FERMILAB
FEB 23 2000
LIBRARY

34

GANIL

GRAND ACCELERATEUR NATIONAL D'IONS LOURDS - CAEN
LABORATOIRE COMMUN IN2P3 (CNRS) - DSM (CEA)

GANIL-S-00-01

Dynamique de faisceau dans CIME en harmonique 3

F. Chautard et M.P. Bourgarel

Fermilab Library
0 1160 0091043 4

NAME | FROM | M.S.
RETURN TO FERMILAB LIBRARY

GANIL S 00 01

SPIRAL
GANIL

Dynamique de faisceau dans CIME en harmonique 3

F. Chautard et M.P. Bourgarel

Table des Matières

Dynamique de faisceau dans CIME pour l'harmonique 3 _____ *1*

I. Introduction _____ *3*

II. Les cartes de champs et les programmes utilisés _____ *3*

A. Les cartes de champs magnétiques de CIME _____ **3**

B. La carte de potentiels électriques 3D de CIME _____ **3**

C. Les cartes de potentiels électriques 3D de la région centrale de CIME _____ **3**

D. Le programme LIONS et programmes de dépouillement _____ **4**

III. Région centrale _____ *4*

A. Brève description _____ **4**

B. Raies centrales _____ **5**

IV. Détermination des corrélations de faisceau _____ *6*

A. Calcul analytique des conditions d'adaptation _____ **6**

B. Calculs des conditions d'adaptation à partir des distributions de particules _____ **7**

C. Création de la matrice faisceau _____ **7**

D. Procédure de calcul des corrélations en retour inverse _____ **8**

V. Résultats des simulations _____ *9*

VI. Interpolations des bobines d'isochronisme à la fréquence de référence _____ *11*

VII. Programme d'interpolation **`PARAM`** _____ *14*

VIII. Conclusions _____ *16*

IX. ANNEXE A : Exemples de fichier d'entrée pour **`LIONS`** *et* **`CORREL.F`** _____ *17*

X. ANNEXE B : Listes des cartes de champs magnétiques _____ *18*

XI. ANNEXE C : Sorties graphiques à tous les niveaux de champs pour le calcul des corrélations avec **`PLOT_BDIM.F`** *et* **`TRAJ.F`**. _____ *22*

XII. ANNEXE D : Exemple de fichiers d'entrée et de sortie du programme **`PARAM.F`** *pour un ion d'Argon.* _____ *33*

I. Introduction

Ce rapport regroupe les résultats des simulations concernant la dynamique de faisceau en harmonique 3 dans CIME. Il détaille les procédures utilisées pour arriver aux conditions d'adaptation à la sortie de l'inflecteur.

L'objectif de ces simulations est d'être capable, pour un ion donné, de connaître les corrélations de faisceau nécessaires à la sortie de l'inflecteur ainsi que les valeurs des courants des bobines d'isochronisme à tous les niveaux de champ.

Ce rapport n'a pas l'ambition de détailler chaque étape des simulations mais plutôt de regrouper tous les éléments nécessaires au réglage de CIME. On trouvera ainsi les informations utiles pour le réglage de la ligne Très Basse Energie (TBE), du champ principal et des bobines d'isochronisme. Néanmoins, ce rapport devra être complété à l'avenir pour tenir compte d'autres réglages de CIME sur les autres harmoniques 2, 4 et 5 en cours d'études.

II. Les cartes de champs et les programmes utilisés

Un compte '~SPIRAL' a été créé dans lequel ont été regroupés les programmes et toutes les cartes de champs et de potentiels nécessaires aux simulations de dynamique de faisceaux des lignes et de CIME. Ceci afin d'unifier les versions des différents codes utilisés jusqu'à présent et par là même l'interprétation des résultats entre utilisateurs.

A. Les cartes de champs magnétiques de CIME

On trouvera sous le répertoire **`/home/spiral/data/cime/mes`** les fichiers suivants :

- sous `/400` à `/800` : Les cartes de champs mesurés de 400A à 800A
- sous `/CARTES_ITEREES` : cartes de champs itérées dont les procédures de fabrication sont détaillées dans le fichier `carte_iter.doc.ps` et les programmes utilisés pour les créer sous /moulinettes. En Annexe B, on retrouve le `README` présent sous ce répertoire et qui regroupe les noms des fichiers des cartes de champs mesurées utilisées pour reconstituer les cartes jusqu'au rayon 2,2 m avec, lorsqu'ils existent, les canaux magnétiques et la sortie vers la ligne Moyenne Energie (ME).

B. La carte de potentiels électriques 3D de CIME

Les gap accélérateurs sont sous :
`/home/spiral/data/cime/elec``/cime_gap.cha3d.dat`

C. Les cartes de potentiels électriques 3D de la région centrale de CIME

Deux cartes sont disponibles sous **`/home/spiral/data/cime/elec`** :

- Pour l'harmonique 3 : `cime_centre_impair_h2h3.cha3d.dat`
- Pour l'harmonique 2 et 4 : `cime_centre_pair_h2h3.cha3d.dat`

D. Le programme LIONS et programmes de dépouillement

Tous les executables sont placés sous : **`/home/spiral/bin/lions`**. Les fichiers sources sous : **`/home/spiral/source/lions`**

Les quatre principaux référencé dans ce rapport sont :

- `lions_1.0` (*ref : GANIL R 93 08*) programme de dynamique de faisceau dans CIME. Un fichier d'entrées de `LIONS` est donné en exemple en Annexe A.

- `lions_plot_bdim_1.0` : visualisation des sorties de `LIONS` et calcul des paramètres de TWISS pour une distribution de particules donnée.
- `correl_1.0` : création d'une matrice faisceau 6x6 utilisable par `LIONS` à partir des paramètres de TWISS. Un exemple de fichier des entrées est donné en Annexe A.
- `traj_1.0` : visualisation des paramètres de la particules centrale en fonction du temps (x, y, les centres de courbure, les champs B, E_s et E_r vus par la particule, le rayon polaire, l'énergie et la phase/H.F.) ainsi que des barycentres

III. Région centrale

A. Brève description

La région centrale étudiée est représentée sur la figure 1. Elles est constituée de deux extrémités de cavités appelées « nez » dont le demi angle d'ouverture est de 30 degrés. Ces « nez » se fixent ensuite sur les résonateurs dont le demi angle d'ouverture est de 20 degrés. Ces nez possèdent chacun deux piliers qui ont pour effet de réduire la pénétration longitudinale du champ électrique et de redresser les lignes de champ dans les gaps accélérateurs. Ceci afin de favoriser la dynamique de faisceau à basse énergie sensible à la forme du champ au voisinage des pilier centraux.

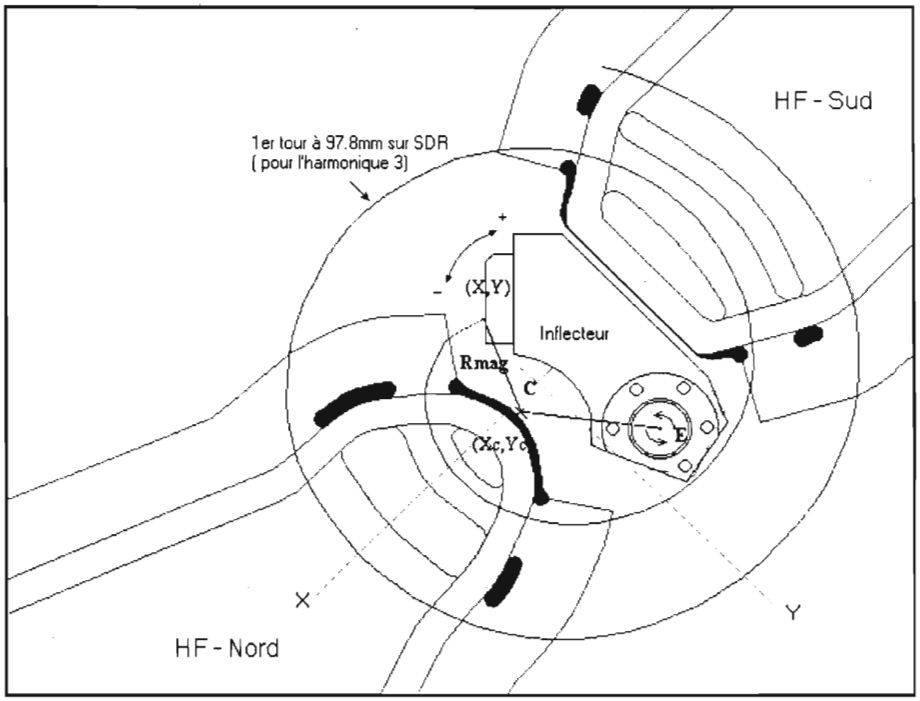


Figure 1 : Représentation de la région centrale de CIME avec la trajectoire de la particule centrale à la sortie de l'inflecteur.

On ne reviendra pas ici sur le choix de cette région centrale avec pilier faite au moment de l'étude du projet SPIRAL (cf. conférence cyclotrons 1998). L'étude faite au niveau du champ haut (~ 800A) et du champ

bas (~ 400A) avec TOSCA, à la fois sur l'harmonique 2, 3 et 4 à la fréquence de révolution de 4,8 MHz, a permis de montrer qu'on pouvait à la fois placer un inflecteur et obtenir des corrélations réalisables par la ligne TBE.

B. Raies centrales

Rappelons la méthode et les critères.
Partant d'une trajectoire centrée au rayon de 0,5 m environ, il faut trouver en « retour inverse » 3 raies centrales répondant aux conditions suivantes :

- Etre centrée, c'est à dire minimiser le mouvement des barycentres.

- Avoir un rayon magnétique Rmag = 34 mm à l'injection. Si (X_C ,Y_C) sont les coordonnées du centre de courbure C de la trajectoire et (X ,Y) les coordonnées de la particule à la sortie de l'inflecteur : Rmag = $\sqrt{(X - Xc)^2 + (Y - Yc)^2}$.

- Avoir un point d'injection E (entrée de l'inflecteur) identique pour chacune des harmoniques et pour chacun des niveaux de champ. Au centre de courbure C correspond un point d'injection E tel que EC $=\sqrt{(X_C - X_E)^2 + (Y_C - Y_E)^2}$, où avec un inflecteur Müller EC = 1,74109*Rmag. Comme (X_C ,Y_C) ne peuvent être identiques sur les 3 harmoniques (en raison du temps de transit) et à n'importe quel niveau de champ (en raison de la saturation des pointes de secteurs), il fallait trouver des conditions pour que l'ensemble des points C se déplacent sur un cercle de rayon EC. La rotation de l'inflecteur autour de E permet de s'adapter à la trajectoire. En agissant sur la position du point de départ à R ~ 0,5 m, sur le nombre de tours, différents pour chaque harmonique, et sur la valeur de la bobine d'isochronisme centrale B1 (et B2 si nécessaire), on a pu converger vers une solution donnant EC = 58,88 mm et choisir pour E le point X_E = -19,3 mm, Y_E = 45,8 mm.

- Pouvoir loger cet inflecteur entre les nez des dés.

- Avoir des phases de passage dans les premiers gaps les plus proches possibles des phases théoriques (zéro degré dans l'axe des cavités), ce que permet la bobine B1.

A partir de ces conditions trouvées avec TOSCA au niveau haut et bas, on a pu figer la région centrale. Il s'est avéré que les positions trouvées pour l'inflecteur avec TOSCA sont bonnes pour tous les niveaux de champ mesurés à condition toutefois de rectifier les valeurs des bobines B1 et quelquefois B2, car le centre magnétique (plug et pointes des secteurs) sont moins en accord avec TOSCA que le reste de l'aimant.

Il s'agit maintenant de donner l'ensemble des raies centrales et des corrélations correspondantes aux 9 niveaux de champ mesurés et isochronisés pour la fréquence de révolution 4,8 MHz, dite 'fréquence de référence', soit 14,4 MHz sur l'harmonique 3.

IV. Détermination des corrélations de faisceau

Afin de systématiser le calcul des corrélations en raison du grand nombre de niveaux de champs (9 au total à refaire pour les harmoniques 2, 4 et 5) une nouvelle méthode de calcul à partir des sorties `LIONS` a été mise au point.

L'idée principale était de pouvoir créer facilement une matrice de faisceau 6x6 compatible avec `LIONS` à partir des paramètres couramment utilisés dans les accélérateurs : α, β et γ, les paramètres de TWISS généralisés.

Les paramètres de TWISS généralisés peuvent être obtenus de manière analytique ou numérique.

A. Calcul analytique des conditions d'adaptation

On se place au rayon 0,5 m à l'azimut 270 degrés. Les conditions d'adaptation considérées en ce point pour une orbite fermée (non accélérées) sont les suivantes :

Dans le plan radial (r,pr), l'équation du mouvement se met sous la forme,

$$\left| \begin{array}{l} r = a.\sin(\nu_r\theta) \\ \dfrac{dr}{d\theta} = a.\nu_r.\cos(\nu_r\theta) \Rightarrow \dot{r} = \dfrac{dr}{ds} = \dfrac{dr}{R.d\theta} = \dfrac{a.\nu_r}{R}.\cos(\nu_r\theta) \end{array} \right.$$

où r : La position radiale de la particule.
a : L'amplitude maximale du faisceau.
ν_r : Le nombre d'onde radial.
R: La distance de la particule centrale par rapport au centre géométrique de cyclotron.
θ : L'azimut du faisceau dans le cyclotron.

L'émittance marginale radiale est alors donnée par $\varepsilon_{\max} = \dot{r}_{\max}.r_{\max} = \dfrac{a^2.\nu_r}{R}$

Pour une émittance radiale $\varepsilon_{\max} = 80\ \pi$.mm.mrad à l'injection avec R = 34 mm et ν_r proche de 1, la dimension radiale du faisceau adapté est :

$$a = \sqrt{\frac{\varepsilon_{\max.34}.R_{34}}{\nu_r}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{\max.0.5}.R_{0.5}}{\nu_r}} = 1{,}649mm$$

d'où l'émittance à R = 0,5 m ,

$$\varepsilon_{\max.0.5} = \frac{a^2}{R_{0.5}} = 5{,}44\ \pi.\text{mm.mrad},$$

et

$$\dot{r}_{\max} = \frac{\varepsilon_{\max.0.5}}{a} = 3{,}298\ \text{mrad}$$

Dans le plan (z,pz), ν_z est de l'ordre de 0,28, on a alors de la même manière:

a = 3,117 mm, $\varepsilon_{\max.0.5} = 5{,}44\ \pi.\text{mm.mrad}$ et $\dot{z}_{\max} = \frac{\varepsilon_{\max.0.5}}{a} = 3{,}298$ mrad

B. Calculs des conditions d'adaptation à partir des distributions de particules

Les moments de la distribution de particules dans un espace des phases donné sont calculés avec le programme `PLOT_BDIM.F`. Ce programme permet de visualiser au moyen d'une interface graphique la distribution des particules dans les espaces des phases ou des projections (r,pr), (z,pz), (pr,ϕ) etc... à partir des fichiers «bdim» fournit par `LIONS` (voir graphiques en Annexe C).

Pour chaque distribution, on peut calculer les paramètres de TWISS et on affiche sur cette distribution l'ellipse rms et l'ellipse homothétique maximale associée. La visualisation de la distribution de particules ainsi que des ellipses à l'avantage de mettre en évidence ce que contient réellement l'ellipse et la structure de la distribution, informations perdues dans la reconstitution de la matrice faisceau par la méthode du produit de matrice $\sigma_{ij}=P.P^T$. Ainsi, on le verra pour le plan (pr,ϕ) notamment, les paramètres calculés peuvent être sur ou sous-estimés et doivent être corrigés pour avoir une bonne adaptation en sens direct. Ceci est encore plus vrai pour les études des harmoniques 4 et 5 où les aberrations deviennent importantes en raison d'un allongement du temps de transit dans les gaps accélérateurs.

C. Création de la matrice faisceau

Lorsque les paramètres sont déterminés le programme `CORREL.F` va créer une matrice faisceau 6x6 simplifiée lisible par `LIONS`. Les 9 paramètres nécessaires pour former cette matrice sont les suivants :

plans de phases	Paramètres		
(r,pr)	Emittance[mm.mrad]	Pr_{max}[mrad]	$\alpha_{(r,pr)}$
(z,pz)	Emittance[mm.mrad]	Pz_{max}[mrad]	$\alpha_{(z,pz)}$
(pr,ϕ)	ϕ_0[degrés]	$\alpha_{(pr,\phi)}$	-
(r,ϕ)	$\alpha_{(r,\phi)}$	-	-
(r,w)	$\delta w/w$	$\alpha_{(r,w)}$	-

d'où une matrice faisceau 6x6 simplifiée de la forme :

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & 0 & 0 & \sigma_{15} & \sigma_{16} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & 0 & 0 & \sigma_{25} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} & \sigma_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{43} & \sigma_{44} & 0 & 0 \\ \sigma_{51} & \sigma_{52} & 0 & 0 & \sigma_{55} & 0 \\ \sigma_{61} & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{66} \end{bmatrix}$$

Les autres paramètres sont négligeables dans les cas qui nous intéressent et sont mis à zéro.

D. Procédure de calcul des corrélations en retour inverse

Au rayon 0,5 m, `CORREL.F` crée une matrice faisceau σ_{ij}. Le programme `LIONS` remplit cet ellipsoïde à 6 dimensions de 10000 particules et les transporte tour après tour jusqu'à l'azimut 266 degrés à l'entrée de l'inflecteur.

A cette position, on ne garde que les particules dont la dispersion en énergie est inférieure ou égale à 1% (dispersion maximum créée par la ligne Très Basses Energies (TBE) notamment par la source et le groupeur).

Sur les particules restantes dans cette acceptance, on calcule les moments de la distribution avec `PLOT_BDIM.F`. Les corrélations ainsi trouvées sont utilisées par `CORREL.F` pour créer une nouvelle matrice faisceau σ_{ij} à la sortie de l'inflecteur utilisable en sens direct.

On vérifiera en lançant `LIONS` en sens direct que la matrice trouvée est bien celle d'un faisceau adapté en regardant l'allure des courbes dr(t) et dz(t). On pourra si nécessaire modifier légèrement les paramètres d'entrée de `CORREL.F` afin de parfaire l'adaptation du faisceau en sens direct. En effet, les corrélations qui ont été déterminées en retour inverse sont entachées d'une barre d'erreur. Tout d'abord en raison de la méthode de calcul qui nécessite le plus de particules possible pour augmenter la précision du résultat mais aussi et surtout en raison de l'allure de la distribution des particules à l'entrée de l'inflecteur. La distribution n'est jamais uniforme et sa représentation par une ellipse qui sera remplie de manière uniforme n'est qu'une interprétation approchée des résultats obtenus en retour inverse.

La matrice faisceau σ_{ij} finale est alors communiquée aux personnes en charge de la ligne TBE qui étudieront la faisabilité de ces corrélations par les éléments de la ligne (quadripôles, dipôles, solénoïde et groupeur) pour chaque niveau de champ ainsi que le passage du faisceau dans l'inflecteur Müller.

V. Résultats des simulations

Après avoir déterminé pour chaque niveau la raie centrale à 0,5 m pour le retour inverse, on applique autour de la particule de référence les corrélations calculées précédemment. On lance ensuite `LIONS` en retour inverse avec 10000 particules jusqu'à l'entrée de l'inflecteur à l'azimut 266 degrés où on filtre en énergie les particules dans ± 1%. Il reste environ 10% du faisceau initial pour calculer les corrélations.

Tous ces paramètres ont été regroupés dans le Tableau 1 avec dans certains cas un ajustement des valeurs calculées si les enveloppes dr(t) et dz(t) en sens direct jusqu'au rayon d'éjection montraient un faisceau mal adapté.

Les corrélations ont été d'abord calculées aux niveaux 400, 500, 600, 700 et 800 A. Pour les niveaux intermédiaires, de 450A à 750A, on a utilisé des valeurs de paramètres interpolées entre les niveaux précédents et on vérifie aussi que les corrélations donnent bien un faisceau adapté jusqu'à l'éjection de CIME (ρ = 1,5 m).

Les figures données en Annexe C représentent la distribution des particules à cet azimut pour les plans (r,pr), (z,pz), (pr,ϕ) et (r,ϕ). Pour chaque graphique, on retrouve les paramètres faisceau nécessaire à la reconstruction de la matrice σ_{ij}

L'évolution des barycentres et de la phase du faisceau en fonction de la phase H.F. jusqu'à l'extraction sont reportées pour chaque niveau.

On remarquera que le mouvement des barycentres est inférieur à ± 2 mm et que l'isochronisme est bon dans ± 2 degrés.

Les niveaux 450A, 650A et 750A ont une dérive en phase entre 10 et 15 degrés avec un mouvement des barycentres compris dans ± 4 mm. Mais ceci n'affecte pas notablement l'adaptation du faisceau. Pour le cas à 355A le mouvement des barycentres provient d'une carte de champ magnétique mesuré défectueuse introduisant également une grande excursion en phase et une enveloppe radiale du faisceau plus large due aux effets chromatiques.

Les Figures 2 montrent qu'il est possible de lisser de manière satisfaisante les paramètres en fonction du niveau de champ avec un polynôme d'ordre 3. On estime alors que l'on peut interpoler dans une base de données constituée de ces valeurs.

H=3 f =14.4 MHz

Courant	rayon éjection	Winj	W ext	Vhf	Φ0	Rmag	EC	Theta	Xc	Yc	(r,r') @ 80 π.mm.mrad			(z,z') @ 80 π.mm.mrad			(ϕ,pr)		(r,ϕ)			
BP [A]	[mm] à 250deg	[keV/A]	[MeV/A]	[V]	[deg]	[mm]	[mm]	[deg]	[mm]	[mm]	pr max [mrad]	rmax [mm]	α	pz max [mrad]	z max [mm]	α	ϕ0 [deg]	α	α	Bz [G]	bob1 [A]	bob2 [A]
	281ieme tours																					
355	1499	5.565	10.855	28123	-230	34.17	58.90	266.9	14	-2.8	69.5	2.6	2.0	29.0	4.86	1.45	2.0	-4	1.65	-0.7760	-250	-8
400	1506	5.504	10.972	31793	-243	34.08	58.88	266.7	13.8	-2.9	64.5	2.6	1.9	29.2	4.56	1.33	2.0	-4	1.84	-0.8706	-70	-20
450	1500	5.456	10.870	35368	-240	33.94	59.00	266.9	13.9	-3	60.0	3.0	2.0	25.0	4.53	1.00	2.0	-4	1.5	-0.9724	-50	0
500	1501	5.431	10.897	39089	-245	33.95	58.88	267.0	13.8	-2.9	54.4	3.5	2.2	27.1	4.93	1.34	2.0	-4	1.36	-1.0743	100	-78
550	1495	5.665	10.909	42621	-238	34.3	58.88	266.9	14.1	-2.7	60.0	3.2	2.2	25.0	5.00	1.20	2.0	-4	1.5	-1.1821	170	-80
600	1499	5.614	10.897	45880	-236	34.12	58.88	266.7	13.8	-2.9	60.7	2.9	2.0	26.8	4.57	1.16	2.4	-4	1.7	-1.2763	140	-30
650	1496	5.600	11.000	49620	-240	34.17	58.91	266.9	14	-2.8	70.0	2.6	2.0	30.0	4.59	1.40	2.5	-4	1.5	-1.3575	200	-75
700	1502	5.665	10.919	51890	-240	34.08	58.88	266.7	13.8	-2.9	69.5	2.5	1.9	29.0	4.85	1.45	2.8	-4	1.65	-1.4519	85	0
750	1501	5.680	10.912	5.68	-240	34.03	58.94	266.9	13.9	-2.9	80.0	2.2	2.0	30.0	4.37	1.30	2.7	-4	1.65	-1.5252	80	0
800	1501	5.784	10.925	56560	-230	34.17	58.88	266.7	13.8	-2.9	87.7	2.4	2.4	24.2	4.47	0.91	3.5	-4	1.58	-1.5962	50	0

Tableau 1 : Paramètres de faisceau et de CIME pour l'harmonique 3 a tous les niveaux de champs.

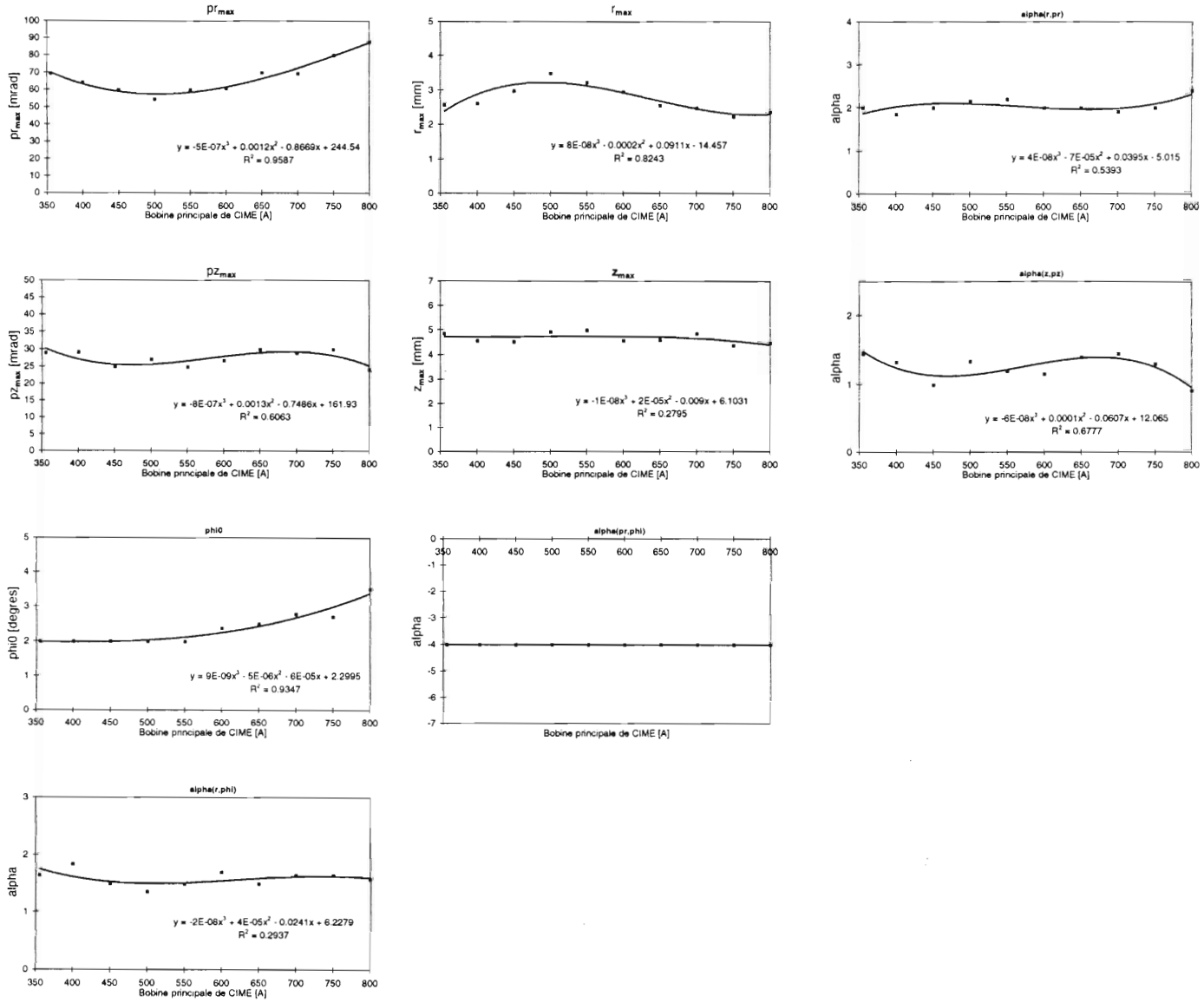


Figure 2 : Paramètres faisceau pour les différents niveaux de champ calculés avec LIONS. Interpolation par un polynome d'ordre 3.

VI. Interpolations des bobines d'isochronisme à la fréquence de référence

Pour le réglage du cyclotron à la fréquence de référence, il est nécessaire de connaître les valeurs des 11 bobines d'isochronisme.

Le Tableau 2 résume les valeurs de courants pour chaque bobine d'isochronisme à la fréquence de référence. Ces courants sont des courants 'itérés' pour parfaire l'isochronisme des premières mesures. Ce sont ces cartes 'itérées' qui ont servi au calcul de dynamique et au calcul des corrélations déjà décrits.

Ces courants tiennent compte des valeurs des bobines 1 et 2 trouvées lors des simulations pour régler la phase de passage de l'ion dans les cavités lors des premiers tours.

	COURANTS DE LA BOBINE PRINCIPALE [A]									
Bobines	355	400	450	500	550	600	650	700	750	800
bob1	-250	-133.8	2.7	121	388	435.5	419	399.8	280.7	206.3
bob2	-386	-381.9	-387.7	-367	-364	-283.5	-210.2	-47.4	76.9	134.1
bob3	-70.9	-99.9	-103.1	-79	-40.1	-9.7	-16.7	20.9	97.6	151.1
bob4	-80.5	-88.2	-94	-71.9	-58.9	-49.2	-21.8	-15.8	-15.2	26
bob5	-68.6	-74.4	-88.9	-94.5	-80.7	-71.4	-76.4	-77.4	-63.9	-56.9
bob6	-28.6	-33.8	-40.4	-44.7	-46.1	-49.3	-48.1	-57.7	-70.9	-78.2
bob7	40.6	43.1	35.6	36.5	34.2	32.9	34.1	39.2	47.6	59
bob8	45.8	47.2	36.6	27.5	2.3	-1.7	-12.9	-25.7	-31.8	-43.5
bob9	-5.3	0.3	-17.7	-13.3	-23	-31.3	-27.4	-10.3	10.6	36
bob10	181.2	194.7	212.2	208.8	195.3	164.8	124.1	75.5	8.4	-68.6
bob11	182.5	196	212.6	209.5	194.1	163.1	123	75.3	10.7	-66.7

Tableau 2 : Valeurs des courants dans les bobines d'isochronisme en fonction du courant dans la bobine principale de CIME.

Les méthodes de calcul des courants d'isochronisme et des courants itérés sont explicités dans le rapport 'Calcul des courants d'isochronisme de CIME'.

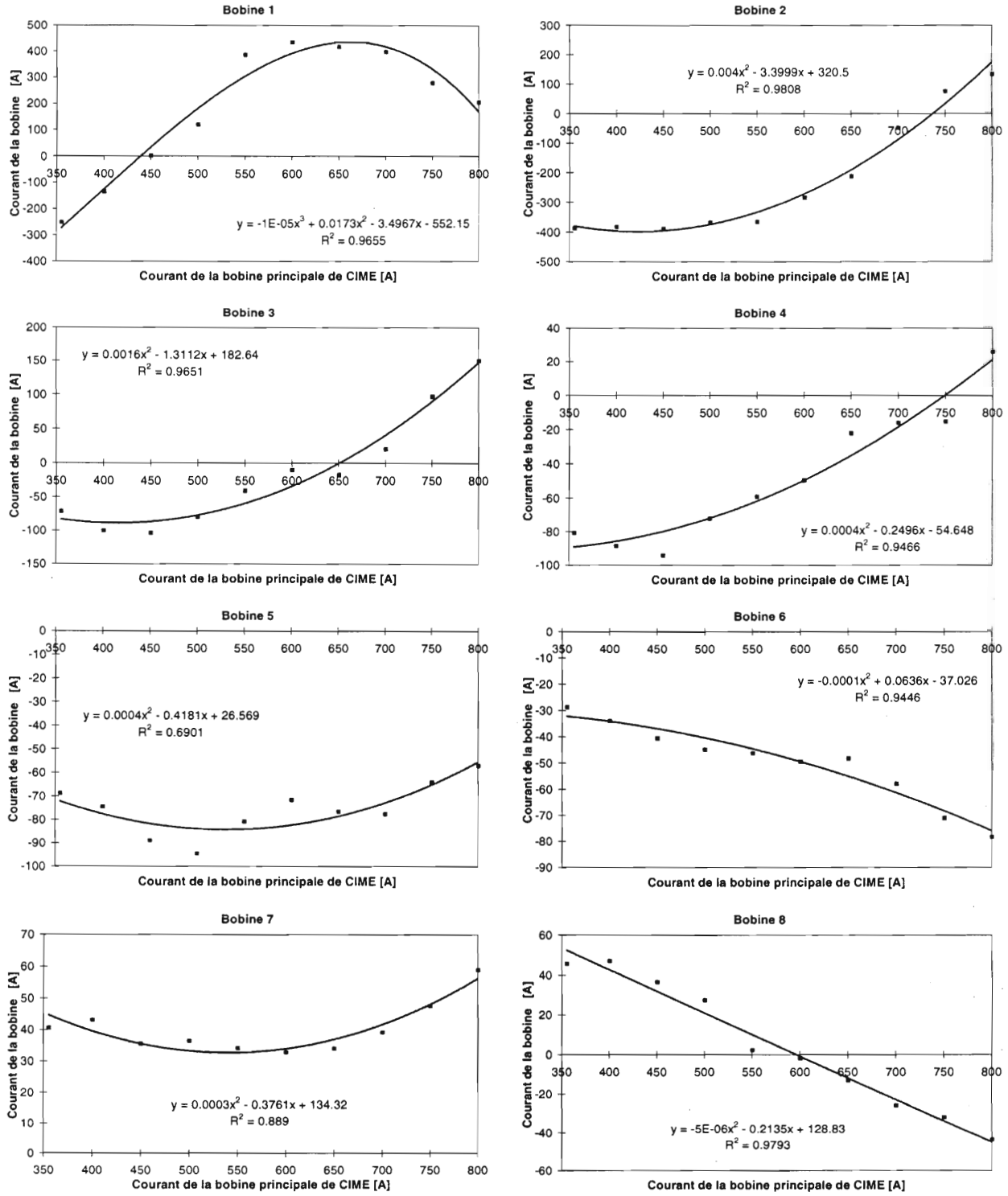


Figure 3 : Valeurs des courants des bobines d'isochronisme de 1 à 8. Lissage des valeurs par un polynôme d'ordre 3.

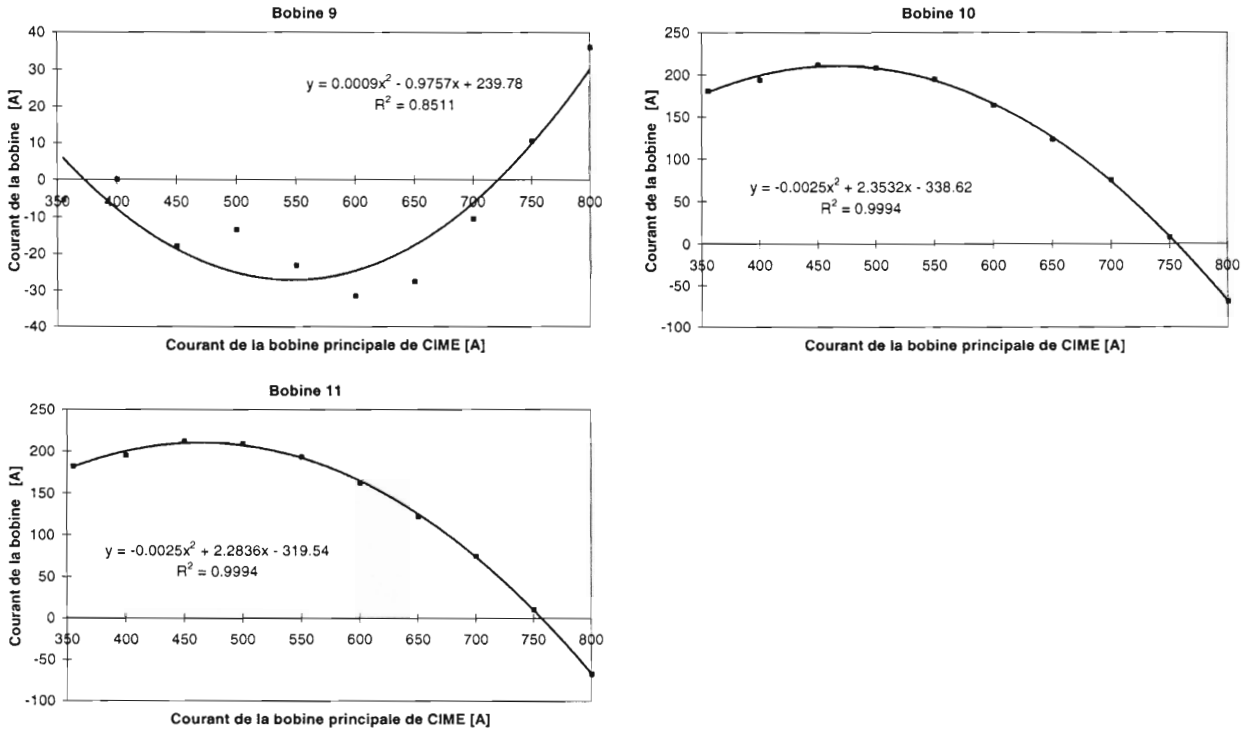


Figure 4 : Valeurs des courants des bobines d'isochronisme de 9 à 11. Lissage des valeurs par un polynôme d'ordre 3.

VII. Programme d'interpolation `PARAM`

Pour le réglage du cyclotron, il est nécessaire de connaître la valeur de courant de la bobine principale et des 11 bobines d'isochronisme, pour un niveau de champ et de fréquence fixés par le choix de l'ion et de son énergie d'éjection.
Le programme `PARAM.F` (utilisé lors des essais) permet de les déterminer. Il a été complété pour permettre également l'interpolation des corrélations.

Ce programme `PARAM.F` opère de la façon suivante :

a) On interpole dans la base de donnée $I_{BP} = f(B_{iso})$ le courant de la bobine principale pour le champ B_{iso} désiré.

b) On interpole, à la fréquence de référence 4,8 MHz (soit 14,4 MHz en harmonique 3), les courants d'isochronisme dans la 2ieme base de données $I_{bobines} = f(I_{BP})$.

c) On interpole ensuite les courants de correction relativiste (détaillés dans le rapport 'Calcul des courants d'isochronisme de CIME') dans une 3ieme base de données $I_{bobines} = f(f, I_{BP})$.

d) On interpole enfin les corrélations au niveau I_{BP} trouvé.

Pour mémoire, le champ B_{iso} est calculé par le programme `PARAM.F` pour différentes situations :

1) Si on connaît l'énergie cinétique W de la particule à l'éjection, ρ = 1,5 m, on détermine B_{iso} de la manière suivante :

Soit m_0 : La masse de l'ion en MeV/c^2/A.
u : L'unité de masse atomique = 931.4943228 MeV/ c^2.
m_e : La masse de l'électron = $5.485799027.10^{-4}$ .u MeV/ c^2.
c : La célérité de la lumière = 299792458 $m.s^{-1}$.
γ : Le facteur de Lorentz.
h : L'harmonique HF.

$$m_0 = u*(AM - Q*m_e)/A$$

$$\gamma = W/m_0 + 1$$
$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}}$$

on déduit,
enfin,

$$\boxed{B_{iso} = \frac{A \cdot \beta \cdot \gamma \cdot m_0}{Q \cdot \rho \cdot c}}$$

et la fréquence ,

$$F_{faisceau} = \frac{\beta \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot \rho}$$

avec

$$F_{faisceau} = \frac{F_{HF}}{h}$$

2) Si on connaît la fréquence $F_{faisceau\ ou\ HF}$ et l'harmonique

$$\beta = \frac{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot F_{faisceau}}{c \cdot H}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$W = (\gamma - 1)m_0$$

$$B_{iso} = \frac{A \cdot \beta \cdot \gamma \cdot m_0}{Q \cdot \rho \cdot c}$$

3) Ou plus simplement connaît directement B_{iso} à ρ = 1.5 m
`PARAM.F` interpole directement dans les bases de données.

On trouve en Annexe D un exemple d'entrées et de sorties du programme `PARAM.F` pour un ion d'$_{40}Ar^{9+}$ accéléré à 9.6 MHz.

VIII. Conclusions

En conclusion, on peut à présent déterminer sur l'harmonique 3 et pour une fréquence fixe de 14.4 MHz, les conditions d'adaptation d'un faisceau d'ions qu'il est nécessaire de créer avec la ligne TBE à la sortie de l'inflecteur pour tous les niveaux de champs de CIME.

On interpole également pour trouver les courants des bobines d'isochronisme associée au niveau de champ.

Les harmoniques 2, 4 et 5 sont cours d'études et feront l'objet d'un autre rapport.

IX. ANNEXE A : Exemples de fichier d'entrée pour LIONS et CORREL.F

```
"Exemple de fichier LIONS en sens direct pour H3 i700"
1080
1.50d0 250
14400000.d0 -51890.d0 20.d0 3.d0 +1.1d-4
0 0
51890.d0 51890.d0
0
0
-.015d0 .015d0 .164d0
-1.  -1. -1.  -1.
1
1.513  6990000 0 0 0 0 250 267
0

1
100 100.36496d0 100.36496d0 22.d0
 3.31451584027190882E-2,  266.88838095372307,  0.E+0,  426.4704491813456
0.E+0,  5.66526725142284596E-3,  -240.00000000000031

1
correl.lio.dat
3d
exp.bac
exp.mat
no
303480 30
no
lions.plot

'/home/chautard/lions/h3/700/cime700.p85bob1.lions.dat'
'/home/spiral/data/cime/elec/cime_centre_impair_h2h3.cha3d.dat'
'/home/spiral/data/cime/elec/cime_gap.cha3d.dat'
```

```
Exemple de fichier d'entrées pour le programme correl_1.0.f

n                        ! sortir graphique postscript [o/n]
5.50362e-3               ! énergie [Mev/A]
14.4                     ! fréquence [MHz]
3                        ! harmonique
45                       ! rayon de la trajectoire [mm]
80. 64.   1.85           ! (r,pr) : emit[mm.mrad], prmax[mrad], alfa
80. 29.   1.33           ! (z,pz) : emit[mm.mrad], prmax[mrad], alfa
2.  -4.                  ! (pr,phi) : phi0[degrés], alfa
1.84                     ! (r,phi) alfa
1.00e-2  0.0             ! (r,dw/w) : dwsw max, alfa
```

X. ANNEXE B : Listes des cartes de champs magnétiques

Copie du fichier README sous /home/spiral/data/cime/mes, résumant les fichiers de mesures magnétiques utilisés pour créer les cartes de champs au format LIONS.

```
-----------------------------------------------------------------
I= 400 A            25 avril              page 27 du cahier de manip

Fichiers de mesures :
++++++++++++++++++
   region centrale            CMS1            CMS2         EJECTION
   (360.0 degrés)          (225-315.9)     (339.3-21.6)

  cime400.2504.dat       cime121122.dat   cime123.dat   sortex400.dat
               (assemblage de cime121.dat et 122.dat)


Fichier utilisable par LIONS : cime400.lions.dat
++++++++++++++++++++++++++++

bobines d'isochronisme:
I1 = -57
I2 = -386
I3 = -53.3
I4 = -99.6
I5 = -76.1
I6 = -34.8
I7 = 39.
I8 = 42.3
I9 = -3.3
I10= 197.9
I11= 199.

-----------------------------------------------------------------
I= 450 A            4 mai                 page 37 du cahier de manip

Fichiers de mesures :
++++++++++++++++++
   région centrale            CMS1            CMS2         EJECTION
   (360.0 degrés)          (225-315.9)     (339.3-21.6)

  cime450.0405.dat       cime116.dat       cime118.dat   sortex457.dat
                          (fichier  CMS pour I=457 A)

Fichier utilisable par LIONS :  cime450.lions.dat
++++++++++++++++++++++++++++

bobines d'isochronisme:
I1 =0
I2 =-350.9
I3 =-101.1
I4 =-87.1
I5 =-89.3
I6 =-40.2
I7 =46.8
I8 =53.7
I9 =-12.5
I10=220.7
I11=221
```

I= 500 A **26 avril** **page 29 du cahier de manip**

Fichiers de mesures :
++++++++++++++++++

région centrale (360.0 degrés)	CMS1 (225-315.9)	CMS2 (339.3-21.6)	EJECTION
cime500bis.2604.dat	aucune	aucune	aucune

Fichier utilisable par LIONS : cime500.lions.dat
++++++++++++++++++++++++++++

bobines d'isochronisme:
I1 =13
I2 =-285
I3 =-79
I4 =-71.9
I5 =-94.5
I6 =-44.7
I7 =36.5
I8 =27.5
I9 =-13.3
I10=208.8
I11=209.5

I= 550 A **15 mai** **page 48 du cahier de manip**

La région centrale, 360 degrés, a été recalcule a partir des mesures de cime87.dat pour avoir un pas constant de 0.9 degré. Cette nouvelle carte s'appelle cime550.spline87.dat

Fichiers de mesures :
++++++++++++++++++

région centrale (360.0 degrés)	CMS1 (225-315.9)	CMS2 (339.3-21.6)	EJECTION
cime550.spline87.dat	cime89.dat	cime91.dat	aucune

Fichier utilisable par LIONS : cime550.lions.dat (sans carte de sortie)
++++++++++++++++++++++++++++

bobines d'isochronisme:
I1 =234.
I2 =-297.2
I3 =-41.9
I4 =-63.2
I5 =-86.7
I6 =-46.7
I7 =30.4
I8 =7.1
I9 =-27.4
I10=196.1
I11=195.4

I= 600 A **24 avril** **page 26 du cahier de manip**

Fichiers de mesures :
++++++++++++++++++

région centrale (360.0 degrés)	CMS1 (225-315.9)	CMS2 (339.3-21.6)	EJECTION
cime600.2404.dat	aucune	aucune	aucune

Fichier utilisable par LIONS : cime600.lions.dat
++++++++++++++++++++++++++++

bobines d'isochronisme:
I1 =243.3
I2 =-200.1
I3 =-25.3
I4 =-36.5
I5 =-88.2
I6 =-44.1
I7 =32.9
I8 =-0.60

I9 =-19.90
I10=158.4
I11=157.1

I= 650 A **2 mai** **page 35 du cahier de manip**

Fichiers de mesures :
++++++++++++++++++

région centrale (360.0 degrés)	CMS1 (225-315.9)	CMS2 (339.3-21.6)	EJECTION
cime650.0205.dat	aucune	aucune	aucune

Fichier utilisable par LIONS : cime650.lions.dat
++++++++++++++++++++++++++++

bobines d'isochronisme:
I1 =222
I2 =-188
I3 =22
I4 =-43.3
I5 =-78.3
I6 =-56
I7 =35.1
I8 =-1.1
I9 =-27.2
I10=129.7
I11=130

I= 700 A **18 avril** **page 21 du cahier de manip**

Fichiers de mesures :
++++++++++++++++++

région centrale (360.0 degrés)	CMS1 (225-315.9)	CMS2 (339.3-21.6)	EJECTION
cime700.1804.dat	cime94.dat (pour CMS mesure a gamma min)	cime95.dat	sortoxyex.dat (I=686.98 A) sort700.dat (I=700 A sans iso)

Fichier utilisable par LIONS : cime686.lions.dat (avec carte de sortie a 686.98 A)
++++++++++++++++++++++++++++ cime700.lions.dat (avec carte de sortie a 700 A)

bobines d'isochronisme:
I1 =314.8
I2 =-47.4
I3 =20.9
I4 =-15.8
I5 =-77.4
I6 =-57.7
I7 =39.2
I8 =-25.7
I9 =-10.3
I10=75.5
I11=75.3

I= 750 A **2 mai** **page 34 du cahier de manip**

Fichiers de mesures :
++++++++++++++++++

région centrale (360.0 degrés)	CMS1 (225-315.9)	CMS2 (339.3-21.6)	EJECTION
cime750.0205.dat	aucune	aucune	aucune

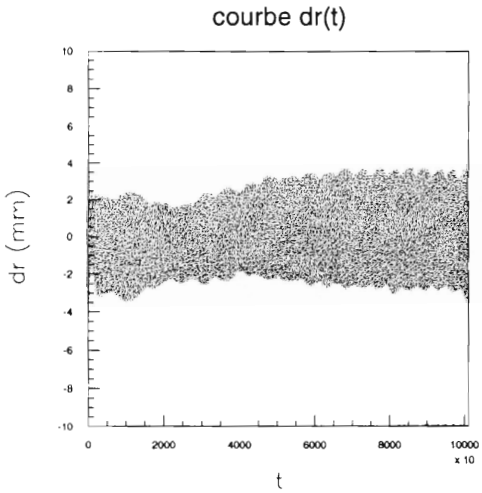
Fichier utilisable par LIONS : cime750.lions.dat
++++++++++++++++++++++++++++

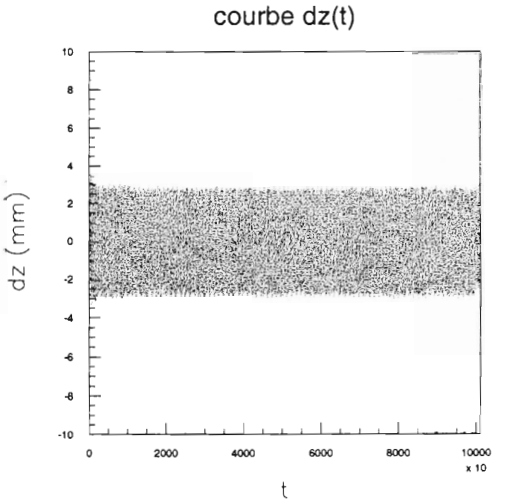
bobines d'isochronisme:
I1 =196
I2 =98
I3 =61.8
I4 =6.8
I5 =-71.9
I6 =-68.8
I7 =44.6

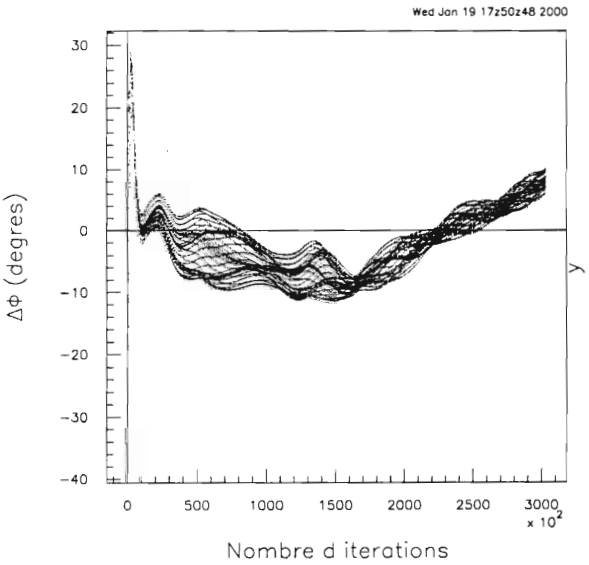
```
I8 =-28.8
I9 =2.3
I10=12.8
I11=14.5

-----------------------------------------------------------------
I= 800 A          1 mai                    page 32 du cahier de manip

Fichiers de mesures :
++++++++++++++++++
   région centrale            CMS1            CMS2         EJECTION
   (360.0 degrés)         (225-315.9)     (339.3-21.6)

  cime800.0105.dat      cime92.dat       cime93.dat     sotriex800.dat
                                                     (mesurée avec les canaux recules)
                                                     (il manque 2 points dans la carte)

Fichier utilisable par LIONS : cime800.lions.dat  (sans sortie)
++++++++++++++++++++++++++++

bobines d'isochronisme:
I1 =150
I2 =150
I3 =117.5
I4 =48.5
I5 =-59.9
I6 =-77.3
I7 =65.2
I8 =-52.8
I9 =58.7
I10=-77.1
I11=-75.7

-----------------------------------------------------------------
```

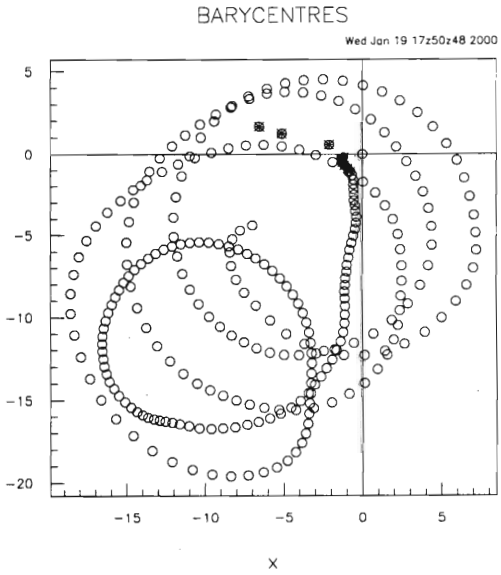
XI. ANNEXE C : Sorties graphiques à tous les niveaux de champs pour le calcul des corrélations avec `PLOT_BDIM.F` et `TRAJ.F`.

H3 i 355

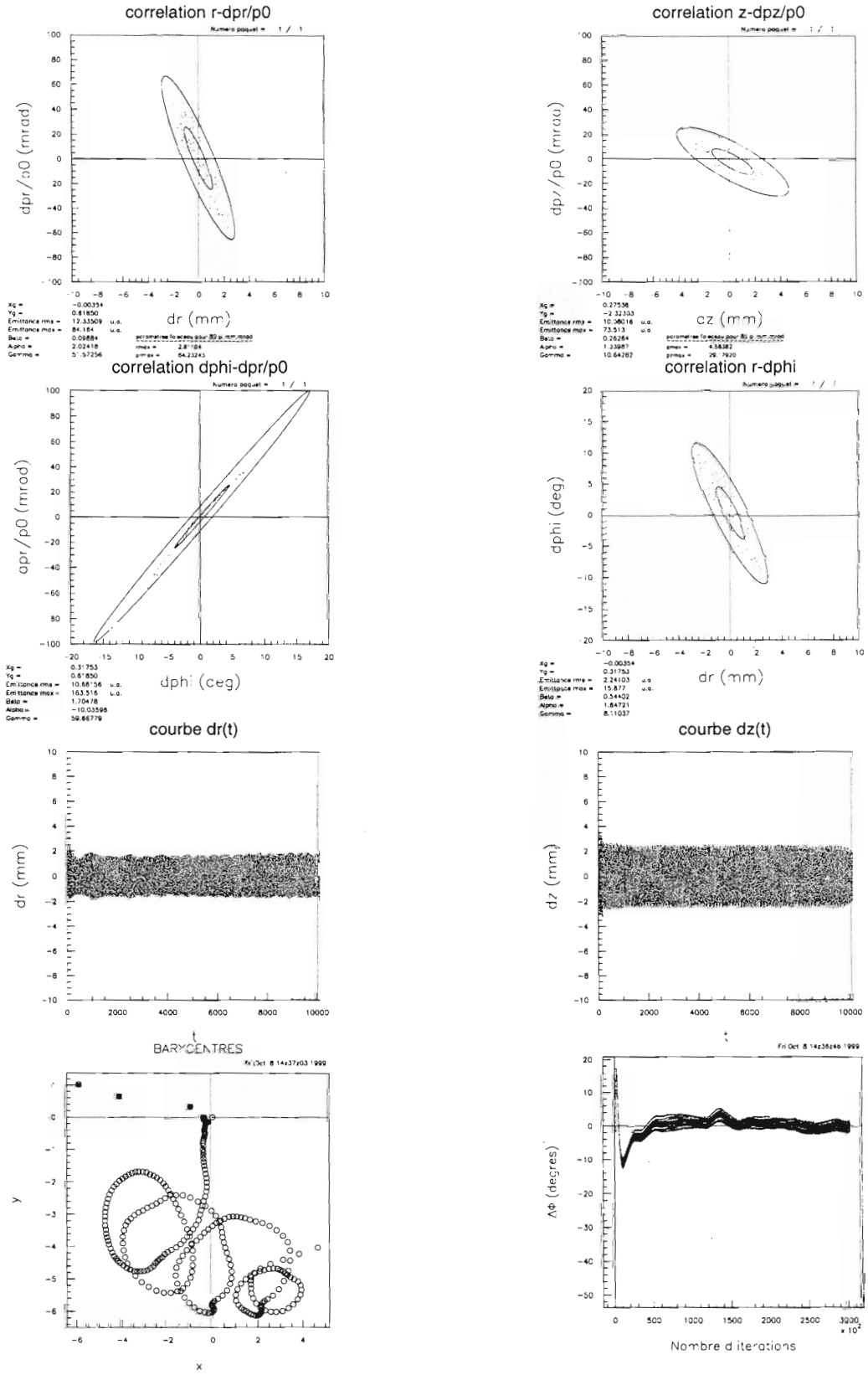

courbe dr(t)
dr (mm)
t
x 10
Wed Jan 19 17z46z21 2000


courbe dz(t)
dz (mm)
t
x 10
Wed Jan 19 17z46z37 2000

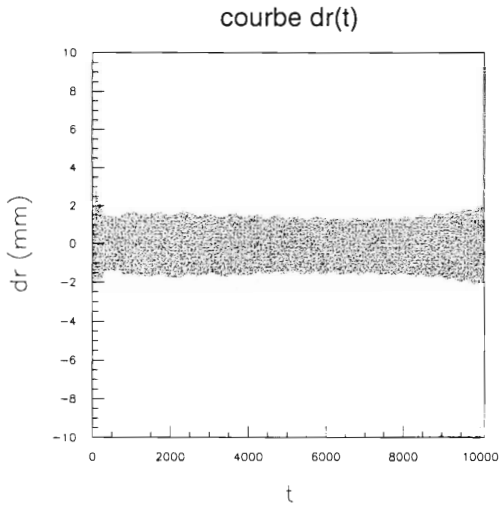

Wed Jan 19 17z50z48 2000
Δφ (degres)
Nombre d iterations
x 10²

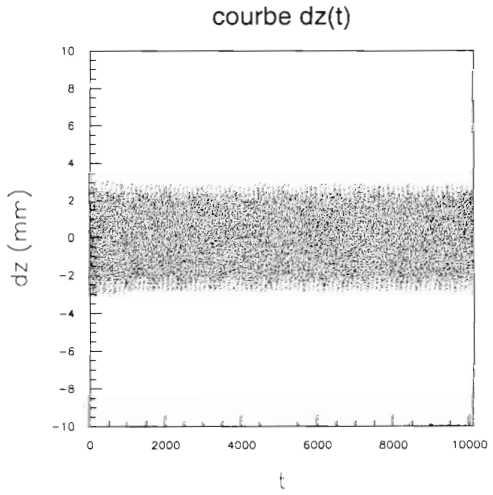

BARYCENTRES
Wed Jan 19 17z50z48 2000
y
x

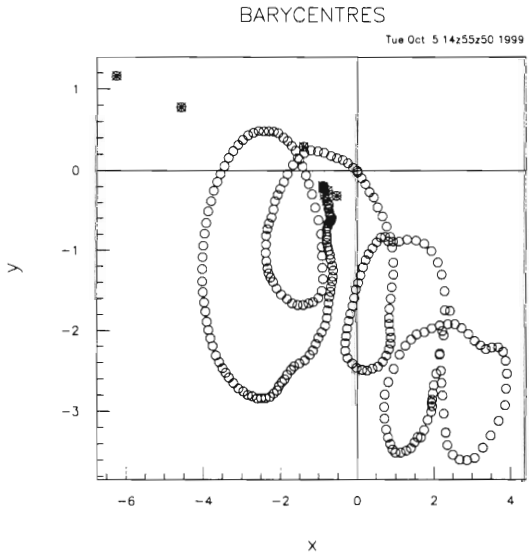
H3 i 400

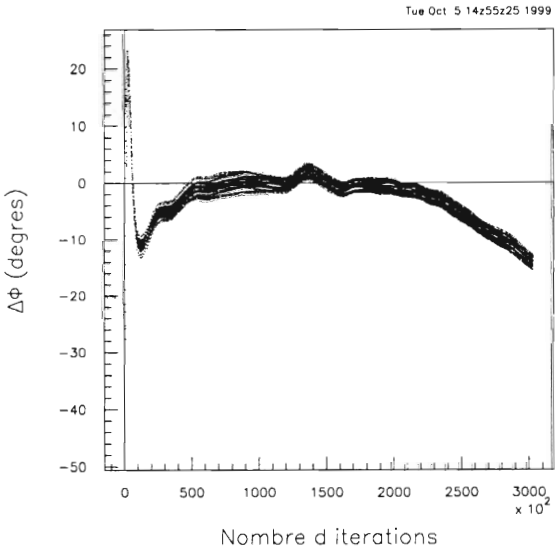

correlation r-dpr/p0
dpr/p0 (mrad)
dr (mm)
correlation z-dpz/p0
dpz/p0 (mrad)
dz (mm)
correlation dphi-dpr/p0
dpr/p0 (mrad)
dphi (deg)
correlation r-dphi
dphi (deg)
dr (mm)
courbe dr(t)
dr (mm)
courbe dz(t)
dz (mm)
BARYCENTRES
y
x
ΔΦ (degres)
Nombre d'iterations

H3 i 450

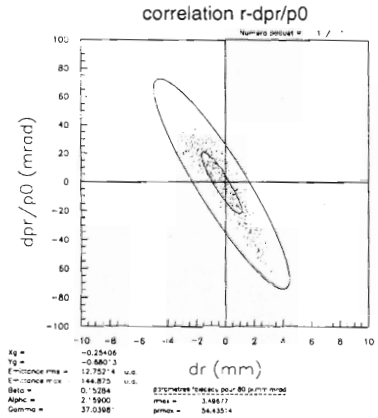

courbe dr(t)
dr (mm)
t

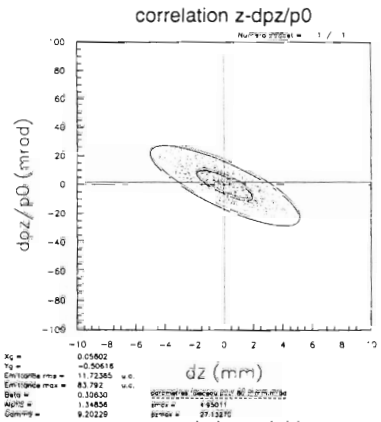

courbe dz(t)
dz (mm)
t

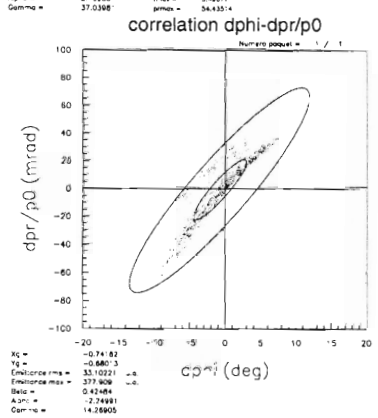

BARYCENTRES
Tue Oct 5 14z55z50 1999
y
x

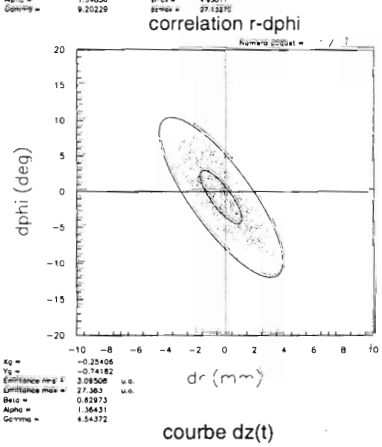

Tue Oct 5 14z55z25 1999
ΔΦ (degres)
Nombre d iterations
x 10^2

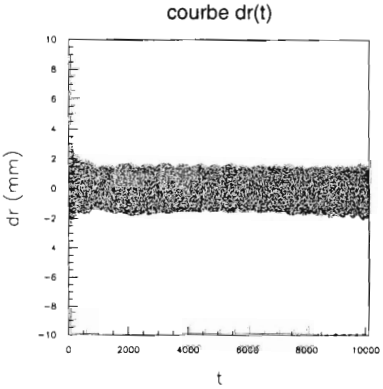
H3 i 500

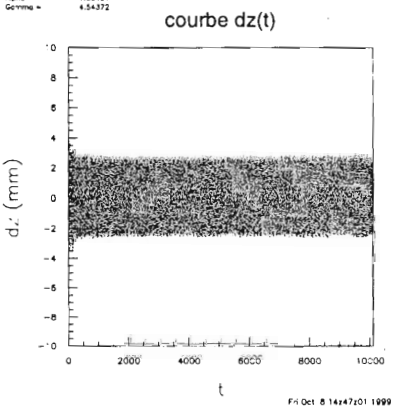

correlation r-dpr/p0
dpr/p0 (mrad)
dr (mm)

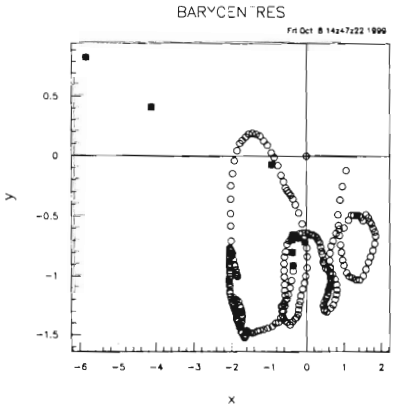

correlation z-dpz/p0
dpz/p0 (mrad)
dz (mm)

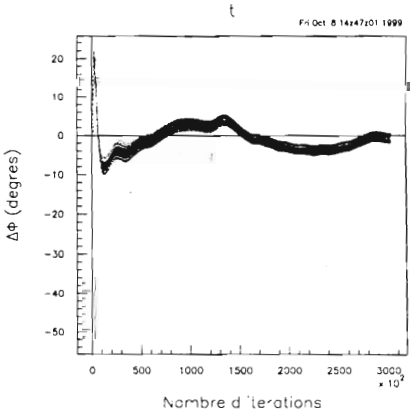

correlation dphi-dpr/p0
dpr/p0 (mrad)
dphi (deg)


correlation r-dphi
dphi (deg)
dr (mm)

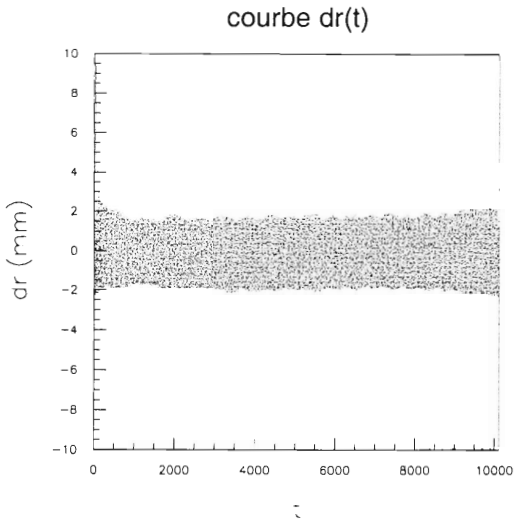

courbe dr(t)
dr (mm)
t

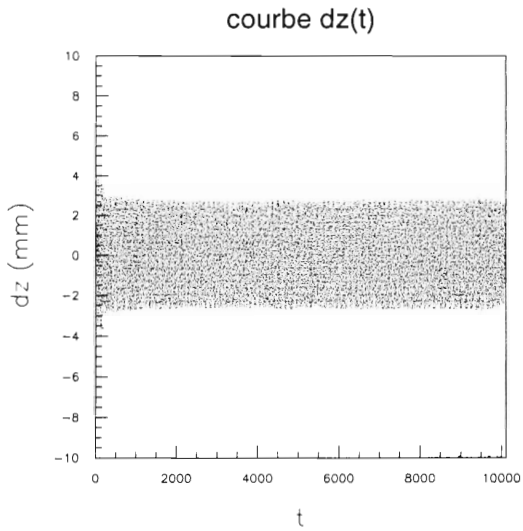

courbe dz(t)
dz (mm)
t

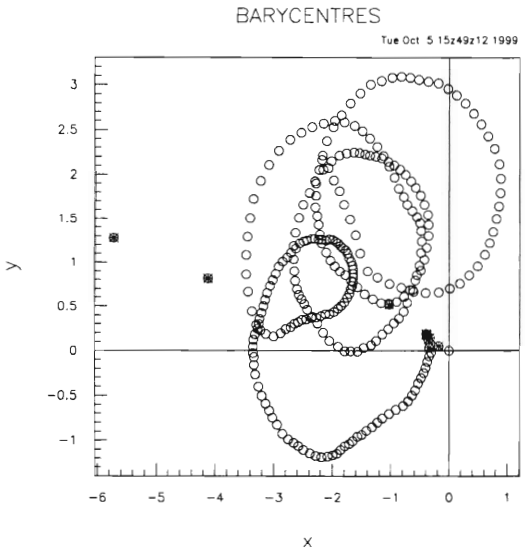

BARYCENTRES
y
x

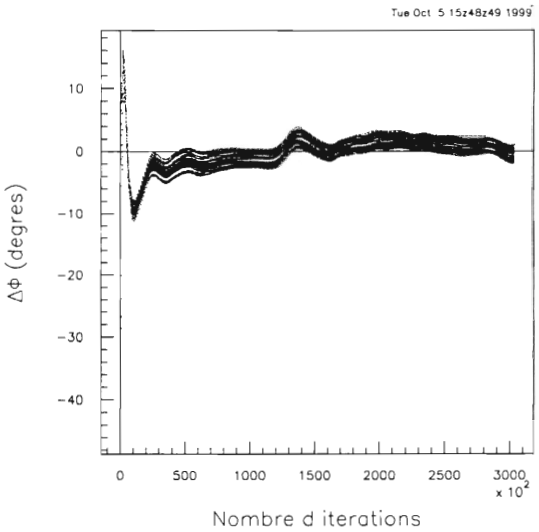

ΔΦ (degres)
Nombre d'iterations

H3 i 550

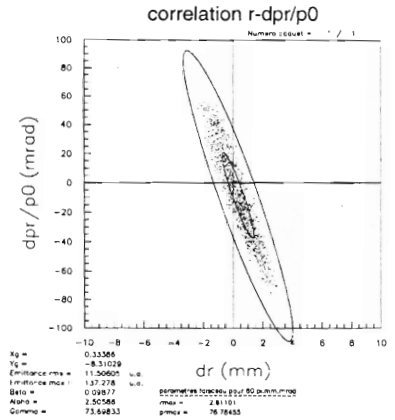

courbe dr(t)
dr (mm)
10
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
0
2000
4000
6000
8000
10000

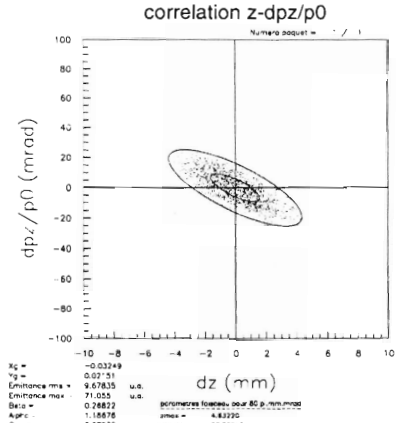

courbe dz(t)
dz (mm)
10
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
0
2000
4000
6000
8000
10000
t

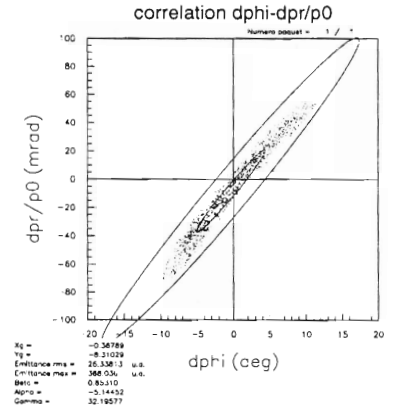

BARYCENTRES
Tue Oct 5 15z49z12 1999
y
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
-0.5
-1
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
1
x

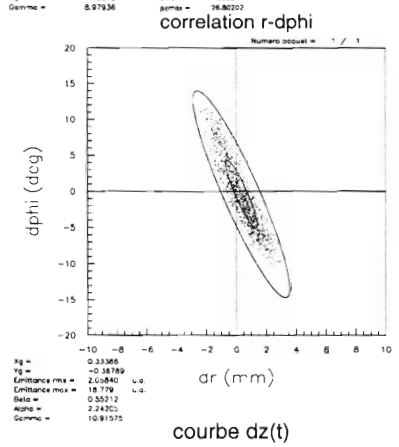

Tue Oct 5 15z48z49 1999
ΔΦ (degres)
10
0
-10
-20
-30
-40
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
x 10^2
Nombre d iterations

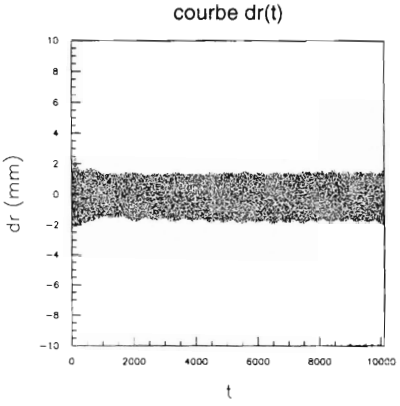
H3 i 600

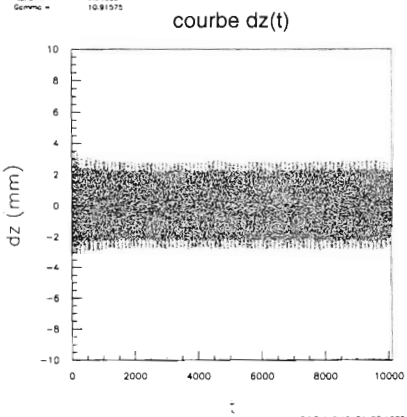

correlation r-dpr/p0
dpr/p0 (mrad)
dr (mm)

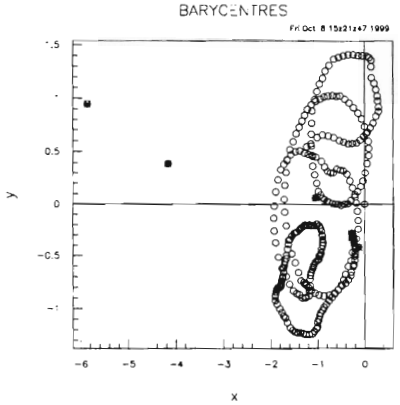

correlation z-dpz/p0
dpz/p0 (mrad)
dz (mm)

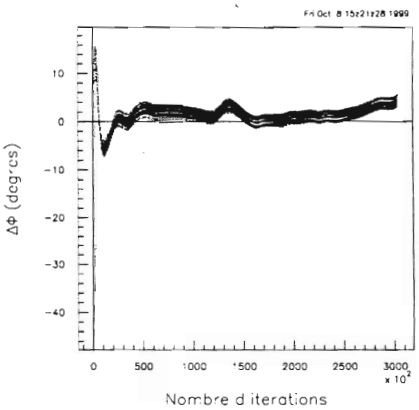

correlation dphi-dpr/p0
dpr/p0 (mrad)
dphi (deg)


correlation r-dphi
dphi (deg)
dr (mm)

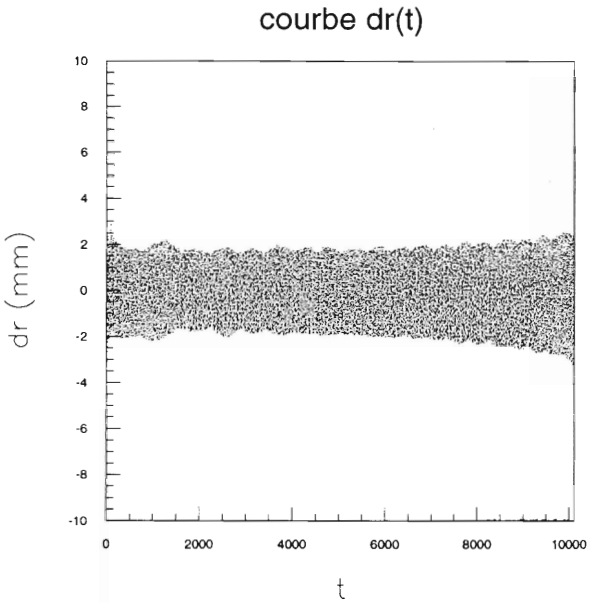

courbe dr(t)
dr (mm)
t

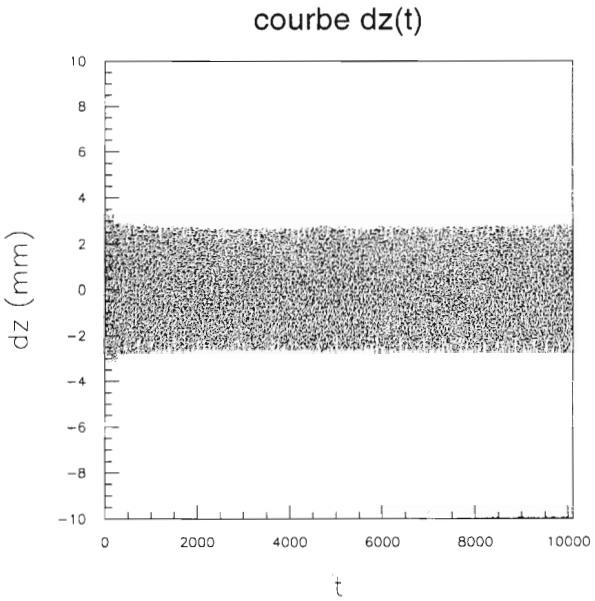

courbe dz(t)
dz (mm)

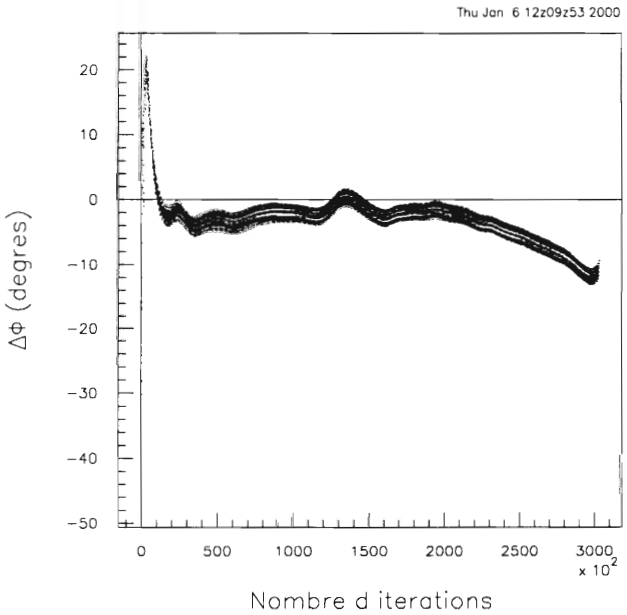

BARYCENTRES
y
x

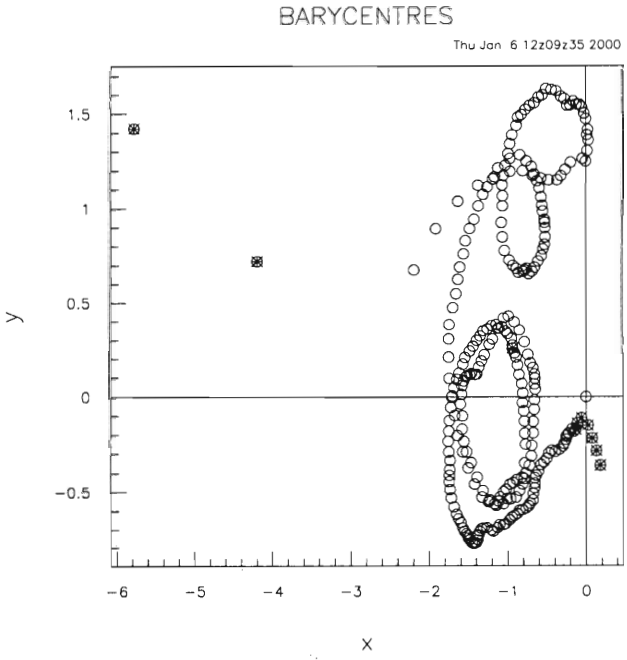

ΔΦ (deg-cs)
Nombre d iterations

H3 i 650

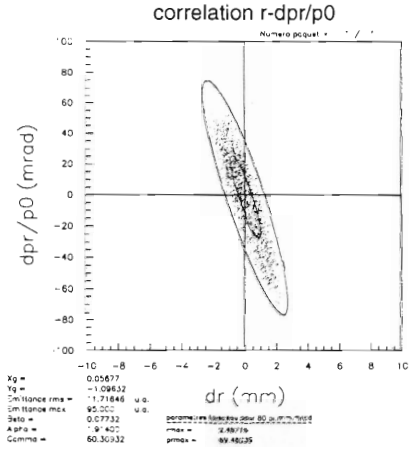

courbe dr(t)
dr (mm)
t
Thu Jan 6 12z09z08 2000

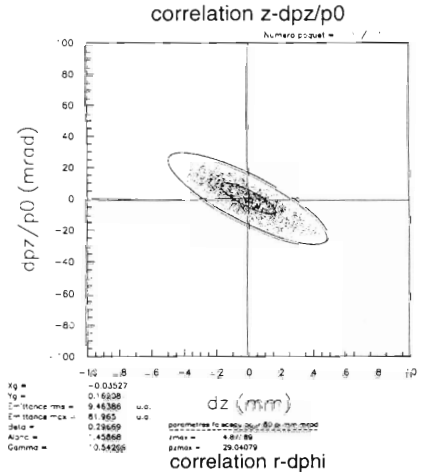

courbe dz(t)
dz (mm)
t

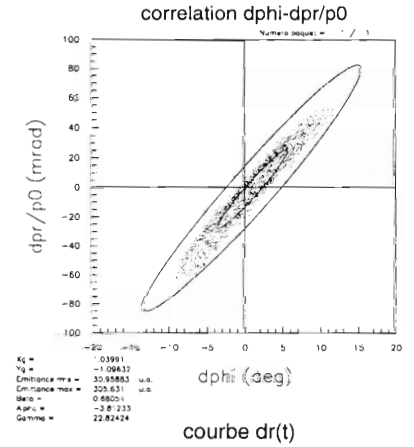

Thu Jan 6 12z09z53 2000
ΔΦ (degres)
Nombre d iterations
x 10^2

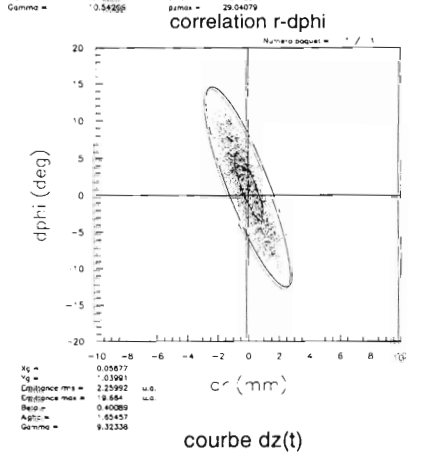

BARYCENTRES
Thu Jan 6 12z09z35 2000
y
x

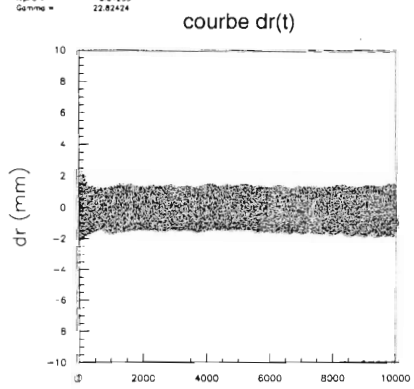
H3 i 700

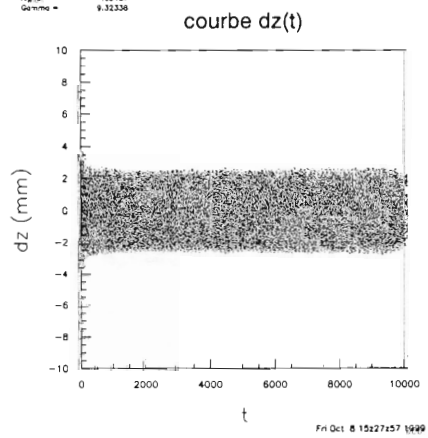

correlation r-dpr/p0
dpr/p0 (mrad)
dr (mm)

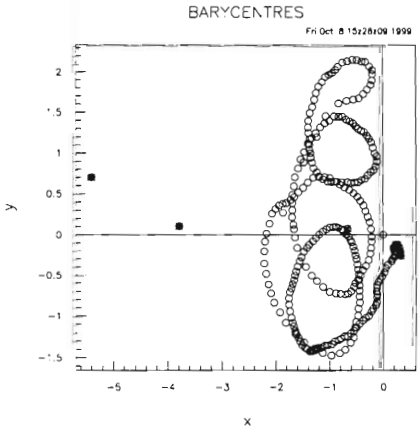

correlation z-dpz/p0
dpz/p0 (mrad)
dz (mm)

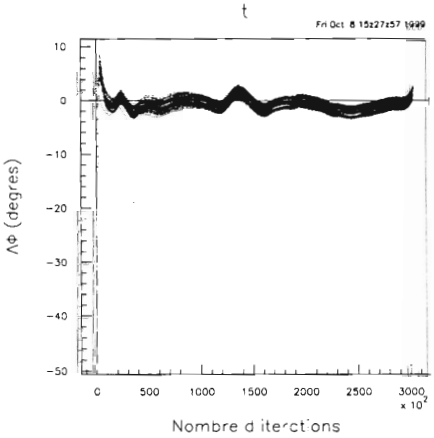

correlation dphi-dpr/p0
dpr/p0 (mrad)
dphi (deg)


correlation r-dphi
dphi (deg)

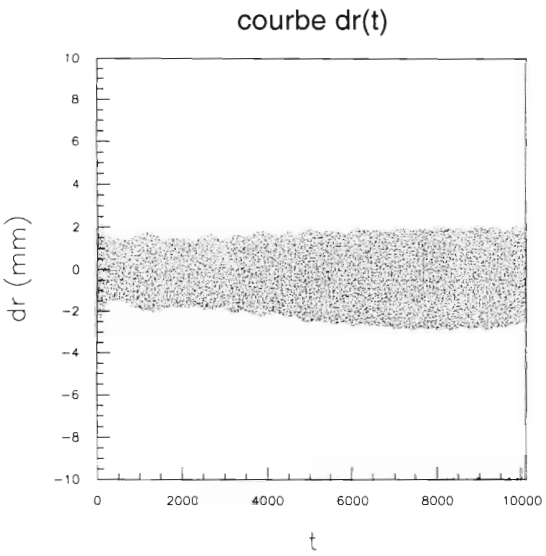

courbe dr(t)
dr (mm)

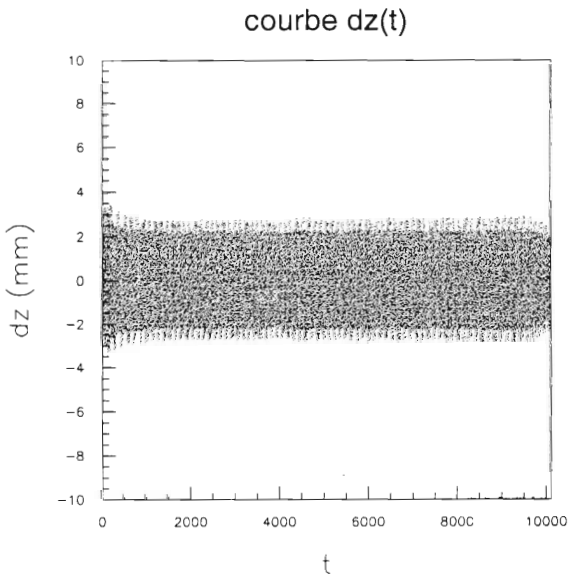

courbe dz(t)
dz (mm)
t

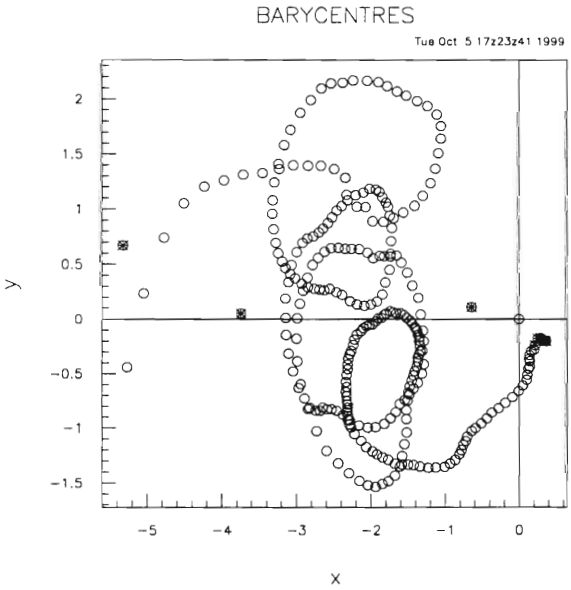

BARYCENTRES
y
x

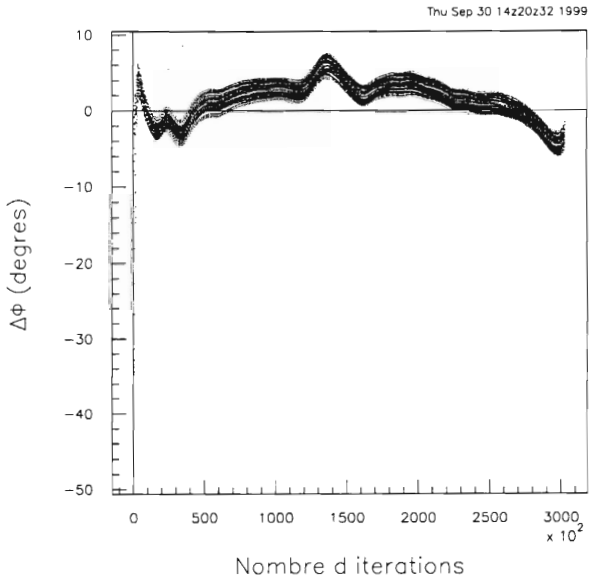

ΔΦ (degres)
Nombre d iterations

H3 i 750

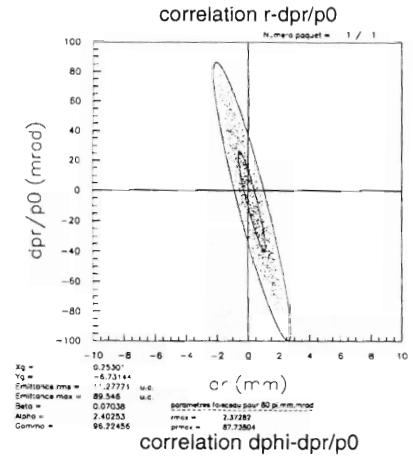

courbe dr(t)
dr (mm)
t

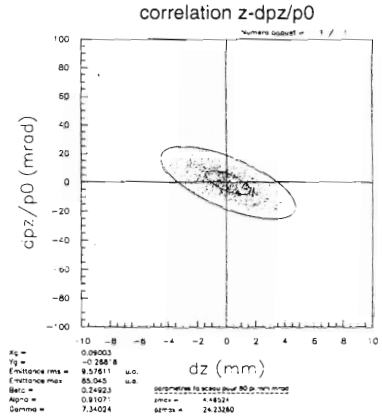

courbe dz(t)
dz (mm)
t

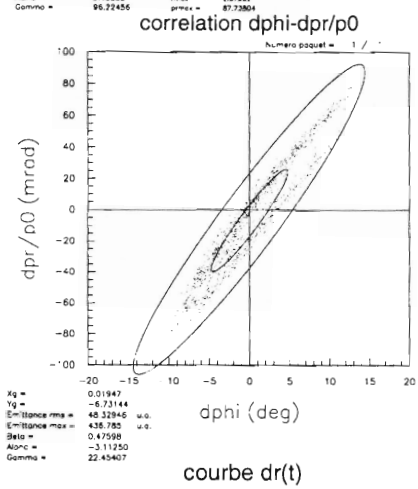

BARYCENTRES
Tue Oct 5 17z23z41 1999
y
x

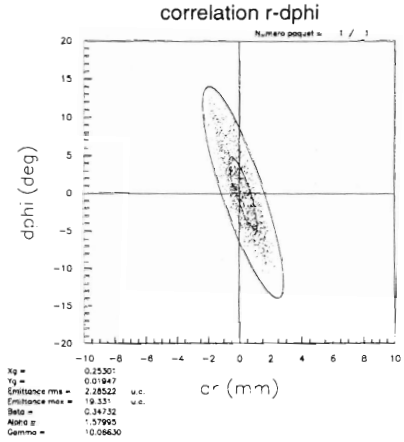

Thu Sep 30 14z20z32 1999
Δφ (degres)
x 10²
Nombre d iterations

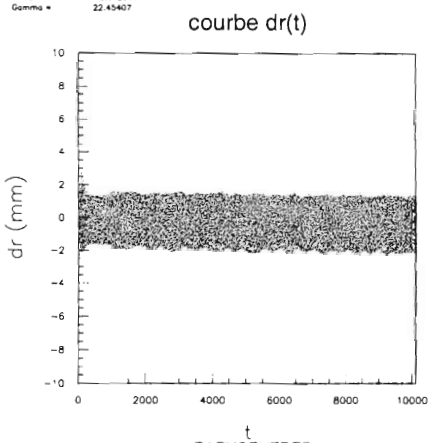
H3 i 800

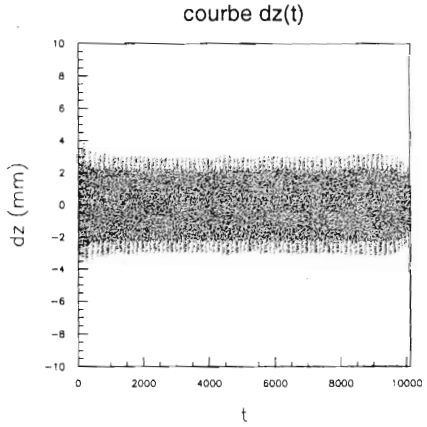

correlation r-dpr/p0
dpr/p0 (mrad)
dr (mm)

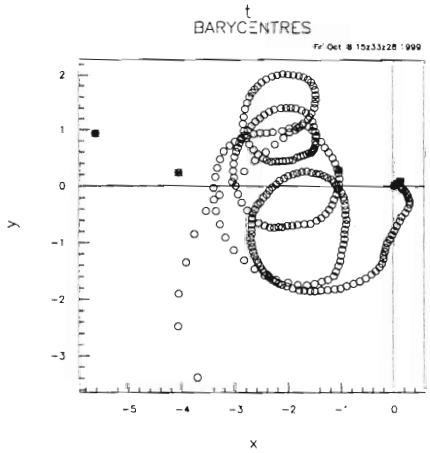

correlation z-dpz/p0
dpz/p0 (mrad)
dz (mm)

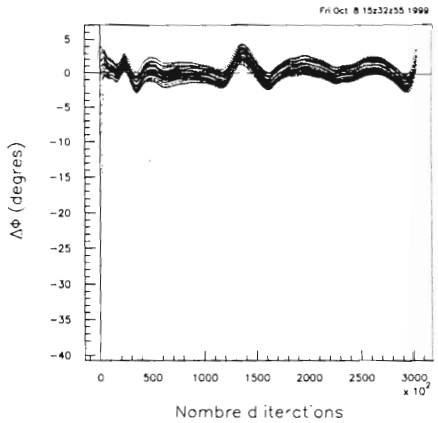

correlation dphi-dpr/p0
dpr/p0 (mrad)
dphi (deg)


correlation r-dphi
dphi (deg)
dr (mm)


courbe dr(t)
dr (mm)
t


courbe dz(t)
dz (mm)
t


BARYCENTRES
y
x


ΔΦ (degres)
Nombre d iterc'ons

XII. ANNEXE D : Exemple de fichiers d'entrée et de sortie du programme `PARAM.F` pour un ion d'Argon.

```
'fichier de définition du faisceau à accélérer'
F                  ! W = énergie ou B= champ principal ou F = fréquence
40.d0              ! Nombre de masse
39.96238282d0      ! Masse atomique
9.                 ! Charge
9.6                ! Energie cinétique finale ou BP en Tesla ou F en MHz
3                  ! harmonique si option fréquence choisie
```

```
*****************************************************
*  Calcul des bobines iso et paramètres faisceau    *
*                  15/10/1999                       *
*****************************************************

 A =  40    AM =    39.962382820000     Q =  9      H =  3

--------------------------------------------------
Calcul des paramètres pour f H.F. =     9.6000000   MHz
                  soit f faisceau =     3.2000000   MHz
--------------------------------------------------

                 m0 = 930.503343270139 MeV/c2/A
               beta = 0.10060056105368
              gamma = 1.00509897225729
            énergie =    4.745 MeV/A

     Le champs Biso voulu =   0.929892 Tesla

 Interpolation effectuée pour le courant de BP :

    0.929892  Tesla    =     424.153A

Les valeurs des bobines d'isochronisme à 4.8 MHz sont :
Bobine   1  :     -62.80  A
Bobine   2  :    -386.78  A
Bobine   3  :    -105.59  A
Bobine   4  :     -93.53  A
Bobine   5  :     -81.05  A
Bobine   6  :     -37.02  A
Bobine   7  :      39.57  A
Bobine   8  :      42.46  A
Bobine   9  :      -8.51  A
Bobine  10  :     204.46  A
Bobine  11  :     205.25  A

Interpolation à la fréquence choisie :     3.200MHz
Delta I sur bob   1  :        0.00  A, dy=    0.00
Delta I sur bob   2  :       -0.68  A, dy=    0.03
Delta I sur bob   3  :       23.78  A, dy=    0.14
Delta I sur bob   4  :        5.37  A, dy=   -0.12
Delta I sur bob   5  :       15.02  A, dy=    0.15
Delta I sur bob   6  :       13.17  A, dy=   -0.17
Delta I sur bob   7  :       24.73  A, dy=    0.38
Delta I sur bob   8  :       19.24  A, dy=   -0.21
Delta I sur bob   9  :       19.87  A, dy=   -0.05
```

```
Delta I sur bob  10  :        27.35  A, dy=    0.09
Delta I sur bob  11  :        25.13  A, dy=   -0.38

Résultat interpolation à la fréquence choisie :
Bobine   1  :      -62.80  A
Bobine   2  :     -387.46  A
Bobine   3  :      -81.81  A
Bobine   4  :      -88.17  A
Bobine   5  :      -66.03  A
Bobine   6  :      -23.85  A
Bobine   7  :       64.29  A
Bobine   8  :       61.70  A
Bobine   9  :       11.36  A
Bobine  10  :      231.81  A
Bobine  11  :      230.38  A

 Paramètres de faisceau interpolés :
 prmax =    62.7593  rmax =    2.75329 alpha =    1.91988
 pzmax =    26.3920  zmax =    4.49561 alpha =    1.09077
 phi0 =    1.99749   alpha(pr,phi) =   -4.00000
 alpha(r,phi) =    1.66293

 Energie d'injection    :    5.48687  KeV/A
 Tension H.F a 14.4 MHz :    33502.3 V
```