



SPIRAL-2

SECTION ACCELERATEUR

CONFIGURATION DE BASE

DES LIGNES BASSE-ENERGIE

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

20 Juillet 2006

EDMS n°I-008526 Version 1.0

Document de travail pour la revue du 6 septembre 2006

SOMMAIRE

0.	Préambule.....	3
0.1	Spécifications générales.....	3
0.2	Description générale de l'accélérateur.....	3
0.3	Présentation du présent document.....	4
1	Paramètres généraux des lignes basse-énergie.....	7
1.1	Caractéristiques générales.....	7
1.2	Faisceaux produits par la source d'ions $q/A=1/3$	8
1.3	Faisceaux produits par la source de deutons.....	9
1.4	Structure temporelle du faisceau.....	10
2	Description de la ligne LBE1 ions $q/A=1/3$	11
2.1	Plan de la ligne LBE1 ions $q/A=1/3$	11
2.2	LBE1 – Section de préparation faisceau.....	12
2.3	LBE1 – Section d'analyse et d'achromatisme.....	12
2.4	LBE1 – Section de transport.....	14
3	Description de la ligne LBE2 deutons.....	15
3.1	Plan de la ligne LBE2 deutons.....	15
3.2	LBE2 – Section de préparation faisceau.....	16
3.3	LBE2 – Section de tri et d'achromatisme.....	16
4	Description de la ligne LBE commune.....	19
4.1	Plan de la ligne LBE commune.....	19
4.2	LBE – Section de mise en forme.....	19
4.3	LBE – Section d'adaptation au RFQ.....	20
5	Optique dans les lignes basse-energie.....	23
5.1	Hypothèses de calculs.....	23
5.2	Procédures de réglage de la ligne ions $q/A=1/3$ (LBE1 + LBE).....	24
5.3	Optique pour les ions $q/A=1/3$	27
5.4	Procédures de réglage de la ligne deutons (LBE2 + LBE).....	31
5.5	Optique pour les deutons (et les protons).....	32
5.6	Tolérances sur les erreurs d'alignement et de champ.....	36
6	Conclusion.....	39
	Annexe 1 – Plan général des lignes basse-énergie.....	41
	Annexe 2 – Liste des paramètres du linac SPIRAL-2.....	43
	Annexe 3 – Paramètres de fonctionnement des lignes basse-énergie.....	49
	Annexe 4 – Spécifications des aimants des lignes basse-énergie.....	57
	Références.....	67

0. PREAMBULE

Le projet SPIRAL-2 consiste à construire à GANIL (Caen) un nouveau complexe de type ISOL (« Isotope Separation On Line ») visant à produire des faisceaux d'ions radioactifs exotiques de forte intensité. Le projet, qui est entré dans sa phase de construction en 2005, prévoit :

- un premier test faisceau de la source d'ions $q/A=1/3$ et de sa ligne de tri au LPSC Grenoble en Mars 2008 ;
- un premier test faisceau de l'injecteur complet au CEA Saclay en Novembre 2009 ;
- un premier faisceau stable d'énergie nominale produit au GANIL en Septembre 2011 ;
- un premier faisceau radioactif produit au GANIL en Juillet 2012.

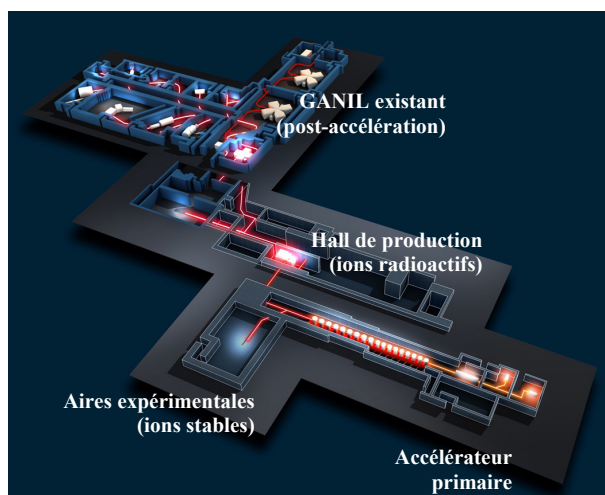


Figure 1 : Implantation générale de l'installation SPIRAL-2 (schéma de principe).

0.1 Spécifications générales

→ Spécifications « de base »

L'accélérateur primaire est conçu pour produire les faisceaux principaux suivants :

- des faisceaux continus de deutons (et de H_2^+ pour le « commissionning »), d'intensité maximale 5 mA, et d'énergie finale 40 MeV ;
- des faisceaux continus d'ions de rapport masse sur charge $A/q \leq 3$, d'intensité maximale 1 mA, et d'énergie finale 14.5 A.MeV pour les $A/q=3$.

→ Spécifications additionnelles

L'accélérateur doit également avoir la capacité :

- de produire un faisceau continu de protons, d'intensité maximale 5 mA, et d'énergie finale 33 MeV (spécification « post-APD ») ;
- de produire, dans une future phase prévoyant un second injecteur dédié, des faisceaux d'ions de rapport masse sur charge $A/q \leq 6$, d'intensité maximale 1 mA, et d'énergie finale 7 A.MeV pour les $A/q=6$;
- de faire varier l'énergie finale de tous les faisceaux produits, jusqu'à une énergie minimale de 2 A.MeV.

0.2 Description générale de l'accélérateur

La phase APD du projet a établi la configuration générale de l'accélérateur : il s'agit d'un accélérateur linéaire (linac) essentiellement constitué de 3 parties principales : l'injecteur (sources ECR + LBES + RFQ + LME), le linac supraconducteur, et les lignes de transport finales (LHEs). Le linac hors LHEs est schématisé Figure 2.

→ *Injecteur*

L'injecteur comprend deux sources d'ions distinctes, une pour produire les faisceaux de deutons (et de protons), l'autre pour produire les faisceaux d'ions plus lourds avec $A/q \leq 3$. A chacune de ces sources est associée une ligne de transport basse énergie (LBE). Ces deux lignes LBEs fusionnent avant de mener au RFQ, dont le rôle est de créer la structure temporelle du faisceau à 88.05 MHz, et de l'accélérer jusqu'à 0.75 A.MeV. La ligne de transport moyenne-énergie (LME) injecte alors le faisceau dans le linac supraconducteur ; cette LME inclut un suppresseur de paquets, et prévoit le raccordement futur de l'injecteur pour les ions $A/q=6$.

→ *Linac supraconducteur*

Le linac principal est constitué de cavités accélératrices supraconductrices alimentées de façon indépendante. Une telle solution permet d'assurer une flexibilité maximale en terme d'espèces d'ions à accélérer et d'énergies finales à atteindre. Ce linac supraconducteur se compose de cavités « quart d'onde » résonnant à 88.05 MHz. Deux types de résonateurs sont utilisés : les résonateurs « bêta 0.07 » couvrent la partie basse-énergie du linac (12 cavités, 1 cavité par cryostat), tandis que les résonateurs « bêta 0.12 » (14 cavités, 2 cavités par cryostat, + 2 cryostats supplémentaires « spare » prévus) couvrent la partie haute-énergie. La focalisation est assurée par des doublets de quadrupôles fonctionnant à température ambiante, intercalés entre chaque cryostat. La longueur totale du linac supraconducteur est d'environ 25 mètres.

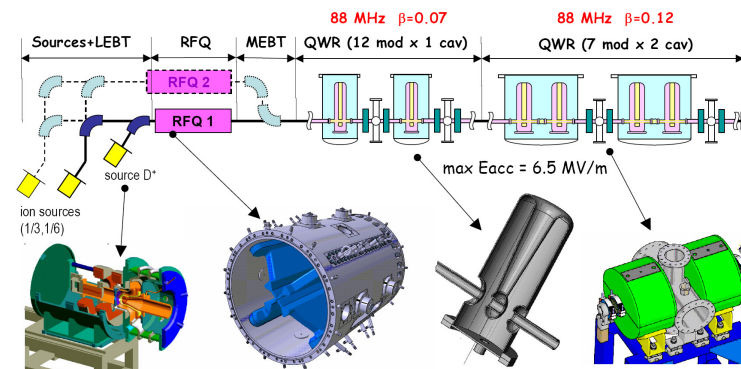


Figure 2 : Schéma de principe du linac SPIRAL-2.

→ *Lignes haute-énergie*

A la sortie du linac, le faisceau peut être distribué à trois endroits différents. Une première ligne de transport haute énergie (LHE) conduit à un arrêt faisceau. Une seconde ligne LHE transporte le faisceau à la casemate contenant l'ensemble cible-source produisant les ions radioactifs, et le focalise afin d'obtenir une distribution de puissance uniforme ($P_{\text{faisceau}} \leq 200 \text{ kW}$) sur le convertisseur de neutrons (ou directement sur la cible). Enfin, une troisième ligne LHE transporte et adapte le faisceau jusqu'aux aires expérimentales pour ions stables.

0.3 Présentation du présent document

→ *Historique du document*

Partant de l'étude APD [1,2,3], l'équipe « dynamique faisceau » est entrée dans la phase de consolidation, et a produit un certain nombre de notes et communications [4,5,6,7,8,9,10,11,12]. Concernant les lignes LBEs proprement dites, certaines modifications ont été proposées, en particulier pour la ligne d'ions $q/A=1/3$, afin de prendre en compte les incertitudes concernant les conditions initiales des sources ECR, le taux de compensation de charge d'espace, les pertes des polluants, etc.. Ces études ont donné lieu à la rédaction d'un ensemble de documents (EDMS n°I-008027 [13]), diffusé auprès d'une vingtaine de spécialistes que nous tenons à remercier ici. Leurs remarques et suggestions ont été regroupées dans le document EDMS n°I-008062 [14], puis prises en compte pour l'élaboration du présent document. En parallèle, et de façon interactive, une étude a été menée par le responsable des éléments magnétiques, et dans une moindre mesure par le responsable des diagnostics faisceau, afin de vérifier que les spécifications demandées n'étaient pas irréalistes, et anticiper la rédaction du cahier des charges des principaux éléments. Cela concerne en particulier les éléments magnétiques de la première partie de la ligne d'ions $q/A=1/3$, première à devoir être construite et testée ; l'objectif est en effet de commander ces premiers objets avant fin 2006.

→ **Objectif du document**

Le présent document « Configuration de base des lignes basse-énergie » a donc pour objectif de décrire en détail les lignes LBEs de l'injecteur avant la revue technique prévue en Septembre 2006 et le lancement en construction. Il est donc l'aboutissement du processus suivant :

- étude APD (mars 2003 – février 2005) ;
- études complémentaires post-APD (mars 2005 – janvier 2006) ;
- consolidation des lignes LBEs (février 2006 – mai 2006) ;
- remarques des acteurs concernés (mai & juin 2006) ;
- validation EDMS des documents de consolidation (juin & juillet 2006) ;
- élaboration du présent document (juillet 2006).

→ **Structure du document**

Le présent document est structuré de manière suivante :

- le Chapitre 1 présente les paramètres généraux des lignes basse-énergie, et détaille les caractéristiques et spécifications des faisceaux d'entrée produits par les sources ;
- les Chapitres 2 à 4 décrivent en détail la structure de ces lignes (la ligne ions $q/A=1/3$ LBE1, la ligne deutons LBE2, et la ligne commune LBE)
- le Chapitre 5 traite des résultats de simulation de l'optique de ces lignes, et décrit leurs procédures de réglage.

→ **Annexes**

Plusieurs annexes d'importance permettent d'accéder à certaines données de façon plus précise :

- l'Annexe 1 contient le plan des lignes (imprimable en format A0) ;
- l'Annexe 2 est la « Liste des paramètres » de l'accélérateur, pour la partie lignes basse-énergie ; cette liste « officielle » est le résumé des spécifications requises pour chaque élément ;
- l'Annexe 3 liste les champs électromagnétiques requis et les tailles de faisceau dans chaque élément pour les différentes optiques nominales ; elle contient aussi pour mémoire les fichiers de données TRACEWIN ;
- l'Annexe 4 regroupe des fiches de spécifications détaillées disponibles à ce jour pour les principaux aimants de la ligne.

→ **Accès aux références**

Les documents cités en référence sont pour la plupart accessibles sur le serveur EDMS de l'IN2P3, à l'adresse suivante : <https://edms.in2p3.fr/edms/cedarw.home?cookie=2039894&project=SPIRAL>. Les personnes n'ayant pas accès à ce serveur peuvent s'adresser à l'équipe consolidation (bertrand@ganil.fr, biarrott@ipno.in2p3.fr, uriot@cea.fr) pour se les procurer.

→ **Remerciements**

Nous tenons à remercier vivement toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration du présent document, en particulier toutes celles qui ne font pas partie du projet SPIRAL-2.

1 PARAMETRES GENERAUX DES LIGNES BASSE-ENERGIE

1.1 Caractéristiques générales

→ Fonction des lignes

Les lignes basse-énergie (LBEs) de l'injecteur ont pour rôle de recueillir les faisceaux d'ions produits par les 2 sources ECR, de sélectionner les ions désirés (résolution en q/A requise : ≥ 100), et de les transporter dans les meilleures conditions jusqu'à l'entrée du RFQ.

→ Implantation générale des lignes et longueurs

Ces lignes peuvent être décomposées en 3 parties distinctes (cf. Figure 3) :

- la ligne associée à la source d'ions $q/A=1/3$ (LBE1),
- la ligne associée à la source de deutons, qui fournira également les protons (LBE2),
- la ligne commune injectant directement dans le RFQ (LBE).

Un plan de référence détaillé est disponible en Annexe 1. Les longueurs associées sont données ci-dessous, depuis l'électrode d'extraction de la source jusqu'au point d'intersection des lignes LBE1 et LBE2 pour les lignes LBE1 et LBE2, et depuis ce même point d'intersection jusqu'à la bride d'entrée du RFQ pour la ligne LBE :

- longueur LBE1 : 15 900 mm (4120.5 + 5243 + 6536.5) ;
- longueur LBE2 : 5 962 mm (3062 + 2900) ;
- longueur LBE : 5 307 mm.

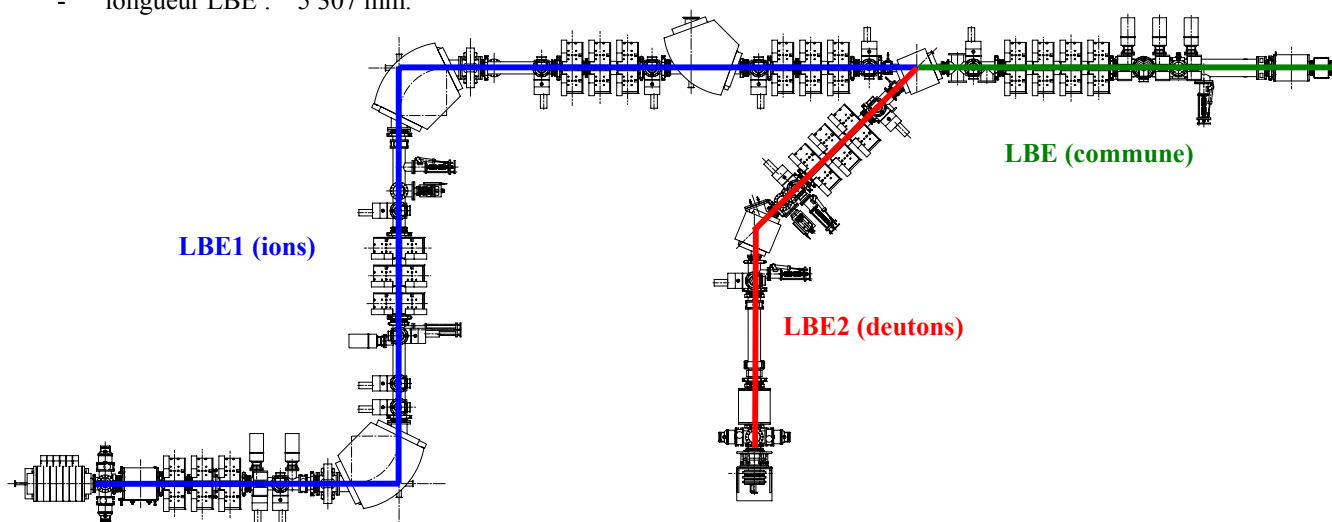


Figure 3 : Plan des lignes LBE de l'accélérateur SPIRAL-2.

→ Hauteur de l'axe faisceau, supports mécaniques et alignement

Les différents composants qui constituent ces lignes sont à considérer, sur le plan mécanique, comme des avant-projets. Chaque élément (aimants, diagnostics, chambres à vide...) 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. Les dipôles, qui sont des éléments d'aiguillage pour le faisceau, comportent un support qui leur est propre, tandis qu'entre chaque dipôle, les éléments sont montés sur des profilés (type « Technal »), soutenus au sol par des entretoises mécano-soudées.

Pour réaliser l'alignement des équipements, chacun doit comporter un système de réglage selon les trois directions X, Y et Z. Ces réglages sont assurés par des systèmes à vis permettant le déplacement de plus ou moins un centimètre. Pour les éléments magnétiques, afin d'assurer le positionnement correct des équipements sur l'axe du faisceau, il faut disposer de références externes. Ce sont des platines situées au-dessus des aimants qui sont usinées avec précision ; le type d'usinage doit être défini avec le géomètre. Les boîtes diagnostics sont elles alignées avec un diagnostic monté : c'est ce dernier qui est aligné directement sur l'axe faisceau. Les lignes de faisceau doivent

donc permettre cette visée directe de l'axe faisceau. Les boîtes diagnostics doivent aussi assurer le montage des équipements pour le vide. Elles doivent donc comporter des ouvertures pour les pompes à vide ainsi que pour les différents équipements nécessaires à la gestion du vide (jauges, vannes etc.).

→ **Diamètre des tubes faisceau**

Le diamètre nominal des tubes faisceau est fixé à \varnothing 164.3 mm interne. Les études de dynamique faisceau montrent en effet qu'un tel choix de tube « standard » permet de conserver, pour les différentes optiques considérées, une transmission hors fentes proche de 100 % dans toutes les lignes (cf. Chapitre 5). Quelques exceptions sont cependant à prévoir, avec notamment : tube à vide du solénoïde de sortie source d'ions $q/A=1/3$ ($\varnothing > 168$ mm si possible), chambre à vide des dipôles de forme spécifique, tubes à vide en entrée et sortie des dipôles de la ligne LBE1 qui devront être plus larges dans le plan horizontal (\varnothing 200 mm environ). Quelques endroits spécifiques pourraient également être élargis pour des raisons mécaniques (hacheur, système à 3 fentes...).

→ **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 [15]. Hormis les risques classiques, le risque principal pour les lignes basse-énergie est lié à la production de neutrons par le faisceau de deutons, en particulier sur l'arrêt faisceau de la ligne LBE2 et celui associé au hacheur (« scrapper »), sur lesquels la totalité du faisceau peut être perdue en fonctionnement normal.

Un point important est de décider si la source $q/A = 1/3$ devra produire des deutons (par exemple si la source de deutons est en panne). Dans un tel cas, ceci a une incidence sur la définition de la casemate entourant la ligne LBE1, et sur les procédures d'accès. Par ailleurs, il faut signaler que des arrêts faisceau sont prévus avant les derniers dipôles des lignes LBE1 et LBE2, ce qui limitera tout le flux de neutrons dans la salle RFQ à travers le tube faisceau et devra permettre une intervention sans arrêter la source.

1.2 Faisceaux produits par la source d'ions $q/A=1/3$

→ **Ions produits et tensions source**

La source d'ions $q/A=1/3$ est une source ECR qui fonctionnera à une fréquence de 18 GHz (type Phoenix V2) ou 28 GHz (type A-Phoenix). Cette source produira une large gamme d'ions, dont le rapport A/q pourra être compris entre 1 et 3 au maximum. La tension de la source V_s est ajustée de manière à produire un faisceau de vitesse réduite adaptée à l'entrée du RFQ, soit $\beta \approx 6.553 \times 10^{-3}$. Elle devra donc pouvoir varier entre 20 kV (cas $A/q=1$) et 60 kV (cas $A/q=3$), avec une stabilité d'au moins 10^{-3} ; V_s est donnée en fonction de l'ion par :

$$V_s \cong \frac{1}{2} \frac{m_0 c^2}{q} \beta^2$$

→ **Courants requis**

Selon le type d'ion produit, l'intensité du faisceau extrait pourra être très différente : plus la masse de l'ion est lourde, plus le courant est faible [16]*. Le courant maximum considéré pour l'ion « d'intérêt » est ici de 1.3 mA, afin d'obtenir les 1 mA requis en fin de linac. Le courant minimum de fonctionnement sera à définir par rapport à la sensibilité des diagnostics, la source elle-même étant capable de produire des courants stables à moins d'1 μ A.

→ **Polluants**

A la sortie de la source ECR, le faisceau « d'intérêt » est extrait en compagnie d'un certain nombre d'ions indésirables (les « polluants »), qui devront être interceptés par le système de tri de la ligne LBE1. On estime que pour produire 1.3 mA d'ions d'intérêt, la source pourrait produire jusqu'à 10 mA d'intensité totale. Ce chiffre s'appuie notamment sur les mesures effectuées sur la source Phoenix V2 en oxygène, où le courant total extrait est de presque 5 mA pour 1 mA de $^{16}\text{O}^{6+}$ produits. L'analyse de ces mesures [17] permet de dresser le tableau suivant (Table 1), qui a notamment servi de référence durant l'étude du comportement des polluants dans les lignes.

* La source Phoenix-V2 fournit typiquement 1 mA jusqu'à la masse $A=16$ (O), et environ : 0.1 mA pour la masse $A=50$, 10 μ A pour la masse $A=80$, 1 μ A pour la masse $A=110$ et 0.1 μ A pour la masse $A=140$ (Xe). La source A-Phoenix devrait pouvoir permettre de fournir 1 mA jusqu'à la masse $A = 40$ (Ar), et gagner un facteur $\times 4$ sur toutes les intensités pour toutes les masses plus lourdes (soit environ : 0.1 mA pour la masse $A=65$, 10 μ A pour la masse $A=95$, 1 μ A pour la masse $A=125$).

Table 1 : Faisceaux produits par la source q/A=1/3 type Phoenix V2 pour un fonctionnement en oxygène.

Ion	I (μA)	Pourcentage	Emittance rms x et y (π.mm.mrad norm)	α _x et α _y	β _x et β _y (mm/π.mrad)
¹⁶ O ¹⁺	120	2 %	0.17	-3	1
¹⁶ O ²⁺	300	6 %	0.25	-3	1
¹⁶ O ³⁺	450	9 %	0.28	-3	1
¹⁶ O ⁴⁺ et ⁴ He ¹⁺	1600	33 %	0.31	-3	1
¹⁶ O ⁵⁺	800	16 %	0.24	-3	1
¹⁶ O ⁶⁺	1000	21 %	0.22	-3	1
¹⁶ O ⁷⁺	135	3 %	0.21	-3	1
¹⁶ O ⁸⁺ et ⁴ He ²⁺	225	5 %	0.39	-3	1
H ⁺	245	5 %	0.66	-6	1.7

Les émittances et les paramètres de Twiss α et β sont donnés à 350 mm de l'électrode d'extraction

→ *Emittances de sortie source*

Sur la base des mesures précédentes, l'émittance normalisée en sortie de source est considérée comme égale à 0.2 π.mm.mrad rms. Cependant, étant données les incertitudes liées à la grande diversité des faisceaux à produire, au fait que la future source A-Phoenix n'est à ce jour pas encore construite, et aux possibles effets de corrélations croisées dues au champ magnétique de la source (cf. Chapitre 5), nous avons choisi de dimensionner la ligne pour des émittances normalisées pouvant atteindre jusqu'à 0.4 π.mm.mrad rms. Cette dernière valeur « pessimiste » était celle considérée lors de l'étude APD. On peut remarquer que pour une distribution gaussienne tronquée à 4σ, ceci correspond à une émittance géométrique non normalisée marginale de 960 π.mm.mrad.

1.3 Faisceaux produits par la source de deutons

→ *Ions produits et tensions source*

La source de deutons est une source ECR de type SILHI qui fonctionnera à une fréquence de 2.45 GHz [18]. Cette source produira des deutons, des ions H₂⁺, utiles pour le réglage de l'accélérateur, mais aussi des protons. Les tensions source correspondantes sont de 40.27 kV (cas D⁺), 40.30 kV (cas H₂⁺), et 20.15 kV (cas H⁺), avec une stabilité d'au moins 10⁻³.

→ *Courants requis*

Le courant maximum considéré pour l'ion d'intérêt est ici de 6.5 mA, afin d'obtenir les 5 mA requis en fin de linac. Cela est valable pour les deutons, les protons, et pour les H₂⁺ dans la mesure du possible (on n'atteint pas encore un tel courant aujourd'hui, cf. Table 2, mais cela est largement envisageable en agrandissant le trou d'extraction de la source). Le courant minimum de fonctionnement de la source est fixé à 100 μA.

→ *Polluants*

A la sortie de la source ECR, le faisceau d'intérêt est également extrait en compagnie d'un certain nombre d'ions indésirables, qui seront perdus le long de la ligne LBE2. On s'attend ici aussi à ce que la source puisse produire jusqu'à 10 mA d'intensité totale en fonctionnement nominal deutons ou protons (cf. Table 2). Cette valeur pourrait même atteindre jusqu'à 50 mA total en fonctionnement H₂⁺ pendant les phases de réglage. Le tableau ci-dessous, sur la base de mesures effectuées sur la source prototype [18], liste les différents ions extraits pour un fonctionnement en deutons, et en protons + H₂⁺. A noter que, dans le cas spécifique d'un fonctionnement deutons à faible courant (0.1 mA), le courant extrait de N⁺ pourra cependant atteindre 4 ou 5 mA.

Table 2 : Faisceaux produits par la source de type SILHI pour un fonctionnement en D⁺, H₂⁺ et H⁺.

Fonctionnement en D ⁺ : 6.9 mA deutons extraits				
D ⁺	D ₂ ⁺	D ₃ ⁺	Ions lourds*	Courant total extrait
77 %	9 %	1 %	13 %	9 mA
Fonctionnement en H ⁺ et H ₂ ⁺ : 6.5 mA protons extraits, 1.1 mA H ₂ ⁺ extraits				
H ⁺	H ₂ ⁺	H ₃ ⁺	Ions lourds*	Courant total extrait
71 %	12 %	2 %	15 %	9.2 mA

* les ions lourds sont du type 1+, A=14 à 20

→ *Emittances de sortie source*

Les valeurs d'émittance (ϵ_r, ϵ_r') mesurées sur la source de type SILHI en fonctionnement deutons sont comprises entre 0.07 et 0.09 π .mm.mrad norm rms. Sur la base de ces valeurs, on considère que l'émittance de sortie source vaut 0.1 π .mm.mrad norm rms dans les 2 plans pour les deutons. En ce qui concerne les autres faisceaux produits (protons, H_2^+ , H_3^+ , D_2^+ , D_3^+ , ions lourds), d'après les mesures préliminaires réalisées pour les protons et les simulations effectuées à Saclay avec le code AXEL [19], nous avons choisi de considérer une émittance de 0.1 π .mm.mrad norm rms dans les 2 plans pour tous ces différents faisceaux [5,11].

1.4 *Structure temporelle du faisceau*

→ *Fonctionnement nominal*

Le fonctionnement nominal du linac Spiral-2 est un fonctionnement en faisceau « continu » ; ce faisceau continu est en fait, en aval du RFQ, formé de paquets à une fréquence de répétition de 88.05 MHz.

→ *Procédures de réglage : cycle utile et longueur des pulses*

Pour les procédures de réglage, il sera nécessaire de fonctionner avec un faisceau d'intensité crête nominale (pour avoir des effets de charge d'espace corrects) mais à très faible cycle utile. Le cycle utile doit ainsi pouvoir varier entre 100% et 0.1%. La valeur inférieure de 0.1% correspond à une puissance faisceau maximale (deutons, 5 mA) en fin de linac de 200 W, valeur qui semble raisonnable pour une perte éventuelle du faisceau dans les derniers cryomodules pendant le réglage.

Concernant la longueur des pulses à produire, il est nécessaire que celle-ci soit beaucoup plus longue que le temps de compensation de charge d'espace afin de pouvoir diagnostiquer un faisceau stabilisé. Ce temps de compensation est très mal connu, mais devrait être de l'ordre de quelques dizaines de μ s. De ce fait, la longueur minimale des pulses est fixée à 200 μ s. Pour atteindre le cycle utile de 0.1%, la fréquence de répétition associée vaut donc 5 Hz. On doit cependant prévoir de pouvoir opérer jusqu'à des fréquences aussi basses que 1 Hz au cas où le temps de compensation serait plus long qu'estimé.

→ *Procédures de réglage : premières réflexions sur la montée en puissance faisceau*

Le réglage du linac commencera donc a priori avec des pulses de 200 μ s à 5 Hz, créés par le hacheur situé dans la ligne LBE. Pour le réglage des lignes situées en amont du hacheur (LBE1 et LBE2), une pulsation de la source doit être prévue (sauf si les profileurs choisis supportent un cycle utile de 100%...). Il serait préférable que cette pulsation soit synchronisée sur la fréquence du chopper (5 Hz), avec des pulses de longueur beaucoup plus grande que le temps de montée des sources, qui est de l'ordre de 1 ms. Un tel réglage pourrait ainsi être effectué avec des pulses de 10 ms à 5 Hz.

Lors de la montée en puissance faisceau, en partant d'un fonctionnement en pulses de 200 μ s à 5 Hz (10 ms à 5 Hz en amont du hacheur), deux méthodes complémentaires peuvent être utilisées : augmentation de la fréquence de répétition, et augmentation de la durée des pulses. Une façon élégante de faire les choses pourrait être :

- d'augmenter d'abord le cycle utile de 0.1% à 5% en augmentant la longueur des pulses produits par le hacheur de 200 μ s à 10 ms ;
- de couper la pulsation de la source ;
- d'augmenter le cycle utile de 5% à 100% en augmentant la fréquence du hacheur de 5 Hz à 100 Hz, puis de couper le hacheur ;
- durant cette procédure, le faisceau correspondant au temps de montée de la source pourra être éliminé en utilisant le hacheur et/ou en pulsant le champ RF du RFQ.

A noter que ces réflexions restent préliminaires et sont à approfondir, notamment en fonction du temps de réponse de la mesure des pertes faisceau dans le linac supraconducteur.

→ *Fonctionnement spécifique « mono-paquet »*

Enfin, un fonctionnement spécifique « mono-paquet » prévoit de produire des paquets de faisceau à des fréquences comprises entre 8.8 kHz (1 paquet sur 10 000) et 880 kHz (1 paquet sur 100). Cela ne peut a priori être réalisé qu'en utilisant le hacheur rapide de la ligne LME sur un faisceau continu (sauf si le hacheur de la LBE peut monter suffisamment haut en fréquence pour « aider » le hacheur rapide de la LME, ce qui semble a priori difficile...).

2.2 LBE1 – Section de préparation faisceau

→ Principe

La section de préparation faisceau, située en sortie de la source d'ions, vise essentiellement à refocaliser le faisceau sortant de la source, et à l'adapter au dipôle d'analyse pour obtenir la résolution désirée (≥ 100 en q/A).

→ Eléments magnétiques

Un solénoïde (LBE1.Sol11) et un triplet de quadrupôles (LBE1.Q11, LBE1.Q12, LBE1.Q13) sont utilisés, ce qui permet de contrôler totalement les paramètres du faisceau ($\alpha_x, \beta_x, \alpha_y, \beta_y$)* et créer le point objet O requis pour la section d'analyse. Chacun des quadrupôles est équipé d'un déflecteur intégré (« steerer ») permettant de dévier le faisceau dans une seule direction, ceci pour compenser les possibles désalignements dans la ligne (cf. Chapitre 5). Tous les quadrupôles des lignes LBE1, LBE2 et LBE sont ainsi équipés.

A noter que tous les éléments magnétiques de cette section sont dimensionnés pour atteindre des champs jusqu'à 2.7 fois supérieurs aux valeurs nominales, cela afin de pouvoir réaliser dans les meilleures conditions le spectre des ions issus de la source jusqu'au $q/A=1/20$ ($^{20}\text{Ne}^+$).

→ Fentes de nettoyage

Un jeu de fentes (1 horizontale LBE1.FH11 et 1 verticale LBE1.FV11) est placé en aval du triplet afin d'intercepter une partie des polluants près du point objet (ceux qui sont les plus éloignés en q/A du faisceau d'intérêt). De plus, une fente horizontale supplémentaire (LBE1.FH12) placée un peu plus loin (à 450 mm du point objet) où le faisceau est très divergent, est utilisée pour faciliter la séparation avale, en coupant le halo qui subirait les aberrations d'ordre $n \geq 2$ du dipôle d'analyse. Toutes ces fentes devront sans doute être refroidies.

→ Diagnostics

Une cage de Faraday (LBE1.CF11) est disponible en sortie de source pour mesurer le courant total extrait. Elle peut également être utile pour interrompre le faisceau dans certaines circonstances spécifiques. Aucun autre diagnostic n'est prévu dans cette section du fait du grand nombre de polluants présents : le faisceau d'intérêt sera en effet dans la plupart des cas « invisible » [6].

→ Refroidissement nécessaire

Les études de comportement des polluants [11] montrent que l'on s'attend, pour un faisceau d'oxygène de 1.3 mA, à des pertes de l'ordre de : 15 à 20 W sur chacune des 3 fentes de nettoyage, environ 10 W dans le triplet, de 5 à 10 W dans les tubes situés entre le triplet et l'hexapôle LBE1.Hx11, et moins de 1 W dans le solénoïde. A partir de ces résultats, et afin d'anticiper les divers types de faisceaux d'ions susceptibles d'être produits par la source ainsi que les pertes maximales envisageables lors des phases de réglage (cf. Chapitre 5), les spécifications sur les puissances à évacuer sont fixés à au moins : 60 W sur chacune des 3 fentes de nettoyage, et 30 W dans tous les autres éléments de la ligne. Un refroidissement (à évaluer) devra être prévu là où nécessaire.

→ Vide

Le niveau de vide requis dans la ligne est de 10^{-8} mbar pour limiter l'interaction des ions avec le gaz résiduel (« stripping ») [20]. Pour cela, 4 piquages dédiés ont pour l'instant été prévus : 2 en sortie de source, et 2 entre le triplet et les fentes de nettoyage (la capacité de pompage reste à évaluer). Une vanne d'isolation est placée avant l'hexapôle LBE1.Hx11. Pour information, le niveau de vide dans la source d'ions sera de 10^{-6} mbar.

2.3 LBE1 – Section d'analyse et d'achromatisme

→ Principe

Le rôle principal de la ligne LBE1 est de séparer efficacement en masse et charge les différents ions provenant de la source afin de ne conserver que l'ion d'intérêt. Ceci est réalisé dans la section d'analyse, en utilisant un dipôle d'indice nul à double focalisation, et en positionnant une fente de tri horizontale au niveau du point image I que doit créer le système optique. Comparée à la solution proposée lors de l'APD, un tel système permet notamment, du fait de l'augmentation des distances, de relâcher les contraintes au niveau du « waist » du point image qui est

* Ce choix permet notamment de pouvoir réadapter correctement quasiment n'importe quel type de faisceau issu de la source.

beaucoup moins prononcé qu'avant ; il y a ainsi moins d'effets de charge d'espace, et des aberrations dues au passage dans le dipôle moins prononcées. Après l'analyse, une focalisation et une nouvelle déviation sont réalisées de façon à obtenir une ligne symétrique (réglage facilité) et doublement achromatique (en angle et position). Ceci permet de se prémunir contre toute fluctuation du centroïde du faisceau en angle et en position (à laquelle le RFQ est très sensible) en cas de variation de la tension source ou de dérive des champs des dipôles (qui seront alimentés en série).

→ *Eléments magnétiques*

Les conditions à remplir par le dipôle d'analyse pour réaliser un tel système d'analyse sont données par :

- $\tan \theta = 4 t / (1 - 4 t^2)$, où θ est l'angle de déviation du dipôle, et $t = \tan \alpha$, où α est l'angle du coin du dipôle;
- $L t = \rho$, où ρ est le rayon de courbure du dipôle, et L la longueur O / entrée dipôle et sortie dipôle / I.

Après une étude dédiée du système de tri [6,7], les paramètres principaux de ce système ont été figés afin d'obtenir le meilleur compromis résolution/longueur [9]. Nous optons pour un dipôle de $\theta = 90^\circ$, avec des coins en entrée et sortie de $\alpha = 26.565^\circ$, et un rayon de courbure $\rho = 600$ mm. La longueur dipôle / point image est de $L = 1.2$ m.

Après ce dipôle d'analyse LBE1.D11 déviant le faisceau vers la gauche, un triplet de quadripôles (LBE1.Q14, LBE1.Q15, LBE1.Q16) est utilisé. Puis un second dipôle à 90° (LBE1.D12), strictement identique au premier mais déviant le faisceau vers la droite, complète la double-déviation achromatique. Chaque dipôle sera doté de bobines de corrections et de sondes RMN pour égalité parfaite des champs magnétiques. Enfin, 2 hexapôles (LBE1.Hx11 et LBE1.Hx12), placés symétriquement avant LBE1.D11 et après LBE1.D12, sont utilisés pour compenser les effets non-linéaires (aberrations d'ordre 2) induits par le passage dans les dipôles d'un faisceau de si grande extension radiale. De ce fait, le premier hexapôle permet de faciliter la séparation, et d'augmenter ainsi la résolution pratique de la ligne.

A noter enfin que tous les éléments magnétiques de cette section (hors LBE1.DIP12 et LBE1.Hx12) sont dimensionnés pour atteindre des champs jusqu'à 2.7 fois supérieurs aux valeurs nominales, cela afin de pouvoir réaliser dans les meilleures conditions le spectre des ions issus de la source jusqu'au $q/A=1/20$ ($^{20}\text{Ne}^+$).

→ *Fente de tri*

Une fente horizontale refroidie LBE1.FH13 est positionnée au niveau de point image I afin d'intercepter les polluants n'ayant pas encore été perdus en amont, et ne laisser passer que le faisceau d'intérêt.

→ *Diagnostics*

5 profileurs sont prévus dans cette section. Le profileur LBE1.PR13, situé derrière la fente de tri, est utilisé pour régler le point image. Les 2 profileurs LBE1.PR14 et LBE1.PR22 sont utilisés pour régler l'optique de la double-déviation de façon symétrique. Les 2 profileurs LBE1.PR12 et LBE1.PR21 sont uniquement utilisés pour l'alignement. Enfin, un jeu d'émittance-mètres (1 horizontal, 1 vertical, non référencés sur le plan) est placé après le triplet de l'achromat pour réaliser les mesures d'émittances, et une cage de Faraday (LBE1.CF13) est positionnée derrière le profileur LBE1.PR13 pour mesure d'intensité. Un arrêt faisceau est également présent derrière les émittance-mètres afin d'arrêter le faisceau lors du réglage (ou en cas d'urgence).

→ *Refroidissement nécessaire*

Les études de comportement des polluants [11] montrent que l'on s'attend, pour un faisceau d'oxygène de 1.3 mA, à des pertes de l'ordre de : environ 15 W dans l'hexapôle LBE1.Hx11, environ 150 W dans la chambre du dipôle, près de 40 W sur le tube en aval du dipôle, et quelques W sur la fente de tri. A partir de ces résultats, et estimant que dans le cas de polluants avec des q/A très proches, ces dernières valeurs (tube, fente) pourraient peut-être atteindre jusqu'à quelques centaines de W, les spécifications sur les puissances à évacuer sont fixés à au moins : 500 W sur la chambre du dipôle, 300 W sur le tube en aval du dipôle, 300 W sur la fente de tri, et 50 W sur l'hexapôle. Tous ces éléments (sauf peut-être l'hexapôle) devront donc a priori être refroidis. Concernant les éléments situés en aval de la fente de tri, les pertes maximales envisageables (phases de réglage) sont de l'ordre de quelques W au maximum. Aucun refroidissement n'est donc a priori nécessaire.

→ *Vide*

Le niveau de vide requis dans la ligne est de 10^{-8} mbar. Pour cela, 4 piquages dédiés ont été prévus : 1 en sortie de dipôle LBE1.D11, 1 au niveau du profileur LBE1.PR13, 1 au niveau du profileur LBE1.PR14, et 1 au niveau du profileur LBE1.PR22 (la capacité de pompage reste à évaluer). Une vanne d'isolation est placée avant le dipôle LBE1.D12.

2.4 LBE1 – Section de transport

→ *Principe*

Après la double-déviation achromatique de la section d'analyse, une section de transport fait la jonction avec la ligne commune LBE en prenant soin de minimiser l'extension radiale du faisceau sur tout le parcours, et en particulier au passage des dipôles LBE4.D13 (prévu pour une connexion à la future ligne $q/A=1/6$) et LBE2.D12 (jonction avec la ligne deutons LBE2).

→ *Eléments magnétiques*

Deux triplets de quadrupôles sont utilisés pour réaliser le transport, le premier (LBE1.Q21, LBE1.Q22, LBE1.Q23) en amont du futur dipôle LBE4.D13, le second (LBE1.Q24, LBE1.Q25, LBE1.Q26) en aval de celui-ci.

→ *Diagnostics*

3 profileurs sont prévus dans cette section pour régler l'optique. Les profileurs LBE1.PR23 et LBE1.PR24 de part et d'autre du futur dipôle LBE4.D13, et le profileur LBE1.PR23 avant le dipôle deutons LBE2.D12.

→ *Refroidissement nécessaire*

Les pertes maximales envisageables dans les éléments de cette section (phases de réglage) sont de l'ordre de quelques W au maximum. Aucun refroidissement n'est donc a priori nécessaire.

→ *Vide*

Le niveau de vide requis dans la ligne est de 10^{-8} mbar. Pour cela, 3 piquages dédiés ont été prévus, sur les boîtes diagnostics associées aux 3 profileurs (la capacité de pompage reste à évaluer). Une vanne d'isolation est placée avant le dipôle deutons LBE2.D12.

3 DESCRIPTION DE LA LIGNE LBE2 DEUTONS

3.1 Plan de la ligne LBE2 deutons

La ligne LBE2 transporte les deutons (ou H_2^+) et les protons issus de la source LBE2.SI1. Elle peut être décomposée en 2 parties principales de fonctions différentes : la section de préparation faisceau, et la section de tri et d'achromatisme. Ces 2 sections sont illustrées sur les 2 figures suivantes.

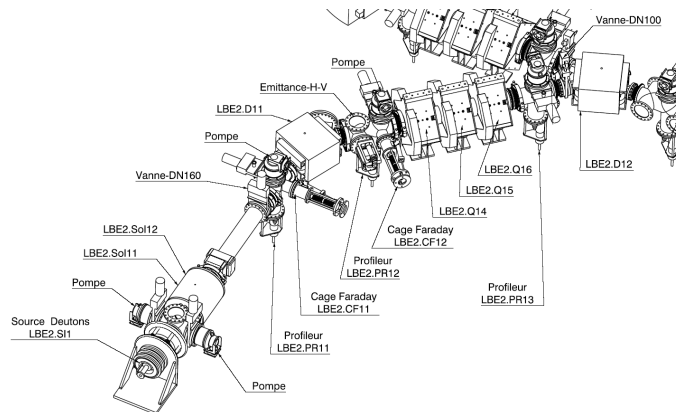


Figure 6 : Vue en perspective de la ligne LBE2 et nomenclature des éléments.

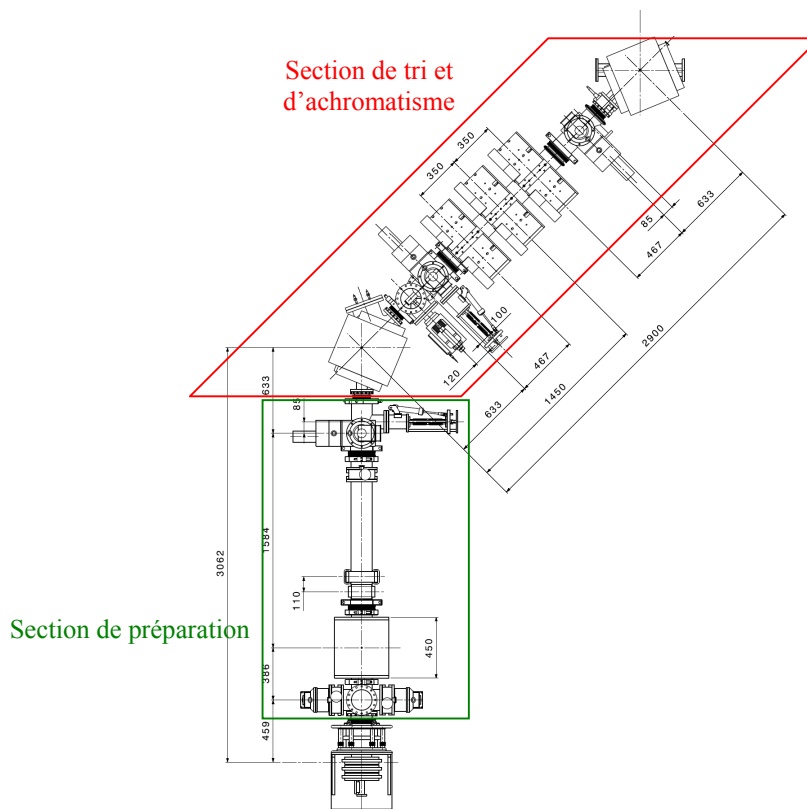


Figure 7 : Plan de la ligne LBE2.

3.2 LBE2 – Section de préparation faisceau

→ Principe

La section de préparation faisceau vise essentiellement à refocaliser le faisceau sortant de la source deutons.

→ Eléments magnétiques

Un solénoïde avec deux bobinages successifs alimentés séparément (LBE2.Sol11 et LBE2.Sol12) est utilisé. Le choix d'utiliser deux bobinages indépendants (c'est-à-dire délivrant 2 zones de champs B_1 et B_2 réglables) améliore la souplesse du réglage ; ceci peut en effet s'avérer utile en cas de surprise sur les valeurs de taux de compensation de charge d'espace dans la ligne (cf. Chapitre 5) ou de désadaptation du faisceau issu de la source. Dans le même ordre d'idée, la longueur de l'espace de glissement entre ce double-solénoïde et le dipôle LBE2.D11 a été optimisée afin de pouvoir assurer une optique satisfaisante pour des taux de compensation compris entre 50% à 100%. Enfin, 2 déflecteurs magnétiques (« steerers ») sont localisés en aval du solénoïde pour l'alignement du faisceau.

A noter que le solénoïde à double bobinage est dimensionné pour atteindre des champs jusqu'à 1.8 fois supérieurs aux valeurs nominales, cela afin de pouvoir réaliser dans les meilleures conditions le spectre des ions issus de la source jusqu'au $q/A=1/6$ (D_3^+).

→ Diagnostics

Un DCCT blindé est disponible en aval des « steerers » pour mesure du courant faisceau, et un profileur (LBE2.PR11) est positionné avant le premier dipôle pour le pré-réglage du double-solénoïde. Une cage de Faraday (LBE2.CF11) est disponible derrière le profileur, utile pendant le réglage. Il doit pouvoir être prévu de déplacer cette cage de Faraday au niveau du piquage de sortie source si nécessaire. A noter que, dans certains cas, l'utilisation du profileur pourra être rendue difficile du fait de la présence d'un halo important de polluants.

→ Refroidissement nécessaire

Les études de comportement des polluants [11] montrent que l'on s'attend, pour un faisceau de deutons de 6.5 mA, à des pertes de l'ordre de : 40 W dans l'espace de glissement solénoïde / dipôle, et moins de 1 W dans le solénoïde. Cependant, considérant les pertes maximales envisageables dans tous les modes de fonctionnement (cf. Chapitre 5), les spécifications sur les puissances à évacuer sont fixées à au moins : 100 W dans le solénoïde, et 150 W le long du tube à vide reliant le solénoïde au dipôle. Un refroidissement (à évaluer) devra être prévu ; l'idée de l'ajout d'un diaphragme refroidi après les 2 « steerers » pourraient permettre de rendre les « pertes tube » mieux localisées.

A noter que dans le cas où l'on veuille fonctionner en H_2^+ 6.5 mA et faisceau continu, ces spécifications doivent être revues à la hausse (cf. Chapitre 5) avec au moins : 100 W dans le solénoïde, et 750 W le long du tube à vide reliant le solénoïde au dipôle.

→ Vide

Le niveau de vide requis dans la ligne est de 10^{-6} mbar pour limiter l'interaction des ions avec le gaz résiduel (« stripping ») [20]. Pour cela, 3 piquages dédiés ont été prévus : 2 en sortie de source, et 1 au niveau du profileur LBE2.PR11 (la capacité de pompage reste à évaluer). Une vanne d'isolation est placée entre la cage de Faraday LBE2.CF11 et le dipôle. Pour information, le niveau de vide dans la source d'ions sera de 10^{-3} mbar.

3.3 LBE2 – Section de tri et d'achromatisme

→ Principe

La section de tri et d'achromatisme a pour objectif, via une double-déviations, de séparer le faisceau d'intérêt de ses polluants associés tout en conservant une ligne de transport symétrique, pour faciliter le réglage, et achromatique en angle et position, pour éviter toute fluctuation du centroïde du faisceau en cas de variation de la tension source ou de dérive des champs des dipôles, qui seront alimentés en série.

→ Eléments magnétiques

Cette double-déviations achromatique est effectuée en utilisant les dipôles secteurs d'indice nul LBE2.D11 et LBE2.D12, d'angle $\theta = 45^\circ$ et de rayon de courbure $\rho = 500$ mm. Une telle déviation permet en effet de réaliser sans difficulté le tri désiré. De plus, le choix de dipôles secteurs (sans coin) permet de mieux équilibrer les excursions radiales du faisceau dans chaque plan. Enfin, comme dans la ligne LBE1, ces dipôles sont dotés de bobines de correction pour équilibrage mutuel. Entre ces 2 dipôles déviant le faisceau vers la droite, un triplet de

quadrupôles (LBE2.Q14, LBE1.Q15, LBE1.Q16) est utilisé pour focaliser le faisceau et ajuster l'achromaticité de la ligne. Aucun hexapôle n'est par contre utilisé compte tenu de la faible extension radiale du faisceau dans les dipôles.

A noter que le premier dipôle LBE2.D11 est dimensionné pour atteindre un champ jusqu'à 1.8 fois supérieur à la valeur nominale, cela afin de pouvoir réaliser dans les meilleures conditions le spectre des ions issus de la source jusqu'au $q/A=1/6$ (D_3^+).

→ **Diagnosics**

2 profileurs, LBE2.PR12 et LBE2.PR13, sont positionnés de part et d'autre du triplet pour régler l'optique de la double-déviator achromatique de façon aussi symétrique que possible. Un jeu d'émission-mètres (1 horizontal, 1 vertical) est placé juste avant le profileur LBE2.PR12 pour réaliser les mesures d'émission des faisceaux produits. Une cage de Faraday (LBE2.CF12) est placée derrière le profileur LBE2.PR12 pour arrêter le faisceau lors du réglage, et pour mesure d'intensité. Enfin, un arrêt faisceau est également présent derrière le profileur LBE2.PR13, utile pour arrêter le faisceau à pleine puissance en cas de besoin.

→ **Refroidissement nécessaire**

Les études de comportement des polluants [11] montrent que l'on s'attend, pour un faisceau de deutons de 6.5 mA, à des pertes de l'ordre de : 25 W dans la chambre du dipôle LBE2.D11, et 20 W dans l'espace de glissement dipôle / triplet. Cependant, considérant les pertes maximales envisageables dans tous les modes de fonctionnement (cf. Chapitre 5), les spécifications sur les puissances à évacuer sont fixées à au moins : 100 W sur la chambre du dipôle, et 100 W le long du tube en aval du dipôle. Un refroidissement (à évaluer) devra être prévu. Concernant les éléments situés en aval (depuis le triplet jusqu'à la fin de la ligne LBE2), les pertes maximales envisageables (phases de réglage) sont de l'ordre de 15 W au maximum ; aucun refroidissement n'est donc a priori nécessaire.

A noter que dans le cas où l'on veuille fonctionner en H_2^+ 6.5 mA et faisceau continu, les spécifications doivent être revues à la hausse concernant le dipôle et son tube aval (cf. Chapitre 5), avec au moins : 650 W sur la chambre du dipôle, et 400 W le long du tube en aval du dipôle.

→ **Vide**

Le niveau de vide requis dans la ligne est de 10^{-6} mbar. Pour cela, 2 piquages dédiés ont été prévus : 1 au niveau du profileur LBE2.PR12, et 1 au niveau du profileur LBE2.PR13 (la capacité de pompage reste à évaluer). Une vanne d'isolation est placée avant le second dipôle LBE2.D12.

4 DESCRIPTION DE LA LIGNE LBE COMMUNE

4.1 Plan de la ligne LBE commune

La ligne LBE est commune à tous les ions produits, et est conçue de façon à permettre un réglage analogue pour les ions $q/A = 1/3$ et les deutons/protons (les quadrupôles sont notamment toujours de même signe). Elle peut être décomposée en 2 parties principales de fonctions différentes : la section de mise en forme du faisceau, et la section d'adaptation au RFQ. Ces 2 sections sont illustrées sur les 2 figures suivantes.

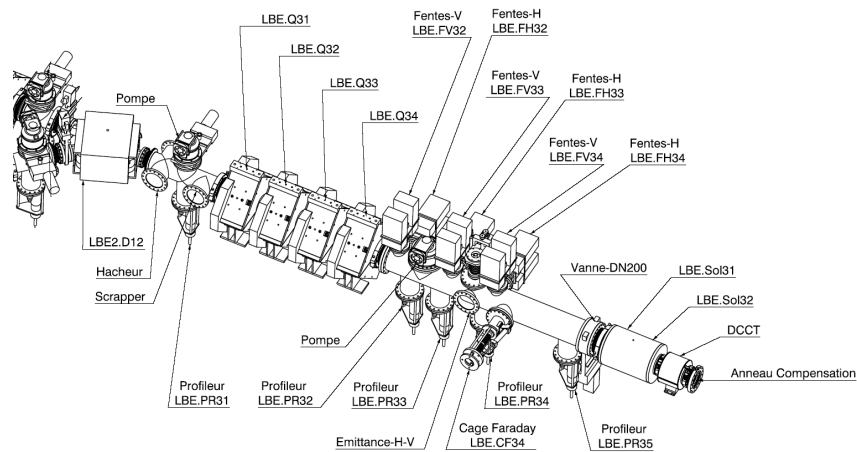


Figure 8 : Vue en perspective de la ligne LBE et nomenclature des éléments.

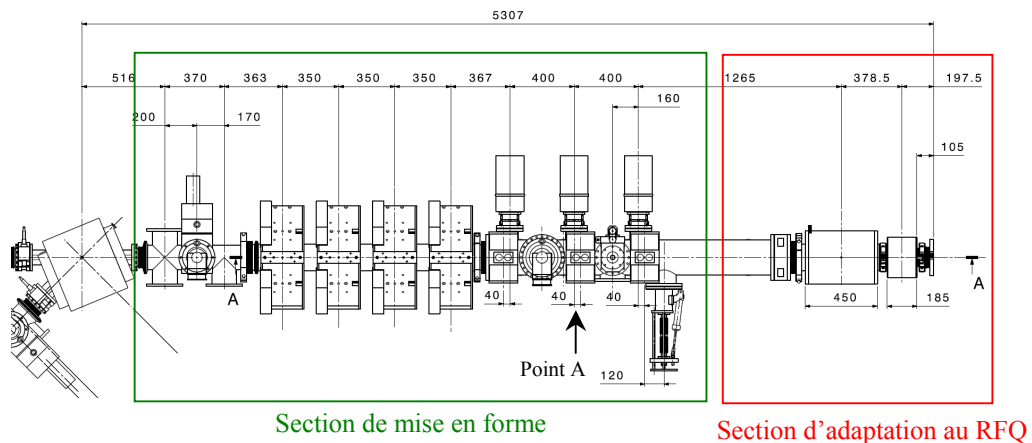


Figure 9 : Plan de la ligne LBE.

4.2 LBE – Section de mise en forme

→ Principe

La section de mise en forme, située en aval du dipôle LBE2.D12, a pour but de créer un faisceau rond à l'entrée du solénoïde d'injection LBE.Sol31. Deux fonctions supplémentaires de cette section sont : dans le cas d'un fonctionnement en faisceau pulsé, la définition du cycle utile à l'aide d'un hacheur et de son arrêt faisceau (« scrapper ») associé, et de manière plus générale, la définition de l'émission du faisceau à l'aide d'un système à 3 fentes. Ces fonctions doivent être valides dans tous les cas de figure (ions $q/A=1/3$, deutons, protons).

→ **Hacheur et arrêt faisceau associé**

Un hacheur électrostatique déviant le faisceau horizontalement est placé en sortie du dipôle LBE2.D12. Il est composé de 2 plaques de longueur utile 16 cm, espacées de 9 cm, et pouvant créer une tension inter-plaques de 10 kV au maximum. Ce hacheur sera utilisé pour faire varier le cycle utile du faisceau entre 0.1% et 100%, à des fréquences comprises entre 1 Hz et 100 Hz au minimum ; il pourra éventuellement aussi servir d'élément de sécurité. Le « scrapper » associé, positionné à 37 cm en aval du piquage du hacheur, est décalé par rapport à l'axe faisceau de $r = 43$ mm afin, dans tous les cas de figure, de pouvoir intercepter le faisceau dévié sans intercepter le faisceau nominal ; il devra être refroidi.

→ **Eléments magnétiques**

Un quadruplet de quadripôles (LBE.Q31, LBE.Q32, LBE.Q33, LBE.Q34) est utilisé pour contrôler totalement les paramètres du faisceau et créer un faisceau rond ($\beta_x = \beta_y$) de divergence nulle (« waist », $\alpha_x = \alpha_y = 0$) au centre du système à 3 fentes (point A).

→ **Système à 3 fentes**

Un jeu de 6 fentes, 3 horizontales (LBE.FH32, LBE.FH33, LBE.FH34) et 3 verticales (LBE.FV32, LBE.FV33, LBE.FV34), est placé juste derrière le quadruplet. Les 2 fentes centrales, au niveau desquelles le « waist » du faisceau (point A) est réglé, sont entourées des 2x2 fentes périphériques, d'ouverture plus larges, positionnées de façon symétrique par rapport aux fentes centrales. Toutes ces fentes devront être refroidies.

Un tel système permet, avant l'injection dans le RFQ, de supprimer le halo qui s'est formé en amont, et de définir les émittances transverses en maintenant un faisceau quasi elliptique dans les deux plans transverses (x, x') et (y, y').

→ **Diagnostics**

Quatre profileurs sont présents dans cette section. Le profileur LBE.PR31, positionné en début de section, est utilisé pour ajuster les optiques amont. Les 3 profileurs LBE.PR32, LBE.PR33 et LBE.PR34, associés à chacune des 3 paires de fentes, sont utilisés pour le réglage du quadruplet et l'ajustement des fentes. Les 2 profileurs extérieurs (LBE.PR32 et LBE.PR34) sont positionnés de façon symétrique par rapport au point A (fente centrale). Derrière le système à 3 fentes sont positionnés un émittance-mètre et une cage de Faraday (LBE.CF34), utiles pour les réglages et la caractérisation du faisceau sortant des lignes basse-énergie.

→ **Refroidissement nécessaire**

Le « scrapper » associé au hacheur devra pouvoir intercepter la puissance totale du faisceau, soit environ 260 W au maximum (deutons 6.5 mA). Il devra être refroidi. De plus, l'électronique du hacheur devra être protégée contre les neutrons (à 180° environ) qui seront émis au niveau du « scrapper ». Les quadripôles situés en aval du « scrapper » devront pouvoir supporter une puissance de 50 W au maximum (20% de la puissance faisceau totale), dans le cas d'une optique défavorable qui empêcherait le hacheur de dévier totalement le faisceau sur le « scrapper » (cf. Chapitre 5). Un refroidissement (à évaluer) devra être prévu si nécessaire. Concernant les 6 fentes destinées à supprimer le halo du faisceau, les spécifications sur les puissances à évacuer sont fixés à au moins 60 W pour chacune d'entre elles. Un refroidissement (à évaluer) devra être prévu si nécessaire. Enfin, pour tous les autres éléments de cette section, les pertes maximales envisageables (phases de réglage) sont de l'ordre de 15 W au maximum ; aucun refroidissement n'est donc a priori nécessaire.

→ **Vide**

Le niveau de vide requis dans la ligne est de 10^{-8} mbar pour des raisons de « stripping » (les ions $q/A = 1/3$ sont ici dimensionnant). Pour cela, 2 piquages dédiés ont été prévus : 1 au niveau du profileur LBE.PR31, et 1 au niveau du système à 3 fentes (la capacité de pompage reste à évaluer).

4.3 LBE – Section d'adaptation au RFQ

→ **Principe**

Cette section finale permet d'adapter le faisceau au RFQ pour maximiser sa transmission. Il est à noter que le réglage d'une telle injection est traditionnellement difficile.

→ **Eléments magnétiques**

L'adaptation est réalisée en utilisant un solénoïde possédant deux bobinages successifs alimentés séparément (LBE.Sol31 et LBE2.Sol32), ce qui donne la souplesse nécessaire pour adapter de façon adéquate le couple (α, β) du faisceau rond produit précédemment. De plus, le solénoïde sera mis sur roulettes pour donner un degré de liberté supplémentaire si nécessaire (2 cm de jeu). A noter que la position du solénoïde par rapport au système à 3 fentes a été optimisée de façon à pouvoir réaliser l'adaptation dans tous les cas de figure testés.

→ **Diagnostics**

Un profileur LBE.PR35, situé en amont du solénoïde, sera utilisé pour l'alignement. Entre le solénoïde et le RFQ, un DCCT blindé permettra de mesurer en permanence le courant faisceau pénétrant dans le RFQ, même en régime continu. Ceci sera très utile, notamment pour le réglage du RFQ par optimisation de sa transmission. Nous avons vérifié que le blindage prévu éliminait les effets du champ de fuite magnétique du solénoïde. En cas de problèmes majeurs d'injection au moment du « commissioning », le DCCT pourra être retiré pour laisser place à des diagnostics provisoires (profileur ou émittance-mètre). Enfin, une bague polarisée négativement (anneau de décompensation) positionnée sur la bride d'entrée du RFQ a pour rôle de faciliter l'adaptation du faisceau, en assurant que le faisceau pénétrant le RFQ est un faisceau non-compensé en termes de charge d'espace.

→ **Refroidissement nécessaire**

Pour tous les autres éléments de cette section, les pertes maximales envisageables (phases de réglage) sont de l'ordre de 15 W au maximum ; aucun refroidissement n'est donc a priori nécessaire. Il peut cependant s'avérer utile de prévoir un refroidissement près de la bride d'entrée du RFQ, de diamètre très étroit, en cas de désalignement imprévu du faisceau.

→ **Vide**

Le niveau de vide requis dans la ligne est de 10^{-8} mbar pour des raisons de « stripping » (les ions $q/A = 1/3$ sont ici dimensionnant). Le pompage s'effectuera via les piquages de la section précédente de mise en forme, et via le RFQ. Une vanne d'isolation est en effet placée avant le solénoïde.

5 OPTIQUE DANS LES LIGNES BASSE-ENERGIE

5.1 Hypothèses de calculs

→ Codes utilisés

L'optique des lignes basse-énergie a été simulée en utilisant les codes TRACEWIN et PARTRAN, développés par le CEA Saclay [21]. 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. Les effets de charge d'espace sont traités via la routine PICNIC. Les simulations multi-particulaires sont effectuées avec au moins 10 000 particules, et une distribution initiale dans les 2 plans de type gaussienne tronquée à $\pm 4\sigma$, hypothèse a priori pessimiste. Dans les figures présentées, les enveloppes sont elles tracées de façon arbitraire à $\sqrt{6}$ fois la taille rms, ce qui correspond à environ 95% du faisceau pour une telle distribution.

Ces codes permettent également de simuler les procédures de démarrage ou de réglage des lignes 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 simulations des lignes basse-énergie du driver de SPIRAL-2 étant basées sur ces uniques outils, une attention particulière a été apportée, au cours de l'APD et de la phase de consolidation, à la comparaison avec d'autres codes de simulation tels que LIONS_LINAC [22], TRANSPORT [23] ou BETA [24]. De plus, PARTRAN a récemment fait l'objet d'une étude comparative [25] incluant la plupart des codes de référence de la communauté dans le cadre du projet HIPPI [26].

→ Compensation de charge d'espace

Un des aspects les plus mal connus dans cette étude concerne la valeur du taux de compensation de charge d'espace dans les lignes. Cette compensation est créée par la production d'électrons due à l'ionisation du gaz résiduel. D'après [27], il est raisonnable de s'attendre, en moyenne le long des lignes basse énergie, à un taux de compensation de l'ordre de 80%. Ceci est cohérent avec [4], qui évalue à 70% le taux de compensation dans la ligne A-Phoenix.

La valeur de ce taux de compensation est critique dans le cas de l'optique deutons (et protons), du fait notamment des courants mis en jeu (jusqu'à 6.5 mA) et de la faible masse des ions. Elle l'est par contre beaucoup moins pour l'optique des ions $q/A=1/3$. De ce fait, afin de rendre les lignes LBE2 et LBE les plus acceptantes possibles, nous avons choisi de considérer, dans le cas des deutons, des taux de compensation pouvant être compris entre 50% et 100% (avec une valeur nominale de 80%).

→ Effet de magnétisation en sortie de source

L'effet de « magnétisation » du faisceau en sortie de source ECR est rarement pris en compte dans les simulations et n'a pas été introduit lors de l'APD SPIRAL-2. Cette magnétisation du faisceau, due au franchissement du champ de fuite solénoïdal de la source [28], peut être important dans le cas des sources d'ions lourds à très hautes fréquences, ce qui sera le cas pour la future source A-Phénix. Du point de vue de la condition initiale pour les études de dynamique faisceau, cela se traduit par une corrélation croisée des 2 plans transverses.

Hors charge d'espace, l'on peut montrer qu'il est légitime de négliger ces corrélations croisées, mais à forte intensité, la conjugaison de la magnétisation du faisceau et des effets de charge d'espace peut se traduire par un transfert d'émittance entre les 2 plans transverses. Après modification de TRACEWIN pour permettre d'introduire de telles corrélations croisées, une vérification récente a permis de vérifier que les éléments magnétiques de la ligne LBE1 permettent de gérer convenablement cet effet (cf. Chapitre 5).

→ Faisceaux d'entrée pour optiques nominales

Sur la base des mesures de sortie source présentées précédemment (cf. Chapitre 1), nous avons choisi de considérer, à la sortie de l'électrode d'extraction des sources, les 2 faisceaux « d'entrée » nominaux suivants :

- un faisceau d'ions $q/A=1/3$ de 60 keV, d'émittance $0.2 \pi \text{ mm.mrad}$ norm rms et de paramètres de Twiss $\alpha=0.5$ et $\beta=0.12 \text{ mm}/\pi \text{ mrad}$ dans les 2 plans, avec un taux de compensation de charge d'espace le long de la ligne de 70% ;

- un faisceau de deutons de 40.27 keV, d'émittance 0.1π .mm.mrad norm rms et de paramètres de Twiss $\alpha=-3.4$ et $\beta=0.32$ mm/ π .mrad dans les 2 plans, avec un taux de compensation de charge d'espace le long de la ligne de 80% ;

Cependant, afin de prendre en compte les nouveaux besoins en protons, ainsi que les différentes incertitudes déjà mentionnées (grande diversité des faisceaux d'ions $q/A=1/3$ à produire, future source A-Phoenix en construction, possibles effets de corrélations croisées dues au champ magnétique de la source, valeur du taux de compensation de charge d'espace...), les 4 faisceaux « d'entrée » suivants ont également été considérés pour nos optiques de référence :

- un faisceau d'ions $q/A=1/3$ de 60 keV, d'émittance 0.4π .mm.mrad norm rms et de paramètres de Twiss $\alpha=-1$ et $\beta=0.2$ mm/ π .mrad dans les 2 plans, avec un taux de compensation de charge d'espace le long de la ligne de 70% ;
- un faisceau de deutons de 40.27 keV, d'émittance 0.1π .mm.mrad norm rms et de paramètres de Twiss $\alpha=-3.4$ et $\beta=0.32$ mm/ π .mrad dans les 2 plans, avec un taux de compensation de charge d'espace le long de la ligne de 50% ;
- un faisceau de deutons de 40.27 keV, d'émittance 0.1π .mm.mrad norm rms et de paramètres de Twiss $\alpha=-3.4$ et $\beta=0.32$ mm/ π .mrad dans les 2 plans, avec un taux de compensation de charge d'espace le long de la ligne de 100%.
- un faisceau de protons de 20.15 keV, d'émittance 0.1π .mm.mrad norm rms et de paramètres de Twiss $\alpha=-3.4$ et $\beta=0.32$ mm/ π .mrad dans les 2 plans, avec un taux de compensation de charge d'espace le long de la ligne de 80%.

5.2 Procédures de réglage de la ligne ions $q/A=1/3$ (LBE1 + LBE)

Les procédures de réglage de l'optique des lignes ont fait l'objet d'une étude préalable, et ont été pour la plupart complètement simulées avec les codes de transport afin de vérifier leurs comportements, à la fois en calcul enveloppe (1^{er} ordre) et en calcul multi-particulaire.

La ligne ions $q/A=1/3$ se règle en plusieurs 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 quadrupôle a été considéré. Tous les quadrupôles en sont équipés et par convention, un « steerer » nommé B_Y donne un « kick » sur X^* , et un « steerer » B_X un « kick » sur Y^* . Les valeurs mentionnées lors de la description des différentes étapes correspondent au réglage de l'optique nominale pour des ions $q/A=1/3$ d'émittance initiale 0.2π .mm.mrad norm rms.

→ Etape 0

Réglage de la source (LBE1.SI1) en utilisant la cage de Faraday de sortie source (LBE1.CF11) pour mesurer le courant total extrait.

→ Etape 1

Réglage du premier dipôle (LBE1.D11) à sa valeur nominale (attention à bien sélectionner l'ion d'intérêt), et réglage du solénoïde LBE1.Sol11 et du triplet (LBE1.Q11, LBE1.Q12 & LBE1.Q13, tous indépendants) de manière à obtenir sur le profileur LBE1.PR13 situé juste derrière la fente de séparation (point image), la taille faisceau désirée ($X_{RMS}=1.6$ mm & $Y_{RMS}=5.2$ mm). Durant ce réglage, la cage de faraday LBE1.CF13 est en place pour optimiser la transmission.

Le réglage est ici effectué pour atteindre une résolution théorique en q/A (calcul enveloppe) de $R=150$ [6,7]. Pour cela, il faut que la tache horizontale marginale du faisceau au point image vérifie $\Delta x \leq T_{16} / 2 R$, où T_{16} est le terme dispersif du système optique qui vaut ici 2.4m. La condition à vérifier est donc ici $\Delta x \leq 8$ mm. En terme de rayon rms, cela correspond, en considérant un rayon marginal de $\sqrt{6}$ fois la taille rms, à la condition : $X_{RMS} \leq 1.6$ mm.

Dans le plan vertical, la taille demandée au point image ($Y_{RMS}=5.2$ mm) permet de minimiser l'extension verticale du faisceau dans le dipôle.

[Diagnostic_1 dans le fichier TRACEWIN]

→ Etape 2

On vérifie la présence d'un « waist » sur le profileur LBE1.PR13 en faisant varier légèrement le gradient du quadrupôle LBE1.Q13 autour de la valeur obtenue à l'étape précédente. On peut s'aider de la cage de faraday LBE1.CF13. Les fentes de nettoyage LBE1.FH11 et LBE1.FV11 pourront aussi éventuellement être utilisées pour

vérifier le « waist » du point objet. Elles seront ensuite ajustées pour intercepter une partie des polluants sans dégrader la transmission de l'ion d'intérêt ; leur ouverture sera de l'ordre de \varnothing 100 mm dans chaque plan.

[Diagnostic_1 dans le fichier TRACEWIN]

→ **Etape 3**

Ajustement de l'hexapôle LBE1.Hx11 pour compenser les non-linéarités d'ordre 2 du premier dipôle, en s'aidant du profileur LBE1.PR13, voire, ultérieurement, de la mesure d'émittance présente dans l'achromat. L'effet de cet hexapôle est illustré sur la Figure 10. Une fois l'hexapôle ajusté, la force du second hexapôle (LBE1.Hx12) sera réglée par symétrie avec une valeur opposée à celle du premier*.

[Diagnostic_2 dans le fichier TRACEWIN]

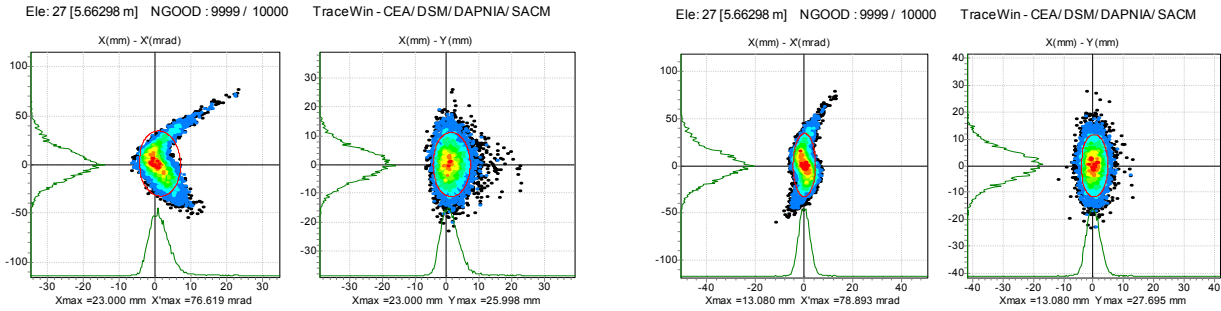


Figure 10 : Tache faisceau dans les espaces (x,x') et (x,y) avant (gauche) et après (droite) le réglage de l'hexapôle.

→ **Etape 4**

Ajustement des steerers B_Y de LBE1.Q11, B_X de LBE1.Q12 et B_Y de LBE1.Q13 afin d'aligner le centroïde du faisceau sur les profileurs LBE1.PR13 et LBE1.PR12. Notons cependant qu'il n'est pas évident que l'on verra quelque chose d'exploitable sur LBE1.PR12 si trop de polluants sortent du dipôle.

[Diagnostic_3 dans le fichier TRACEWIN]

→ **Etape 5**

Ajustement de la fente horizontale de nettoyage LBE1.FH12 pour couper les queues subissant les effets non-linéaires d'ordres supérieurs dans le dipôle. On pourra s'aider pour cela du profileur LBE1.PR13 et de la cage de Faraday LBE1.CF13 en dégradant la transmission de l'ion d'intérêt de quelques %. L'ouverture nominale de la fente LBE1.FH12 (placée à 45cm en aval du point objet) est d'environ \varnothing 36 mm (plan horizontal).

→ **Etape 6**

Ajustement de la fente horizontale de tri LBE1.FH13 en visualisant les faisceaux à séparer sur le profileur LBE1.PR13 et en optimisant la transmission de l'ion d'intérêt sur la cage de Faraday LBE1.CF13. Un ajustement de la fente de tri à \varnothing 10 mm permet d'atteindre une résolution pratique en q/A (calcul multi-particulaire) de l'ordre de 115 avec une transmission supérieure à 95%. La Figure 11 illustre les performances du système de tri pour des espèces d'ions distantes de +/- 1 % en q/A.

→ **Etape 7**

Ajustement du second dipôle et ajustement du triplet (LBE1.Q14, LBE1.Q15 & LBE1.Q16, avec LBE1.Q16 de même gradient que LBE1.Q14) de manière à obtenir un « waist » sur les profileurs LBE1.PR14 et LBE1.PR22 tout en assurant la symétrie de l'optique en égalisant les tailles faisceau dans les profileurs LBE1.PR13 et LBE1.PR14. On devra partir de valeurs calculées vérifiant l'achromaticité de l'ensemble. Cette propriété devra être revérifiée après le réglage des « waists ». Pour ce faire, on fera varier les champs des 2 dipôles et des 3 quadrupôles de manière identique tout en vérifiant que le centroïde du faisceau n'est pas affecté.

[Diagnostic_4 dans le fichier TRACEWIN]

→ **Etape 8**

Ajustement des steerers B_X de LBE1.Q14, B_Y de LBE1.Q15 et B_X de LBE1.Q16 afin d'aligner le centroïde du faisceau sur les profileurs LBE1.PR21 et LBE1.PR22.

[Diagnostic_6 dans le fichier TRACEWIN]

* On peut cependant imaginer mieux optimiser la valeur du second hexapôle par la suite, en disposant un émittance-mètre de façon provisoire en place du profileur LBE1.PR22. [Diagnostic_5 dans le fichier TRACEWIN]

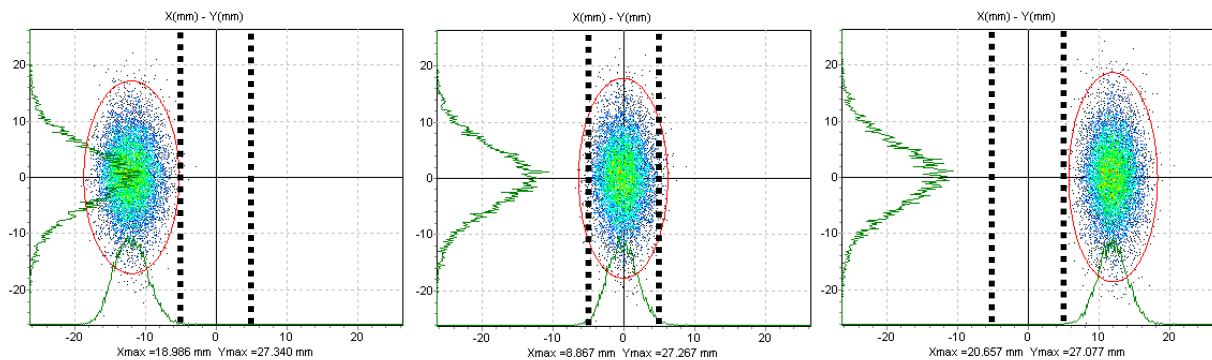


Figure 11 : Tache faisceau au niveau de la fente de tri (traits pointillés) pour le faisceau nominal de $q/A = 1/3$ (centre), et pour des faisceaux de $q/A = 1/3 - 1/100$ (gauche) et $q/A = 1/3 + 1/100$ (droite).
Les ellipses rouges représentent 99% du faisceau.

→ **Etape 9**

Ajustement du triplet (LBE1.Q21, LBE1.Q22 & LBE1.Q23, tous indépendants) de manière à obtenir un faisceau rond (même taille en X et en Y) de taille proche de 8.5 mm rms, sur les deux profileurs LBE1.PR23 et LBE1.PR24. Ceci permet de minimiser les enveloppes à la traversée du futur dipôle LBE4.D13.

[Diagnostic_9 dans le fichier TRACEWIN]

→ **Etape 10**

Ajustement des steerers B_x de LBE1.Q21, B_y de LBE1.Q22 et B_x de LBE1.Q23 afin d'aligner le centroïde du faisceau sur les profileurs LBE1.PR23 et LBE1.PR24.

[Diagnostic_10 dans le fichier TRACEWIN]

→ **Etape 11**

Ajustement du triplet (LBE1.Q24, LBE1.Q25 & LBE1.Q26, tous indépendants) de manière à obtenir un faisceau rond (même taille en X et en Y) de taille proche de 6 mm rms, sur les deux profileurs LBE1.PR25 et LBE1.PR31. Ceci permet de minimiser les enveloppes à la traversée à la fois du dipôle deutons LBE2.D12 et du hacheur de la ligne LBE.

[Diagnostic_11 dans le fichier TRACEWIN]

→ **Etape 12**

Ajustement des steerers B_x de LBE1.Q24, B_y de LBE1.Q25 et B_x de LBE1.Q26 afin d'aligner le centroïde du faisceau sur les profileurs LBE1.PR25 et LBE1.PR31.

[Diagnostic_12 dans le fichier TRACEWIN]

→ **Etape 13**

Ajustement du quadruplet (LBE.Q31, LBE.Q32, LBE.QP33 & LBE.Q34, tous indépendants) de manière à obtenir un faisceau rond (même taille en X et en Y) de taille de l'ordre de 3.5 à 4 mm rms sur le profileur LBE.PR33, avec les mêmes profils sur les profileurs LBE.PR32 & LBE.PR34 afin de créer un « waist » au niveau des fentes centrales LBE.FH33 et LBE.FV33 du système de définition d'émittance.

Ce système à 3 (×2) fentes a été dimensionné pour obtenir des tailles faisceau environ $N=\sqrt{2}$ fois plus grandes au niveau des fentes périphériques qu'au niveau des 2 fentes centrales. La taille du « waist » à créer au centre du système s'exprime donc, en fonction de l'émittance normalisée du faisceau ϵ_{norm} et de sa vitesse réduite β :

$$X_{RMS}^2 = Y_{RMS}^2 = \frac{L \epsilon_{norm}}{\beta \sqrt{N^2 - 1}}, \text{ où } L \text{ est la distance inter-fentes (400 mm) ; on a donc ici } X_{RMS} \approx 7.8 \times \sqrt{\epsilon_{norm}} \text{ en mm.}$$

[Diagnostic_14 dans le fichier TRACEWIN]

→ **Etape 14**

Ajustement des steerers B_y de LBE.Q31, B_x de LBE.Q32, B_y de LBE.Q33 et B_x de LBE.Q34 afin d'aligner le centroïde du faisceau sur les profileurs LBE.PR33 et LBE.PR34. Ici le nombre de steerers est suffisant pour éviter un réglage par itérations successives.

[Diagnostic_15 dans le fichier TRACEWIN]

→ **Etape 15**

Ajustement des 6 fentes du système de définition d'émission, de façon à supprimer le halo présent, ou même à redéfinir l'émission (ou/et le courant) si nécessaire en coupant le faisceau de façon plus importante. On utilisera les profileurs associés à chaque paire de fentes pour cela (LBE.PR31, LBE.PR32, LBE.PR33) ainsi que le profileur LBE.PR34. L'ouverture nominale des fentes pour suppression du halo est de l'ordre \varnothing 20 mm dans chaque plan pour les fentes centrales (LBE.FH33, LBE.FV33), et de l'ordre de \varnothing 28 mm dans chaque plan pour les fentes périphériques (LBE.FH32, LBE.FV32 et LBE.FH34, LBE.FV34). L'émission du faisceau peut être mesurée à l'aide de l'émission-mètre présent en aval des 6 fentes. Durant tous les réglages précédents, la cage de Faraday LBE.CF34 est utilisée pour vérifier la transmission, et comme arrêt faisceau.

→ **Etape 16**

Ajustement des 2 bobines du solénoïde (LBE.Sol31, LBE.Sol32) pour optimiser la transmission du RFQ en utilisant le DCCT d'injection. En cas de problème d'injection dans le RFQ, les étapes n°13 à n°15 pourront être reprises de façon légèrement différente avec l'appui de simulations.

Pour une adaptation au RFQ $q/A=1/3$, le faisceau doit avoir une taille d'environ 1.65 mm rms, et une divergence de l'ordre de 26 mrad (cas émission $\sim 0.2 \pi$.mm.mrad norm rms, courant ~ 1 mA).

[Diagnostic_16 dans le fichier TRACEWIN]

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

→ **Optique nominale ($q/A = 1/3, 0.2 \pi$.mm.mrad norm rms)**

L'optique nominale pour les ions $q/A=1/3$ est illustrée sur la Figure 12, où les enveloppes représentent environ 95% du faisceau. La transmission totale est de l'ordre de 85 à 90%, avec environ 5% du faisceau intercepté dans la section de tri (fentes de nettoyage et fente de tri), et presque 10% en fin de ligne dans le système à 3 fentes (cf. Figures 13). Hors fentes, la transmission est supérieure à 99.9%. Au passage de la double-déviator, on observe une augmentation d'émission de l'ordre de 50 % dans le plan horizontal, du fait des aberrations d'ordre supérieur dans les dipôles, et ce malgré la présence des hexapôles ; ceux-ci sont en fait essentiellement réglés pour maximiser la résolution (optimisation du point image) et non pour minimiser l'émission en fin de ligne. Le nettoyage du halo (système à 3 fentes) permet au final de retrouver sans problème les émissions initiales avant l'injection dans le RFQ.

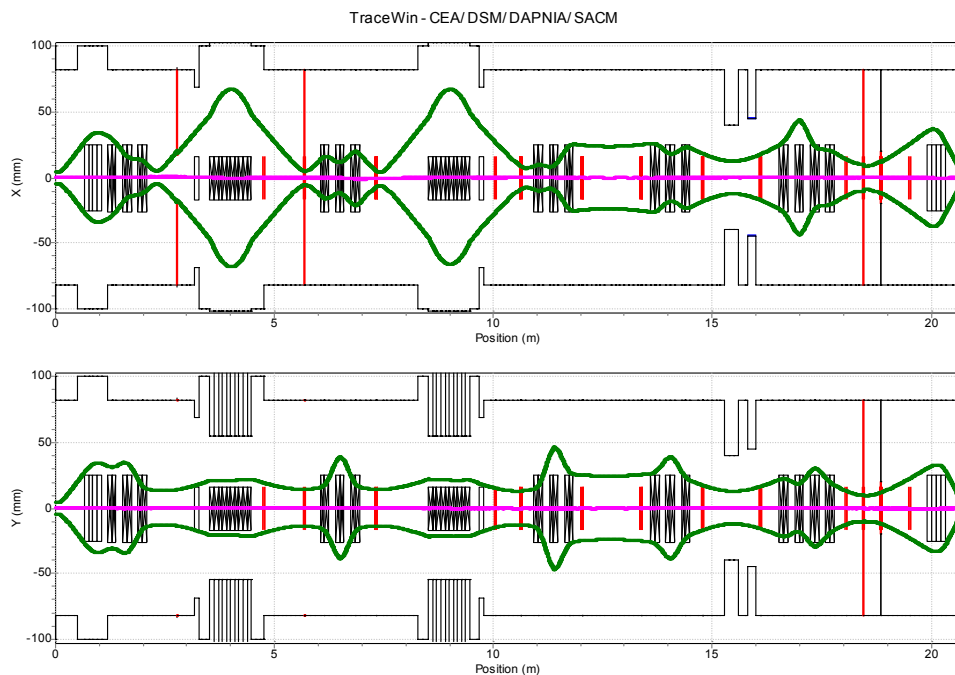
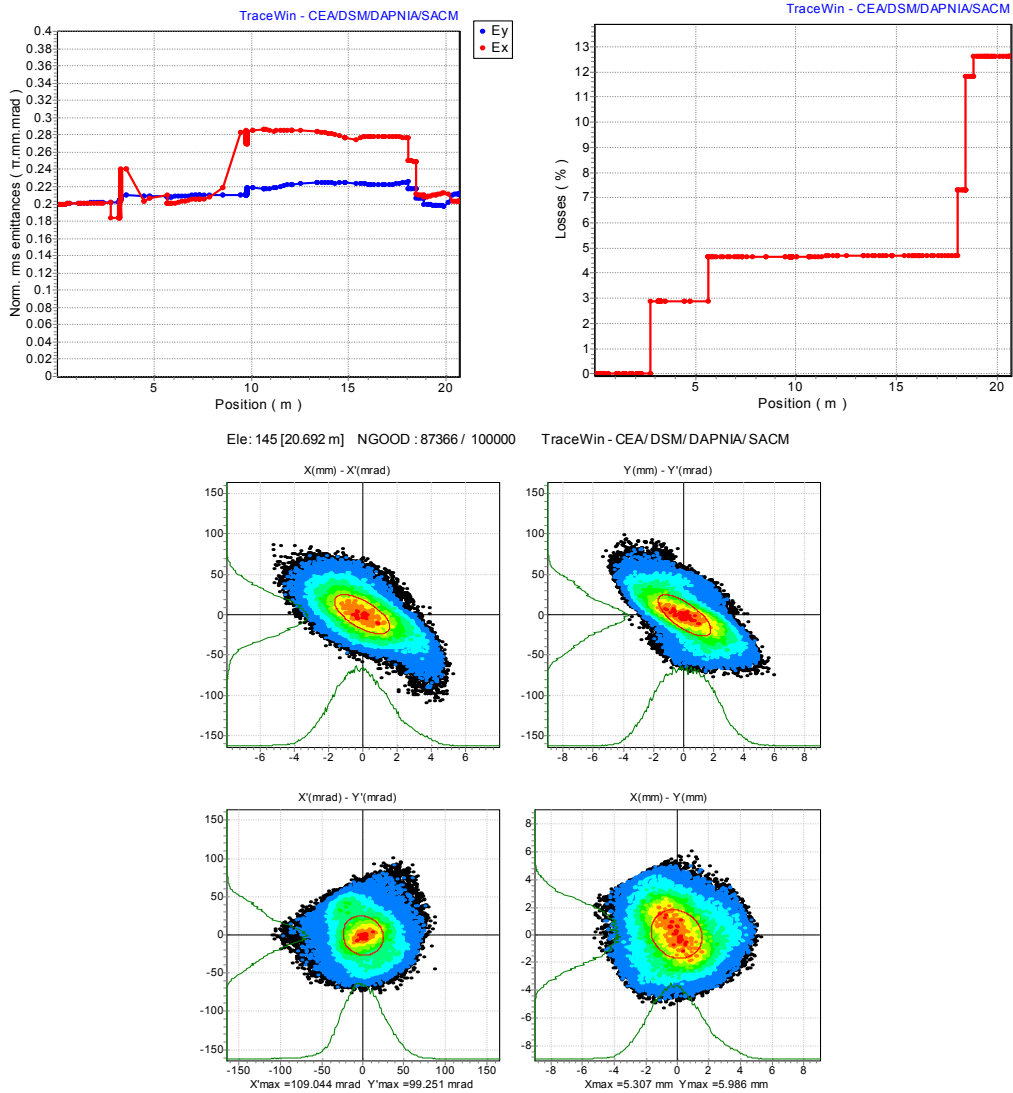
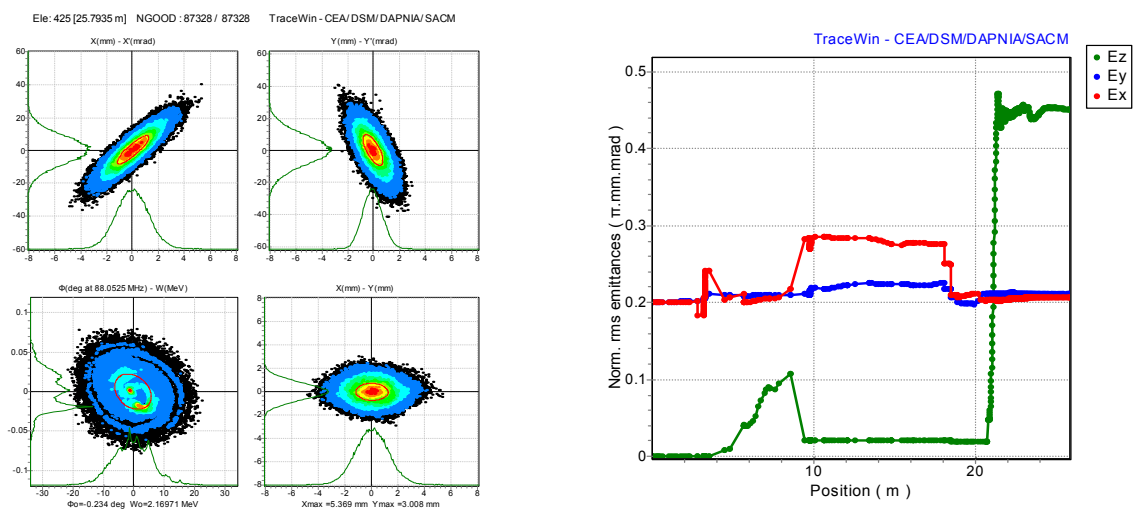


Figure 12 : Optique nominale pour les ions $q/A = 1/3, 0.2 \pi$.mm.mrad norm. rms ; les enveloppes, issues d'un calcul multi-particulaire, sont données à $\sqrt{6}$ fois la taille rms, soit environ 95% du faisceau total.



Figures 13 : Optique nominale pour les ions $q/A = 1/3$; en haut : évolution des émittances norm. rms transverses (gauche) et pertes faisceau (droite) ; en bas : faisceau à l'entrée du RFQ (le cercle rouge représente la valeur rms).



Figures 13b : Optique nominale pour les ions $q/A = 1/3$; à gauche : faisceau à la sortie du RFQ ; à droite : évolution des émittances dans la ligne et le RFQ.

→ Cas d'une émittance d'entrée plus importante ($0.4 \pi \text{ mm.mrad norm rms}$)

Dans le cas d'une émittance d'entrée de $0.4 \pi \text{ mm.mrad norm rms}$, la ligne est réglée strictement de la même façon*, et l'optique obtenue est similaire, avec un faisceau $\sqrt{2}$ plus gros en moyenne. Pour cette raison, c'est ce cas qui est dimensionnant en terme de diamètre des tubes faisceau dans toute la ligne LBE1 (cf. Annexe 3). Il est également dimensionnant en ce qui concerne les tensions de fonctionnement du hacheur (cf. ci-après).

→ Optique en mode hacheur

Les caractéristiques du hacheur ont été spécifiées pour pouvoir assurer un fonctionnement dans les 6 optiques de référence étudiées. Ce sont bien sûr les ions les plus lourds (ions $q/A = 1/3$) qui sont dimensionnant, puisqu'ils nécessitent des tensions de l'ordre de 9 à 10 kV total (+/- 4.5 à 5 kV) (cf. Annexe 3). L'optique en fonctionnement hacheur est illustrée sur la Figure 14, dans le cas d'un « gros » faisceau d'ions $q/A = 1/3$ d'émittance $0.4 \pi \text{ mm.mrad norm rms}$, cas le plus défavorable. Dans un tel cas, 15% du faisceau n'est pas intercepté par le « scraper », et se perd totalement dans le premier quadrupôle (qui est divergent dans le plan horizontal pour accentuer la déviation). Notons que les simulations sont faites en considérant que les plaques du hacheur sont centrées sur leur piquage dédié ; la situation pourra être améliorée en reculant autant que possible le hacheur vers l'amont (côté dipôle).

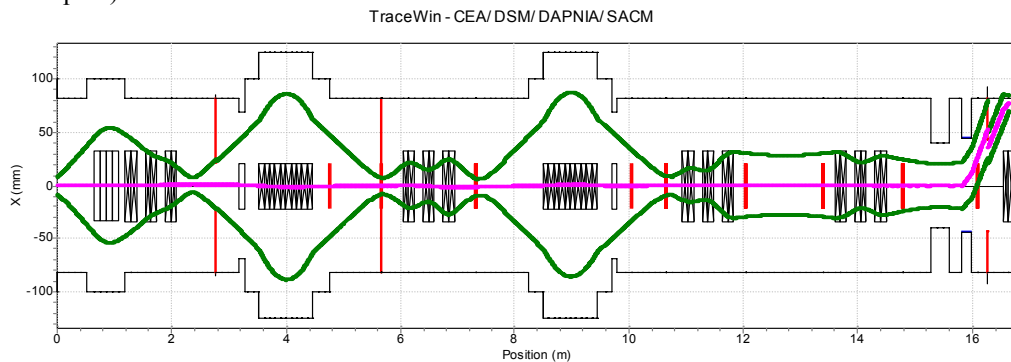


Figure 14 : Enveloppe horizontale hacheur « ON » (+/- 4.9 kV) pour les ions $q/A = 1/3$, $0.4 \pi \text{ mm.mrad norm rms}$ (enveloppe issue d'un calcul multi-particulaire et donnée à $\sqrt{6}$ fois la taille rms, soit environ 95% du faisceau total).

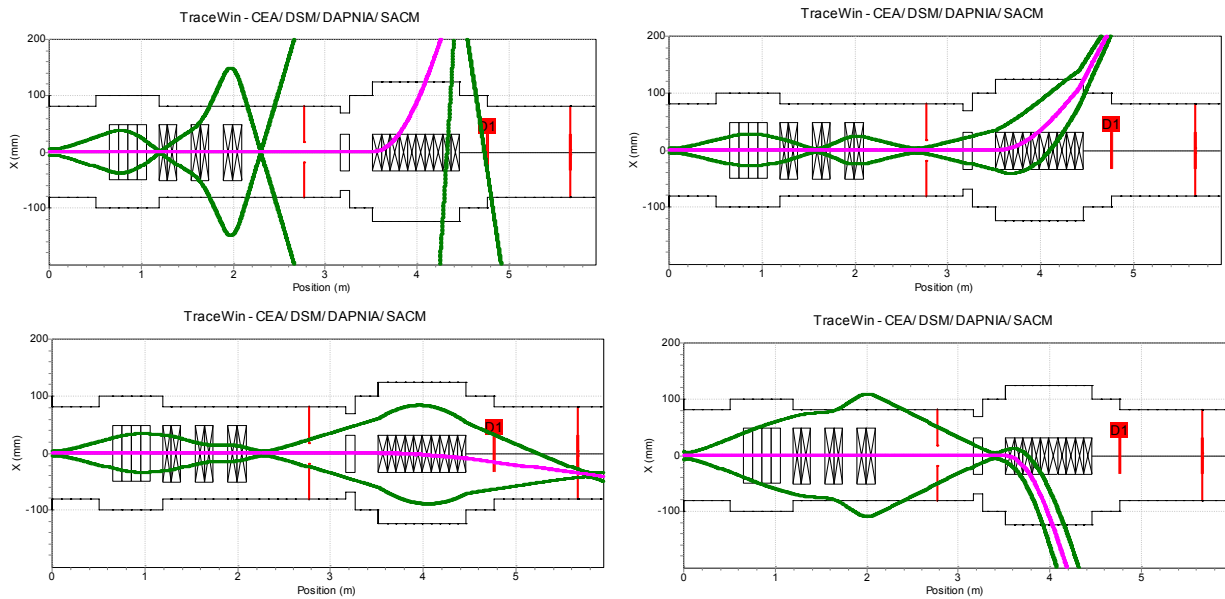
→ Comportement des polluants

Les études de comportement des polluants [11] montrent que l'on s'attend, pour un faisceau d'oxygène de 1.3 mA, à des pertes de l'ordre de : moins de 1 W dans le solénoïde de sortie source, environ 10 W dans le triplet, de 15 à 20 W sur chacune des 3 fentes de nettoyage, de 5 à 10 W dans les tubes situés entre le triplet et l'hexapôle LBE1.Hx11, environ 15 W sur l'hexapôle, 150 W dans la chambre du dipôle, et près de 40 W sur le tube en aval du dipôle.

A partir de ces résultats, et afin d'anticiper les divers types de faisceaux d'ions susceptibles d'être produits par la source $q/A = 1/3^\dagger$ ainsi que les pertes maximales envisageables lors des phases de réglage (10 mA total avec un cycle utile de 5%), les spécifications sur les puissances à évacuer sont fixées à au moins : 500 W sur la chambre du dipôle, 300 W sur le tube en aval du dipôle, 300 W sur la fente de tri, 60 W sur chacune des 3 fentes de nettoyage, 50 W sur l'hexapôle et 30 W dans tous les autres éléments de la ligne. Les Figures 15 illustrent, pour information, le comportement de polluants avec $q/A = 1$ (protons), $q/A = 1/2$, $q/A = 1/3 - 1/100$ et $q/A = 1/14$ (N^+) dans le cas d'une optique réglée pour les ions $q/A = 1/3$.

* Les différences dans la procédure de réglage se résument principalement (cf. fichier TRACEWIN de l'Annexe 3) à de plus grandes tailles faisceaux requises dans les profileurs (et donc une résolution dégradée de 150 théorique à 100 théorique) ; l'ouverture optimale des différentes fentes est bien sûr aussi plus grande.

† Un facteur de sécurité de 3 est appliqué aux pertes calculées pour l'élaboration des spécifications afin d'anticiper les divers types de faisceaux d'ions susceptibles d'être produits par la source. De plus, nous estimons que dans le cas de polluants avec des q/A très proches (de l'ordre de 1%), les puissances perdues sur la fente de tri et le tube amont pourraient peut-être atteindre jusqu'à 2 ou 3 centaines de W au maximum.



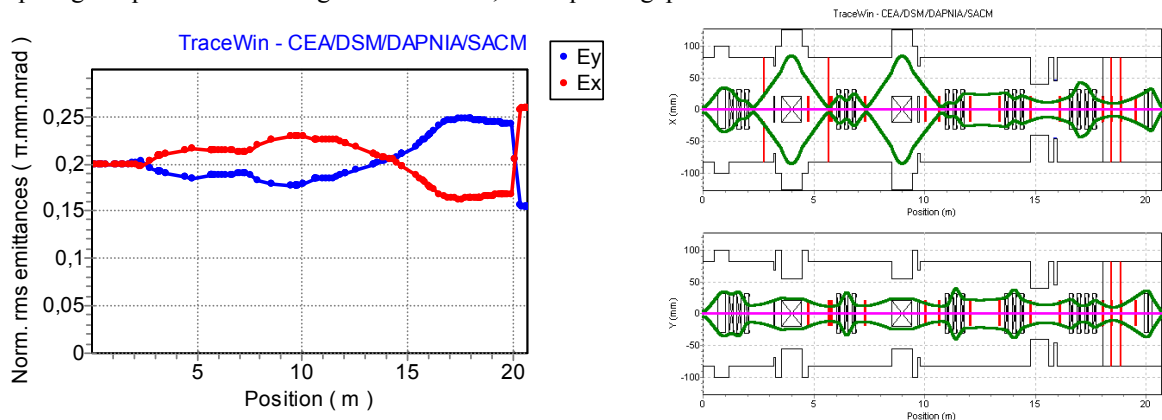
Figures 15 : Comportement des ions $q/A = 1$ (en haut à gauche), $q/A = 1/2$ (en haut à droite), $q/A = 97/300$ (en bas à gauche), et $q/A = 1/14$ (en bas à droite) dans le plan horizontal (calculs enveloppe, donnés à $\sqrt{6}$ fois la taille rms).

→ Effet de la magnétisation de sortie source

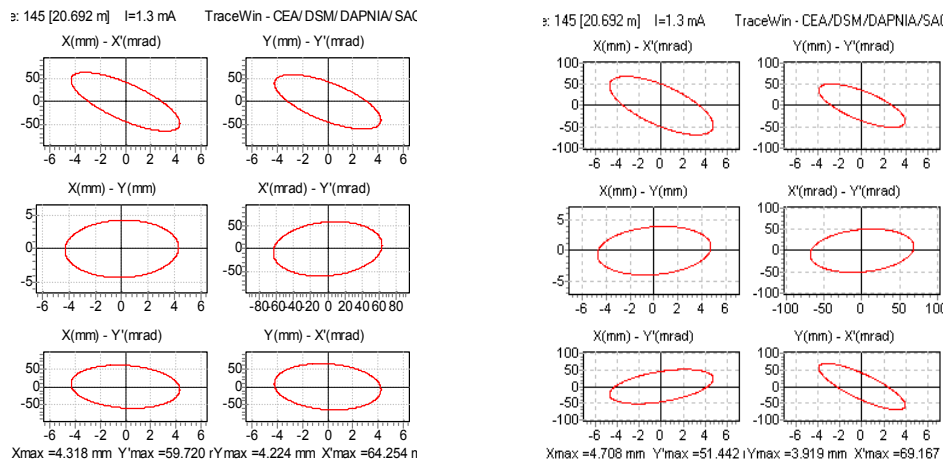
Nous avons procédé à plusieurs tests pour évaluer l'effet des corrélations croisées en présence de charge d'espace, dans le cas nominal. La méthode a consisté tout d'abord à modifier la matrice faisceau initiale en introduisant les valeurs de corrélation dans la 2^{ème} diagonale, puis à envoyer le faisceau dans la ligne basse-énergie sans en modifier le réglage. Les Figures 16 montrent l'effet produit sur les 2 émittances transverses et les enveloppes faisceau (cas d'une source fonctionnant à 28 GHz). Les Figures 17 montrent le portrait du faisceau, sans et avec magnétisation, à l'entrée du RFQ : on observe que des profils légèrement modifiés.

Par un nouveau réglage de la ligne peu différent du réglage initial, nous avons vérifié que l'on pouvait rétablir un faisceau rond en entrée du solénoïde d'injection, et entrer dans le RFQ avec les conditions requises. Ensuite, dans le RFQ, l'effet des corrélations croisées devient négligeable du fait que le faisceau reste presque rond tout en étant accéléré. De même l'effet sera négligeable à plus haute énergie.

Nous pensons donc que ce problème de magnétisation sera observable dans la ligne basse-énergie (on ne peut l'éviter), et qu'il pourra être maîtrisé. Nous préconisons cependant d'étudier une méthode de mesure au moment des tests à Grenoble, permettant de quantifier cet effet, qui dépend à la fois de la masse de l'ion d'intérêt, de l'intensité du faisceau, du taux de compensation dans la ligne, de la fréquence de la source, du profil axial du champ magnétique de fuite le long de l'extraction, ainsi que du gap accélérateur.



Figures 16 : Effet des corrélations croisées de sortie source (28 GHz) sur les émittances (gauche) et les enveloppes faisceau (droite) ; calculs enveloppe pour le réglage nominal $q/A = 1/3$.



Figures 17 : Portrait du faisceau $q/A=1/3$ en entrée du RFQ sans (gauche) et avec (droite) effet de magnétisation.

5.4 Procédures de réglage de la ligne deutons (LBE2 + LBE)

La ligne deutons se règle en plusieurs 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 quadrupôle a été considéré. Tous les quadrupôles en sont équipés et par convention, un « steerer » nommé B_Y donne un « kick » sur X' , et un « steerer » B_X un « kick » sur Y' . Les valeurs mentionnées lors de la description des différentes étapes correspondent au réglage de l'optique nominale pour des deutons d'émittance initiale $0.1 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ norm rms, avec un taux de compensation de charge d'espace dans les lignes de 80%. Il est important de noter que pour des raisons de radioprotection, la phase préliminaire du réglage de cette ligne sera effectuée en utilisant des ions moléculaires H_2^+ .

→ Etape 0

Pré-réglage du double solénoïde LBE2.Sol11 / LBE2.Sol12 en utilisant le profileur LBE2.PR11, et réglage de la source (LBE1.SI1) en utilisant la cage de Faraday LBE2.CF11 et le DCCT.

[Diagnostic_0 dans le fichier TRACEWIN]

→ Etape 1

Réglage du premier dipôle (LBE2.D11) à sa valeur nominale (attention à bien sélectionner l'ion d'intérêt), et ajustement du double solénoïde LBE2.Sol11 / LBE2.Sol12 de manière à obtenir un faisceau rond (même taille en X et en Y) de taille identique sur les deux profileurs LBE2.PR11 et LBE2.PR12 situés de part et d'autre du premier dipôle à 45° . Ceci permet de minimiser la taille du faisceau à la traversée du dipôle. Durant ce réglage, la cage de Faraday LBE2.CF12 est en place pour optimiser la transmission. Les 2 champs du solénoïde sont réglés à l'identique, sauf si nécessaire. A noter que, dans certains cas, la visualisation du faisceau dans le premier profileur pourra être rendue difficile du fait de la présence d'un halo important de polluants.

[Diagnostic_0 dans le fichier TRACEWIN]

→ Etape 2

Ajustement des 2 steerers situés derrière le solénoïde (1 horizontal et 1 vertical) afin d'aligner le centroïde du faisceau sur les profileurs LBE2.PR11 et LBE2.PR12.

[Diagnostic_1 dans le fichier TRACEWIN]

→ Etape 3

Ajustement du triplet (LBE2.Q14, LBE2.Q15 & LBE2.Q16, avec LBE2.Q14 de même gradient que LBE2.Q16) de manière à obtenir des tailles en X et en Y identiques sur les 2 profileurs LBE2.PR12 & LBE2.PR13. On devra partir de valeur calculées vérifiant l'achromaticité de l'ensemble.

[Diagnostic_2 dans le fichier TRACEWIN]

→ **Etape 4**

Réajustement du triplet (LBE2.Q14, LBE2.Q15 & LBE2.Q16, tous indépendants) de manière à obtenir l'achromaticité. Pour vérifier cette propriété, on bougera les champs des 2 dipôles et des 3 quadrupôles de manière identique tout en vérifiant que le centroïde du faisceau n'est pas affecté. On utilisera pour cela les profileurs LBE2.PR13 et LBE2.PR31.

[Diagnostic_3 dans le fichier TRACEWIN]

→ **Etape 5**

Ajustement des steerers B_Y de LBE2.QP14, B_X de LBE2.QP15 et B_Y de LBE2.QP16 afin d'aligner le centroïde du faisceau sur les profileurs LBE2.PR13 et LBE2.PR31.

[Diagnostic_6 dans le fichier TRACEWIN]

→ **Etape 6**

Ajustement du quadruplet (LBE.Q31, LBE.Q32, LBE.QP33 & LBE.Q34, tous indépendants) de manière à obtenir un faisceau rond (même taille en X et en Y) de taille de l'ordre de 4 à 4.5 mm rms sur le profileur LBE.PR33, avec les mêmes profils sur les profileurs LBE.PR32 & LBE.PR34 afin de créer un « waist » au niveau des fentes centrales LBE.FH33 et LBE.FV33 du système de définition d'émission.

[Diagnostic_14 dans le fichier TRACEWIN]

→ **Etape 7**

Ajustement des steerers B_Y de LBE.Q31, B_X de LBE.Q32, B_Y de LBE.Q33 et B_X de LBE.Q34 afin d'aligner le centroïde du faisceau sur les profileurs LBE.PR33 et LBE.PR34. Ici le nombre de steerers est suffisant pour éviter un réglage par itérations successives.

[Diagnostic_15 dans le fichier TRACEWIN]

→ **Etape 8**

Ajustement des 6 fentes du système de définition d'émission, de façon à supprimer le halo présent, ou même à redéfinir l'émission (ou/et le courant) si nécessaire en coupant le faisceau de façon plus importante. On utilisera les profileurs associés à chaque paire de fentes pour cela (LBE.PR31, LBE.PR32, LBE.PR33) ainsi que le profileur LBE.PR34. L'ouverture nominale des fentes pour suppression du halo est de l'ordre \varnothing 20 mm dans chaque plan pour les fentes centrales (LBE.FH33, LBE.FV33), et de l'ordre de \varnothing 28 mm dans chaque plan pour les fentes périphériques (LBE.FH32, LBE.FV32 et LBE.FH34, LBE.FV34). L'émission du faisceau peut être mesurée à l'aide de l'émission-mètre présent en aval des 6 fentes. Durant tous les réglages précédents, la cage de Faraday LBE.CF34 est utilisée pour vérifier la transmission, et comme arrêt faisceau.

→ **Etape 9**

Ajustement des 2 bobines du solénoïde (LBE.Sol31, LBE.Sol32) pour optimiser la transmission du RFQ en utilisant le DCCT d'injection. En cas de problème d'injection dans le RFQ, les étapes n°6 à n°8 pourront être reprises de façon légèrement différente avec l'appui de simulations.

Pour une adaptation au RFQ deutons, le faisceau doit avoir une taille d'environ 1.6 mm rms, et une divergence de l'ordre de 23 mrad (cas émission $\sim 0.15 \pi$.mm.mrad norm rms, courant ~ 6 mA).

[Diagnostic_16 dans le fichier TRACEWIN]

5.5 Optique pour les deutons (et les protons)

→ **Optique nominale deutons (0.1 π .mm.mrad norm. rms, 80% compensation de charge d'espace)**

L'optique nominale pour les deutons est illustrée sur la Figure 18, où les enveloppes représentent environ 95% du faisceau. La transmission totale est de l'ordre de 85 à 90%, 10 à 15% du faisceau étant intercepté en fin de ligne dans le système à 3 fentes (cf. Figures 19). Hors fentes, la transmission est supérieure à 99%, quelques pertes étant enregistrées dans le quadruplet de la ligne LBE du fait du fort halo du faisceau. On observe d'ailleurs une augmentation d'émission de l'ordre de près de 100% dans le plan vertical, et de plus de 200% dans le plan horizontal, due en grande partie à la création de ce halo par les forces de charge d'espace. Le nettoyage du halo (système à 3 fentes) permet au final de retrouver sans problème des émissions acceptables (entre 0.1 et 0.2 π .mm.mrad norm. rms) avant l'injection dans le RFQ, et ce sans trop dégrader la transmission.

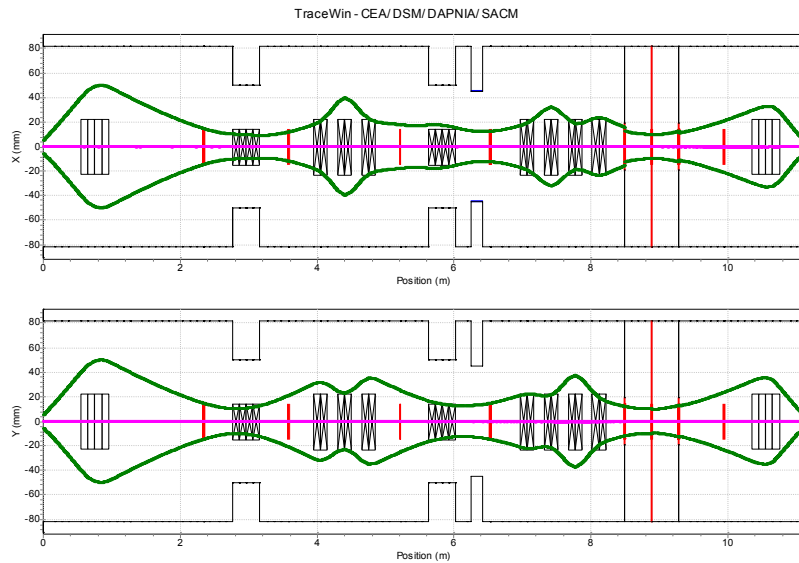
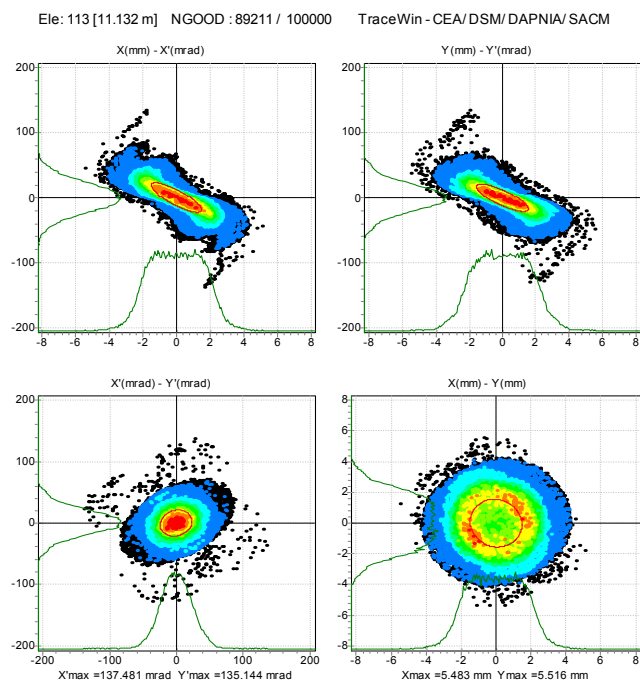
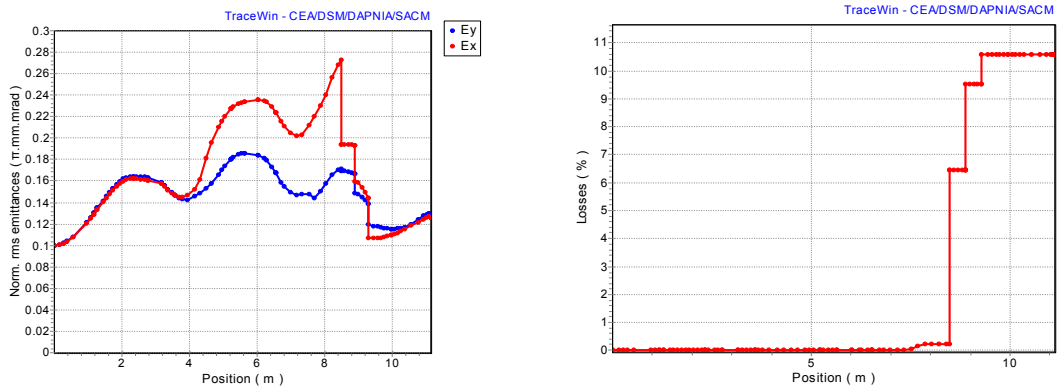
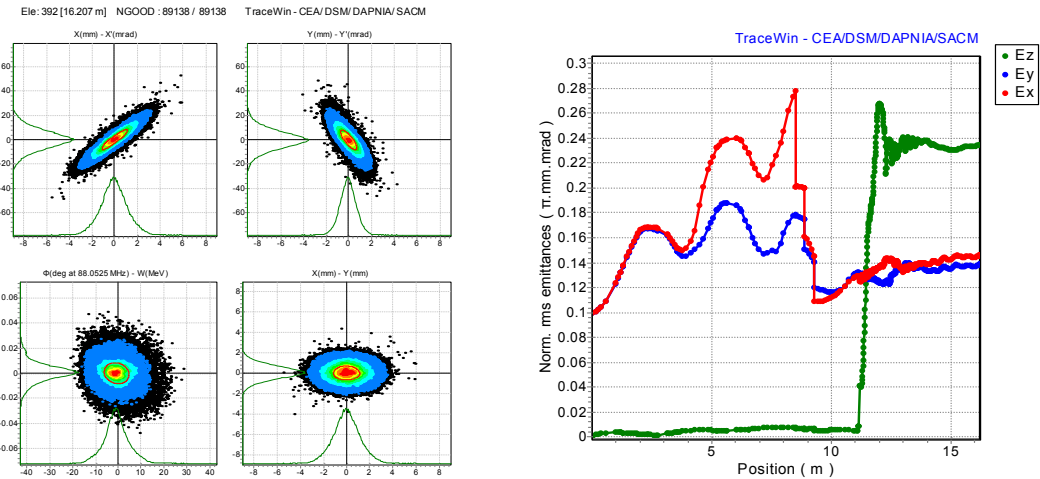


Figure 18 : Optique nominale pour les deutons, $0.1 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ norm. rms et taux de compensation de 80% ; les enveloppes, issues d'un calcul multi-particulaire, sont données à $\sqrt{6}$ fois la taille rms, soit environ 95% du faisceau.



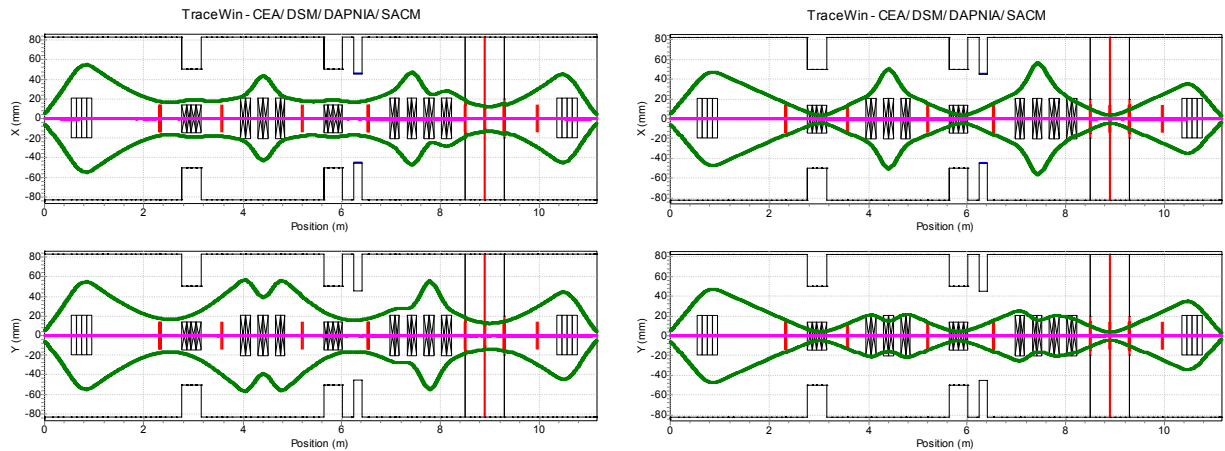
Figures 19 : en haut : évolution des émittances norm. rms transverses (gauche) et pertes faisceau (droite) ; en bas : faisceau à l'entrée du RFQ dans l'espace des phases (le cercle rouge représente la valeur rms).



Figures 19b : à gauche : faisceau à la sortie du RFQ dans l'espace des phases ;
à droite : évolution des émittances dans la ligne et le RFQ.

→ **Tolérance à divers taux de compensation de charge d'espace**

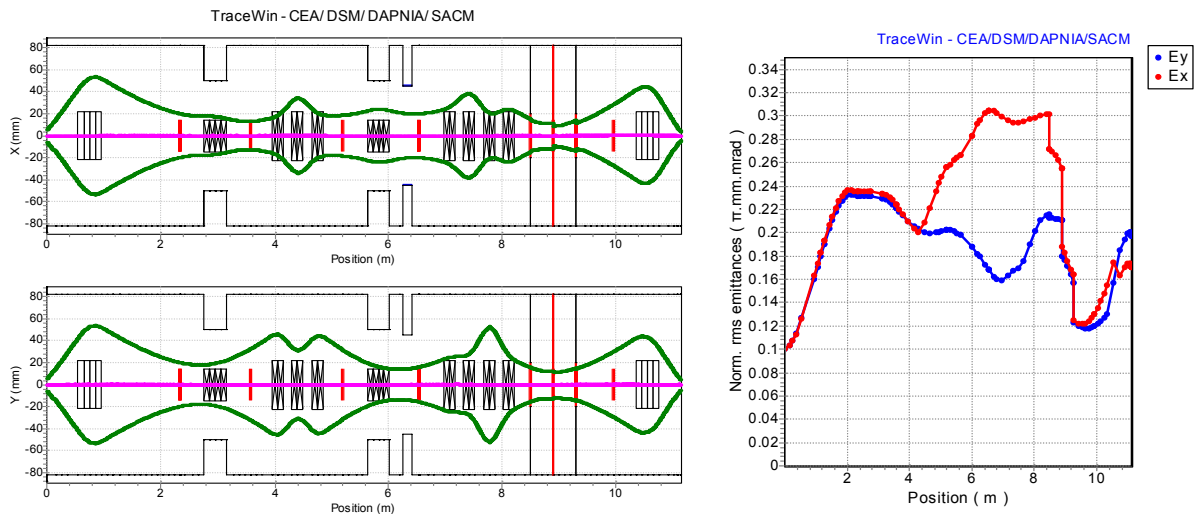
Comme déjà indiqué précédemment, un des aspects les plus mal connus dans cette étude concerne la valeur du taux de compensation de charge d'espace dans les lignes. Nous avons donc choisi de considérer, dans le cas des deutons, des taux de compensation pouvant être compris entre 50% et 100% (avec une valeur nominale de 80%). Les procédures de réglages sont strictement identiques, mais les optiques obtenues sont sensiblement différents, comme illustré sur les Figures 20. Il est intéressant de noter que, du fait du fort halo développé, c'est l'optique deutons avec un taux de compensation de 50% qui est le cas dimensionnant en terme de diamètre des tubes faisceau dans les lignes LBE2, mais aussi LBE (cf. Annexe 3).



Figures 20 : Optiques pour les deutons, 0.1π .mm.mrad norm. rms, avec des taux de compensation de 50% (gauche) et 100% (droite) (envelopes multi-particulaires données à $\sqrt{6}$ fois la taille rms, soit environ 95% du faisceau total).

→ **Optique pour les protons**

L'optique pour les protons est illustrée sur la Figure 21, où les enveloppes représentent environ 95% du faisceau. La transmission totale est de l'ordre de 80 à 85% (>99% hors fentes), 15 à 20% du faisceau étant intercepté en fin de ligne dans le système à 3 fentes. Le halo est ici encore plus important, à compensation de charge d'espace identique, que dans le cas deutons ; les forces de charge d'espace sont en effet 2 fois plus grandes du fait de la faible masse du proton. On observe de ce fait une augmentation d'émittance de l'ordre de 200% dans le plan vertical, et de près de 300% dans le plan horizontal. Le nettoyage du halo (système à 3 fentes) permet au final de retrouver sans problème des émittances acceptables (de l'ordre de 0.2π .mm.mrad norm. rms) avant l'injection dans le RFQ, et ce sans trop dégrader la transmission.



Figures 21 : Optiques pour les protons, $0.1 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ norm. rms, avec des taux de compensation de 80% (envelopes multi-particulaires données à $\sqrt{6}$ fois la taille rms) (gauche) ; évolution des émittances (droite).

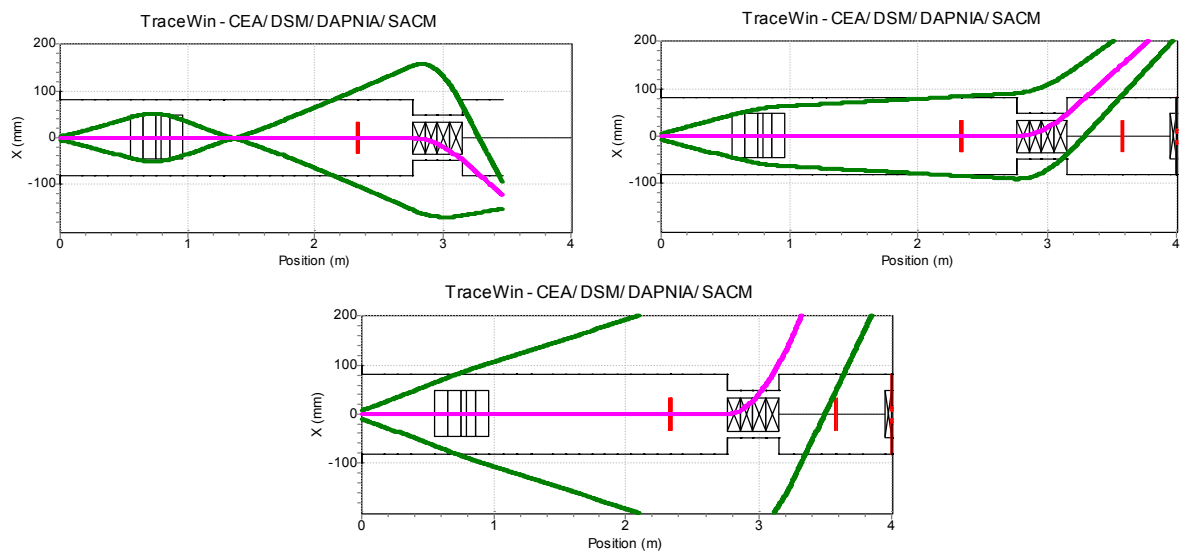
→ Comportement des polluants

Les études de comportement des polluants [11] montrent que l'on s'attend, pour un faisceau de deutons de 6.5 mA, à des pertes de l'ordre de : moins de 1 W dans le solénoïde de sortie source, 40 W dans l'espace de glissement solénoïde / dipôle, 25 W dans la chambre du dipôle LBE2.D11, et 20 W dans l'espace de glissement dipôle / triplet. Ce fonctionnement n'est cependant pas dimensionnant concernant les puissances perdues à évacuer. Le tableau ci-dessous (Table 3) détaille les pertes attendues pour les autres fonctionnements, dans le cas d'un faisceau continu : deutons faible courant, protons et H_2^+ 6.5 mA.

Table 3 : Localisation des pertes des polluants dans la ligne LBE2 pour différents fonctionnements.

Type de fonctionnement	Polluants principaux (courant approximatif)	Pertes estimées le long du début de la ligne LBE2 (W)				
		piquage + solénoïde	tube	dipôle	tube	triplet
Deutons 6.5mA	D_2^+ 1mA ions (A=14 à 20) 1+, 1mA	1	40	25	20	0
Deutons 0.1mA	$^{14}\text{N}^+$ 5mA	2	150	70	15	0
Protons 6.5mA	H_2^+ 1.5mA ions (A=14 à 20) 1+, 1.5mA	2	30	30	15	0
H_2^+ 6.5mA	protons 33mA ions (A=14 à 20) 1+, 7mA	3	750	650	400	0

Dans le cas où l'on désire pouvoir effectuer un réglage en H_2^+ en faisceau continu, il apparaît que c'est ce type de fonctionnement qui est nettement dimensionnant, avec des puissances à évacuer dans tous les éléments de la ligne (hors solénoïde) approchant le kW. Si de telles puissances sont rédhitoires (à évaluer), il faudra se contenter d'effectuer ces réglages H_2^+ en mode pulsé, avec le cycle utile de 5% créé par la source. Dans un tel cas, d'après le tableau précédent, et en considérant les pertes maximales envisageables lors des phases de réglage en H_2^+ (50 mA total avec un cycle utile de 5%), les spécifications sur les puissances à évacuer deviennent plus raisonnables : 100 W dans le solénoïde, 150 W le long du tube à vide reliant le solénoïde au dipôle, 100 W sur la chambre du dipôle, et 100 W le long du tube en aval du dipôle. Les figures ci-dessous illustrent, pour information, le comportement des principaux polluants (protons, D_2^+ , $^{14}\text{N}^+$) présents dans le cas d'une optique réglée pour les ions $q/A = 1/2$ (deutons ou H_2^+)



Figures 22 : Comportement dans le plan horizontal des protons (en haut à gauche), des D_2^+ (en haut à droite), et des ions $^{14}N^+$ (en bas) (calculs enveloppe tracées à $\sqrt{6}$ fois la taille rms).

5.6 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 quadropoles ; 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.

→ Résultats issus de l'APD en termes de tolérances

Cette étude a été menée durant l'APD [3], et a montré que les pertes dans les différents éléments de la ligne basse-énergie ainsi que dans le « scrapper » n'augmentaient pas de manière significative avec les amplitudes des différentes erreurs. Avec un niveau de perte moyen par élément autour de 0.02 W, 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 Tables 4 et 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 :

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

Table 4 : Tolérances sur les amplitudes des erreurs pour les éléments magnétiques.

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

Table 5 : Tolérances sur les amplitudes des erreurs pour les diagnostics.

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

→ 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 basse énergie, mais plutôt les grossissements d'émittance pouvant provoquer des pertes supplémentaires à plus haute énergie dans le RFQ 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 d'un dispositif à 3 fentes permettant de contrôler efficacement l'émittance d'entrée du RFQ en cas d'augmentation inattendue.

→ « Steerers »

L'étude d'erreur menée durant l'APD montrait que la valeur rms de la position du faisceau le long de la ligne basse énergie présentait des amplitudes élevées (jusqu'à 1.5 mm) comparées au reste du linac. Cette forte excursion s'expliquait par le choix de ne pas considérer, dans nos études, de corrections sur les erreurs de champ des dipôles de la ligne. L'amplitude des steerers nécessaire à la correction en position du faisceau dans le pire des cas étudié était de $3.5 \cdot 10^{-4}$ T.m ou 17.5 mrad (cas des protons).

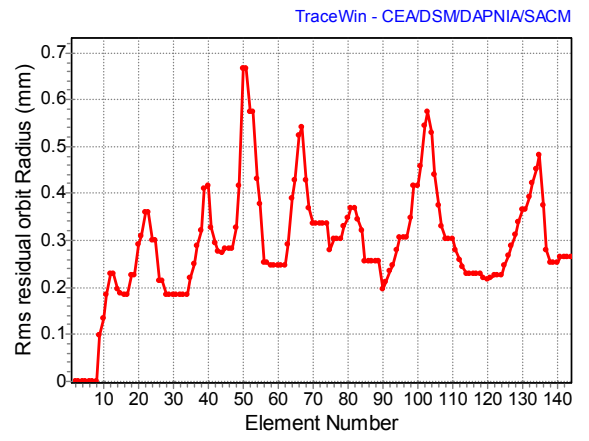
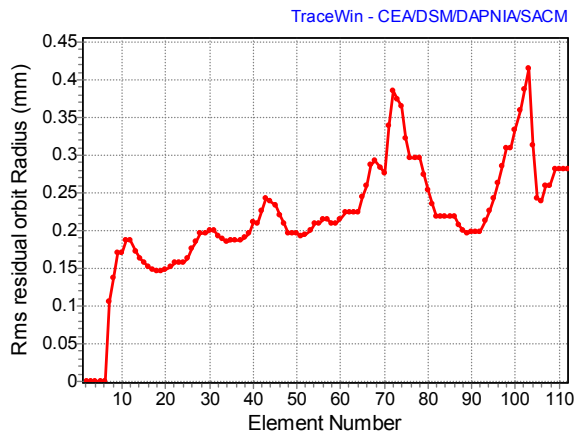
Une nouvelle étude basée sur les designs réactualisés des lignes $q/A=1/3$ et deutons a été menée afin de redéfinir la force des steerers nécessaires au contrôle du centroïde du faisceau. Un certain nombre de modifications ont été prises en compte :

- réduction du nombre de steerers par quadrupôle de 2 à 1 ;
- nouveau schéma de correction ;
- allongement significatif de la ligne $q/A=1/3$;
- utilisation de protons dans la ligne de deutons ;
- correction supposée des erreurs de champ dans les dipôles ;
- diminution de la précision de la mesure de position des BPM de 0.1 mm à 0.25 mm.

Cette étude basée sur 1000 simulations d'enveloppes a permis de vérifier que le schéma de correction actuel permettait un contrôle du centre de gravité du faisceau mieux maîtrisé (cf. Figures 23). De plus les déviations demandées aux steerers restent inférieures dans tous les cas à 5.1 mrad, soit largement inférieures au 17 mrad précédent, comme illustré dans la Table 6.

Table 6 : Bilan des champs requis pour les « steerers » (1000 simulations)

Champ des steerers	Proton/deuton	1/3
rms	$1.6 \cdot 10^{-5}$ T.m (0.8 mrad)	$1.0 \cdot 10^{-4}$ T.m (1.7 mrad)
3 rms	$4.8 \cdot 10^{-5}$ T.m (2.4 mrad)	$3.0 \cdot 10^{-4}$ T.m (5.1 mrad)
Amplitude max.	$5.3 \cdot 10^{-5}$ T.m (2.6 mrad)	$2.6 \cdot 10^{-4}$ T.m (4.3 mrad)



Figures 23 : : Position rms du centroïde pour les protons (gauche) et les ions $q/A = 1/3$ (droite).

6 CONCLUSION

Le présent document regroupe et synthétise l'ensemble des travaux effectués sur les lignes basse énergie de SPIRAL-2, en conciliant les exigences suivantes :

- tenir compte des nouvelles demandes de la physique ;
- minimiser le risque de ne pas obtenir les faisceaux désirés ;
- minimiser les temps de réglage faisceau ;
- respecter au mieux le budget alloué ;
- respecter le planning de réalisation tel qu'il est défini actuellement.

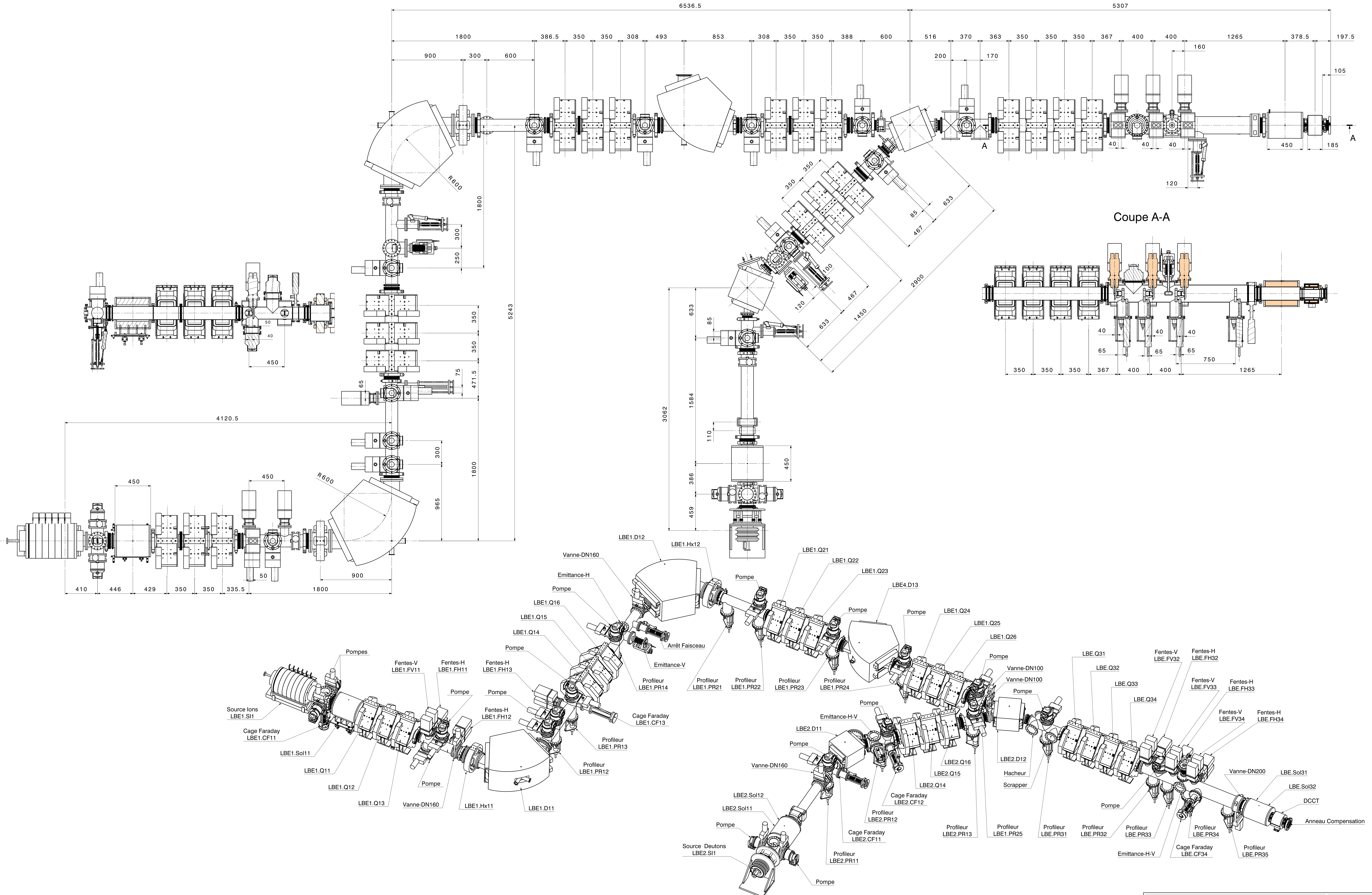
Certains aspects méritent cependant approfondissement, études complémentaires ou prises de décision :

- l'indisponibilité en ressource humaine côté « vide » n'a pas permis de valider définitivement le nombre et la disposition des pompes le long des lignes basse-énergie ;
- le fonctionnement en H_2^+ à pleine intensité (au moins 5 mA) induirait des pertes faisceau importantes pour la ligne LBE2 : il faut décider rapidement si ce mode de réglage est indispensable ;
- il faut décider si la source $q/A = 1/3$ doit aussi pouvoir produire des deutons et des protons ;
- après obtention des cartes de champs des solénoïdes, il sera indispensable d'effectuer un calcul de dynamique faisceau avant de procéder à la commande de ces objets.

ANNEXE 1 – PLAN GENERAL DES LIGNES BASSE-ENERGIE

L'Annexe 1 contient le plan des lignes basse-énergie SPIRAL-2, mis à jour au 26 avril 2006 (plan n°8383.12.04). Ce plan sera mis à jour dans la version définitive du présent document, qui sera disponible début Septembre 2006. Les modifications à prendre en compte sont les suivantes :

- **LBE1 – section de préparation** : la position des 2 premières fentes de nettoyage (LBE1.FV11 et LBE1.FH11) est à revoir afin de pouvoir placer un groupe de pompage directement derrière le triplet ; dans l'ordre, on doit avoir : triplet, groupe de pompage, fentes de nettoyage du point objet, la position de la fente de nettoyage LBE1.FH12 devant rester inchangée ;
- **LBE2** : la vanne de la section de préparation doit être positionnée en aval de la cage de Faraday LBE2.CF11, entre la cage de Faraday et le dipôle ; un DCCT doit être également ajoutée juste en aval des 2 steerers ; un arrêt faisceau de même type que dans la LBE1 doit être ajouté entre le dernier profileur LBE2.PR13 et le dipôle LBE2.D12 ; on remarque de plus que les 2 steerers ne sont pas notifiés, de même que la pompe associée au profileur LBE2.PR13 ;
- **LBE** : l'émittance-mètre et la cage de Faraday LBE.CF34 doivent être positionnés derrière le système à 3 fentes ; on a dans l'ordre : système à 3 fentes (et 3 profileurs associés), émittance-mètre, cage de Faraday ;
- enfin, il est remarqué que les groupes de pompage associés aux sources elles-mêmes ne sont pas apparents.



Matière: --	Traitement: --	Nettoyage: --	Masses: --	Date: 26-04-2006
Indice Puget: Ra	Tol. Géom: L± 0,	α ± 0,		Dessiné: F Daudin
SPRAL 2 : Accélérateur				Echelle: --
Ligne LBE Ions - deutons				version 2006
				B.P. 5027 14076 CAEN Cedex 5 Tel. 02.31.45.46.47 Fax. 02.31.45.49.69
PROJET COMMUN CEA / INSP				LABORATOIRE COMMUN DES CEA - INSP/SCNR
ONGINE LABO	SECTEUR	AFFAIRE	COMPONENT	ACTIVITE
GANIL	SST	000	000	00
PL	P	8383.12.04	00	1/1
Date: Vis:				N° PROJET
				SPR1
				SEDS
				N° Plan
				TOUTO

D	Ajusté LBE1.PR25	8-06-06	F D
C	Mise à jour	29-05-06	F D
B	Mise à jour	22-05-06	F D
A	Ajusté vanne DN160 avant LBE1.D11	10-05-06	F D
Modifications:		Date:	Vis:

ANNEXE 2 – LISTE DES PARAMETRES DU LINAC SPIRAL-2

L'Annexe 2 est la « Liste des paramètres » du linac SPIRAL-2, dans sa version 1.2 du 19 Juillet 2006. Cette version décrit les paramètres généraux de fonctionnement de l'accélérateur, et les spécifications et paramètres des éléments de l'injecteur (codes « 1 X ») hors RFQ et LME.



LINAC SPIRAL-2

LISTE DES PARAMETRES

Version 1.2

Version mise à jour par JL Biarrotte, le 20/07/2006

Document créé par JL Biarrotte, le 13/04/2006

LINAC SPIRAL-2 / PARAMETRES GENERAUX

Types de particules	deutons ions q/A >= 1/3 protons ions q/A >= 1/6	<i>extension future</i>
Puissance faisceau max	200 kW	<i>en deutons</i>
Energie max deutons	40 MeV	
Energie min deutons	4 MeV	<i>à valider</i>
Intensité crête max deutons	5 mA	<i>intensité crête = intensité dans les macro-pulses</i>
Intensité crête min deutons	0.1 mA	<i>ou moins (-> 10 uA avec fentes) si diags le permettent</i>
Energie max ions 1/3	14.5 A.MeV	<i>pour ions q/A=1/3</i>
Energie min ions 1/3	2 A.MeV	<i>à valider</i>
Intensité crête max ions 1/3	1 mA	<i>pour tous ions jusqu'à l'Argon (A=40)</i>
Intensité crête min ions 1/3	0.1 mA	<i>ou moins (-> 1uA) si diags le permettent</i>
Energie max protons	33 MeV	
Energie min protons	2 MeV	<i>à valider</i>
Intensité crête max protons	5 mA	
Intensité crête min protons	0.1 mA	<i>ou moins (-> 10 uA avec fentes) si diags le permettent</i>
Energie max ions 1/6	7 A.MeV	<i>pour ions q/A=1/6</i>
Energie min ions 1/6	2 A.MeV	<i>à valider</i>
Intensité crête max ions 1/6	1 mA	<i>pour tous ions jusqu'à A=50</i>
Intensité crête min ions 1/6	0.1 mA	<i>ou moins (-> 1uA) si diags le permettent</i>
Pulsation faisceau (nominal)	continu	<i>bunché à 88.05 MHz après le RFQ</i>
Pulsation faisceau (commissioning et réglage)		<i>à valider avec équipe diags</i>
Cycle utile	0.1% à 100%	<i>0.1% (200W faisceau max) pour réglage SC linac</i>
Fréquence de répétition	1 Hz à 100 Hz	<i>5 Hz nominal pour le commissioning à 0.1% dc</i>
Durée pulse (amont hacheur)	10 ms à 1 s	<i>doit être >> 1ms (tps montée source)</i>
Durée pulse (aval hacheur)	0.2 ms à 1 s	<i>doit être >> plusieurs dizaines de us (tps SCC)</i>
Longueur injecteur deutons		<i>extraction source à bride entrée 1er cryo</i>
Longueur injecteur ions 1/3		<i>extraction source à bride entrée 1er cryo</i>
Longueur linac SC		<i>bride entrée 1er cryo à bride sortie dernier cryo</i>
Longueur LHE arrêt faisceau		<i>bride sortie dernier cryo à bride beam dump</i>
Longueur LHE stable		<i>bride sortie dernier cryo à ?</i>
Longueur LHE casemate		<i>bride sortie dernier cryo à ?</i>

Code	Paramètre	Valeur nominale	Commentaire
<u>Injecteur (Sources + LBEs + RFQ + LME) / Paramètres généraux</u>			
1 0	Type de particules	ions $q/A \geq 1/3$, D+, p	et H2+ (+ions $q/A \geq 1/6$ si extension future)
1 0	Longueur totale ions		extraction source ions -> bride cryo 1
1 0	Longueur totale deutons		extraction source deutons -> bride cryo 1
1 0	Energie sortie protons	0.752 MeV	toutes particules sortent à $\beta = 0.04$
1 0	Energie sortie deutons	1.502 MeV	
1 0	Energie sortie ions	0.746 A.MeV	pour tous ions $q/A \geq 1/3$
1 0	Courant crête sortie max protons	5 mA	(on considère une transmission injecteur de 77%)
1 0	Courant crête sortie max deutons	5 mA	(on considère une transmission injecteur de 77%)
1 0	Courant crête sortie max ions	1 mA	(on considère une transmission injecteur de 77%)
1 0	Emittance sortie protons		
1 0	Emittance sortie deutons		
1 0	Emittance sortie ions		
<u>Injecteur / Source ions (LBE1.SI1)</u>			
1 1	Type de particules	ions $q/A \geq 1/3$	
1 1	Type de source	ECR	à 18 GHz (Phoenix V2) ou 28 GHz (A-Phoenix)
1 1	Tension source max	60.00 kV	pour $q/A=1/3$ (on veut tjrs $\beta=6.553E-3$)
1 1	Tension source min	20.15 kV	pour protons
1 1	Stabilité tension	$\leq 1E-3$	notamment pour ne pas dégrader la transmission du RFQ
1 1	Courant crête source max	1.3 mA	courant de l'ion d'intérêt
1 1	Courant crête source min	1 μ A	
1 1	Stabilité courant crête	$\leq \pm 2\%$	
1 1	Emittance sortie H & V	≤ 0.4 pi.mm.mrad norm rms	ion-dépendant, mesures LPSC=0.2pi pour Oxygène
1 1	Temps de montée	< 1 ms	
1 1	Cycle utile pulsation	1% à 100%	pulses $\geq 10ms$
1 1	Fréquence pulsation	5 Hz	à valider
1 1	Pression source	1E-6 mbar	
1 1	Durée de vie source		à définir
<u>Injecteur / Source deutons (LBE2.SI1)</u>			
1 2	Type de particules	D+, p	et H2+
1 2	Type de source	ECR	à 2.45 GHz
1 2	Tension source max	40.27 kV	pour deutons (on veut tjrs $\beta=6.553E-3$)
1 2	Tension source min	20.15 kV	pour protons
1 2	Stabilité tension	$\leq 1E-3$	notamment pour ne pas dégrader la transmission du RFQ
1 2	Courant crête source max	6.5 mA	courant de D+ ou p
1 2	Courant crête source min	0.1 mA	
1 2	Stabilité courant crête	$\leq \pm 2\%$	
1 2	Emittance sortie H & V	≤ 0.1 pi.mm.mrad norm rms	d'après mesures Saclay
1 2	Temps de montée	< 1 ms	
1 2	Cycle utile pulsation	1% à 100%	pulses $\geq 10ms$
1 2	Fréquence pulsation	5 Hz	à valider
1 2	Pression source	1E-3 mbar	
1 2	Durée de vie source	≥ 3 mois	

Code	Paramètre	Valeur nominale	Commentaire
Injecteur / LBE ions 1/3 (ligne LBE1)			
1 3	Type de particules	ions q/A >=1/3	
1 3	Longueur de la ligne	15 900 mm	électrode d'extraction -> LBE2.D12 (=4120.5+5243+6536.5)
1 3	Energie sortie ions	20 A.keV	(on veut tjrs beta=6.553E-3)
1 3	Courant crête sortie max	1.25 mA	pour optiques nominales
1 3	Emittance sortie ions	<= 0.45 pi.mm.mrad norm rms	pour optiques nominales
1 3	Résolution en q/A	>=100	pour séparation de 2 especes à rac(6) sigma (~95%) - cas 0.2pi
1 3	Nb de solénoïdes type Sol-A	1	LBE1.Sol11
1 3	Nb de quadrupoles type QP-A	12	LBE1.Q11 à Q16 et LBE1.Q21 à Q26
1 3	Nb d'hexapoles type Hex-A	2	LBE1.Hx11 et Hx12
1 3	Nb de dipôles types DIP-A	2	LBE1.D11 (gauche) et D12 (droite)
1 3	Nb de profileurs type A	8	
1 3	Nb d'émittance-mètres type A	1	EM double (H-V)
1 3	Nb de cages de Faraday type A	2	
1 3	Nb d'arrêts faisceau type A	1	
1 3	Nb de fentes de type A	3	fentes de nettoyage LBE1.FH11, FV11 et FH12
1 3	Nb de fentes de type B	1	fente de tri LBE1.FH13
1 3	Nb de groupes de pompage	10	à valider
1 3	Vide ligne	1.0E-8 mbar	
Injecteur / LBE deutons (ligne LBE2)			
1 4	Type de particules	D+, p	et H2 +
1 4	Longueur de la ligne	5 962 mm	électrode d'extraction -> LBE2.D12 (=3062+2900)
1 4	Energie sortie deutons	40.27 keV	(on veut tjrs beta=6.553E-3)
1 4	Energie sortie protons	20.15 keV	
1 4	Courant crête sortie max d & p	6.5 mA	pour optiques nominales
1 4	Emittance sortie deutons	<= 0.3 pi.mm.mrad norm rms	pour optiques nominales
1 4	Emittance sortie protons	<= 0.3 pi.mm.mrad norm rms	pour optiques nominales
1 4	Nb de solénoïdes type Sol-B	1	LBE2.Sol11/12
1 4	Nb de quadrupoles type QP-A	3	LBE2.Q14 à Q16
1 4	Nb de dipôles types DIP-B	2	LBE2.D11 (droite) et D12 (droite)
1 4	Nb de steerers type A	2	1H, 1V
1 4	Nb de profileurs type A	3	
1 4	Nb d'émittance-mètres type A	1	EM double (H-V)
1 4	Nb de cages de Faraday type A	2	
1 4	Nb de DCCT type A	1	
1 4	Nb d'arrêts faisceau type A	1	
1 4	Nb de groupes de pompage	5	à valider
1 4	Vide ligne	1.0E-6 mbar	
Injecteur / LBE commune (ligne LBE)			
1 5	Type de particules	ions q/A >= 1/3, D+, p	et H2 +
1 5	Longueur de la ligne	5307 mm	LBE2.D12 -> entrée RFQ
1 5	Energie sortie ions	20 A.keV	(on veut tjrs beta=6.553E-3)
1 5	Energie sortie deutons	40.27 keV	
1 5	Energie sortie protons	20.15 keV	
1 5	Courant crête sortie max ions	1.2 mA	pour optiques nominales
1 5	Courant crête sortie max d & p	6.5 mA	pour optiques nominales
1 5	Emittance sortie ions	<= 0.4 pi.mm.mrad norm rms	pour optiques nominales
1 5	Emittance sortie deutons	<= 0.2 pi.mm.mrad norm rms	pour optiques nominales
1 5	Emittance sortie protons	<= 0.2 pi.mm.mrad norm rms	pour optiques nominales
1 5	Nb de solénoïdes type Sol-B	1	LBE.Sol31/32, si possible sur roulettes ds l'encombrement dispo
1 5	Nb de quadrupoles type QP-A	4	LBE.Q31 à Q34
1 5	Nb de hacheurs type Hach-A	1	dévie dans le plan horizontal
1 5	Nb de profileurs type A	5	
1 5	Nb d'émittance-mètres type A	1	EM double (H-V)
1 5	Nb de cages de Faraday type A	1	
1 5	Nb de DCCT type A	1	
1 5	Nb de scrapers type A	1	associé au hacheur
1 5	Nb de fentes type A	6	3 H & 3V = syst.déf. émittance avec fi(ext)=rac(2)*fi(centre)
1 5	Nb de groupes de pompage	2	à valider
1 5	Vide ligne	1 E-8 mbar	(ions lourds dimensionnant)

Code	Paramètre	Valeur nominale	Commentaire
Injecteur / Eléments électro-magnétiques des lignes basse-énergie			
Sol-A			
1 6	Nb de solénoïdes type Sol-A	1	solénoïde à simple enroulement
1 6	Longueur magnétique solénoïde	410 mm	
1 6	Champ max solénoïde	0.70 T	
1 6	Diamètre utile solénoïde	>= 168 mm	il s'agit du diamètre interne chambre à vide; 164.3 sera suffisant
Sol-B			
1 6	Nb de solénoïdes type Sol-B	2	solénoïdes à double enroulement
1 6	Longueur magnétique solénoïde	410 mm	2*205mm
1 6	Champ max solénoïde	0.49 T	dans chaque demi-bobine
1 6	Diamètre utile solénoïde	>= 155 mm	il s'agit du diamètre interne chambre à vide
QP-A			
1 6	Nb de quadrupoles type QP-A	19	
1 6	Longueur magnétique quadrupole	200 mm	valable pour steerers associés
1 6	Gradient max quadrupole	3.4 T/m	
1 6	Diamètre utile quadrupole	>= 163 mm	il s'agit du diamètre interne chambre à vide
1 6	Force max steerers associés	4 E-4 T.m	d'après nouvelle étude d'erreurs
Hex-A			
1 6	Nb d'hexapoles type Hex-A	2	
1 6	Longueur magnétique hexapoles	150 mm	anciennement 100 mm
1 6	Force max hexapoles	6.5 T/m ²	anciennement 10 T/m ²
1 6	Diamètre utile hexapoles	>= 128 mm	il s'agit du diamètre interne chambre à vide
DIP-A			
1 6	Nb de dipôles type DIP-A	2	indice n=0
1 6	Angle déviation dipôle	90°	gauche puis droite
1 6	Faces tournées dipôle	26.565°	entrée et sortie
1 6	Rayon de courbure dipôle	600 mm	
1 6	Champ max dipôle	0.27 T	
1 6	Homogénéité champ dipôle	<= 5 E-4	
1 6	Hauteur utile V	>= 90 mm	hauteur interne de la chambre à vide
1 6	Largeur utile H	>= 220 mm	zone d'homogénéité (la largeur de la chambre est bcp + grande)
DIP-B			
1 6	Nb de dipôles type DIP-B	2	indice n=0
1 6	Angle déviation dipôle	45°	droite puis droite
1 6	Faces tournées dipôle	0°	dipôles secteurs
1 6	Rayon de courbure dipôle	500 mm	
1 6	Champ max dipôle	0.15 T	
1 6	Homogénéité champ dipôle	<= 5 E-4	
1 6	Hauteur utile V	>= 73 mm	hauteur interne de la chambre (!! max pour faisceau ions !!)
1 6	Largeur utile H	>= 60 mm	zone d'homogénéité (la largeur de la chambre est bcp + grande)
Steerers de type A			
1 6	Nb de steerers type A	2	
1 6	Force max steerers type A	4 E-4 T.m	
1 3	Diamètre tube à vide	>=150 mm	a priori sur tube standard fi 164.3
Hach-A			
1 6	Nb de hacheurs type Hach-A	1	
1 6	Longueur utile électrodes	160 mm	
1 6	Distance inter-plaques h	>= 88 mm	la tension est donnée pour h=90mm
1 6	Largeur plaques	>= 78 mm	largeur d'homogénéité de la tension
1 6	Tension max	10 kV	tension inter-plaques (+/-5 kV par rapport au centroïde du faisceau)
1 6	Temps de montée tension	< 1 us	doit être très inférieur au temps d'établissement de la SCC
Tolérance sur les éléments magnétiques			
1 6	Précision des champs	<= 1%	
1 6	Stabilité dynamique des champs	<= 0.1%	
1 6	Précision d'alignement	<= 0.1 mm	sur les 3 axes
1 6	Stabilité dynamique de position	<= 0.01 mm	sur les 3 axes

Code	Paramètre	Valeur nominale	Commentaire
Injecteur / Diagnostics, arrêts faisceau et fentes des lignes basse-énergie			
Profileurs de type A			
1 7	Nb de profileurs de type A	16	à évaluer si plusieurs sortes de profileurs est nécessaire... type harpes a priori
1 7	Dimension faisceau max	100 mm	diamètre max à 99%, d'après les 6 optiques de référence
1 7	Dimension faisceau min	5 mm	diamètre min rms, d'après les 6 optiques de référence
1 7	Puissance moyenne à supporter	>= 15 W	pour 5% cycle utile max (idéalement 260W pour faisceau continu)
1 7	Précision en position	<= +/- 0.1 mm	relaxable à +/- 0.25 mm
1 7	Précision en taille	<= +/- 0.1 mm	relaxable à +/- 0.25 mm
Emittance-mètres de type A			
1 7	Nb d'émission-mètres de type A	3	EM doubles (H-V) de type Allison (LPSC)
1 7	Dimension faisceau max	80 mm	diamètre max à 99%, d'après les 6 optiques de référence
1 7	Dimension faisceau min	5 mm	diamètre min rms, d'après les 6 optiques de référence
1 7	Puissance moyenne à supporter	>= 15 W	pour 5% cycle utile max (idéalement 260W pour faisceau continu)
1 7	Précision en taille	<= +/- 10%	
1 7	Précision en divergence	<= +/- 10%	
Cages de Faraday de type A			
1 7	Nb de cages de Faraday de type A	5	
1 7	Dimension faisceau max	100 mm	diamètre max à 99%, d'après les 6 optiques de référence
1 7	Dimension faisceau min	5 mm	diamètre min rms, d'après les 6 optiques de référence
1 7	Puissance à soutenir	>= 15 W	pour 5% cycle utile max (idéalement 260W pour faisceau continu)
1 7	Précision en courant		à définir
DCCTs de type A			
1 7	Nb de DCCTs de type A	2	
1 7	Diamètre tube à vide	>=150 mm	à priori sur tube standard fi 164.3
1 7	Précision en courant		à définir
Arrêts faisceau de type A			
1 7	Nb d'arrêts faisceau de type A	2	
1 7	Dimension faisceau max	100 mm	diamètre max à 99%, d'après les 6 optiques de référence
1 7	Dimension faisceau min	5 mm	diamètre min rms, d'après les 6 optiques de référence
1 7	Puissance moyenne à supporter	>= 260 W	deutons dimensionnant
Scraper de type A			
1 7	Nb de scraper de type A	1	sa pénétration doit être réglable
1 7	Dimension faisceau max	80 mm	diamètre max à 99%, d'après les 6 optiques de référence
1 7	Dimension faisceau min	10 mm	diamètre min rms, d'après les 6 optiques de référence
1 7	Puissance moyenne à supporter	>= 260 W	deutons dimensionnant
Fentes de type A			
1 7	Nb de fentes de type A	9	fentes de nettoyage et fentes du système de déf. émittance
1 7	Pas de réglage des fentes	0.1 mm	à valider
1 7	Puissance moyenne à supporter	>= 60 W	
Fentes de type A			
1 7	Nb de fentes de type A	1	fente de tri
1 7	Pas de réglage des fentes	0.1 mm	à valider
1 7	Puissance moyenne à supporter	>= 300 W	

ANNEXE 3 – PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT DES LIGNES BASSE-ENERGIE

L'Annexe 3 donne les principaux paramètres de fonctionnement des lignes basse-énergie en ce qui concerne les éléments électro-magnétiques (champs, tensions, tailles faisceau...), et ce, pour les 6 optiques de référence considérées. 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.

Données LEBT d'après run TraceWin

Faisceaux de référence de sortie source

from	ions	E0 (pI.mm.mrad norm rms)	alpha0	beta0	SCC	V source (kV)	TW s=0
APD	1/3	0.4	-1	0.2	0.7	60	sortie electrode d'extraction
Thuillier	1/3	0.2	0.5	0.12	0.7	60	sortie electrode d'extraction
Gobin	d	0.1	-3.4	0.32	0.8	40.27	sortie electrode d'extraction +94mm
Gobin	d	0.1	-3.4	0.32	1	40.27	sortie electrode d'extraction +94mm
Gobin	d	0.1	-3.4	0.32	0.5	40.27	sortie electrode d'extraction +94mm
idem deutons	p	0.1	-3.4	0.32	0.8	20.15	sortie electrode d'extraction +94mm

1. ELEMENTS ELECTRO-MAGNETIQUES

le facteur 0.8 sur les aimants correspond à la marge prise pour avoir une certaine latitude de réglage par rapport à ces réglages de référence
 le facteur 2.7 (2.502 + marge) correspond au facteur nécessaire pour réaliser le spectre des ions jusqu'au Néon20 +
 le facteur 1.8 (1.732 +marge) correspond au facteur nécessaire pour réaliser le spectre des deutons jusqu'au D3 +

les positions correspondent aux abscisses repérées le long des axes faisceau

les positions sont données pour le centre de chaque élément, et pour le point d'intersection des axes faisceau dans le cas des dipôles

l'origine est remise à zéro pour chaque tronçon de ligne (LBE1: électrode d'extraction source ions, LBE2: électrode d'extraction source d, LBE: point d'intersection des axes dans le dipôle LBE2/D12)

1.1. QUADRUPOLES

Nom	Position (mm)	Type	Diamètre utile nécessaire (mm) 99% faisceau max/0.8	Gradient max (T/m) nom/0.8 (ou *2.7 sur Q11 à Q16)	Grad nom 1 (T/m) 1/3, 0.4pi, res100	Grad nom 2 (T/m) 1/3, 0.2pi, res150	99% ray beam 1 (mm) 1/3, 0.4pi, res100	99% ray beam 2 (mm) 1/3, 0.2pi, res150
LBE1 Q11	1285	QP-A	147.5	0.85	0.08	0.31	59	38
LBE1 Q12	1635	QP-A	112.5	1.95	-0.25	-0.72	45	37
LBE1 Q13	1985	QP-A	75.0	2.58	0.54	0.96	30	23
LBE1 Q14	8392	QP-A	92.5	3.13	1.16	1.16	37	28
LBE1 Q15	6742	QP-A	140.0	3.41	-1.26	-1.26	56	41
LBE1 Q16	7092	QP-A	90.0	3.13	1.16	1.16	36	28
LBE1 Q21	11550	QP-A	92.5	2.00	1.40	1.60	37	27
LBE1 Q22	11900	QP-A	157.5	1.50	-1.11	-1.20	63	49
LBE1 Q23	12250	QP-A	117.5	0.93	0.66	0.74	47	36
LBE1 Q24	14212	QP-A	105.0	0.53	0.42	0.42	42	33
LBE1 Q25	14562	QP-A	130.0	1.00	-0.76	-0.80	52	38
LBE1 Q26	14912	QP-A	102.5	0.67	0.46	0.53	41	32

Nom	Position (mm)	Type	Diamètre utile nécessaire (mm) 99% faisceau max/0.8	Gradient max (T/m) nom/1.8 (gaudage à CF)	Grad nom 3 (T/m) d, 0.1pi, 0.8 SCC	Grad nom 4 (T/m) d, 0.1pi, 1.0 SCC	Grad nom 5 (T/m) d, 0.1pi, 0.5 SCC	Grad nom 6 (T/m) p, 0.1pi, 0.8 SCC	99% ray beam 3 (mm) d, 0.1pi, 0.8 SCC	99% ray beam 4 (mm) d, 0.1pi, 1.0 SCC	99% ray beam 5 (mm) d, 0.1pi, 0.5 SCC	99% ray beam 6 (mm) p, 0.1pi, 0.8 SCC
LBE2 Q14	4162	QP-A	135.0	0.83	-0.43	-0.46	-0.43	-0.22	44	37	54	43
LBE2 Q15	4512	QP-A	152.5	1.27	0.69	0.71	0.69	0.35	55	54	61	55
LBE2 Q16	4862	QP-A	135.0	0.83	-0.44	-0.46	-0.43	-0.22	41	37	54	42

Nom	Position (mm)	Type	Diamètre utile nécessaire (mm) 99% faisceau max/0.8	Gradient max (T/m) nom/0.8	Grad nom 1 (T/m) 1/3, 0.4pi, res100	Grad nom 2 (T/m) 1/3, 0.2pi, res150	Grad nom 3 (T/m) d, 0.1pi, 0.5 SCC	Grad nom 4 (T/m) d, 0.1pi, 1.0 SCC	Grad nom 5 (T/m) d, 0.1pi, 0.5 SCC	Grad nom 6 (T/m) p, 0.1pi, 0.8 SCC	99% ray beam 1 (mm) 1/3, 0.4pi, res100	99% ray beam 2 (mm) 1/3, 0.2pi, res150	99% ray beam 3 (mm) d, 0.1pi, 0.8 SCC	99% ray beam 4 (mm) d, 0.1pi, 1.0 SCC	99% ray beam 5 (mm) d, 0.1pi, 0.5 SCC	99% ray beam 6 (mm) p, 0.1pi, 0.8 SCC
LBE Q31	1249	QP-A	162.5	0.57	0.35	0.46	-0.33	-0.45	-0.24	-0.10	43	30	48	41	52	42
LBE Q32	1599	QP-A	162.5	1.19	0.85	0.95	0.65	0.66	0.32	48	32	62	55	65	54	
LBE Q33	1949	QP-A	155.0	1.13	-0.91	-0.87	-0.73	-0.28	-0.75	-0.38	53	39	62	43	55	50
LBE Q34	2299	QP-A	102.5	0.58	0.43	0.31	0.47	-0.16	0.43	0.24	39	33	41	26	37	36

! Ici signe inversé !

QP-A	Diamètre utile (mm) 162.5	Gradient max (T/m) 3.4
-------------	-------------------------------------	----------------------------------

1.2. SOLENOIDES

Nom	Position (mm)	Type	Diamètre utile nécessaire (mm) 99% faisceau /0.8	Champ max (T) *2.7	Champ nom 1 (T) 1/3, 0.4pi, res100	Champ nom 2 (T) 1/3, 0.2pi, res150	99% ray beam 1 (mm) 1/3, 0.4pi, res100	99% ray beam 2 (mm) 1/3, 0.2pi, res150
LBE1 Sol11	856	Sol-A	167.5	0.70	0.26	0.26	67	42

Nom	Position (mm)	Type	Diamètre utile nécessaire (mm) 99% faisceau max/0.8	Champ max (T) et DB/B max (%)	Champ nom 3 (T) d, 0.1pi, 0.8 SCC	Champ nom 4 (T) d, 0.1pi, 1.0 SCC	Champ nom 5 (T) d, 0.1pi, 0.5 SCC	Champ nom 6 (T) p, 0.1pi, 0.8 SCC	99% ray beam 3 (mm) d, 0.1pi, 0.8 SCC	99% ray beam 4 (mm) d, 0.1pi, 1.0 SCC	99% ray beam 5 (mm) d, 0.1pi, 0.5 SCC	99% ray beam 6 (mm) p, 0.1pi, 0.8 SCC
LBE2 Sol11 et Sol12	845	Sol-B	155.0	0.34 0%	0.18 0.18	0.17 0.17	0.19 0.19	0.09 0.09	59	58	62	59

Nom	Position (mm)	Type	Diamètre utile nécessaire (mm) 99% faisceau max/0.8	Champ max (T) et DB/B max (%) nom/0.8	Champ nom 1 (T) 1/3, 0.4pi, res100	Champ nom 2 (T) 1/3, 0.2pi, res150	Champ nom 3 (T) d, 0.1pi, 0.8 SCC	Champ nom 4 (T) d, 0.1pi, 1.0 SCC	Champ nom 5 (T) d, 0.1pi, 0.5 SCC	Champ nom 6 (T) p, 0.1pi, 0.8 SCC	99% ray beam 1 (mm) 1/3, 0.4pi, res100	99% ray beam 2 (mm) 1/3, 0.2pi, res150	99% ray beam 3 (mm) d, 0.1pi, 0.8 SCC	99% ray beam 4 (mm) d, 0.1pi, 1.0 SCC	99% ray beam 5 (mm) d, 0.1pi, 0.5 SCC	99% ray beam 6 (mm) p, 0.1pi, 0.8 SCC
LBE Sol31 et Sol32	4731	Sol-B	152.5	0.49 65%	0.20 0.39	0.26 0.36	0.13 0.28	0.22 0.19	0.23 0.20	0.10 0.12	61	42	45	43	53	38

réduire la DB/B encore plus allonger la distance fentes/solenoides et grossir le diamètre utile dans le solénoïde

Sol-A	Diamètre utile (mm) 167.5	Champ max (T) 0.70	DB/B max -
Sol-B	Diamètre utile (mm) 155.0	Champ max (T) 0.49	DB/B max 65%

1.3. HEXAPOLES

Nom	Position (mm)	Type	Diamètre utile nécessaire (mm) 99% faisceau /0.8	Force max (T/m²) nom/0.8 (ou *2.7 sur Hx11)	Force nom 1 (T/m²) 1/3, 0.4pi, res100	Force nom 2 (T/m²) 1/3, 0.2pi, res150	99% ray beam 1 (mm) 1/3, 0.4pi, res100	99% ray beam 2 (mm) 1/3, 0.2pi, res150
LBE1 Hx11	3220.5	Hex-A	117.5	9.6	3.6	3.4	47	36
LBE1 Hx12	10263.5	Hex-A	127.5	4.3	-2.1	-3.4	51	38

Hex-A	Diamètre utile (mm) 127.5	Force max (T/m²) 9.6
--------------	-------------------------------------	--------------------------------

1.4. DIPOLES

Nom	Position (mm)	Type	Hauteur utile nécessaire (mm) 99% faisceau /0.8	Largeur utile nécessaire (mm) 99% faisceau /0.8	Champ max (T) /0.8 (ou *2.7 pour D11)	Champ nom (T) ions 1/3	99% ray beam V1 (mm) 1/3, 0.4pi, res100	99% ray beam V2 (mm) 1/3, 0.2pi, res150	99% ray beam H1 (mm) 1/3, 0.4pi, res100	99% ray beam H2 (mm) 1/3, 0.2pi, res150
LBE1 D11	4120.5	DIP-A	90.0	220.0	0.27	0.1018	36	24	88	65
LBE1 D12	9363.5	DIP-A	85.0	210.0	0.13	0.1018	24	24	84	63

Nom	Position (mm)	Type	Hauteur utile nécessaire (mm) 99% faisceau /0.8	Largeur utile nécessaire (mm) 99% faisceau /0.8	Champ max (T) /0.8 (ou *1.8 pour D11)	Champ nom (T) d	99% ray beam V1 (mm) 1/3, 0.4pi, res100	99% ray beam V2 (mm) 1/3, 0.2pi, res150	99% ray beam V3 (mm) d, 0.1pi, 0.8 SCC	99% ray beam V4 (mm) d, 0.1pi, 1.0 SCC	99% ray beam V5 (mm) d, 0.1pi, 0.5 SCC	99% ray beam V6 (mm) p, 0.1pi, 0.8 SCC	99% ray beam H1 (mm) 1/3, 0.4pi, res100	99% ray beam H2 (mm) 1/3, 0.2pi, res150	99% ray beam H3 (mm) d, 0.1pi, 0.8 SCC	99% ray beam H4 (mm) d, 0.1pi, 0.5 SCC	99% ray beam H5 (mm) d, 0.1pi, 0.8 SCC	99% ray beam H6 (mm) p, 0.1pi, 0.8 SCC
LBE2 D11	3082	DIP-B	60.0	80.0	0.15	0.082	-	-	15	9	24	14	-	-	15	9	24	14
LBE2 D12	5962	DIP-B	72.5	57.5	0.10	0.082	29	19	16	9	23	17	29	18	16	9	23	17

DIP-A	Hauteur utile nécessaire (mm) 90.0	Largeur utile nécessaire (mm) 220.0	Champ max (T) 0.27
DIP-B	Hauteur utile nécessaire (mm) 72.5	Largeur utile nécessaire (mm) 80.0	Champ max (T) 0.15

1.5. HACHEUR

Nom	Position (mm)	Type	Diamètre utile nécessaire (mm) 99% faisceau max/0.8	Tension max (kV) pas de marge	Champs pour une longueur utile de 160mm, et une distance inter-plaques de 90mm, et un scraper à r=43mm (=99%beam/0.8)	Champ nom 1 (kV) 1/3, 0.4pi, res100	Champ nom 2 (kV) 1/3, 0.2pi, res150	Champ nom 3 (kV) d, 0.1pi, 0.5 SCC	Champ nom 4 (kV) d, 0.1pi, 1.0 SCC	Champ nom 5 (kV) d, 0.1pi, 0.5 SCC	Champ nom 6 (kV) p, 0.1pi, 0.8 SCC	99% ray beam 1 (mm) 1/3, 0.4pi, res100	99% ray beam 2 (mm) 1/3, 0.2pi, res150	99% ray beam 3 (mm) d, 0.1pi, 0.8 SCC	99% ray beam 4 (mm) d, 0.1pi, 1.0 SCC	99% ray beam 5 (mm) d, 0.1pi, 0.5 SCC	99% ray beam 6 (mm) p, 0.1pi, 0.8 SCC	déviations max (mm) tous ions
LBE Hacheur	516	Hach-A	77.5	4.9	on scrappé à >= 80%, le faisceau non totalement scrappé se perd ensuite totalement dans le quadrupole (defoc en x) -> on ne prend pas de marge	1/3, 0.4pi, res100	1/3, 0.2pi, res150	4.5	4.5	3.0	1.5	31	19	20	15	21	17	10

Hach-A	Diamètre utile nécessaire (mm) 88	Largeur utile nécessaire (mm) 78	Tension max (kV) 5
---------------	---	--	------------------------------

inclut la déviation nominale max ATTENTION c'est la tension par rapport à l'axe faisceau, la tension totale inter-plaques vaut le double

calcul avec h=110mm -> gges pertes

n'inclut pas la déviation nominale


```

DRIFT 250 82
;***** émittance mètres
;LBE1.EMIT : DIAG_EMIT 2 0.12 0. 0
DRIFT 300 82
;***** piquage
DRIFT 650 82
;***** dipole 90° droite
ERROR_BEND_NCPL_STAT 3 1 0.1 0.1 0.011 0.011 0.011 0.0
ERROR_BEND_NCPL_DYN 3 1 0.01 0.01 0.0011 0.0011 0.0011 0.0
EDGE 26.565 600 110 0 0 125 0
LBE1.D12 : BEND 90 600 0 125 0
EDGE 26.565 600 110 0 0 125 0
DRIFT 250 100
;***** hexapole
ERROR_QUAD_NCPL_STAT 5 1 0.1 0.1 0.114 0.114 0.07 1 0
ERROR_QUAD_NCPL_DYN 5 1 0.01 0.01 0.011 0.011 0.007 0.1 0
ADJUST 2 4 1 0 0
;ADJUST 5 4 1 0 0
LBE1.Hx12 : MULTIPOLE 3 100 100 -0.0200147 69
DRIFT 250 82
;***** profileur
LBE1.PR21 : DIAG_POSITION 6 0 0 0.25
DRIFT 600 82
;***** profileur
LBE1.PR22 : DIAG_WAIST 4 1 1 0.1
LBE1.PR22 : DIAG_ACHROMAT 4 10 1 1
;LBE1.PR22 : DIAG_EMIT 5 0.2 0.2 0
LBE1.PR22 : DIAG_POSITION 6 0 0 0.25
DRIFT 100 82
DRIFT 186.5 82
;end
;***** triplet
ERROR_QUAD_NCPL_STAT 15 1 0.1 0.1 0.057 0.057 0.07 1 0
ERROR_QUAD_NCPL_DYN 15 1 0.01 0.01 0.0057 0.0057 0.007 0.1 0
ADJUST_STEERER_BX 10
STEERER 0 0
ADJUST 9 2 1 0 0
LBE1.Q21 : QUAD 200 0.5 82 0
DRIFT 150 82
ADJUST_STEERER_BY 10
STEERER 0 0
ADJUST 9 2 2 0 0
LBE1.Q22 : QUAD 200 -0.5 82 0
DRIFT 150 82
ADJUST_STEERER_BX 10
STEERER 0 0
ADJUST 9 2 3 0 0
LBE1.Q23 : QUAD 200 0.5 82 0
DRIFT 208 82
;***** profileur
LBE1.PR23 : DIAG_DSIZE2 9 0 0 0.5
LBE1.PR23 : DIAG_DSIZE 9 0 0 0 0.5
;LBE1.PR23 : DIAG_SIZE 9 10.5 0 0 0.5
LBE1.PR23 : DIAG_SIZE 9 8.5 0 0 0.5
LBE1.PR23 : DIAG_POSITION 10 0 0 0.25
DRIFT 493 82
;***** (LBE4.D13) arrivée faisceau futur
DRIFT 853 82
;***** profileur
LBE1.PR24 : DIAG_POSITION 10 0 0 0.25
LBE1.PR24 : DIAG_DSIZE2 9 0 0 0.5
DRIFT 208 82
;end
;***** triplet
ERROR_QUAD_NCPL_STAT 15 1 0.1 0.1 0.057 0.057 0.07 1 0
ERROR_QUAD_NCPL_DYN 15 1 0.01 0.01 0.0057 0.0057 0.007 0.1 0
ADJUST_STEERER_BX 12
STEERER 0 0
ADJUST 11 2 1 0 0
LBE1.Q24 : QUAD 200 0.6 82 0
DRIFT 150 82
ADJUST_STEERER_BY 12
STEERER 0 0
ADJUST 11 2 2 0 0
LBE1.Q25 : QUAD 200 -1 82 0
DRIFT 150 82
ADJUST_STEERER_BX 12
STEERER 0 0
ADJUST 11 2 3 0 0
LBE1.Q26 : QUAD 200 0.6 82 0
DRIFT 288 82
;***** profileur
LBE1.PR25 : DIAG_DSIZE 11 0 0 0 0.5
LBE1.PR25 : DIAG_DSIZE2 11 0 0 0.5
LBE1.PR25 : DIAG_SIZE 11 6 0 0 0 0.5
;LBE1.PR25 : DIAG_SIZE 11 8.5 0 0 0.1
LBE1.PR25 : DIAG_POSITION 12 0 0 0.25
DRIFT 600 40
;***** arrivée axe ligne deutons
DRIFT 207.1 40
;***** sortie LBE2.D12
DRIFT 168.9 82
DRIFT 60 82
;***** hacheur horizontal h=9cm, L=16cm, environ 5 kV
CHOPPER 1 0000 45 0 0
DRIFT 160 45
DRIFT 120 82
;***** profileur
LBE.PR31 : DIAG_DSIZE2 11 0 0 0.5
LBE.PR31 : DIAG_POSITION 12 0 0 0.25
DRIFT 170 82
;***** scrapper
;APERTURE 43 82 0
;end
DRIFT 263 82
;***** quadruplet
ERROR_QUAD_NCPL_STAT 15 1 0.1 0.1 0.057 0.057 0.07 1 0
ERROR_QUAD_NCPL_DYN 15 1 0.01 0.01 0.0057 0.0057 0.007 0.1 0
ADJUST_STEERER_BY 15
STEERER 0 0
ADJUST 14 2 1 0 0
LBE.Q31 : QUAD 200 -0.679574 82 0
DRIFT 150 82
ADJUST_STEERER_BX 15
DRIFT 60 82
;***** hacheur horizontal Dz=90mm, environ 3 kV pour deutons
CHOPPER 1 0000 45 0 0
DRIFT 160 45
DRIFT 120 82
;***** profileur
LBE.PR31 : DIAG_ACHROMAT 0 10 1 1
LBE.PR31 : DIAG_ACHROMAT 2 10 1 1
LBE.PR31 : DIAG_POSITION 6 0 0 0.5
DRIFT 170 82
;***** scrapper
;APERTURE 43 100 0
;end
DRIFT 100 82
DRIFT 163 82
;***** quadruplet
ERROR_QUAD_NCPL_STAT 15 1 0.1 0.1 0.057 0.057 0.07 1 0
ERROR_QUAD_NCPL_DYN 15 1 0.01 0.01 0.0057 0.0057 0.007 0.1 0
ADJUST_STEERER_BY 15
STEERER 0 0
ADJUST 14 2 1 0 0
LBE.Q31 : QUAD 200 -0.3 82 0
DRIFT 150 82
ADJUST_STEERER_BX 15
STEERER 0 0
ADJUST 14 2 2 0 0
LBE.Q32 : QUAD 200 0.7 82 0
DRIFT 150 82
ADJUST_STEERER_BY 15
STEERER 0 0
ADJUST 14 2 3 0 0
LBE.Q33 : QUAD 200 -0.7 82 0
DRIFT 150 82
ADJUST_STEERER_BX 15
STEERER 0 0
ADJUST 14 2 4 0 0
LBE.Q34 : QUAD 200 0.3 82 0
DRIFT 167 82
DRIFT 100 82
;***** système à 3 fentes
;***** réglage des fentes: 10mm & 14mm (SCC 0.8 ou 0.5); 5mm/14mm (SCC 1.0)
APERTURE 14 14 0
LBE.PR32 : DIAG_DSIZE2 14 0 0 0.5
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
;***** waifs théoriques pour f1=rac(2)*f10 : (0.1pi) 2.5mm, (0.3pi) 4.3mm
;LBE.PR33 : DIAG_SIZE 14 2.5 2.5 0
LBE.PR34 : DIAG_POSITION 15 0 0 0.5
LBE.PR33 : DIAG_SIZE 14 4.3 4.3 0.5
LBE.PR33 : DIAG_DSIZE 14 0 0.5
APERTURE 10 10 0
;APERTURE 5 5 0
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
LBE.PR34 : DIAG_DSIZE2 14 0 0 0.5
APERTURE 14 14 0
DRIFT 160 82
;***** LBE.CF34
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
LBE.PR35 : DIAG_POSITION 15 0 0 0.5
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
;end
;***** solénoïde
ERROR_QUAD_NCPL_STAT 10 1 0.1 0.1 0.028 0.028 0.07 1 0
ERROR_QUAD_NCPL_DYN 10 1 0.01 0.01 0.0028 0.0028 0.007 0.1 0
ADJUST 16 2 0 0 0
LBE.Sol31 : SOLENOID 205 0.096 82
ADJUST 16 2 1 0 0
LBE.Sol31 : SOLENOID 205 0.096 82
DRIFT 157 82
;***** DCCT
DRIFT 94 82
DRIFT 70 82
SPACE_CHARGE_COMP 0.0
DRIFT 50 82
;***** entrée RFQ
;faisceau adapté pour 6mA, 0.15pi (cas SCC 0.8)
DIAG_SIZE 16 23 23 0 2
DIAG_SIZE 16 1.6 1.6 0 0.16
;faisceau adapté pour 6.5mA, 0.1pi (cas SCC 1.0)
;DIAG_SIZE 16 19.5 19.5
;DIAG_SIZE 16 1.35 1.35
;faisceau adapté pour 6mA, 0.2pi (cas SCC 0.5)
;DIAG_SIZE 16 26 26
;DIAG_SIZE 16 1.8 1.8
;faisceau adapté pour protons 5.5mA, 0.2pi (cas SCC 0.8)
;DIAG_SIZE 16 29.7 29.7 0 2.6
;DIAG_SIZE 16 1.8 1.8 0 0.16
DRIFT 1e-08 82
END
;*****
;
; RFQ
;*****
;READ_OUT toutatis_d01.out
RFQ_CELL 70000 9.94396 0 1 66.9319 -90 3 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.94396 6.69068e-05 1.00028 11.1553 -90 4 7.5 1 0 0 0 0
LATTICE 2 1
RFQ_CELL 70000 9.94244 0.000125255 1.00052 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.93848 0.000206589 1.00086 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.93291 0.000269428 1.00112 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.92632 0.000314328 1.0013 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.9191 0.000347596 1.00144 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.91145 0.000376226 1.00155 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0

```

```

STEERER 0 0
ADJUST 14 2 2 0 0
LBE.Q32 : QUAD 200 0.629319 82 0
DRIFT 150 82
ADJUST_STEERER_BY 15
STEERER 0 0
ADJUST 14 2 3 0 0
LBE.Q33 : QUAD 200 0.354361 82 0
DRIFT 150 82
ADJUST_STEERER_BX 15
STEERER 0 0
ADJUST 14 2 4 0 0
LBE.Q34 : QUAD 200 -0.737355 82 0
DRIFT 167 82
DRIFT 100 82
;***** système à 3 fentes
;***** réglage des fentes: 15mm & 20 mm (0.4pi) ; 10mm & 14 mm (0.2pi)
;APERTURE 20 20 0
APERTURE 14 14 0
LBE.PR32 : DIAG_DSIZ2 14 0 0 0.5
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
;***** waist théorique: 4.9mm (0.4pi), 3.7mm (0.25pi)
;LBE.PR33 : DIAG_SIZE 14 4.9 4.9 0
LBE.PR34 : DIAG_POSITION 15 0 0 0.25
LBE.PR33 : DIAG_SIZE 14 3.7 0 0.5
LBE.PR33 : DIAG_SIZE 14 0 0 0.5
;APERTURE 15 15 0
APERTURE 10 10 0
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
LBE.PR34 : DIAG_DSIZ2 14 0 0 0.5
;LBE.PR34 : DIAG_POSITION 15 0 0 0.1
;APERTURE 20 20 0
APERTURE 14 14 0
;LBE.PR34 : DIAG_POSITION 15 0 0 0.25
DRIFT 160 82
;***** LBE.CF34
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
LBE.PR35 : DIAG_POSITION 15 0 0 0.25
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
DRIFT 100 82
;end
;***** solénoïde
ERROR_QUAD_NCPL_STAT 10 1 0.1 0.1 0.028 0.028 0.07 1 0
ERROR_QUAD_NCPL_DYN 10 1 0.01 0.01 0.0028 0.0028 0.007 0.1 0
ADJUST 16 2 1 0 0
LBE.Sol31 : SOLENOID 205 0.2 82
ADJUST 16 2 2 0 0
LBE.Sol31 : SOLENOID 205 0.2 82
DRIFT 157 82
;***** DCCT
DRIFT 94 82
DRIFT 70 82
SPACE_CHARGE_COMP 0.0
DRIFT 50 82
;***** entrée RFQ
;faisceau adapté pour 1mA, 0.4pi
;DIAG_SIZE 16 36 36
;DIAG_SIZE 16 2.35 2.35
;faisceau adapté pour 1mA, 0.2pi
DIAG_SIZE 16 26 26 0.2 6
DIAG_SIZE 16 1.65 1.65 0 0.16
DRIFT 1e-08 82
END
;*****
;***** RFQ
;*****
DRIFT 1e-05 10
;READ_OUT 13_88.out
RFQ_CELL 100000 9.94396 0 1 66.9319 -90 3 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.94396 0.000199015 1.00083 11.1553 -90 4 7.5 1 0 0 0 0
LATTICE 2 1
RFQ_CELL 100000 9.93943 0.000213887 1.00089 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.93128 0.000349638 1.00145 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.92335 0.000364972 1.00151 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.91525 0.000383998 1.00159 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.90706 0.000399467 1.00165 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.89879 0.000422514 1.00174 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.89042 0.00043432 1.00232 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.88204 0.000583216 1.00239 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.8735 0.000606503 1.00249 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.86487 0.000630131 1.00258 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.85615 0.000653859 1.00267 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.84734 0.000800414 1.00326 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.83852 0.000828244 1.00337 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.82952 0.00085621 1.00348 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.82045 0.0008843 1.00358 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.81128 0.00104006 1.00421 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.80209 0.00107234 1.00433 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.79274 0.00110504 1.00445 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.78329 0.00126239 1.00508 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.77383 0.00129909 1.00521 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.76421 0.0013325 1.00534 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.75449 0.00137355 1.00549 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.74468 0.00153651 1.00613 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.73485 0.00157817 1.00628 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.72486 0.00162032 1.00644 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.71478 0.00179261 1.00711 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.70468 0.00183516 1.00726 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.69441 0.00200914 1.00794 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.6841 0.00206024 1.00812 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 100000 9.67362 0.0021164 1.0083 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.90352 0.000442117 1.00182 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.89541 0.000497636 1.00205 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.88714 0.000539925 1.00222 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.87872 0.00057467 1.00236 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.87019 0.000604967 1.00248 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.86156 0.000637383 1.00275 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.85284 0.000734131 1.003 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.84403 0.000781421 1.00318 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.83511 0.000820964 1.00334 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.8261 0.000898677 1.00365 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.81702 0.000966455 1.00391 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.80784 0.00102007 1.00412 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.79856 0.00110703 1.00447 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.78921 0.00118191 1.00476 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.77975 0.00124031 1.00499 11.1553 -91.0717 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.7702 0.0012912 1.00518 11.1553 -89.7124 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.76055 0.00137897 1.00552 11.1553 -91.1199 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.75083 0.00145639 1.00582 11.1553 -89.7182 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.74101 0.00151956 1.00606 11.1553 -91.0806 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.73109 0.00161787 1.00644 11.1553 -89.6617 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.7211 0.00170251 1.00676 11.1553 -91.1022 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.711 0.00181423 1.00719 11.1553 -89.6876 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.70083 0.00190986 1.00755 11.1553 -91.0337 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.69054 0.00198765 1.00784 11.1553 -89.6361 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.68014 0.00209774 1.00826 11.1553 -90.9877 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.66967 0.00219441 1.00862 11.1553 -89.5724 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.6591 0.00231662 1.00908 11.1553 -90.9619 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.64845 0.00242229 1.00948 11.1553 -89.54 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.63769 0.00250996 1.0098 11.1553 -90.8722 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.62684 0.00263044 1.01025 11.1553 -89.4501 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.61592 0.00273617 1.01063 11.1553 -90.8358 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.6049 0.00286939 1.01113 11.1553 -89.4073 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.5938 0.0029861 1.01155 11.1553 -90.779 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.58261 0.00312838 1.01208 11.1553 -89.3502 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.57135 0.00325125 1.01252 11.1553 -90.7094 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.55998 0.0033992 1.01306 11.1553 -89.2812 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.54855 0.00352752 1.01353 11.1553 -90.6372 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.53702 0.00368102 1.01408 11.1553 -89.2035 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.52543 0.00385925 1.01473 11.1553 -90.5875 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.51376 0.00400947 1.01527 11.1553 -89.1517 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.502 0.00417915 1.01588 11.1553 -90.4864 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.49017 0.00432652 1.0164 11.1553 -89.0467 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.47825 0.00449681 1.01701 11.1553 -90.4129 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.46626 0.00469174 1.0177 11.1553 -88.9751 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.45421 0.00485841 1.01829 11.1553 -90.3339 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.44208 0.00504488 1.01895 11.1553 -88.8957 -2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.42988 0.00520884 1.01952 11.1553 -90.2477 2 7.5 1 0 0 0 0
RFQ_CELL 70000 9.4176 0.00539618 1.02017 11.1553 -88.8046 -2 7.5 1 0 0 0 0
;;;Etc...

;;; Attention, le RFQ protons est réglé différemment
;*****
;***** RFQ
;*****
RFQ_CELL 43000 9.94396 0 1 66.9319 -90 3 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.94396 6.69068e-05 1.00028 11.1553 -90 4 7.5 1
;lattice 2
RFQ_CELL 43000 9.94244 0.000125255 1.00052 11.1553 -99.1895 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.93848 0.000206589 1.00086 11.1553 -94.4736 -2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.93291 0.000269428 1.00112 11.1553 -93.8432 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.92632 0.000314328 1.0013 11.1553 -89.9494 -2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.9191 0.000347596 1.00144 11.1553 -94.217 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.91145 0.000376226 1.00155 11.1553 -93.3444 -2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.90352 0.000442117 1.00182 11.1553 -95.3002 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.89541 0.000497636 1.00205 11.1553 -91.2156 -2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.88714 0.000539925 1.00222 11.1553 -91.3268 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.87872 0.00057467 1.00236 11.1553 -88.3378 -2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.87019 0.000604967 1.00248 11.1553 -90.5263 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.86156 0.000637383 1.00275 11.1553 -90.8269 -2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.85284 0.000734131 1.003 11.1553 -90.9758 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.84403 0.000781421 1.00318 11.1553 -89.2463 -2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.83511 0.000820964 1.00334 11.1553 -90.1163 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.8261 0.000898677 1.00365 11.1553 -88.1753 -2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.81702 0.000966455 1.00391 11.1553 -87.1494 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.80784 0.00102007 1.00412 11.1553 -84.2477 -2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.79856 0.00110703 1.00447 11.1553 -86.6333 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.78921 0.00118191 1.00476 11.1553 -86.631 -2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.77975 0.00124031 1.00499 11.1553 -88.7165 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.7702 0.0012912 1.00518 11.1553 -87.2621 -2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.76055 0.00137897 1.00552 11.1553 -88.6377 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.75083 0.00145639 1.00582 11.1553 -87.2008 -2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.74101 0.00151956 1.00606 11.1553 -88.4494 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.73109 0.00161787 1.00644 11.1553 -87.0372 -2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.7211 0.00170251 1.00676 11.1553 -88.3916 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.711 0.00181423 1.00719 11.1553 -86.9979 -2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.70083 0.00190986 1.00755 11.1553 -88.2578 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.69054 0.00198765 1.00784 11.1553 -88.8335 -2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.68014 0.00209774 1.00826 11.1553 -88.1785 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.66967 0.00219441 1.00862 11.1553 -86.7703 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.6591 0.00231662 1.00908 11.1553 -88.1582 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.64845 0.00242229 1.00948 11.1553 -86.7651 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.63769 0.00250996 1.0098 11.1553 -88.078 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.62684 0.00263044 1.01025 11.1553 -86.7365 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.61592 0.00273617 1.01063 11.1553 -88.1555 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.6049 0.00286939 1.01113 11.1553 -86.8196 -2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.5938 0.0029861 1.01155 11.1553 -88.2459 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.58261 0.00312838 1.01208 11.1553 -86.9303 -2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.57135 0.00325125 1.01252 11.1553 -88.3694 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.55998 0.0033992 1.01306 11.1553 -87.0672 -2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.54855 0.00352752 1.01353 11.1553 -88.5378 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.53702 0.00368102 1.01408 11.1553 -87.2573 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.52543 0.00385925 1.01473 11.1553 -88.7955 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.51376 0.00400947 1.01527 11.1553 -87.8834 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.502 0.00417915 1.01588 11.1553 -89.3867 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.49017 0.00432652 1.0164 11.1553 -88.1049 -2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.47825 0.00449681 1.01701 11.1553 -89.6602 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.46626 0.00469174 1.0177 11.1553 -88.3916 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.45421 0.00485841 1.01829 11.1553 -89.9541 -2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.44208 0.00504488 1.01895 11.1553 -88.6936 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.42988 0.00520884 1.01952 11.1553 -90.2536 2 7.5 1
RFQ_CELL 43000 9.4176 0.00539618 1.02017 11.1553 -88.9881 -2 7.5 1

```

<pre> RFQ_CELL 100000 9.66305 0.0022912 1.00899 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 RFQ_CELL 100000 9.65247 0.00234718 1.00919 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 RFQ_CELL 100000 9.64172 0.00252831 1.00988 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 RFQ_CELL 100000 9.63095 0.00258923 1.01009 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 RFQ_CELL 100000 9.62002 0.00265025 1.01031 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 RFQ_CELL 100000 9.60901 0.00284128 1.01103 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 RFQ_CELL 100000 9.59798 0.00290344 1.01124 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 RFQ_CELL 100000 9.58679 0.00310004 1.01198 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 RFQ_CELL 100000 9.57558 0.00317116 1.01222 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 RFQ_CELL 100000 9.56422 0.00337345 1.01298 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 RFQ_CELL 100000 9.55285 0.00344562 1.01322 11.1553 -90 2 7.5 1 0 0 0 RFQ_CELL 100000 9.54132 0.00365366 1.01399 11.1553 -90 -2 7.5 1 0 0 0 ;;Etc...</pre>	<pre> RFQ_CELL 43000 9.40526 0.00560852 1.02091 11.1553 -90.596 2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.39288 0.00579231 1.02155 11.1553 -89.3239 -2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.38041 0.0059962 1.02225 11.1553 -90.9186 2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.36789 0.00622325 1.02304 11.1553 -89.6291 -2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.35532 0.00646508 1.02388 11.1553 -91.2287 2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.3427 0.00667278 1.02458 11.1553 -89.9356 -2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.33001 0.00689806 1.02536 11.1553 -91.5024 2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.31727 0.00714516 1.0262 11.1553 -90.1738 -2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.3045 0.0074062 1.02709 11.1553 -91.7477 2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.29169 0.00767758 1.02802 11.1553 -90.396 -2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.27884 0.00791202 1.02881 11.1553 -91.9056 2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.26592 0.00816143 1.02964 11.1553 -90.5208 -2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.25298 0.00843241 1.03055 11.1553 -92.0146 2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.24002 0.00871752 1.03151 11.1553 -90.5916 -2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.22703 0.00901459 1.03251 11.1553 -92.04 2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.21402 0.00932009 1.03353 11.1553 -90.579 -2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.20099 0.0096327 1.03458 11.1553 -91.9685 2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.18793 0.00995045 1.03563 11.1553 -90.4687 -2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.17487 0.0102763 1.03671 11.1553 -91.8049 2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.1618 0.0106072 1.03781 11.1553 -90.2641 -2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.14872 0.0109361 1.03875 11.1553 -91.54 2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.13562 0.0111996 1.03973 11.1553 -89.9645 -2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.12252 0.0115237 1.04078 11.1553 -91.2226 2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.10944 0.0118641 1.04189 11.1553 -89.6216 -2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.09638 0.0122642 1.04321 11.1553 -90.8658 2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.08335 0.0126634 1.04452 11.1553 -90.6285 -2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.07035 0.0130547 1.04579 11.1553 -90.2914 2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.05736 0.0134437 1.04705 11.1553 -89.1273 -2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.0444 0.0138339 1.04831 11.1553 -89.9298 2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.03149 0.0142272 1.04957 11.1553 -88.674 -2 7.5 1 RFQ_CELL 43000 9.01869 0.0146248 1.05085 11.1553 -89.606 2 7.5 1 ;;Etc...</pre>
---	--

Fichiers de réglage TRACEWIN *.cal

<p>Fichier TraceWin utilisé pour les ions q/A = 1/3</p> <pre> ;; réglage nominal 1A (0.2pi pour res150 théorique; alpha0=+0.5, beta0=0.12) - Jean-Luc Diagnostic_3 0 0 0 Diagnostic_3_PARTRAN 0 0 0 Diagnostic_6 0 0 0 Diagnostic_6_PARTRAN 0 0 0 Diagnostic_10 0 0 0 Diagnostic_10_PARTRAN 0 0 0 Diagnostic_12 0 0 0 Diagnostic_12_PARTRAN 0 0 0 Diagnostic_15 0 0 0 Diagnostic_15_PARTRAN 0 0 0 Diagnostic_1 0.262585 0.33107 -0.774022 1.15072 Diagnostic_1_PARTRAN 0.261395 0.312941 -0.724228 0.957179 Diagnostic_2 0.02 -0.02 Diagnostic_2_PARTRAN 0.017609 -0.017609 Diagnostic_4 1.15991 -1.27897 Diagnostic_4_PARTRAN 1.15967 -1.2623 ;Diagnostic_5 ;-0.02 ;Diagnostic_5_PARTRAN ;-0.0085155 Diagnostic_9 1.59483 -1.16668 0.654684 Diagnostic_9_PARTRAN 1.59816 -1.20055 0.741151 Diagnostic_11 0.428685 -0.79495 0.500006 Diagnostic_11_PARTRAN 0.42312 -0.796534 0.533327 Diagnostic_14 -0.458837 0.953958 -0.877005 0.31578 Diagnostic_14_PARTRAN -0.451727 0.950528 -0.864625 0.309552 Diagnostic_16 0.249206 0.365561 Diagnostic_16_PARTRAN 0.258572 0.357713 ;; réglage nominal 1B (0.2pi pour res150 théorique; alpha0=+0.5, beta0=0.12) - Didier ;Diagnostic_1 ;0.263722 0.309037 -0.745898 1.14569 ;Diagnostic_2 ;0.02 -0.02 ;;Diagnostic_5 ;;-0.02 ;Diagnostic_3 ;0 0 0 ;Diagnostic_3_PARTRAN ;0 0 0</pre>	<p>Fichier TraceWin utilisé pour les deutons (et protons)</p> <pre> ;;; tous réglages pour 0.1pi, alpha0=-3.4, beta0=0.32 ;;réglage 1A - deutons nominal 80% SCC (Didier) Diagnostic_3 0 0 Diagnostic_6 0 0 0 Diagnostic_15 0 0 0 0 Diagnostic_3_PARTRAN 0 0 Diagnostic_6_PARTRAN 0 0 0 Diagnostic_15_PARTRAN 0 0 0 0 Init_Diagnostic_0 0.18 -0.5 0.72 Init_Diagnostic_2 -0.47 0.71 -0.47 Init_Diagnostic_14 -0.36 0.72 -0.76 0.48 Init_Diagnostic_16 0.21 0.21 Diagnostic_0 0.184107 -0.499665 0.767796 Diagnostic_2 -0.446964 0.697814 -0.446957 Diagnostic_14 -0.285816 0.716257 -0.774105 0.507973 Diagnostic_16 0.124715 0.282142 Diagnostic_0_PARTRAN 0.182496 -0.471598 0.743804 Diagnostic_2_PARTRAN -0.433664 0.69238 -0.443623 Diagnostic_14_PARTRAN -0.278343 0.644751 -0.732928 0.465628 Diagnostic_16_PARTRAN 0.134342 0.27657 ;;réglage 1B - deutons 80% SCC (Jean-Luc) ;Diagnostic_0 ;0.187855 -0.444063 0.695961 ;Diagnostic_2 ;-0.444063 0.695961 -0.444063 ;Diagnostic_3 ;0 0 ;Diagnostic_6 ;0 0 0 ;Diagnostic_0_PARTRAN ;0.182802 -0.448297 0.700881 ;Diagnostic_2_PARTRAN ;-0.448297 0.700881 -0.448297 ;Diagnostic_3_PARTRAN ;0 0 ;Diagnostic_6_PARTRAN ;0 0 0 ;Diagnostic_14 ;-0.383938 0.764952 -0.743545 0.334535 ;Diagnostic_14_PARTRAN ;-0.234321 0.636702 -0.745845 0.474423 ;Diagnostic_15 ;0 0 0 ;Diagnostic_15_PARTRAN ;0 0 0</pre>
---	---

<pre> :Diagnostic_4 :1.15998 -1.28363 :Diagnostic_6 :0 0 0 :Diagnostic_6_PARTRAN :0 0 0 :Diagnostic_9 :1.59918 -1.16629 0.650834 :Diagnostic_10 :0 0 0 :Diagnostic_10_PARTRAN :0 0 0 :Diagnostic_11 :0.429355 -0.792578 0.497795 :Diagnostic_12 :0 0 0 :Diagnostic_12_PARTRAN :0 0 0 :Diagnostic_14 :-0.673106 0.621325 0.354519 -0.732219 :Diagnostic_15 :0 0 0 :Diagnostic_15_PARTRAN :0 0 0 :Diagnostic_16 :0.223321 0.383089 :Diagnostic_1_PARTRAN :0.272425 0.313586 -0.726938 1.12209 :Diagnostic_2_PARTRAN :0.01391 -0.013 :Diagnostic_4_PARTRAN :1.15954 -1.25444 :Diagnostic_9_PARTRAN :1.91775 -1.32927 0.896209 :Diagnostic_11_PARTRAN :0.461802 -0.797888 0.479252 :Diagnostic_14_PARTRAN :-0.660978 0.604176 0.352811 -0.765181 :Diagnostic_16_PARTRAN :0.182479 0.40228 :: réglage 2 (0.4pi pour res100 théorique; alpha0=-1, beta0=0.2) - Jean-Luc :Diagnostic_3 :0 0 0 :Diagnostic_3_PARTRAN :0 0 0 :Diagnostic_6 :0 0 0 :Diagnostic_6_PARTRAN :0 0 0 :Diagnostic_10 :0 0 0 :Diagnostic_10_PARTRAN :0 0 0 :Diagnostic_12 :0 0 0 :Diagnostic_12_PARTRAN :0 0 0 :Diagnostic_15 :0 0 0 :Diagnostic_15_PARTRAN :0 0 0 :Diagnostic_1 :0.257502 0.16217 -0.434949 0.777767 :Diagnostic_1_PARTRAN :0.258315 0.0944137 -0.252987 0.5384 :Diagnostic_2 :0.02 -0.02 :Diagnostic_2_PARTRAN :0.018483 -0.018483 :Diagnostic_4 :1.15979 -1.27068 :Diagnostic_4_PARTRAN :1.15956 -1.25515 ::Diagnostic_5 ::-0.02 ::Diagnostic_5_PARTRAN ::-0.010628 :Diagnostic_9 :1.39699 -1.11057 0.608365 :Diagnostic_9_PARTRAN :1.26443 -1.11859 0.657757 :Diagnostic_11 :0.41678 -0.770318 0.479596 :Diagnostic_11_PARTRAN :0.423141 -0.76054 0.458254 :Diagnostic_14 :-0.345078 0.882442 -0.936491 0.443538 :Diagnostic_14_PARTRAN :-0.329455 0.850365 -0.904884 0.427538 :Diagnostic_16 :0.272142 0.342568 :Diagnostic_16_PARTRAN :0.203798 0.392577 </pre>	<pre> :Diagnostic_16 :0.233303 0.186252 :Diagnostic_16_PARTRAN :0.159781 0.26277 :::réglage 2 - deutons 50% SCC (Jean-Luc) :Diagnostic_0 :0.194879 -0.444832 0.696453 :Diagnostic_2 :-0.444832 0.696453 -0.444832 :Diagnostic_3 :0 0 :Diagnostic_0_PARTRAN :0.1908 -0.43015 0.6874 :Diagnostic_2_PARTRAN :-0.43015 0.6874 -0.43015 :Diagnostic_3_PARTRAN :0 0 :Diagnostic_6 :0 0 0 :Diagnostic_6_PARTRAN :0 0 0 :Diagnostic_14 :-0.284576 0.727049 -0.803694 0.470667 :Diagnostic_14_PARTRAN :-0.234752 0.662503 -0.748448 0.42792 :Diagnostic_15 :0 0 0 :Diagnostic_15_PARTRAN :0 0 0 :Diagnostic_16 :0.265329 0.126167 :Diagnostic_16_PARTRAN :0.229421 0.201029 :::réglage 3 - deutons 100% SCC (Jean-Luc) :Diagnostic_0 :0.173166 -0.461167 0.706801 :Diagnostic_2 :-0.461167 0.706801 -0.461167 :Diagnostic_3 :0 0 :Diagnostic_0_PARTRAN :0.173166 -0.461167 0.706801 :Diagnostic_2_PARTRAN :-0.461167 0.706801 -0.461167 :Diagnostic_3_PARTRAN :0 0 :Diagnostic_6 :0 0 0 :Diagnostic_6_PARTRAN :0 0 0 :Diagnostic_14 :-0.459206 0.658833 -0.278338 -0.163915 :Diagnostic_15 :0 0 0 :Diagnostic_14_PARTRAN :-0.459206 0.658833 -0.278338 -0.163915 :Diagnostic_15_PARTRAN :0 0 0 :Diagnostic_16 :0.220021 0.184678 :Diagnostic_16_PARTRAN :0.220021 0.184678 :: réglage 4 - protons 80% SCC (Didier) :Diagnostic_3 :0 0 :Diagnostic_6 :0 0 0 :Diagnostic_15 :0 0 0 :Diagnostic_3_PARTRAN :0 0 :Diagnostic_6_PARTRAN :0 0 0 :Diagnostic_15_PARTRAN :0 0 0 :Diagnostic_0 :0.0929633 -0.217698 0.354854 :Diagnostic_2 :-0.219132 0.34623 -0.219256 :Diagnostic_14 :-0.103278 0.314669 -0.38436 0.241683 :Diagnostic_16 :0.107879 0.107873 :Diagnostic_0_PARTRAN :0.0928109 -0.220276 0.359043 :Diagnostic_2_PARTRAN :-0.219231 0.34623 -0.219231 :Diagnostic_14_PARTRAN :-0.102606 0.318105 -0.38341 0.241685 ::Init_Diagnostic_16_PARTRAN :::0.10651 0.110685 :Diagnostic_16_PARTRAN :0.0991094 0.118988 </pre>
---	---

ANNEXE 4 – SPECIFICATIONS DES AIMANTS DES LIGNES BASSE-ENERGIE

L'Annexe 4 regroupe les fiches de spécifications disponibles à ce jour concernant les principaux éléments magnétiques des lignes basse-énergie SPIRAL-2. Ces éléments sont :

- les quadrupôles des lignes LBE1, LBE2 et LBE ;
- les hexapôles de la ligne LBE1 ;
- les dipôles à 90° de la ligne LBE1 ;
- les dipôles à 45° de la ligne LBE2.

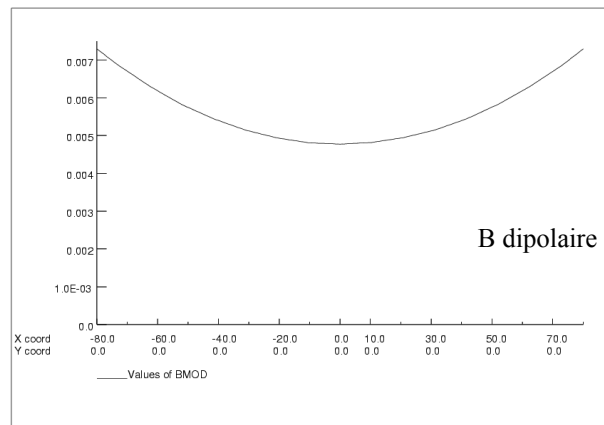
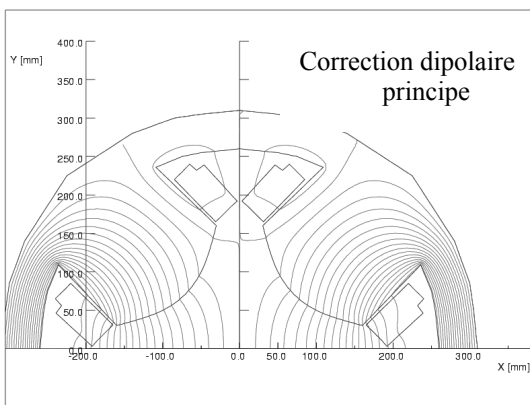
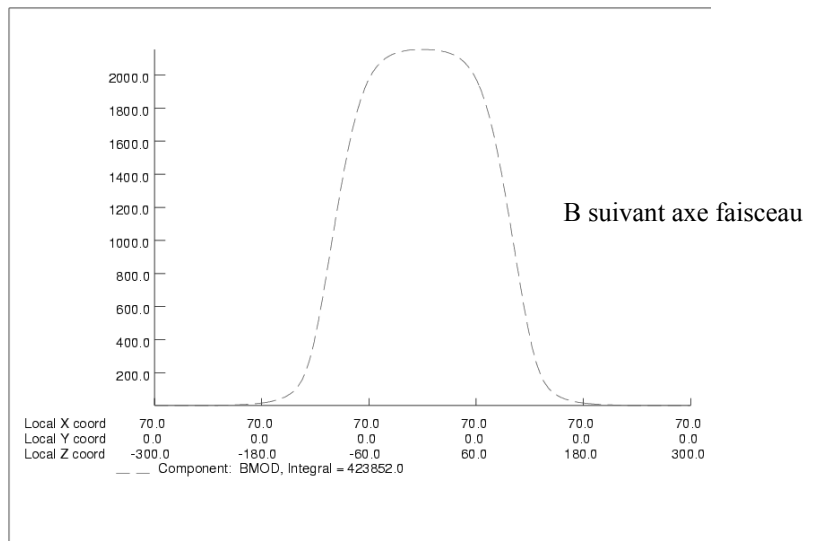
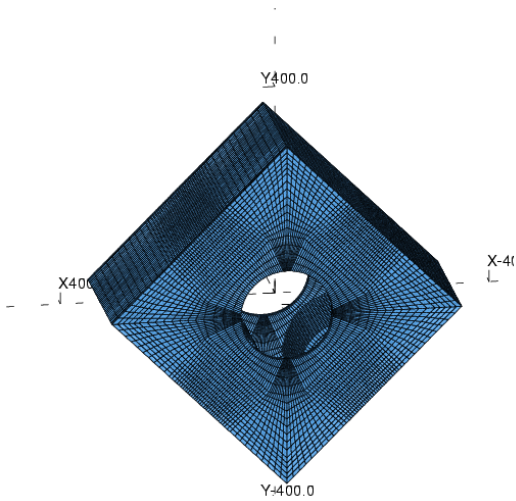
QUADRUPOLES LBE1, LBE2 & LBE

CARACTERISTIQUES GENERALES

DONNEES MAGNETIQUES	
Type aimant	Quadrupole carré ouvrant avec plaques de garde
Nbre ampère-tours maximaux	4*6300
Gradient maximum	G = 3 T/m
Longueur de gradient	L = 200 mm

DONNEES MECANIQUES	
Diamètre de gorge	172 mm
Longueur totale	270 mm
Poids de fer	180 Kg
Poids de cuivre	22 Kg

DONNEES ELECTRIQUES ET HYDRAULIQUES	
Intensité maximale	I=210 A
Tension maximale	U=30 V
Puissance dissipée	P=6.3 KW
Résistance électrique (a I max)	R=0.14
Nbre de circuits hydrauliques	4
Perte de charge	12 bars
Débit total	4.5 l/mn



QUADRUPLES LBE1, LBE2 & LBE

CARACTERISTIQUES POUR UNE BOBINE

CONDUCTEUR	
Résistivité à 20 degrés	$1.75 \cdot 10^{-8}$
Section carrée	$5 \cdot 5 \text{ mm}^2$
Rayons des arrondis	1 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	44
Longueur approximative d'une spire moyenne	0.77 m
Nombre de circuits hydrauliques	1
Longueur approximative d'un circuit d'eau	34 m
Poids de cuivre	5.5 Kg

DONNEES ELECTRIQUES ET HYDRAULIQUES	
Intensité maximale	I=210 A
Tension maximale	U=7.5 V
Résistance électrique (I max)	R=0.036
Puissance consommée (I max)	1.57 Kw
Perte de charge	12 bars
Débit d'eau par circuit hydraulique	1.1 l/mn
Echauffement (I max)	20 °C

CARACTERISTIQUES POUR UNE BOBINE CORRECTION DIPOLAIRE

CONDUCTEUR MEPLAT	
Résistivité a 20 degrés	$1.75 \cdot 10^{-8}$
Section rectangulaire	$5 \cdot 1.25 \text{ mm}^2$
Rayons des arrondis	0.5 mm
Valeur moyenne de la section de cuivre	5.9 mm^2

DONNEES GEOMETRIQUES	
Nombre de spires	22
Longueur approximative d'une spire moyenne	0.82 m
Poids de cuivre	Kg

DONNEES ELECTRIQUES	
Intensité maximale	10 A
Tension maximale	0.6 V
Résistance électrique (I max)	0.15
Puissance consommée (I max)	6 W

QUADRUPOLES LBE1, LBE2 & LBE

ALIMENTATIONS

Les valeurs de gradient maximum varient beaucoup selon l'emplacement du quadrupole sur les lignes.

Nous proposons de réaliser des quadrupoles identiques, mais de leur affecter des alimentations de gamme de puissance différente, afin de minimiser le cout de ces alimentations.

On peut faire apparaitre trois familles :

Huit quadrupoles de gradient inférieur ou égal à 1T/m
(0.53 / 0.57 / 0.59 / 0.67 / 0.83 / 0.83 / 0.85 / 0.93)

Huit quadrupoles de gradient compris entre 1T/m et 2T/m
(1 / 1.13 / 1.19 / 1.27 / 1.45 / 1.45 / 1.5 / 1.58)

Trois quadrupoles de gradient supérieur à ou égal à 2T/m
(1.95 / 2.0 / 2.58)

D'où possibilité de trois types d'alimentations :

210 A	6.3 KW
140 A	2.8 KW
70 A	0.7 KW

Ce choix sera à confirmer par le groupe alimentations.

HEXAPOLES LBE1

CARACTERISTIQUES GENERALES

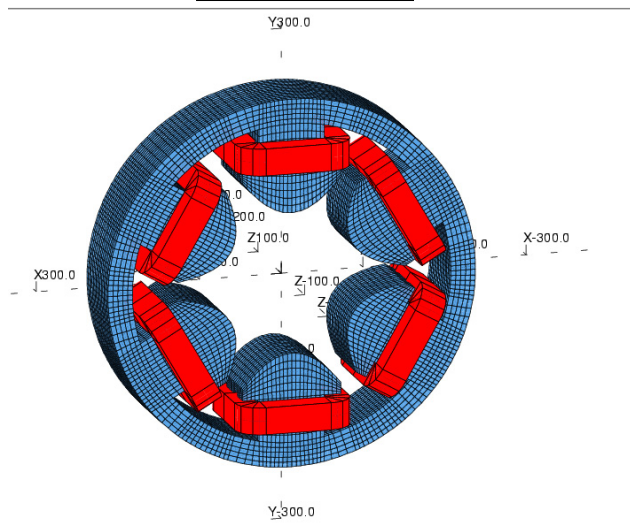
DONNEES MAGNETIQUES	
Circuit magnétique	Structure circulaire , ouvrante Acier type ARMCO XC6 XC10
bobines	Cuivre méplat émaillé Imprégnation résine époxy
force	8 T/m ² longueur de champ 145mm

DONNEES MECANIQUES	
Diamètre de gorge	172 mm
Longueur culasse	90 mm
Diamètre extérieur	470 mm
Longueur totale avec bobines	155 mm
Poids de fer	80 kg
Poids de cuivre	25 kg

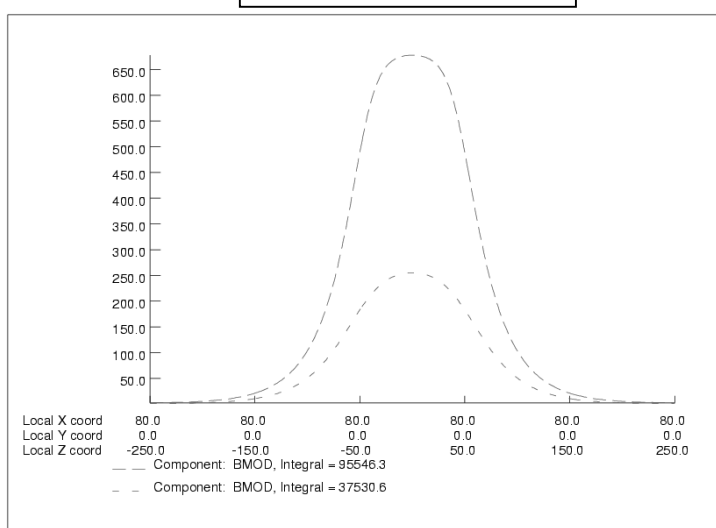
DONNEES ELECTRIQUES ET HYDRAULIQUES	
Intensite maximale	I = 10 A
Tension maximale	U = 15 V
Puissance dissipée	P = 150 W
Resistance électrique (a I max)	R = 1.5
Refroidissement air	

DONNEES POUR UNE BOBINE	
Nombre de spires	N = 144 (8*18)
conducteur	5*1.25 mm ²
Section moyenne de cuivre	5.9 mm ²

modélisation



B suivant axe faisceau



DIPOLLES 90 DEGRES LIGNE LBE1

CARACTERISTIQUES GENERALES

DONNEES MAGNETIQUES	
Angle de déviation	90°
Rayon de courbure	600 mm
Angle de la face d'entrée	26.56°
Angle de la face de sortie	26.56°
Induction nominale max	0.27 T

DONNEES MECANIQUES	
Entrefer	H= 110 mm
Acier	Type ARMCO, XC06, XC10
Poids de fer	kg
Poids de cuivre	kg

DONNEES ELECTRIQUES ET HYDRAULIQUES	
Intensité maximale	I= 250 A
Tension maximale	U= 45 V
Puissance dissipée	P= 11.25 kW
Résistance électrique (a I max)	0.18
Nbre de circuits hydrauliques	8
Perte de charge	12 bars
Débit total	16 l/mn

CARACTERISTIQUES POUR UNE BOBINE PRINCIPALE

CONDUCTEUR	
Résistivité a 20 degrés	$1.75 \cdot 10^{-8}$
Section carrée	7*7 mm ²
Diamètre du trou intérieur	4mm
Valeur moyenne de section de cuivre	40 mm ²
Valeur moyenne de la section de passage d'eau	12.5 mm ²

DONNEES GEOMETRIQUES	
Nombre de spires	56
Longueur approximative d'une spire moyenne	3.1 m
Nombre de circuits hydrauliques	4
Longueur approximative d'un circuit d'eau	44 m
Poids de cuivre	Kg

DONNEES ELECTRIQUES ET HYDRAULIQUES	
Intensité maximale	250 A
Tension maximale	22.5 V
Résistance électrique (I max)	0.09
Puissance consommée (I max)	5.6 KW
Perte de charge	12 bars
Débit d'eau par circuit hydraulique	2 l/mn
Echauffement (I max)	10 degrés

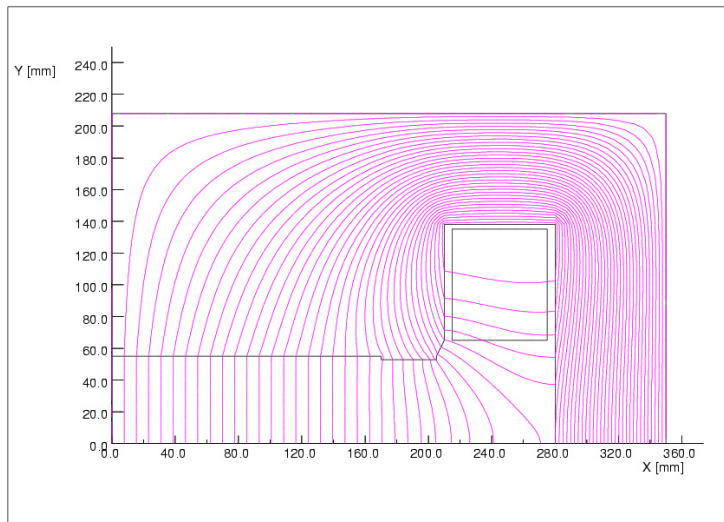
DIPOLÉS 90 DEGRÉS LIGNE LBE1

CARACTERISTIQUES POUR UNE BOBINE AUXILIAIRE

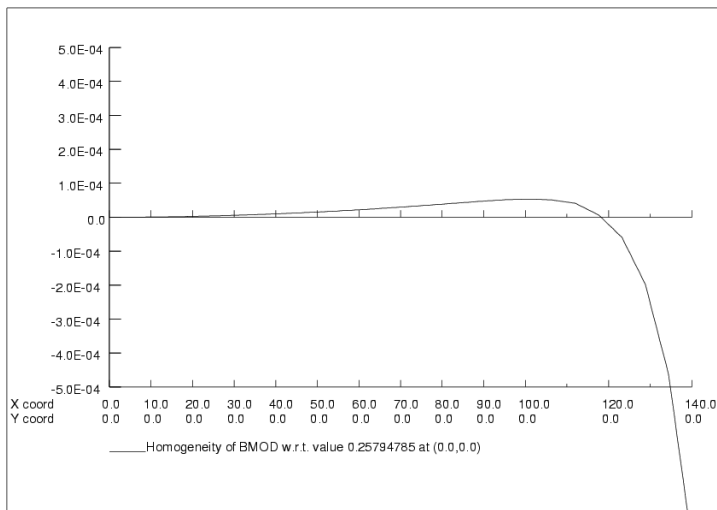
CONDUCTEUR MEPLAT	
Résistivité a 20 degrés	$1.75 \cdot 10^{-8}$
Section rectangulaire	$5 \cdot 1.25 \text{ mm}^2$
Rayons des arrondis	0.5 mm
Valeur moyenne de la section de cuivre	5.9 mm^2

DONNEES GEOMETRIQUES	
Nombre de spires	35
Longueur approximative d'une spire moyenne	3.1 m
Poids de cuivre	Kg

DONNEES ELECTRIQUES	
Intensité maximale	10 A
Tension maximale	3.5 V
Résistance électrique (I max)	0.35
Puissance consommée (I max)	35 W



Section radiale



Homogénéité radiale

DIPOLE 45 DEGRES LIGNE LBE2

CARACTERISTIQUES GENERALES

DONNEES MAGNETIQUES	
Angle de déviation	45°
Rayon de courbure	500 mm
Angle de la face d'entrée	0°
Angle de la face de sortie	0°
Induction nominale	0.150 T

DONNEES MECANIQUES	
Entrefer	H= 90 mm
Acier	Type ARMCO, XC06, XC10
Poids de fer	370 kg
Poids de cuivre	25 kg

DONNEES ELECTRIQUES ET HYDRAULIQUES	
Intensité maximale	I= 150 A
Tension maximale	U= 24 V
Puissance dissipée	P= 3.6 kW
Résistance électrique (a I max)	0.16
Nbre de circuits hydrauliques	8
Perte de charge	12 bars
Débit total	11.5 l/mn

CARACTERISTIQUES POUR UNE BOBINE PRINCIPALE

CONDUCTEUR	
Résistivité a 20 degrés	$1.75 \cdot 10^{-8}$
Section carrée	5* 5 mm ²
Diamètre du trou intérieur	3mm
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	48
Longueur approximative d'une spire moyenne	1.6 m
Nombre de circuits hydrauliques	4
Longueur approximative d'un circuit d'eau	20 m

DONNEES ELECTRIQUES ET HYDRAULIQUES	
Intensité maximale	150 A
Tension maximale	12 V
Résistance électrique (I max)	0.08
Puissance consommée (I max)	1.8 KW
Perte de charge	12 bars
Débit d'eau par circuit hydraulique	1.4 l/mn
Echauffement (I max)	5 degrés

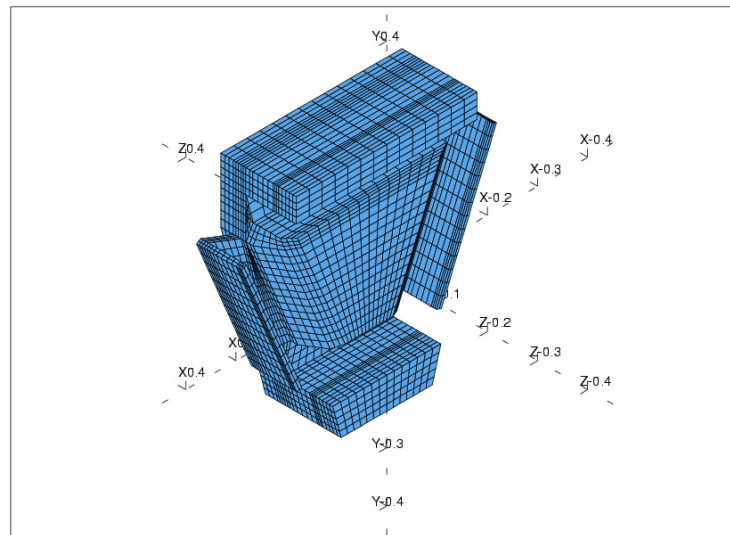
DIPOLE 45 DEGRES LIGNE LBE2

CARACTERISTIQUES POUR UNE BOBINE AUXILIAIRE

CONDUCTEUR MEPLAT	
Résistivité a 20 degrés	$1.75 \cdot 10^{-8}$
Section rectangulaire	$5 \cdot 1.25 \text{ mm}^2$
Rayons des arrondis	0.5 mm
Valeur moyenne de la section de cuivre	5.9 mm^2

DONNEES GEOMETRIQUES	
Nombre de spires	25
Longueur approximative d'une spire moyenne	1.7 m
Poids de cuivre	Kg

DONNEES ELECTRIQUES	
Intensité maximale	10 A
Tension maximale	1.5 V
Résistance électrique (I max)	0.15
Puissance consommée (I max)	15 W



REFERENCES

- [1] 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>
- [2] 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>
- [3] 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>
- [4] P. Bertrand, J-L. Biarrotte, D. Uriot, “Diamètre d’ouvertures faisceau le long du linac”, Septembre 2005. EDMS n°I-008527 ver.1. <https://edms.in2p3.fr/document/I-008527/1>
- [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] J-L. Biarrotte, “Consolidation de l’injecteur ions Spiral2”, Janvier 2006, inclus dans EDMS n°I-007485 ver.1. <https://edms.in2p3.fr/document/I-007485/1>
- [7] J-L. Biarrotte, “Performances du système de tri de l’injecteur q/A=1/3 SPIRAL-2”, Janvier 2006, inclus dans EDMS n°I-007485 ver.1. <https://edms.in2p3.fr/document/I-007485/1>
- [8] J-L. Biarrotte, “Consolidation de l’injecteur deutons Spiral2”, Février 2006, inclus dans EDMS n°I-007485 ver.1. <https://edms.in2p3.fr/document/I-007485/1>
- [9] P. Bertrand, J-L. Biarrotte, D. Uriot, “Consolidation des lignes LEPT”, Avril 2006, inclus dans EDMS n°I-008027 ver.1. <https://edms.in2p3.fr/document/I-008027/1>
- [10] 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>
- [11] J-L. Biarrotte, “Comportement des polluants dans les LBEs SPIRAL2”, Juin 2006, inclus dans EDMS n°I-008062 ver.1. <https://edms.in2p3.fr/document/I-008062/1>
- [12] J-L. Biarrotte, P. Bertrand, D. Uriot, “Beam dynamics studies for the SPIRAL-2 project”, Juin 2006, Proc. EPAC’06, Edinburgh. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e06/Pre-Press/WEPC007.pdf>
- [13] P. Bertrand, EDMS n°I-008027 ver.1. <https://edms.in2p3.fr/document/I-008027/1>
- [14] P. Bertrand, EDMS n°I-008062 ver.1. <https://edms.in2p3.fr/document/I-008062/1>
- [15] R. Ferdinand, “Sûreté, sécurité, radioprotection – Accélérateur: fonctions et descriptions”, Février 2006, EDMS n°I-008522 ver.1. <https://edms.in2p3.fr/document/I-008522/1>
- [16] T. Thuillier, réunion SPIRAL-2 accélérateur du 02 mars 2006, GANIL, inclus dans EDMS n°I-007494 ver.1. <https://edms.in2p3.fr/document/I-007494/1>
- [17] T. Thuillier, “Emittances calculées en sortie de source q/A=1/3”, Janvier 2006, EDMS n°I-007294 ver.1. <https://edms.in2p3.fr/document/I-007294/1>
- [18] R. Gobin et al., “SPIRAL2 – Rapport de fin APD - Source ECR type SILHI pour la production de deutons”, Février 2005, EDMS n°I-007512 ver.1. <https://edms.in2p3.fr/document/I-007512/1>

-
- [19] INP Junkerstr.99, 65206 Wiesbaden, Germany, Ver. 4.36.
- [20] J-M. De Conto, “Diffusion coulombienne et échange de charge dans SPIRAL2”, Février 2003, EDMS n°I-008528 ver.1. <https://edms.in2p3.fr/document/I-008528/1>
- [21] R. Duperrier, N. Pichoff, D. Uriot, “CEA Saclay codes review”, Avril 2002, Proc. ICCS Conference, Amsterdam.
- [22] P. Bertrand, “LIONS_LINAC, a new particle in cell code for linacs”, Mai 2003, Proc. PAC’03, Portland, Oregon. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/p03/PAPERS/FPAG011.PDF>
- [23] K.L. Brown, D.C. Carey, Ch. Iselin and F. Rothacker: “Transport, a computer program for designing charged particle beam transport systems”, Yellow reports CERN 73-16(1973) & CERN 80-04 (1980).
- [24] L. Farvacque et J. Payet et al. Voir <http://www.esrf.fr/ftp/pub/machine/theory/BETA89.pdf>.
- [25] Voir http://mgt-hippi.web.cern.ch/mgt-hippi/HIPPI05_presentations/WP5_franchi.pdf.
- [26] Voir <http://mgt-hippi.web.cern.ch/mgt-hippi>.
- [27] A. Ben Ismail, “Etude des effets transitoires de la compensation de charge d'espace sur la dynamique d'un faisceau intense”, Septembre 2005, thèse Université Paris XI. <http://www-dapnia.cea.fr/Phocea/file.php?class=std&&file=Doc/Publications/Archives/dapnia-05-08-T.pdf>
- [28] P. Bertrand, J-L. Biarrotte, D. Uriot, “Flat beams and application to the mass separation of radioactive beams”, Juin 2006, Proc. EPAC’06, Edinburgh. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e06/Pre-Press/TUPLS081.pdf>