

# Etude et mesure de l'alignement du faisceau de SILHI

D. Uriot

*CEA/DSM/DAPNIA/SACM/LEDA*

Le 20 février 2005

1.	Introduction .....	3
2.	Les causes de désalignement du faisceau.....	3
3.	Sensibilité du RFQ aux erreurs du faisceau d'entrée .....	4
4.	La ligne d'étude.....	5
5.	Etudes analytiques.....	5
5.1	Alignement du centre de gravité du faisceau: .....	5
5.2	Détermination des erreurs d'alignement des éléments de la ligne .....	6
6.	Etudes statistiques .....	7
6.1	Tolérances .....	7
6.2	Emplacement des déviateurs .....	8
7.	Experimentations.....	8
7.1	Alignement .....	9
7.2	Les erreurs de la ligne .....	10
8.	Le cas d'IPHI .....	11
9.	Conclusion.....	12

Figure 1:	Pertes et grossissements d'émittances pour une erreur de position.....	4
Figure 2:	Pertes et grossissements d'émittances pour une erreur d'angle. ....	4
Figure 2:	Ligne de SILHI .....	5
Figure 3:	Distribution du champ d'un déviateur pour 10.000 cas aléatoires.....	7
Figure 4:	Premier profileur (profil horizontal et vertical).....	9
Figure 5:	Second profileur (profil horizontal et vertical).....	9
Figure 6:	Evolution de la position X et Y du faisceau au plan du premier profileur. ....	10
Figure 7:	Profils horizontal et vertical.....	11

Tableau 1:	Erreurs maximales tolérables. ....	8
------------	------------------------------------	---

# 1. Introduction

La ligne basse énergie de l'injecteur IPHI comporte deux couples de déviateurs magnétiques opérants dans les deux directions transverses. Ceux-ci ont été dimensionnés et localisés sans étude de dynamique de faisceau préalable [1]. Cette étude vise à tester la capacité de ces déviateurs à aligner efficacement le faisceau à injecter dans le RFQ. Ce point est crucial si on veut éviter des pertes non acceptables le long du RFQ compte tenu de sa faible ouverture en regard de la taille du faisceau. La méthode la plus simple pour le vérifier est de contrôler le centre de gravité du faisceau au niveau des deux profileurs, mesurant le plan transverse en deux positions situés après le second solénoïde. La principale difficulté est un couplage transverse X et Y produit par les solénoïdes. Ceci rend impossible tout réglage manuel des déviateurs. Le but de ce papier est d'étudier analytiquement et statistiquement le comportement du centre de gravité du faisceau ainsi que et la méthode permettant de l'aligner et de confronter ces résultats à des mesures sur la ligne SILHI.

## 2. Les causes de désalignement du faisceau.

Il existe sur la ligne de SILHI quatre principales causes de désalignement :

- Le désalignement des éléments de la ligne, essentiellement la source ECR et son extraction et les deux solénoïdes.
- Le champ magnétique terrestre agissant pour des faisceaux ayant la rigidité de ceux de SILHI : en ne considérant aucun blindage, la déviation en bout de ligne n'excède pas le millimètre pour des protons de 95 keV.
- Les forces non linéaires de charges d'espace et non axisymétriques tendent à briser la symétrie circulaire du faisceau, tel que des effets d'image due aux portions non circulaires de la chambre. On peut également imaginer compte tenu du diamètre du trou d'extraction de la source au regard de la dimension de la chambre ECR, une non homogénéité du faisceau extrait.
- La dernière cause est une conséquence des premières. Si les précédentes causes induisent un désalignement non négligeable, des pertes sur les parois de la chambre vont créer un déplacement du centre de gravité du faisceau.

Les deux dernières causes rendent le transport du centre de gravité non linéaire. D'autre part il faut considérer le problème des espèces secondaires  $H_2^+$  et  $H_3^+$ . En effet, due à leurs rigidités différentes, leurs centres de gravité respectifs vont se comporter différemment de celui de l'espèce principale. Ce qui risque de compliquer sensiblement toute tentative de mesure précise du centre de gravité global même si on peut estimer qu'une grande partie de ces espèces secondaires sera perdue avant les points de mesure. De plus, si les centres de gravité des différentes espèces ne sont pas superposés, la force de charge d'espace du faisceau global ne sera plus symétrique par rapport à celui du faisceau  $H^+$  et va donc influencer non linéairement le centre de gravité de l'ensemble.

Cependant, pour simplifier, on va faire l'hypothèse de la linéarité. Elle a l'avantage de rendre le comportement du centre de gravité complètement indépendant des paramètres du faisceau de sortie de la source (émittances et tailles) et surtout de la charge d'espace.

### 3. Sensibilité du RFQ aux erreurs du faisceau d'entrée

La Figure 1 et la Figure 2 représentent l'évolution des pertes et des grossissements d'émittance dans le RFQ pour une erreur de position et d'angle horizontale du faisceau d'entrée. Le code Toutatis [2] a été utilisé avec une distribution d'entrée gaussienne coupée à  $4\sigma$ . Il faut noter, qu'en pratique, d'une part la distribution d'entrée aura certainement un halo plus important qu'une Gaussienne  $4\sigma$  (voir mesures sur le LEDA [4] : Le paramètre quantifiant le halo est 60% plus important que pour une Gaussienne), et surtout que les erreurs de positions et d'angles horizontales et verticales vont se cumuler, augmentant d'autant les pertes dans le RFQ. Quoiqu'il en soit, dans un cas idéal, les figures ci-dessous montrent qu'il faudra aligner le faisceau en position à quelques dixièmes de millimètre et avec une erreur angulaire inférieure à 10 mrad, si on veut limiter les pertes à quelques pour-cent. Cette extrême sensibilité à l'alignement du faisceau d'entrée relativise les craintes sur les tolérances mécaniques internes du RFQ lui-même.

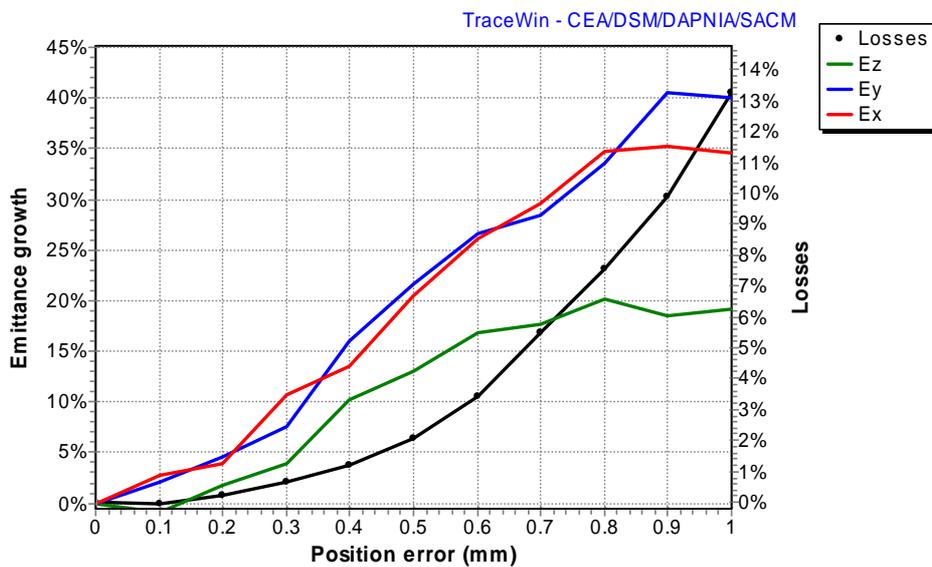


Figure 1: Pertes et grossissements d'émittances pour une erreur de position.

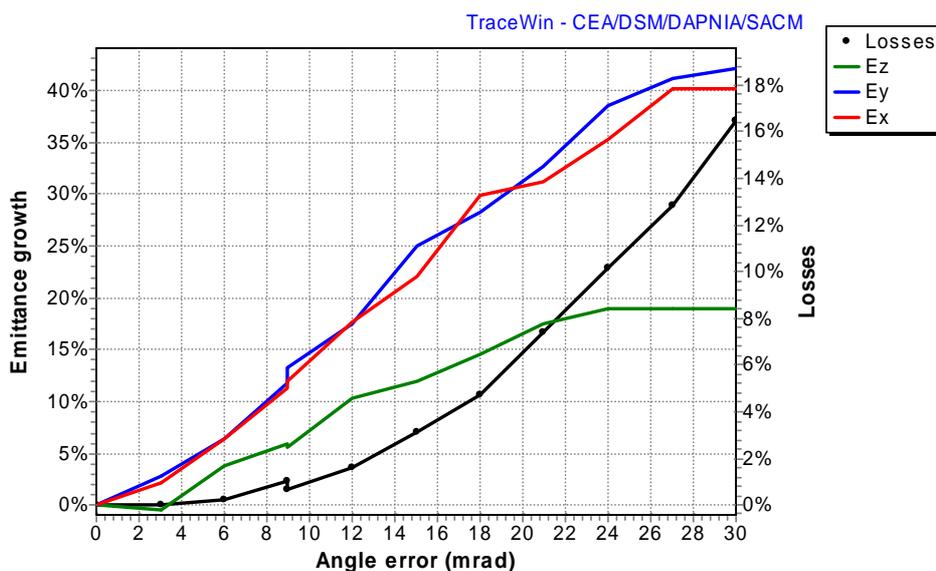


Figure 2: Pertes et grossissements d'émittances pour une erreur d'angle.

## 4. La ligne d'étude

La ligne de SILHI a été équipée pour cette étude de deux profileurs dans les plans X et Y pouvant être placés dans les deux positions indiquées sur la Figure 3 en rouge (D1). Dv1 et Dv2 représentent les déviateurs. Ces déviateurs magnétiques ont été dimensionnés de manière à produire une déviation maximum de 20mrad, soit un champ maximum de  $8.1.10^{-3}$  T. S1 et S2 représentent les deux solénoïdes respectivement fixés à 109A et 153A. Ces valeurs correspondent à un réglage permettant d'obtenir les observations sur les profileurs les plus exploitables possibles.

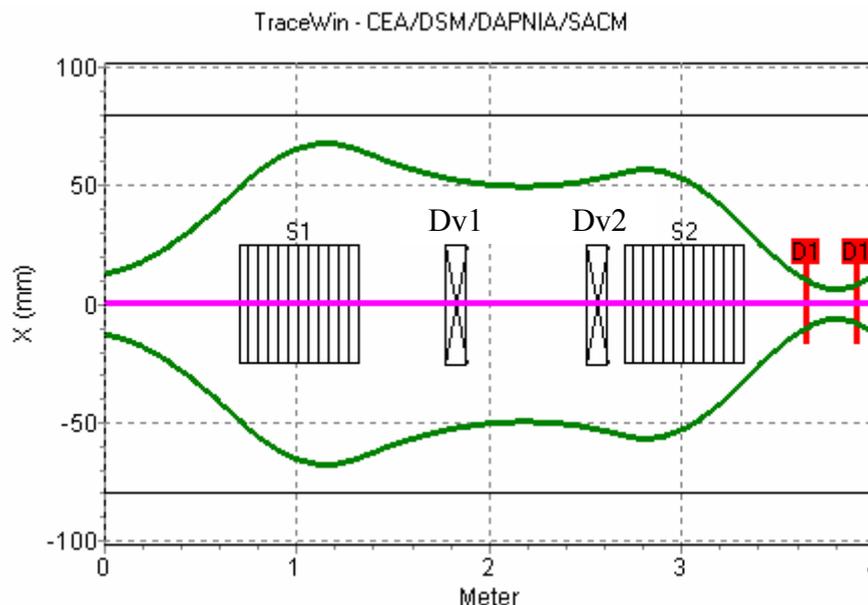


Figure 3: Ligne de SILHI

## 5. Etudes analytiques

L'étude analytique du comportement du centre de gravité du faisceau de SILHI démontre qu'il est possible, en utilisant deux profileurs, utilisés comme moniteurs de position, placés après le second solénoïde, de calculer les forces des déviateurs nécessaires à aligner le faisceau au niveau des deux point de mesure. De plus, il est théoriquement possible en utilisant ces moniteurs de caractériser les erreurs d'alignements des éléments de la ligne.

Cette étude est basée sur l'hypothèse de la linéarité du système. En d'autres termes, elle n'est valide que si les causes de désalignement du faisceau sont principalement linéaires. Cela implique également que le faisceau soit homogène ou symétrique par rapport à son centre de gravité quelque soit sa distribution (uniforme, Gaussienne...). Dans le cas contraire, la charge d'espace induirait une composante non linéaire sur le centre de gravité du faisceau. Les mesures sur la ligne de SILHI permettront de vérifier ces hypothèses.

### 5.1 Alignement du centre de gravité du faisceau:

Considérant le système global déviateurs et profileurs, il est possible de résoudre le système si le nombre d'inconnu (force des déviateurs) est équivalent au nombre de point de mesures (profileur). Il suffit simplement d'engendrer le nombre d'équations nécessaires à résoudre un

système d'équation linéaire à  $n$  inconnues. Dans le cas particulier de SILHI, aligner le faisceau en X et Y en deux positions nécessite l'utilisation des deux couples de déviateurs. Il suffit alors, par exemple, d'allumer les déviateurs un par un en éteignant les autres et de relever la position du faisceau aux niveaux des profileurs. Répéter cette étape 16 fois permet d'obtenir les 16 termes de la matrice de transfert des déviateurs vers les profileurs.

Le système qui doit être résolu est le suivant:

$$\begin{cases} X_1(Dv1_X, Dv1_Y, Dv2_X, Dv2_Y) = 0 \\ Y_1(Dv1_X, Dv1_Y, Dv2_X, Dv2_Y) = 0 \\ X_2(Dv1_X, Dv1_Y, Dv2_X, Dv2_Y) = 0 \\ Y_2(Dv1_X, Dv1_Y, Dv2_X, Dv2_Y) = 0 \end{cases}$$

$X1, Y1, X2, Y2$  étant la position du centre gravité du faisceau au niveau des profileurs 1 et 2. Ces quantités sont des fonctions des champs dans les déviateurs :  $Dv1,2_{x,y}$ . On note  $X1_0, Y1_0, X2_0, Y2_0$  les positions du faisceau sans aucun déviateur allumé.  $M$  est la matrice de transfert des déviateurs vers les profileurs. Si on considère donc le système comme linéaire il peut être résolu par inversion de la matrice  $M$  de manière à obtenir les valeurs des déviateurs:

$$M \cdot \begin{pmatrix} Dv1_X \\ Dv1_Y \\ Dv2_X \\ Dv2_Y \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} X1_0 \\ Y1_0 \\ X2_0 \\ Y2_0 \end{pmatrix} \quad \text{On obtient ainsi:} \quad \begin{pmatrix} Dv1_X \\ Dv1_Y \\ Dv2_X \\ Dv2_Y \end{pmatrix} = -M^{-1} \begin{pmatrix} X1_0 \\ Y1_0 \\ X2_0 \\ Y2_0 \end{pmatrix}$$

## 5.2 Détermination des erreurs d'alignement des éléments de la ligne

On peut étendre le raisonnement précédent permettant d'aligner le centre de gravité du faisceau et ainsi en déduire les erreurs désalignement des différents éléments de la ligne (solénoïdes, source ECR). La méthode consiste à augmenter le nombre d'équations du système linéaire du nombre d'inconnues que sont les erreurs de positionnement considérées. Dans le cas présent le nombre de déviateurs ne permet pas d'engendrer un nombre d'équations suffisantes, l'astuce consiste donc à générer des équations en créant des lignes différentes par changement des valeurs des solénoïdes. Il suffit donc de faire varier la valeur des solénoïdes de la ligne autant de fois que nécessaire. Ce développement s'appuie sur une hypothèse supplémentaire à la linéarité du système. En effet, le système d'équation n'est exploitable que si les variations de champ dans les solénoïdes induisent une variation de position suffisante. Autrement dit, que la dynamique des champs des solénoïdes soit suffisante au regard de l'amplitude des erreurs tout en conservant un faisceau observable et exploitable au niveau des profileurs.

## 6. Etudes statistiques

### 6.1 Tolérances

Cette étude statistique permet, connaissant le champ maximum des déviateurs magnétiques (8.1 mT), de définir les amplitudes maximales des défauts de désalignement des différents éléments de la ligne. Les erreurs d'alignement suivantes ont été considérées:

- Position transverse ( $dx_{sol}$  &  $dy_{sol}$ ) des solénoïdes.
- Position angulaire ( $Rx_{sol}$  &  $Ry_{sol}$ ) des solénoïdes.
- Position transverse ou rotation ( $dx_{source}$  &  $dy_{source}$ ) de la source ECR.
- Position angulaire ou rotation ( $Rx_{source}$  &  $Ry_{source}$ ) de la source ECR.

Les erreurs de position angulaire des solénoïdes sont fixées de manière à les ramener à des erreurs de position transverse équivalentes par la relation:

$$R_{sol} = \frac{d_{sol}}{\frac{1}{2} \text{Longueur}_{solénoïde}}$$

Pour une erreur d'amplitude  $A$ , la valeur de l'erreur a une probabilité uniforme d'être comprise entre  $\pm A$ . La valeur rms est donc de  $A/\sqrt{3}$ . Si la distribution des erreurs n'était pas uniforme, il faudrait simplement appliquer le principe de valeur rms équivalente. De plus, afin de simplifier le problème on considère sur la source ECR les mêmes erreurs que celles appliquées sur les solénoïdes. Le transport se fait de manière linéaire avec le code d'enveloppe TraceWin [2] et la statistique prise en compte porte sur 10.000 cas.

Si on observe la distribution résultante des valeurs des champs magnétiques à appliquer dans un des déviateurs de la ligne (voir la distribution Figure 4, de la valeur d'un déviateur pour des erreurs tirées aléatoirement et uniformément entre  $\pm 1\text{mm}$  et  $\pm 0.2\text{deg.}$ ). On remarque qu'elle n'est évidemment pas uniforme. Pour simplifier, on va la considérer gaussienne et on va estimer que la valeur maximale d'un déviateur correspond à 3 fois la valeur rms de cette distribution.

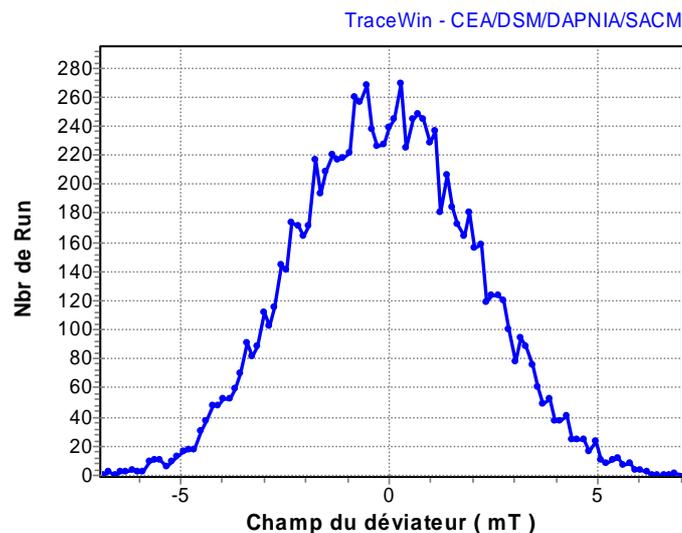


Figure 4: Distribution du champ d'un déviateur pour 10.000 cas aléatoires.

Le Tableau 1 représente les erreurs maximales tolérables d’alignement des éléments de la ligne compte tenu du champ maximal et de la position actuelle des déviateurs. Bien évidemment, ces résultats dépendent d’une part des champs dans les solénoïdes mais également de l’énergie du faisceau. C’est à 95 keV que les déviateurs sont le moins efficaces et plus le champ des solénoïdes est élevé plus on est sensible à une erreur de leurs positionnements.

Conditions	Position (mm)	Rotation (deg.)
Solénoïdes à (109A, 153A), 95 keV	1.35	0.27
Solénoïdes à (145A, 164A), 95 keV	1.23	0.24

**Tableau 1: Erreurs maximales tolérables.**

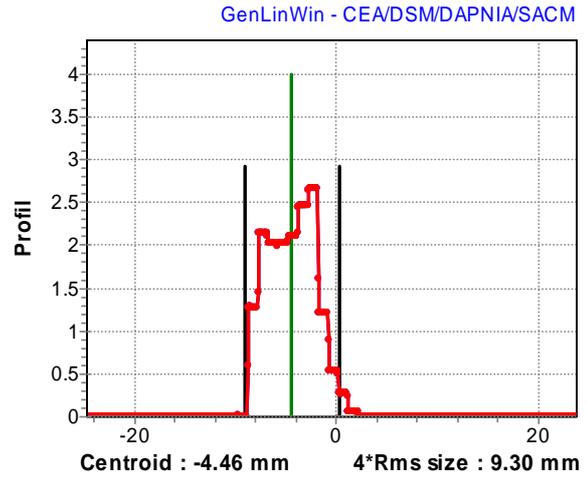
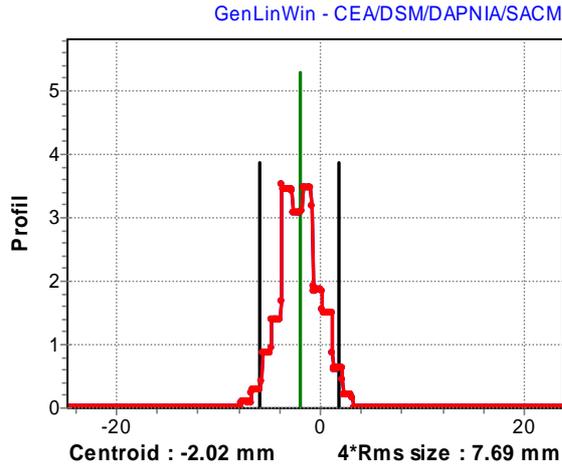
Si on étudie les éléments un par un et qu’on normalise on peut déterminer que statistiquement la ligne est deux fois plus sensible aux défauts sur chacun des solénoïdes que ceux de la source ECR. Il faudra donc apporter un soin particulier à l’alignement des éléments de la ligne et en particulier des deux solénoïdes qui ne pourront se contenter d’un ajustement grossier à la règle. 1.2mm et 0.24° paraissent des tolérances mécaniques relativement aisées à atteindre, mais il ne faut pas oublier que l’on parle de tolérances concernant le centre magnétique et non mécanique. D’autre part, même si on dispose du champ nécessaire dans les déviateurs pour corriger le centre de gravité du faisceau principal, on sera dans l’incapacité de le faire sur les secondaires qui doivent être eux, à peu centrés sur le bloc d’arrêt situé devant le RFQ [3]. De plus le faisceau principal est très proche de la chambre (iris, trèfle) et risque inutilement des pertes, si la qualité des d’alignements est négligée.

## 6.2 Emplacement des déviateurs

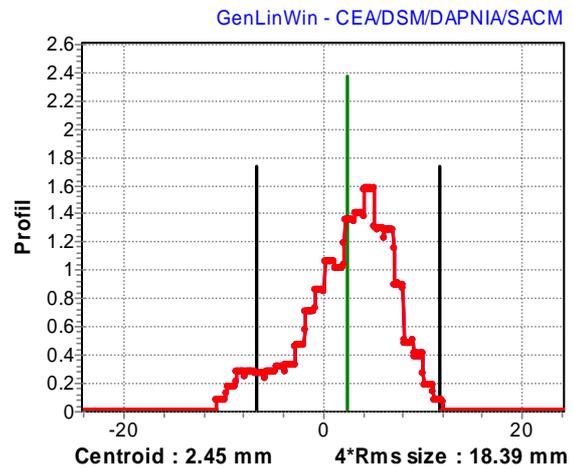
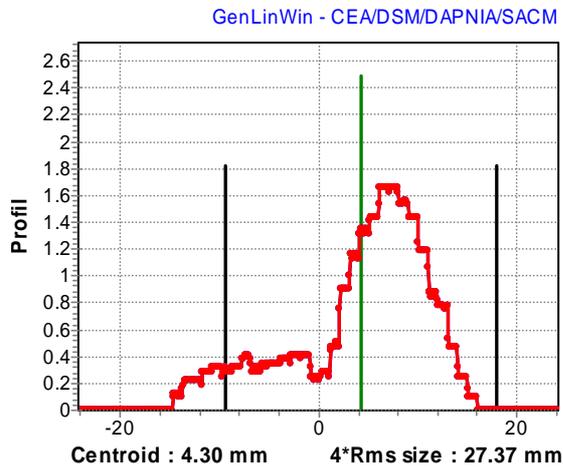
Dans l’optique de l’installation de la nouvelle ligne courte d’injection dans le RFQ, l’emplacement actuelle des deux déviateurs peut être amélioré de manière à être le plus efficace possible. En partant du principe qu’ils seront de toute façon localisés entre les deux solénoïdes, les règles à appliquer pour optimiser leur positionnement est simple : Les éloigner le plus possible l’un de l’autre.

## 7. Experimentations

Une campagne de mesure a été donc menée afin de vérifier sur SILHI la possibilité de mettre en œuvre les développements analytiques précédemment développés. Une des difficultés rencontrées est la nécessité d’avoir des profils exploitables aux deux positions de mesure en même temps, sachant que pour passer d’une position à l’autre il fallait casser le vide de la ligne donc attendre une journée. Les quatre profils Figure 5 et Figure 6 ont été relevés pour un faisceau de 80mA à 95keV, tous les déviateurs éteints. Ils montrent également la difficulté d’interprétation de ces mesures. En effet, le second profileur fait apparaître des profils non symétriques peut-être due à la présence de faisceaux secondaires désaxés. Et on peut estimer que l’imprécision des mesures est vraisemblablement supérieure à l’espacement des fils des profileurs qui est de 1 mm.



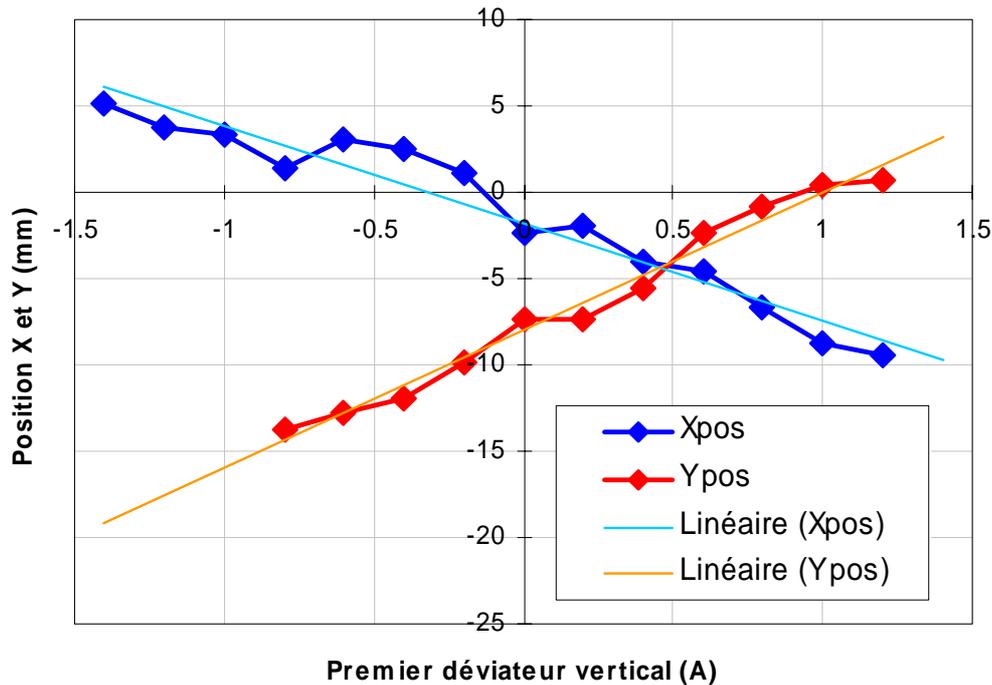
**Figure 5: Premier profileur (profil horizontal et vertical)**



**Figure 6: Second profileur (profil horizontal et vertical)**

### 7.1 Alignement

Compte tenu de ces imprécisions, plutôt que d'utiliser une mesure par coefficients de la matrice de transfert, déviateur → profileurs, on applique une régression linéaire sur chacune de ces 16 courbes ainsi obtenues à partir des quatre déviateurs sur les directions X et Y des deux profileurs afin de moyenner et donc réduire le plus possible les erreurs de mesure. La Figure 7 montre une de ces courbes représentant l'évolution du centre de gravité du faisceau (mm) au niveau du premier profileur en fonction du courant appliqué dans le premier déviateur vertical. On constate bien un comportement proche du linéaire.



**Figure 7: Evolution de la position X et Y du faisceau au plan du premier profileur.**

Une fois la matrice obtenue, les forces des déviateurs ont été calculées et appliquées afin de vérifier si la position du faisceau était bien ramenée sur l'axe au niveau des deux profileurs. On constate, que la valeur des déviateurs calculés est heureusement inférieure à leurs maximums possibles. On obtient les positions suivantes du faisceau :

$$\mathbf{X}_1 = + 6.3 \text{ mm,}$$

$$\mathbf{Y}_1 = - 1.2 \text{ mm}$$

$$\mathbf{X}_2 = - 1.7 \text{ mm}$$

$$\mathbf{Y}_2 = - 1.2 \text{ mm}$$

Une des positions ( $X_1$ ) n'est clairement pas satisfaisante. On peut avancer plusieurs raisons pour l'expliquer :

- L'imprécision des mesures.
- Les non symétries des mesures (non linéarité) voir Figure 6, peut être due à aux faisceaux secondaires.
- Des pertes de faisceau non symétriques et non négligeables. En effet, on observe des décentremments de l'ordre de 5 mm (premier profileur en sortie du second solénoïde, déviateurs éteints), ce qui implique un décentrement supérieur à l'entrée du second solénoïde car le transport dans un solénoïde ne peut amplifier ce type de défaut.

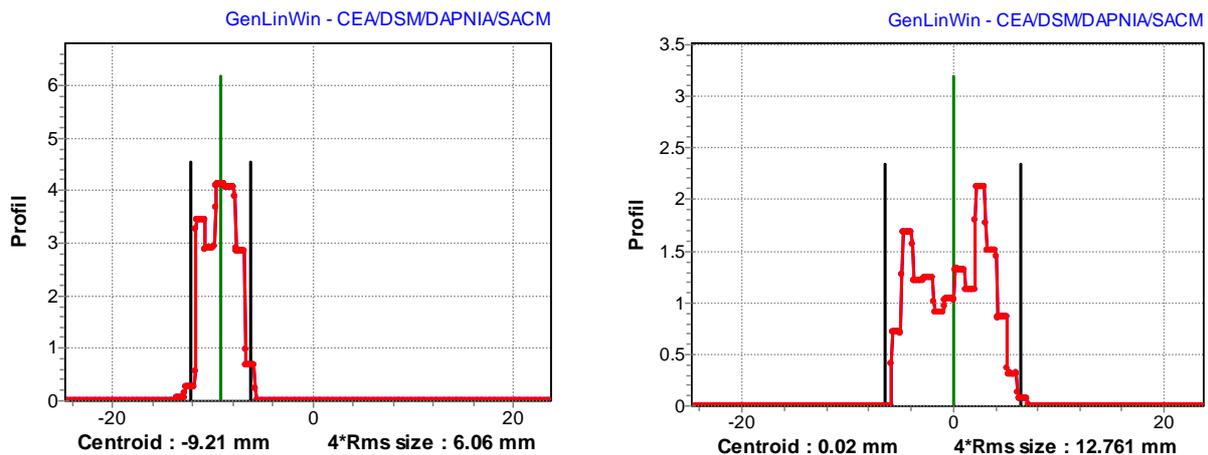
Malgré tout, les ordres de grandeur sont là. On peut estimer dans l'état, que les champs des déviateurs seront suffisants pour aligner le faisceau dans le RFQ.

## 7.2 Les erreurs de la ligne

Pour permettre de revenir aux erreurs de la ligne, les champs dans les solénoïdes ont donc été progressivement variés. Malheureusement il apparaît très rapidement que dès que l'on s'éloigne du point de réglage nominal des champs, les profils de faisceau deviennent complètement inexploitable rendant impossible l'utilisation d'une telle méthode (pas assez

de dynamique). De plus, il est vraisemblable que compte tenu de la précision des mesures il aurait été impossible de déduire les erreurs de positionnement des éléments de la ligne avec une précision suffisante.

Remarque: Un certain nombre de mesures fait apparaître non seulement des faisceaux non symétrique tel que celles de la Figure 6, tandis que d'autre montrent clairement des faisceaux non circulaire (taille horizontale 2 à 3 fois celle verticale). Voir l'exemple de la Figure 8. Notons que dans ces conditions, la mesure d'émittance qui repose obligatoirement sur l'hypothèse que le faisceau est circulaire et centré, est complètement inexploitable.



**Figure 8: Profils horizontal et vertical.**

## 8. Le cas d'IPHI

Jusqu'ici la procédure d'alignement s'appuyait sur deux profileurs X et Y espacés par un drift (condition obligatoire pour aligner un faisceau en position et en angle). La ligne retenue pour injecter dans le RFQ ne disposera au mieux que d'une caméra en entrée de RFQ n'ayant de toute manière pas la précision nécessaire ( $\sim 200 \mu\text{m}$ ). Cela signifie, que l'alignement du faisceau dans le RFQ ne pourra être obtenu qu'indirectement par la mesure de transmission du RFQ lui-même, par exemple. De plus, compte tenu du couplage transverse induit par les solénoïdes, dès qu'un champ d'un des solénoïdes sera changé, il faudra reprendre l'alignement. Pour compliquer le tout, l'effet des quatre déviateurs étant évidemment également couplés (on traverse un solénoïde), il faudrait réaliser des abaques 4D pour toutes les valeurs possibles de champs dans les solénoïdes. Une telle méthode paraît peu envisageable. Dans tous les cas, il faudra fixer les forces des solénoïdes avant celle des déviateurs au risque de tourner en rond, loin du point optimum de fonctionnement. Il est vraisemblable qu'une procédure itérative, multi paramètres et automatique soit la seule issue à ce problème.

Des simulations multiparticulaires de ce type d'algorithme ont commencé afin de tester la pertinence de ces méthodes. Malheureusement elles sont extrêmement gourmandes en temps de calcul et encore beaucoup de réflexions restent à faire sur le choix de l'algorithme optimal.

## 9. Conclusion

L'ensemble de ces réflexions et de ces mesures permet de dégager plusieurs points clairs :

- Les tolérances d'alignement du faisceau à l'entrée du RFQ sont très sévères (quelques dixièmes de millimètre). Les diagnostics actuellement disponibles (profileur, caméra) ne permettront pas d'atteindre une telle précision.
- Les forces des déviateurs paraissent suffisantes dans la ligne SILHI actuelle pour centrer le faisceau en entrée du RFQ.
- Eloigner les deux déviateurs l'un de l'autre améliorerait leur efficacité.
- L'alignement (rotation et position), de la source et des solénoïdes en particulier, doit faire l'objet d'une attention toute particulière, même si on estime pouvoir le corriger. Car, même si on a toute latitude pour recentrer le faisceau, plus les erreurs des éléments sont importantes, plus l'excursion maximale du faisceau est amplifiée. La qualité du transport dans la ligne SILHI ne pourra qu'en être améliorée.
- Les procédures d'alignement dans le cas de IPHI apparaissent très compliquées. Fixer en premier lieu les champs des solénoïdes avant ceux des déviateurs devrait un peu simplifier le problème. Mais un algorithme évolué d'adaptation automatique semble nécessaire.

## Références :

- [1] : Etude et conception d'un déviateur magnétique sous vide, Isabelle Yao (Avril 1998)
- [2] : R. Duperrier, N. Pichoff and D. Uriot, in *Proceedings of the International Conference on Computational Science (ICCS 02)*, (Springer-Verlag, London, 2002), Part III, p. 411–418
- [3] : Estimation des pertes sur le bloc d'arrêt des ions  $H_2^+$  et  $H_3^+$  (D. Uriot, R. Duperrier) *CEA/DSM/DAPNIA/SACM/LEDA*, Le 05 Avril 2004
- [4] : Simulations du RFQ d'IPHI avec distribution mesurée du LEDA, R. Duperrier, D. Uriot, *CEA/DSM/DAPNIA/SEA*, 20 août 2001