

MESURE MAGNETIQUE DU QUADRIPOLE

FODO NO. 1 AVEC DIPOLE DE CORRECTION

G. Suberlucq et M. Tardy

1. INTRODUCTION

2. PRINCIPE ET PRECISION DES MESURES

2.1 Système de coordonnées et alignement.

2.2 Principe des mesures.

2.3 Précision des mesures.

3. MESURES MAGNETIQUES

3.1 Courbe de magnétisation du quadripôle.

3.2 Courbe de magnétisation du dipôle.

3.3 Homogénéité du gradient intégré sur la longueur.

3.4 Homogénéité du gradient au centre.

3.5 Homogénéité du champ dipolaire.

4. CALCUL DES COEFFICIENTS MULTIPOLAIRES

1. INTRODUCTION

Dans les linacs du préinjecteur LEP, 34 quadripôles type "FODO" sont installés pour focaliser les faisceaux d'électrons et de positons pendant leur accélération.

Le but de la présente note est de décrire les propriétés magnétiques d'un de ces quadripôles y compris avec dipôle de correction incorporé.

2. PRINCIPE ET PRECISION DES MESURES

2.1 Système de coordonnées et alignement

La figure 1 montre le système de coordonnées, que nous avons utilisé.

L'alignement a été effectué en utilisant le gabarit d'alignement prévu à cet effet. La précision de l'alignement par rapport au gabarit est meilleure que $\pm 0,1$ mm.

2.1.1 Avec cet alignement nous avons obtenu un centre magnétique à :

$$Y = +0,55 \text{ mm}$$

$$X = -0,16 \text{ mm}$$

2.1.2 Nous avons estimé cette erreur inacceptable et envoyé le gabarit au contrôle.

2.1.3 Nous nous sommes alignés sur l'axe magnétique de l'aimant et nous avons vérifié mécaniquement les pôles : par rapport à l'axe magnétique, l'axe moyen du cercle de gorge des pôles à $Z = 0$ est à :

$$\left. \begin{array}{l} X_p = + 0,13 \text{ mm} \\ Y_p = - 0,15 \text{ mm} \end{array} \right\} \text{ de l'axe magnétique}$$

L'axe du gabarit est à :

$$\left. \begin{array}{l} X_g = -250 + 0,16 \text{ mm} \\ Y_g = 470 - 0,55 \text{ mm} \end{array} \right\} \text{ de l'axe magnétique}$$

Toutes les mesures qui suivent sont faites en prenant l'axe magnétique comme origine des X, Y.

2.1.4 Alignement du dipôle. Nous avons conservé le même système de coordonnées et les mêmes origines pour la mesure du dipôle de correction. Nous avons trouvé un décalage de + 3 mm de l'axe du sextupôle contenu dans le dipôle de correction.

2.2 Principe des mesures

2.2.1 Préparation magnétique de l'aimant

Avant chaque mesure le quadripôle est pulsé lentement au moins 10 fois à 250 A.

Pour la mesure du dipôle, celui-ci est cyclé au moins 10 fois jusqu'à 20 A.

2.2.2 Alimentation en courant

Le quadripôle est alimenté en courant continu entre 0 et 250 A; l'enroulement dipolaire est aussi alimenté en courant continu entre 0 et 20 A.

2.2.3 Mesure du gradient intégré sur la longueur

La mesure de $\int_{-\infty}^{+\infty} Gdz$ est faite avec une bobine de 1,6 m de long :

GL 1. La valeur finale est la moyenne des 4 valeurs obtenues lors des 4 rotations de 90°.

$$\int_{-0,8m}^{+0,8m} Gdz = \frac{I_{th}}{8 \cdot As} \quad 4 \quad \frac{\int_0^t edt(n)}{I_n} \quad n=1$$

avec : I_{th} = Courant théorique auquel on souhaite faire la mesure.

A_s Constante spécifique de la bobine à gradient (compte tenu de la longueur équivalente du quadripôle).

I_n = Courant effectif auquel on fait la mesure pendant une rotation de 90° de la bobine.

$\int_0^t \text{edt}(n)$ = Intégration de la tension induite dans la bobine pendant une rotation de 90° .

2.2.4 Mesure du champ intégré sur la longueur

La mesure de $\int_{-\infty}^{+\infty} B dz$ (pour l'enroulement dipolaire seulement) est

faite avec une bobine de 2 m de long : BL3. La valeur finale est la moyenne des 2 valeurs obtenues lors de 2 rotations de 180° .

$$\int_{-1m}^{+1m} B dz = \frac{I_{th}}{4 \cdot A_s} \sum_{n=1}^2 \frac{\int_0^t \text{edt}(n)}{I_n}$$

avec : I_{th}, I_n : Comme défini au paragraphe 2.2.3.

A_s : Constante spécifique de la bobine à champ.

$\int_0^t \text{edt}(n)$: Intégration de la tension induite dans la bobine pendant une rotation de 180° .

2.2.5 Mesure du champ au centre

La mesure de B est faite avec une sonde de Hall (No. 3).

$$B = \frac{I_{th}}{3} \cdot \sum_{n=1}^{n=3} \frac{\sum_{k=0}^{k=15} A_k \cdot V_{H(n)}^k}{I_n}$$

avec : I_{th} , I_n : Comme défini au paragraphe 2.2.3.

A_k : Coefficients correspondants au polynôme passant par les points d'étalonnage de la sonde.

$U_H(n)$: Tension fournie par la sonde de Hall.

2.2.6 Mesure du gradient au centre

La mesure de G est faite par deux mesures de B à une distance connue :

$$G(0,0,0) = \frac{B(X=10) - B(X=-10)}{(X=10) - (X = -10)}$$

2.3 Précision des mesures

2.3.1 Mesure du gradient intégré sur la longueur

Erreur relative sur les valeurs absolues : $\epsilon_a \leq \pm 2 \times 10^{-3}$

Erreur relative aléatoire : $\epsilon_r \leq \pm 3 \times 10^{-4}$

Pour $-40 \text{ mm} \leq x \leq +40 \text{ mm}$; $100 \leq I \leq 250 \text{ A}$.

2.3.2 Mesure du champ intégré sur la longueur

Erreur absolue sur le champ $\Delta B \leq \pm 5 \times 10^{-5} \text{ Tm}$

Erreur relative aléatoire $\epsilon_r \leq \pm 2 \times 10^{-3}$

Non compte tenu du champ magnétique ambiant.

2.3.3 Mesure du champ au centre

Pour $0,09 \text{ T} \leq B \leq 1,7 \text{ T}$

Erreur relative sur la valeur absolue : $\epsilon_a \leq \pm 5 \times 10^{-4}$

Erreur relative aléatoire : $\epsilon_r \leq \pm 2 \times 10^{-4}$

Pour $0 \leq B \leq 0,01 \text{ T}$ $\Delta B \leq \pm 5 \cdot 10^{-5} \text{ T}$.
 Erreur relative sur la valeur absolue $\leq 5 \cdot 10^{-3}$.

2.3.4 Mesure du gradient au centre

Idem au paragraphe 2.3.3. plus :
 Erreur de positionnement : $\Delta X = \Delta Y = \pm 0,02 \text{ mm}$

$$\frac{\Delta G}{G} \leq \pm 3 \cdot 10^{-3}$$

3. MESURES MAGNETIQUES

3.1 Courbe de magnétisation du quadripôle

Courant	$\int Gdz$	G	Leq. quad.
0	$1,59 \cdot 10^{-3} \text{ T}$	$4 \cdot 10^{-3} \text{ T/m}$	0,398 m
50	0,2633 T	0,8025 T/m	0,328 m
100	0,5264 T	1,604 T/m	0,328 m
150	0,7887 T	2,406 T/m	0,328 m
200	1,0495 T	3,201 T/m	0,328 m
250	1,3093 T	4,005 T/m	0,327 m

La figure 2 montre la variation du coefficient de magnétisation :

$$K = \frac{\int Gdz(I) - \int Gdz_{\text{rémanent}}}{I} \quad \text{la référence est arbitrairement choisie à } I = 100 \text{ A.}$$

3.2 Courbe de magnétisation du dipôle

Courant	$\int Bdz$	B	Leq. dip.
0	$*1,39 \cdot 10^{-4} \text{ Tm}$	$7 \cdot 10^{-5} \text{ T}$	*1,9 m
5	$1,006 \cdot 10^{-3} \text{ Tm}$	$2,59 \cdot 10^{-3} \text{ T}$	0,388 m
10	$1,891 \cdot 10^{-3} \text{ Tm}$	$5,15 \cdot 10^{-3} \text{ T}$	0,367 m
15	$2,781 \cdot 10^{-3} \text{ Tm}$	$7,72 \cdot 10^{-3} \text{ T}$	0,360 m
20	$3,669 \cdot 10^{-3} \text{ Tm}$	$10,29 \cdot 10^{-3} \text{ T}$	0,357 m

* Voir nota ci-après.

Nota : Les mesures de $\int Bdz$ prennent en compte le champ magnétique ambiant intégré sur la bobine de 2 m. Pour $-60 \leq x \leq 60$ mm : $1,45 \times 10^{-4}$ Tm $\leq \int Bdz$ ambiant $\leq 1,53 \times 10^{-4}$ Tm. Si l'on veut en tenir compte, il faut soustraire à $\int Bdz$:

$$\frac{1,5 \times 10^{-4}}{2} \times 1,6 = 1,2 \times 10^{-4} \text{ Tm}$$

3.3 Mesure de l'homogénéité du gradient intégré sur la longueur

La figure 3 montre la variation du gradient intégré sur la longueur en fonction de X, Y et du courant dipolaire.

On notera que pour chaque point le gradient est la valeur moyenne de la composante X et Y (voir paragraphe 2.2.3).

$$EPS = \left(\frac{\int Gdz(X, Y, Idip.)}{\int Gdz_{réf}} - 1 \right) \times 100$$

avec : $\int Gdz(réf) = \int Gdz(0,0)$ à I quadripôle = 230 A; I dipôle = 0.

3.4 Mesure du gradient au centre

La figure 4 montre la variation du gradient au centre en fonction de X. Cette variation est calculée à partir des mesures de champ.

$$EPS = \left(\frac{G(X, 0, 0)}{G(0, 0, 0)} - 1 \right) \times 100$$

3.5 Mesure de l'homogénéité du champ dipolaire

La figure 5 montre une loupe de la variation du champ magnétique intégré sur la longueur et du champ B en fonction de X.

$$EPS = \left(\frac{\int Bdz(X, 0)}{\int Bdz(0, 0)} - 1 \right) \times 100, \quad EPS = \left(\frac{B(X, 0)}{B(0, 0)} - 1 \right) \times 100$$

à I dipôle = 10 A ; I quad. = 0 A.

La sextupôle inclus dans ce dipôle a son centre décalé de + 3 mm par rapport à l'axe magnétique du quadripôle.

4. CALCUL DES COEFFICIENTS MULTIPOLAIRES

A partir de la mesure d'homogénéité du gradient intégré sur la longueur, sur l'axe X on obtient les coefficients suivants :

An		A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉
Quadripôle seul Iq = 230 A	Coefficient	1,207	4·10 ⁻³	0,1	-7	-10 ⁴	6·10 ³	2·10 ⁶	-2·10 ⁶	-1·10 ⁹	-3·10 ⁹
	$\frac{\Delta \int Gdz}{\int Gdz(0,0)}$ à X = 30 mm en ‰	0	0,01	-0,01	-0,02	-0,7	0,01	+0,1	0	-0,06	0
Quadripôle et dipôle Iq = 230 A Id = 10 A	Coefficient	1,203	-0,46	-0,3	-0,5	-8500	1·10 ⁴	3·10 ⁵	-5·10 ⁶	-3·10 ⁸	1·10 ⁹
	$\frac{\Delta \int Gdz}{\int Gdz(0,0)}$ à X = 30 mm en ‰	0	-1,2	-0,02	0	-0,57	0,02	0,02	-0,01	0	0

$$\int_{-\infty}^{+\infty} Gdz = \sum_{n=0}^{\infty} \left(A_n \cdot X^n \right); \quad \int_{-\infty}^{+\infty} Bdz = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{A_n}{n+1} \cdot X^{n+1} \right)$$

Distribution :

M. Renard, Orsay - Paris
 Membres de la section MA du groupe PSR
 Y. Baconnier
 D. Warner
 J.H.B. Madsen

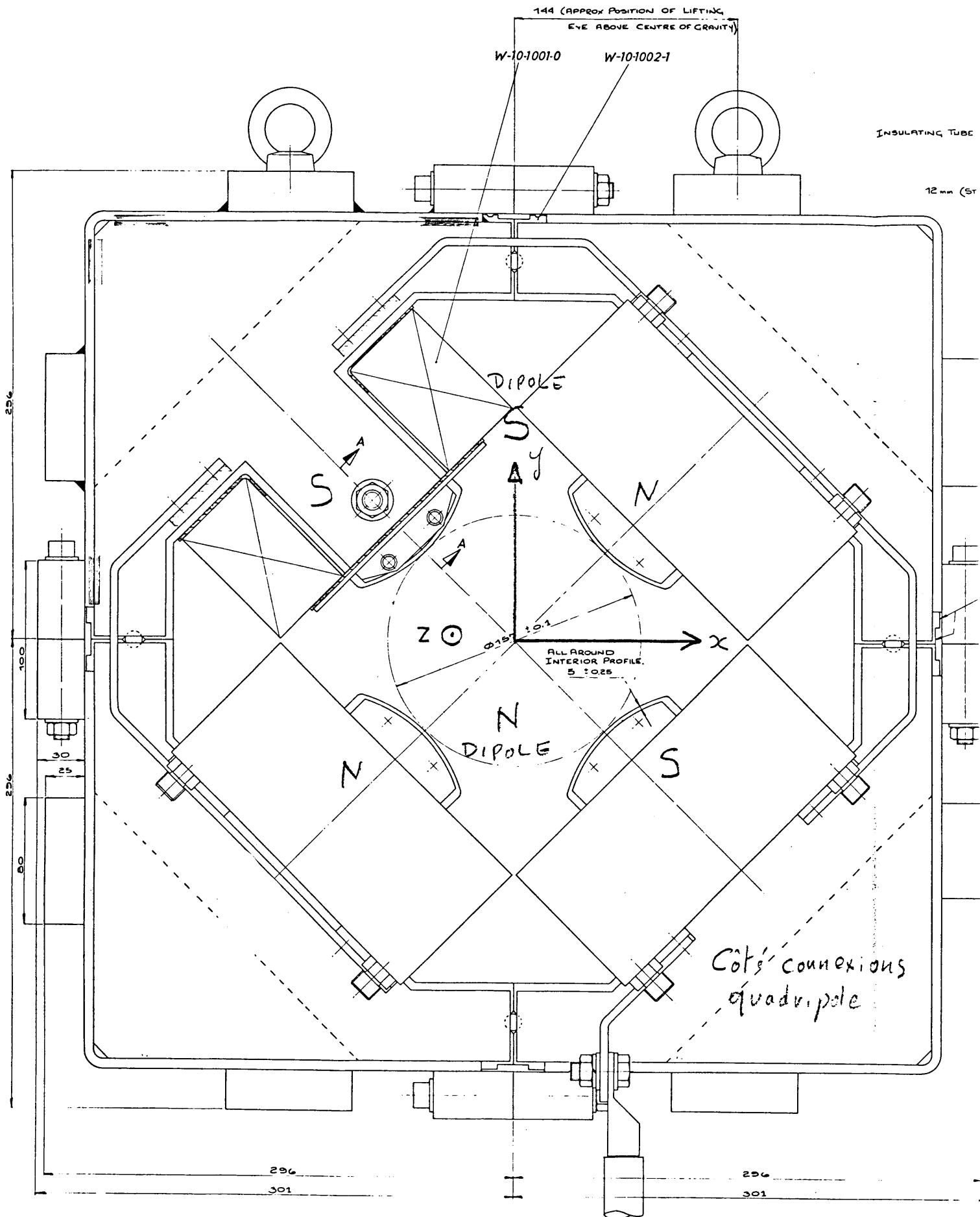
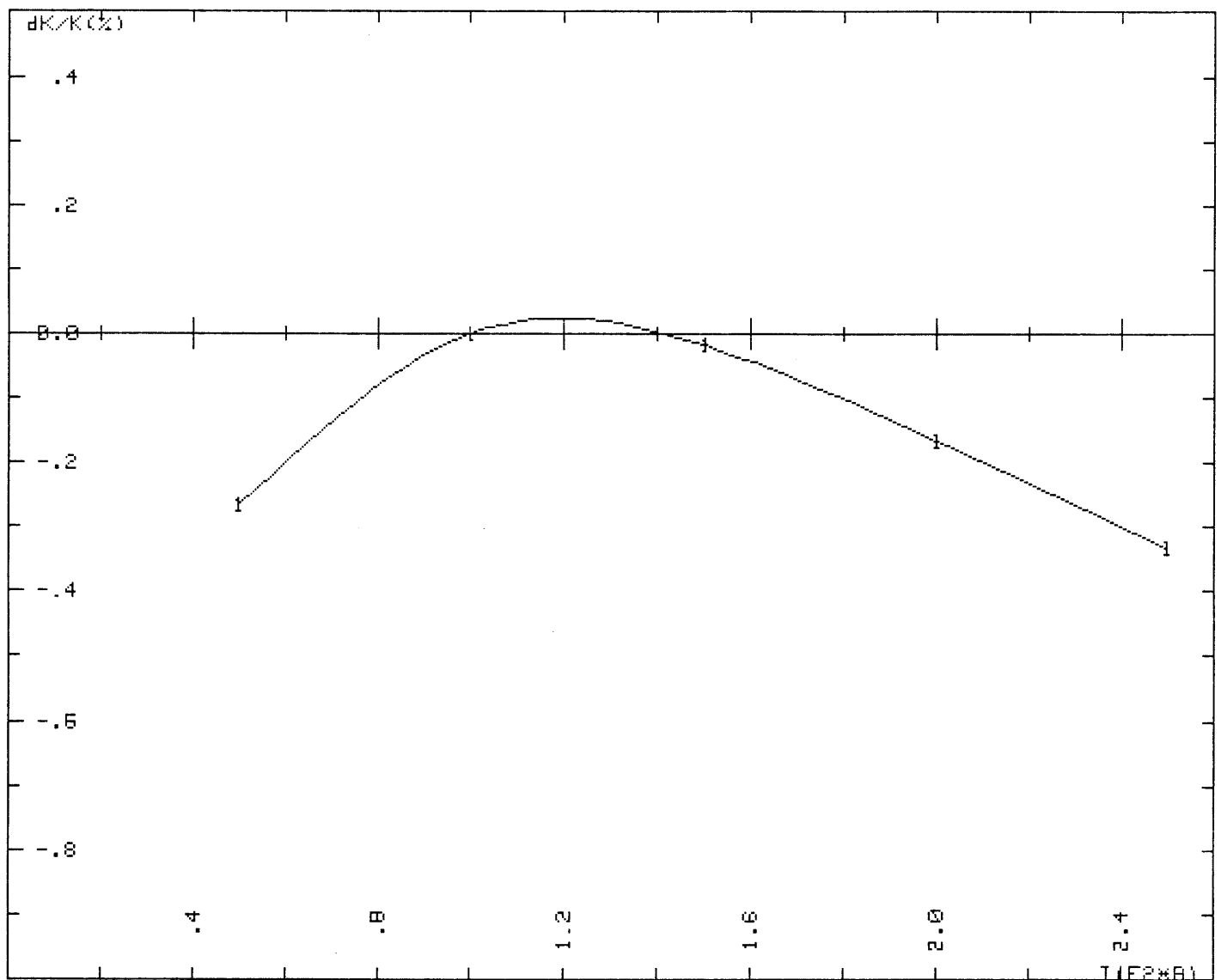


FIGURE 1.

NO	DATE	BY	ZONE	MODIFICATION



FODO No1 : Calcul du coefficient de magnetisation $\int Gdz(I)/I$ (Xref, Yref)=(0,0) mm 03/06/1985

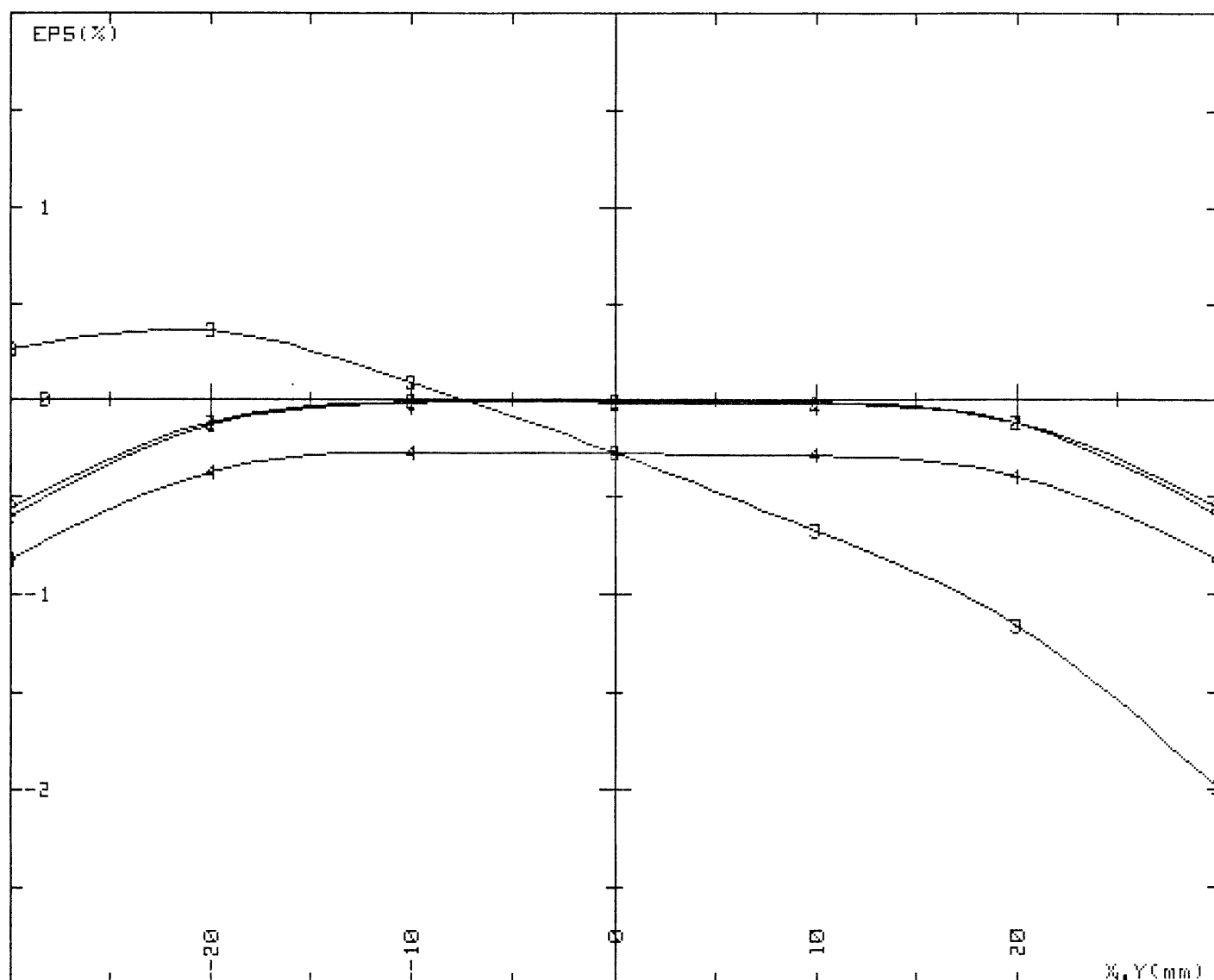
COEFFICIENT DE MAGNETISATION : $K = 5.2482E-03$ T/A à $I = 100$ A
 $\int Gdz_{remanent} = 1.591E-03$ T
 $\int Gdz = K * I * (1 + dK/K/100) + \int Gdz_{remanent}$

QUADRIPOLE FODO No1
 SANS ENROULEMENT DIPOLAIRE

COURANT CONTINU ; MANUEL ; 0-POLES GRAD ; MAGNETISAT.(I)
 MESURE INTEGREE ; BOB. GL1 ; HP 2401C ; ATTENUATION NON
 TENSION ; HP 3490 ;

Traitement du fichier : BI0101 disque DATA-2

FIGURE : 2.



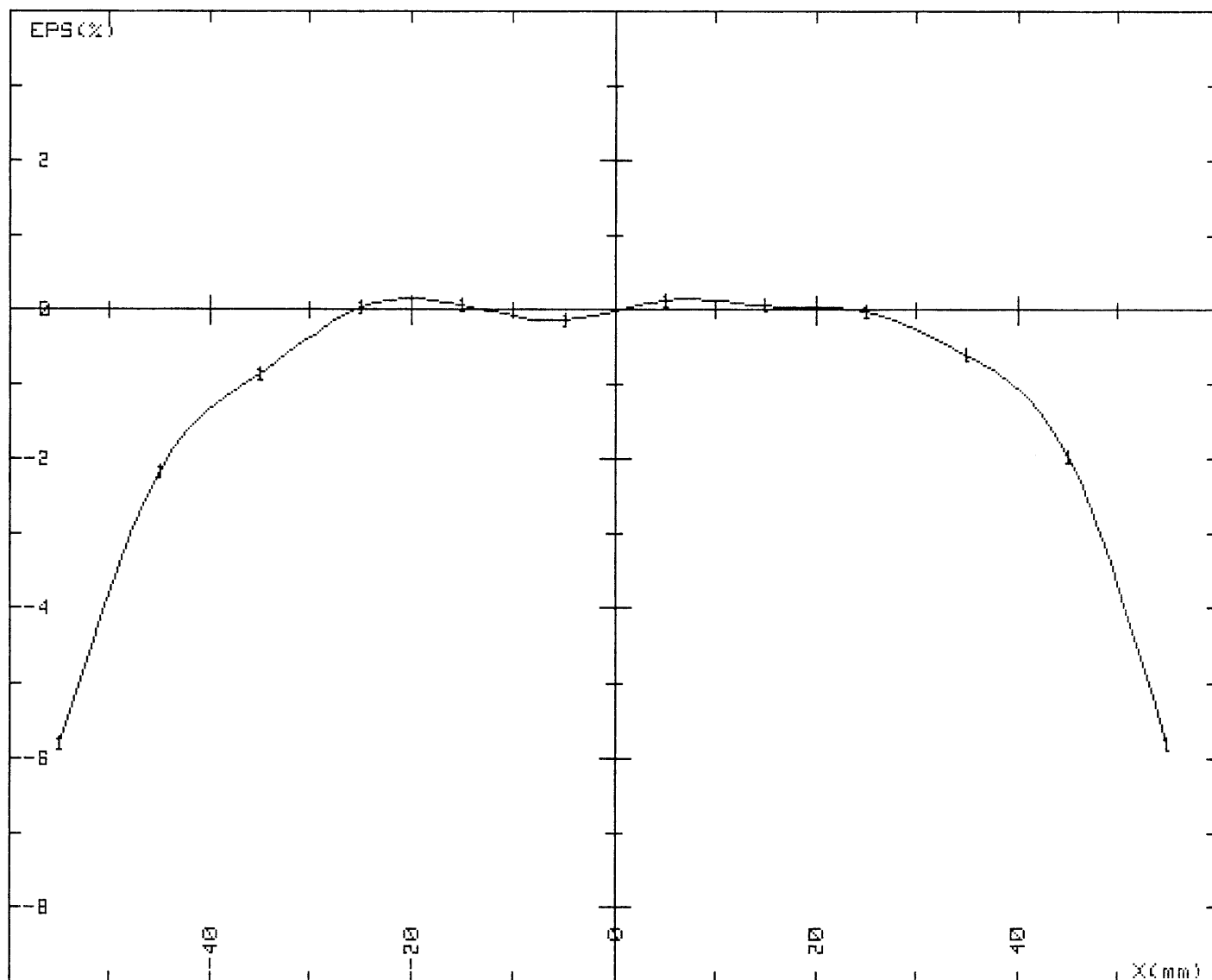
FODO+DIP No1 : mesure de l'homogeneite du gradient 12/06/1985
 REFERENCE : $\int Gdz(0,0) = 1.2068 \text{ Tm/m}$ à $I_{quad} = 230 \text{ A}$ & $I_{dipole} = 0$
 COURBE 1 : $\int Gdz(X,0) = f(X)$ à $I_{quad} = 230 \text{ A}$ & $I_{dipole} = 0 \text{ A}$
 COURBE 2 : $\int Gdz(Y,0) = f(Y)$ à $I_{quad} = 230 \text{ A}$ & $I_{dipole} = 0 \text{ A}$
 COURBE 3 : $\int Gdz(X,0) = f(X)$ à $I_{quad} = 230 \text{ A}$ & $I_{dipole} = 10 \text{ A}$
 COURBE 4 : $\int Gdz(Y,0) = f(Y)$ à $I_{quad} = 230 \text{ A}$ & $I_{dipole} = 10 \text{ A}$

QUADRIPOLE FODO No1
 COURBE 1&2 : SANS ENROULEMENT DIPOLAIRE
 COURBE 3&4 : AVEC ENROULEMENT DIPOLAIRE

COURANT CONTINU ; MANUEL ; 0-POLES GRAD ; HOMOG.(X,Y)
 MESURE INTEGREE ; BOB. GL1 ; HP 2401C ; ATTENUATION NON
 TENSION ; HP 3490 ; ;

LOUPE DU FICHER :H00304

FIGURE : 3.



FODO+DIP No1 : Calcul de l'homogeneite du gradient du champ 12/06/1985

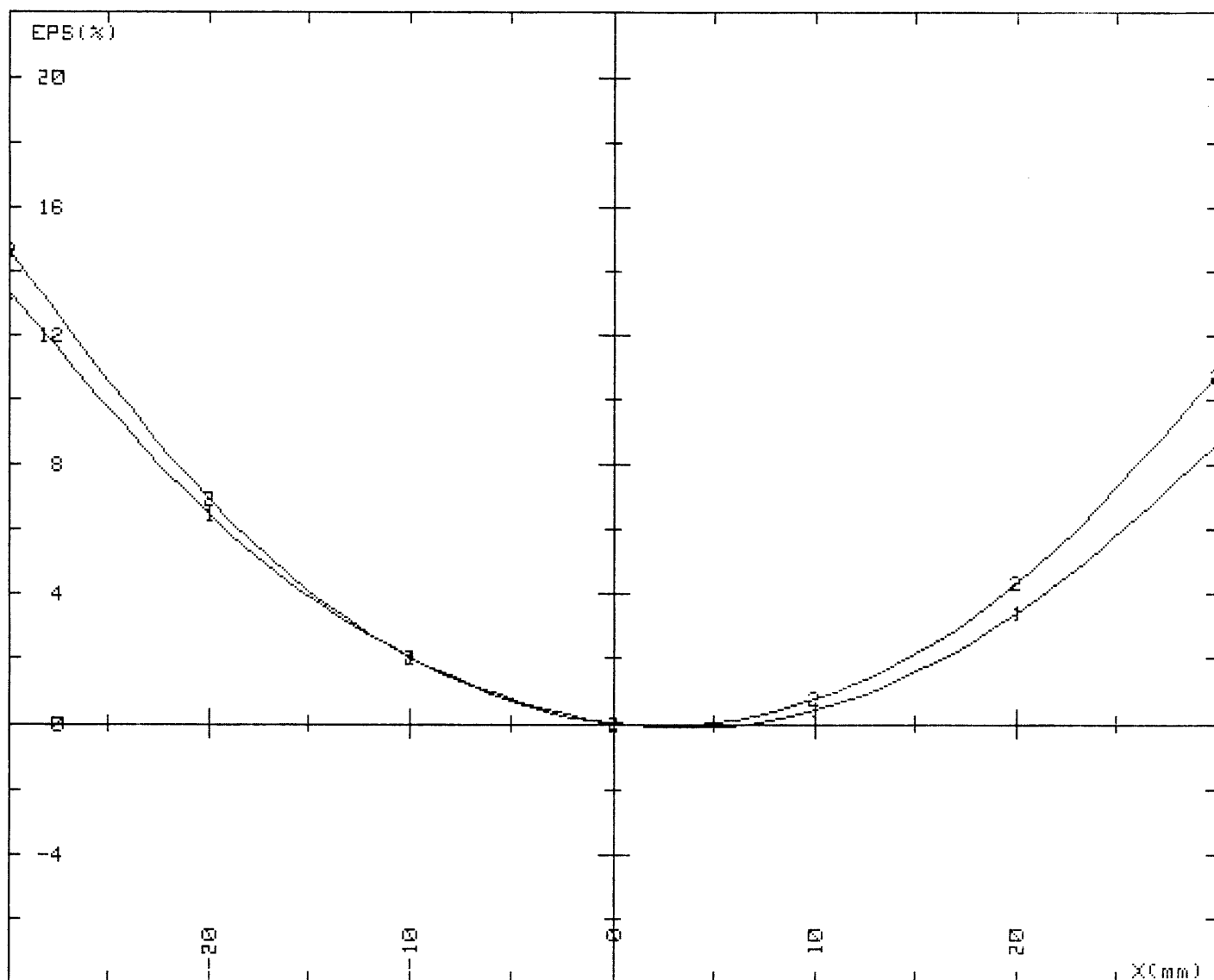
COURBE 1 : $G_y(0,0,0) = 3.68 \text{ T/m}$ à $I = 230 \text{ A}$

QUADRIPOLE FODO No1 SANS ENROULEMENT DIPOLAIRE

COURANT CONTINU ; MANUEL ; DIPOLES ; HOMOG. (X,Y)
 MESURE INTERNE ; HALL No 3 ; HP 3456A ; ATTENUATION NON
 TENSION ; HP 3490 ;

Nom du fichier : H00313 disque DATA-2

FIGURE : 4.



FODO+DIP No1 : mesure de l'homogeneite de $\int Bdz, B = f(X)$

12/06/1985

COURBE 1 : $\int Bdz = f(X)$; $\int Bdz(0,0) = 1.891E-03 \text{ Tm}$ à $I = 10 \text{ A}$

COURBE 2 : $B = f(X)$; $B(0,0) = 5.157E-03 \text{ T}$ à $I = 10 \text{ A}$

QUADRIPOLE FODO No1 SEUL L'ENROULEMENT DIPOLAIRE EST ALIMENTE

$EPS = (\int Bdz(X,0) / \int Bdz(0,0) - 1) * 100$

$EPS = (B(X,0) / B(0,0) - 1) * 100$

LOUPE DES FICHIERS : H00303 & H00315 Disque DATA-2

FIGURE 5.