

L'AIMANT D'EXTRACTION "HARICOT"

D.J. Simon
R. Michelier

I. BUT

L'installation dans la zone sud-est (neutrino) d'un faisceau de basse énergie compatible avec les expériences neutrino futures ne permettait qu'un démontage très limité du filtre neutrino; le faisceau k_{11} ⁽¹⁾ a donc été conçu de façon à contourner ce blindage et il a été nécessaire de défléchir le faisceau secondaire dès que possible après la cible. Ceci a été réalisé à l'aide de l'aimant "Haricot" décrit dans ce rapport.

Cet aimant devait répondre aux exigences suivantes :

- a) Produire une déflexion de 45° du faisceau de quantité de mouvement maximale 1.3 GeV/c.
- b) Etre de type C afin de défléchir les particules secondaires tout en laissant le passage libre au faisceau primaire de protons de haute énergie.
- c) Etre aussi court que possible; pour permettre une bonne analyse en quantité de mouvement dans le faisceau, il était en effet nécessaire que le centre de la déflexion soit situé très près de la cible.

Nous avons donc choisi de réaliser un aimant "secteur" pouvant produire un champ magnétique de 2 Teslas; cet aimant est adapté aux alimentations de type R2 (900 Ampères, 200 Volts).

II. CARACTERISTIQUES (Fig. 2)

Le circuit magnétique, réalisé en acier doux Roechling AME 1S comporte seulement 2 blocs usinés puis boulonnés après la mise en place du bobinage; le rayon de courbure moyen de 2.16 m était suffisamment petit pour permettre l'usinage du fer sur un tour carrousel, ce qui a permis d'éviter les inhomogénéités magnétiques qu'aurait entraînées une construction en plusieurs parties.

Les deux bobines, en série électriquement, comportent chacune 64 spires de cuivre creux refroidies par circulation d'eau (8 circuits de refroidissement en parallèle par bobine). Le cuivre utilisé, de section extérieure $8.5 \times 10 \text{ mm}^2$, comporte un canal de refroidissement circulaire de diamètre 5.4 mm. L'isolation des conducteurs est obtenue au moyen d'enrubannage de feutre de tergal (épaisseur, entre spires, 0.52 mm). Entre chaque galettes de 8 spires est placé un stratifié de verre-epoxy de 0.4 mm d'épaisseur, et différentes couches de ruban en verre-mica et en feutre préimprégné assurent l'isolation à la masse (épaisseur $\approx 2.9 \text{ mm}$). La résine utilisée pour l'imprégnation est une araldite F produite par CIBA (durcisseur HY 905, flexibilisateur DY 040 et accélérateur DY 061). Cette araldite présente de très bonnes caractéristiques mécaniques, elle est d'une utilisation facile; sa tenue aux radiations est moyenne mais doit cependant permettre d'envisager l'utilisation des bobines jusqu'à des doses de radiation atteignant 10^9 rad ⁽²⁾, (diminution de 50 o/o de la résistance mécanique). Les mesures effectuées pendant le fonctionnement du faisceau k_{11} montrent que la dose reçue par l'extrémité des bobines du côté de la cible est approximativement de 10^7 rad pour 10^{17} protons de 20 GeV/c touchant la cible (environ 2 semaines de fonctionnement); la durée de vie probable de l'enroulement est donc acceptable.

Les bobines sont soumises à des efforts électromagnétiques importants (près de 1 tonne par mètre de longueur); elles sont fixées par des vérins de pression et des coins à l'intérieur, et par des chaises-support à l'extérieur.

Les dimensions du circuit magnétique, le profil des pôles et les Ampère-tours nécessaires ont été déterminés en utilisant le programme MARE ⁽³⁾; l'aimant a été construit par la Société Savoisienne à Aix-les-Bains (France).

Signalons enfin que l'aimant est installé sur un support réglable utilisable non seulement dans la zone neutrino, mais aussi dans les zones expérimentales habituelles (hauteur du faisceau : 1.260 mm).

Les caractéristiques essentielles de "Haricot" sont résumées sur le tableau de la page 9.

III. MESURES MAGNETIQUES

1. Méthodes

Le système de coordonnées utilisé est visible sur la Fig. 2 : l'origine 0 est le centre géométrique de l'entrefer, l'axe du faisceau est symbolisé par l'abscisse curviligne $x' 0 x$, et l'axe $z' 0 z$ représente la direction du champ magnétique.

Les mesures absolues de l'intensité B du champ magnétique ont été faites au moyen d'un fluxmètre à résonance nucléaire ou à l'aide de petites bobines (diamètre extérieur 14 mm, hauteur 11 mm, surface effective 0.3324 m^2) reliées à un intégrateur électronique et soumises à une rotation précise de 180° ; elles ont été étalonnées dans le champ magnétique lui-même par utilisation simultanée de la résonance nucléaire.

L'intégrale du champ magnétique :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} B(x) dx$$

a été calculée en intégrant numériquement les valeurs du champ magnétique mesurées tous les 2 centimètres sur l'arc $x' 0 x$; le calcul a été fait au moyen du programme NR 12⁽⁴⁾.

La longueur équivalente de l'aimant suivant l'arc $x' 0 x$ est donnée par le rapport entre l'intégrale du champ et le champ au centre de l'aimant :

$$L_e = \frac{\int B(x) dx}{B_0}$$

L'homogénéité du champ magnétique dans l'entrefer a été mesurée à courant constant dans l'aimant au moyen de 2 petites bobines en opposition et de l'intégrateur électronique; les 2 bobines étant fixées au point $(x, y = 0, z = 0)$, la bobine mobile est amenée au point (x, y, z) . La tension intégrée permet de calculer la variation relative du champ magnétique entre ces deux points. On la définit par le rapport :

$$\frac{\Delta B}{B(x)} = \frac{B(x, 0, 0) - B(x, y, z)}{B(x, 0, 0)} \times 100$$

exprimé en centièmes.

Il est possible de faire la mesure complète de l'homogénéité du champ magnétique dans le plan $y = 0, z = 0$ pour toute valeur de x en déplaçant le chariot prévu pour cette mesure.

Enfin la mesure de l'homogénéité du champ de fuite aux extrémités de l'aimant a été réalisée suivant le même principe que celle de l'homogénéité du champ dans l'entrefer, c'est-à-dire par une méthode différentielle au moyen de deux bobines et d'un intégrateur; mais nous avons utilisé deux longues bobines qui intégraient directement le champ de fuite suivant l'axe $x'x$ (dimensions $450 \times 8 \times 8 \text{ mm}^3$, 140 spires).

2. Résultats

Les principaux résultats des mesures sont représentés sur les Figs 3 à 11. On relève qu'un champ magnétique de 2 Teslas est atteint pour une intensité de 865 Ampères; la puissance de déflexion de l'aimant est alors de 3.4 Teslas x mètre. La longueur équivalente varie entre 1.75 m aux faibles champs et 1.70 m à 2 Teslas (longueur du fer : 1.65 m).

La Fig. 6 représente l'homogénéité transversale du champ magnétique dans l'entrefer ($x = z = 0$). Nous avons tracé en trait continu les résultats expérimentaux et en traits interrompus les valeurs calculées à faible champ (0.6 Tesla) et à champ élevé (2 teslas). Le calcul a été effectué par calculatrice au moyen des programmes MARE. On a utilisé le programme MARE-A pour les faibles champs, en prenant la surface du fer comme equipotentielle magnétique;

la maille la plus faible utilisée a été de $3 \times 2 \text{ mm}^2$ et les résultats expérimentaux sont en bon accord avec les valeurs calculées. Aux champs magnétiques élevés, on a fait intervenir la saturation du fer en utilisant le programme MARE-C (maille fer : $12 \times 12 \text{ mm}^2$, 3 cycles complets fer-air, temps de calcul ≈ 12 minutes sur CDC 6600). L'accord entre les homogénéités calculées et mesurées est un peu moins bon, mais encore très satisfaisant compte tenu de la maille relativement importante utilisée pour le calcul dans le fer et du rayon de courbure de l'aimant dont on n'a pas tenu compte dans le calcul.

La nécessité de travailler à champ magnétique élevé nous a conduits à étudier des corrections destinées à améliorer l'homogénéité dans l'entrefer. Ces corrections sont principalement des "shims", feuilles minces de fer doux, d'épaisseur et de largeur variables disposées aux 4 coins des pôles sur toute la longueur de l'aimant. Chacun d'eux est découpé en une seule pièce de façon à épouser le rayon de courbure de l'aimant et est maintenu contre le pôle par un support en acier inoxydable vissé dans le fer. On a aussi utilisé des corrections d'extrémités, pièces de fer doux destinées à corriger le champ de fuite (Voir Fig. 2). Des corrections différentes ont été prévues selon l'utilisation que l'on envisage pour l'aimant : champs faibles, champs pour le fonctionnement du faisceau k_{11} , champs forts.

Les dimensions de ces corrections indiquées ci-après sont en millimètres; les shims sont caractérisés par leur largeur (suivant $y' y$) et leur épaisseur (suivant $z' z$). Les pièces d'extrémités ont toutes 31 mm de hauteur (suivant $z' z$) et sont définies par deux nombres qui sont leur largeur (suivant $y' y$) et leur épaisseur (suivant $x' x$), leur positionnement étant indiqué sur la Fig. 2.

Les corrections sont en général différentes selon qu'elles sont placées du côté concave ou convexe de l'entrefer (intérieur ou extérieur de l'aimant); de plus la dissymétrie du champ de fuite due à la présence de l'alimentation des bobines à un bout de l'aimant a imposé des pièces d'extrémités différentes du côté de l'alimentation et de l'autre côté.

Corrections No. 1 : pour champs inférieurs à 1.5 Tesla.

- Shims intérieurs : 30 x 0.5
- " extérieurs : 35 x 0.5
- Pièces d'extrémités intérieures : 40 x 3
- " extérieures : 60 x 4 et 40 x 3

Corrections No. 2 : fonctionnement normal du faisceau k_{11}
(de 1.23 à 1.85 Tesla)

- Shims intérieurs : 36 x 0.5; aux extrémités, épaisseur augmentée de 0.5 mm sur une longueur de 88.5 mm et de 1 mm sur une longueur de 50 mm.
- Shims extérieurs : 45 x 0.5; aux extrémités, épaisseur augmentée de 0.5 mm sur une longueur de 100 mm et de 1 mm sur une longueur de 50 mm.
- Pièces d'extrémités :
 - Extrémité alimentation (pièces extérieures 60 x 6 et 40 x 4
pièces intérieures 40 x 4 et 25 x 2)
 - Autre extrémité (pièces extérieures 60 x 4 et 40 x 4
pièces intérieures 60 x 2, 40 x 4 et 25 x 4)

Corrections No. 3 : pour champs forts, de 1.8 à 2 Teslas.

- Shims intérieurs : 42 x 1
- " extérieurs : 60 x 1
- Pièces d'extrémités::
 - Extrémité alimentation (pièces extérieures 60 x 14 et 40 x 8
pièces intérieures 40 x 6 et 25 x 4)
 - Autre extrémité (pièces extérieures 60 x 8, 40 x 8 et 25 x 4
pièces intérieures 60 x 4 et 40 x 8)

Les Figs 7 et 9 représentent l'homogénéité du champ magnétique obtenue dans l'entrefer respectivement avec les corrections No. 1 ($B_0 = 1.23$ et 1.47 Tesla) et avec les corrections No. 3 pour un champ de 2 Teslas; l'homogénéité du champ de fuite aux extrémités étant du même ordre de grandeur que l'homogénéité dans l'entrefer, les courbes des Figs 7 et 9 représentent donc aussi l'homogénéité de l'intégrale du champ magnétique $\int B dx$.

La gamme étendue des champs magnétiques nécessaires au fonctionnement du faisceau k_{11} (de 1.23 à 1.85 Tesla) devait être couverte avec un seul type de corrections. Les corrections No. 2 ont permis d'obtenir une homogénéité suffisante du champ magnétique dans l'entrefer tout au long de l'aimant (voir Fig. 8); par contre, il s'est avéré difficile de trouver des pièces d'extrémités qui permettent d'obtenir une bonne homogénéité du champ de fuite à la fois pour les champs faibles et les champs élevés : la Fig. 11 représente le compromis obtenu avec les corrections No. 2 .

Cependant la longueur importante de l'aimant et le fait que le faisceau divergent qui le traverse est pratiquement ponctuel à une extrémité, rend négligeable l'inhomogénéité supplémentaire introduite par les effets de bout; l'homogénéité de la force de déflexion totale est donc encore représentée par la Fig. 8. La Fig. 10 montre l'homogénéité transversale dans une demi-section du tube à vide pour différents champs magnétiques. La plus grande erreur vue par le faisceau de largeur maximale 12 cm ne dépasse pas quelques pour mille.

Remerciements

L'étude, la construction et les mesures de cet aimant ont été grandement facilités par l'aide de C. Germain, A. Dind, B. Bossel, G. Favaro et J. Jenny. L'utilisation du programme MARE a été rendue possible grâce à la courtoisie de R. Perin. Nous leur adressons ici tous nos remerciements.

D.J. Simon
R. Michelier

Distribution :

Sections MU/SD et MU/SE
A. Colombo
A. Grant
P. Lazeyras
G. Petrucci
D. Plane

REFERENCES

- 1) D. LEROY et D.J. SIMON,
Projet d'un faisceau basse énergie dans la
Zone neutrino,
Note NPA 3.4.1967.
- 2) G. PLUYM and M.H. VAN DE VOORDE,
Radiation damage of epoxy resins used in
magnet coil insulation,
Proceedings Second International Conference
on Magnet Technology - Oxford 1967.
- 3) R. PERIN and S. VAN DER MEER,
The programme MARE for the computation of two-
dimensional static magnetic fields,
CERN 67-7.
- 4) MSC New Projects Group Programmes,
Programme NR 12, Intégration of Table.

CARACTERISTIQUES DE "HARICOT"

Encombrement total (cm) :	Longueur	201
	Largeur	137
	Hauteur	132
Longueur développée du circuit magnétique (cm)		165
Ouverture utile (cm) :	Entrefer	5.3
	Largeur	21.3
Rayon de courbure au centre de l'entrefer (cm)		216.45
Poids de l'aimant seul (kg)		11.500
Poids du support (kg)		1.500
Nombre de spires		128
Résistance à 20°C (ohm)		0.15
Intensité maximale (Ampères)		900
Force de déflexion maximale (Tesla x m.)		3.4
Débit d'eau à l'intensité maximale ($\Delta p = 10 \text{ kg/cm}^2$, élévation de température $\Delta t = 30^\circ \text{ C}$) (l/mm)		60

LISTE DES FIGURES

Fig. 1 : "Haricot" installé sur le faisceau k_{11} .

Fig. 2 : Ensemble de l'aimant.

Fig. 3 : Champ magnétique au centre en fonction de l'intensité.

Fig. 4 : Longueur équivalente et intégrale du champ en fonction de l'intensité.

Fig. 5 : Champ de fuite aux extrémités, mesuré sur l'arc $x' 0 x$.

Fig. 6 : Mesure de l'homogénéité du champ dans l'entrefer.

Fig. 9 : ($\Delta B/B_0$ exprimé en pour cent, mesuré suivant $y' y$ pour $x = z = 0$).

Fig. 6 : sans correction ($B_0 = 0.6$ et 2 Teslas)

Fig. 7 : avec corrections No. 1 ($B_0 = 1.23$ et 1.47 Tesla)

Fig. 8 : avec corrections No. 2 ($B_0 = 1.23$ et 1.85 Tesla)

Fig. 9 : avec corrections No. 3 ($B_0 = 2$ Teslas)

Fig. 10 : Mesures de l'homogénéité de champ magnétique dans le tube à vide avec corrections No. 2 ($B_0 = 1.23, 1.47$ et 1.85 Tesla).

Fig. 11 : Homogénéité de l'intégrale du champ de fuite aux extrémités avec et sans corrections No. 2 ($B_0 = 1.23$ et 1.85 Tesla).

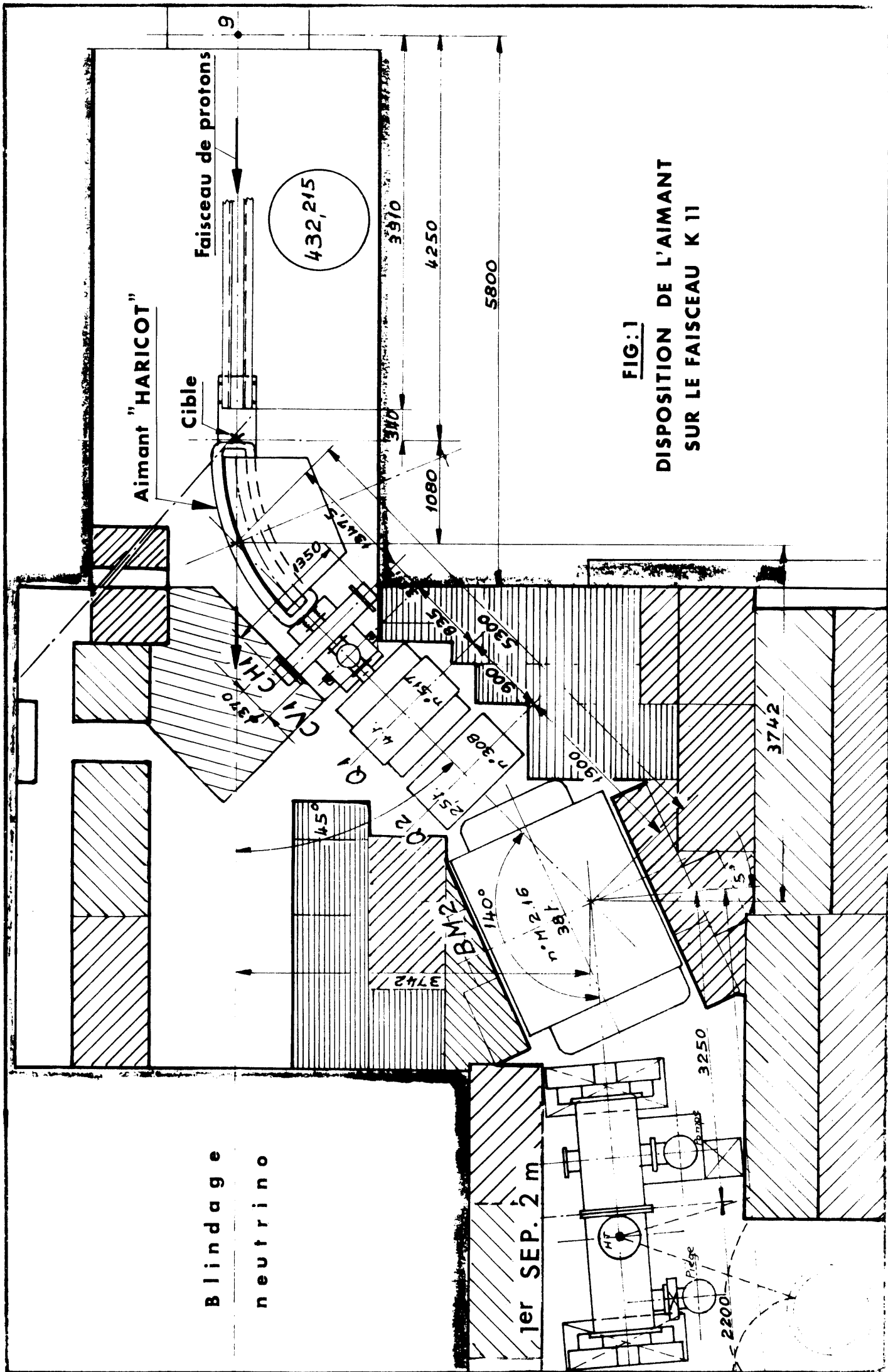
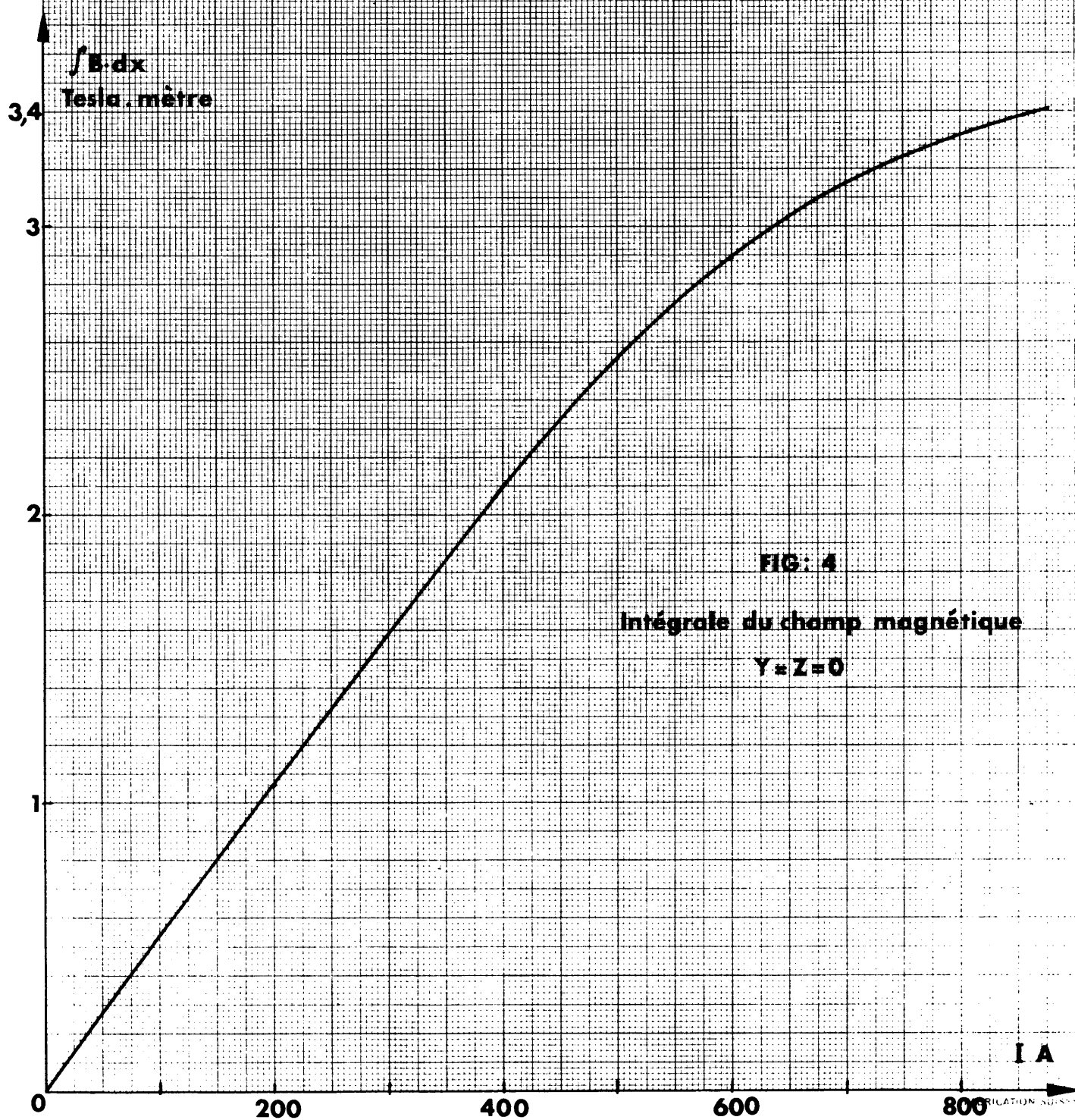
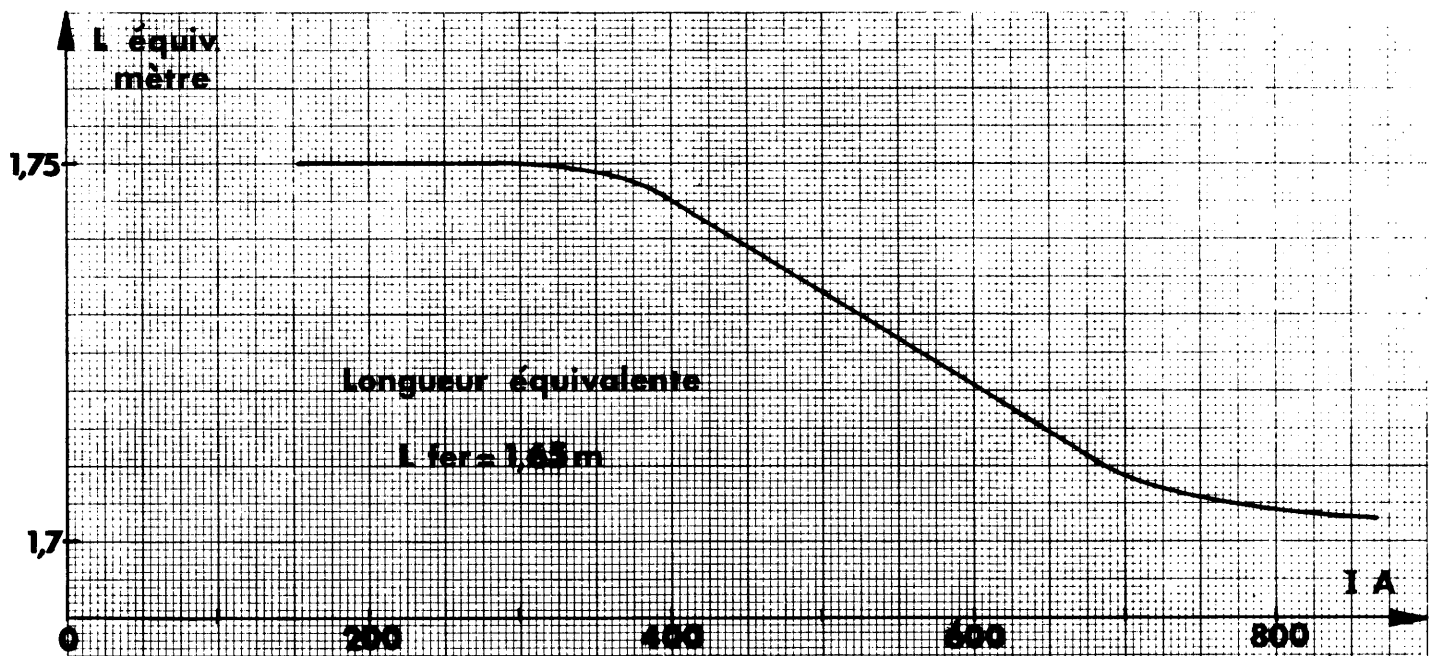
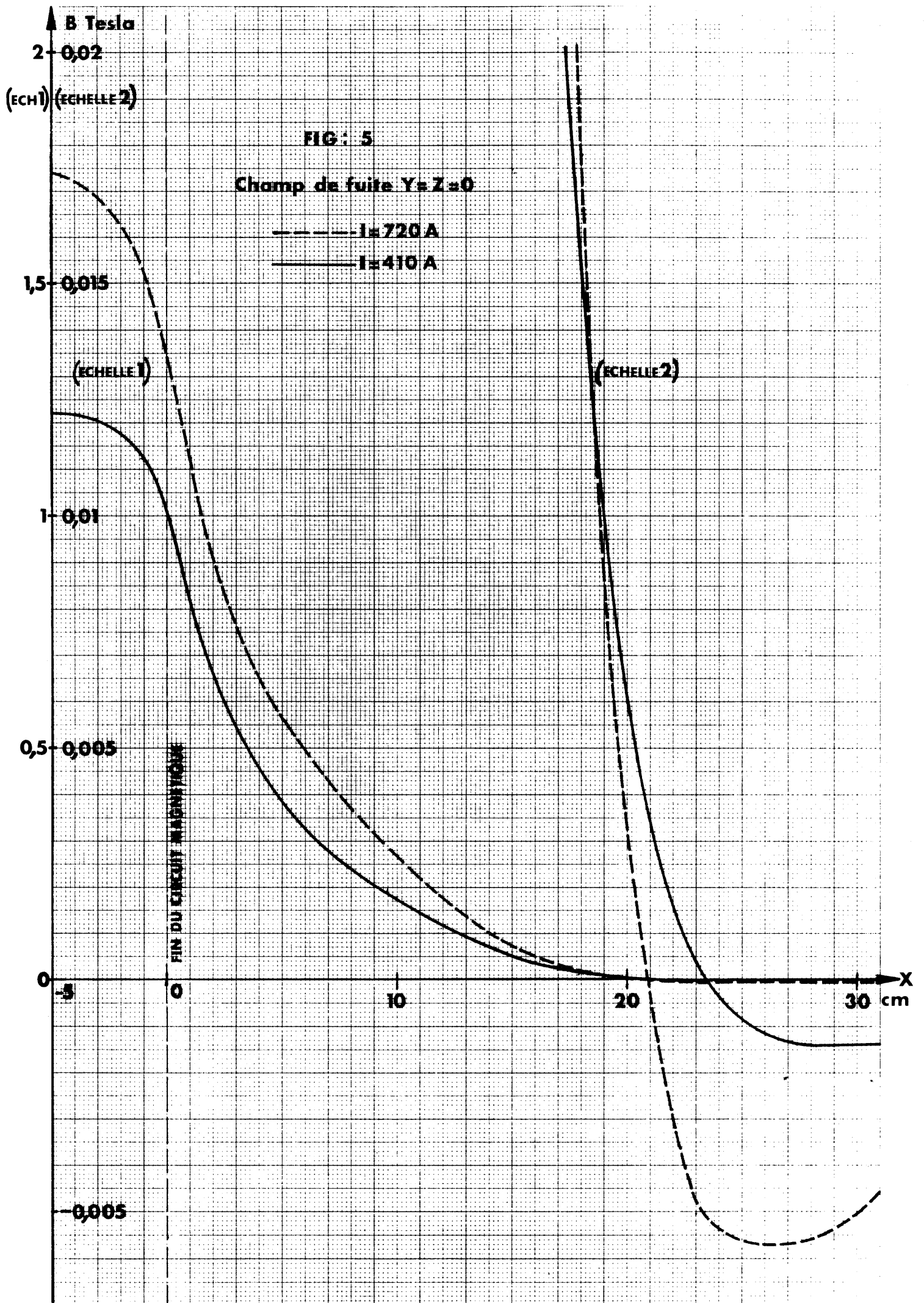


FIG: 1
DISPOSITION DE L'AIMANT
SUR LE FAISCEAU K 11





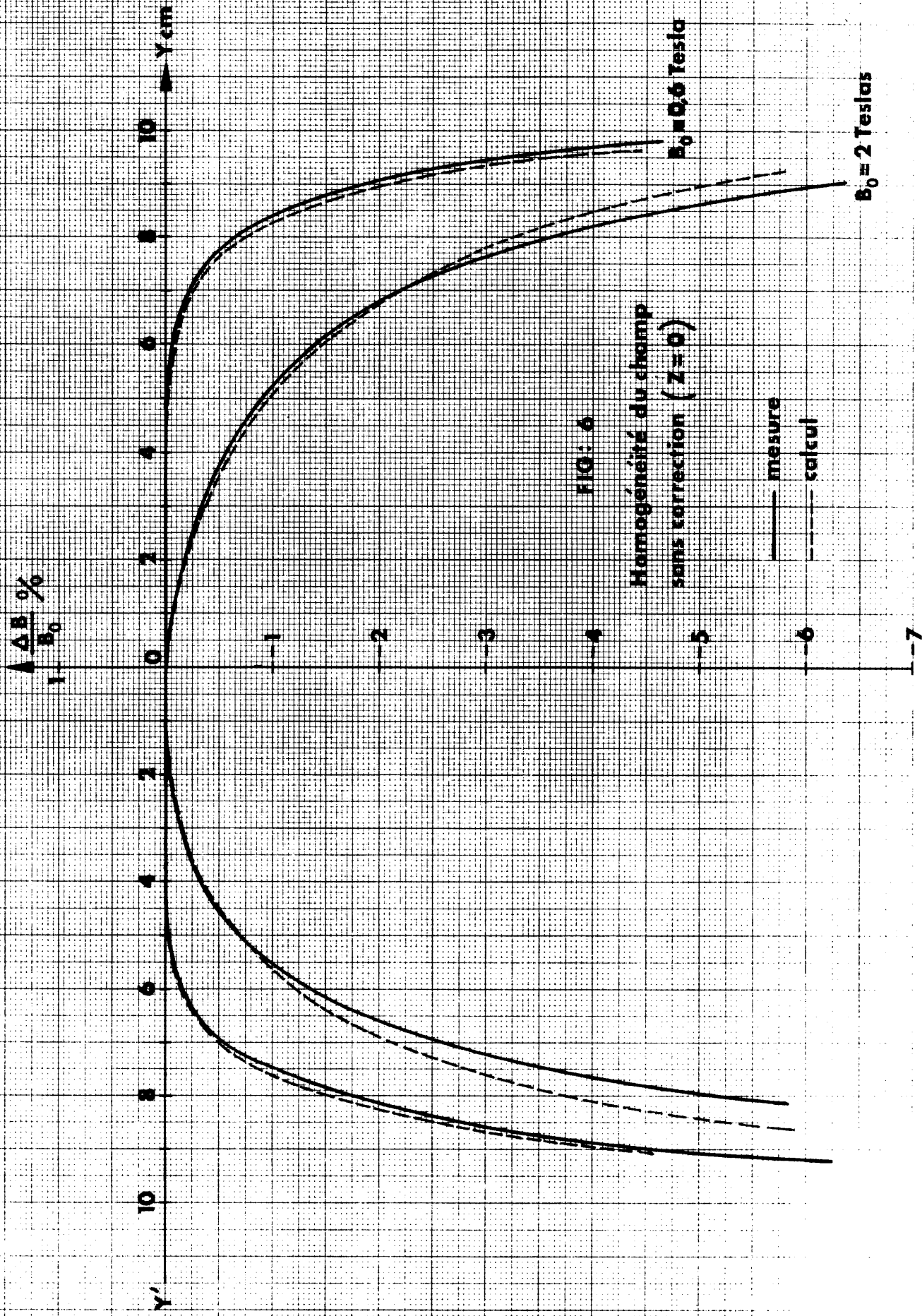


FIG: 6

Homogénéité du champ
sans correction ($Z=0$)

— mesure
--- calcul

$B_0 = 0.6$ Tesla

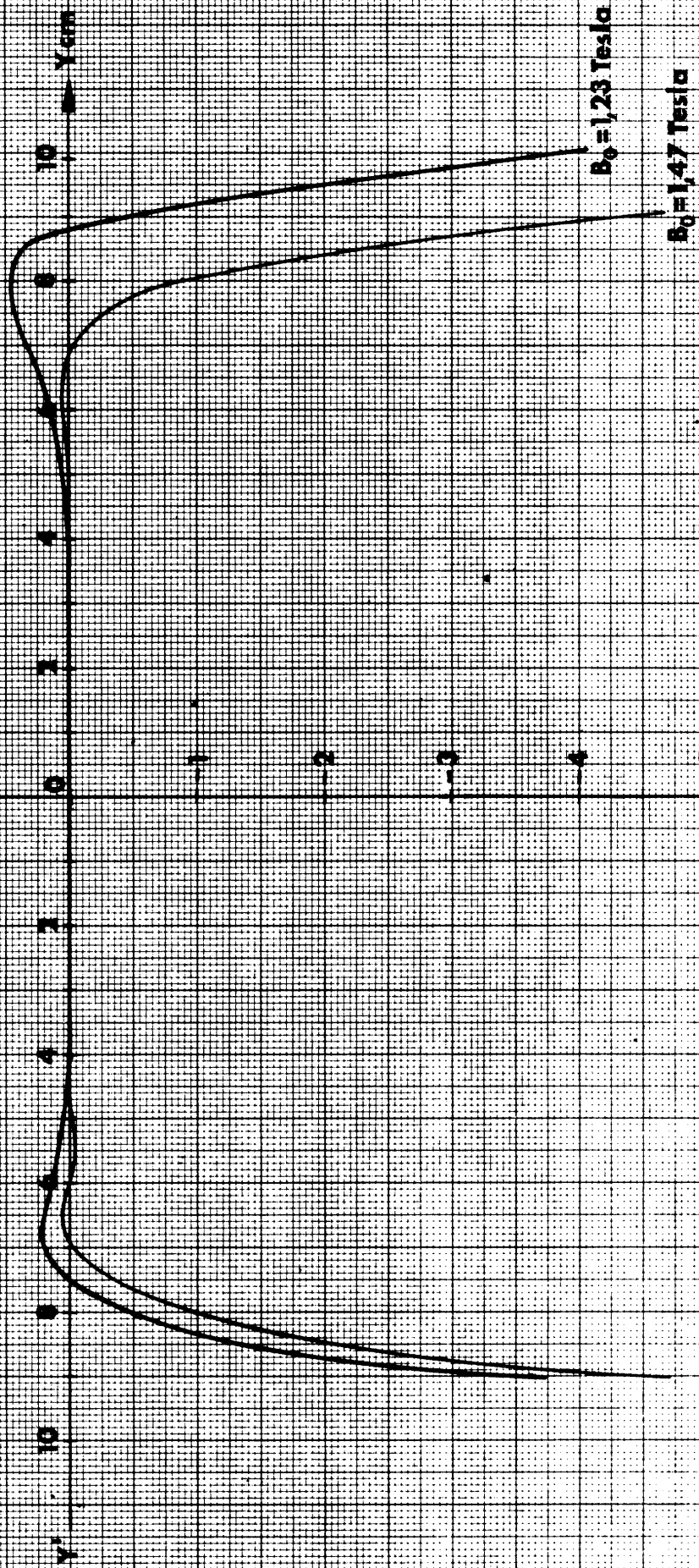
$B_0 = 2$ Tesla

HC:7

Homogénéité du champ
avec corrections N_1
($Z=0$)

$\frac{\Delta B}{B_0} \%$

Y cm



$B_0 = 1.23$ Tesla

$B_0 = 1.47$ Tesla

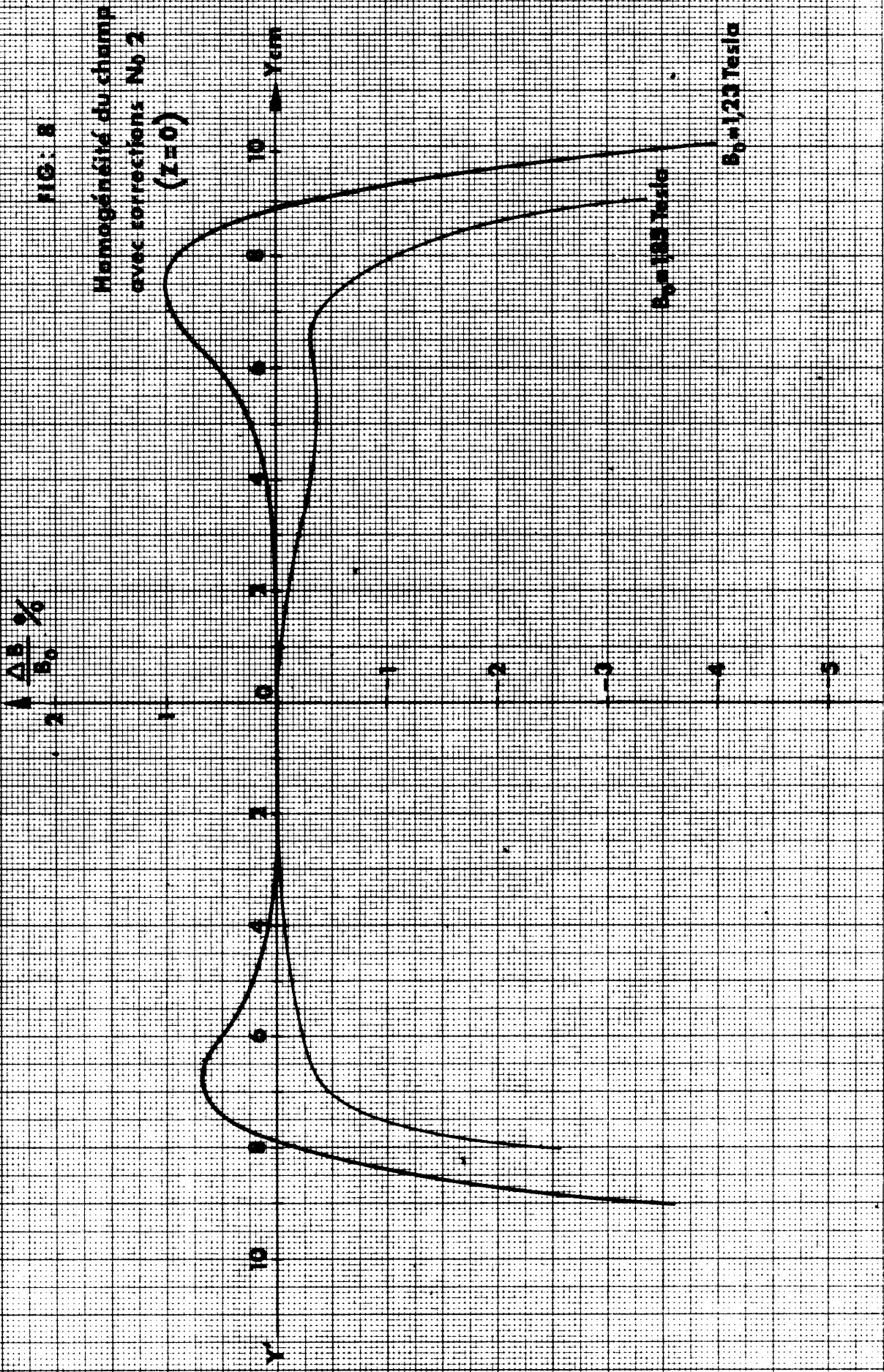


FIG. 19

Homogénéité du champ
avec corrections N₀ 3
(Z=0)

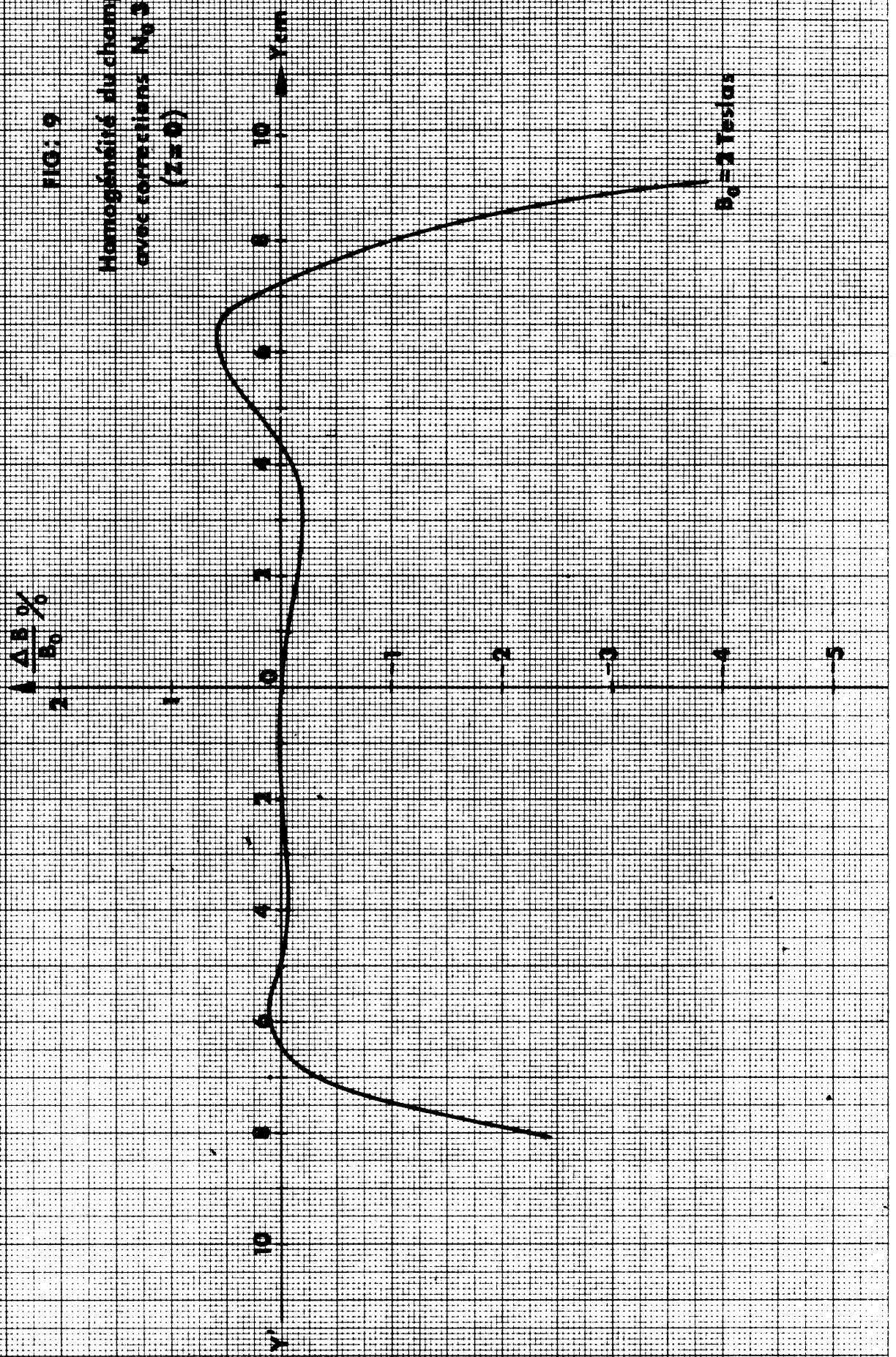
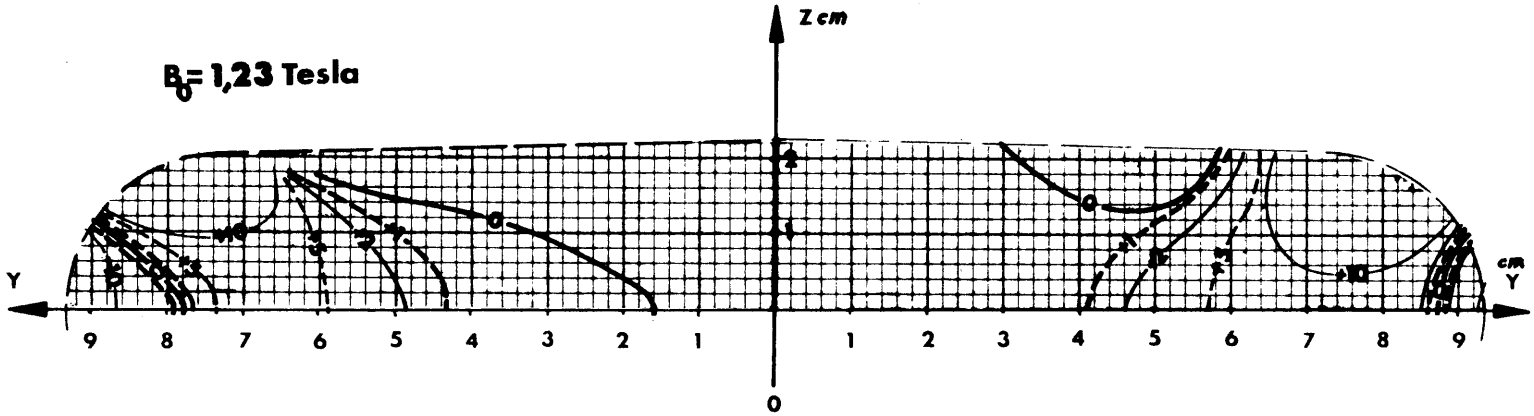


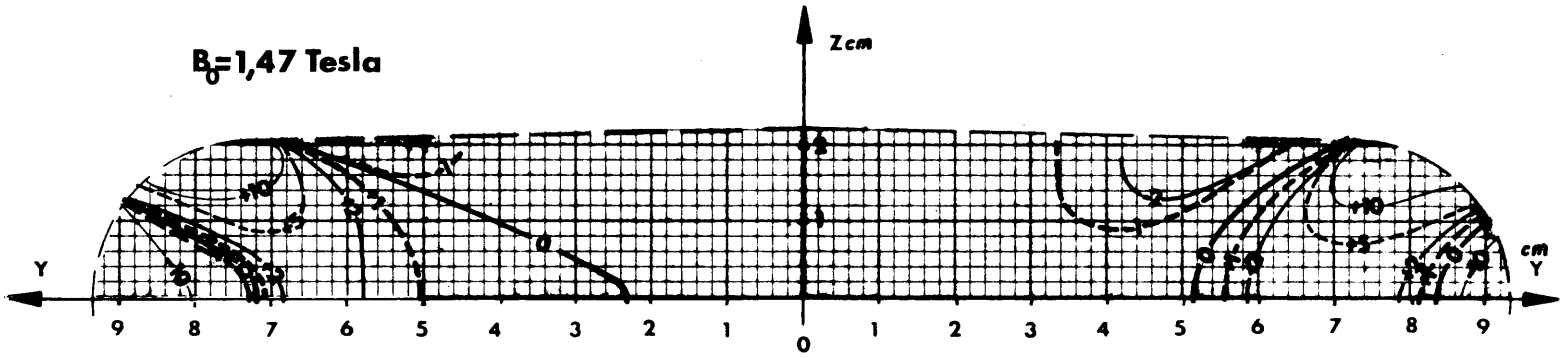
FIG: 10

Correction N_0 2. Coubes d'égalé erreur $\frac{\Delta B}{B_0}$ en pour mille

$B_0 = 1,23$ Tesla



$B_0 = 1,47$ Tesla



$B_0 = 1,85$ Tesla

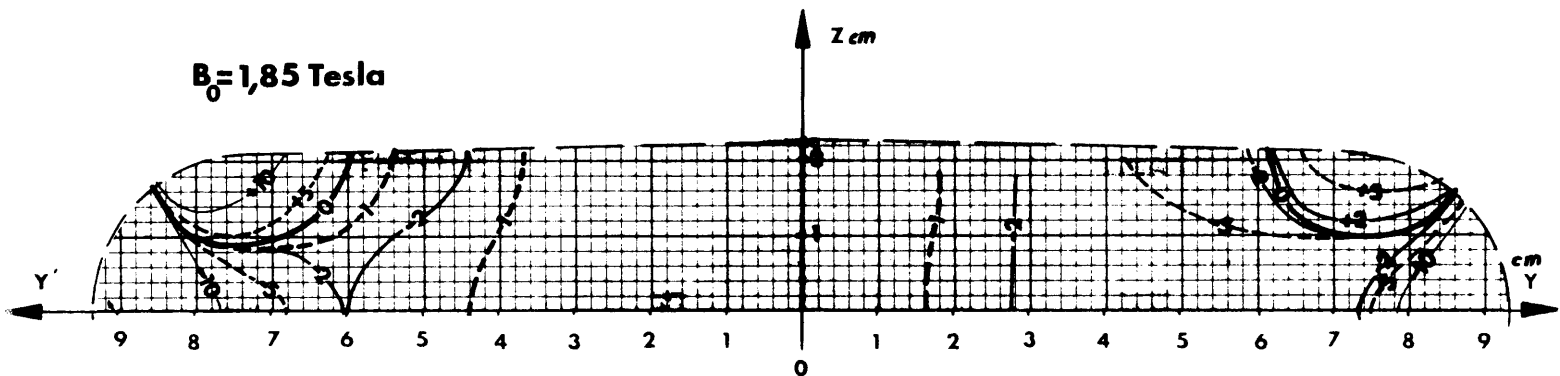
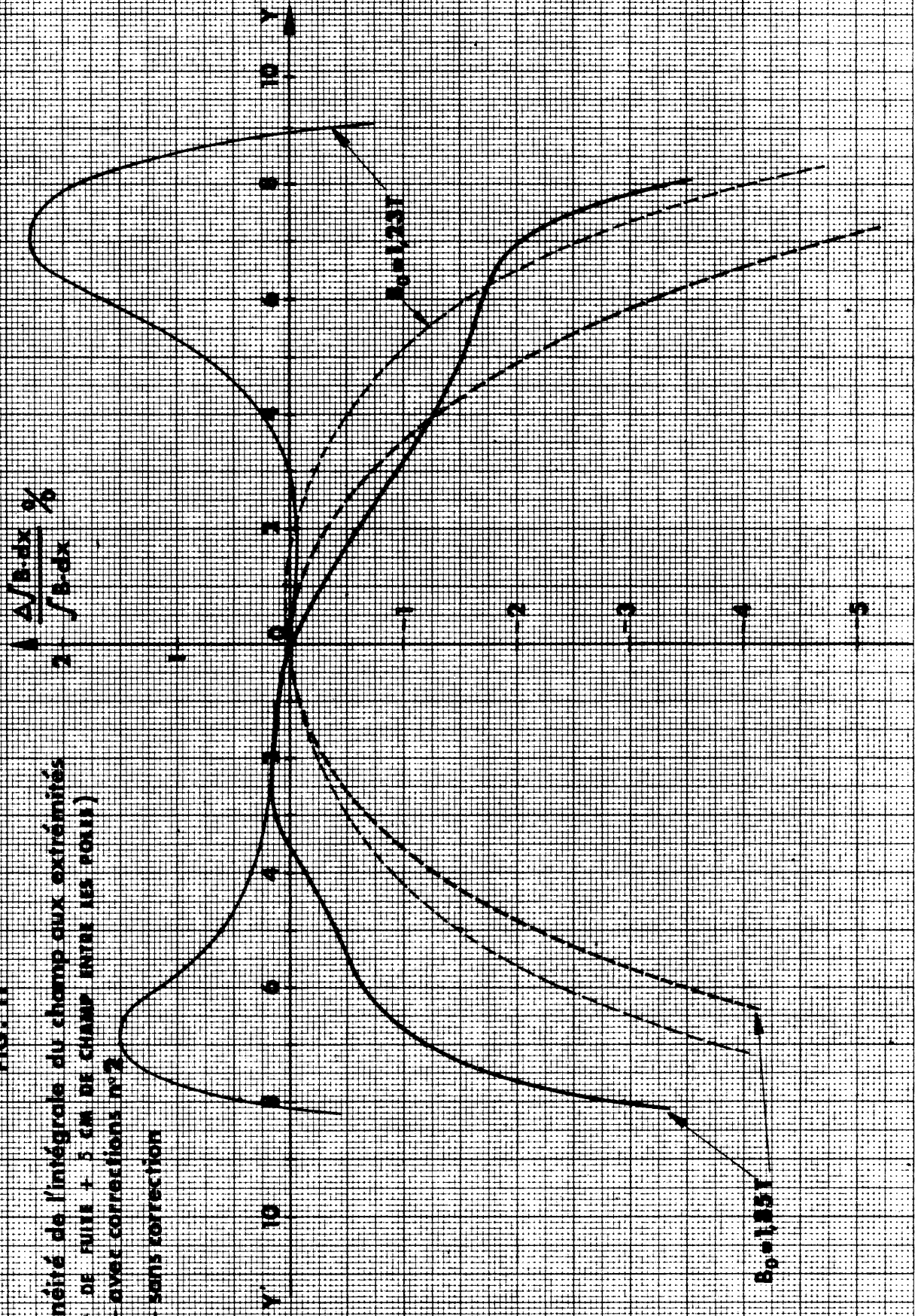


FIG: II

Homogénéité de l'intégrale du champ aux extrémités
 (CHAMP DE FLUIE + 5 CM DE CHAMP ENTRE LES POLES)

— avec corrections n°2

--- sans correction



RESUME DE RAPPORT

L'AIMANT D'EXTRACTION "HARICOT"

D.J. Simon
R. Michelier

(Ref.: CERN/MPS/MU-SD 69-2, 21.7.69)

Cet aimant est un secteur de type C à faible rayon de courbure qui permet de défléchir de 45° un faisceau de particules de quantité de mouvement inférieure à 1.3 GeV/c.

L'aimant a été calculé en utilisant les programmes MARE. On donne les résultats expérimentaux comparés aux valeurs calculées pour les champs faibles et élevés (2 Teslas).

Des corrections permettant d'obtenir une bonne homogénéité de la force de déflexion dans l'entrefer ont été étudiées; on trouvera la liste des corrections nécessaires dans les différents cas d'utilisation de l'aimant ainsi que les homogénéités correspondantes.

Ce rapport est à la disposition des personnes intéressées.
A cet effet, veuillez remplir la note ci-dessous.

Distribution : Personnel Scientifique MPS, SI

A : Mlle L. Deberti - Division MPS
De : Division

Veuillez s.v.p. m'envoyer ... copie(s) du rapport
CERN/MPS/MU-SD 69-2 du 21.7.69, par D.J. Simon et
R. Michelier.