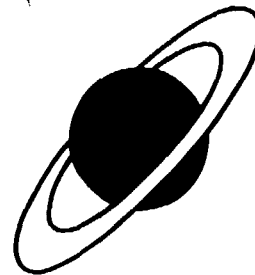


LABORATOIRE NATIONAL SATURNE

04

400
I+E



91191 Gif-sur-Yvette Cédex France

CARACTERISTIQUES DU FAISCEAU PRIMAIRE DE SISSI

P. NGHIEM, J. PAYET et A. TKATCHENKO
Groupe Théorie
CEA-DSM & CNRS-IN2P3
Laboratoire National Saturne
CE Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

RAPPORT Interne

CEA-LNS/GT/94-01



Centre National de la Recherche Scientifique
Commissariat à l'Énergie Atomique

VVL

CARACTERISTIQUES DU FAISCEAU PRIMAIRE DE SISSI

P. NGHIEM, J. PAYET et A. TKATCHENKO

Groupe Théorie

CEA-DSM & CNRS-IN2P3

Laboratoire National Saturne

CE Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

I. INTRODUCTION

SISSI (Source d'Ions Secondaires à Supraconducteurs Intenses) comprend 2 solénoïdes à fort champ ($B_{max} \sim 11 T$) entre lesquels est placée une cible de production d'ions secondaires. Ce dispositif permet d'obtenir un faisceau primaire de faibles dimensions transverses au niveau de la cible et de recueillir la plupart des ions produits grâce à sa grande acceptance angulaire.

L'étude présentée ici concerne la définition des caractéristiques du faisceau primaire dans SISSI où la taille de l'image sur cible visée ($\phi = 0.4 mm$) nécessite une évaluation de l'effet des aberrations chromatiques et géométriques introduites par le fort pouvoir focalisant du premier solénoïde ainsi qu'une évaluation des effets de défauts d'alignement.

Les calculs ont été effectués en deux étapes :

- Une étude au premier et second ordre à l'aide du code matriciel BETA.
- Une étude aux ordres supérieurs à l'aide du code ZGOUBI pouvant prendre en compte les champs mesurés et dans lequel les équations du mouvement sont intégrées numériquement.

La structure et le réglage nominal de la ligne de transport depuis la sortie du CSS2 jusqu'à la cible nous ont été communiqués par MM. Bru et Grunberg du GANIL sous forme de liste de paramètres de sortie des codes de calcul GALOPR et TRANSPORT.

II. MODELE DE CHAMP UTILISE POUR LES SOLENOIDES

Dans les codes GALOPR et TRANSPORT utilisés au GANIL, les solénoïdes de SISSI ont été découpés en 28 tronçons à champ constant afin de restituer au mieux la courbe du champ longitudinal sur l'axe mesurée chez le constructeur.

Partant de ces données (28 valeurs) on a procédé à un lissage par spline pour déterminer un ensemble de 201 valeurs en des points régulièrement espacés d'environ

1.47 cm. La courbe ainsi obtenue permet une bonne évaluation des dérivées qui sont nécessaires pour le calcul des composantes du champ hors de l'axe dans le code d'intégration numérique ZGOUBI (voir figure 1).

Pour arrêter l'intégration au niveau de la cible, c'est-à-dire en un point où le champ n'est pas nul, on a utilisé l'option "droite de coupure" prévue dans ZGOUBI qui permet d'éviter les problèmes de variation brutale des dérivées, en prenant en compte le champ au-delà de la coupure.

Dans le code BETA, les solénoïdes sont comme dans GALOPR et TRANSPORT découpés en tronçons, mais on a utilisé ici un plus grand nombre de valeurs de champ (60).

Pour illustrer le bon accord des deux représentations, on donne dans le tableau 1 les matrices de transfert du premier solénoïde calculées par BETA et ZGOUBI.

**TABLEAU 1 - Matrices de transfert du 1^{er} solénoïde
calculées par BETA et ZGOUBI**

BETA - MATRICE DE TRANSFERT ORDRE 1 (MKSA)

-2.330E-02	1.030E-01	-1.267E-01	5.598E-01	.000E+00	.000E+00	.000E+00
-2.962E-01	-9.546E-02	-1.610E+00	-5.190E-01	.000E+00	.000E+00	.000E+00
1.267E-01	-5.598E-01	-2.330E-02	1.030E-01	.000E+00	.000E+00	.000E+00
1.610E+00	5.190E-01	-2.962E-01	-9.546E-02	.000E+00	.000E+00	.000E+00
.000E+00	.000E+00	.000E+00	.000E+00	1.000E+00	.000E+00	.000E+00
.000E+00	.000E+00	.000E+00	.000E+00	.000E+00	1.000E+00	.000E+00

DETERMINANTS : Dxx = .032726, Dxy = .967275
Dyx = .967275, Dyy = .032726

ZGOUBI - MATRICE DE TRANSFERT ORDRE 1 (MKSA)

-.02333	.10672	-.12692	.57831	.00000	.00000
-.30492	-.01547	-1.60988	-.28433	.00000	.00000
.12692	-.57831	-.02333	.10672	.00000	.00000
1.60988	.28433	-.30492	-.01547	.00000	.00000
.00000	.00000	.00000	.00000	1.00000	.00000
.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	1.00000

DETERMINANTS : DETY = .0329007544
DETZ = .0329008363

N.B. Dans BETA, s, x, z désignent respectivement les coordonnées longitudinales, radiales et verticales. Dans ZGOUBI ces mêmes coordonnées sont notées X (ou S), Y , Z . Les matrices de transfert du tableau 1 s'appliquent donc aux vecteurs

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \\ z \\ z' \\ s \\ \delta \end{pmatrix} \quad \text{ou} \quad \begin{pmatrix} Y \\ T \\ Z \\ P \\ X \\ \delta \end{pmatrix} \quad \text{où } \delta = \frac{\Delta p}{p} \text{ désigne l'écart relatif en impulsion.}$$

III. ETUDE DE L'OPTIQUE DU FAISCEAU AU PREMIER ET SECOND ORDRE

Les hypothèses relatives aux conditions initiales du faisceau sont les suivantes :

- rigidité $B\rho = 2.88 \text{ T.m}$
- Emittances $E_x/\pi = E_z/\pi = 5.10^{-6} \text{ m.rad}$
- Dispersion interne en moment $\Delta p/p = \pm 1.5 \cdot 10^{-3}$.

La matrice faisceau σ_0 (notation TRANSPORT, unités MKSA) à l'entrée de la ligne est donnée ci-dessous :

$$\sigma_0 = \begin{bmatrix} 1.0719E-05 & & & & & & & \\ 3.8246E-06 & 1.2037E-05 & & & & & & \\ .0000E+00 & .0000E+00 & 2.0976E-05 & & & & & \\ .0000E+00 & .0000E+00 & 3.2746E-06 & 1.7030E-06 & & & & \\ 1.0636E-05 & -2.1564E-05 & .0000E+00 & .0000E+00 & 7.2159E-05 & & & \\ 4.2075E-07 & 4.4618E-06 & .0000E+00 & .0000E+00 & -1.0643E-05 & 2.2500E-06 & & \end{bmatrix}$$

Le fichier de données pour BETA décrivant la structure optique de la ligne de transport depuis la sortie du CSS2 jusqu'à la cible est donné en annexe.

Le tableau 2 donne la matrice de transfert ainsi que la matrice faisceau σ en bout de ligne et indique qu'au 1er ordre les résultats obtenus sont identiques à ceux de GALOPR ou de TRANSPORT. Pour mémoire l'enveloppe du faisceau (1er ordre) est donnée sur la figure 2.

TABLEAU 2 - Matrice de transfert de la ligne et matrice faisceau au point cible obtenues avec BETA

BETA - MATRICE DE TRANSFERT ORDRE 1 (MKSA)

-8.530E-03	2.337E-02	4.128E-02	-1.693E-01	.000E+00	2.003E-06	.000E+00
-1.286E+00	-3.140E-01	4.203E+00	6.192E+00	.000E+00	2.461E-04	.000E+00
4.637E-02	-1.271E-01	7.594E-03	-3.114E-02	.000E+00	-1.089E-05	.000E+00
6.989E+00	1.707E+00	7.732E-01	1.139E+00	.000E+00	-1.338E-03	.000E+00
-3.170E-01	-1.519E+00	.000E+00	.000E+00	1.000E+00	-1.432E+01	.000E+00
.000E+00	.000E+00	.000E+00	.000E+00	.000E+00	1.000E+00	.000E+00

DETERMINANTS : Dxx = .032726, Dxy = .967275
 Dyx = .967275, Dyy = .032726

MATRICE FAISCEAU

4.0115E-08						
3.7303E-07	6.2667E-04					
-6.4805E-11	4.3544E-09	4.0456E-08				
4.3562E-09	1.0819E-06	3.5016E-07	6.2099E-04			
-6.7939E-08	1.1986E-05	3.6936E-07	-6.5164E-05	4.7294E-04		
4.5072E-12	5.5369E-10	-2.4504E-11	-3.0102E-09	-3.2229E-05	2.2500E-06	

Pour calculer les dimensions de la taille du faisceau sur la cible, l'effet des aberrations chromatiques a été pris en compte en modifiant les forces de focalisation des éléments magnétiques dans le rapport des rigidités $B\rho$ associées aux particules.

On a ainsi :

- pour un quadrupôle :
$$K = \frac{GL}{(B\rho)} = \frac{GL}{(B\rho)_o(1 + \frac{\Delta p}{p})} = K_o \frac{1}{(1 + \frac{\Delta p}{p})}$$

- pour le solénoïde :
$$S = \frac{BL}{(B\rho)} = \frac{BL}{(B\rho)_o(1 + \frac{\Delta p}{p})} = S_o \frac{1}{(1 + \frac{\Delta p}{p})}$$

Cette modélisation donne les mêmes résultats que ceux qui sont obtenus lorsqu'on effectue un transport au second ordre en utilisant les coefficients d'aberration $(x/x_o\delta)$, $(x/x'_o\delta)$ des quadrupôles et du solénoïde.

La figure 3 montre les ellipses de phase transverses au niveau de la cible pour $\frac{\Delta p}{p} = -1.5 \cdot 10^{-3}$, 0 et $+1.5 \cdot 10^{-3}$. On peut voir que l'effet des aberrations chromatiques se fait peu sentir en ce qui concerne les dimensions de la tache du fait de la faible dispersion en moment. Le faisceau reste rond avec l'extension spatiale désirée de ± 0.2 mm.

Pour compléter cette étude aux 1er et 2nd ordre, nous avons procédé à une évaluation des effets de défauts d'alignement des éléments focalisants sur le centrage du faisceau à la cible.

Deux types de défauts ont des effets notables sur la position du faisceau :

- des déplacements horizontaux et verticaux des quadrupôles
- des déplacements horizontaux et verticaux du solénoïde

Dans le 1er cas, la simulation est faite par tirage aléatoire, pour chaque quadrupôle, de défauts de positions (h ou v) suivant une distribution gaussienne, d'écart-type 0.2 mm, tronquée à trois écart-type.

La figure 4 présente les trajectoires centrales, le long de la ligne, pour 100 jeux de défauts en l'absence de corrections.

On voit ainsi que l'axe faisceau peut se déplacer de :

$$\begin{aligned} &\pm 5 \text{ mm en } x \text{ et} \\ &\pm 6 \text{ mm en } z \text{ dans le solénoïde.} \end{aligned}$$

La figure 5 montre les coordonnées au niveau de la cible de ces trajectoires centrales.

Le centre de la tache peut se décaler de :

$$\begin{aligned} &\pm 0.6 \text{ mm en } x \text{ et } \pm 10 \text{ mrad en } x' \\ &\pm 0.4 \text{ mm en } z \text{ et } \pm 8 \text{ mrad en } z' \end{aligned}$$

Dans le 2ème cas, un déplacement de 0.2 mm du solénoïde a été simulé en x . On voit, sur la figure 6, que la forte focalisation du solénoïde ramène le faisceau sur son axe et donc induit un même déplacement de la tache sur la cible.

IV. ETUDE DE L'EFFET DES ABERRATIONS D'ORDRES SUPERIEURS

Pour étudier l'effet des aberrations d'ordres supérieurs à 2 pouvant être introduites par le solénoïde, on a utilisé le code ZGOUBI qui intègre pas à pas les équations du mouvement dans les champs magnétiques traversés.

Dans un premier temps, on a calculé la matrice de transfert de la structure à partir de trajectoires gaussiennes (proches de l'axe). Le résultat donné dans le tableau 3 est, comme on peut le constater, en très bon accord avec celui du code BETA.

**TABLEAU 3 - Matrice de transfert de la ligne
calculée avec ZGOUBI**

ZGOUBI - MATRICE DE TRANSFERT ORDRE 1 (MKSA)					
- .00864	.02344	.04598	-.16344	.00000	-.00006
-1.29115	-.30698	4.16695	6.19654	.00000	.00074
.04896	-.12654	.00825	-.03050	.00000	.00030
6.98803	1.70890	.77110	1.13171	.00000	-.00306
-.31738	-1.51855	.00000	.00000	1.00000	-4.31816
.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	1.00000
DETERMINANTS :		DETY =	.0329173990		
		DETZ =	.0328569412		

Pour ensuite caractériser le faisceau à la cible, on a simulé les trajectoires de particules dont les coordonnées initiales sont régulièrement réparties sur le pourtour des ellipses décrites au chapitre II dans les plans (Y,T) ou (Z,P) pour 3 valeurs d'écart en moment $\Delta p/p = -1.5 \cdot 10^{-3}, 0, +1.5 \cdot 10^{-3}$.

L'allure de ces trajectoires dans le premier solénoïde est donnée par la figure 7. Le tracé des trajectoires au voisinage de la cible dans les plans (Y,S) et (Z,S) permet d'apprécier la profondeur de champ (figure 8).

Enfin, la trace du faisceau sur cible dans les plans de phase transverses (Y,T) et (Z,P) est donnée par la figure 9. Il apparaît que le faisceau, au niveau de la cible, présente une section à peu près circulaire de rayon et d'ouverture angulaire compris dans $\pm 0,23$ mm et ± 25 mrad.

Ces résultats, très proches de ceux de BETA, indiquent que l'effet des ordres supérieurs est très faible. Ceci est dû à la qualité du faisceau primaire (faible émittance, bonne définition en énergie) et au fait que les aberrations introduites par le solénoïde c'est-à-dire par l'élément le plus critique, ne subissent aucune amplification (la cible est située juste à la sortie du solénoïde).

On notera, pour finir, que les résultats ci-dessus sont inchangés lorsqu'on simule les trajectoires de particules ayant des coordonnées non-nulles simultanément dans les 2 plans transverses.

V. CONCLUSION

Compte tenu de la qualité des faisceaux délivrés par les accélérateurs du GANIL (faibles émittances transverses, bonne définition en énergie), l'obtention d'une tache de faibles dimensions transverses ($\phi \sim 0.4$ mm) au niveau de la cible de SISSI ne semble pas poser de problèmes.

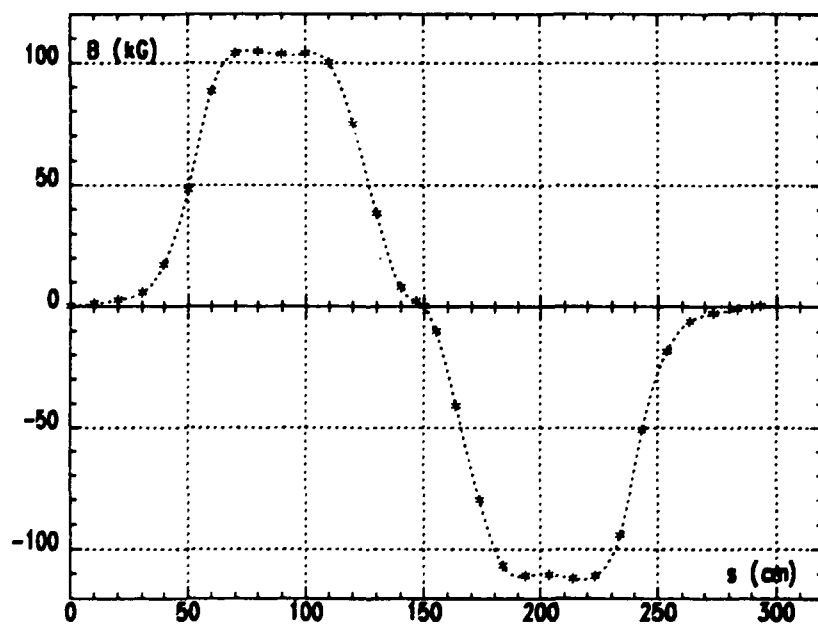


Figure 1 - Allure du champ sur l'axe utilisé dans ZGOUBI pour le calcul des trajectoires dans les solénoïdes.

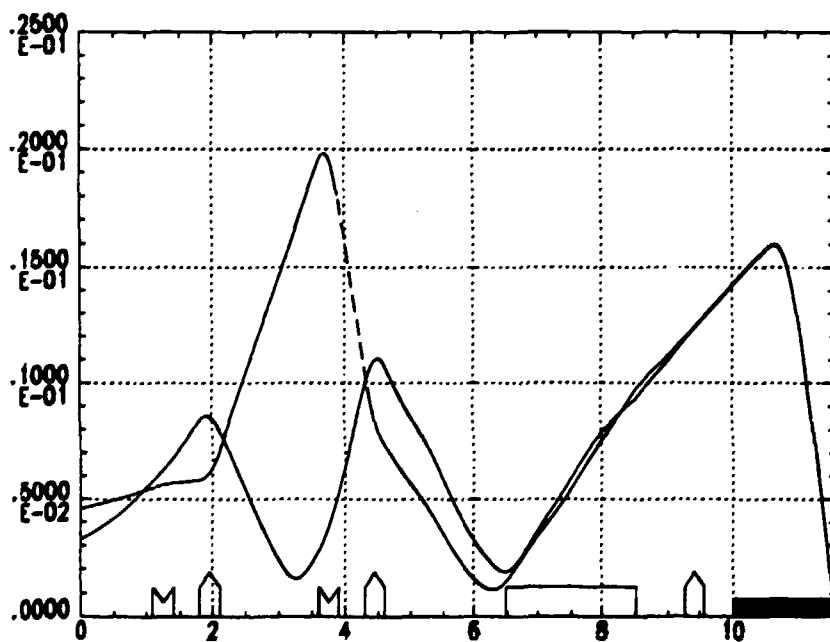
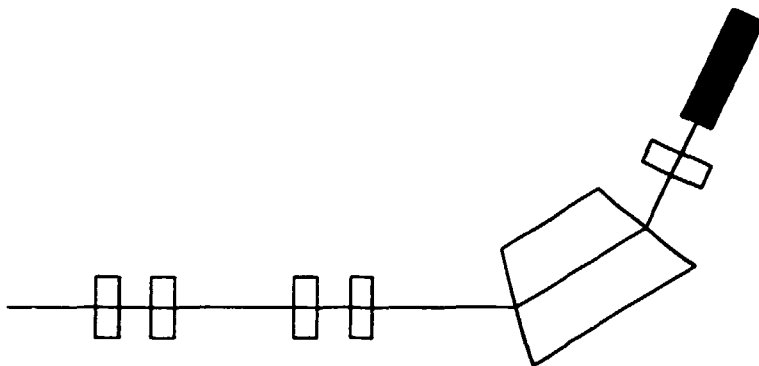


Figure 2 - Schéma de la ligne de transport et enveloppes du faisceau.

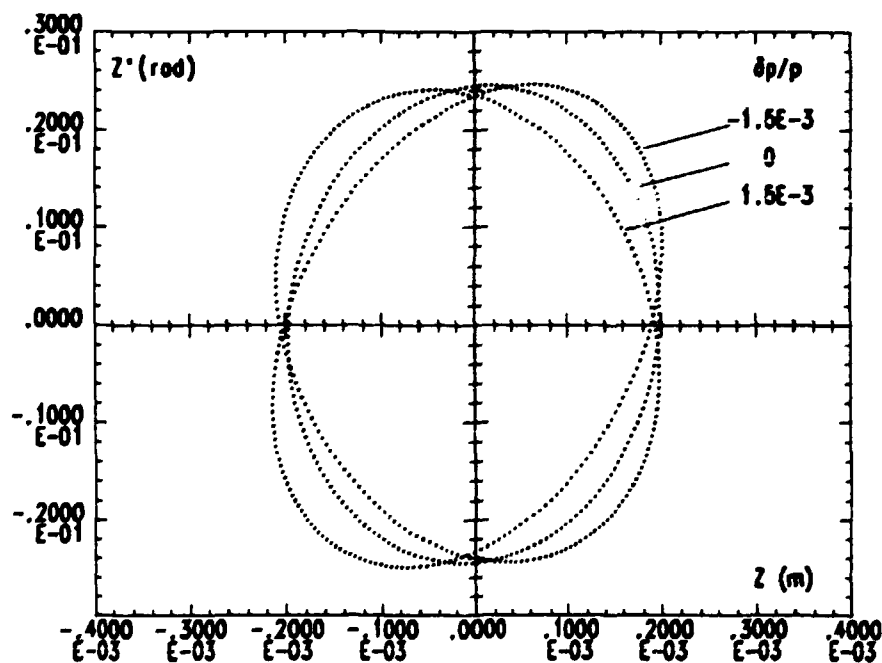
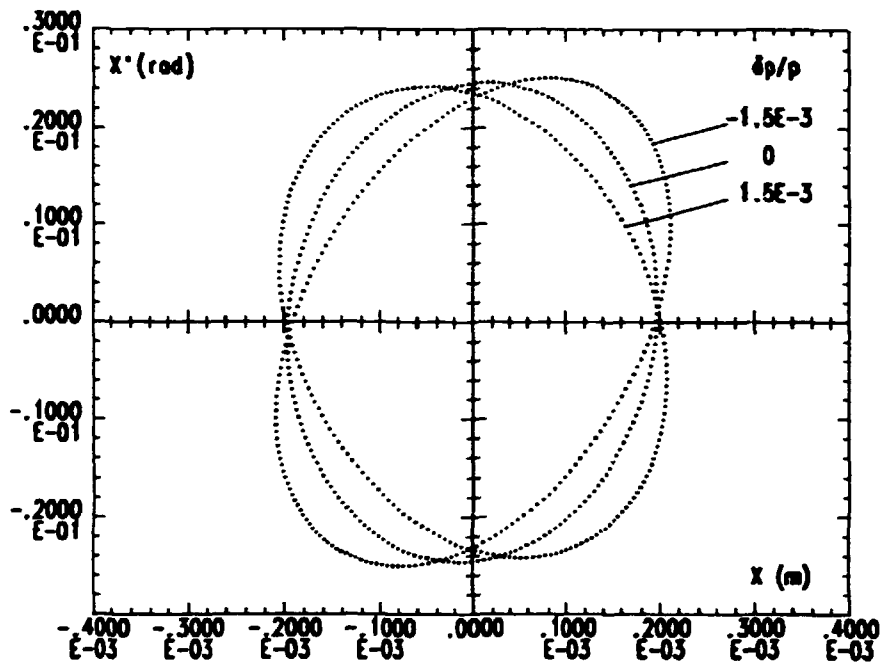


Figure 3 - Ellipses de phase transverses au niveau de la cible pour $\Delta p/p = -1.5 \cdot 10^{-3}$, 0 , $+1.5 \cdot 10^{-3}$.

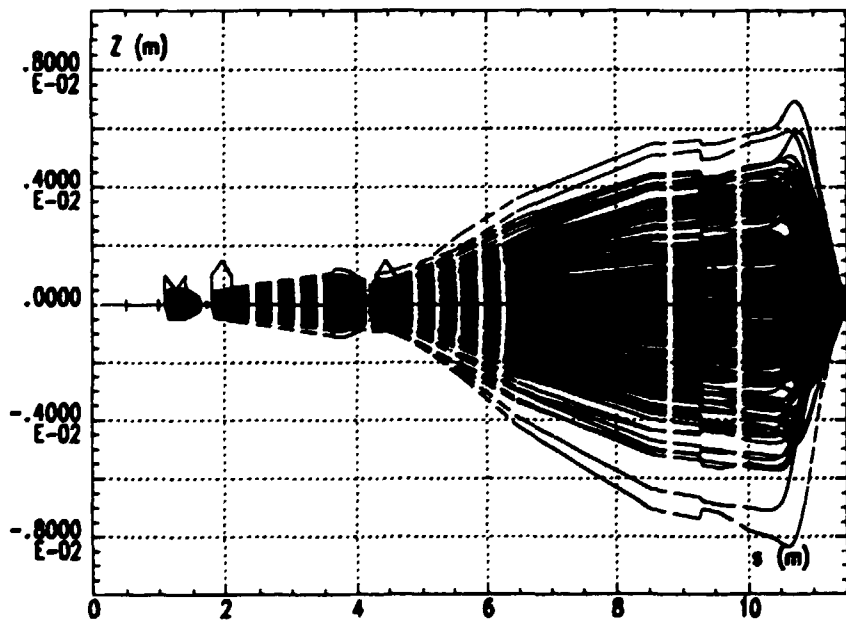
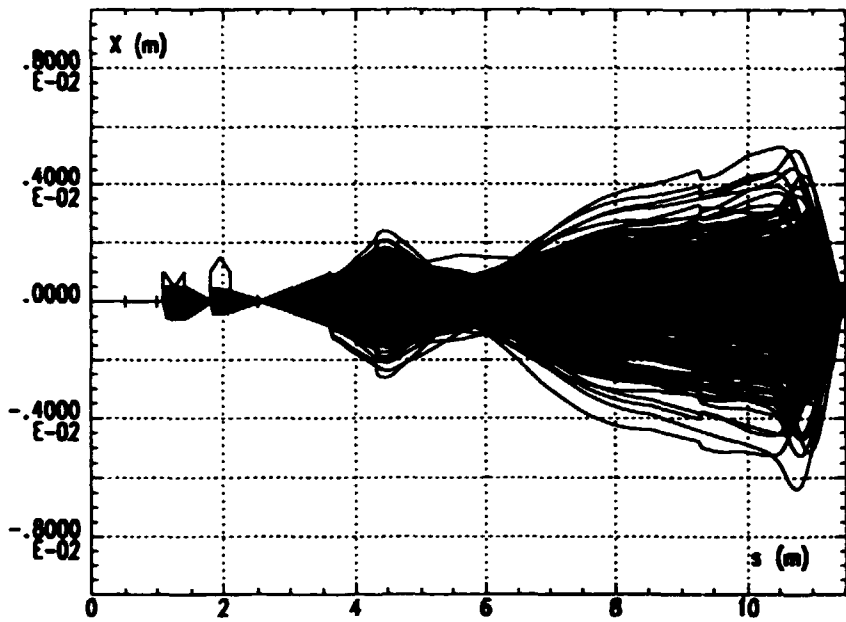


Figure 4 - Trajectoires centrales le long de la ligne en présence de défauts d'alignement.

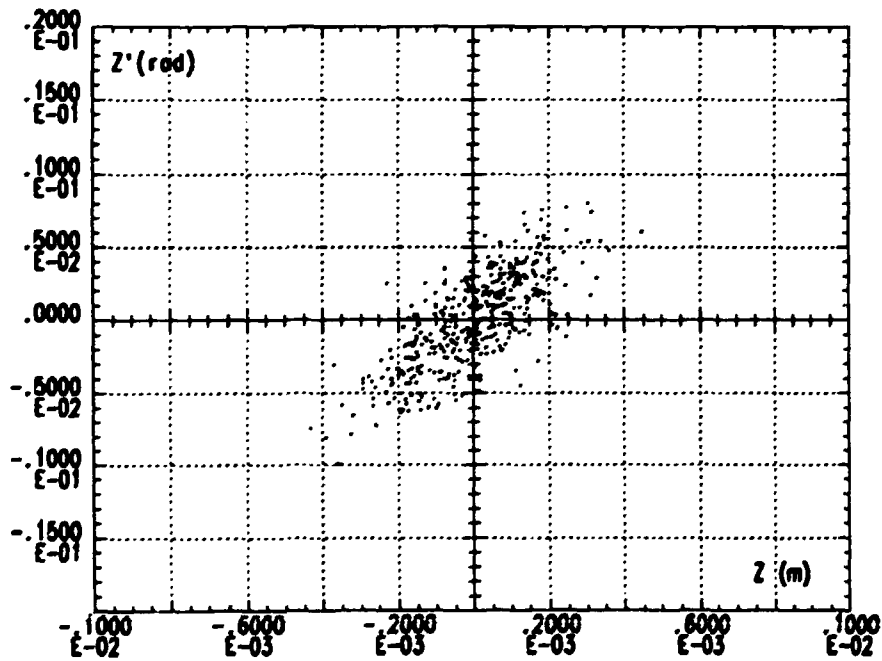
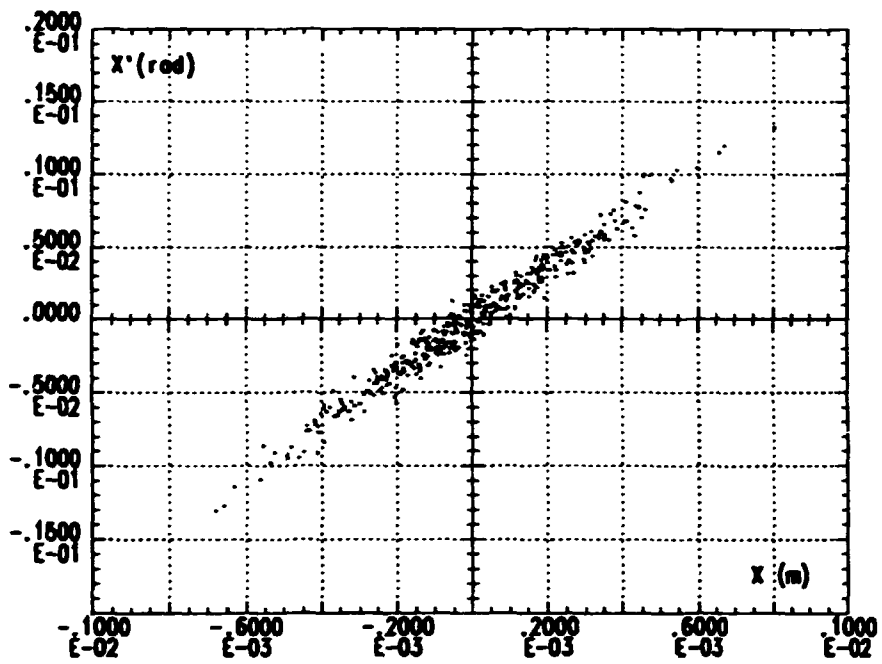


Figure 5 - Coordonnées des trajectoires centrales sur cible en présence de défauts d'alignement.

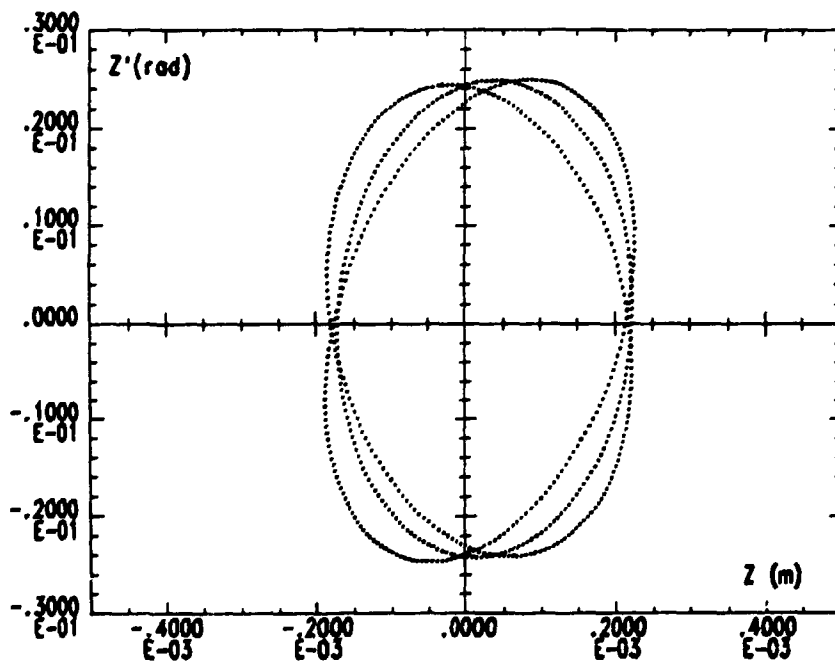
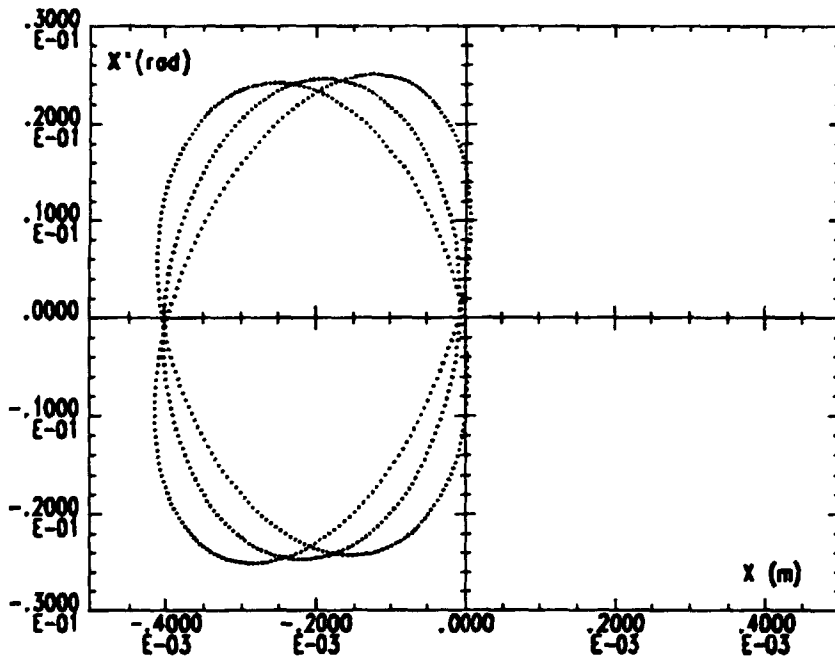


Figure 6 - Déplacement des ellipses de phase au niveau de la cible dû à un désalignement du scintilloïde.

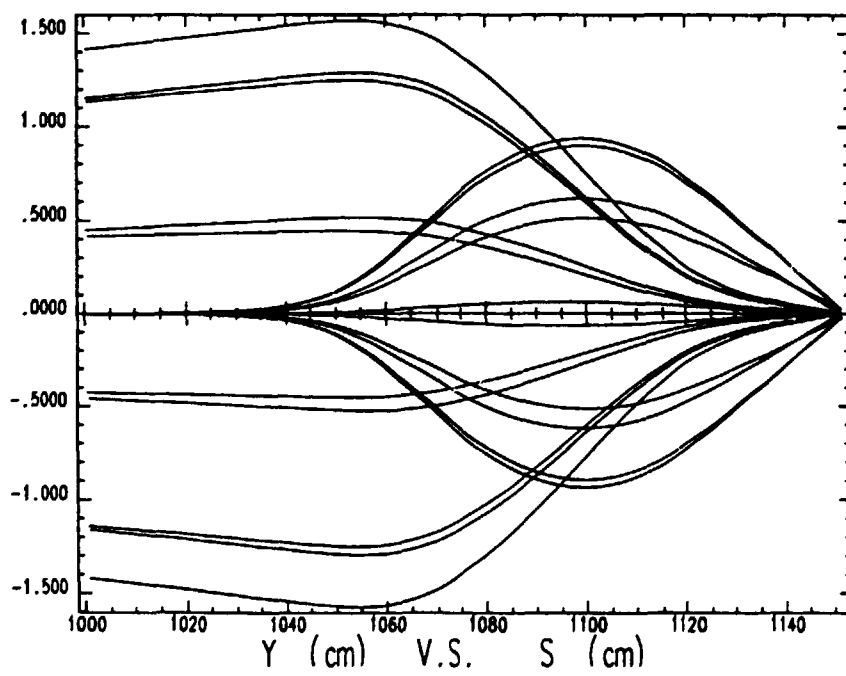


Figure 7 - Trajectoires dans le premier solénoïde calculées avec ZGOUBI.

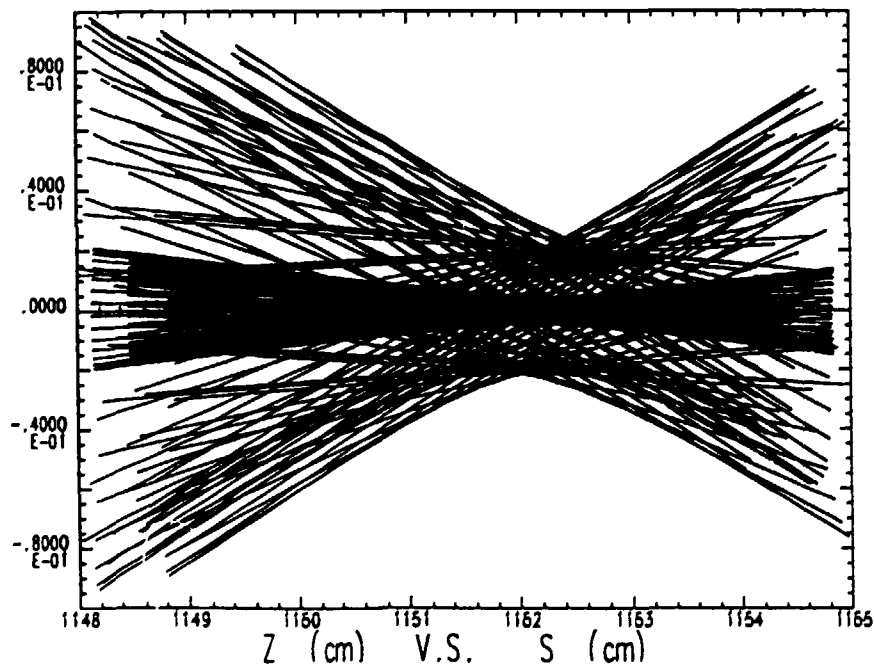
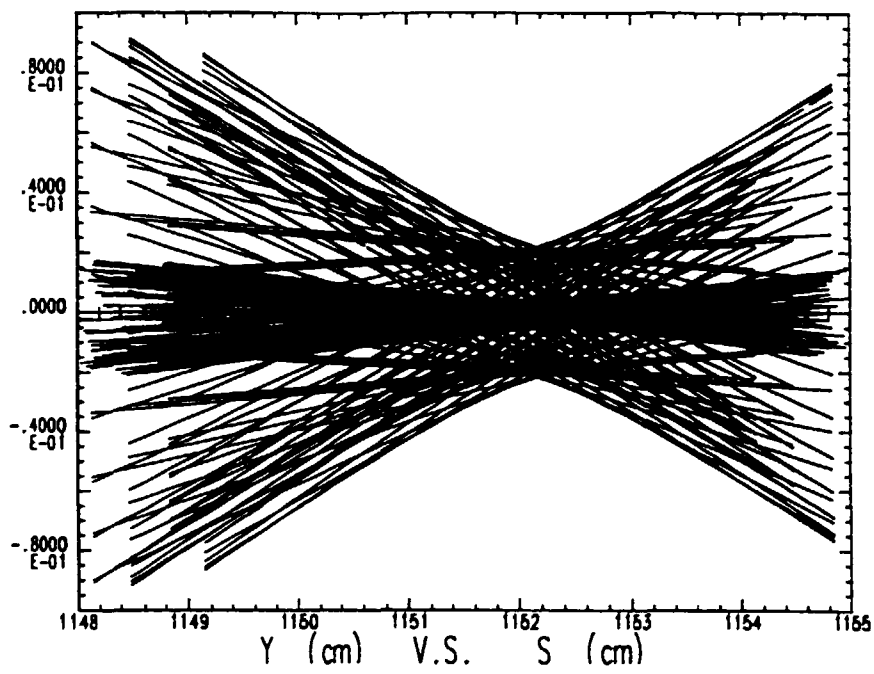


Figure 8 - Tracé des trajectoires au voisinage de la cible.

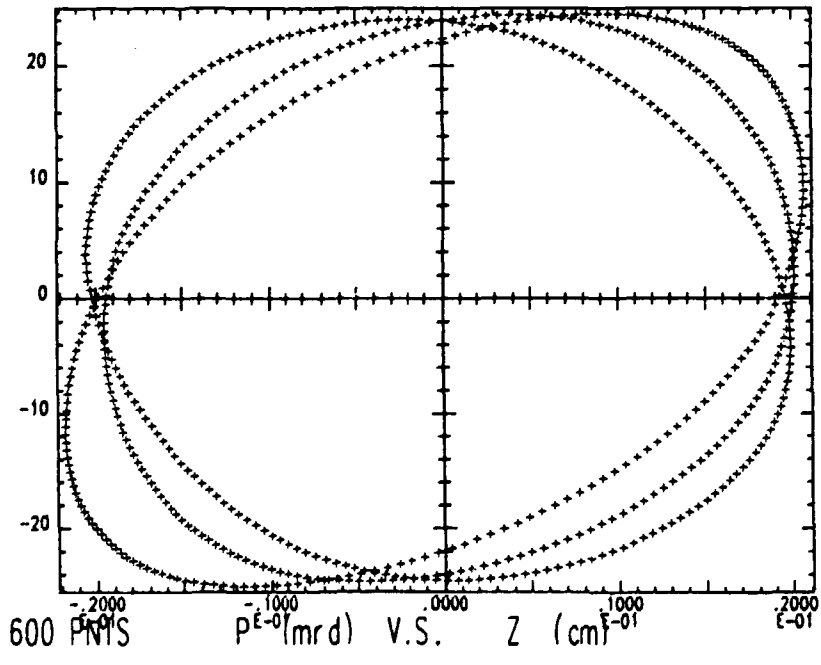
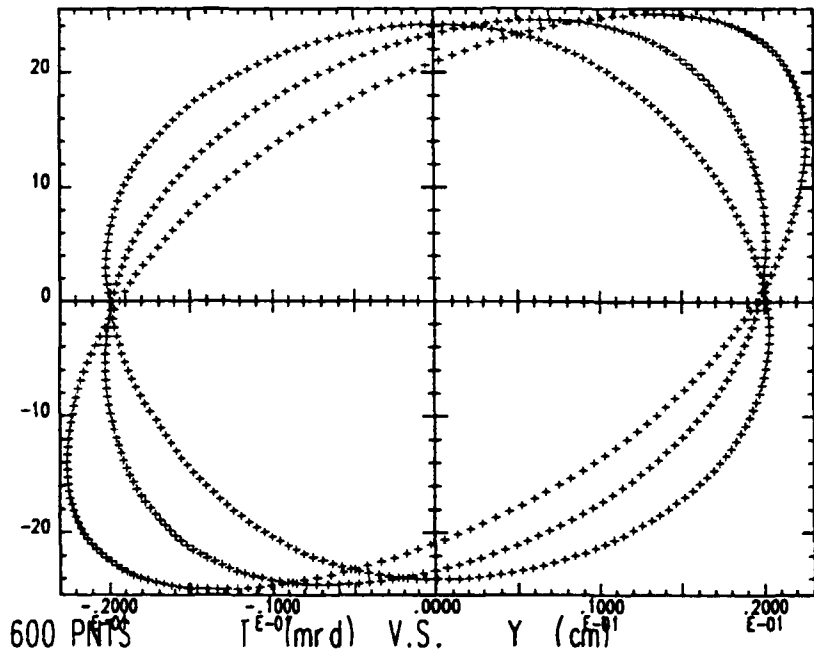


Figure 9 - Tracé du faisceau sur cible dans les espaces de phase pour $\Delta p/p = +1.5 \cdot 10^{-3}$, 0 , $-1.5 \cdot 10^{-3}$.

ANNEXE 1

Fichier de données pour BETA

De la sortie du cyclotron à la cible

*** TITRE ***

CYCLO-CIBLE

*** LIST OF ELEMENTS ***

49

CYCLO	SQ	.000000E+00				
.100000E+01		.000000E+00	.000000E+00	.000000E+00	.000000E+00	.187000E+00
.000000E+00		.100000E+01	.000000E+00	.000000E+00	.000000E+00	.198300E+01
.000000E+00		.000000E+00	.100000E+01	.000000E+00	.000000E+00	.000000E+00
.000000E+00		.000000E+00	.000000E+00	.100000E+01	.000000E+00	.000000E+00
.166600E+01		-.170600E+01	.000000E+00	.000000E+00	.100000E+01	-.473000E+01
.000000E+00		.000000E+00	.000000E+00	.000000E+00	.000000E+00	.100000E+01
SD1	SD	.887000E+00				
SD2	SD	.211300E+00				
L3Q11	QP	.303800E+00	-.386806E+00			
SD3	SD	.396100E+00				
L3Q12	QP	.304500E+00	.410986E+01			
SD4	SD	.149460E+01				
L3Q13	QP	.304500E+00	-.449910E+01			
SD5	SD	.396700E+00				
L3Q14	QP	.304000E+00	.527260E+01			
SD6	SD	.101050E+01				
SD7	SD	.863000E+00				
COIE	CO	-.258310E+00	-.180000E+01	.181510E+00	.000000E+00	.000000E+00
L3D11	DI	-.113450E+01	-.180000E+01	.000000E+00	.000000E+00	
COIS	CO	-.249580E+00	-.180000E+01	.181450E+00	.000000E+00	.000000E+00
SD8	SD	.578500E+00				
SD9	SD	.170300E+00				
L3Q21	QP	.303800E+00	.558680E-01			
SD10	SD	.434200E+00				
SOL1	SO	.506267E-01	.390960E-02			
SOL2	SO	.506267E-01	.136440E-01			
SOL3	SO	.506267E-01	.256880E-01			
SOL4	SO	.506267E-01	.397500E-01			
SOL5	SO	.506267E-01	.559600E-01			
SOL6	SO	.506267E-01	.821960E-01			
SOL7	SO	.506267E-01	.133770E+00			
SOL8	SO	.506267E-01	.236620E+00			
SOL9	SO	.506267E-01	.423670E+00			
SOL10	SO	.506267E-01	.704830E+00			
SOL11	SO	.506267E-01	.106710E+01			
SOL12	SO	.506267E-01	.142980E+01			
SOL13	SO	.506267E-01	.167240E+01			
SOL14	SO	.506267E-01	.178250E+01			
SOL15	SO	.506267E-01	.181930E+01			
SOL16	SO	.506267E-01	.182010E+01			
SOL17	SO	.506267E-01	.180670E+01			
SOL18	SO	.506267E-01	.179400E+01			
SOL19	SO	.506267E-01	.179140E+01			
SOL20	SO	.506267E-01	.179780E+01			
SOL21	SO	.506267E-01	.180200E+01			
SOL22	SO	.506267E-01	.175720E+01			
SOL23	SO	.506267E-01	.160610E+01			
SOL24	SO	.506267E-01	.135830E+01			
SOL25	SO	.506267E-01	.105450E+01			
SOL26	SO	.506267E-01	.725820E+00			
SOL27	SO	.506267E-01	.404180E+00			
SOL28	SO	.506267E-01	.158830E+00			
SOL29	SO	.506267E-01	.534670E-01			
SOL30	SO	.506267E-01	.124520E-01			

*** STRUCTURE ***

49

CYCLO	SD1	SD2	L3Q11	SD3	L3Q12	SD4	L3Q13	SD5	L3Q14
SD6	SD7	COIE	L3D11	COIS	SD8	SD9	L3Q21	SD10	SOL1
SOL2	SOL3	SOL4	SOL5	SOL6	SOL7	SOL8	SOL9	SOL10	SOL11
SOL12	SOL13	SOL14	SOL15	SOL16	SOL17	SOL18	SOL19	SOL20	SOL21
SOL22	SOL23	SOL24	SOL25	SOL26	SOL27	SOL28	SOL29	SOL30	

1

*** OPTION ***

BEAM

*** BEAM-MATRIX ***

1.06406E-05									
2.99024E-06	3.18980E-06								
.00000E+00	.00000E+00	2.09764E-05							
.00000E+00	.00000E+00	3.27465E-06	1.70302E-06						
.00000E+00	.00000E+00	.00000E+00	.00000E+00	.00000E+00					
.00000E+00	.00000E+00	.00000E+00	.00000E+00	.00000E+00	.00000E+00	2.25000E-06			

ANNEXE 2
Fichier de données pour ZGOUBI
De la sortie du cyclotron à la cible

```

***** CYCLOTRON - CIBLE *****
'OBJET'
2880.          MEV/C EN * PAR 2.99792458/10
5
.1 1 .1 1 .001
1
'TRANSMAT'
1
0.
1. 0. 0. 0. 0. 0.187
0. 1. 0. 0. 0. 1.983
0. 0. 1. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 1. 0. 0.
1.666 -1.706 0. 0. 1. -4.72999
0. 0. 0. 0. 0. 1.
'ESL'
88.7
'ESL'
21.13
'QUADRUPO'
0
30.38 10. -1.10370
0. 0.
6 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0.
6 0. 0. 0. 0. 0. 0
5.0
1 0. 0. 0.
'ESL'
39.61
'QUADRUPO'
0
30.45 10. 11.833
0. 0.
6 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0.
6 0. 0. 0. 0. 0. 0.
5.0
1 0. 0. 0.
'ESL'
149.46
'QUADRUPO'
0
30.45 10. -12.95730
0. 0.
6 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0.
6 0. 0. 0. 0. 0. 0.
5.0
1 0. 0. 0.
'ESL'
39.67

```

```

'QUADRUPO'
0
30.40 10. 15.1835
0. 0.
6 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0.
6 0. 0. 0. 0. 0. 0.
5.0
1 0. 0. 0.
'ESL'
101.05
'ESL'
86.3
'YMY'
'BEND'
0
204.204 0 16
10. 10. 0.2583087
6 0.14552 5.21405 -3.38307 14.0629 0. 0.
10. 10. 0.249582
6 0.14552 5.21405 -3.38307 14.0629 0. 0.
2.
1 0. 0. 0.
'YMY'
'ESL'
57.85
'ESL'
17.03
'QUADRUPO'
0
30.38 10. 0.1611
0. 0.
6 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0.
6 0. 0. 0. 0. 0. 0.
5.0
1 0. 0. 0.
'ESL'
58.42
'ESL'
-15.
'BREVOL'
0 0
1.
1ER SOLENOIDE
201
solentb.map
1 1. 0. -151.88 droite coupure sortie
2
1
1 0 0 0
'ESL'
-140.5
'MATRIX'
1 0
'FAISCEAU'
'FIN'

```