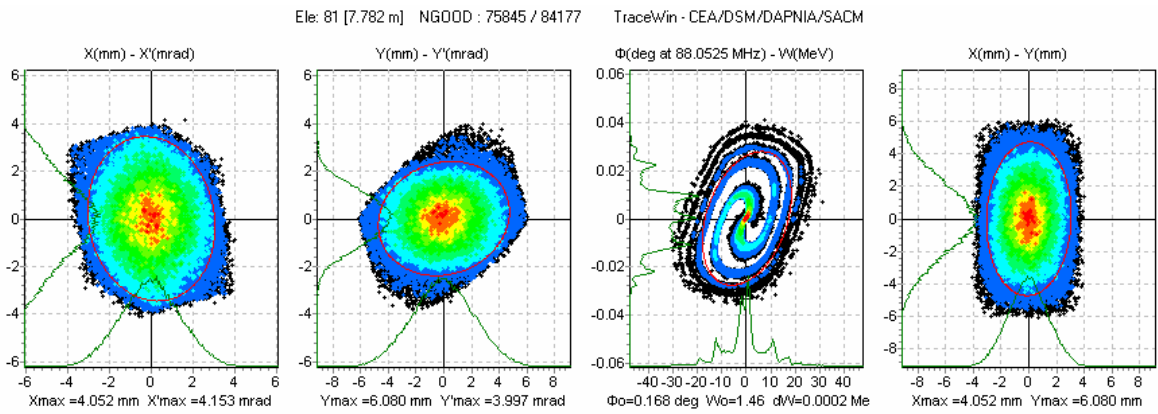


Figure 10 : Distribution du faisceau de deutons 0 mA à la sortie de la LME

3.4 Optique pour les ions $q/A=1/3$

→ Optique nominale à 1 mA

L'optique nominale pour les ions $q/A=1/3$ à 1 mA est illustrée sur les Figure 12 et Figure 13. Les calculs ont été ici effectués en utilisant des cartes de champ 3D pour l'ensemble des éléments (excepté les déviateurs). Le faisceau d'entrée utilisé est la distribution issue du RFQ (Figure 11). La transmission totale est de l'ordre de 94%, avec environ 6% du faisceau intercepté dans les différentes fentes de nettoyage de la ligne (Figure 15). Quelques pertes inférieures au Watt sont observées dans le premier triplet, le premier regroupeur et la chambre sur les 2.4 premiers mètres de la ligne, jusqu'à la première fente. Elles correspondent aux particules décrochées en énergie à la sortie du RFQ. Aucune augmentation d'émission n'est observée dans le transport de la LME (Figure 15). La Figure 14 représente la distribution du faisceau à la sortie de la LME.

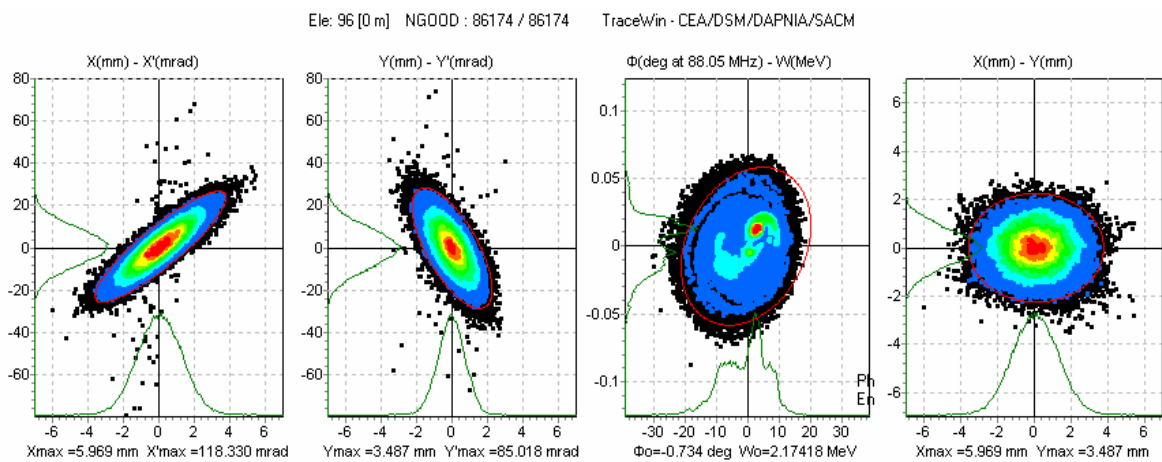


Figure 11 : Distribution du faisceau d'ions $q/A=1/3$ à 1 mA à la sortie du RFQ.

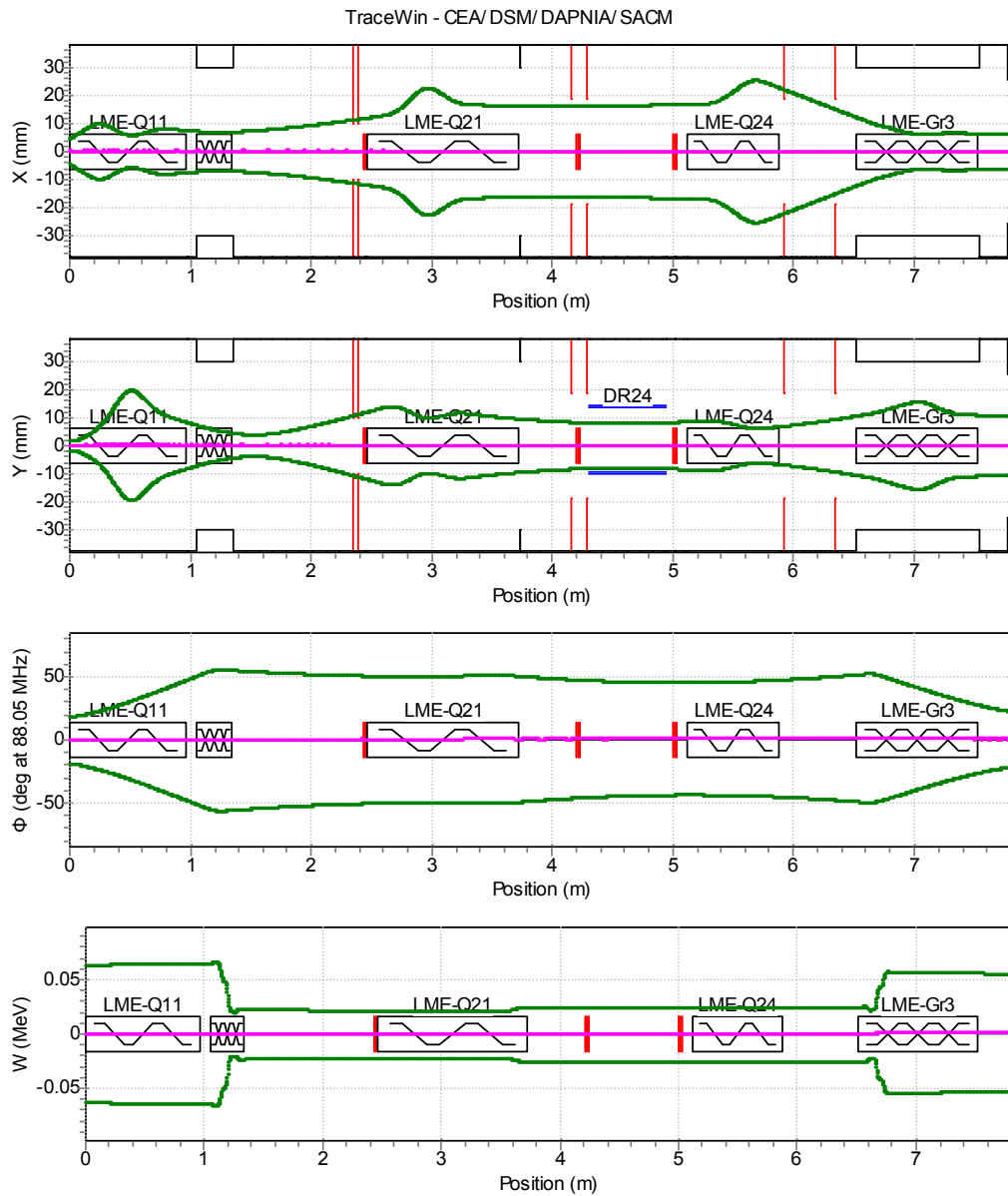


Figure 12 : Envelopes à 3 rms issues d'un calcul multiparticulaire du faisceau d'ions $q/A=1/3$ à 1 mA.

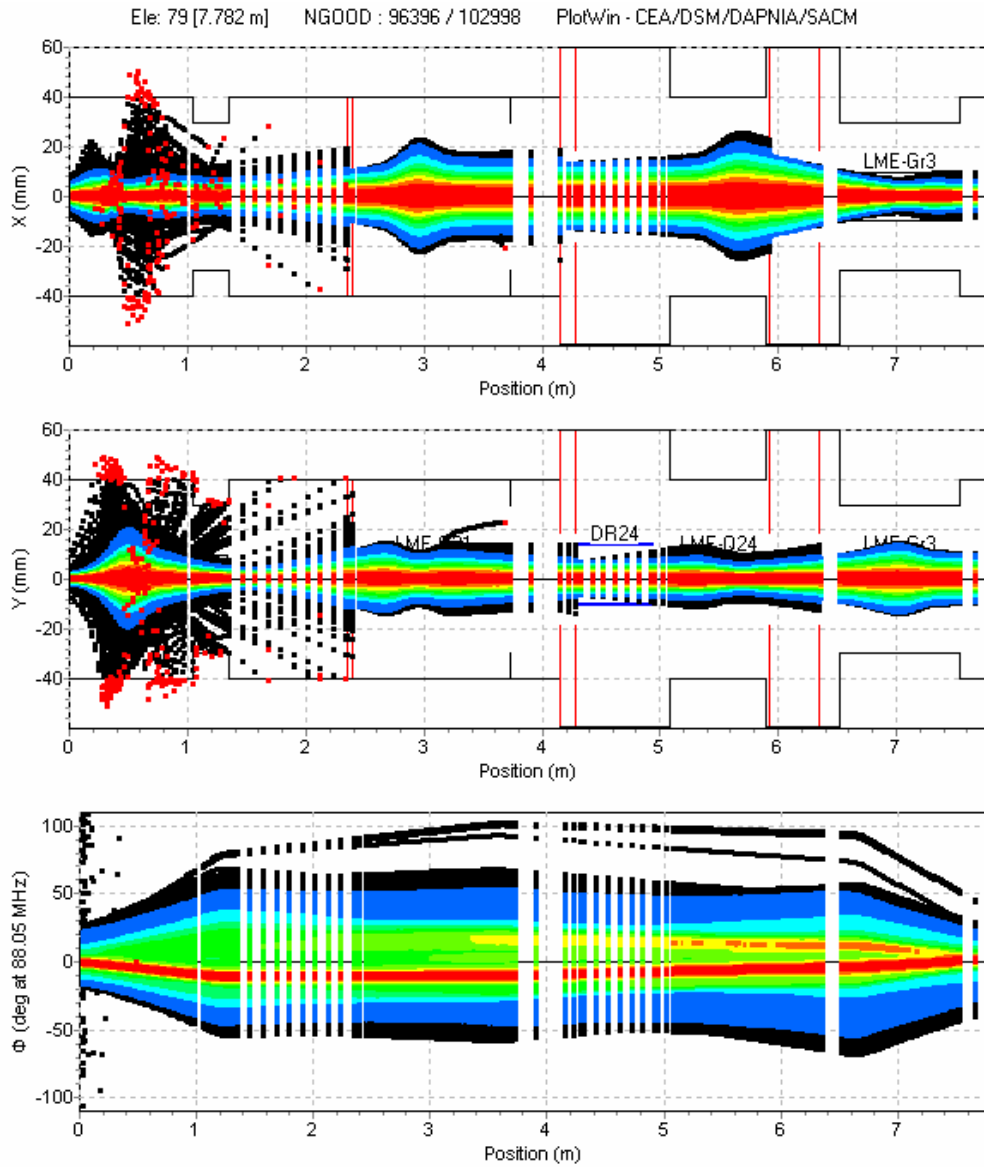


Figure 13 : Optique nominale pour un faisceau d'ions $q/A=1/3$ à 1 mA (100.000 particules).

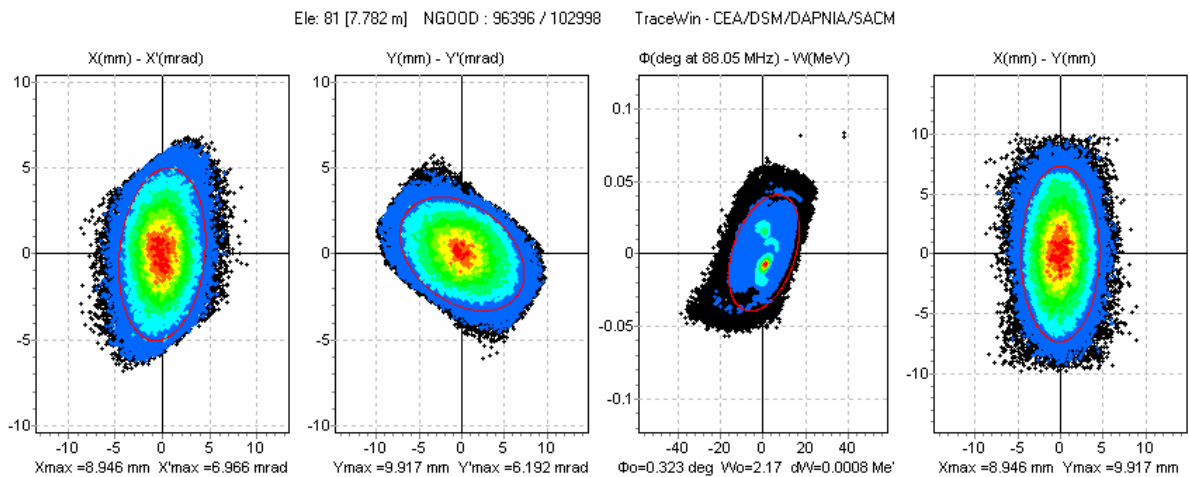


Figure 14 : Distribution du faisceau d'ions $q/A=1/3$ à 1 mA à la sortie de la LME.

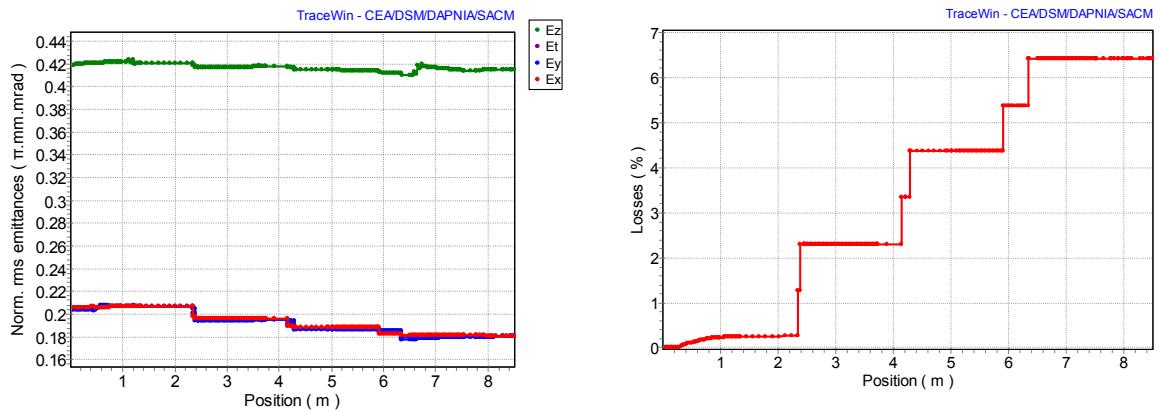


Figure 15 : Evolution des émittances norm. rms (gauche) et des pertes faisceau le long de la ligne (droite) pour l'optique nominale des ions $q/A=1/3$ à 1 mA.

→ **Optique nominale à 150 μ A**

L'optique nominale pour les ions $q/A=1/3$ à 150 μ A est illustrée sur la Figure 17. La distribution d'entrée utilisée pour la simulation elle celle issue du RFQ, Figure 16. On n'observe aucune perte significative ainsi qu'aucune augmentation d'émittance.

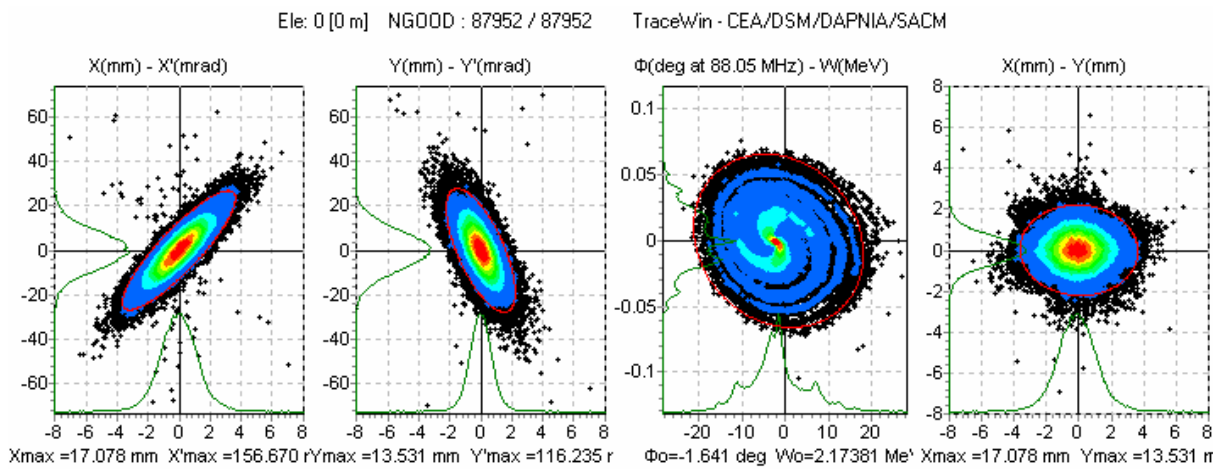


Figure 16 : Distribution du faisceau d'ions $q/A=1/3$ à 150 μ A à la sortie du RFQ.

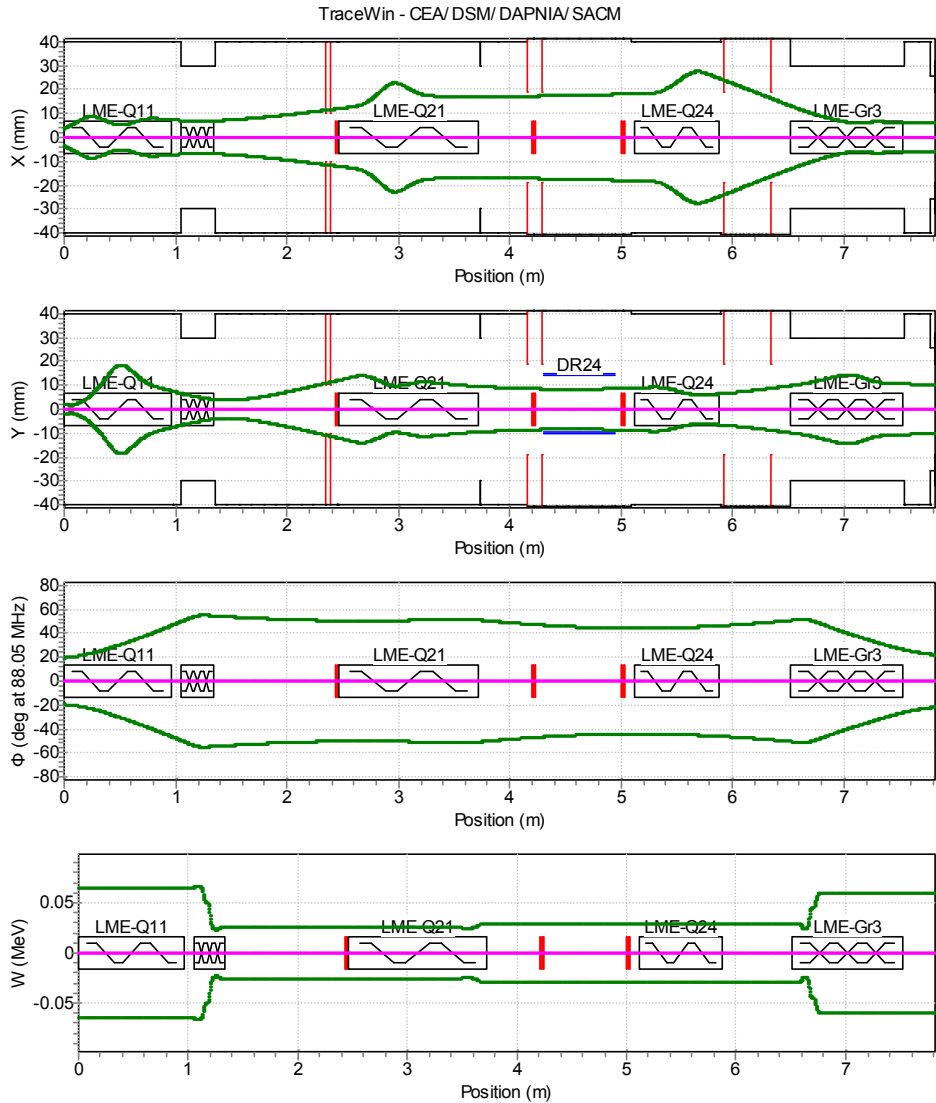


Figure 17 : Envelopes à 3 rms issue d'un calcul multiparticulaire du faisceau d'ions $q/A=1/3$ à $150 \mu\text{A}$.

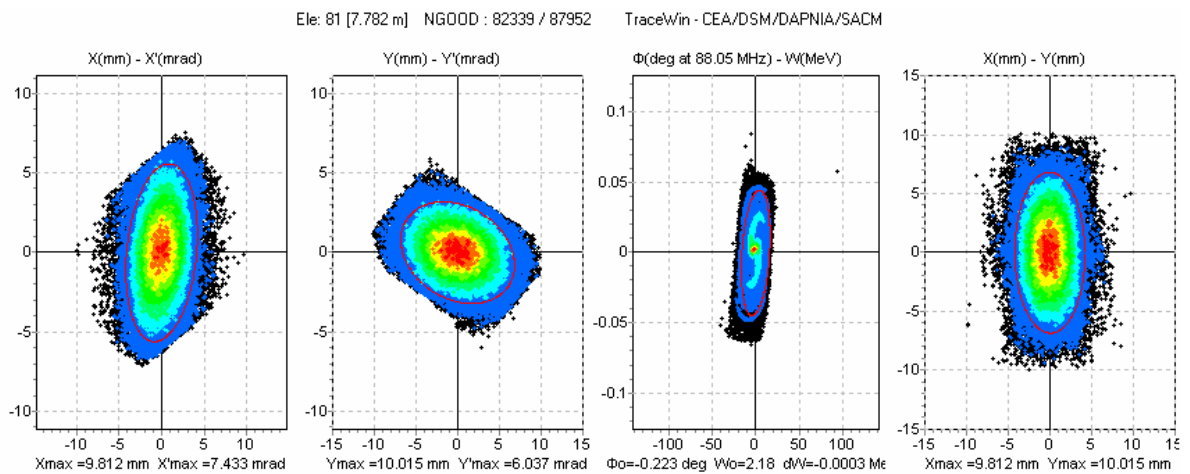


Figure 18 : Distribution du faisceau d'ions $1/3$ à $150 \mu\text{A}$ à la sortie du de la LME.

3.5 Optique pour les Protons

→ Optique nominale à 5 mA

L'optique nominale pour les protons 5 mA est illustrée sur la Figure 20 et la Figure 21. Le faisceau d'entrée utilisé est la distribution issue du RFQ (Figure 19). Cette distribution est issue d'un transport dans la ligne basse énergie d'un faisceau de 10 mA de protons. Les fentes de la ligne basse énergie ont été réglées de manière à créer une émittance transverse acceptable dans le RFQ puis la LME. Ceci est réalisé en scrapant ~50% du faisceau à la sortie de la LBE par le système à 3 fentes, de manière à ramener les émittances transverses de sortie du RFQ de 0.45 à 0.23 π .mm.mrad norm. Cette méthode permet de réduire sensiblement les émittances d'entrée de la LME, mais n'est pas suffisante pour réduire suffisamment le halo, c'est pourquoi encore 19% (Figure 23) du faisceau est nettoyé par les fentes dans la LME, afin de préserver au mieux le linac supraconducteur. Cependant même si les émittances sont bien préservées dans la LME (Figure 23), le transport dans le linac reste difficile notamment en raison de la taille en phase du faisceau. On observe environ 1W de perte faisceau au niveau du premier triplet ainsi que sur l'isolateur de paquet. La Figure 22 représente la distribution du faisceau à la sortie de la LME.

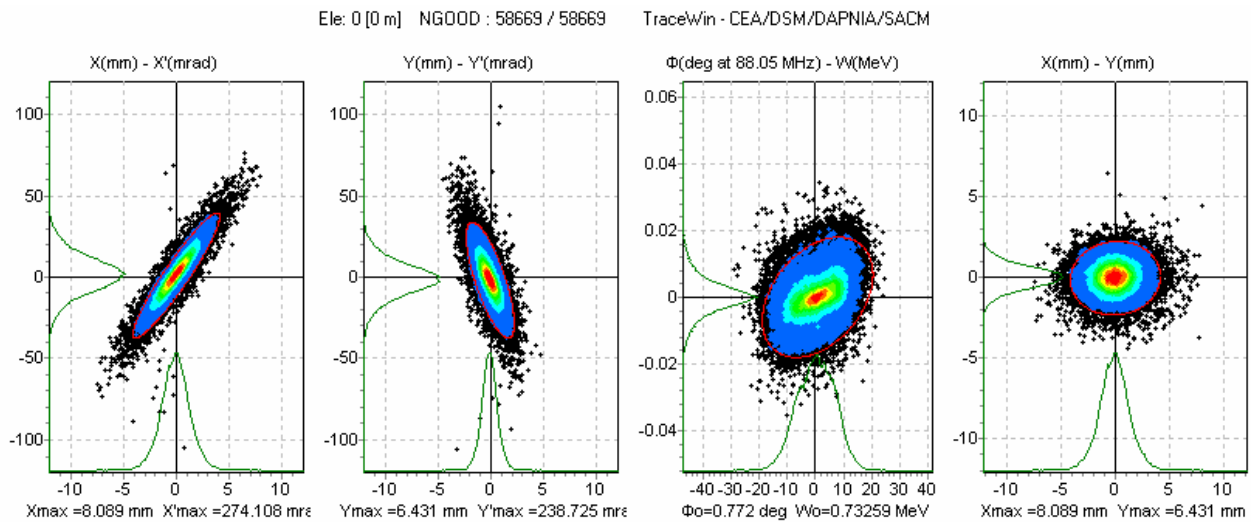


Figure 19 : Distribution du faisceau de protons 5 mA à la sortie du RFQ.

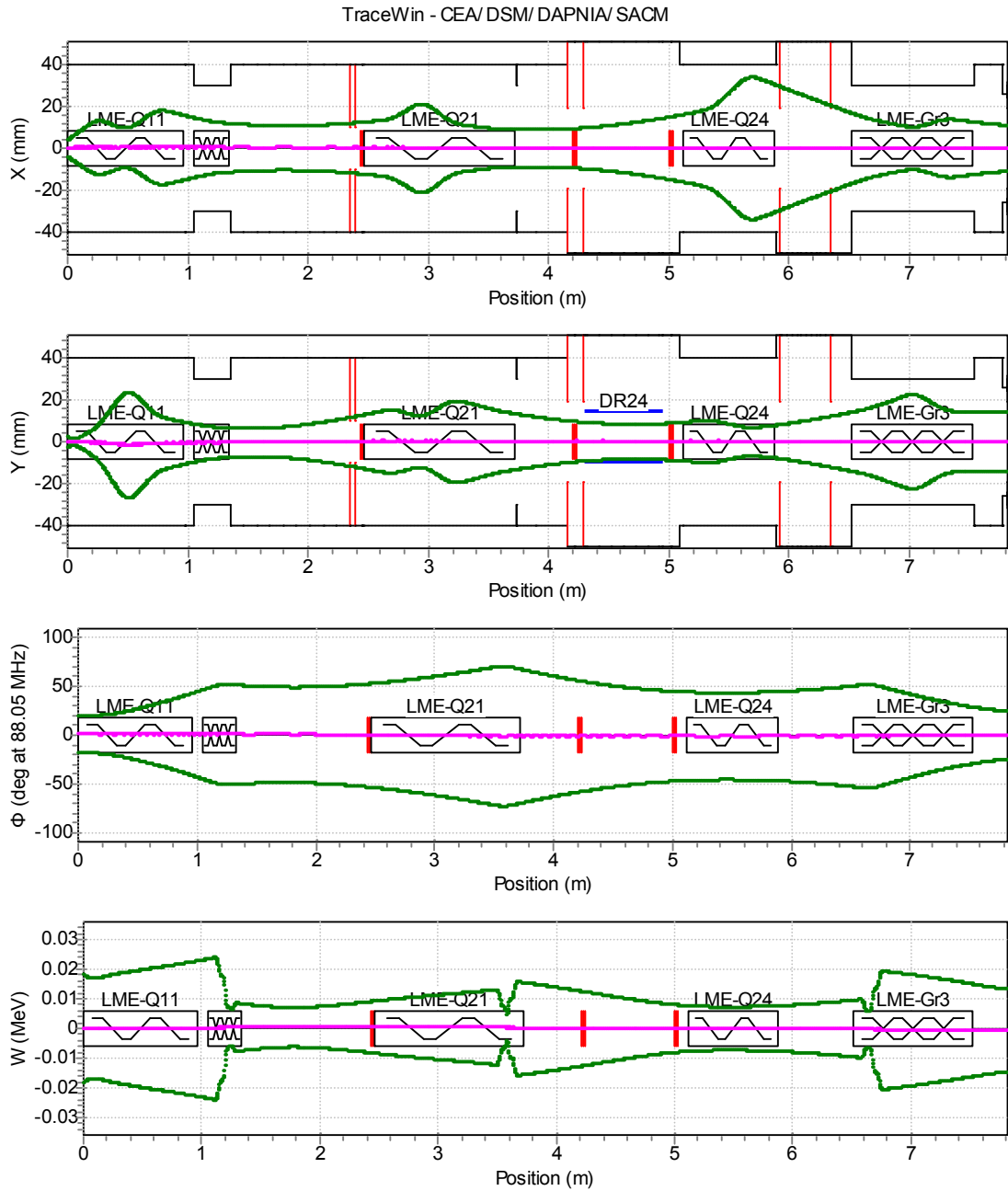


Figure 20 : Envelopes à 3 rms issues d'un calcul multiparticulaire du faisceau de protons 5 mA.

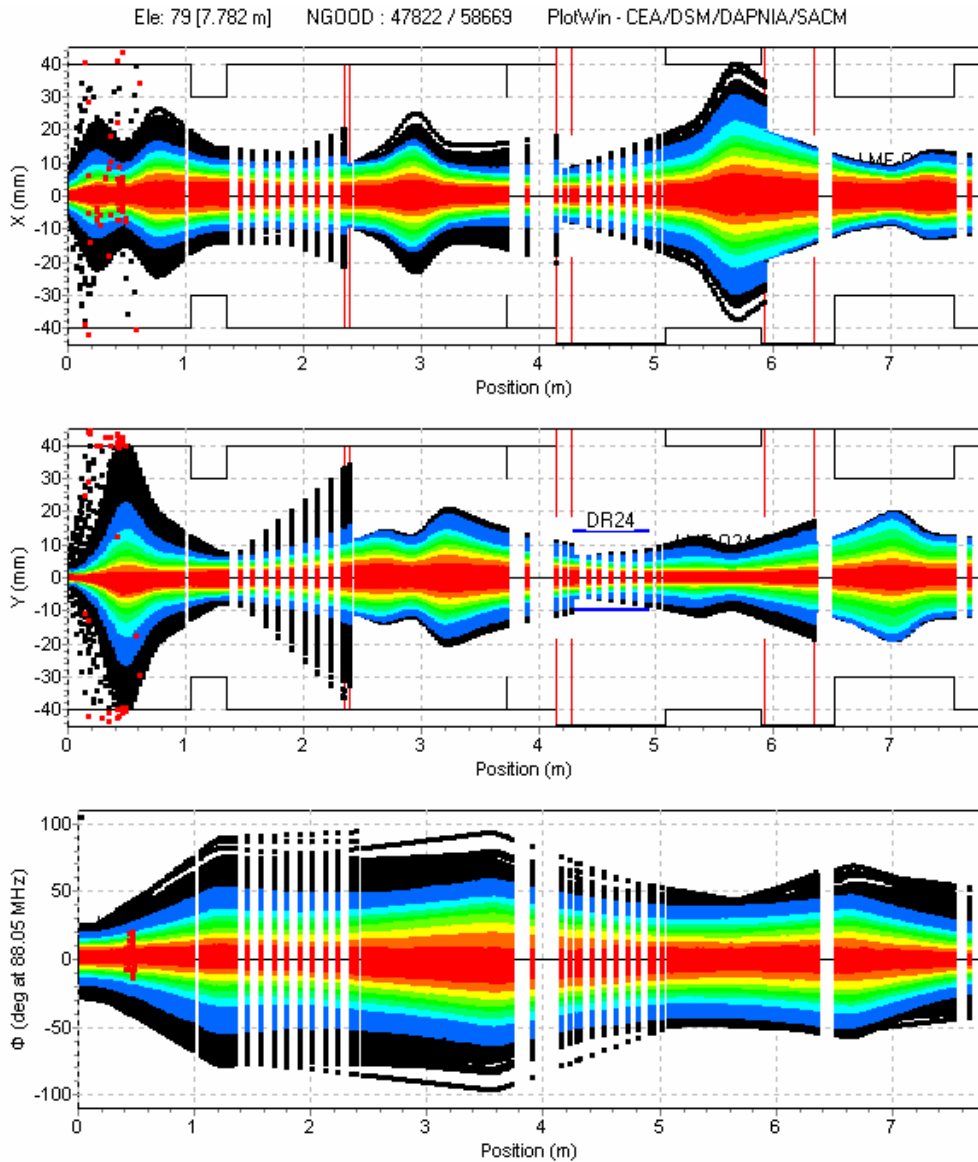


Figure 21 : Optique nominale pour un faisceau de protons 5 mA de 50.000 particules.

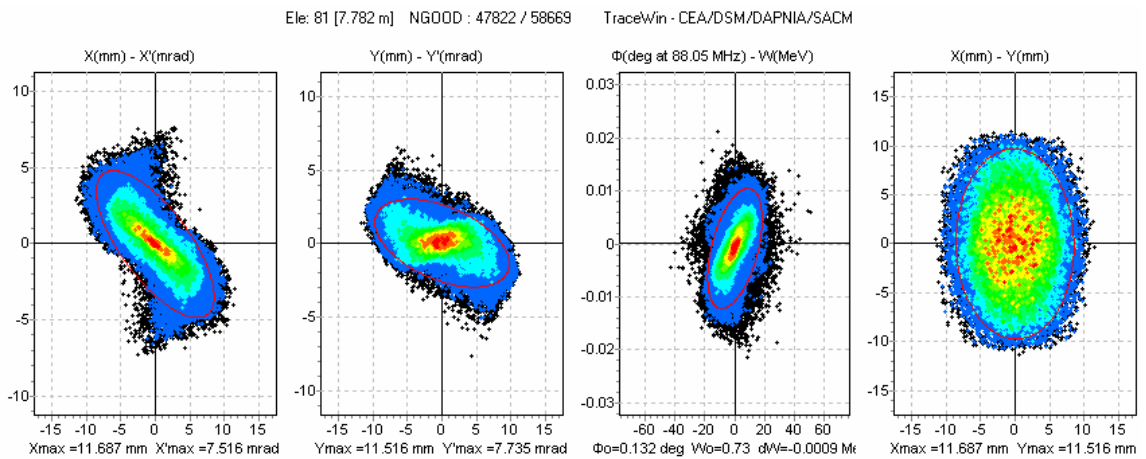


Figure 22 : Distribution du faisceau de protons 5 mA à la sortie du de la LME.

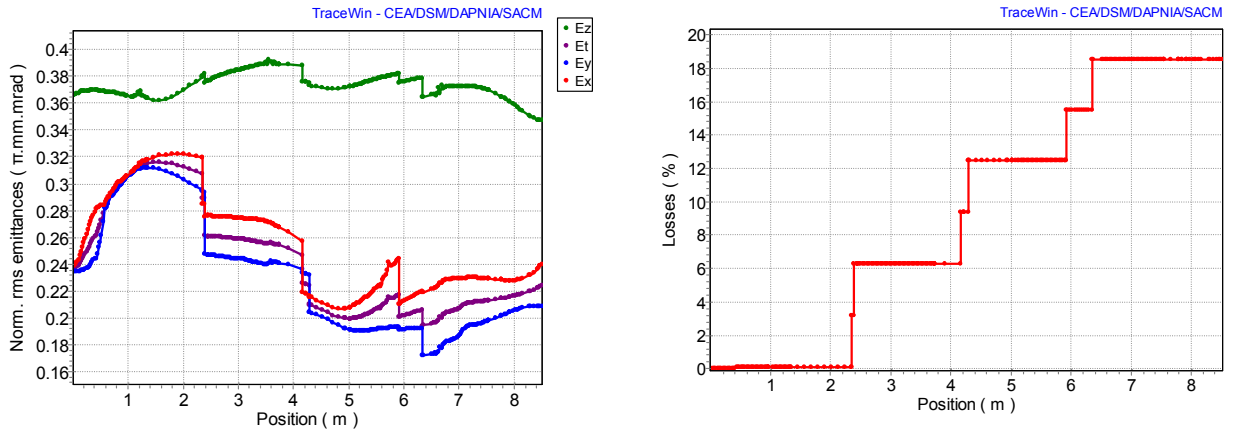


Figure 23 : Evolution des émittances norm. rms (gauche) et des pertes faisceau le long de la ligne (droite) pour l'optique nominale des protons.

→ **Optique nominale à 100 μA**

L'optique nominale pour les protons 100 μA est illustrée sur la Figure 25. Le faisceau d'entrée utilisé est la distribution issue du RFQ (Figure 24). La Figure 26 représente la distribution du faisceau à la sortie de la LME.

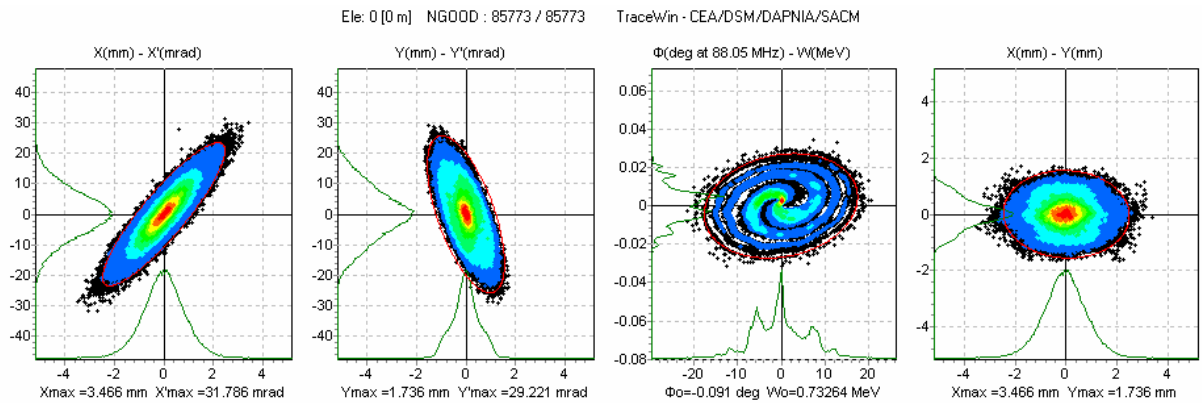


Figure 24 : Distribution du faisceau de protons 100 μA à la sortie du RFQ.

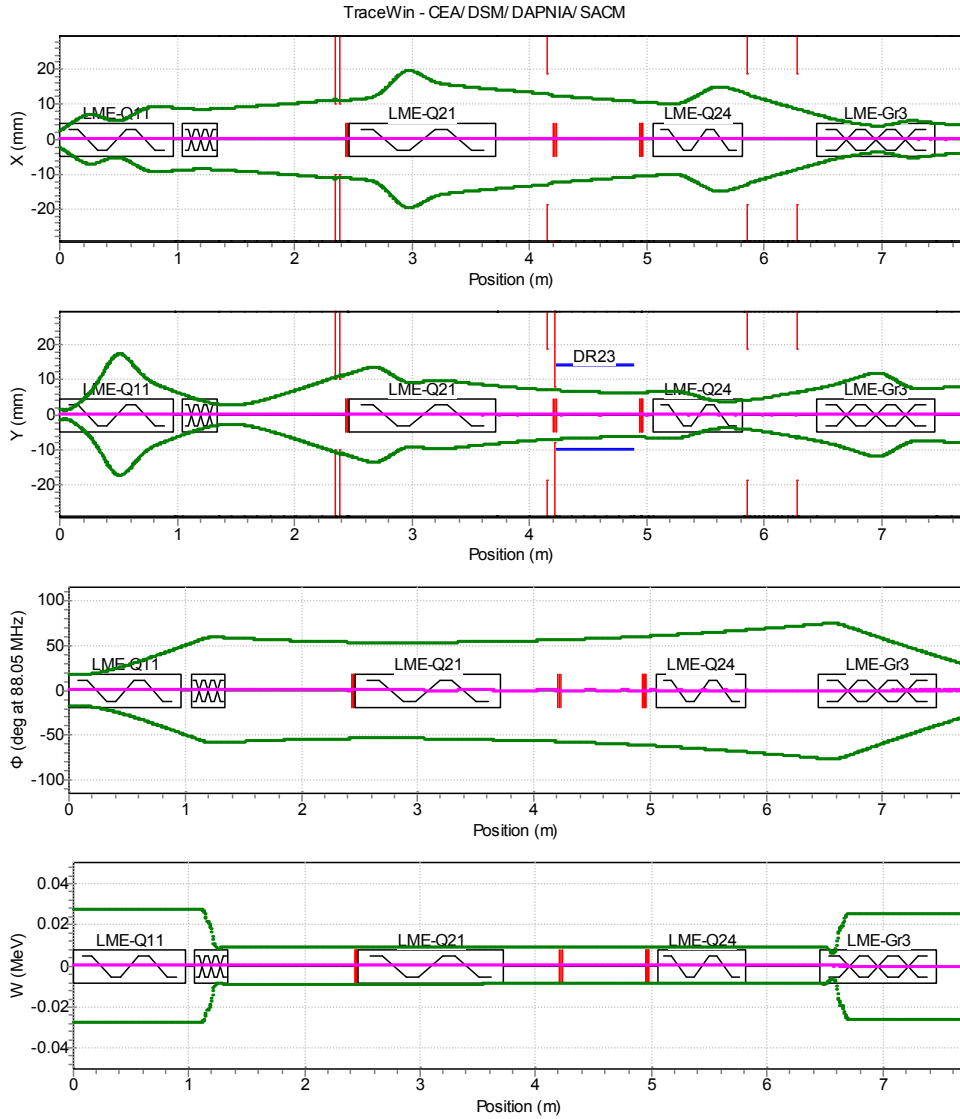


Figure 25 : Envelopes à 3 rms issues d'un calcul multiparticulaire du faisceau de protons 100 μ A.

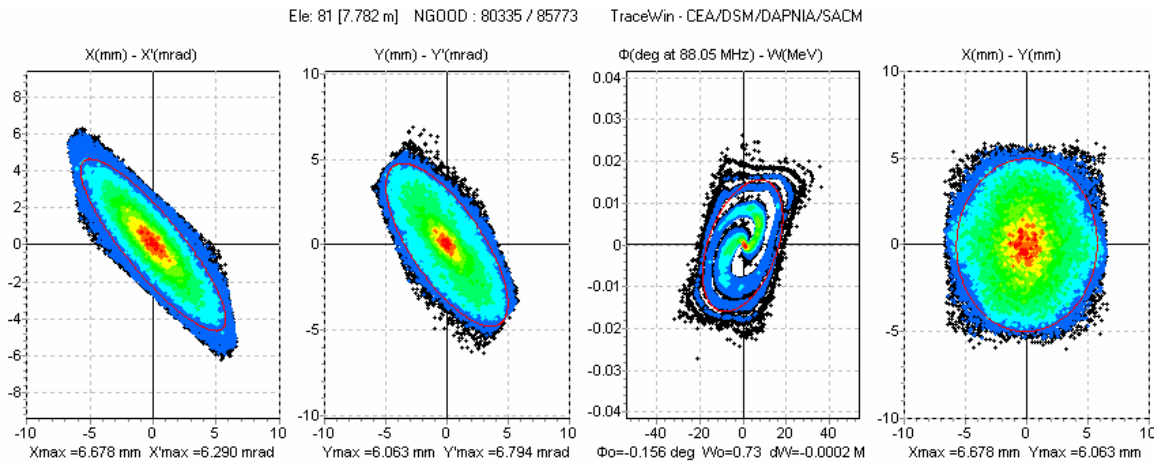


Figure 26 : Distribution du faisceau de protons 100 μ A à la sortie de la LME.

3.6 Optiques possible pour les ions $q/A=1/6$

La structure achromatique de la ligne LME optionnelle $q/A=1/6$ ^{ème} (Figure 27) a été établie avec les objectifs de vérifier sa faisabilité, de vérifier son insertion dans la LME principale et enfin d'estimer son encombrement futur, afin de réserver la place nécessaire dans le bâtiment accélérateur. Les simulations ont été effectuées en utilisant les paramètres de sortie du RFQ 1/3 appliqués à une distribution gaussienne coupée à 3σ . Ce choix est a priori pénalisant, en effet le RFQ 1/6 devrait fournir un faisceau avec une émittance longitudinale meilleure. L'optique dont les enveloppes sont montrées Figure 28, ne présente aucune perte et aucun grossissement d'émittance. La ligne 1/6 est longue d'environ 10 m. La ligne comprend 2 regroupeurs permettant de conserver la structure en paquet du faisceau jusqu'au premier regroupeur de la ligne LME commune. Le choix des dipôles à 45 degrés s'explique par le faible encombrement disponible dans la ligne commune et par la nécessité de conserver une distance suffisante entre les RFQ 1/3 et 1/6.

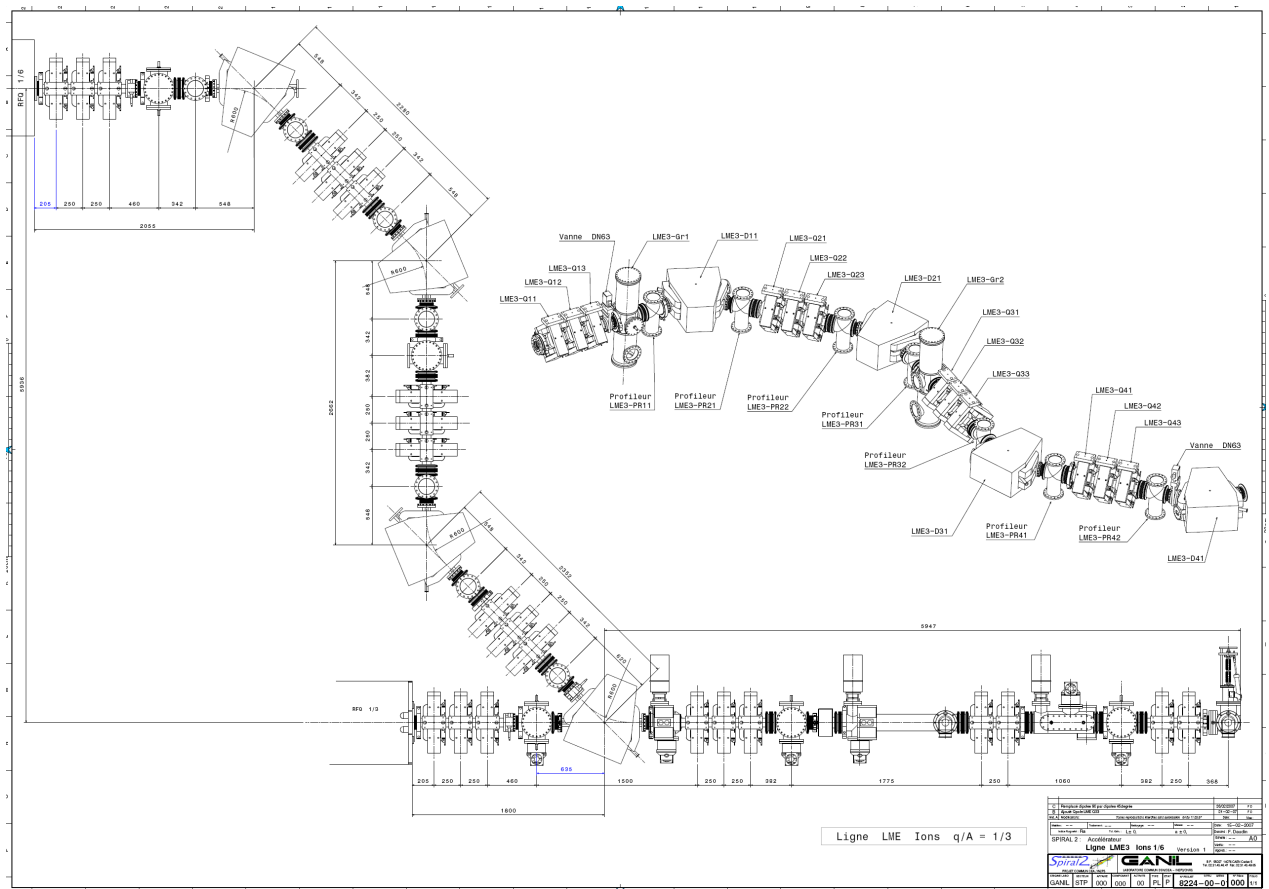


Figure 27 : plan général de la ligne d'ions $q/A=1/6$.

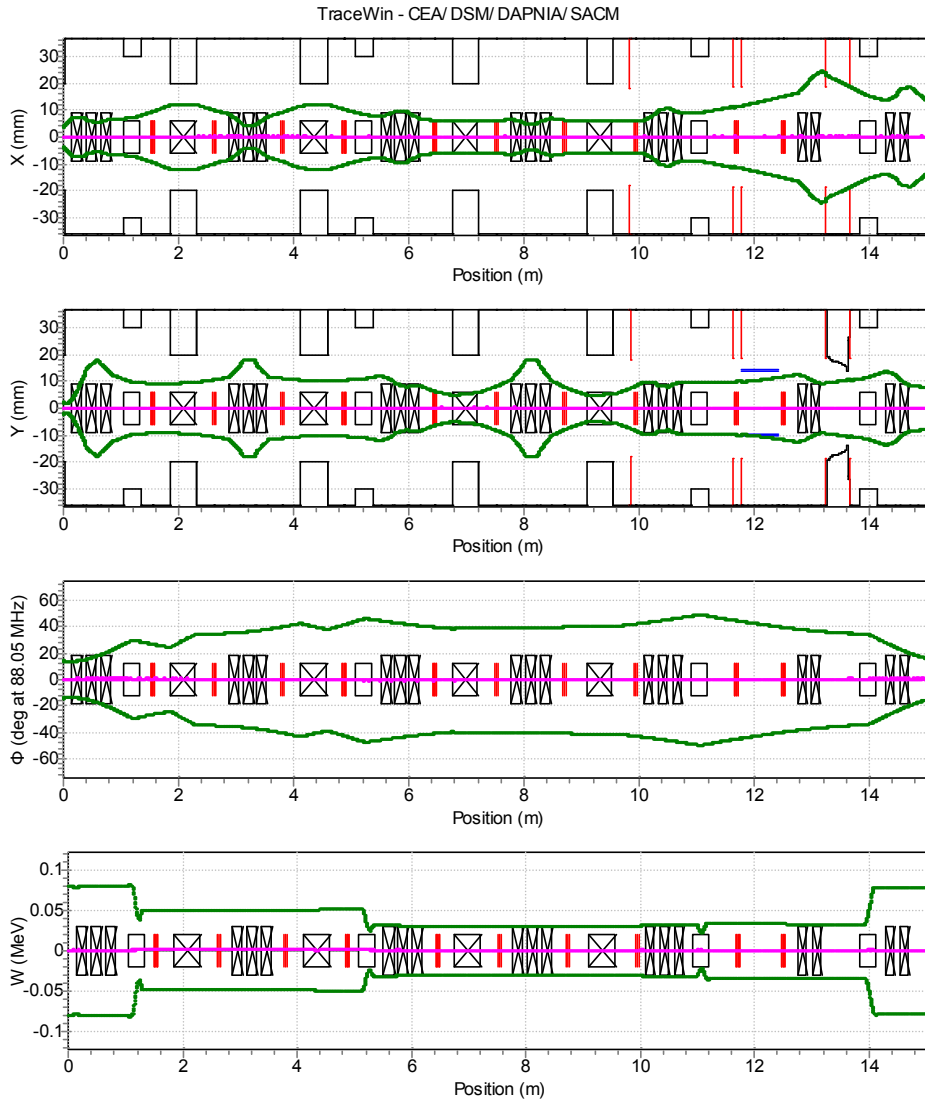


Figure 28 : Envelopes à 3 rms issue d'un calcul multiparticulaire du faisceau d'ions $q/A=1/6$ à 1 mA

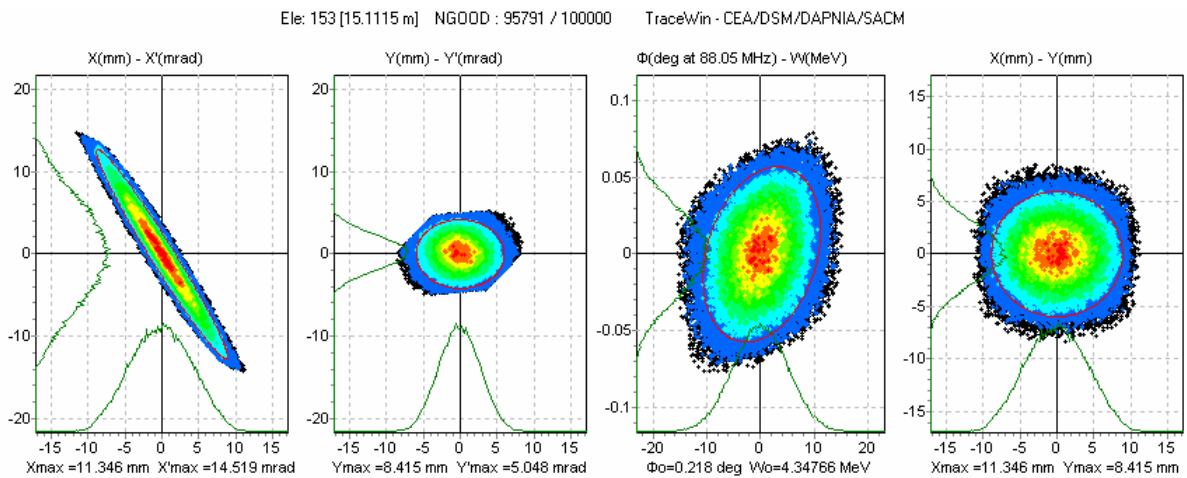


Figure 29 : Distribution du faisceau d'ions 1/6 à 1 mA à la sortie de la LME

→ Optique nominale à 150 μ A

Le comportement du faisceau est sensiblement le même qu'à 1 mA. Les réglages des différents éléments sont similaires et sont reportés dans les annexes.

3.7 Fonctionnement en mode isolateur de paquet

En l'absence de définition arrêtée de l'encombrement de l'isolateur de paquet [10] ainsi que du bloc d'arrêt associé, deux emplacements ont été réservés afin de consolider la LME, les plus long possibles au regard de la dynamique de faisceau, afin de recueillir ces équipements. Le doublet inséré entre ces deux composants doit aider à la séparation du faisceau dévié et du faisceau non dévié. De plus, il est prévu pour soulager les puissances RF dissipées dans le chopper de fonctionner en mode « inversé », c'est-à-dire que l'application des tensions sur les plaques du chopper permet de transmettre le faisceau, tandis que leur mise à zéro dévie le faisceau. Cela sera rendu possible par l'addition d'un déviateur magnétique placé autour des plaques du chopper appliquant au faisceau un champ dipolaire permanent. (voir Figure 30). Pour optimiser l'écartement entre les deux plaques l'ensemble est décalé de 2 mm vers le haut de manière à éviter que le faisceau dévié ne frappe la plaque supérieure. L'écartement est fixé à 24 mm.

Les optiques présentées

Figure 31 représentent l'exemple de la déviation du faisceau deuton 5 mA vers un bloc d'arrêt prévu de manière à répartir de manière la plus uniforme possible la puissance du faisceau. Le bloc d'arrêt constitué de 2 plaques, devra être ajustable en hauteur compte tenu des différentes espèces. L'écartement entre les plaques est le résultat d'un compromis entre les pertes du faisceau transmis et la proportion du faisceau intercepté pour une tension chopper donnée. Pour les protons, ± 600 V donne une transmission inférieure à 1 particule sur 1000. L'angle appliqué au faisceau est de 11 mrad. Aucune perte n'est observée sur les plaques du chopper. 6% du faisceau de protons non dévié est intercepté par le bloc d'arrêt. Le dipôle ou steerer à placer autour du chopper devra avoir une intégrale de champ de 0.0028 T.m pour compenser la déviation électrostatique du chopper. Le Tableau 3 indique pour les différentes espèces les tensions et champs dipolaires nécessaires. Ce concepte devront être validé par des simulations utilisant des cartes de champ du chopper et du dipole.

La Figure 32 représente la proportion du faisceau transmis en fonction de la tension appliquée sur une plaque du chopper, l'autre plaque étant portée à un potentiel égal et opposé. Les ions lourds sont dimensionnants pour la tension maximale, alors que les deutons ou les protons fixent l'espacement minimum entre les plaques évitant au maximum les pertes faisceau.

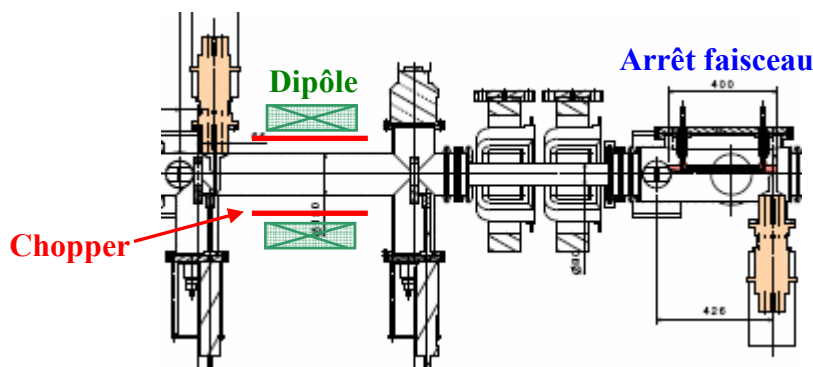


Figure 30 : Section chopper de la ligne LME.

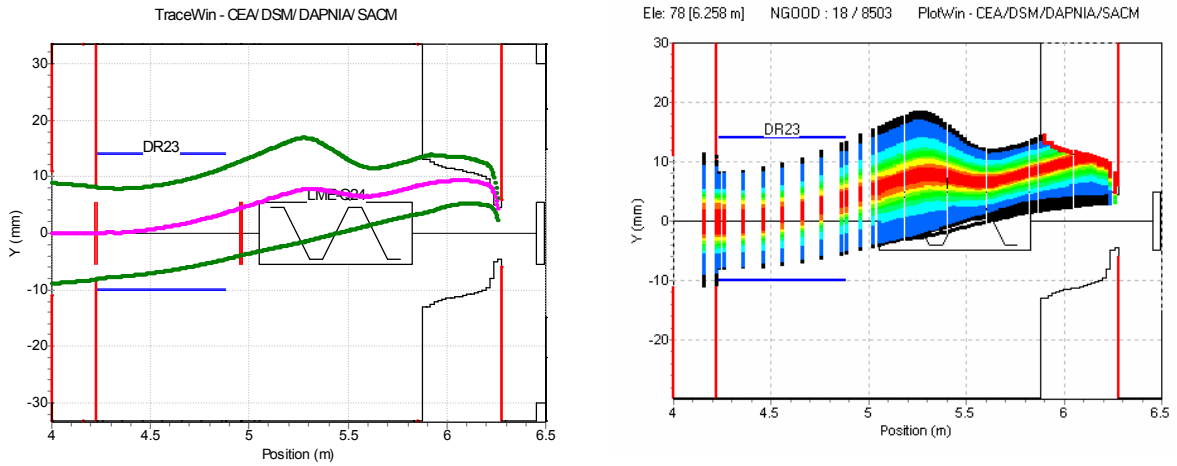


Figure 31 : Optique (enveloppe à gauche et multiparticulaire à droite) pour les deutons 5 mA déviés.

Type de faisceau	Tension chopper	Intégrale de champ dipôle
Proton	± 400 V	0.0020 T.m
Deuton	± 600 V	0.0028 T.m
Ions $q/A=1/3$	± 1000 V	0.0049 T.m
Ions $q/A=1/6$	± 1500 V	0.0074 T.m

Tableau 3 : Paramètres du chopper pour une transmission inférieure à 1 pour 1000 particules.

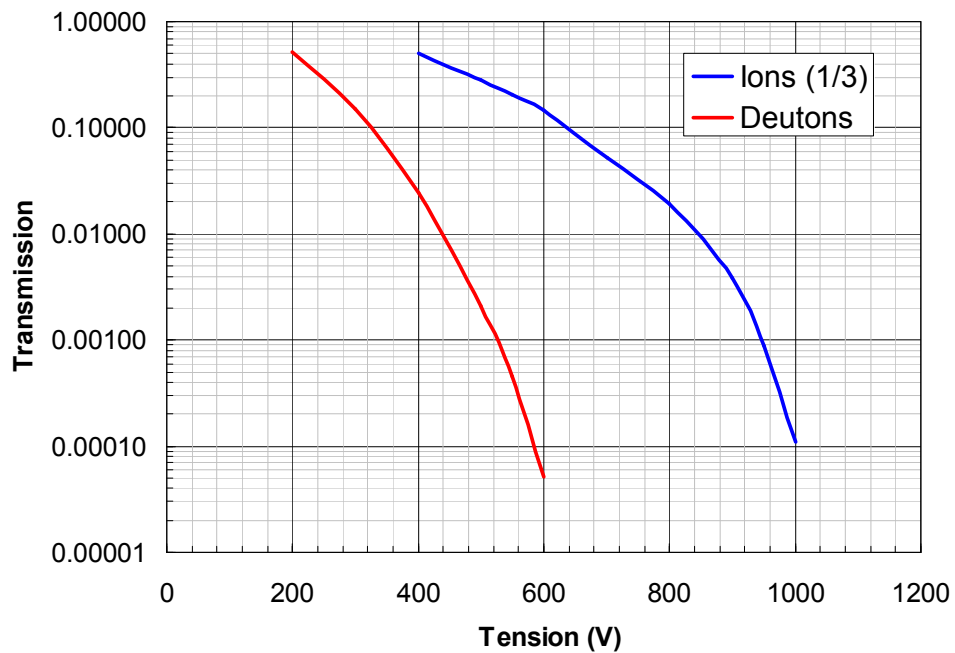


Figure 32 : Proportion du faisceau transmis en fonction de la tension appliquée au chopper.

3.8 Le Banc de Tests Intermédiaires (B.T.I.) - Optiques préliminaires pour le B.T.I.

→ *Fonction du Banc de Test Intermédiaires*

Le Banc de Tests Intermédiaires (B.T.I.) a pour objectifs principaux:

- la caractérisation aussi complète que possible du faisceau accéléré par le RFQ : le BTI sera installé dans la position appelée « position 1 » après le premier regroupeur de la LME,
- la caractérisation aussi complète que possible du faisceau à l'entrée du linac : le BTI sera installé dans la position appelée « position 2 » après la cage de Faraday en fin de la LME.
- la validation du fonctionnement de diagnostics pouvant être montés dans le LINAC : profileurs transverses et mesure de longueur de paquets,
- la mise au point de diagnostics de faisceau basés sur l'étude de la lumière émise par fluorescence lors du passage du faisceau.

Le B.T.I. sera équipé d'un bloc d'arrêt du faisceau capable de dissiper la puissance nominale du faisceau en fonctionnement continu en deutons: 7.5 kW.

→ *Description*

La consolidation du B.T.I. fait naturellement suite à celle de la L.M.E. et n'est pas encore totalement terminée. Son schéma de principe est illustré Figure 23. Il se compose d'un tube à vide (diamètre 80mm identique à celui de la L.M.E.), de longueur environ 2.5m (distance vanne d'isolation – entrée bloc d'arrêt faisceau) et le long duquel plusieurs diagnostics sont positionnés. On trouve dans l'ordre :

- un bloc B.P.M. identique à celui du LINAC mesurant la position du centre de gravité du faisceau,
- une électrode P.U. de mesure de phase du faisceau assurant également la fonction de première électrode de mesure d'énergie du faisceau par temps de vol,
- un transformateur de courant rapide de type « FCT » pour la mesure de longueur de paquet,
- une boîte de diagnostics comprenant:
 - un émittancemètre horizontal et un émittancemètre vertical de type scanner,
 - une cage de Faraday rapide et un moniteur à ionisation du gaz résiduel. Ces deux diagnostics permettent la mesure de longueur de paquet et leur réponse au passage du faisceau pourra être comparée séquentiellement au même azimut,
- un profileur à émission secondaire (harpes de 47 fils horizontaux et 47 fils verticaux) et un profileur à ionisation du gaz résiduel fourniront séquentiellement au même azimut les profils transverses du faisceau. Le pompage cryogénique du B.T.I. sera installé sous ces profileurs,
- des hublots au travers desquels la lumière émise par fluorescence lors du passage du faisceau (ionisation du gaz résiduel par le faisceau) pourra être détectée par une ou plusieurs caméras C.C.D. et analysée. Le dispositif de pompage turbo moléculaire du BTI sera également situé à cet endroit,
- un bloc B.P.M. mesurant la position du centre de gravité du faisceau,
- une deuxième électrode P.U. de mesure de phase et d'énergie du faisceau par temps de vol,
- un transformateur de type D.C.C.T pour la mesure du courant moyen du faisceau,
- un bloc d'arrêt supportant une puissance minimum de 7,5 kW en régime de fonctionnement continu.

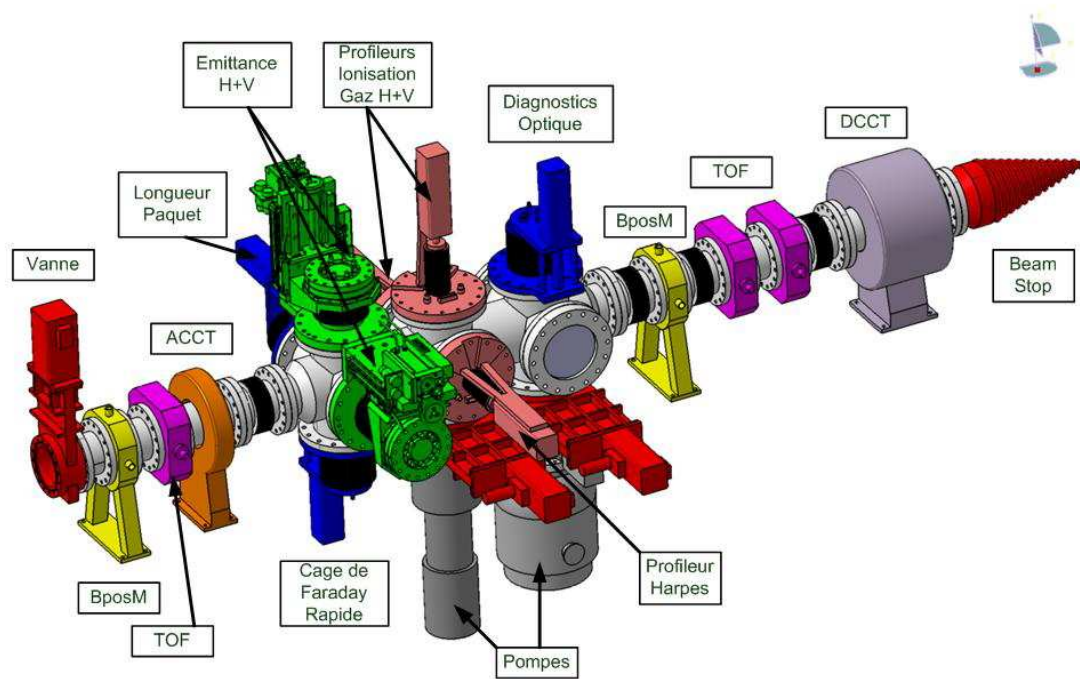


Figure 33 : Répartition des diagnostics le long du B.T.I

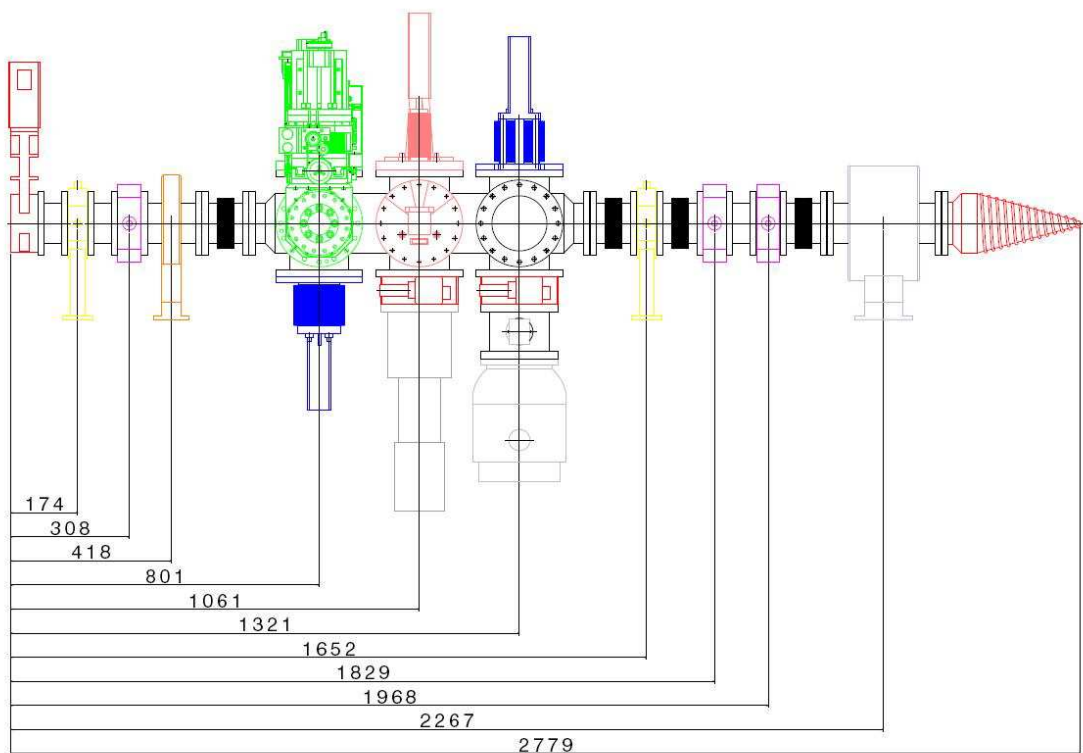


Figure 34 : Encombrement en mm des différents éléments.

→ *Optiques du faisceau en position 1 du Banc de Tests Intermédiaires*

Mesures effectuées

Les simulations ont été effectuées pour des faisceaux de deutons de 5 mA. Plusieurs optiques ont été définies permettant d'utiliser le B.T.I. dans les cas suivants :

- *Mesure de l'énergie du faisceau par temps de vol*

Diagnosics utilisés : Système de deux électrodes P.U.

La résolution visée est inférieure à 0,5 %. Dans ce cas une optique permettant d'obtenir une extension en phase identique ($\pm 40^\circ$) au niveau des deux électrodes P.U. de mesure peut être obtenue pour des faisceaux quasiment « ronds » dont les rayons (enveloppe à 3σ) peuvent être ajustés de $\pm 15\text{mm}$ à $\pm 25\text{mm}$ au niveau des profileurs. Le rayon du faisceau au bloc d'arrêt varie dans ces conditions de $\pm 25\text{ mm}$ à $\pm 40\text{ mm}$.

- *Mesure de l'extension en phase du faisceau. Mesure de l'émittance longitudinale.*

Diagnosics utilisés : F.C.T., moniteur à ionisation du gaz résiduel, cage de Faraday rapide

La méthode de mesure consiste à faire varier l'extension en phase du faisceau en faisant varier la tension du premier groupeur de la L.M.E. Un waist ($\pm 15^\circ$) est obtenu au niveau du FCT pour une tension de + 110 kV (+ 140 kV sont alors nécessaires dans les mêmes conditions pour les ions $q/A = 1/3$). Il a donc été vérifié que l'on pouvait déplacer un waist d'extension en phase de part et d'autre de la cage de Faraday et/ou du moniteur à ionisation du gaz résiduel. Dans ces conditions le rayon du faisceau au bloc d'arrêt reste pratiquement constant à $\pm 25\text{ mm}$.

- *Mesure des profils transverses*

Diagnosics utilisés : Profileur à émission secondaire et profileur à ionisation du gaz résiduel.

Le but est de comparer dans des conditions de faisceau les plus variées possibles la réponse du profileur à émission secondaire (diagnostic interceptif du faisceau) et celle du moniteur à ionisation du gaz résiduel (diagnostic non interceptif du faisceau). Les optiques étudiées permettent de réaliser au niveau de ces profileurs :

- un faisceau « rond » de rayon $\pm 10\text{ mm}$,
- un faisceau « rond » de rayon $\pm 25\text{ mm}$,
- un faisceau dissymétrique de rayons $\pm 8\text{ mm}$ en horizontal et $\pm 30\text{ mm}$ en vertical,
- un faisceau dissymétrique de rayons $\pm 30\text{ mm}$ en horizontal et $\pm 8\text{ mm}$ en vertical.

Les dimensions du faisceau peuvent être sensiblement maintenues en dessous de $\pm 40\text{ mm}$ sur le bloc d'arrêt pour les faisceaux ronds. Dans le cas des faisceaux dissymétriques ces dimensions peuvent excéder légèrement $\pm 40\text{ mm}$ et il faudra se limiter à une dissymétrie moins accentuée pour limiter le rayon d'entrée du bloc d'arrêt.

Réglage des éléments magnétiques et du premier groupeur

Pour assurer ces optiques, le premier triplet et le premier groupeur de la L.M.E. ont été utilisés. La dynamique des réglages effectués nécessitent que:

- le champ magnétique nécessaire du premier quadrupôle excède parfois de 10% le champ maximum nominal,
- le champ magnétique nécessaire du deuxième quadrupôle ne dépasse jamais le champ maximum nominal,
- le champ magnétique maximum du troisième quadrupôle ne dépasse jamais le champ maximum nominal, mais sa polarité doit pouvoir être inversée,
- la tension maximum utilisée pour le groupeur est de 175 kV (cas des ions 1/3), mais atteindre 190 kV permettrait de rapprocher encore plus le waist d'extension en phase en amont.

Pertes de faisceau

Les optiques les plus défavorables en terme de pertes de faisceau le long du B.T.I. sont celles où l'on règle un faisceau le plus gros possible au niveau du bloc d'arrêt. La distribution des pertes dans le cas de cette optique, ne dépassant pas 0,5% de pertes dans la ligne, est représentée ci dessous.

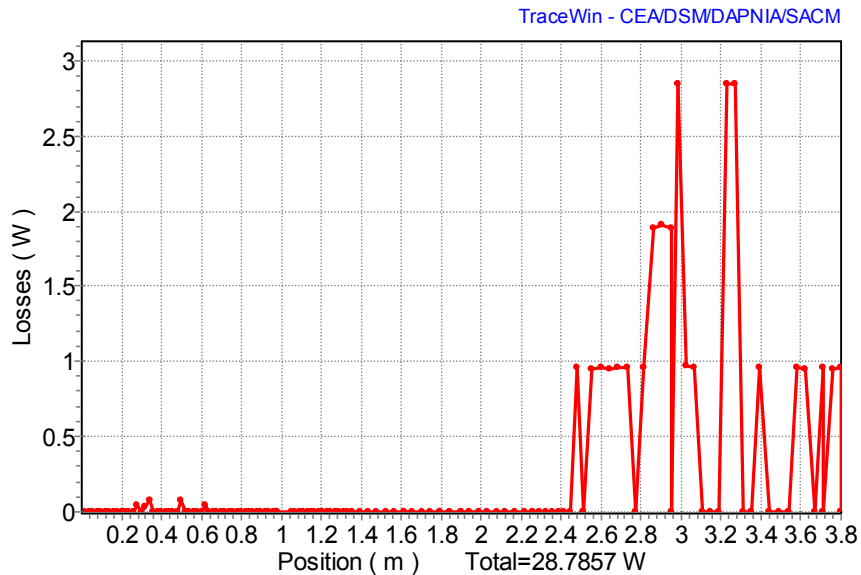


Figure 35 : Perte de faisceau le long du B.T.I.

Densité de puissance sur le bloc d'arrêt

Les optiques les plus défavorables en terme de densité de puissance sur le bloc d'arrêt sont au contraire celles où l'on utilise les faisceaux les plus petits. Une première estimation donne une densité de puissance de l'ordre de 500W/cm² au maximum sur le fond du bloc d'arrêt dans le cas d'une optique petit faisceau (cf figure : 0=entrée beam dump, 400 = fond bloc d'arrêt). Cette valeur correspond à l'optique du B.T.I. en position 1 et restera à préciser pour la conception du bloc d'arrêt. Les densités de puissance peuvent être légèrement plus élevées (non estimées à ce jour) en position 2 du B.T.I. car les faisceaux obtenus sont alors plus petits (car les derniers aimants sont plus proches).

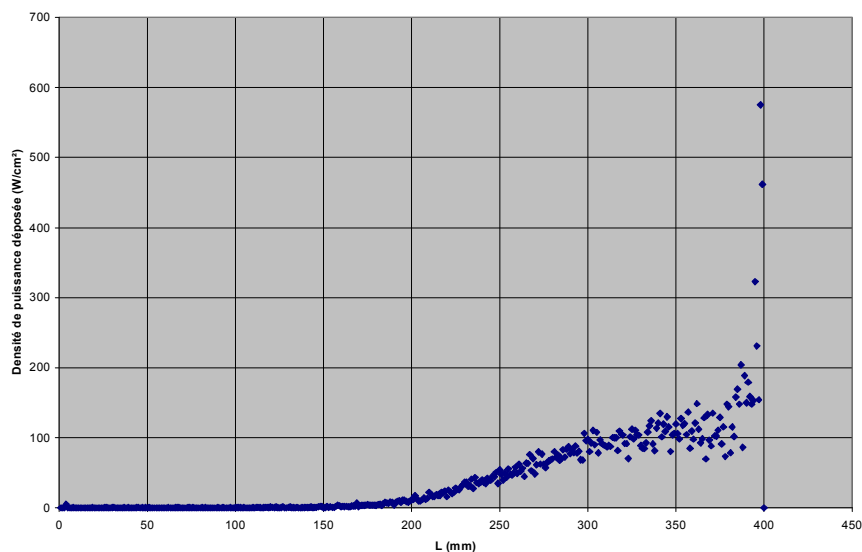


Figure 36 : densité de puissance sur le bloc d'arrêt du B.T.I.

→ *Optiques du faisceau en position 2 du Banc de Tests Intermédiaires*

En position 2 du B.T.I. les éléments de réglages utilisés sont le dernier groupeur ainsi que le dernier doublet de quadrupôles de la LME. Il a été vérifié que :

- les mesures définies et effectuées en position 1 du B.T.I. sont également possibles dans cette position. Les trois familles d'optique de faisceau correspondantes ont été simulées
- Les possibilités de dynamique de réglage du faisceau en transverse (variation des dimensions transverses) et en longitudinal (variation d'extension en phase) sont également préservées dans cette position.
- Le réglage de référence du faisceau de la L.M.E. pour le fonctionnement avec le LINAC (1^{ère} optique) peut être vérifié avec le B.T.I.

Réglage des éléments magnétiques et du deuxième groupeur

- Le champ magnétique nécessaire délivré par les deux quadrupôles peut dans certains cas dépasser de 30% le champ maximum nominal prévu pour le fonctionnement en deutons. Ceci reste compatible avec les caractéristiques des aimants qui sont prévus pour fonctionner avec un faisceau d'ions $q/A = 1/6$.
- La tension nécessaire délivrée par le groupeur atteint environ 80 à 90 kV

3.9 Tolérances sur les erreurs d'alignement et de champ

→ Principe d'une étude d'erreurs

La définition des tolérances sur l'alignement et l'amplitude des champs des éléments magnétiques de la ligne est basée sur une étude d'erreurs, réalisée avec TRACEWIN / PARTRAN, dont les principaux paramètres sont les suivants :

- 1000 simulations avec 10.000 macro-particules (étude des centroïdes).
- 341 simulations avec 1000.000 macro-particules (étude des pertes).
- schéma de corrections transverses (centroïde et « matching »).
- simulation « end-to-end » de la source à la fin de l'accélérateur.
- utilisation de cartes 3D pour les éléments les plus critiques.
- prise en compte des erreurs statiques et dynamiques des éléments.
- prise en compte de l'imprécision des diagnostics.

Deux types d'erreurs ont donc été considérés :

- les erreurs statiques : les effets de ces erreurs sont détectables et donc corrigeables ; par exemple, la mesure de la position du faisceau couplée avec des « steerers » peut compenser les désalignements du faisceau induit par les quadripôles ; la stratégie du schéma de correction est établie afin de corriger ce type d'erreur ;
- les erreurs dynamiques : ces erreurs ne sont pas corrigées ; elles sont dues aux bruits des alimentations ou aux vibrations issues de l'environnement ; heureusement, ces erreurs sont habituellement de très faible amplitude.

→ Rappel des résultats issus de l'APD en terme de tolérances

Cette étude a été menée durant l'APD [4], et a montré que les pertes dans les différents éléments de la ligne moyenne-énergie n'augmentaient pas de manière significative avec les amplitudes des différentes erreurs. Avec un niveau de perte moyen par élément inférieur au Watt, on se situait largement en dessous des limites fixées. Il faut noter que cette étude ne concernait que la ligne deutons supposée être la plus critique.

Cette étude a permis de fixer des tolérances concernant les éléments magnétiques ainsi que des précisions demandées aux différents diagnostics. Ces tolérances sont reportées dans les Tableau 4 et Tableau 5 ci-dessous. Pour une erreur d'amplitude A , la valeur a une probabilité uniforme d'être entre $-A$ et $+A$. La valeur rms est donc de $A/\sqrt{3}$. Si la distribution des erreurs n'est pas uniforme, l'ingénieur mécanique devra appliquer le principe d'équivalence rms. Les rotations autour des axes (OX, OY, OZ) sont calculées avec les formules ci-dessous :

$$\theta_{x,y} = \frac{2d}{L} \text{ et } \theta_z = \frac{d}{R}, \text{ avec } d \text{ le déplacement, } L \text{ la longueur de l'élément et } R \text{ le rayon d'ouverture de l'élément.}$$

Type d'erreur	Statique	Dynamique
Gradient (%)	± 1	± 0.1
Déplacement (mm)	± 0.1	± 0.01
Rotation (OX, OY) (deg.)	± $\theta_{x,y}$	± 0.1 × $\theta_{x,y}$
Rotation (OZ) (deg.)	± θ_z	± 0.1 × θ_z

Tableau 4 : Tolérances sur les amplitudes des erreurs pour les éléments magnétiques durant l'PAD.

Élément	Erreur	Valeur
BPM	Précision de la position (mm)	± 0.1
Profileur	Précision de la taille (mm)	± 0.1
Mesure d'émission	Précision de la taille (%)	± 10
	Précision de la divergence (%)	± 10

Tableau 5 : Tolérances sur les amplitudes des erreurs pour les diagnostics durant l'APD.

→ **Conséquences de la réactualisation des lignes**

Les modifications apportées dans les lignes basse-énergie ne sont pas de nature à remettre en cause les tolérances obtenues lors de l'étude APD. Bien que les ouvertures aient été revues à la baisse le nouveau schéma de correction mis en place a permis de réduire significativement l'amplitude des excursions du centre de gravité du faisceau. Quoiqu'il en soit, les pertes ne sont pas le paramètre relevant pour la ligne moyenne énergie, mais plutôt les grossissements d'émittance pouvant provoquer des pertes supplémentaires à plus haute énergie dans le linac par exemple. Concernant cet aspect, les modifications effectuées sur les lignes n'ont pas de conséquences significatives sur les émittances des faisceaux ; le design actuel a même été enrichi de plusieurs jeux de fentes verticale et horizontale permettant de contrôler efficacement la formation de halo.

Pour la ligne LME consolidée, un certain nombre de modifications ont été apportées aux tolérances demandées durant l'APD. Le Tableau 6 reprend l'ensemble des tolérances finalement demandées à la LME consolidée. Pour les profileurs le budget tolérance de 0.25 mm englobe la tolérance d'alignement à laquelle est ajoutée la précision de l'estimation du centre du faisceau.

Type d'erreur	Statique	Dynamique
Gradient quadripôle	± 1 %	± 0.1 %
Champ regroupeur	± 1 %	± 0.1 %
Phase synchrone regroupeur	± 1 deg.	± 0.1 deg.
Déplacement quadripôle & regroupeur	± 0.1 mm	± 0.01 mm
Rotation (OX, OY) quadripôle & regroupeur	± 0.1 deg.	± 0.01 deg.
Rotation (OZ) quadripôle & regroupeur	± 0.1 deg.	± 0.01 deg.
Précision de la taille mesurée sur profileur	± 0.25 mm	

Tableau 6 : Tolérances sur les amplitudes des erreurs pour les éléments et diagnostics de la LME finale.

→ « **Steerers** »

Les forces des steerers nécessaires sont estimées à partir d'étude statistiques de transport en enveloppe incluant les erreurs définies dans Tableau 6. Dans ce type d'études, nous nous intéressons au comportement du centroïde du faisceau, de sorte qu'un calcul en transport d'enveloppes est suffisant. De plus les cartes de champ des quadripôles sont remplacées par des quadripôles « hard-edges », ce qui simplifie le traitement.

Cette étude basée sur 100 simulations permet également de vérifier que le schéma de correction utilisé permet de contrôler correctement le centre de gravité du faisceau (cf. Figure 37 et Figure 38). La valeur rms de celui-ci reste pour toutes les espèces et sur l'ensemble de la ligne inférieure au millimètre.

Champ des steerers	Protons	Deutons	q/A=1/3	q/A=1/6
rms	$7.9 \cdot 10^{-5}$ T.m	$2.1 \cdot 10^{-4}$ T.m	$3.3 \cdot 10^{-4}$ T.m	$7.5 \cdot 10^{-4}$ T.m
3 x rms	$2.4 \cdot 10^{-4}$ T.m	$6.3 \cdot 10^{-4}$ T.m	$9.9 \cdot 10^{-4}$ T.m	$2.3 \cdot 10^{-3}$ T.m
Amplitude max.	$1.9 \cdot 10^{-4}$ T.m	$5.2 \cdot 10^{-4}$ T.m	$7.5 \cdot 10^{-4}$ T.m	$2.8 \cdot 10^{-3}$ T.m

Tableau 7 : Bilan des champs requis pour les « steerers » (100 simulations).

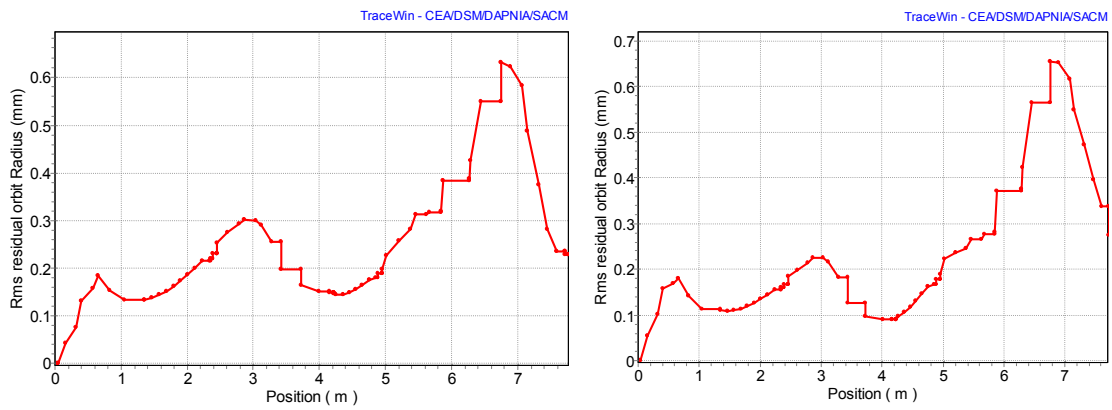


Figure 37 : Position rms du centroïde pour les deutons (gauche) et les protons (droite).

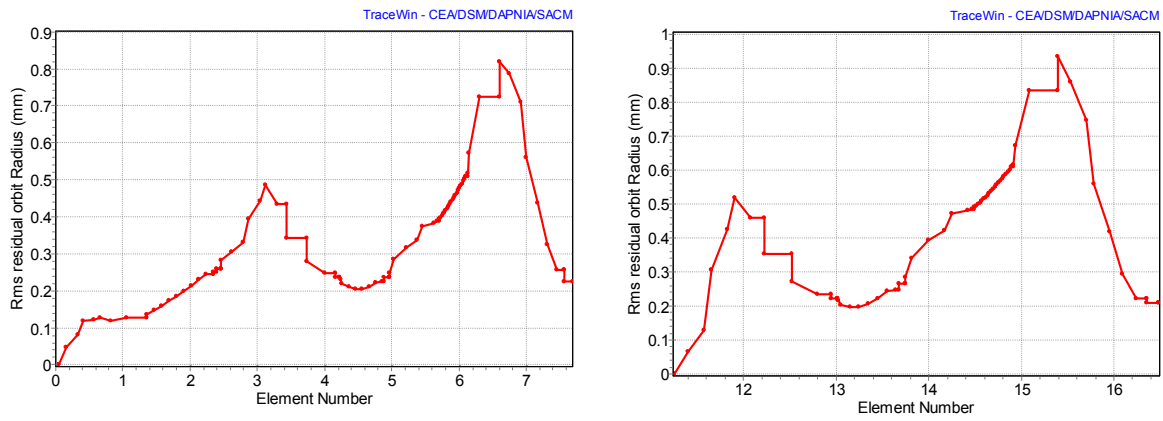


Figure 38 : Position rms du centroïde pour les $q/A=1/3$ (gauche) et les ions $q/A=1/6$ (droite).

4 RECOMMANDATION DES EXPERTS DE LA REVUE TECHNIQUE

A partir de la version précédente de ce document (V1) une revue technique composée d'experts a statué sur le design de la ligne LME. L'ensemble des recommandations est reportée ci-dessous. Les réponses ou les actions du groupe optique sont en gras italique.

4.1 Membres du comité de revue

Pierre-Emmanuel BERNAUDIN (CEA/DAPNIA), Alessandra LOMBARDI (CERN), Nicolas PICHOFF (CEA/DIF).

4.2 Introduction

Le Comité de Revue a pour tâche d'émettre des recommandations concernant la conception de la ligne moyenne énergie (LME), comprise entre le RFQ et le linac supraconducteur, du projet SPIRAL 2. En particulier, il est demandé au Comité de s'assurer que les fonctions attribuées à cette ligne sont correctement remplies, que sa longueur est correctement optimisée et que les objets électromagnétiques compris dans cette ligne (quadripôles, groupeurs, isolateur de paquets) sont réalisables et leur coût est optimisé.

Pour ce faire, il a été remis au Comité un document de synthèse préliminairement à la revue, et chaque élément électromagnétique ainsi que la dynamique faisceau de la ligne ont fait l'objet de présentations techniques orales ouvertes à la discussion.

De manière générale, le Comité tient à souligner la très grande qualité du travail et des présentations effectués par les différents intervenants.

4.3 Dynamique faisceau

Les fonctions assignées à la LME sont les suivantes :

- recueillir le faisceau groupé en sortie du RFQ et le transmettre en entrée du LINAC dans des conditions optimales,
- éliminer le halo transverse,
- permettre la connexion ultérieure d'une LME pour des ions $q/A=1/6$,
- permettre l'installation d'un isolateur de paquet.

Les études de dynamique faisceau sont très exhaustives et il semble au Comité que ces fonctions sont remplies de manière satisfaisante et que le nombre et la position des aimants et des groupeurs est en adéquation avec les fonctions de la LME.

La longueur de la ligne a été correctement optimisée en limitant les espaces de glissement au minimum et en choisissant un design compact des éléments actifs (quadripôles, bunchers).

En standardisant les quadripôles et le buncher les coûts ont été limités.

Les solutions techniques présentées pour chaque composant sont solides. Seul le choix de l'isolateur de paquets (optionnel) n'a pas été défini aujourd'hui.

Des commentaires à propos de chaque composant suivent.

4.4 Isolateur de paquets (chopper)

Il apparaît que l'isolateur de paquets est le goulot d'étranglement géométrique de la ligne, l'écartement des plaques n'étant que de 24 mm et la zone active horizontale étant 27 mm. Par ailleurs, il semble que les études relatives à cet élément, apparemment optionnel à ce stade du projet, sont les moins avancées.

Le choix d'une option où l'isolateur de paquet sélectionne les paquets au lieu de les éliminer grâce à la superposition d'un champ dipolaire (dans le but de réduire la dissipation de puissance dans les déviateurs électrostatiques) va à l'encontre des choix retenus pour les machines pulsées existantes ou en construction (SNS, SPL, RAL).

Les effets de cet isolateur de paquets sur la dynamique du faisceau n'ont pas encore été étudiés, en particulier il serait important de répondre aux questions suivantes :

Quelle est l'influence de la superposition forcément imparfaite du champ dipolaire et de celui de l'isolateur sur la dynamique du faisceau transmis et de la non-uniformité transverse de la déviation ?

Quelle est l'influence sur la dynamique faisceau de la non linéarité longitudinale du champ de l'isolateur de paquets (le plateau de champ se déforme lors de sa propagation de long de l'isolateur) ?

Il convient de répondre à ces questions par des calculs de dynamique faisceau appropriés s'appuyant sur des cartes de champ du dipôle et de l'isolateur.

D'autres questions restent ouvertes, auxquelles il conviendra de répondre pour valider le choix de cet isolateur : quelle est la reproductibilité des pulses ? Quelle est son efficacité ? Quel est le taux de survie des particules dans les paquets éliminés, et qu'advient-il des particules survivantes ?

Il semble également au Comité que le schéma temporel proposé pour les pulses de l'isolateur de paquets ne présente pas de marge suffisante (écart entre deux paquets inférieur à 12 ns, pour un temps de montée et de descente de 7 ns, et un plateau de 5 ns). Un élargissement temporel du plateau au détriment des temps de montée et de descente est recommandé.

Pour toutes ces raisons, il semble au Comité que le choix d'un isolateur à champ nul présente moins de risque. Il est en conséquence recommandé de poursuivre les études portant sur l'isolateur de paquets de type RAL ou d'adopter une solution type SPL avec l'aide du hacheur de la ligne basse énergie (LBE) pour limiter la puissance requise.

La présentation de l'isolateur de paquets comme un élément de sécurité ne semble pas souhaitable; la fonction de protection des équipements est plus convenable mais ne doit pas être un critère majeur dans la sélection du type d'isolateur de paquets.

L'influence sur la dynamique de faisceau de la désorption induite par les pertes faisceau sur l'arrêt faisceau est un phénomène qu'il conviendrait d'analyser.

Enfin, de manière générale, du fait de la forte influence que peut avoir cet élément sur la dynamique faisceau, il semble nécessaire de lever au plus vite son caractère optionnel.

Il est clair que la solution d'un isolateur de paquet à champ nul demandera un certain nombre d'études supplémentaires afin de valider ce choix. Pour des raisons de planning son encombrement quel qu'il soit est figé. Aux concepteurs de cette équipement de s'adapter à l'espace maintenant disponible qui ne pourra pas être augmenté. Pour le moment, ces études de dynamique de faisceau sont suspendues jusqu'à ce que le projet prenne une décision définitive concernant cette option.

4.5 Quadripôles

Il ressort clairement que la forte saturation de quelques uns des quadripôles (2 ou 3 sur 10) dans certaines configurations de faisceau ($q/A=1/3$ et surtout $q/A=1/6$) limite les marges de sécurité en termes de gradient.

Des études supplémentaires, en particulier, de désadaptation du faisceau d'entrée d'ions $q/A=1/3$ montrent que les quadripôles présente une marge suffisante. La seule difficulté restante concerne un quadripôle présentant un champ proche du maximum pour le transport des ions $q/A=1/6$. Compte tenu de l'incertitude concernant les caractéristiques des $q/A=1/6$, le groupe optique considère que ce point ne présente pas de risque significatif et pourrait être ultérieurement corrigé par le remplacement du quadripôle en question.

Par ailleurs, les déviateurs (steerers) inclus dans ces quadripôles fournissent un champ à la limite de ce que demande la dynamique faisceau. Comme les calculs de composante dipolaire ont été effectués séparément de ceux de la composante quadripolaire, il est nécessaire de vérifier l'influence de la saturation sur la composante dipolaire par un calcul superposant les deux excitations.

Comme pour le champ des quadripôles, ce sont les ions $q/A=1/6$ qui demande le plus de champ aux déviateurs. Mais là, c'est pour un cas particulier d'une étude statistique. On peut considérer, que ce cas est peu probable et qu'au pire des cas, il sera toujours possible de modifier les positions d'un ou plusieurs quadripôles pour corriger le problème.

Par ailleurs, le Comité tient à insister sur l'importance relative de la composante hexapolaire des déviateurs; cet effet n'a pas été pris en compte par les calculs de dynamique faisceau.

Du fait de la forte saturation des quadripôles, le Comité recommande d'étudier les effets sur la dynamique faisceau d'un fonctionnement des quadripôles à champ réduit.

Ce type d'étude, compliqué à mettre en œuvre n'est pour le moment pas envisagé, bien que le groupe optique soit conscient du problème.

Afin de récupérer un peu de marge sur les gradients, le Comité recommande d'utiliser une partie de la marge existant sur les bords des quadripôles (3 à 4 cm), soit pour allonger les quadripôles, soit pour réduire l'influence des quadripôles

sur leur voisin immédiat par l'adjonction de plaques de garde. Il semble également exister une légère marge sur le diamètre de gorge (1 ou 2 mm au diamètre ?).

Enfin, si nécessaire, il semble au Comité que l'utilisation de deux familles de quadripôles ne se différenciant que par leur longueur peut être une solution dont l'impact sur les coûts devrait rester assez minime.

Ces deux dernières propositions, compte tenu des remarques précédentes, ne sont pas retenues.

4.6 *Groupeurs (bunchers)*

Les groupeurs ne présentent pas de problème technologique majeur. Le champ Kilpatrick est relativement bas et la charge thermique peut être évacuée dans le cadre des deux solutions technologiques présentées (inox cuivré et cuivre massif).

La solution en acier inoxydable nécessite une optimisation thermique plus poussée compte tenu des échauffements présentés. Les études thermiques encore nécessaires devraient être accompagnées (également pour la solution en cuivre) de calculs de dilatation afin d'évaluer l'influence des déformations sur le champ « accélérateur », particulièrement sur le steering. De même, il serait intéressant d'étudier les vibrations éventuelles des stems.

Le Comité souhaite souligner l'apparent manque de réserve de puissance RF; en particulier, les codes de calcul tendent systématiquement à surestimer les facteurs de qualité de 10 à 30% par rapport aux cavités réelles.

Les études se poursuivent dans ce sens.

4.7 *Fentes (scrappers)*

La conception des fentes n'est pas encore définie mais il semble au Comité que la valeur de 150 W de charge faisceau par fente présente trop peu de marge de sécurité par rapport aux pertes attendues sur ces fentes, particulièrement au cours des phases de réglage préliminaire.

Comme pour l'isolateur de paquet, l'influence sur la dynamique de faisceau de la désorption induite par les pertes faisceau sur les fentes est un phénomène qu'il conviendrait d'analyser.

Des études sont en cours pour vérifier la possibilité d'augmenter la puissance de 150W à 300W. La désorption devra être évaluée.

4.8 *Remarques générales et conclusions*

Il semble intéressant au Comité d'évaluer l'influence du champ magnétique terrestre sur la dynamique du faisceau ainsi que de vérifier que la compensation de charge d'espace sera négligeable.

Des études montrent que ces 2 aspects sont effectivement négligeables.

Il semble au Comité que la LME répond aux fonctions qui lui sont assignées, dans une longueur aussi courte que raisonnablement possible, et au moyen d'éléments électromagnétiques dont la faisabilité n'est pas mise en doute. L'isolateur de paquets semble le point le plus critique de cette ligne à ce stade des études.

Le Comité tient à insister sur l'importance des études de diagnostic. En particulier, il convient de savoir le plus rapidement possible la précision des mesures que l'on peut attendre des différents diagnostics.

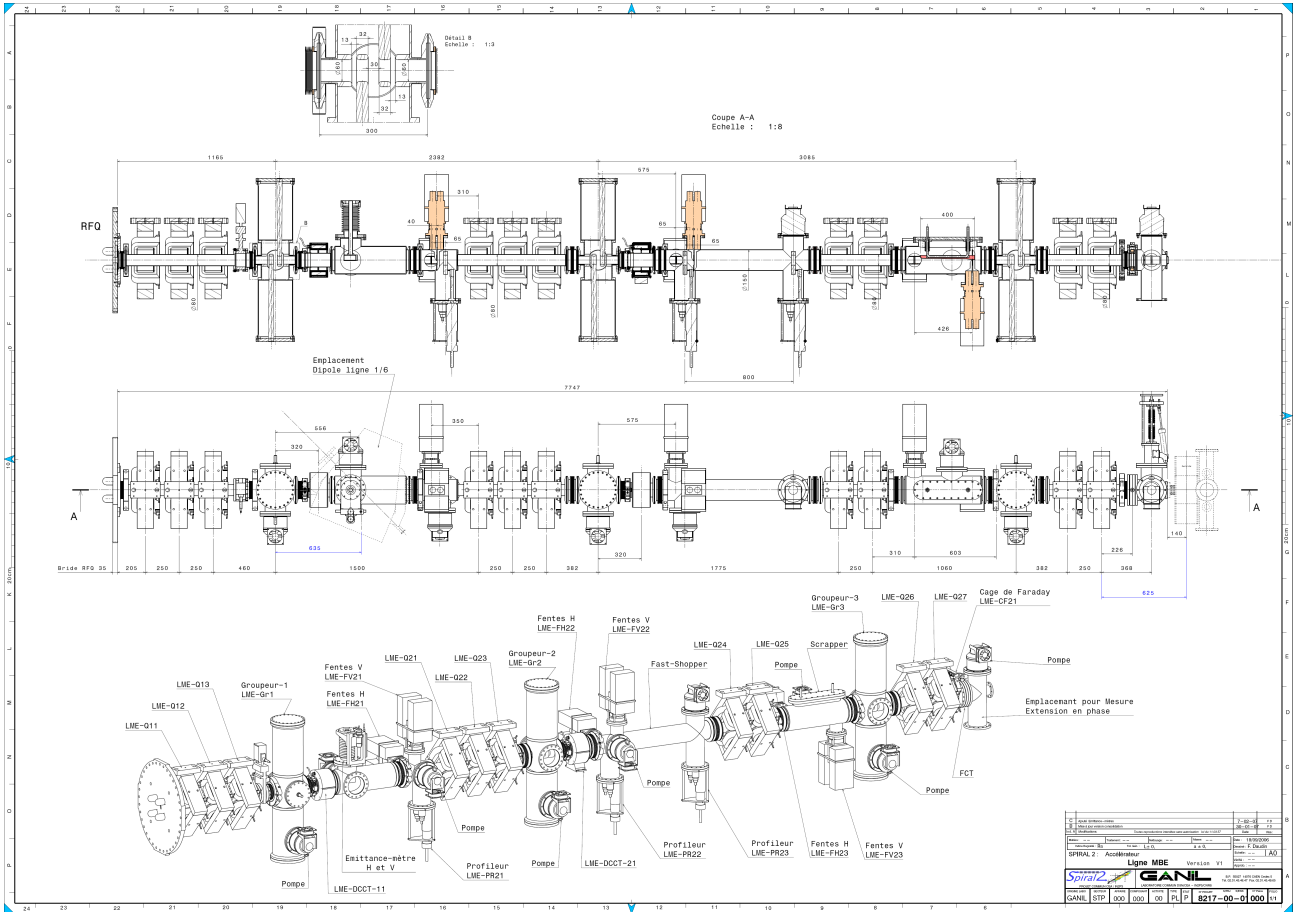
Enfin, la LME n'étant pas isolée du reste de la machine, sa consolidation complète ne pourra être achevée qu'à l'issue de la consolidation complète de la totalité de l'accélérateur.

Ce document v2 a été mis à jour (nouvelles optiques pour l'ensemble des cas) en tenant de la consolidation du linac.

5 CONCLUSION

La ligne LME a été conçue de manière à répondre à un cahier des charges très complexe : différentes espèces à différentes intensités pour des émittances variables, insertion de la ligne ions $q/A=1/6$, insertion d'un isolateur de paquets et de son bloc d'arrêt associé. Une attention toute particulière a donc été portée sur la simplicité de réglage et la réduction du nombre et de la variété des éléments. Ainsi tous les éléments de même nature sont identiques. D'autre part, afin de limiter au maximum les risques de perte faisceau dans le linac supraconducteur, un certain nombre de dispositifs de nettoyage du faisceau ont été placés le long de la LME. L'ensemble des simulations est réalisé à partir d'une distribution gaussienne en sortie de la source et traverse des éléments exclusivement représentés par des cartes de champ (excepté les dipôles de la LBE).

ANNEXE 1 - PLAN A0 DE LA LIGNE LME



ANNEXE 3 - PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT DE LA LME

L'Annexe 3 donne les principaux paramètres de fonctionnement de la ligne moyenne-énergie en ce qui concerne les éléments électro-magnétiques (champs, tensions, tailles faisceau...), et ce, pour les 8 optiques de référence considérées. Les grandeurs en gras représentent les valeurs maximums. On observe donc un champ maximum dans les quadripôles de **2.4 T** et une tension maximum dans les regroupes de **190 kV**. La taille maximum 3 rms est de ± 18.1 mm. Ces valeurs ont été utilisées pour élaborer les spécifications notifiées dans la « Liste des paramètres » de l'Annexe 2. Pour mémoire, les fichiers TRACEWIN associés sont également fournis.

Quadripôles (1)

	Longueur magnétique	Ouverture faisceau (Ø)	Proton 5mA	Proton 100 uA	Deuton 5 mA	Deuton 150 uA	q/A=1/3 1 mA	q/A=1/3 150 uA	q/A=1/6 1 mA	q/A=1/6 150 uA	Optiques B.T.I.	Steerer type
LME-Q11	166 mm	80 mm	0.6954 T	0.7057 T	1.4253 T	1.5083 T	2.1876 T	2.1331 T			TBD	By
LME-Q12	166 mm	80 mm	0.7721 T	0.7725 T	1.6343 T	1.2031 T	2.3118 T	2.1036 T			TBD	Bx
LME-Q13	166 mm	80 mm	0.4212 T	0.3369 T	0.8682 T	0.2689 T	0.9862 T	0.8877 T				
LME-Q21	166 mm	80 mm	0.2514 T	0.3227 T	0.6134 T	0.4097 T	0.9671 T	0.6398 T	1.7738 T	1.8766 T		Bx
LME-Q22	166 mm	80 mm	0.4997 T	0.3725 T	0.9921 T	0.5758 T	1.2675 T	1.1025 T	2.3970 T	2.3970 T		By
LME-Q23	166 mm	80 mm	0.3509 T	0.1279 T	0.5485 T	0.1665 T	0.5747 T	0.5781 T	1.2494 T	1.1384 T		Bx
LME-Q24	166 mm	80 mm	0.3400 T	0.2490 T	0.5954 T	0.5078 T	0.6143 T	0.6143 T	1.1696 T	1.1696 T	TBD	
LME-Q25	166 mm	80 mm	0.3400 T	0.2490 T	0.5977 T	0.5080 T	0.7139 T	0.7139 T	1.3600 T	1.3600 T	TBD	
LME-Q26	166 mm	80 mm	0.3581 T	0.3475 T	0.7506 T	0.4537 T	0.7481 T	0.9359 T	1.8254 T	1.6961 T	TBD	By
LME-Q27	166 mm	80 mm	0.3058 T	0.3375 T	0.6806 T	0.1898 T	0.4247 T	0.7970 T	1.7660 T	1.6277 T	TBD	Bx

Regroupeurs (2)

	Longueur	Ouverture faisceau (Ø)	Proton 5mA	Proton 100 uA	Deuton 5 mA	Deuton 150 uA	q/A=1/3 1 mA	q/A=1/3 150 uA	q/A=1/6 1 mA	q/A=1/6 150 uA	Optiques B.T.I.
LME-Gr1	300 mm	60 mm	49.69 kV	31.27 kV	62.56 kV	57.34 kV	93.81 kV	78.18 kV			190.0 kV
LME-Gr2	300 mm	60 mm	26.54 kV	12.82 kV	35.04 kV	11.77 kV	39.63 kV	22.35 kV	53.70 kV	64.71 kV	
LME-Gr3	300 mm	60 mm	35.57 kV	25.82 kV	61.84 kV	52.37 kV	80.69 kV	77.28 kV	115.73 kV	110.00 kV	

Profileurs (3)

	Plan	Proton 5mA	Proton 100 uA	Deuton 5 mA	Deuton 150 uA	q/A=1/3 1 mA	q/A=1/3 150 uA	q/A=1/6 1 mA	q/A=1/6 150 uA
LME-PR21	X	± 13.5 mm	± 13.5 mm	± 10.4 mm	± 13.3 mm	± 13.2 mm	± 13.2 mm	± 6.0 mm	± 5.9 mm
	Y	± 13.6 mm	± 8.4 mm	± 12.2 mm	± 13.5 mm	± 13.2 mm	± 13.2 mm	± 8.6 mm	± 8.2 mm
LME-PR22	X	± 9.5 mm	± 13.8 mm	± 8.9 mm	± 16.3 mm	± 17.6 mm	± 17.5 mm	± 9.3 mm	± 9.2 mm
	Y	± 9.8 mm	± 7.1 mm	± 8.9 mm	± 7.7 mm	± 7.7 mm	± 7.4 mm	± 8.4 mm	± 8.3 mm
LME-PR23	X	± 14.6 mm	± 11.8 mm	± 10.9 mm	± 14.8 mm	± 18.1 mm	± 17.2 mm	± 12.9 mm	± 12.7 mm
	Y	± 9.4 mm	± 6.5 mm	± 9.7 mm	± 7.2 mm	± 7.8 mm	± 7.4 mm	± 9.3 mm	± 9.2 mm

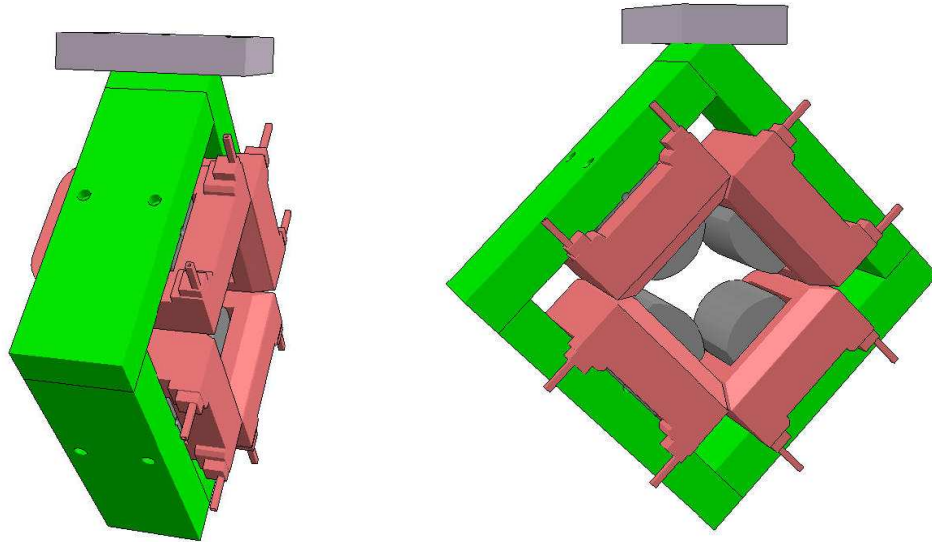
(1) Les champs correspondent à des intégrales de gradient.

(2) Les tensions correspondent à des intégrales de champ électrique.

(3) Les tailles des faisceaux sont données à 3 rms.

ANNEXE 4 - SPECIFICATIONS DES QUADRIPOLES DE LA LME

Maurice Duval



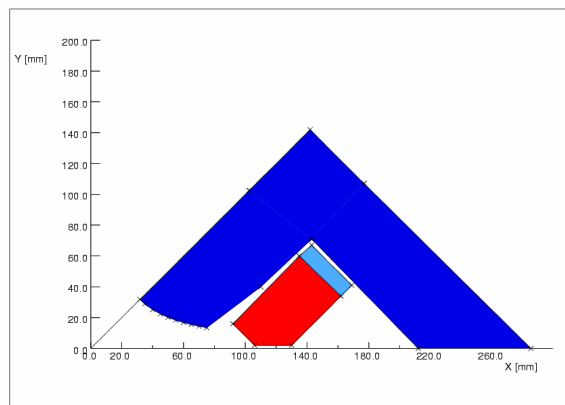
Maquette 'CATIA'

Caractéristiques requises :

- intégrale de gradient : 2.4 Tesla
- ouverture utile : diamètre 80mm
- entre-axe des quadripôles : 250 mm

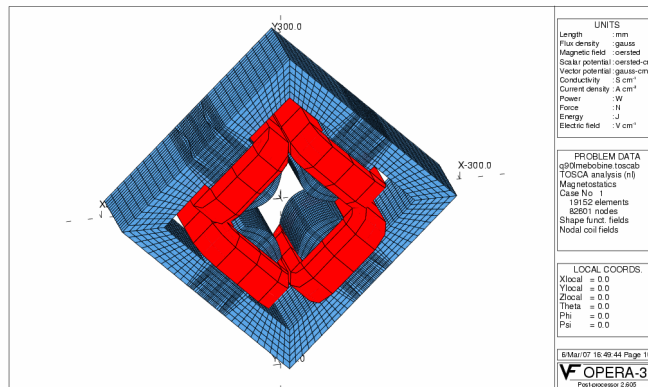
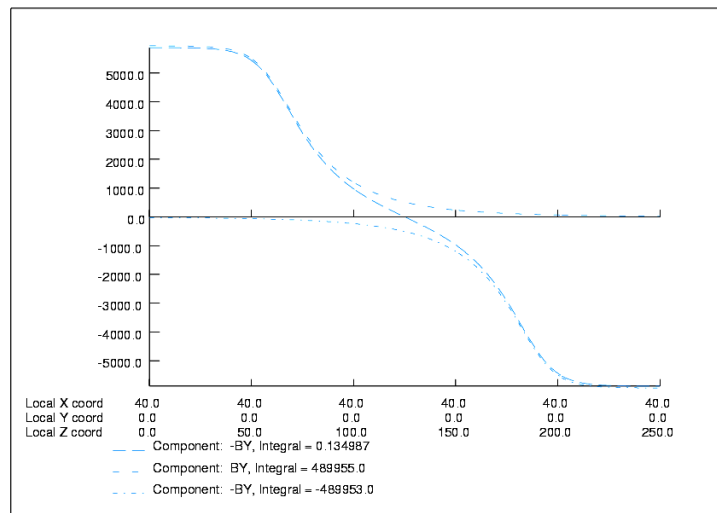
Aimant proposé :

- gradient max : $G = 15 \text{ T/m}$
- longueur magnétique : $L = 160 \text{ mm}$
- longueur de fer : $L = 120 \text{ mm}$
- diamètre de gorge : 90 mm
- sans plaques de garde



Profil polaire : hyperbole + tangente
 Pole avec chanfrein (évasé) mais bobine droite (+ simple)
 Bobine principale N=54 spires
 Bobine auxiliaire N= 44 spires
 Culasse épaisseur 50mm

CALCULS 3D

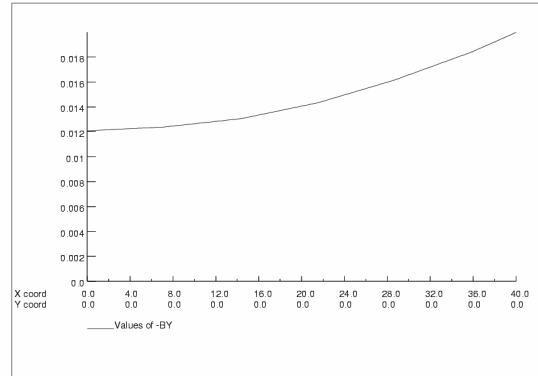
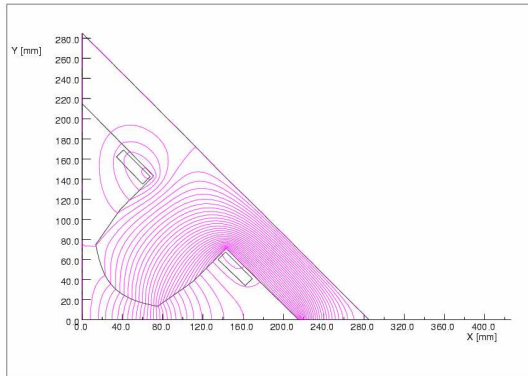


Les courbes ci-dessus représentent les champs de fuite des quadripôles, au rayon R=40mm, du centre du premier au centre du deuxième suivant l'axe faisceau :

- Quadripôle Q1 alimenté seul
- Quadripôle Q2 alimenté seul
- Q1 et Q2 alimentés en inverse.

Le chevauchement des champs de fuite a été pris en compte dans les simulations optique faisceau, en y incluant les cartes 3D Tosca.

COMPOSANTE DIPOLAIRE



La bobine dipolaire est constituée d'une double-galette située au dessus de la bobine principale.
Le nombre de spires est ainsi de 44 et l'induction max au centre, pour $I_{max}=10A$, est de 120Gauss.
Ce qui donne une déviation max, pour le BRO max : $TETA = (B*L) / BRO = 2.5 \text{ mrad}$

DONNEES MAGNETIQUES	
Type aimant	Quadripôle carré ouvrant
Nbre ampère-tours maximaux	4 * 14310
Gradient maximum	G =15 T/m
Composante dipolaire	B = 120 Gauss
Longueur de gradient	L = 160 mm

DONNEES MECANIQUES	
Diamètre de gorge	90 mm
Longueur de fer	120 mm
Poids de fer	100 Kg
Poids de cuivre	20Kg + 6 Kg

DONNEES ELECTRIQUES ET HYDRAULIQUES	
Intensité maximale	I=265 A
Tension maximale	U=35 V
Puissance dissipée	P=9.3 KW
Résistance électrique (a I max)	R=0.132
Nbre de circuits hydrauliques	4
Perte de charge	12 bars
Débit total	4.5 l/mn

CARACTERISTIQUES POUR UNE BOBINE PRINCIPALE

CONDUCTEUR	
Section carrée	5*5 mm ²

Rayons des arrondis	0.7 mm
Diamètre du trou intérieur	3 mm
Valeur moyenne de section de cuivre	17.5 mm ²
Valeur moyenne de la section de passage d'eau	7 mm ²

DONNEES GEOMETRIQUES	
Nombre de spires	54
Longueur approximative d'une spire moyenne	0.58 m
Nombre de circuits hydrauliques	1
Longueur approximative d'un circuit d'eau	31 m
Poids de cuivre	5 Kg

DONNEES ELECTRIQUES ET HYDRAULIQUES	
Intensité maximale	I=265 A
Tension maximale	U=8.8 V
Résistance électrique (I max)	R=0.033
Puissance consommée (I max)	2.3 Kw
Perte de charge	12 bars
Débit d'eau par circuit hydraulique	1.15 l/mn
Echauffement (I max)	29 °C

CARACTERISTIQUES POUR UNE BOBINE CORRECTION DIPOLAIRE

CONDUCTEUR MEPLAT	
Résistivité a 20 degrés	1.75*10 ⁻⁸
Section rectangulaire	5*1.25 mm ²
Rayons des arrondis	0.5 mm
Valeur moyenne de la section de cuivre	5.9 mm ²

DONNEES GEOMETRIQUES	
Nombre de spires	44
Longueur approximative d'une spire moyenne	0.58 m
Poids de cuivre	1.5 Kg

DONNEES ELECTRIQUES	
Intensité maximale	10 A
Tension maximale	0.8 V
Résistance électrique (I max)	0.08
Puissance consommée (I max)	8 W

ANNEXE 5 - SPECIFICATIONS DES REGROUPEURS DE LA LME



SECTION ACCELERATEUR
Activité Systèmes RF

REGROUPEURS DE LA LIGNE LME

G. Le Dem – M. Di Giacomo

SOMMAIRE

SPÉCIFICATION DU BESOIN	1
1. CHOIX DU TYPE DE RÉSONATEUR.....	2
2. CARACTÉRISTIQUES DU RÉSONATEUR.....	2
2.1 CARACTÉRISTIQUES DE LA CAVITÉ RF.....	2
2.2 TRIMMER.....	3
2.3 BOUCLE DE COUPLAGE	3
3. CARTES DE CHAMPS.....	3
4. RÉFÉRENCES	5

Spécification du besoin

La ligne MEBT doit être équipée avec 3 regroupeurs aux caractéristiques suivantes :

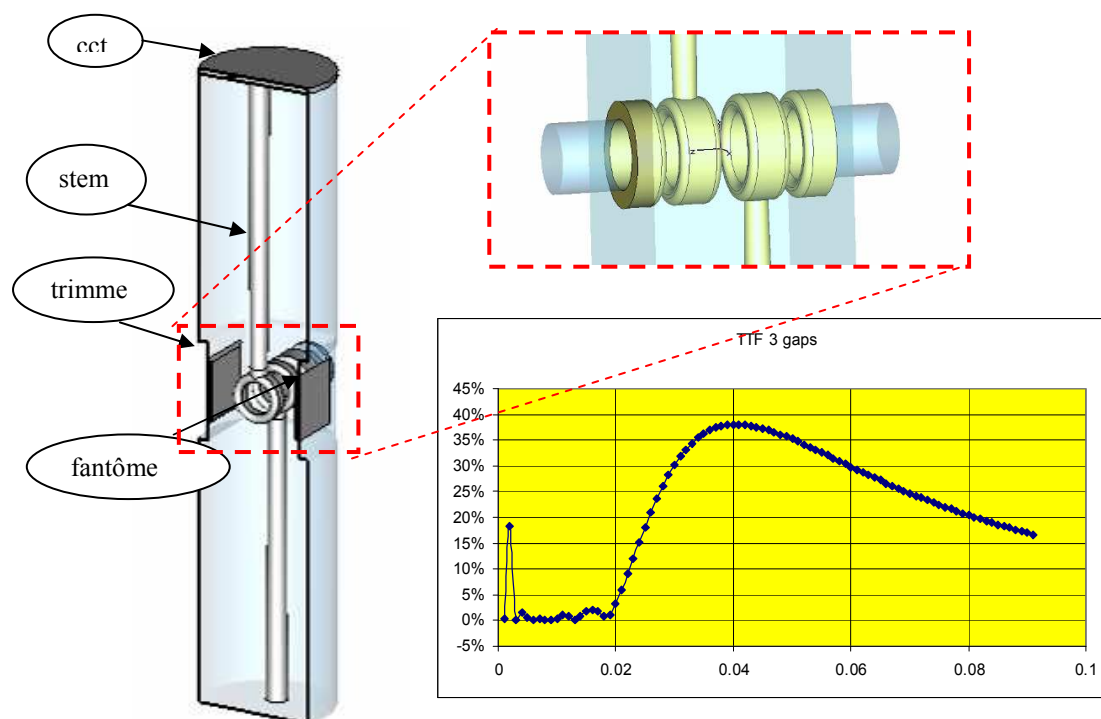
- Tension maximale vue par le faisceau (ions $q/A=1/6$): 165 kV (0 marge)
- Tension minimale vue par le faisceau (protons) TBD
- Bêta : 0.04
- Encombrement bride à bride : plus court possible
- Diamètre ouverture faisceau : 60 mm
- Modes opérationnels: CW et pulsé
- Nb de cavités : 3

1. Choix du type de résonateur

L'étude de l'APD avait retenu la solution en quart d'onde 2 gaps puisque une ouverture faisceau de seulement 30 mm avait été considérée. Avec une ouverture de 60 mm, le temps de transit du résonateur baisse énormément (environ 0.4) et il devient impossible de dissiper dans une cavité de telles dimensions la puissance nécessaire. Des structures possédant plus de 2 gaps ont été analysées. En augmentant le nombre de gaps, la puissance consommée diminue mais la cote d'encombrement longitudinal sur la ligne faisceau augmente. La solution 3 gaps (double cavité quart d'onde), qui a été retenue, se veut être le meilleur compromis entre ces deux tendances.

	2 gaps	3 gaps	4 gaps
Encombrement (mm)	220	300	360
Puissance @ 165 kV)	>30	<10	<4

Table 1 : encombrement et puissance en fonction du nombre de gaps.



2. Caractéristiques du résonateur

2.1 Caractéristiques de la cavité RF

Il s'agit d'une cavité à 2 stems, chacun en quart d'onde. Les stems sont droits (plutôt que repliés comme dans un *split ring*), de façon à ne pas augmenter l'asymétrie de la distribution de puissance, à faciliter l'accès du liquide de refroidissement et à simplifier les aspects mécaniques ainsi que réduire le coût de construction. L'enceinte extérieure est cylindrique avec section rectangulaire aux insertions des ports faisceau et du panneau trimmer. Cette configuration permet de garder un diamètre important sur l'enceinte hors des zones intéressées par les brides. La solution proposée réalise une cavité nécessitant moins de 5 kW pour 120 kV CW, et 12 kW crête pour 190 kV pulsés, qui peut donc être pilotée par un amplificateur de 20 kW comme ceux des cavités bas bêta du linac.

2.2 Trimmer

Avec un trimmer de dimensions 120 mm x 120 mm et une course de 10 mm à une distance variable de 30 à 40 mm du bord du tube faisceau, on couvre une bande de 290 KHz avec une sensibilité maximale de l'ordre 40 KHz/mm.

La bande permet la dérive thermique de la fréquence d'accord dont l'ordre de grandeur typique est de 10^{-3} (88 KHz). Le mouvement du trimmer devra s'effectuer par pas de quelques centièmes, compte tenu de la sensibilité du trimmer et de la bande à -3dB du résonateur (~ 22 KHz en charge). Les simulations montrent que, avec le fantôme à distance de 30 mm, l'asymétrie des courants sur le stem reste négligeable, ce qui permet de positionner la bride de pompage derrière la plaque fantôme.

2.3 Boucle de couplage

Le couplage est de type inductif, réalisé prêt du court circuit bas (position similaire à celle des cavités supra). Il est réalisé du côté froid du court circuit pour ne pas compliquer la mécanique et la thermique dans la zone plus critique. Il ne devrait pas demander de refroidissement.

La présence de la boucle influence légèrement la symétrie des champs entre les deux gaps. Pour compenser cet effet, le stem supérieur est 4 mm plus long que celui inférieur.

- Position des conducteurs de la boucle (distance de l'axe stem)
- Pénétration boucle de couplage
- Surface boucle de couplage
- Epaisseur du conducteur de la boucle

3. Cartes de champs

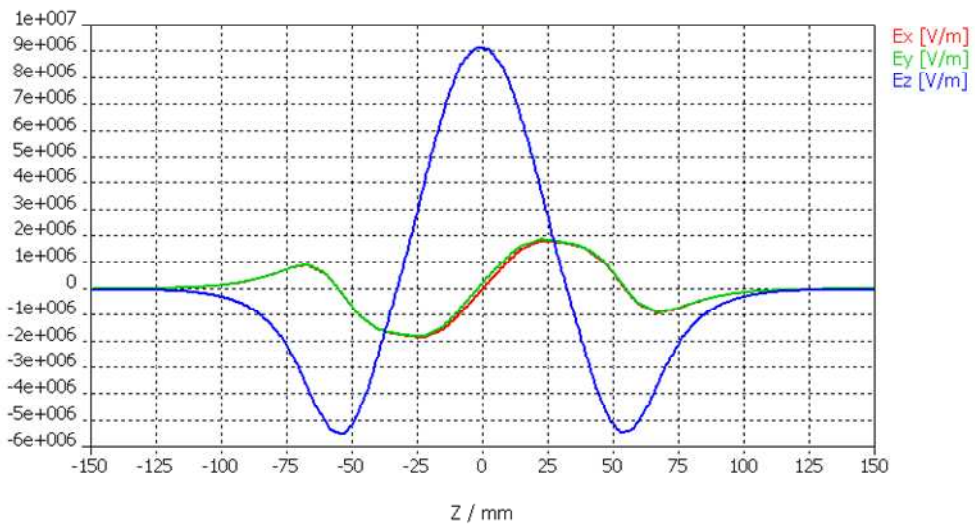


Figure 1- Champ électrique vu par une particule sur l'axe

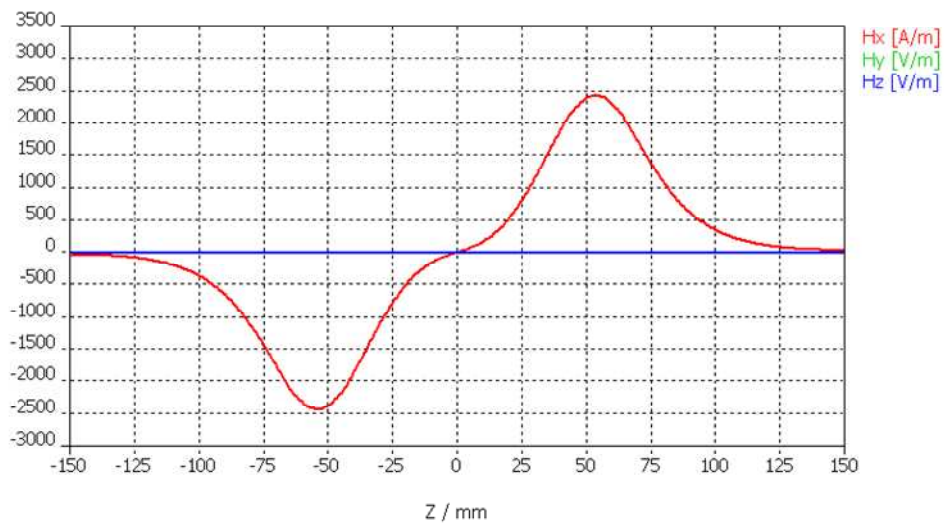


Figure 1 – Champ magnétique vu par une particule sur l'axe.

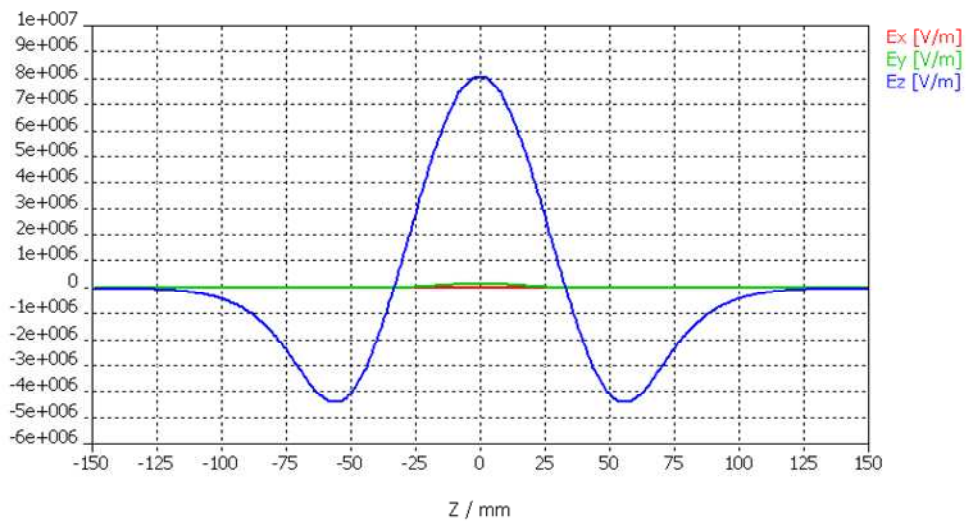


Figure 1 - Champ électrique vu par une particule à 10 mm de rayon.

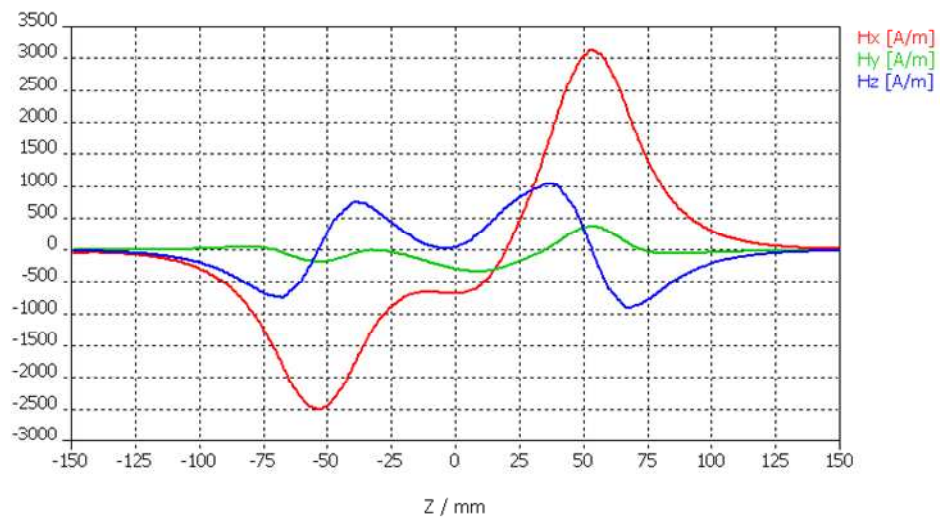


Figure 1 - Champ magnétique vu par une particule à 10 mm de rayon.

REFERENCES

- [1] P. Bertrand, J-L. Biarrotte, D. Uriot, “Consolidation des lignes basses énergie (version 2), Mars 2007, inclus dans EDMS n°I-009436 ver.1. <https://edms.in2p3.fr/document/I-009436/1>
- [2] A. Mosnier et al., “The SPIRAL2 project APD report”, Janvier 2005, EDMS n°I-004609 ver.1. <https://edms.in2p3.fr/document/I-004609/1>
- [3] R. Duperrier et al., “Beam dynamic development for the SPIRAL2 project – Final report”, Octobre 2004, EDMS n°I-004165 ver.1. <https://edms.in2p3.fr/document/I-004165/1>
- [4] D. Uriot, R. Duperrier, “Start to end errors study through the SPIRAL2 linac”, Février 2005, EDMS n°I-004169 ver.1. <https://edms.in2p3.fr/document/I-004169/1>
- [5] D. Uriot, “Etude de la possibilité d’accélérer des protons dans le linac SPIRAL2”, Avril 2006, EDMS n°I-007826 ver.2. <https://edms.in2p3.fr/document/I-007826/2>
- [6] D. Uriot, R. Duperrier, “Accélérateur virtuel : concept, implémentation et premier test”, Mai 2006, EDMS n°I-008036 ver.1. <https://edms.in2p3.fr/document/I-008036/1>
- [7] R. Ferdinand et al., “Sûreté, sécurité, radioprotection – Accélérateur: fonctions et descriptions”, Février 2006, EDMS n°I-008522 ver.1. <https://edms.in2p3.fr/document/I-008522/1>
- [8] R. Duperrier, D. Uriot, “ Etude de faisabilité pour la mesure de l’émittance longitudinale du faisceau dans la ligne moyenne énergie du linac”, Septembre 2006, EDMS n°I-008766 v.1. <https://edms.in2p3.fr/document/I-008766/1>
- [9] R. Duperrier, N. Pichoff, D. Uriot, “CEA Saclay codes review”, Avril 2002, Proc. ICCS Conference, Amsterdam.
- [10] Rapport annuel isolateur de paquets EURISOL: High frequency chopper of the heavy ion accelerator <https://edms.in2p3.fr/document/I-010003/1>
- [11] M.Di Giacomo, « Specification du Besoin pour les regroupeurs LME » <https://edms.in2p3.fr/document/I-010336/1>
- [12] M.Di Giacomo, « études RF pour les regroupeurs de la ligne LME » <https://edms.in2p3.fr/document/I-008758/1>
- [13] D. Uriot, P. Bertrand, J-L. Biarrotte, L. Perrot « Configuration de base du linac supraconducteur » <https://edms.in2p3.fr/document/I-010910/1>