

**EUR 4284 f**

**COMMUNAUTE EUROPEENNE DE L'ENERGIE ATOMIQUE - EURATOM**

**LIBRARY**

**CONTROLE NON DESTRUCTIF PAR COURANTS DE FOUCAULT**

**Contribution à l'étude de l'influence de la forme des sondes bobinées sur la distribution spatiale de l'induction magnétique**

par

**A. PHILIPPE**

**1969**



**Programme ORGEL**

**Centre Commun de Recherche Nucléaire  
Etablissement d'Ispra - Italie**

**Département des Matériaux  
Métallurgie et Céramique**

## AVERTISSEMENT

Le présent document a été élaboré sous les auspices de la Commission des Communautés Européennes.

Il est précisé que la Commission Communautés Européennes, ses contractants, ou toute personne agissant en leur nom :

ne garantissent pas l'exactitude ou le caractère complet des informations contenues dans ce document, ni que l'utilisation d'une information, d'un équipement, d'une méthode ou d'un procédé quelconque décrits dans le présent document ne porte pas atteinte à des droits privatifs;

n'assument aucune responsabilité pour les dommages qui pourraient résulter de l'utilisation d'informations, d'équipements, de méthodes ou procédés décrits dans le présent document.

Ce rapport est vendu dans les bureaux de vente indiqués en 4e page de couverture

au prix de FF 8,50	FB 85,-	DM 6,80	Lit. 1060	Fl. 6.20
--------------------	---------	---------	-----------	----------

**Prière de mentionner, lors de toute commande, le numéro EUR et le titre qui figurent sur la couverture de chaque rapport.**

Imprimé par SMEETS  
Bruxelles, juillet 1969

Le présent document a été reproduit à partir de la meilleure copie disponible.

**EUR 4284 f**

**COMMUNAUTE EUROPEENNE DE L'ENERGIE ATOMIQUE - EURATOM**

**CONTROLE NON DESTRUCTIF PAR COURANTS DE FOUCAULT**

**Contribution à l'étude de l'influence de la forme des sondes bobinées sur la distribution spatiale de l'induction magnétique**

par

**A. PHILIPPE**

**1969**



**Programme ORGEL**

**Centre Commun de Recherche Nucléaire  
Etablissement d'Ispra - Italie**

**Département des Matériaux  
Métallurgie et Céramique**

## RESUME

On a étudié expérimentalement la relation liant la forme d'une sonde cylindrique - qui constitue l'élément fondamental de contrôle des matériaux au moyen des courants induits - et la distribution du champ magnétique de celle-ci.

Des bobines du type cylindre, sphéroïde tronqué, hyperboloïde tronqué et cône, ont été considérées et comparées à une référence du type cylindre droit, relativement à la distribution de champ en question.

## MOTS-CLES

MATERIALS TESTING  
EDDY CURRENTS  
MAGNETIC FIELDS

PROBES  
COILS  
CONFIGURATION

TABLE DES MATIERES

		Pages
1.	INTRODUCTION .....	5
2.	BUT .....	6
3.	METHODE .....	6
4.	ENSEMBLE DE MESURE .....	7
5.	MESURE DES COMPOSANTES $B_r$ et $B_z$ DE L'INDUCTION MAGNETIQUE $\vec{B}$ .....	7
5.1.	Moyens .....	7
5.2.	Boucle de mesure : calcul de $B_r$ et $B_z$ .....	12
	- Les modules .....	14
	- Les phases .....	14
5.3.	Sonde de mesure : calcul de $B_r$ et $B_z$ .....	15
5.4.	Comparaison des deux systèmes .....	16
6.	PRINCIPE DE SIMILITUDE .....	17
6.1.	Bobine-source unique présentant un enroulement uniformément réparti sur toute sa longueur .....	18
6.1.1.	Mod. I & II en l'absence de plaque métallique .....	21
6.1.2.	Mod. I & II en présence de plaque métallique .....	22
6.2.	Bobine-source fractionnée .....	22
6.3.	Bobine-source avec noyau .....	23
6.3.1.	Mod. I & II, noyaux présents, plaques métalliques écartées .....	24
6.3.2.	Mod. I & II, noyaux et plaques métalliques présentes .....	24
7.	INFLUENCE DE LA FORME GEOMETRIQUE DES BOBINES SUR LA DISTRIBUTION DE $B_r$ et $B_z$ .....	24
7.1.	Profils choisis .....	24
7.2.	Etude des graphiques .....	25

	Pages
7.2.1.	Cylindres droits de longueur identique ..... 25
7.2.2.	Hyperboloïdes tronqués ..... 25
7.2.3.	Ellipsoïdes tronqués ..... 25
7.2.4.	Cônes droits ..... 25
7.2.5.	Cylindres et cônes courts ..... 26
7.2.6.	Cylindres de longueur différente ..... 27
8.	CONCLUSIONS ..... 27
	BIBLIOGRAPHIE ..... 30
	GRAPHIQUES ..... 31

## 1. INTRODUCTION (\*)

On sait qu'en matière de contrôles non destructifs par courant de Foucault, le probe joue un rôle très important.

Après avoir recherché théoriquement les conditions de sensibilité maximale à une variation d'épaisseur et de conductivité [3] [4] d'une plaque métallique, il convenait de s'intéresser quelque peu au probe lui-même dans son rôle de source de champ magnétique.

Différentes voies d'investigation s'offraient à nous, à propos d'étude de focalisation de lignes de force à partir de solénoïdes. Nous nous sommes arrêtés à l'une d'entre-elles tout en cherchant à éviter le concours de computers étant donné que les délais d'intervention de ceux-ci sont nécessairement très longs.

Nos moyens ont donc été purement expérimentaux.

L'étude, quoique très fastidieuse vu que des dizaines de milliers de mesures étaient nécessaires pour que des conclusions valables puissent être tirées, a été menée assez rapidement à bonne fin car il était facile de modifier à tout instant la ligne de conduite en tenant compte des résultats déjà obtenus.

Afin de rendre les conclusions applicables aux probes de très petites dimensions, on s'est intéressé assez longuement au Principe de Similitude.

---

(\*) Manuscrit reçu le 1<sup>o</sup> avril 1969.

## 2. BUT

Comme l'indique le titre, on étudie la relation qui existe entre la forme géométrique du probe et la distribution des lignes de force magnétique dans le cas de bobines cylindriques.

Un tel sujet aurait pu être traité sur le plan théorique à partir de l'expression calculée du potentiel-vecteur [3].

Nous y avons renoncé pour les motifs donnés dans l'introduction.

Nous ferons toutefois appel à ces données théoriques afin d'en dégager le Principe de Similitude.

## 3. METHODE

Les bobines considérées se présentent soit sans noyau, soit avec noyau métallique ferro-magnétique ou non.

On compare les mesures de  $B_z$  et  $B_r$  effectuées sur les bobines de forme particulière à celles relevées sur la référence de type cylindrique, en faisant coïncider au préalable les valeurs maximales.

Les conclusions tirées des résultats obtenus avec les modèles utilisés, de dimensions confortables, sont applicables directement au cas des bobines de très petit volume constituant des probes, à condition de respecter le Principe de Similitude.

Ce Principe sera vérifié à partir de mesures particulières faites sur un ensemble dont les dimensions ont été réduites par rapport à celui servant de base à la présente étude.

#### 4. ENSEMBLE DE MESURE

Les plans faisant l'objet des pages suivantes, représentent le dispositif utilisé pour la mesure de  $B_r$  et  $B_z$  ; on trouvera ensuite le schéma électrique de l'ensemble.

Le courant d'excitation est alternatif sinusoïdal (0,7 Amp. Eff.) de fréquence 264 Hz. Cette valeur qui semble très particulière, aurait pu être différente - soit de 1000 Hz - sans rien changer à la validité des résultats.

Les bobines élémentaires représentées sur les plans peuvent se grouper en cylindres.

Elles présentent toutes le même nombre de spires de fil 0,4 mm. émaillé et la même hauteur axiale de manière à ce que la hauteur totale d'un groupe puisse être maintenue constante lorsqu'on modifie le diamètre.

Ces groupes ainsi que les bobines uniques du type n° 1 et n° 2 comportent, éventuellement, un noyau métallique ferromagnétique ou non.

Chaque enroulement porte un signe d'identification. Des plaques métalliques (Pb ou Sn) sont disposées, dans certains cas, entre l'élément à l'étude et la sonde de mesure. Il s'agit de disques de diamètre assez important (12 cm) afin d'éliminer les erreurs dues aux effets de bord.

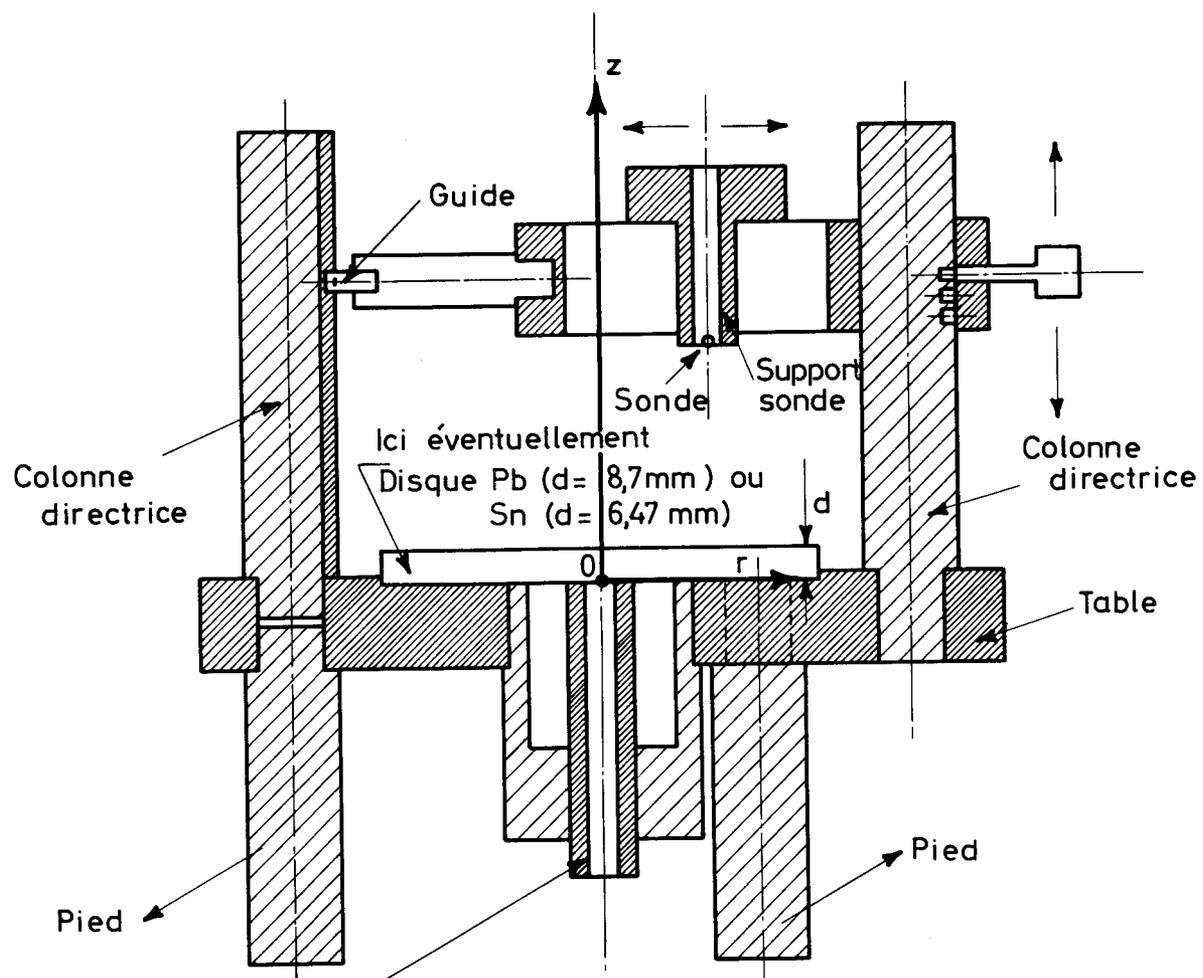
#### 5. MESURE DES COMPOSANTES $B_r$ et $B_z$ DE L'INDUCTION MAGNETIQUE $\vec{B}$

##### 5.1. Moyens

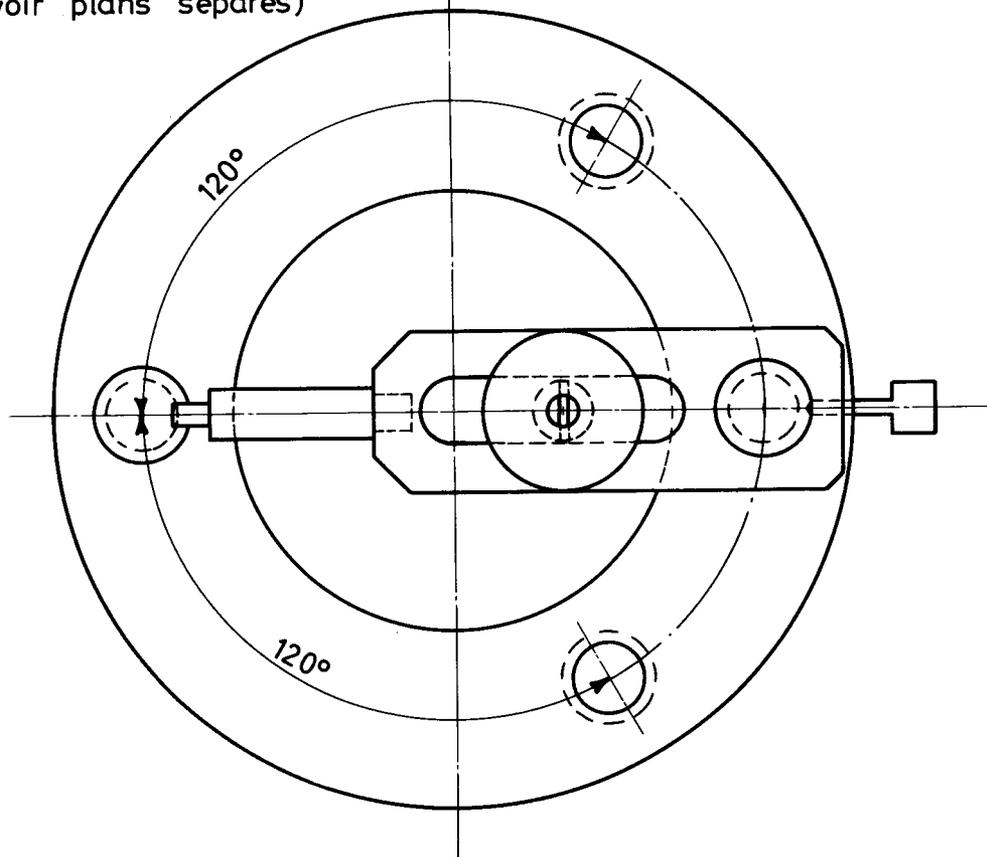
Deux moyens s'offraient à nous pour effectuer ces mesures :

- par boucle coaxiale ;
- par probes ou sondes ponctuelles ;

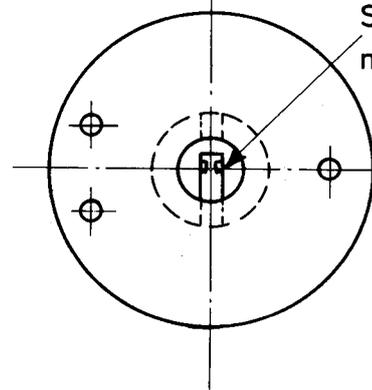
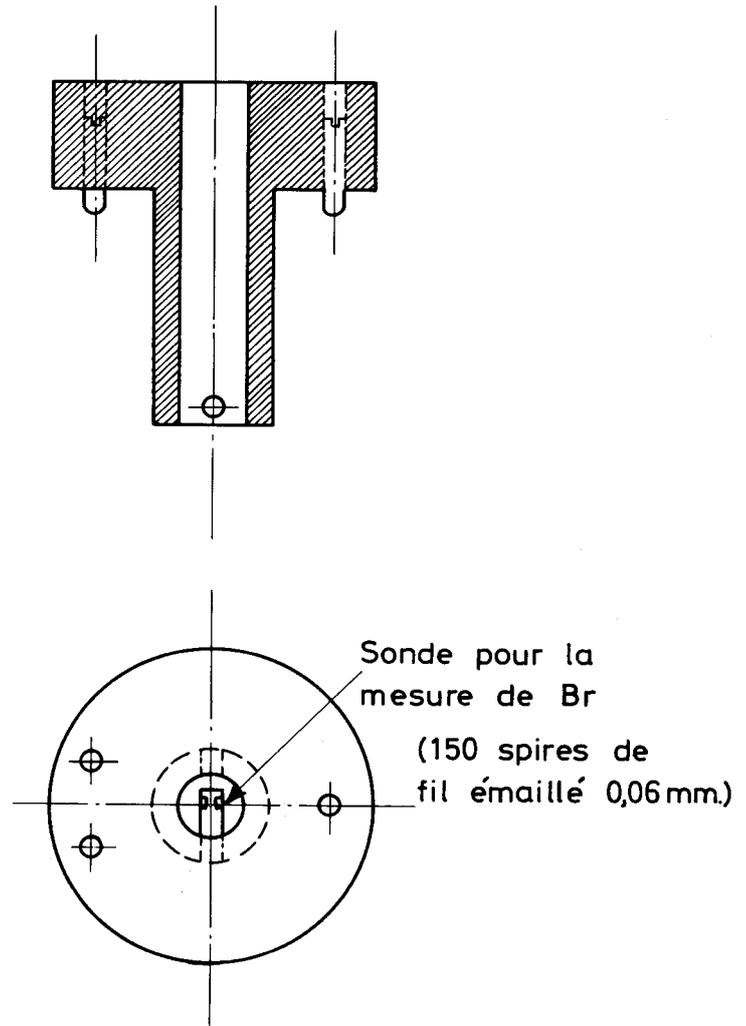
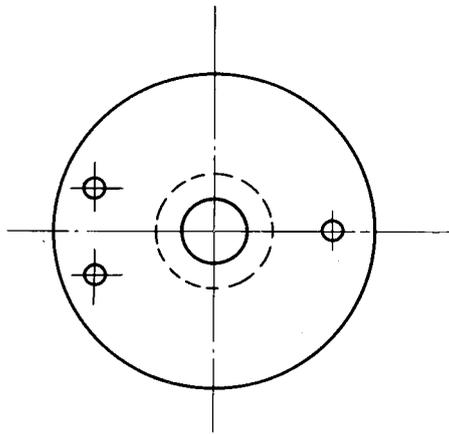
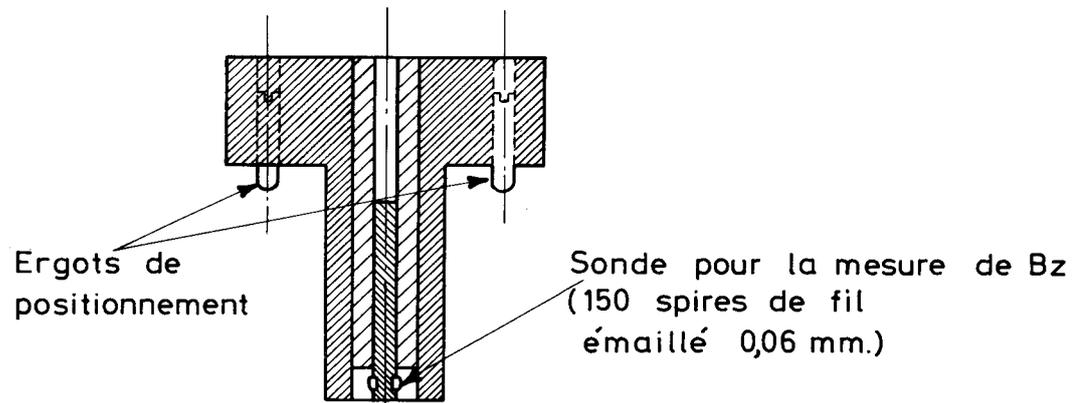
# PL.1 DISPOSITIF DE MESURE



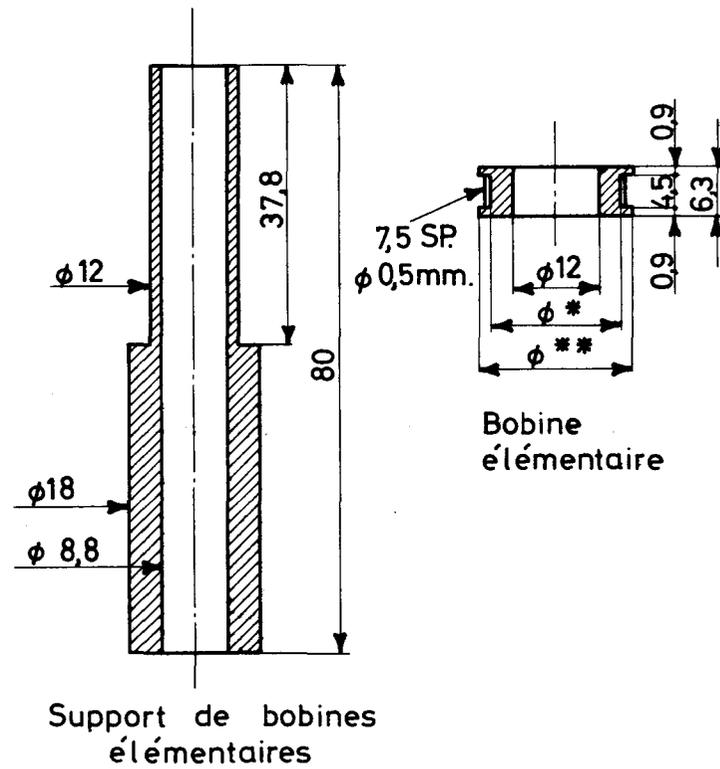
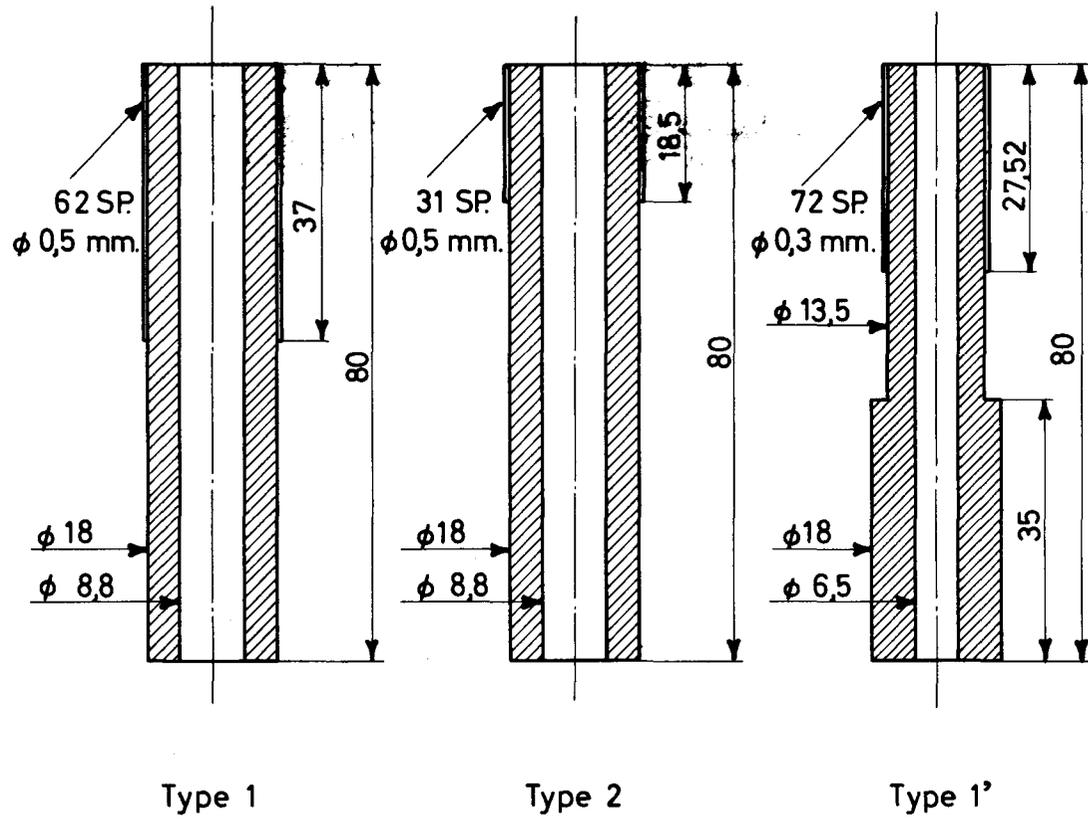
Support bobine - source  
(voir plans séparés)



# PL.2 SONDES ET SUPPORTS

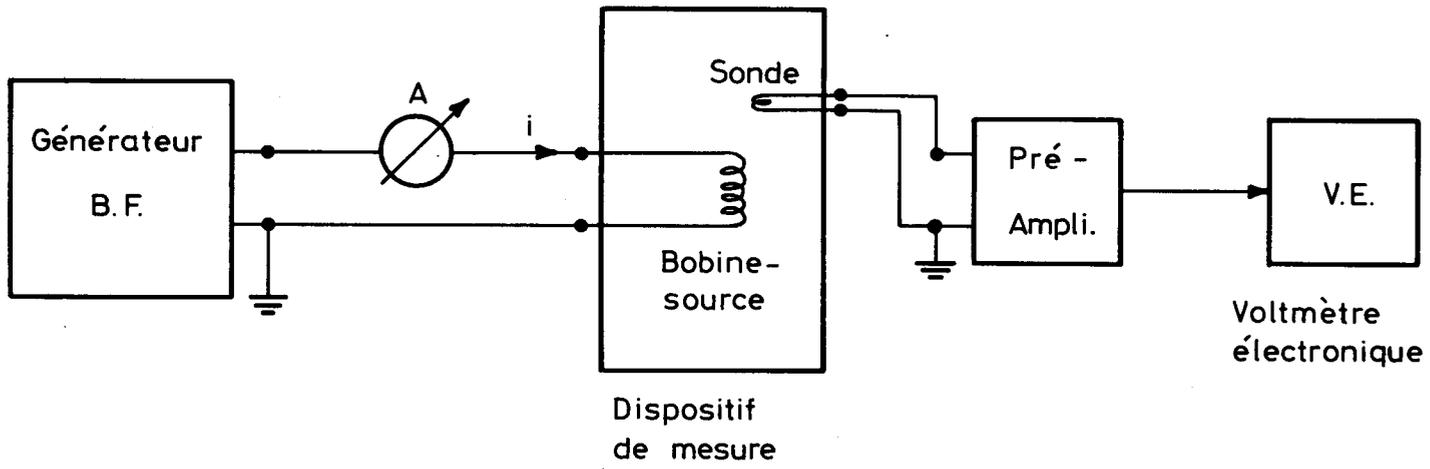


PL. 3 BOBINES - SOURCES



φ* (mm)	φ** (mm)	SIGLES
18	21	a
20	23	b
22	25	c
24	27	d
26	29	e
28	31	f
30	33	g
32	35	h
34	37	i
36	39	j

PL. 4 SCHEMA ELECTRIQUE



Les deux méthodes ont été appliquées à une même bobine dans un cas bien précis afin de nous permettre de nous rendre compte des avantages et inconvénients de chacune d'elles. (Graphique Iar).

Les sondes ponctuelles ont l'avantage de mesurer, en principe, à un facteur de proportionnalité près, la composante du champ magnétique dont la direction se confond avec leur axe. Leur volume interdit, toutefois, de prétendre à une précision convenable dans tous les cas et en tous points de l'espace considéré.

Pour déterminer  $B_r$  et  $B_z$  à l'aide d'une boucle coaxiale, il faut connaître le module et la phase (référence : courant de la bobine à l'étude) de la tension présente aux bornes de la boucle.

La précision peut être assez bonne sur le module et la phase quoique la mesure de cette dernière soit assez délicate.

Les dérivations qui doivent être faites à partir des mesures sont longues, fastidieuses et suffisamment imprécises (Méthode des polynômes de Lagrange), pour que les valeurs calculées de  $B_r$  et  $B_z$  soient inexactes dans certaines zones des courbes  $B_r$  et  $B_z$  en fonction des coordonnées  $\rho$  et  $z$ .

Les erreurs sont d'autant plus marquées que le diamètre de la boucle de mesure est plus petit.

## 5.2. Boucle de mesure : calcul de $B_r$ et $B_z$

Il y a lieu de déterminer la relation qui lie les modules de  $B_r$  et  $B_z$  au module et à la phase de la tension de la boucle

de mesure. Cette tension a pour expression en notation complexe :

$$\mathcal{V} = -2\pi\rho\omega j \mathcal{A}_\theta(\rho, z) \quad (1)$$

où  $\rho$  = rayon de la spire

$z$  = cote de la spire

$\omega$  = pulsation du courant d'excitation de la source

$j = \sqrt{-1}$

$\mathcal{A}_\theta$  = potentiel-vecteur produit par la source le long de la spire.

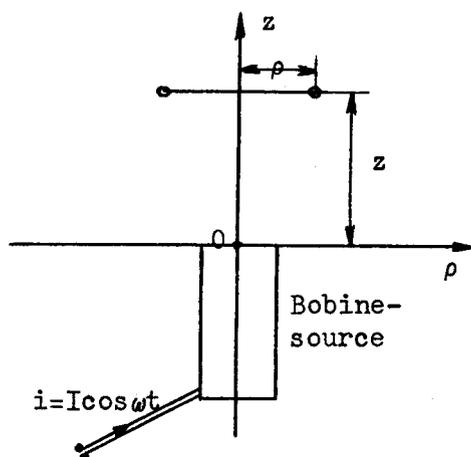


Fig.1

Source et boucle de mesure.

Si on représente par  $V_{im}$  et  $V_{re}$  respectivement les parties imaginaires et réelles de  $\mathcal{V}$ , on a :

$$\mathcal{V} = V_{re} + j V_{im}$$

Dès lors, les expressions des composantes de l'induction magnétique sont les suivantes :

$$\mathcal{B}_r = -\frac{\partial \mathcal{A}_\theta}{\partial z} = +\frac{1}{2\pi\rho\omega j} \frac{\partial \mathcal{V}(\rho, z)}{\partial z} = -\frac{j}{2\pi\rho\omega} \frac{\partial \mathcal{V}(\rho, z)}{\partial z}$$

$$\mathcal{B}_z = -\left(\frac{1}{\rho} + \frac{\partial}{\partial \rho}\right) \frac{\mathcal{V}(\rho, z)}{2\pi\rho\omega j} = +j \left(\frac{1}{\rho} + \frac{\partial}{\partial \rho}\right) \frac{\mathcal{V}(\rho, z)}{2\pi\rho\omega}$$

- Les modules

$$\begin{aligned}
 \text{a) } \quad B_r &= \text{Re} [ \mathcal{B}_r e^{j\omega t} ] \\
 B_r &= \frac{1}{2\pi\rho\omega} \sqrt{\left(\frac{\partial V_{re}}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{im}}{\partial z}\right)^2} \cos(\omega t - \text{arctg} \frac{\partial V_{re}/\partial z}{\partial V_{im}/\partial z}) \quad (2)
 \end{aligned}$$

Le module vaut :

$$|B_r| = \frac{1}{2\pi\rho\omega} \sqrt{\left(\frac{\partial V_{re}}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{im}}{\partial z}\right)^2} \quad (3)$$

Vu que le module de  $\mathcal{Y}$

$$|\mathcal{Y}| = \sqrt{V_{re}^2 + V_{im}^2} \quad \text{et que } V_{re} = |\mathcal{Y}| \cos\phi,$$

$V_{im} = |\mathcal{Y}| \sin\phi$ , avec  $\phi$  = phase de  $\mathcal{Y}$  par rapport au courant d'excitation de la source, l'expression (3) devient :

$$|B_r| = \frac{1}{2\pi\rho\omega} \sqrt{\left(\frac{\partial |\mathcal{Y}|}{\partial z}\right)^2 + |\mathcal{Y}|^2 \left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)^2} \quad (4)$$

$$\text{b) } B_z = \text{Re} [ B_z e^{j\omega t} ]$$

$$\begin{aligned}
 B_z &= \frac{1}{2\pi\rho\omega} \sqrt{\left(\frac{\partial V_{re}}{\partial \rho}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{im}}{\partial \rho}\right)^2} \cos(\omega t - \text{arctg} \frac{\partial V_{re}/\partial \rho}{\partial V_{im}/\partial \rho}) \\
 & \quad (5)
 \end{aligned}$$

Par suite, le module vaut :

$$|B_z| = \frac{1}{2\pi\rho\omega} \sqrt{\left(\frac{\partial |\mathcal{Y}|}{\partial \rho}\right)^2 + |\mathcal{Y}|^2 \left(\frac{\partial \phi}{\partial \rho}\right)^2} \quad (6)$$

- Les phases

La référence est le courant d'excitation de la source.

a) La phase de  $B_r$  :

$$\Phi_r = - \text{arctg} \frac{\partial V_{re}/\partial z}{\partial V_{im}/\partial z} \quad (7)$$

b) La phase de  $B_z$  :

$$\Phi_z = - \operatorname{arctg} \frac{\partial V_{re}/\partial \rho}{\partial V_{im}/\partial \rho} \quad (8)$$

Remarquons que dans le cas où aucun conducteur métallique ne sépare la source de la boucle,  $\partial \phi/\partial z = \partial \phi/\partial \rho = 0$

Dès lors,

$$/B_r/ = \frac{1}{2\pi\rho\omega} \partial \gamma / \partial z \quad (9)$$

$$/B_z/ = \frac{1}{2\pi\rho\omega} \partial \gamma / \partial \rho \quad (10)$$

Pour la fréquence de 264 Hz, et en tenant compte de ce que la boucle de mesure comportait 5 spires, on a au point  $(\rho, z)$ , suivant (9) et (10) :

$$/B_r/ = 2,68655 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial \gamma / \text{mesuré} / \partial z}{\text{mVeff} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}} \right] \quad (11)$$

$$/B_z/ = 2,68655 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial \gamma / \text{mesuré} / \partial \rho}{\text{mVeff} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}} \right] \quad (12)$$

Si les tensions sont exprimées en millivolts, les dimensions en millimètres et la fréquence en Herz.

### 5.3. Sonde de mesure : Calcul de $B_r$ et $B_z$

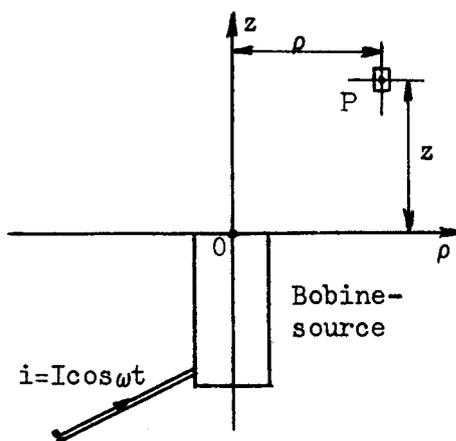


Fig.2

Source et sonde de mesure.

Les valeurs de  $/B_r/$  et  $/B_z/$  au point P de la Fig. 2, se déterminent comme suit, à partir de la mesure du module de la tension apparaissant aux extrémités d'une spire moyenne de la sonde.

Suivant (1) :  $\gamma = -2\pi r \omega j \mathcal{A}_\theta$

où  $r$  = rayon de la spire considérée de la sonde

$\mathcal{A}_\theta$  = potentiel vecteur le long de la spire

D'autre part :  $\mathcal{V} = - d\phi/dt = - j\omega \mathcal{F}$

avec  $\mathcal{F}$  = flux complexe à travers la spire.

$$\mathcal{F} = - \mathcal{V}/j\omega = j\mathcal{V}/\omega$$

$$\mathcal{B} = \mathcal{F}/S = j\mathcal{V}/\omega S \quad \text{avec } S = \text{section droite de la sonde.}$$

Par suite, le module de  $\vec{B}$  vaut :

$$|B| = |\mathcal{V}|/\omega \pi r^2$$

En fait, en tenant compte de ce que la sonde comporte 150 spires et que la tension, à ses bornes, est mesurée après amplification (9,9 X), l'expression de  $|B|$  devient en fonction de  $|\mathcal{V}|$  mesuré :

$$|B| = |\mathcal{V}|_{\text{mesuré}}/\omega \pi r^2 \cdot 150 \cdot 9,9 = 2,2973 \cdot 10^{-7} \cdot |\mathcal{V}|_{\text{mesuré}} \text{ mVeff} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \quad (13)$$

( $r$  = rayon spire moyenne = 1,5 mm)

#### Remarque

Sur la Fig. 2 on a représenté la sonde de mesure de la composante  $B_z$  ; il est évident que la composante  $B_r$  se mesurera avec une sonde identique axée sur la coordonnée  $r$ .

#### 5.4. Comparaison des deux systèmes

Les mesures de  $B_z$  ont été faites à l'aide des deux systèmes dans le cas de la bobine-source, type 1 seule.

Les résultats sont illustrés par le graphique Iar.

La superposition prévue des courbes confrontées n'est pas parfaite.

Au point  $r = 15 \text{ mm}$  ,  $z = 5,5 \text{ mmm}$  , on relève :

<u>Sonde</u>	<u>Boucle</u>
$/Br/ = 12,635.10^{-8}$	$14,002.10^{-8}$
$/Bz/ = 6,202.10^{-8}$	$5,781.10^{-8}$

en  $\text{mVeff.mm}^{-2}.\text{sec.}^{-1}$

L'écart est, grosso modo, de 10 %.

Ces écarts sont imputables au système à boucle pour les motifs exposés au paragraphe 5.1.

Nous avons adopté, en conséquence, la méthode de mesure par sonde sans trop nous inquiéter de la non-ponctualité de celle-ci, vu que l'étude est une étude de comparaison essentiellement.

## 6. PRINCIPE DE SIMILITUDE

Les dimensions des bobines prévues pour recevoir les noyaux de plomb et d'étain ainsi que l'épaisseur des plaques métalliques associées, ont été calculées en vue d'illustrer le principe.

On sait que celui-ci consiste, dans le cas qui nous occupe, à maintenir constant des associations de paramètres intervenant dans l'expression analytique de  $Br$  et  $Bz$  c'est-à-dire du potentiel-vecteur dont ils dépendent, en vue de permettre l'extension pure et simple des résultats obtenus à un ensemble

bobine, noyau, plaque, de dimensions différentes.

Le potentiel-vecteur dont il vient d'être question est connecté à la tension apparaissant aux bornes d'une boucle de mesure suivant l'expression (1) du paragraphe 5.2.

6.1. Bobine-source unique présentant un enroulement uniformément réparti sur toute sa longueur

En se référant à la formule (31) de la page 22 du rapport cité en référence sous le n° [3], on peut écrire :

$$\begin{aligned} \gamma &= - \sum_{IIIN} \mathcal{J} \\ &= - 2\pi\rho j\omega \mathcal{A}_{\theta IIIN}(\rho, z) \end{aligned}$$

ou

$$\begin{aligned} \gamma &= + 4\pi j \left( \frac{jN}{\sigma} \right) \beta \alpha^2 \Gamma \quad (14) \\ \Gamma &= \int_0^{\infty} \frac{\sqrt{j+\lambda^2} J_1(\alpha\beta\lambda) J_1(\alpha\lambda) e^{-\alpha\delta(\sqrt{j+\lambda^2} - \lambda) - \alpha\zeta\lambda} (1 - e^{-\alpha\nu\lambda}) d\lambda}{(-\lambda + \sqrt{j+\lambda^2})^2 e^{-2\alpha\delta\sqrt{j+\lambda^2}} - (+\lambda + \sqrt{j+\lambda^2})^2} \end{aligned}$$

$$\alpha = a\sqrt{\omega\sigma\mu_0} ; \quad \beta = \rho/a ; \quad \delta = d/a ; \quad \zeta = z/a ; \quad \nu = L/a$$

a = rayon bobine-source à l'étude ;

N = nombre de spires par mètre ;

L = longueur de la bobine-source ;

$\rho$  = rayon boucle de mesure ;

$\omega$  = pulsation du courant d'excitation  $\mathcal{J}$  ;

$\sigma$  = conductivité de la plaque interposée entre boucle et source

d = épaisseur de cette plaque ;

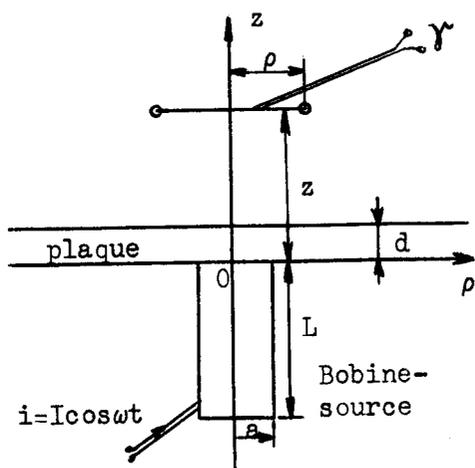


Fig. 3  
Source et boucle  
de mesure.

Pour ne pas modifier l'allure de  $\gamma$  (partant, de  $B_r$  et de  $B_z$ ) en fonction des coordonnées  $\rho$  et  $z$ , il y a lieu de maintenir constants les paramètres :

$$\alpha, \beta, \delta, \zeta, \nu,$$

On a effectué une vérification expérimentale du principe dans le cas de la Fig. 3.

A ce propos, on a comparé les mesures de  $B_r$  et  $B_z$  relevées sur deux ensembles comportant respectivement :

- a) une bobine n° 1 appliquée contre une plaque de Pb et une bobine n° 1' appliquée contre une plaque de Sn,
- b) des bobines n° 1 et n° 1' isolées.

Soit, relativement au premier ensemble :

- L : La longueur de la bobine n° 1 ;
- a : Le rayon ; " " " " "
- N : Le nombre de spires par mètre ;
- d : L'épaisseur de la plaque de plomb ;
- $\sigma$  : La conductivité du plomb ;
- $\omega$  : La pulsation du courant d'excitation ;
- $\mathcal{J}$  : L'amplitude de ce courant ;
- $\rho, z$  : Les coordonnées du point où la mesure de  $B_r$  et  $B_z$  est faite ;

En vertu du principe de similitude, si l'on modifie le rayon "a" en le multipliant par un facteur "M", les paramètres

intervenant d'une manière groupée dans l'expression (14) évolueront comme suit :

$$\alpha = a\sqrt{\omega\sigma(\text{Pb})\mu_0} = Ma\sqrt{\omega\sigma(\text{Pb})\mu_0/m^2}$$

$$\beta = \rho/a = M\rho/Ma$$

$$\delta = d/a = Md/Ma$$

$$\zeta = z/a = Mz/Ma$$

$$\nu = L/a = ML/Ma$$

Afin d'utiliser la même pulsation  $\omega$  dans les deux cas considérés, on a adopté :

a) pour "M", une valeur telle que  $\sigma(\text{Pb})/m^2 = \sigma(\text{Sn})$  ,  
c'est-à-dire

$$M = \sqrt{\sigma(\text{Pb})/\sigma(\text{Sn})} \quad (15)$$

$$\sigma(\text{Pb}) = 0,480 \cdot 10^7 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\sigma(\text{Sn}) = 0,869 \cdot 10^7 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\text{soit } M = 0,7438$$

b)  $\alpha = 0,925$

$$\delta = 0,940$$

$$\nu = 4$$

Fréquence = 264 Hz pour des raisons de commodité.

Il s'ensuit que :

$$a = \alpha / \sqrt{\omega\sigma(\text{Pb})\mu_0} = 9,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Les deux modèles ont les caractéristiques suivantes :

Caractéristiques	Mod. I	Mod. II
<u>Bobine-source</u>		
Rayon	$a=9,25 \cdot 10^{-3}$ m	$a'=Ma=6,88 \cdot 10^{-3}$ m
Rayon support	$R=9 \cdot 10^{-3}$ m	$R'=6,75 \cdot 10^{-3}$ m
Longueur moyenne	$L=\nu a=37 \cdot 10^{-3}$ m	$L'=\nu Ma=27,52 \cdot 10^{-3}$ m
<u>Plaque</u>		
Epaisseur	$d=\delta a=8,7 \cdot 10^{-3}$ m (Homb)	$d'=\delta Ma=6,47 \cdot 10^{-3}$ m (Etain)
<u>Coordonnées</u>		
Cote	$z = \zeta a$	$z'=\zeta Ma=0,7438 z$
Rayon polaire	$\rho = \beta a$	$\rho'=\beta Ma=0,7438$
<u>Fil émaillé</u>		
	$\phi = 0,5$ mm	$\phi = 0,3$ mm
<u>Points de mesure</u>		
de <u>/Br/&amp;/Bz/</u>	tous les 3 mm*	tous les 3 mm*

(\*) L'égalité des pas permet d'utiliser le même dispositif mécanique ; il faudra en tenir compte lors de la superposition des courbes propres aux deux modèles.

#### 6.1.1. Mod. I & Mod. II en l'absence de plaques métalliques

Les graphiques L1 et L2 démontrent que les courbes pour

$Z = 23,5$  mm du modèle I et  $Z = 17,474$  mm du modèle II coïncident exactement.

Par contre, le décollage des courbes pour  $Z = 11,5$  mm et  $Z = 8,553$  mm respectivement est d'autant plus marqué que  $r(\equiv \rho)$  augmente.

Ceci est principalement dû au fait que l'écart entre l'extrémité de la bobine-source et la cote  $z = 0$  ne peut être déterminée d'une manière précise à cause du diamètre du fil utilisé. En outre, la non nullité de ce diamètre a aussi son importance et se fait sentir surtout aux cotes basses.

Enfin, il faut aussi tenir compte de ce que les bobines de mesure ne sont pas ponctuelles quoique de volume très réduit.

#### 6.1.2. Mod. I & Mod. II en présence d'une plaque métallique

Les graphiques M1 et M2 concernent ce cas.

La similitude est parfaite aux deux cotes considérées du Mod. I, c'est-à-dire  $Z = 17,5$  mm et  $Z = 23,5$  mm.

#### 6.2. Bobine-source fractionnée

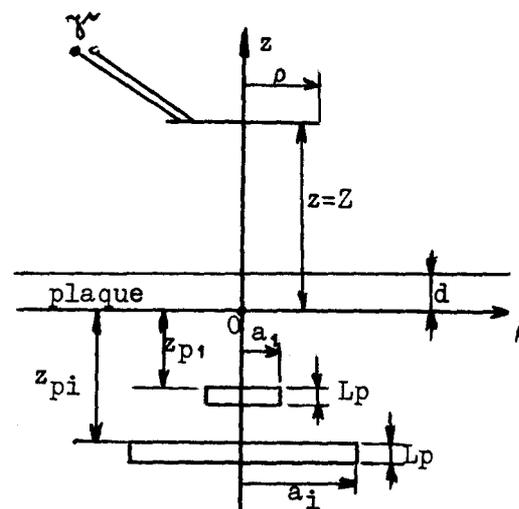


Fig.4

Source fractionnée et boucle de mesure.

Le primaire à l'étude est composé de fractions bobinées coaxiales de longueur fixe  $L_p$ , présentant toutes  $N$  spires/mètre montées en série et parcourues par un courant  $i = \cos \omega t$ .

Dans ces conditions, la tension aux bornes de la boucle a pour expression :

$$\gamma = 4\pi j \left( \frac{\mathfrak{J}N}{\sigma} \right) \sum_i \beta_i \alpha_i^2 \Gamma_i \quad (16)$$

$$\Gamma_i = \int_0^\infty \frac{\sqrt{j+\lambda^2} J_1(\alpha_i \beta_i \lambda) J_1(\alpha_i \lambda) e^{-\alpha_i \delta_i (\sqrt{j+\lambda^2} - \lambda) - \alpha_i (\zeta_i + \zeta_{pi}) \lambda} (1 - e^{-\alpha_i \nu_{pi} \lambda}) d\lambda}{(\sqrt{j+\lambda^2} - \lambda)^2 e^{-2\alpha_i \delta_i \sqrt{j+\lambda^2}} - (\sqrt{j+\lambda^2} + \lambda)^2}$$

$$\alpha_i = a_i \sqrt{\omega \sigma \mu_0} \quad \beta_i = \rho / a_i \quad \delta_i = d / a_i$$

$$\zeta_i = z / a_i \quad \zeta_{pi} = z_{pi} / a_i \quad \nu_{pi} = L_{pi} / a_i$$

Il est clair que le principe de similitude s'applique à cet ensemble.

Dans le cas particulier où les éléments sont tous du même diamètre, on remplacera "a<sub>i</sub>" par "a" dans (16).

Il n'a pas été fait de vérification expérimentale du principe dans ce cas.

### 6.3. Bobine-source avec noyau

Il était intéressant de vérifier si le principe est applicable au cas où un noyau métallique est présent. C'est ce que nous avons essayé de faire.

Les comparaisons portent encore sur les modèles I et II, après avoir muni les bobines sur toute leur longueur de noyaux métalliques.

Pour le Mod. I, le noyau est de plomb et de diamètre = 8,8 mm.

Pour le Mod. II, le noyau est d'étain et de diamètre = 8,8 x 0,7438 = 6,5 mm.

6.3.1. Mod. I & Mod. II, noyaux présents, plaques métalliques écartées

Les graphiques N1 et N2 montrent clairement que la similitude existe.

6.3.2. Mod. I & Mod. II, noyaux et plaques métalliques présentes

Dans ce cas, le décollement des courbes est évident ; il serait imprudent d'affirmer que le principe de similitude est applicable ici. (graphiques O1 et O2).

7.

7. INFLUENCE DE LA FORME GEOMETRIQUE DES BOBINES SUR LA DISTRIBUTION DE  $B_r$  &  $B_z$ .

7.1. Profils choisis

Comme il a déjà été dit, les profils étudiés sont les suivants :

- Cylindre ( $\nu = 4, \nu = 2$ )
- Hyperboloïde tronqué
- Sphéroïde tronqué
- Cône

Ces bobines peuvent comporter des noyaux ou non.

Sur les graphiques, les formes comparées apparaissent clairement.

Pour mettre en évidence l'influence particulière des extrémités et de la partie centrale sur la distribution du champ, on a superposé les diagrammes obtenus à partir d'une bobine complète et d'autres de longueur totale identique dont on a supprimé systématiquement des sections aux extrémités ou à la partie centrale.

## 7.2. Etude des graphiques

### 7.2.1. Cylindres de longueur identique

Les documents A1, A2 et A1', montrent clairement que l'on obtient une meilleure concentration des deux composantes de champ, lorsque la partie centrale de la bobine est éliminée. Les amplitudes sont toutefois nettement réduites.

Le même résultat est obtenu lorsque la bobine est munie d'un noyau de plomb, mais d'une manière moins marquée (B1, B2, B1').

### 7.2.2. Hyperboloïdes tronqués

Suivant C1, C2 et C1', Bz présente une distribution plus uniforme dans le cas de l'hyperboloïde mais plus élargi que dans le cas de la référence. Les graphiques relatifs à Br ne présentent aucune particularité intéressante.

### 7.2.3. Sphéroïdes tronqués

E1, E2 et E1' mettent en évidence le rôle joué par les éléments centraux qui sont les plus larges. La présence de ceux-ci entraîne un élargissement des courbes relatives à Br et Bz.

On constate aussi que les éléments de l'extrémité inférieure sont pratiquement inactifs.

Par contre, la conicité de l'extrémité supérieure influence d'une manière appréciable la distribution de Br suivant r.

### 7.2.4. Cônes droits

Les graphiques G1, G2 et G1' concernent des cônes présentant

leur base aux sondes de mesure. Ils confirment, par comparaison avec C1, C2 et C1', que la partie inférieure des bobines considérées a une contribution nulle dans les valeurs mesurées de Br et Bz.

Ce sont les deux fractions supérieures qui déterminent pratiquement la forme des courbes.

A une ouverture large, correspond une courbe bombée et large. Le maximum, en ce qui concerne  $/Br/$  est décalé vers la droite vu que la position de celui-ci est fonction du diamètre de l'ouverture. Pratiquement, cette valeur maximale se situe à l'abscisse  $r$  - rayon de l'ouverture entre  $z = 0$  et  $z = 10$  mm.

Les cônes présentant leur sommet aux sondes de mesure ont donné les courbes faisant l'objet des documents I1, I2 et I1'. Ici aussi, seules sont utiles les fractions supérieures de la bobine. Si on compare les courbes E1(+) et I1(+), on peut entrevoir le rôle de la deuxième fraction (e sur E1 et c sur I1) : à un diamètre inférieur correspond une courbe présentant une base moins étalée. Dans ce cas, les meilleures courbes seraient obtenues avec deux éléments (a).

En ce qui concerne  $/Br/$ , les graphiques I1' révèlent que la deuxième fraction entraîne une translation du maximum vers la droite mais une amélioration de la forme pour les valeurs basses de cette composante.

#### 7.2.5. Cylindres et cônes courts

Les résultats qui précèdent nous ont conduits à comparer des bobines courtes quant à la distribution spatiale de l'induction magnétique.

Les documents K1, K2, K1' démontrent une fois de plus que la bobine courte composée de deux éléments identiques (a) est plus intéressante. Les courbes s'élargissent à la base, au fur et à mesure, que le diamètre du second élément (b et e) est accru. Les mêmes observations ont été faites à propos de la composante Br.

#### 7.2.6. Cylindres de longueur différente

On constate une fois de plus en examinant les documents P1, P2 et P1', que les courbes sont moins étalées à la base lorsque la bobine est moins longue. La même remarque s'applique au cas où un noyau ici de fer, est présent (doc. Q1, Q2 et Q1') avec cette différence que les courbes serrent l'axe des ordonnées de plus près, ce qui est normal ; le maximum de /Br/ se déplace vers la gauche de 2 mm environ à la cote Z = 5,5 mm.

### 8. CONCLUSIONS

Dans le domaine des contrôles non destructifs par courants de Foucault, les sondes bobinées constituent les éléments vitaux de l'appareillage. C'est pourquoi nous avons entrepris cette étude. Elle nous a permis, non seulement de démontrer que les bobines longues de profils spéciaux ne présentent pas de caractéristiques avantageuses, mais aussi de déterminer la forme la plus appropriée à donner aux sondes bobinées.

Que l'on s'intéresse à Br ou à Bz, la distribution du champ magnétique sera moins éparpillée avec une bobine de courte longueur de petit diamètre et garnie d'un noyau à haute perméabilité.

Il est indispensable, en outre, que le courant d'excitation ait une amplitude aussi élevée que possible.

Les courants pulsés sont avantageux à ce propos.

Remarquons que les bobines encerclantes doivent satisfaire le même critère relatif à la longueur. Les bobines courtes, habituellement jumelées, sont d'ailleurs d'usage en pratique, comme on le sait, pour des motifs de finesse de définition.

Il est clair que la focalisation ne peut être améliorée davantage avec un simple solénoïde. Il faut faire appel à des dispositifs faisant intervenir des phénomènes assez spéciaux comme celui à masque [1, 2] développé récemment aux Etats-Unis.

Une autre possibilité serait offerte, à notre avis, par un ensemble de bobines courtes axiales et excitées indépendamment. Nous comptons entreprendre ultérieurement cette étude.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Monsieur P. BONNET, Chef de l'Unité Métallurgie Appliquée, ainsi qu'à Monsieur P. JEHENSON, Chef du Groupe des Contrôles non Destructifs, pour avoir autorisé et facilité l'exécution de ce travail.

Je remercie, par ailleurs, Monsieur G. SOMA qui a effectué, avec un soin tout particulier, les nombreuses et fastidieuses mesures qui se sont révélées indispensables.

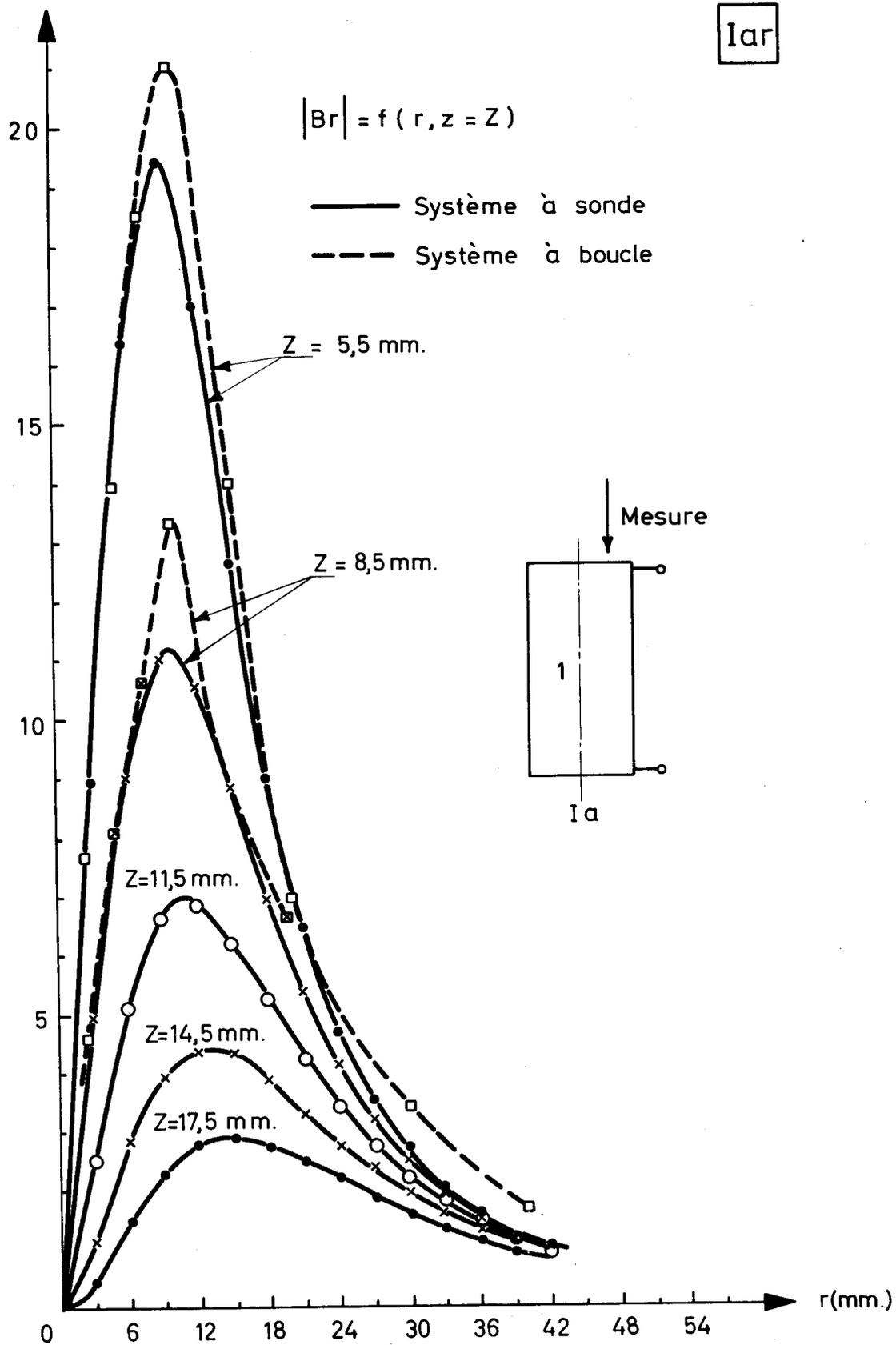
BIBLIOGRAPHIE

1. A pulsed eddy current test system using reflected fields.  
C.J. Renken  
Materials Evaluation, Vol. 23, n° 12, 1965, pp. 622-7
  
2. An analysis of the pulsed magnetic field under a masked eddy current probe.  
D.L. Waidelich, University of Missouri, U.S.A.  
Proceedings of the 4th Congress on Material Testing, Budapest, Hungary, October 11-14, 1967.
  
3. Contrôle non destructif des tôles métalliques non ferromagnétiques à l'aide des courants de Foucault.  
"Calcul de l'impédance complexe d'une bobine en présence d'une plaque métallique en régime alternatif pur". par A. Philippe  
Rapport Euratom 3483.F. - (Vol. 1) - 1967
  
4. Contrôle non destructif des tôles métalliques non ferromagnétiques à l'aide des courants de Foucault.  
"Recherche des conditions optimales des variations d'épaisseur et de conductivité" par A. Philippe  
Rapport Euratom 3483.F. - (Vol. 2) - [to be published]

# SYSTEMES A BOUCLE ET A SONDE PONCTUELLE COMPARAISON

 $|Br| 10^8 \text{ m Veff. mm. sec}^{-1}$ 

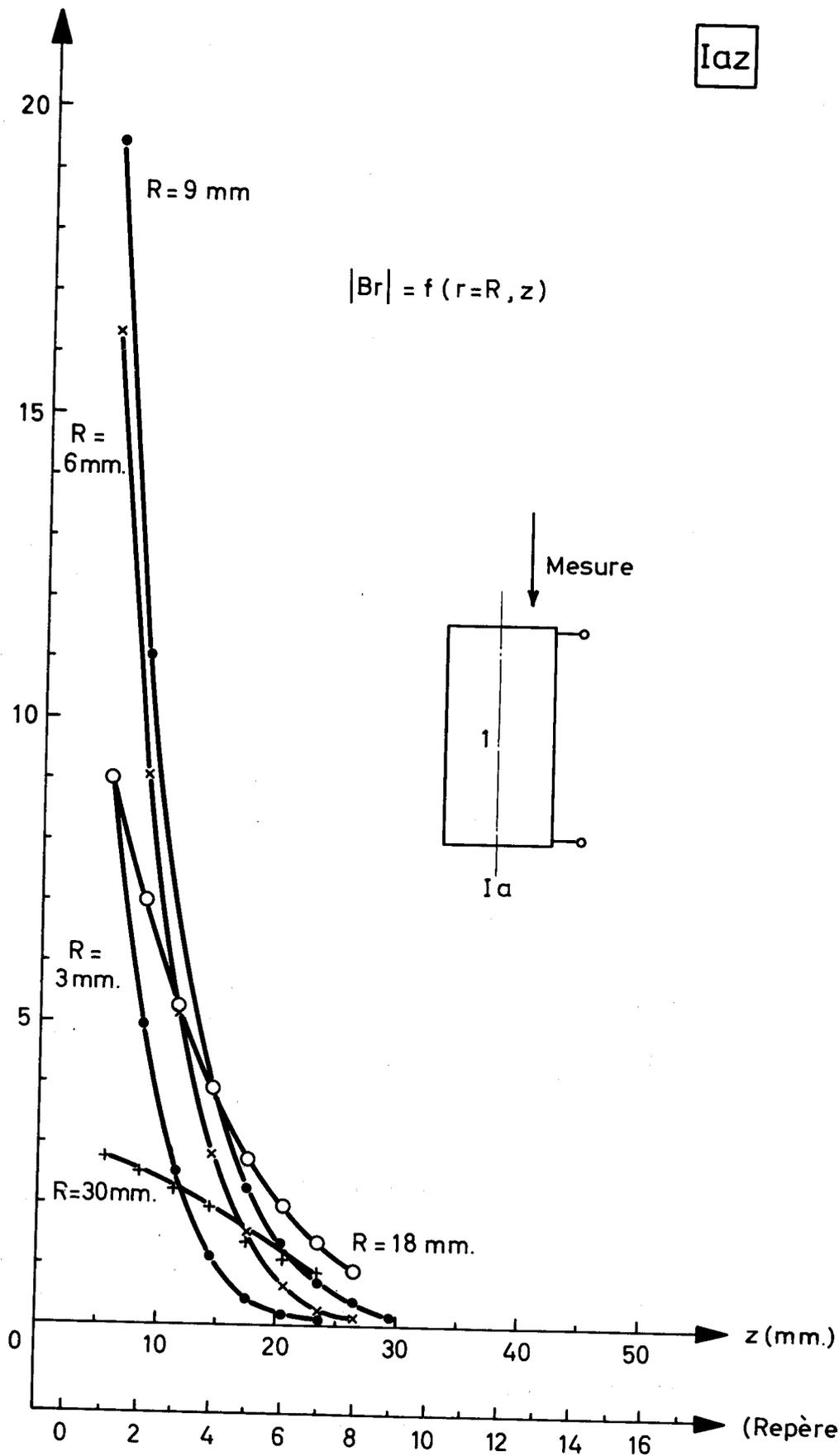
Iar



## SYSTEME A SONDE

 $|Br| 10^{+8} \text{ mVeff. mm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 

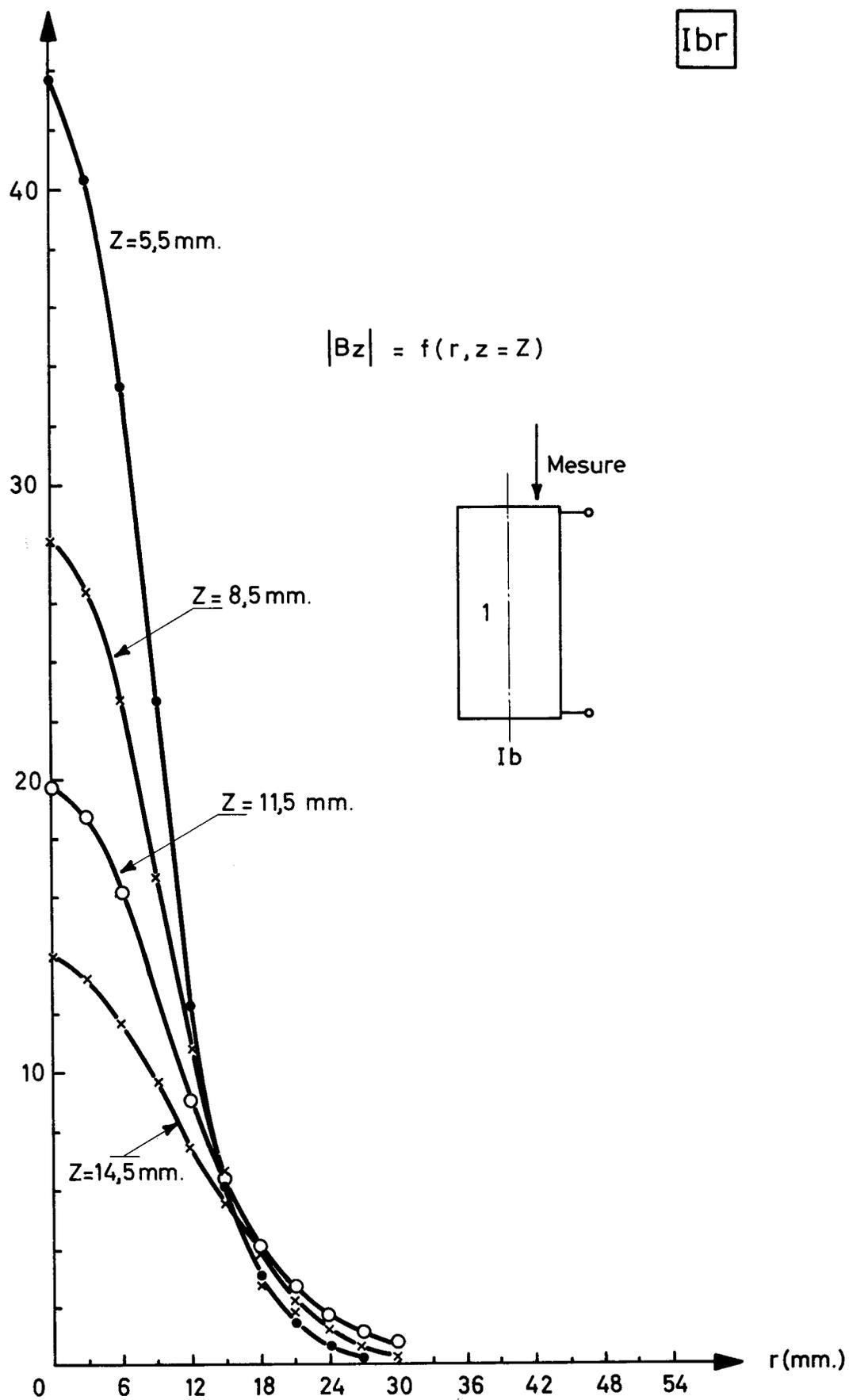
Iaz



## SYSTEME A SONDE

 $|Bz| 10^{+8} \text{ mVeff. mm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 

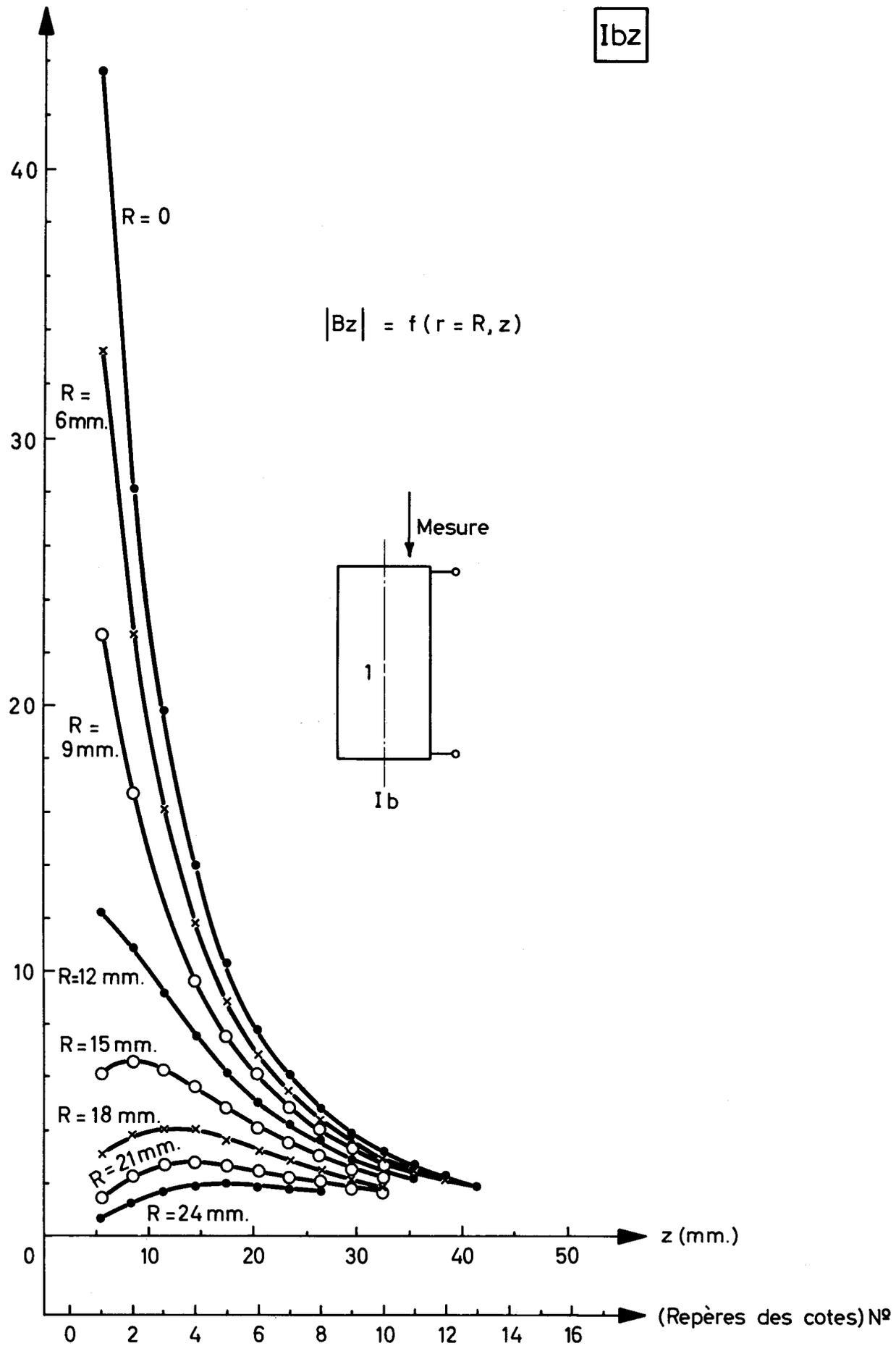
Ibr



# SYSTEME A SONDE

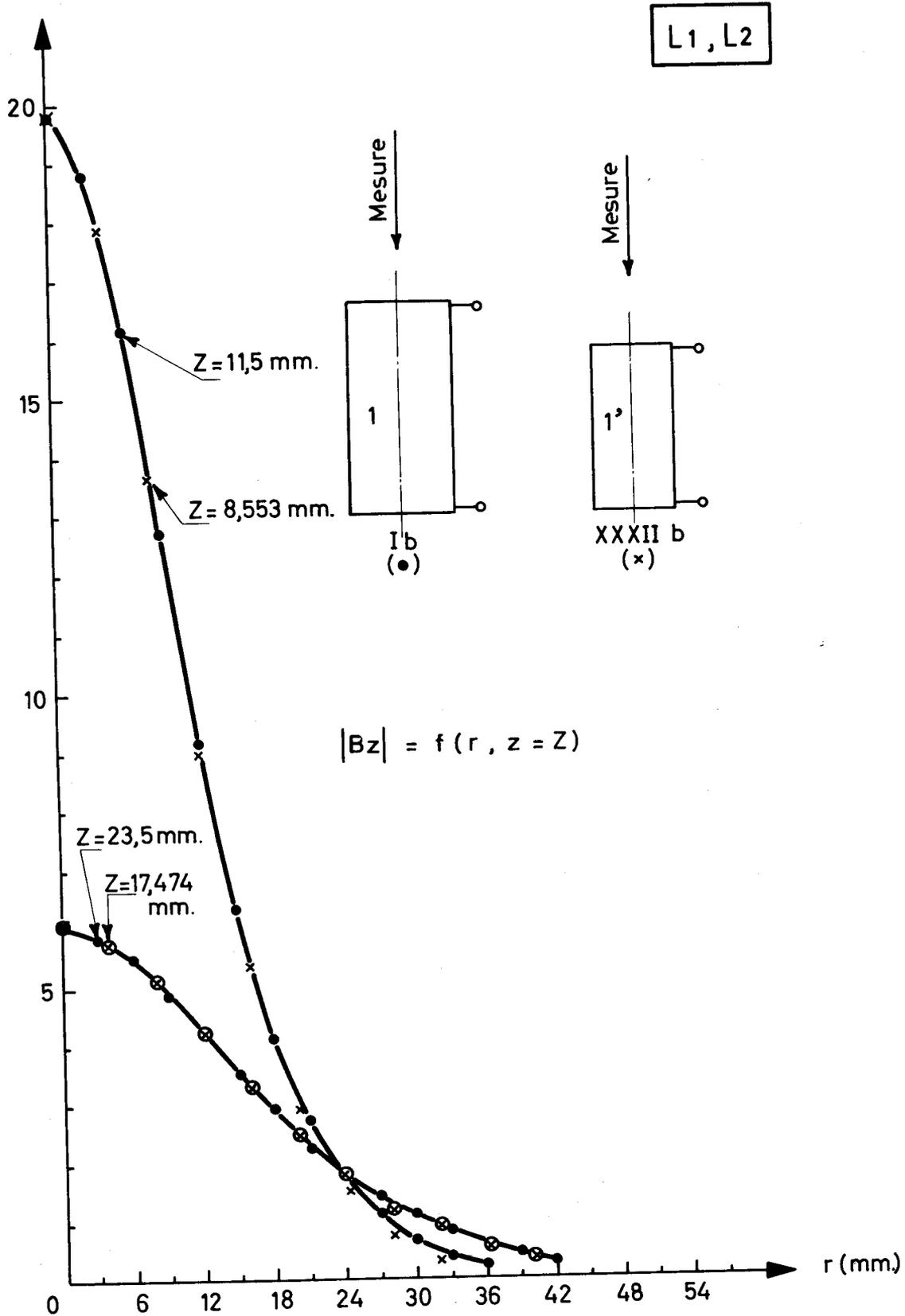
$$|Bz| 10^8 \text{ mVeff. mm.}^{-2} \text{ sec.}^{-1}$$

Ibz



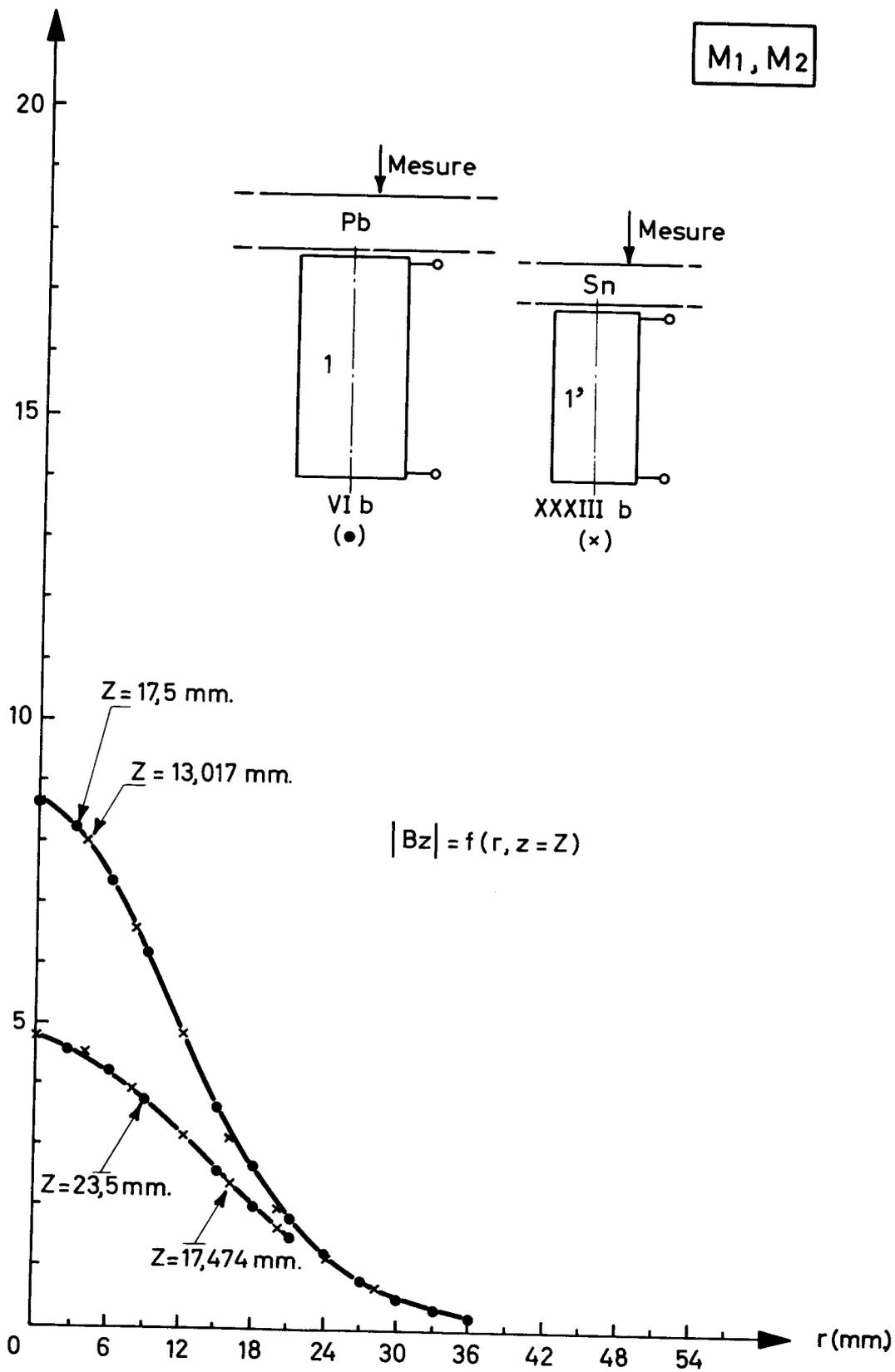
# VERIFICATION EXPERIMENTALE DU PRINCIPE DE SIMILITUDE

$$|Bz| \cdot 10^8 \text{ m Veff. mm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$



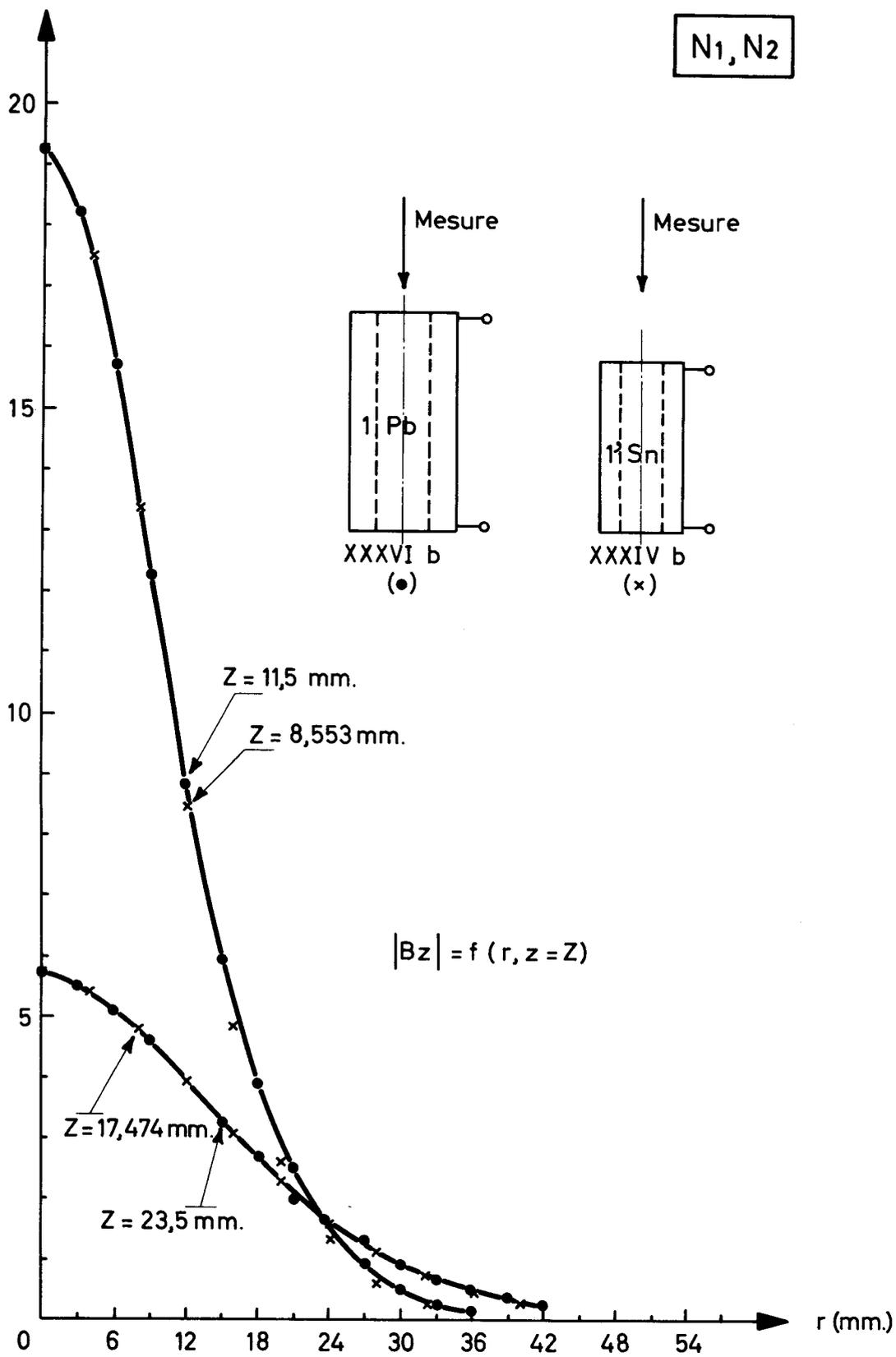
# VERIFICATION EXPERIMENTALE DU PRINCIPE DE SIMILITUDE

$$|Bz| 10^{+8} \text{ m Veff. mm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$



# VERIFICATION EXPERIMENTALE DU PRINCIPE DE SIMILITUDE

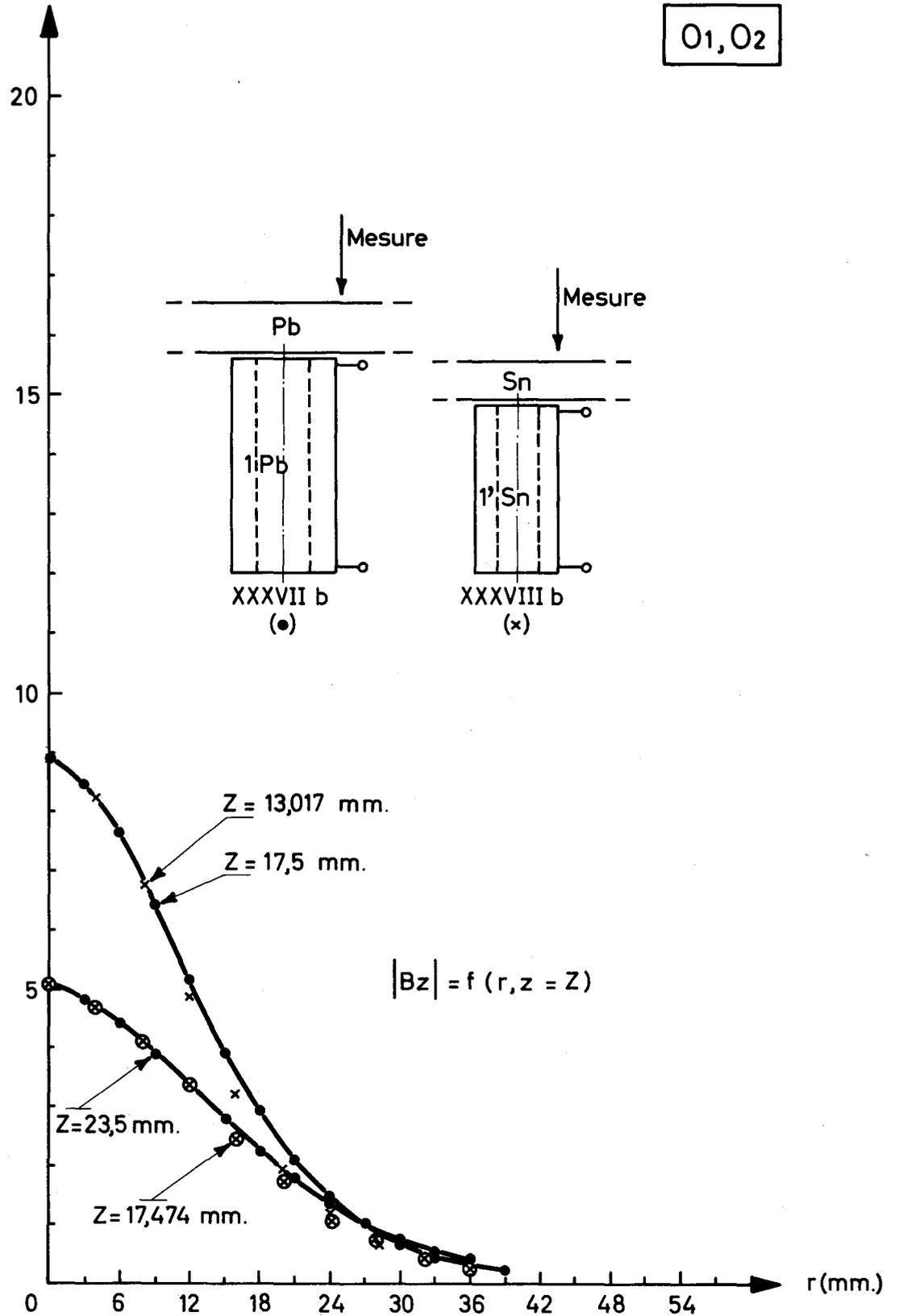
$$|Bz| \cdot 10^{+8} \text{ m Veff. mm.}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$



# VERIFICATION EXPERIMENTALE DU PRINCIPE DE SIMILITUDE

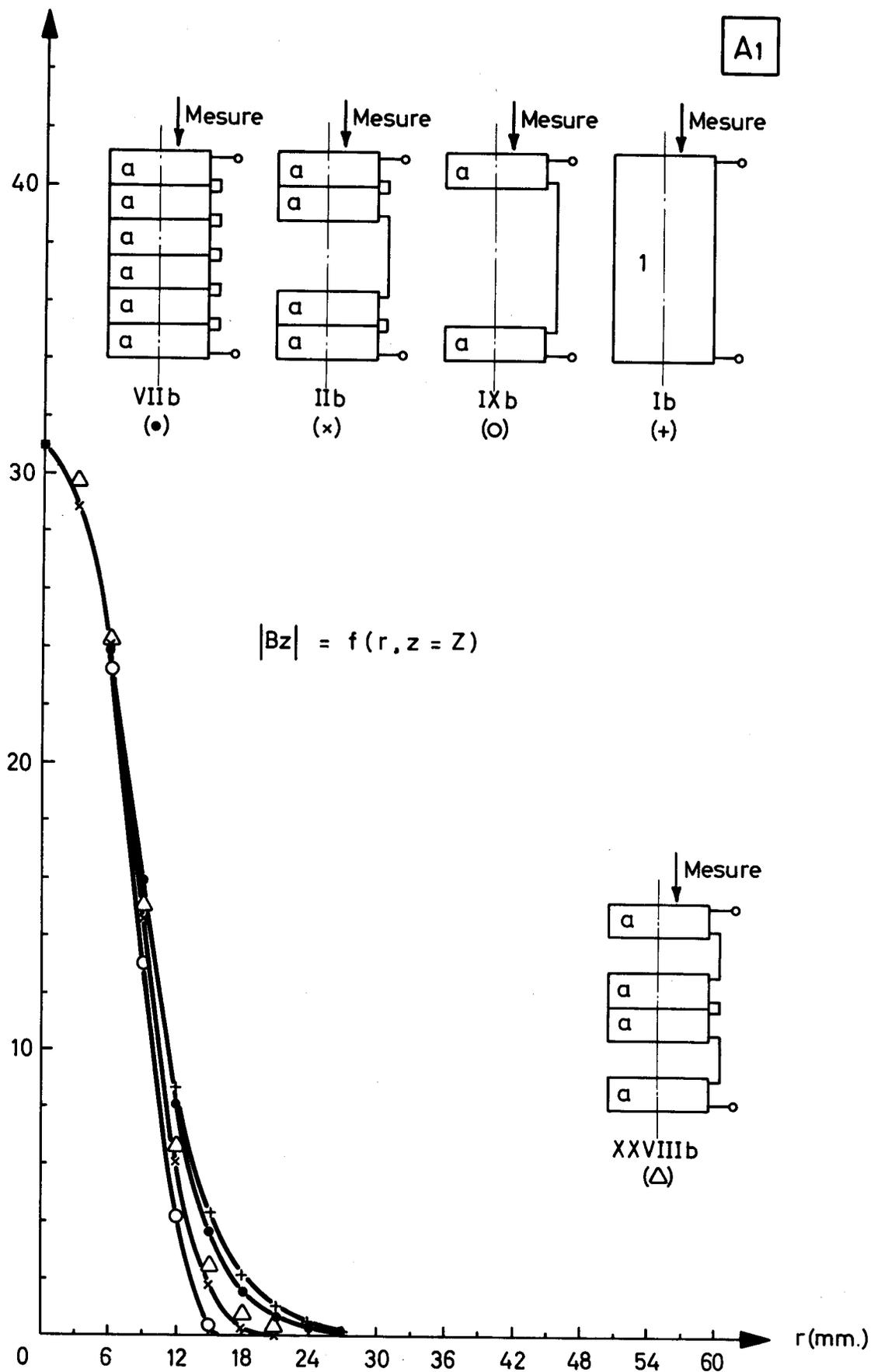
$$|Bz| 10^{+8} \text{ m Veff. mm.}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$

O<sub>1</sub>, O<sub>2</sub>



COMPARAISON DES GRAPHIQUES Ib, IIb, IXb, XXVIIIb ET VIIb APRES EGALISATION DES MAXIMA ( Z = 5,5 mm. )

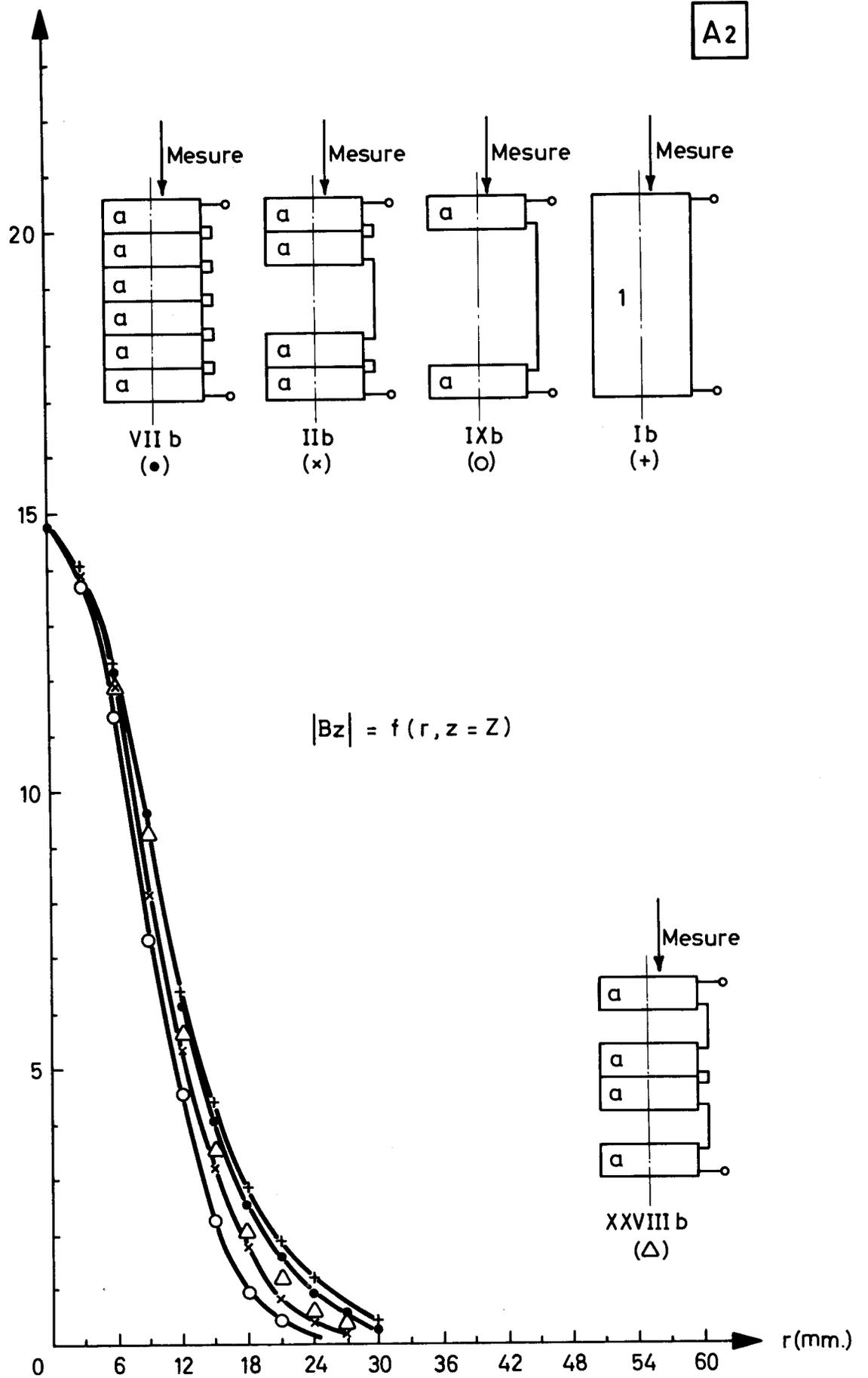
$|Bz| 10^8 \text{ m Veff. mm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$



COMPARAISON DES GRAPHIQUES Ib, II b, IX b, XXVIII b  
 ET VII b APRES EGALISATION DES MAXIMA (Z=11,5mm.)

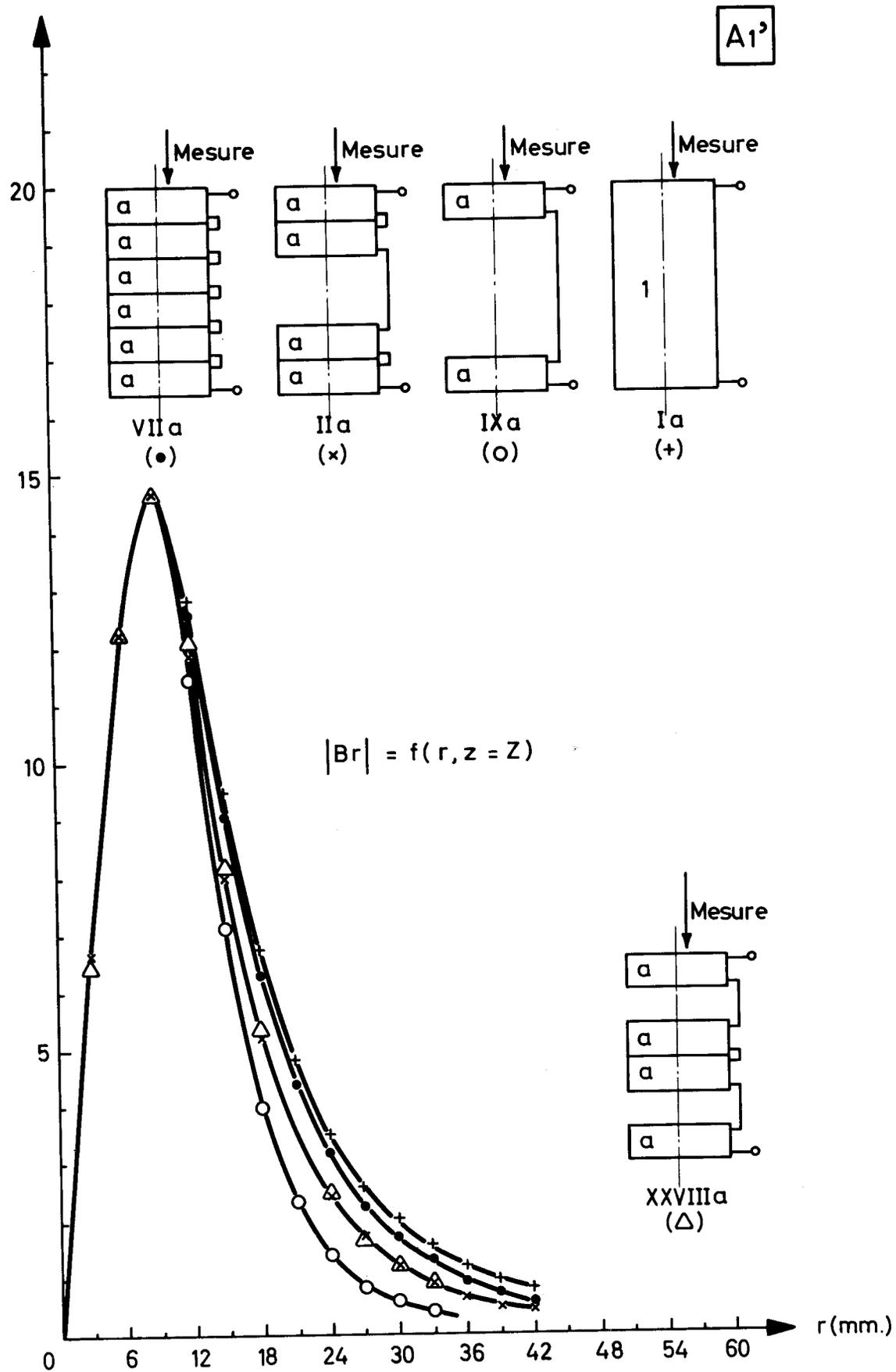
$$|Bz| 10^8 \text{ mVeff. mm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$

A2



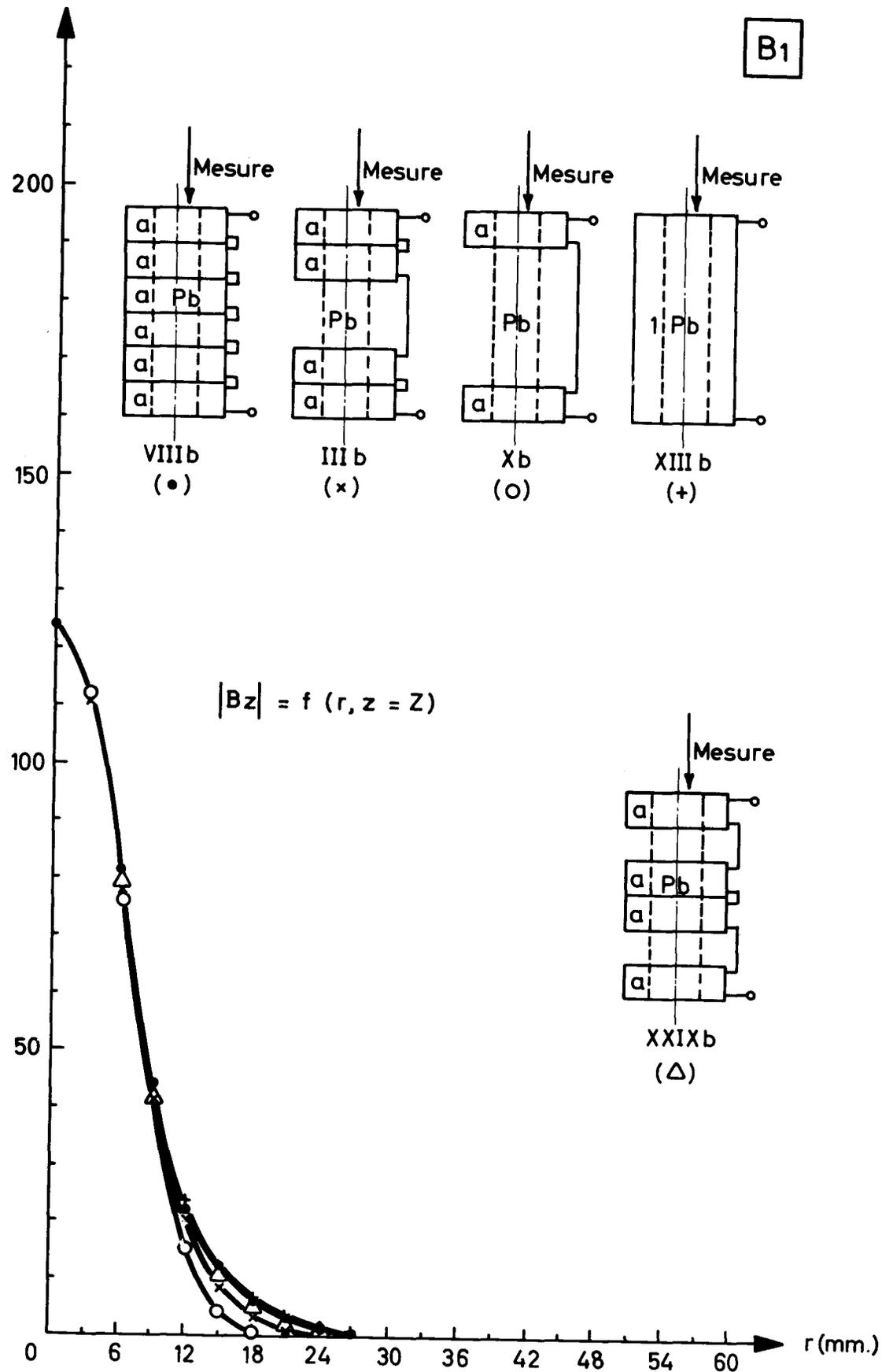
COMPARAISON DES GRAPHIQUES Ia,IIa,IXa,XXVIIIa  
ET VIIa APRES EGALISATION DES MAXIMA (Z=5,5mm)

$$|Br| 10^8 \text{ mVeff. mm.}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$



COMPARAISON DES GRAPHIQUES IIIb, Xb, XIIIb, XXIXb  
ET VIIIb APRES EGALISATION DES MAXIMA (Z=5,5mm.)

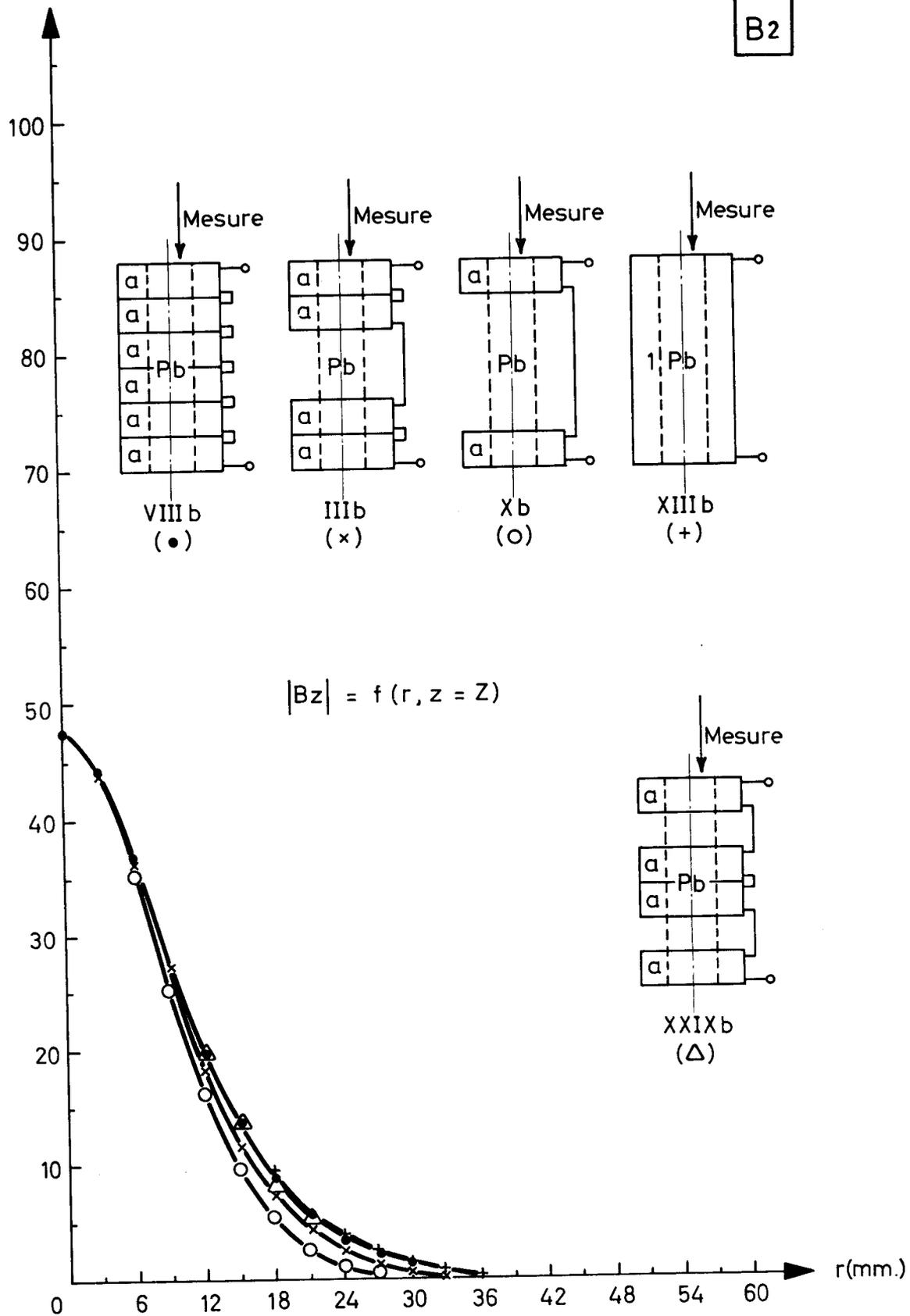
$$|Bz| 10^8 \text{ mVeff. mm.}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$



COMPARAISON DES GRAPHIQUES III b, X b, XIII b, XXIX b  
ET VIII b APRES EGALISATION DES MAXIMA (Z=11,5 mm.)

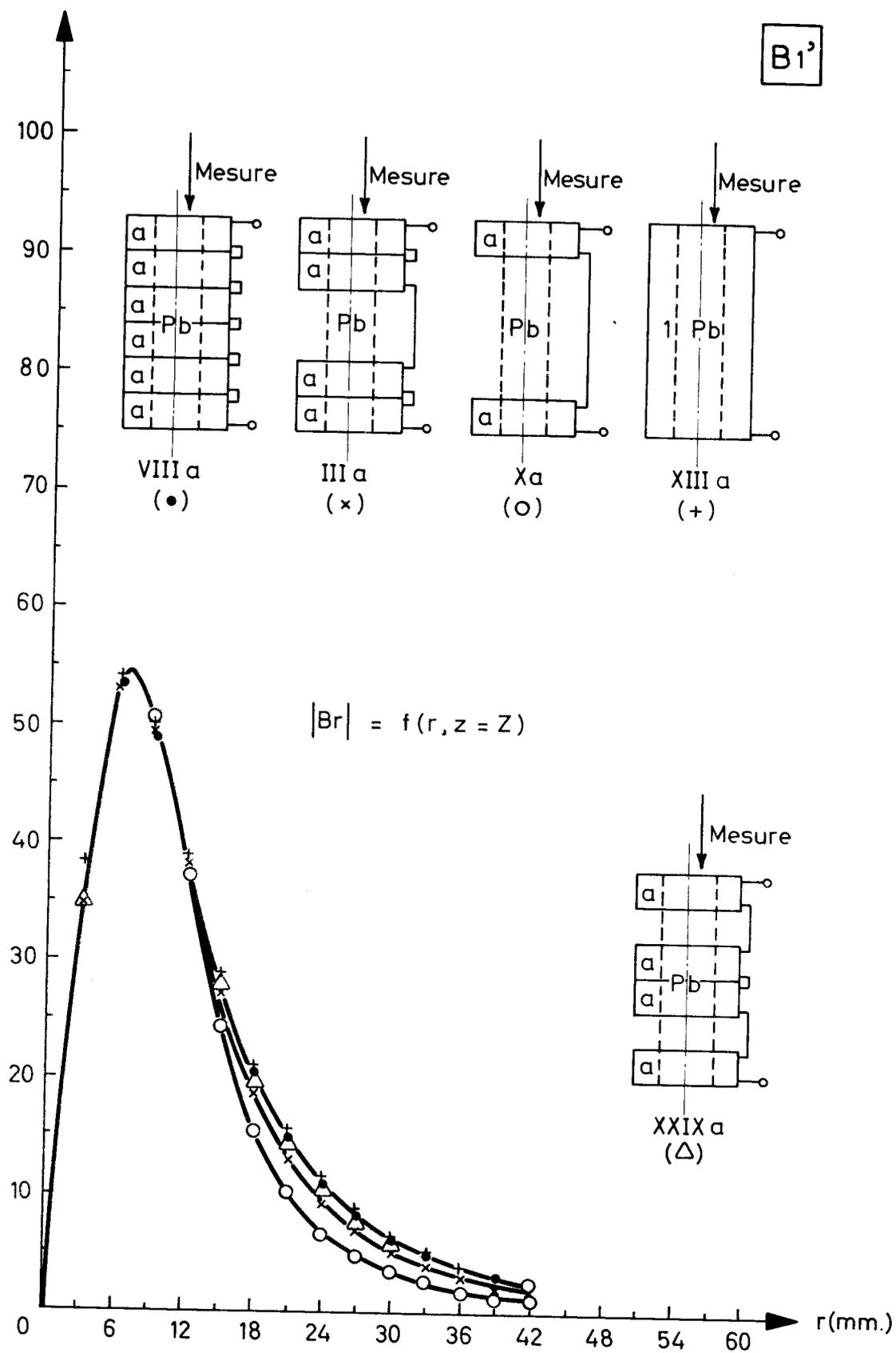
$|Bz| 10^{+8} \text{ mVeff. mm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$

B2



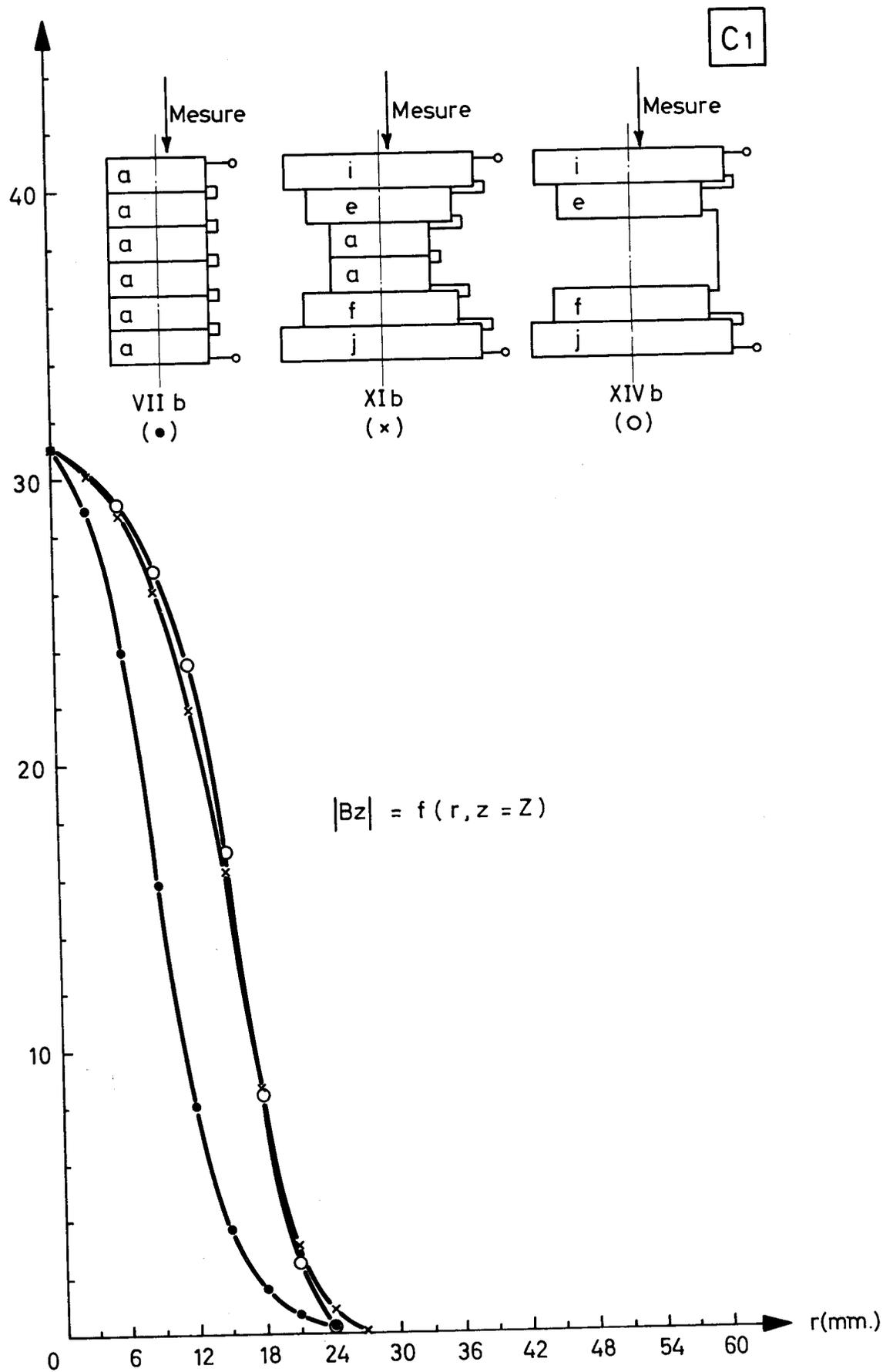
COMPARAISON DES GRAPHIQUES III a, X a, XIII a, XXIX a  
ET VIII a APRES EGALISATION DES MAXIMA (Z = 5,5mm.)

$|Br| 10^{+8} \text{ mVeff. mm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$



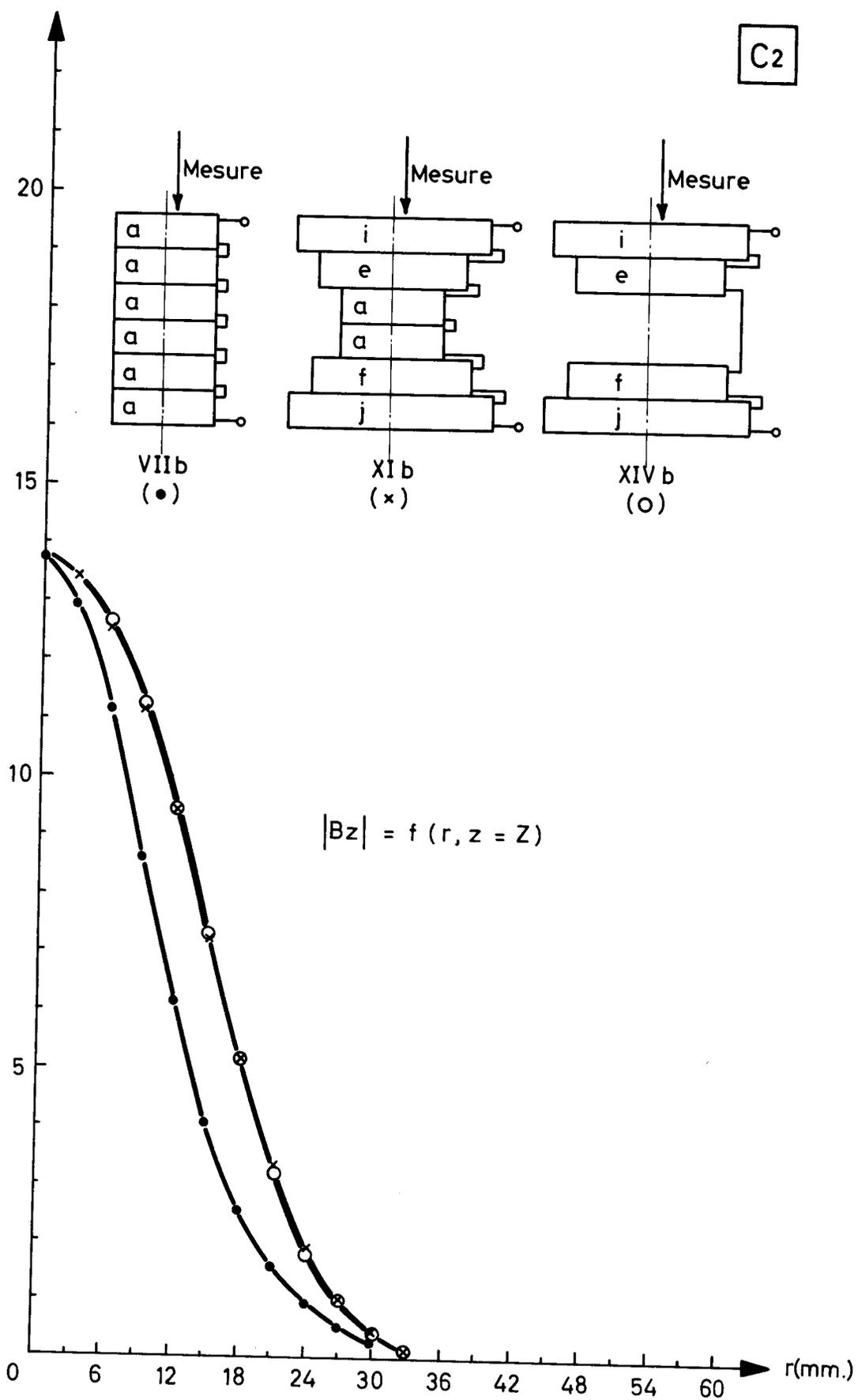
COMPARAISON DES GRAPHIQUES XIb, XIVb ET VIIb  
 APRES EGALISATION DES MAXIMA (Z = 5,5 mm.)

$|Bz| 10^{+8} \text{ mVeff. mm.}^{-2} \text{ sec}^{-1}$



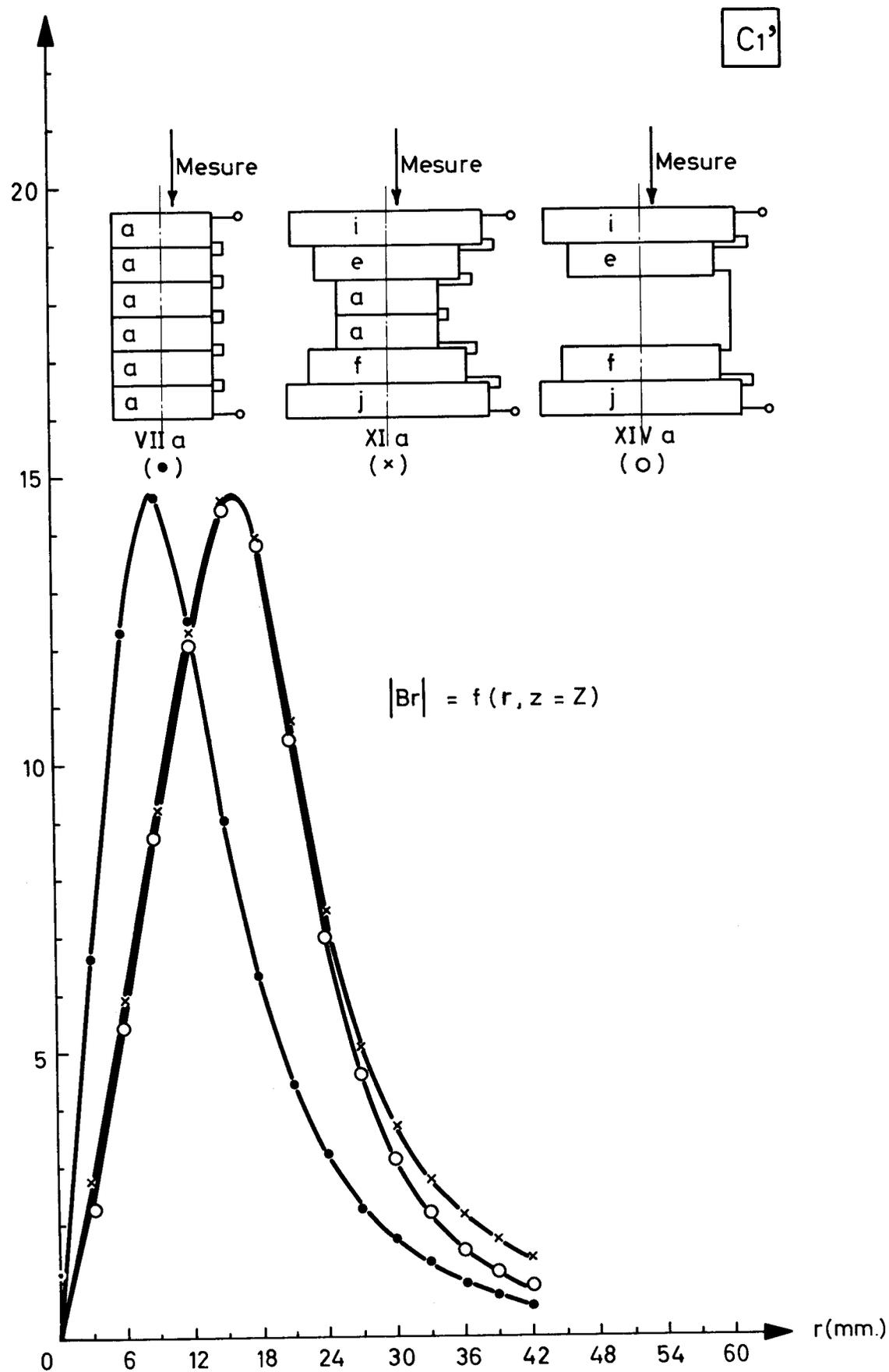
COMPARAISON DES GRAPHIQUES XIb, XIVb ET VIIb  
 APRES EGALISATION DES MAXIMA (Z = 11,5 mm.)

$$|Bz| 10^8 \text{ mVeff. mm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$



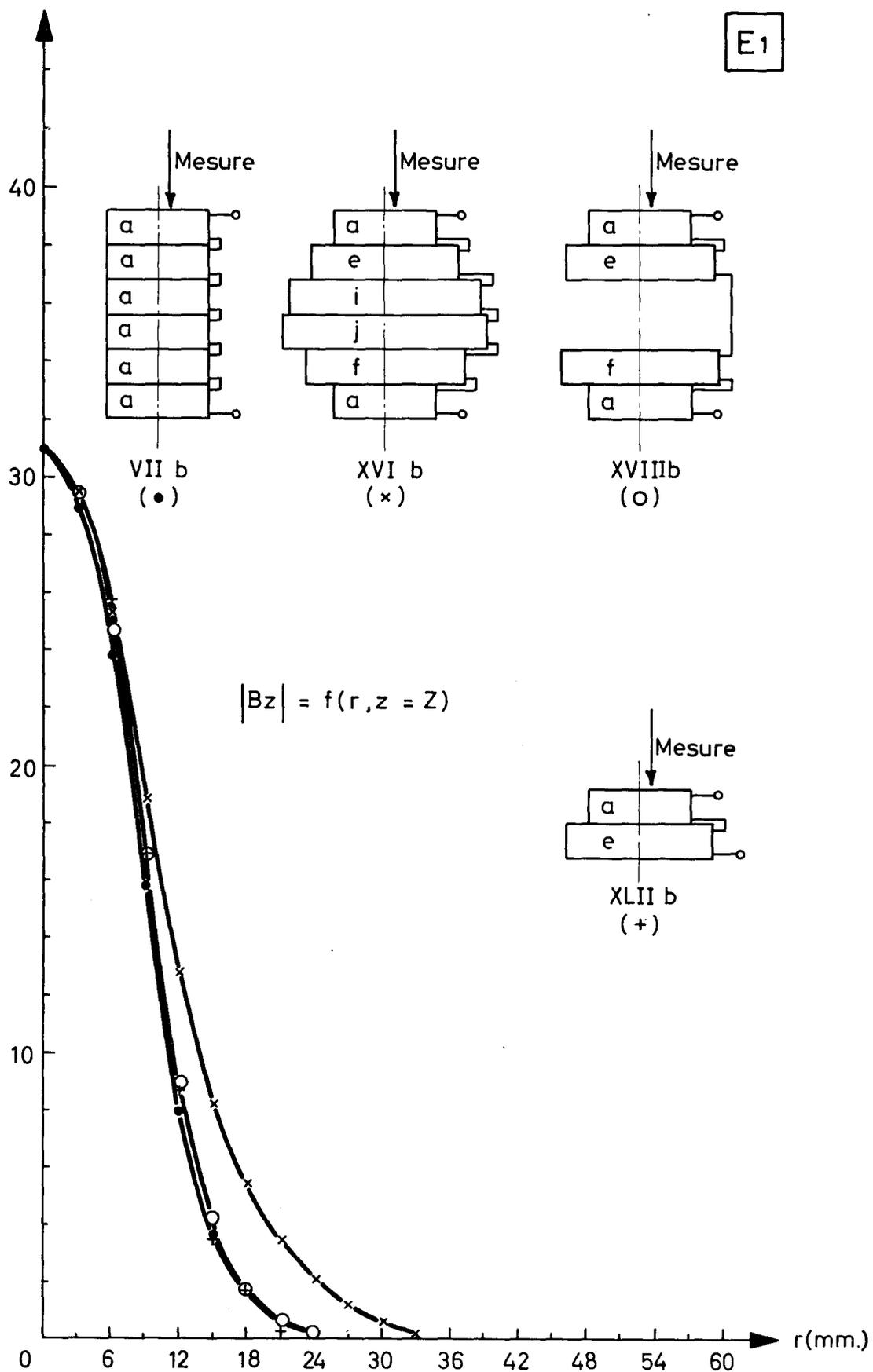
COMPARAISON DES GRAPHIQUES XI a , XIV a et VII a  
 APRES EGALISATION DES MAXIMA (Z = 5,5 mm.)

$|\text{Br}| 10^8 \text{ mVeff. mm.}^{-2} \text{ sec}^{-1}$



COMPARAISON DES GRAPHIQUES XVI b, XVIII b ET VII b APRES EGALISATION DES MAXIMA (Z=5,5 mm.)

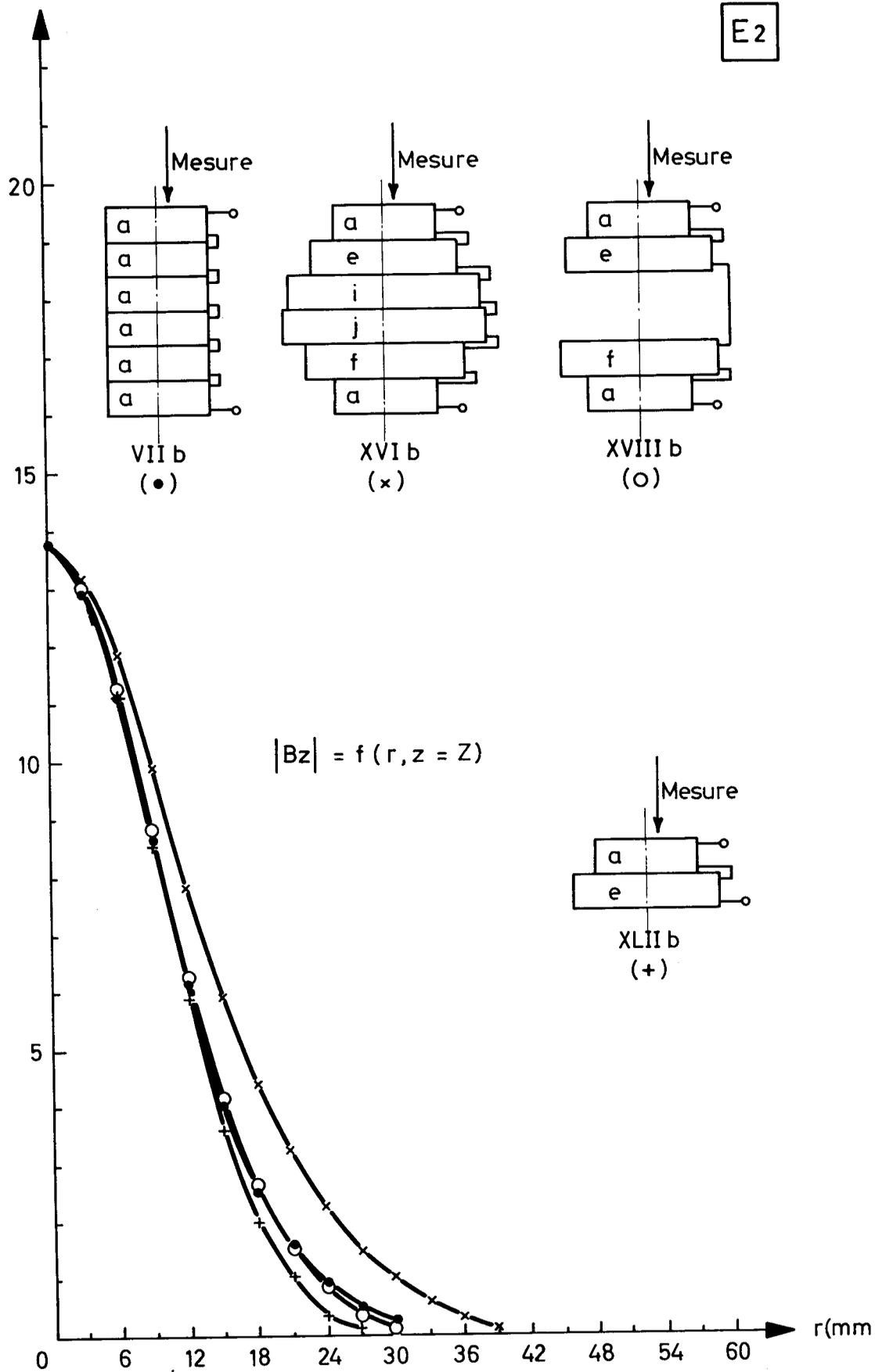
$$|Bz| 10^8 \text{ mVeff. mm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$



COMPARAISON DES GRAPHIQUES XVI b, XVIII b ET VII b APRES REGULATION DES MAXIMA (Z=11,5mm.)

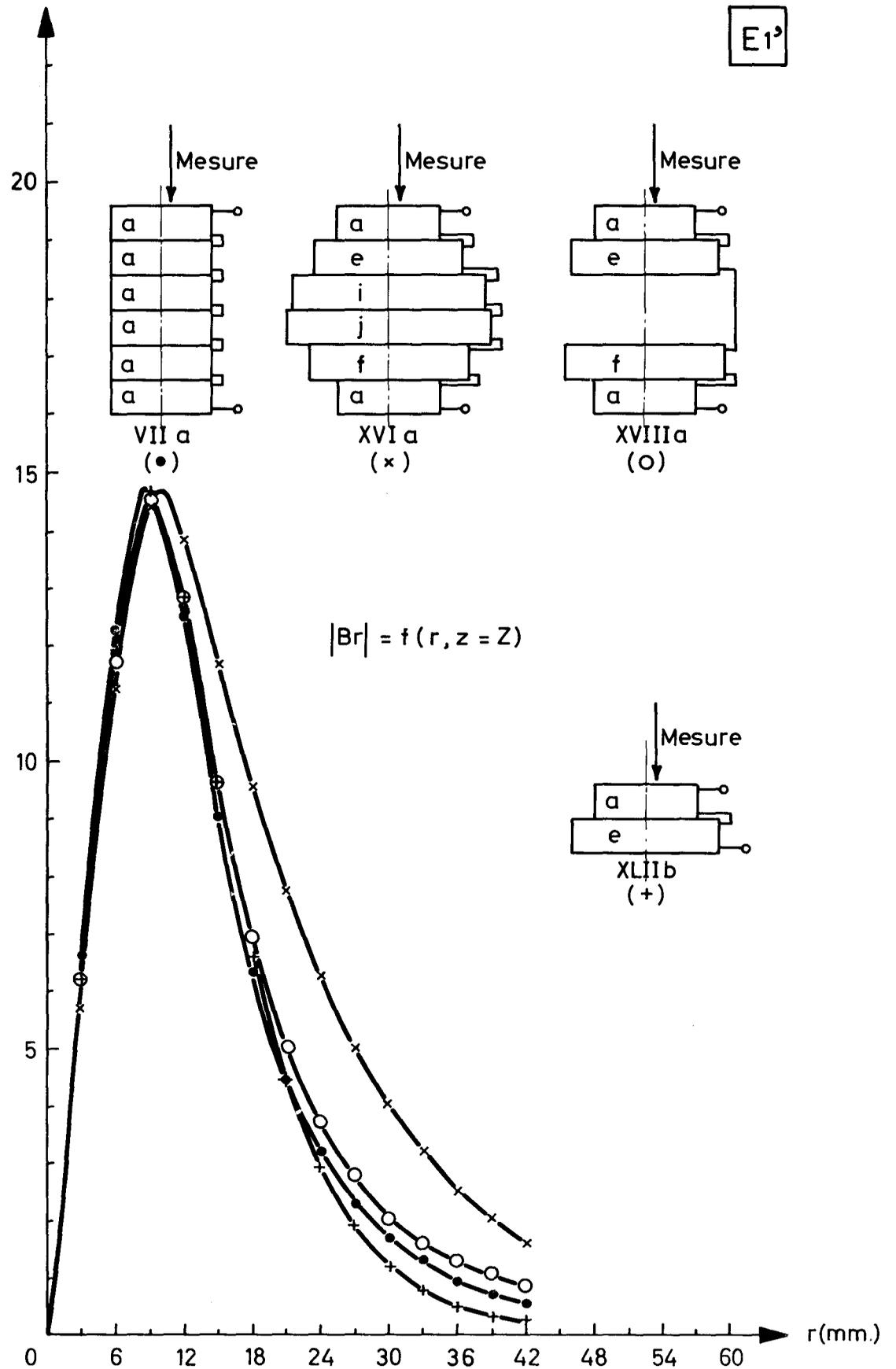
$|Bz| 10^{+8} \text{ mVeff. mm.}^{-2} \text{ sec}^{-1}$

E2



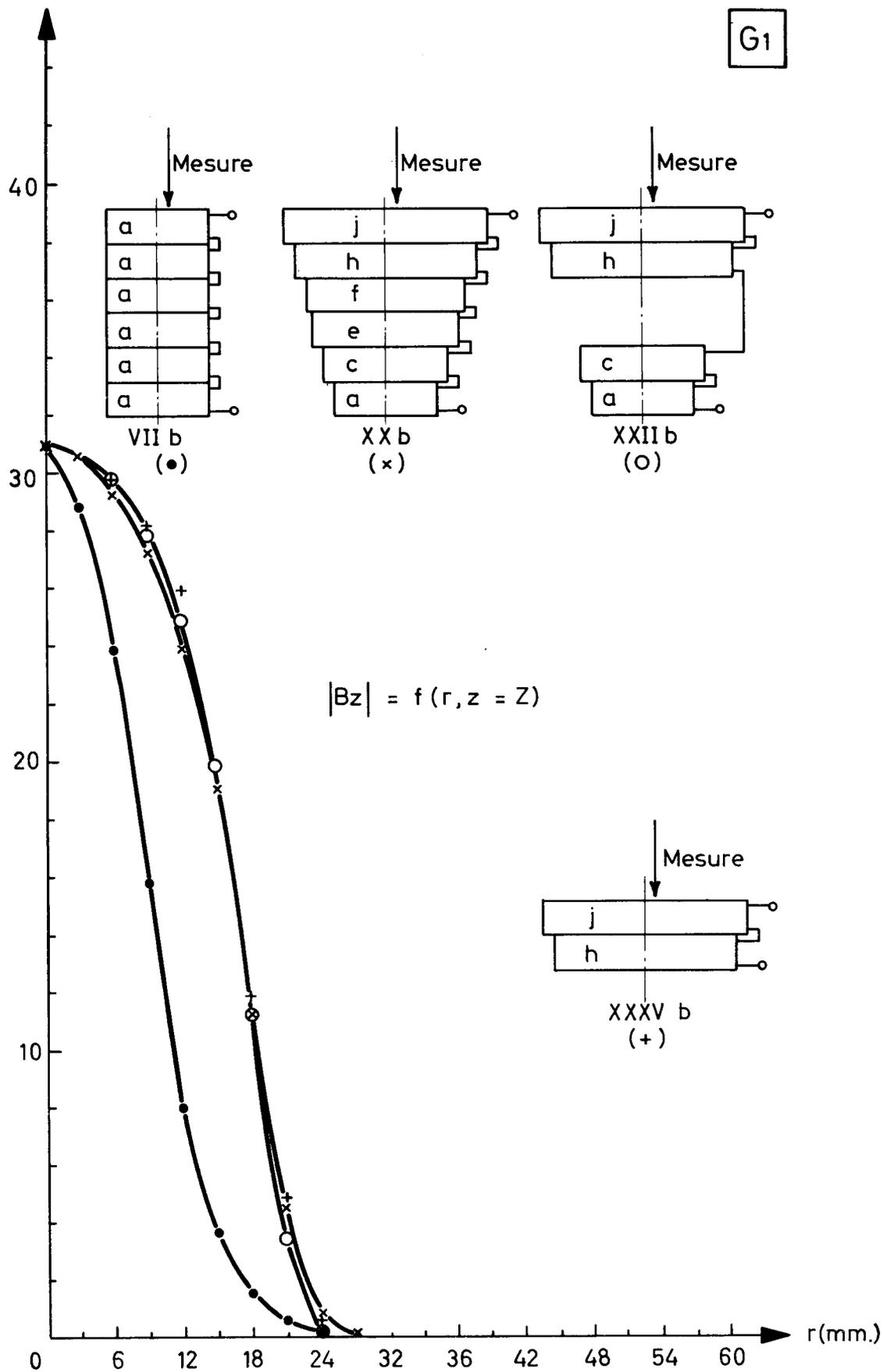
COMPARAISON DES GRAPHIQUES XVI a, XVIII a ET VII a APRES EGALISATION DES MAXIMA (Z=5,5 mm.)

$$|Br|10^{+8} \text{ mVeff. mm.}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$



COMPARAISON DES GRAPHIQUES XXb, XXIIb ET VIIb APRES EGALISATION DES MAXIMA (Z=5,5 mm)

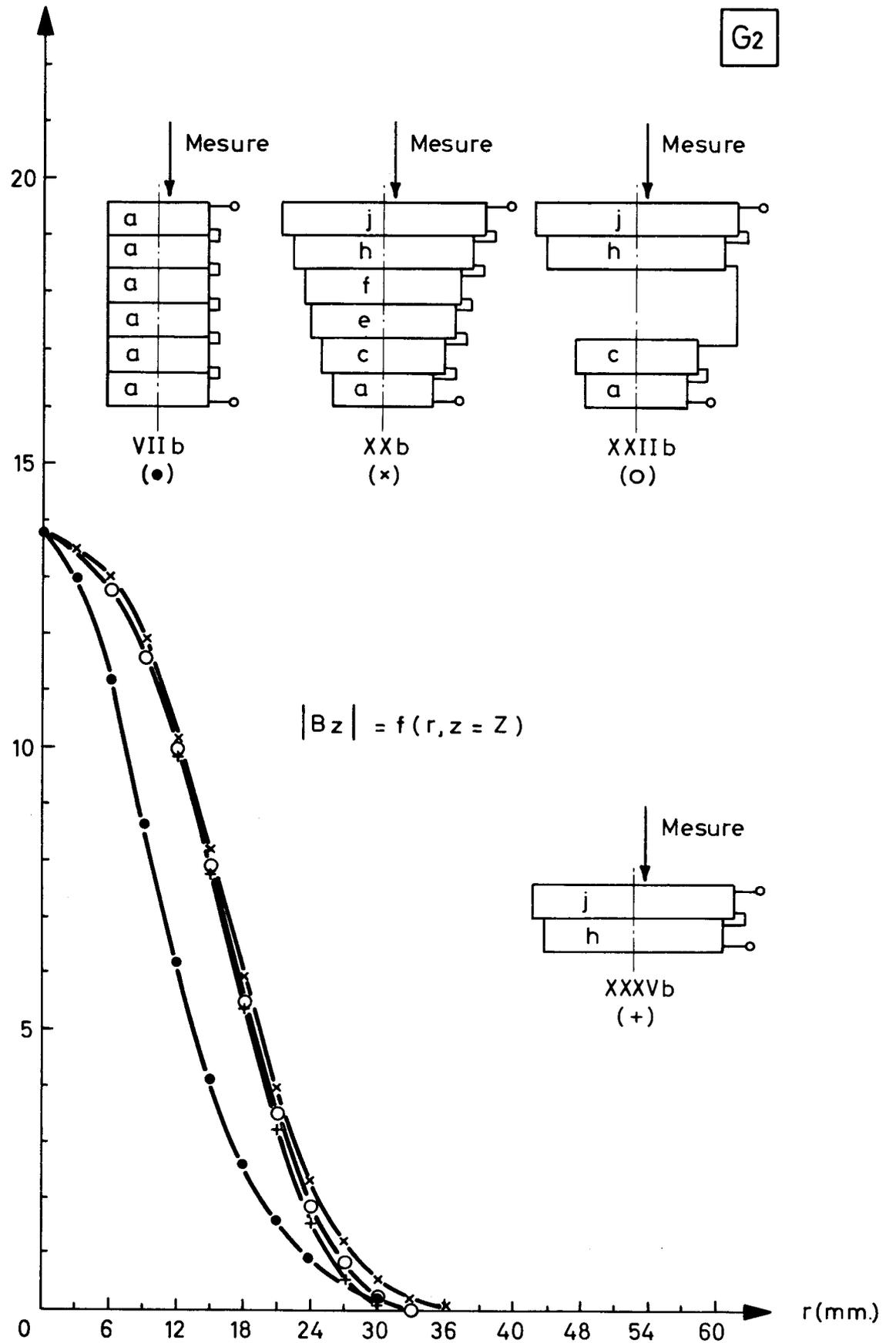
$|Bz| 10^8 \text{ mVeff. mm.}^{-2} \text{ sec}^{-1}$



COMPARAISON DES GRAPHIQUES XXb, XXIIb, ET VIIb  
APRES EGALISATION DES MAXIMA (Z=11,5mm.)

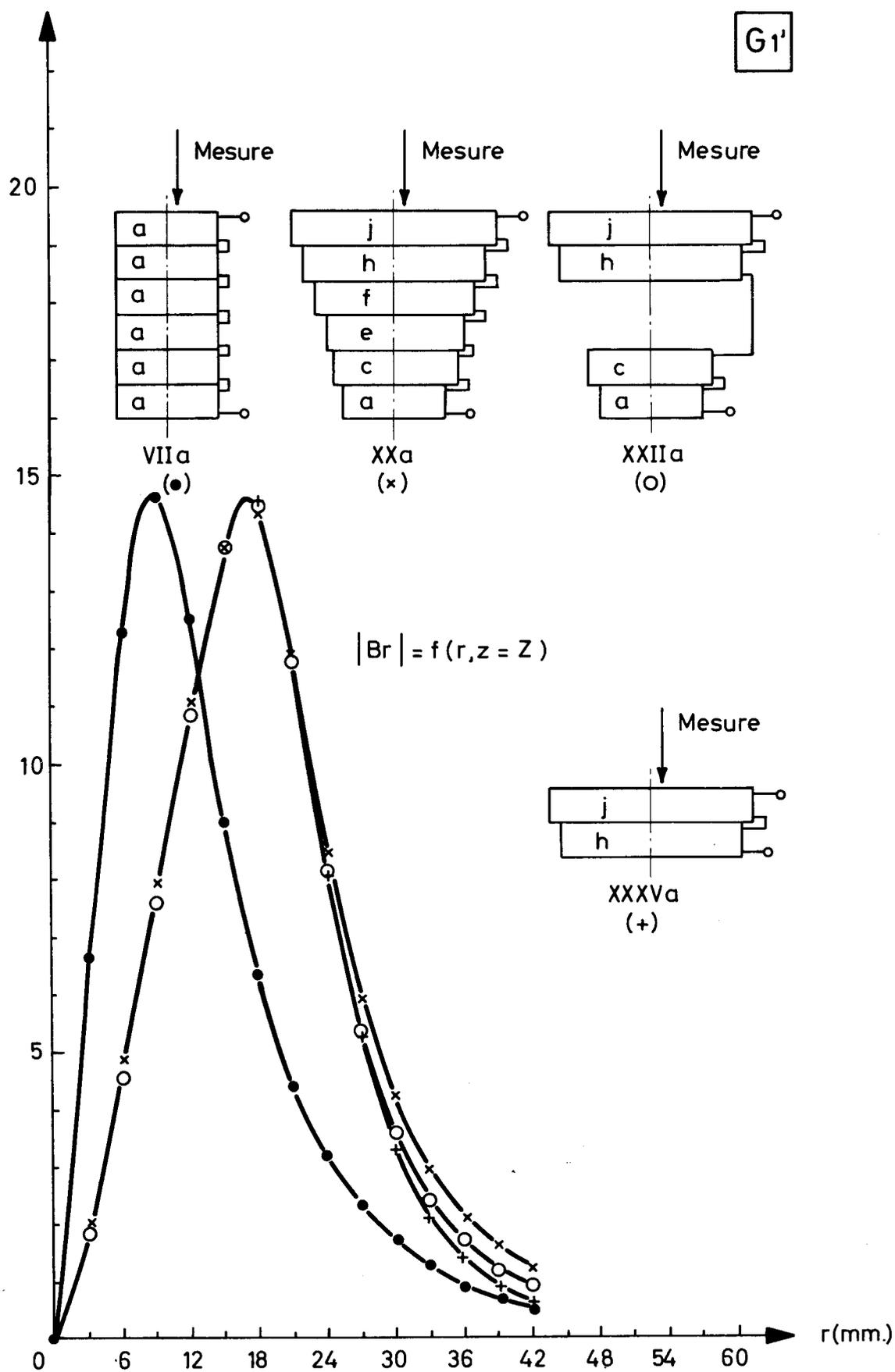
$|B_z| \cdot 10^8 \text{ m Veff. mm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$

G2



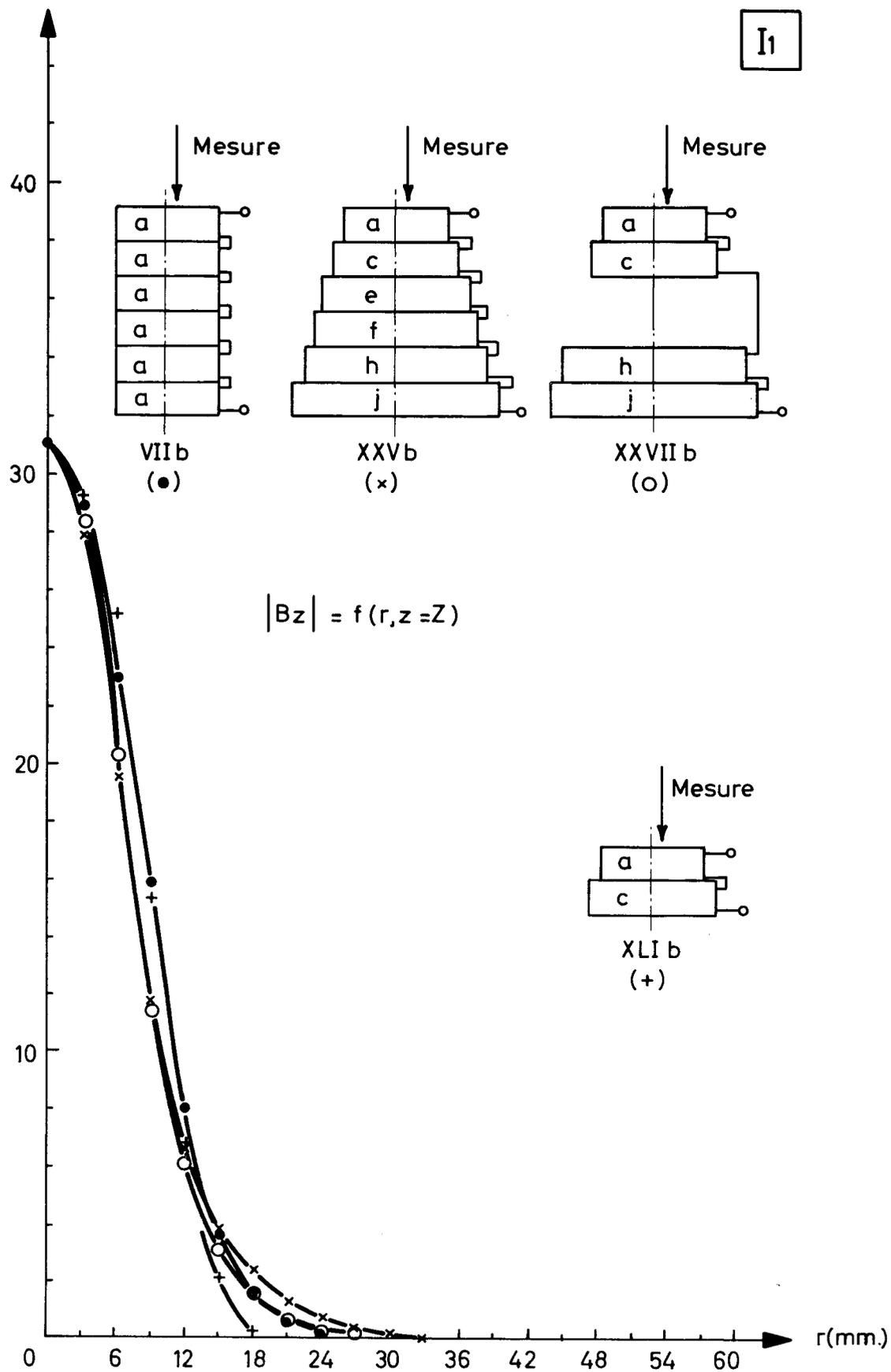
COMPARAISON DES GRAPHIQUES XXa, XXIIa, ET VIIa  
APRES EGALISATION DES MAXIMA (Z=5,5mm.)

$|\text{Br}| 10^8 \text{ m Veff. mm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$



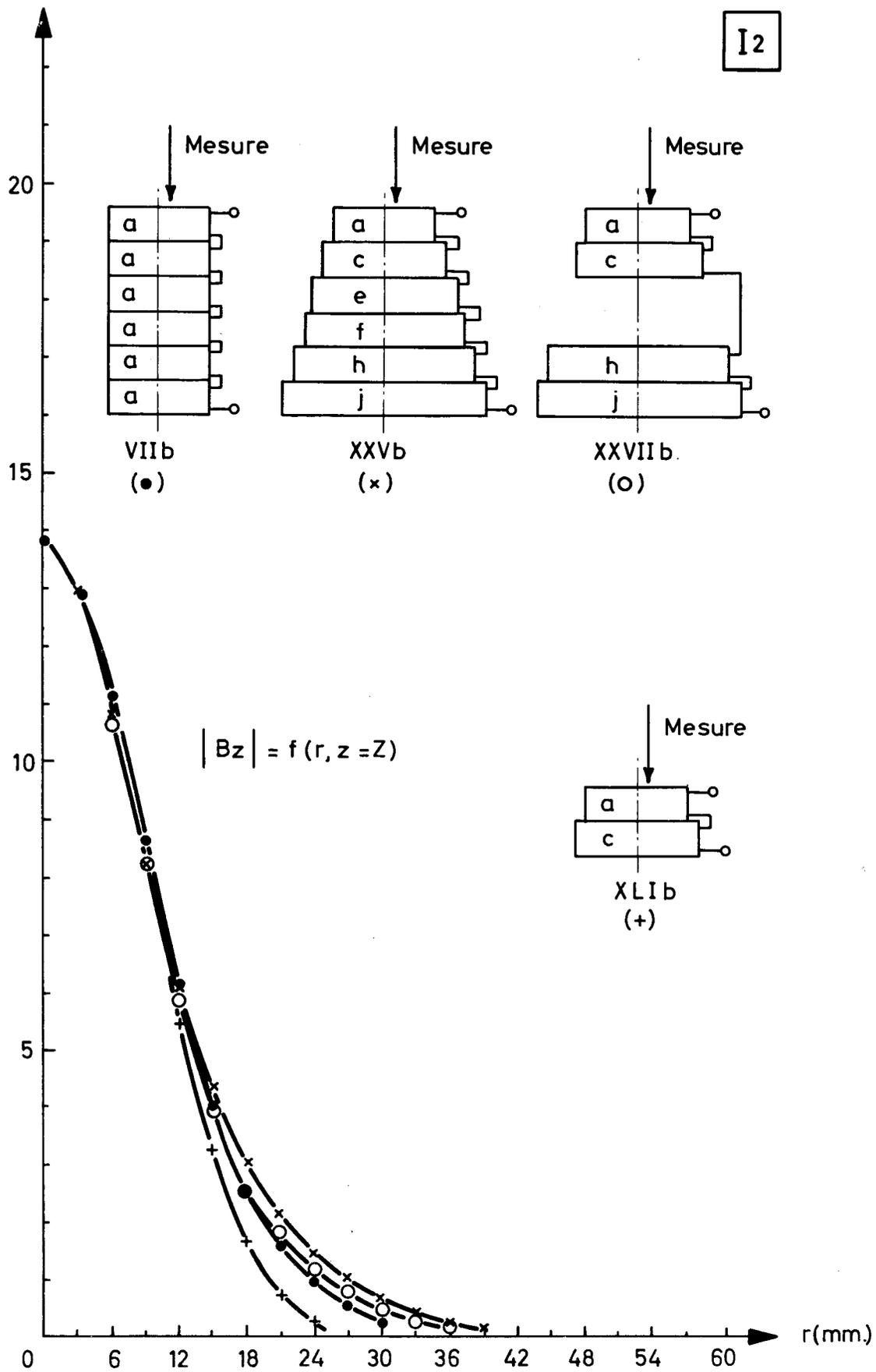
COMPARAISON DES GRAPHITE XXVb, XXVIIb, ET VIIb  
APRES EGALISATION DES MAXIMA (Z=5,5mm.)

$|B_z| \cdot 10^8 \text{ m Veff. mm.}^{-2} \text{ sec}^{-1}$



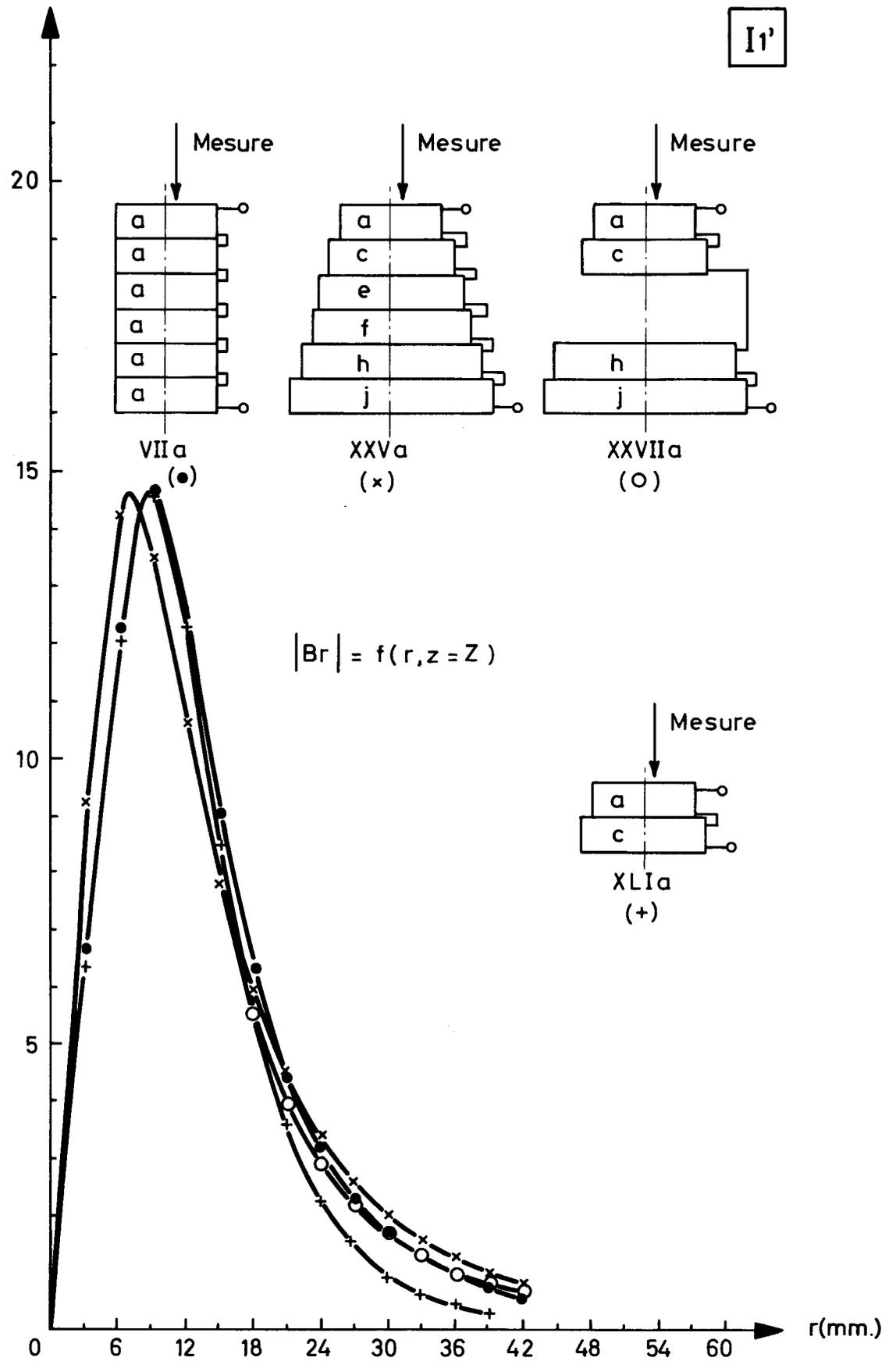
COMPARAISON DES GRAPHIQUES XXVb, XXVIIb, ET VIIb  
APRES EGALISATION DES MAXIMA (Z=11,5 mm.)

$|B_z| \cdot 10^{-8} \text{ m Veff. mm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$



COMPARAISON DES GRAPHIQUES XXVa, XXVIIa, ET VIIa  
APRES EGALISATION DES MAXIMA (Z=5,5 mm.)

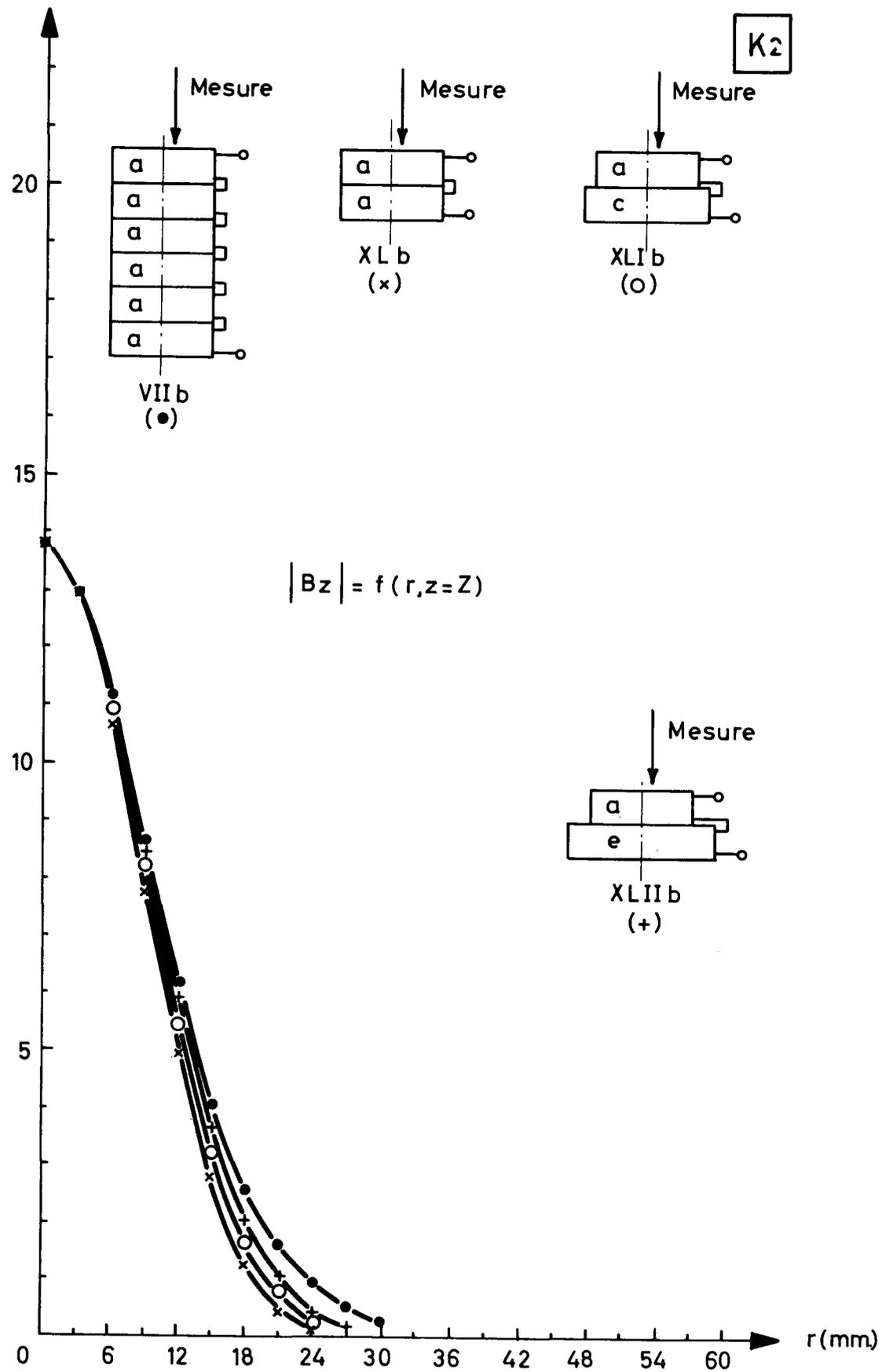
$|Br| \cdot 10^8 \text{ m Veff. mm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$





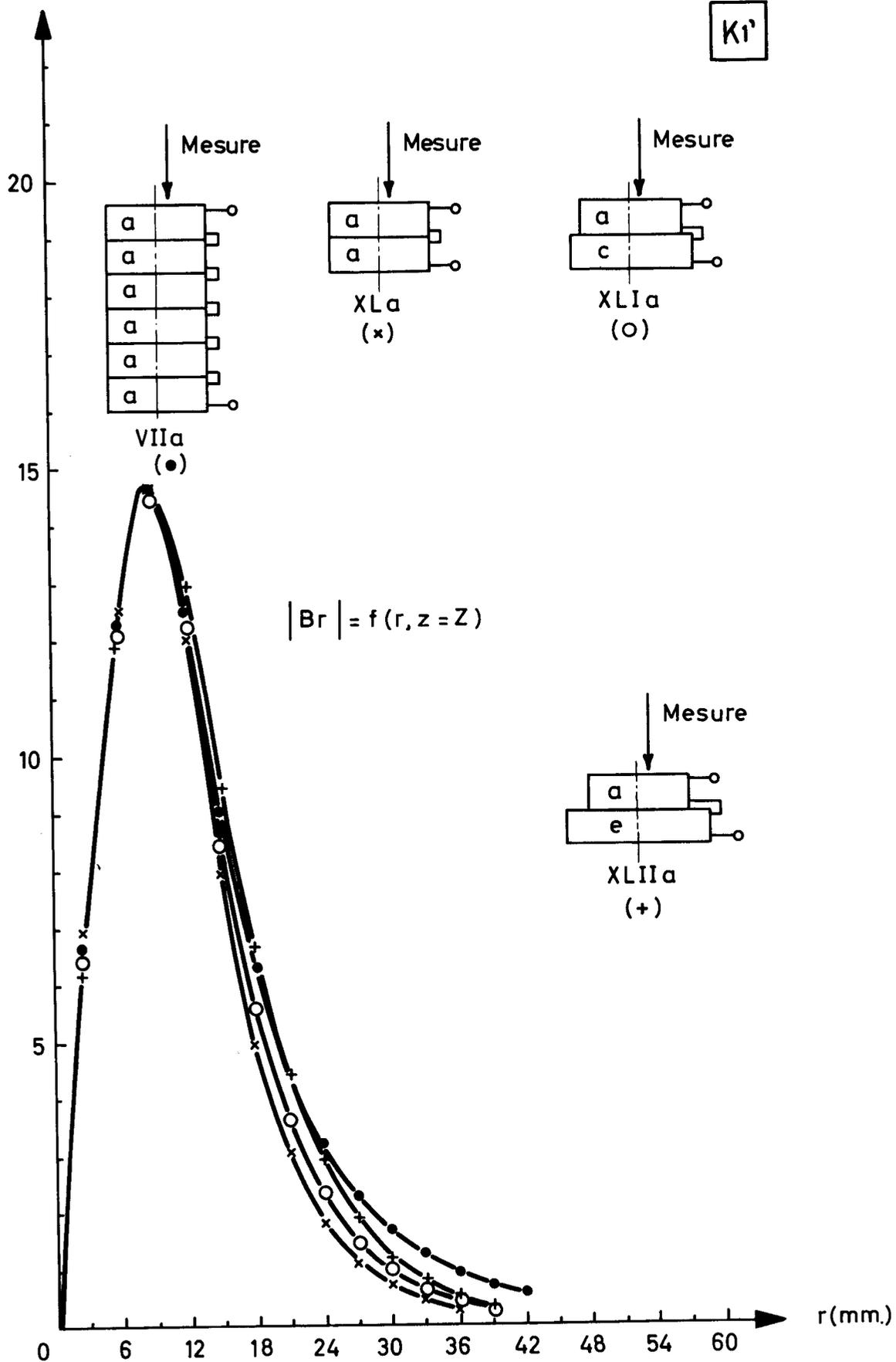
COMPARAISON DES GRAPHIQUES XLb, XLIIb, XLIIb, ET VIIb, APRES EGALISATION DES MAXIMA (Z=11,5 mm)

$|B_z| \cdot 10^8 \text{ m Veff. mm}^2 \text{ sec}^{-1}$



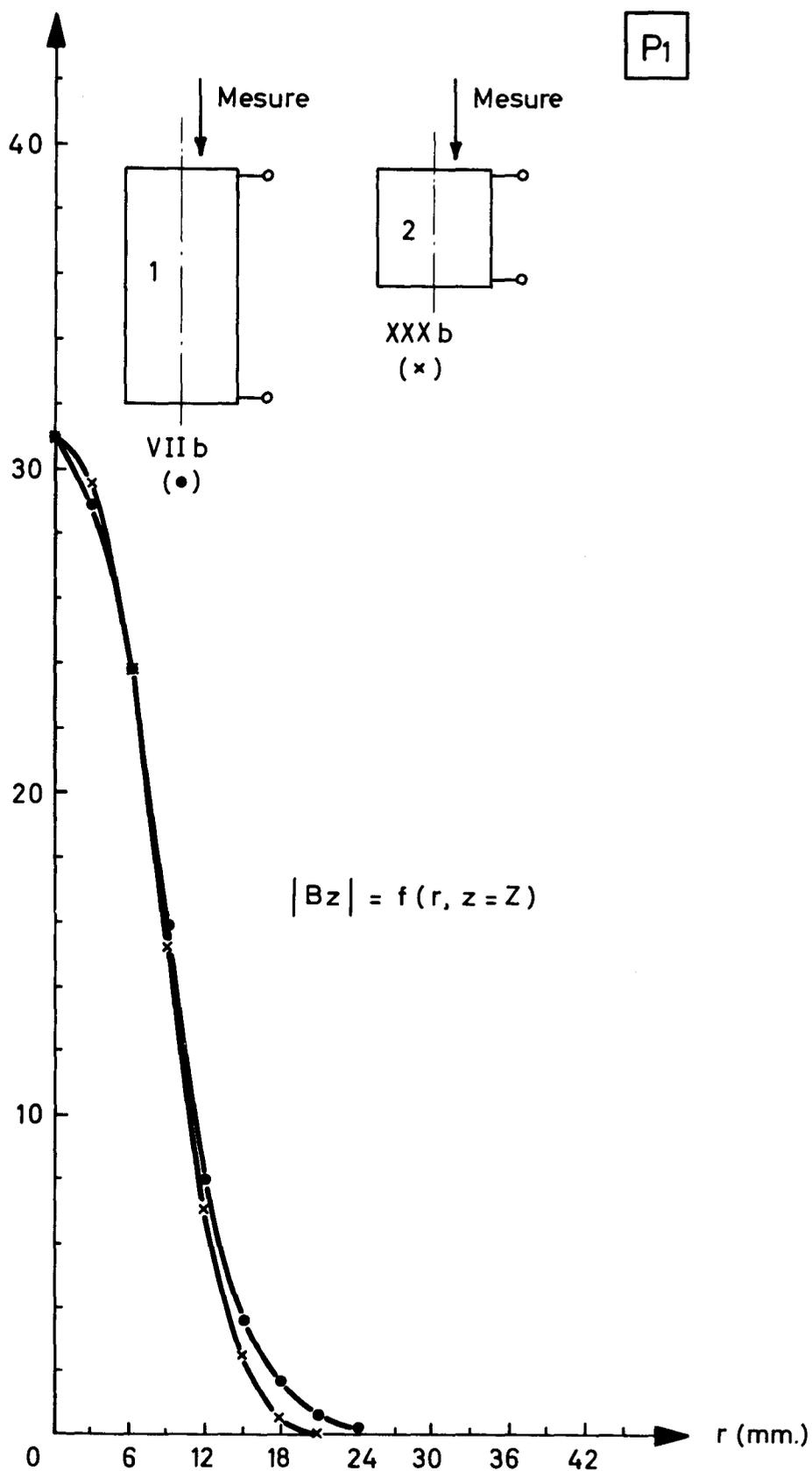
COMPARAISON DES GRAPHIQUES XL<sub>a</sub>, XLI<sub>a</sub>, XLII<sub>a</sub> ET VII<sub>a</sub>, APRES EGALISATION DES MAXIMA (Z = 5,5 mm.)

$|Br| \cdot 10^8 \text{ m Veff. mm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$



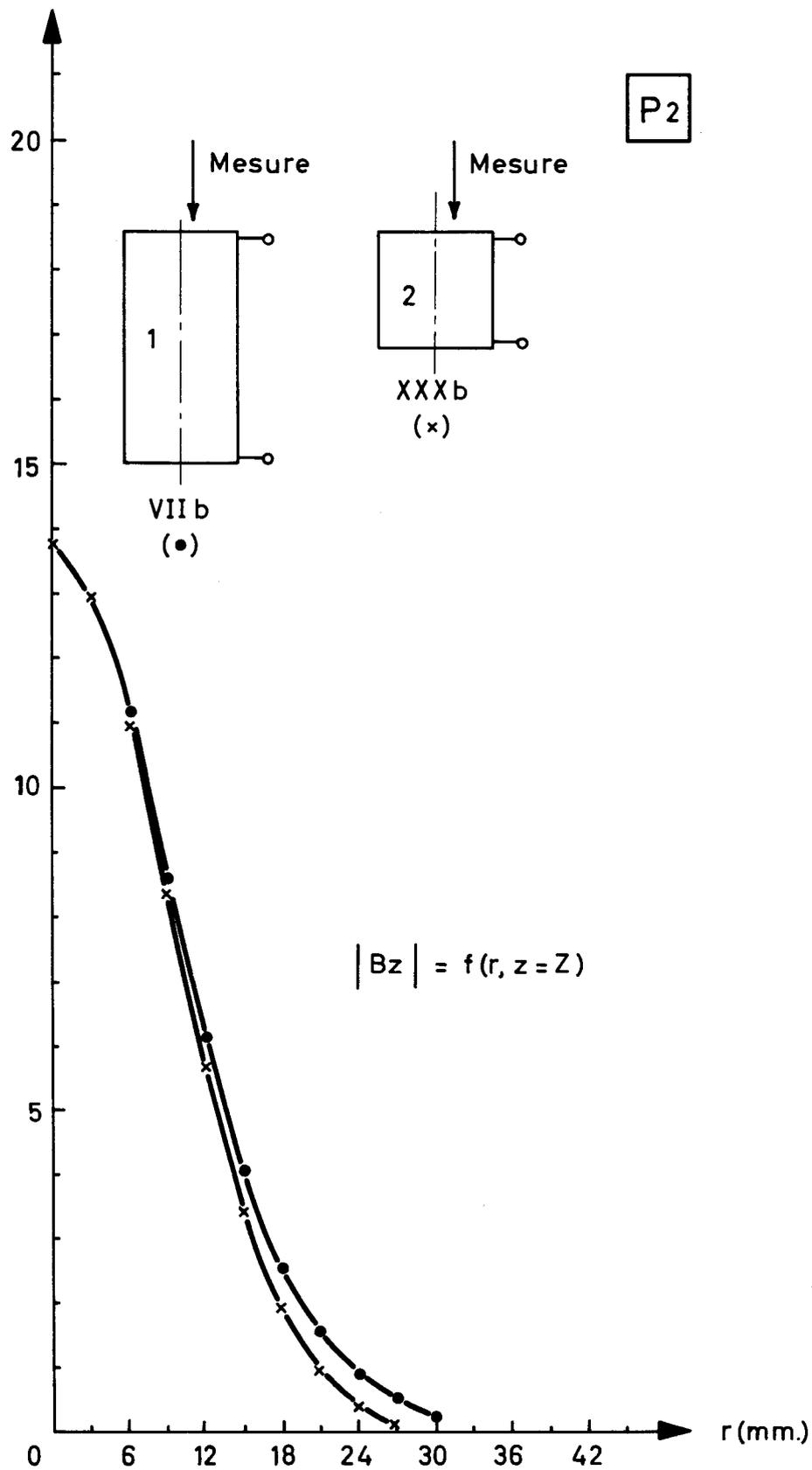
COMPARAISON DES GRAPHIQUES VIIb ET XXXb  
 APRES EGALISATION DES MAXIMA (Z = 5,5 mm.)

$|B_z| \cdot 10^8 \text{ m Veff. mm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$



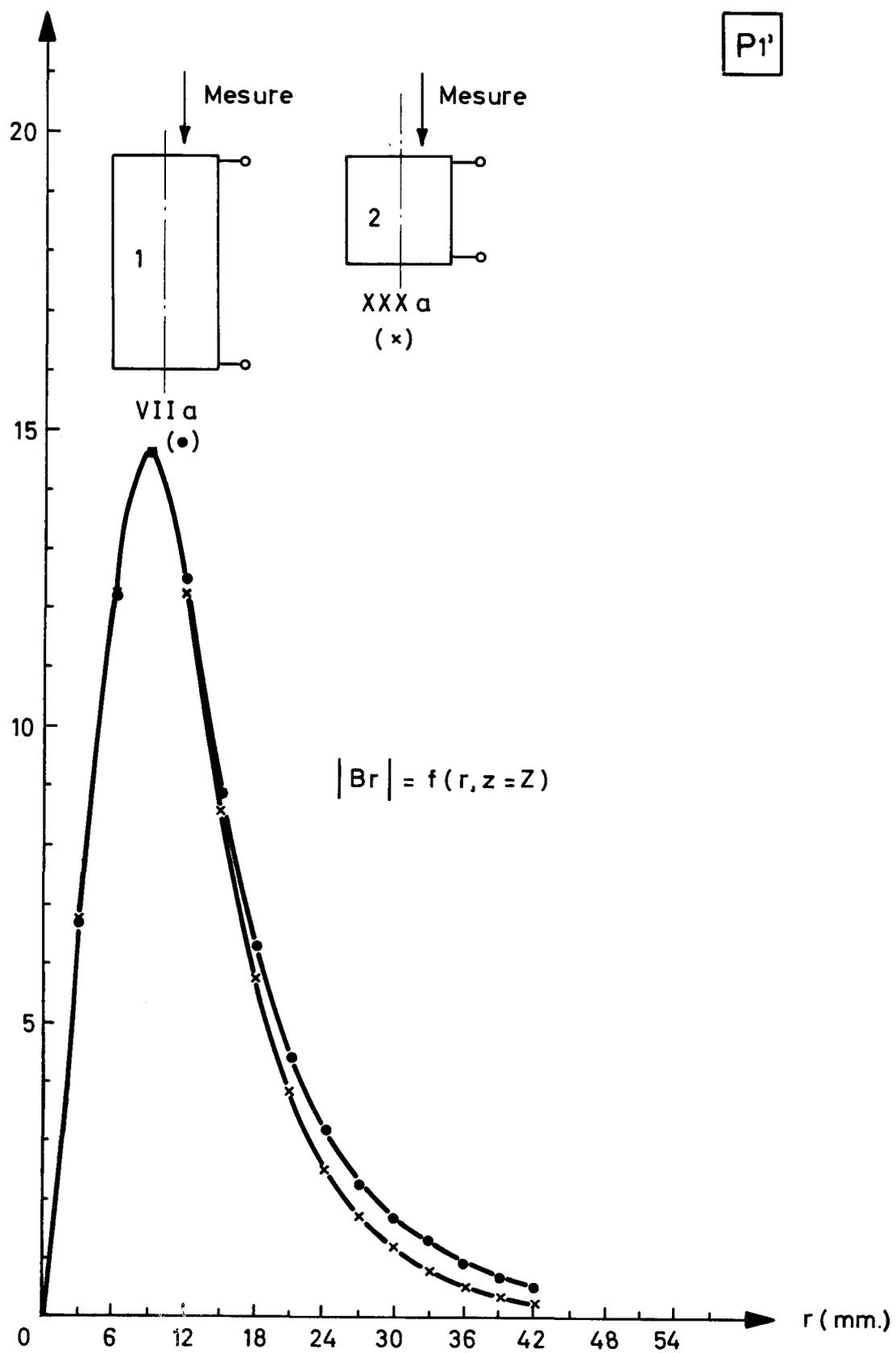
COMPARAISON DES GRAPHIQUES VII b ET XXX b  
 APRES EGALISATION DES MAXIMA (Z=11,5mm)

$|Bz| \cdot 10^8 \text{ m Veff. mm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$



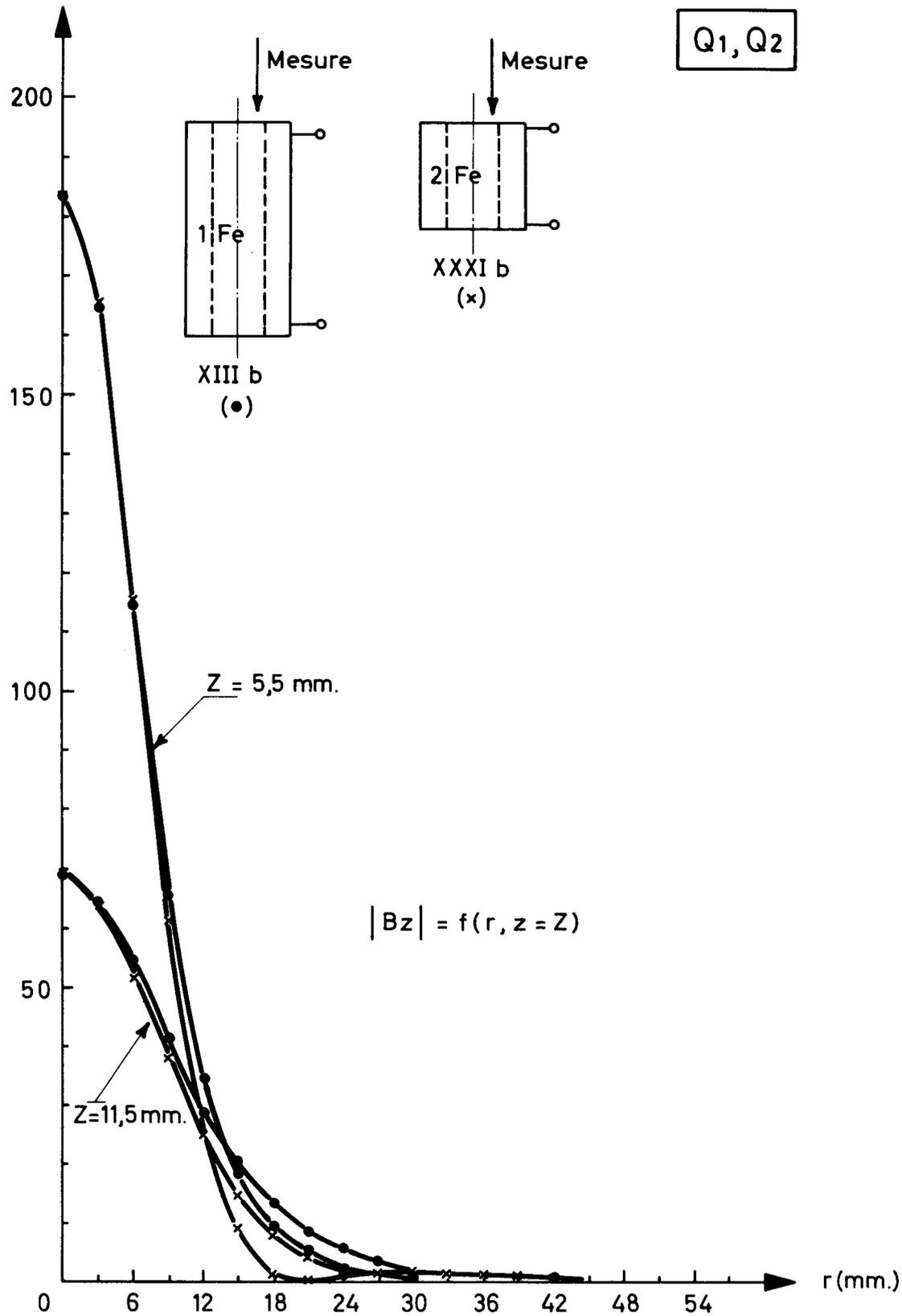
COMPARAISON DES GRAPHIQUES VIIa ET XXXa  
 APRES EGALISATION DES MAXIMA (Z = 5,5 mm.)

$|Br| \cdot 10^8 \text{ m Veff. mm}^2 \text{ sec}^{-1}$



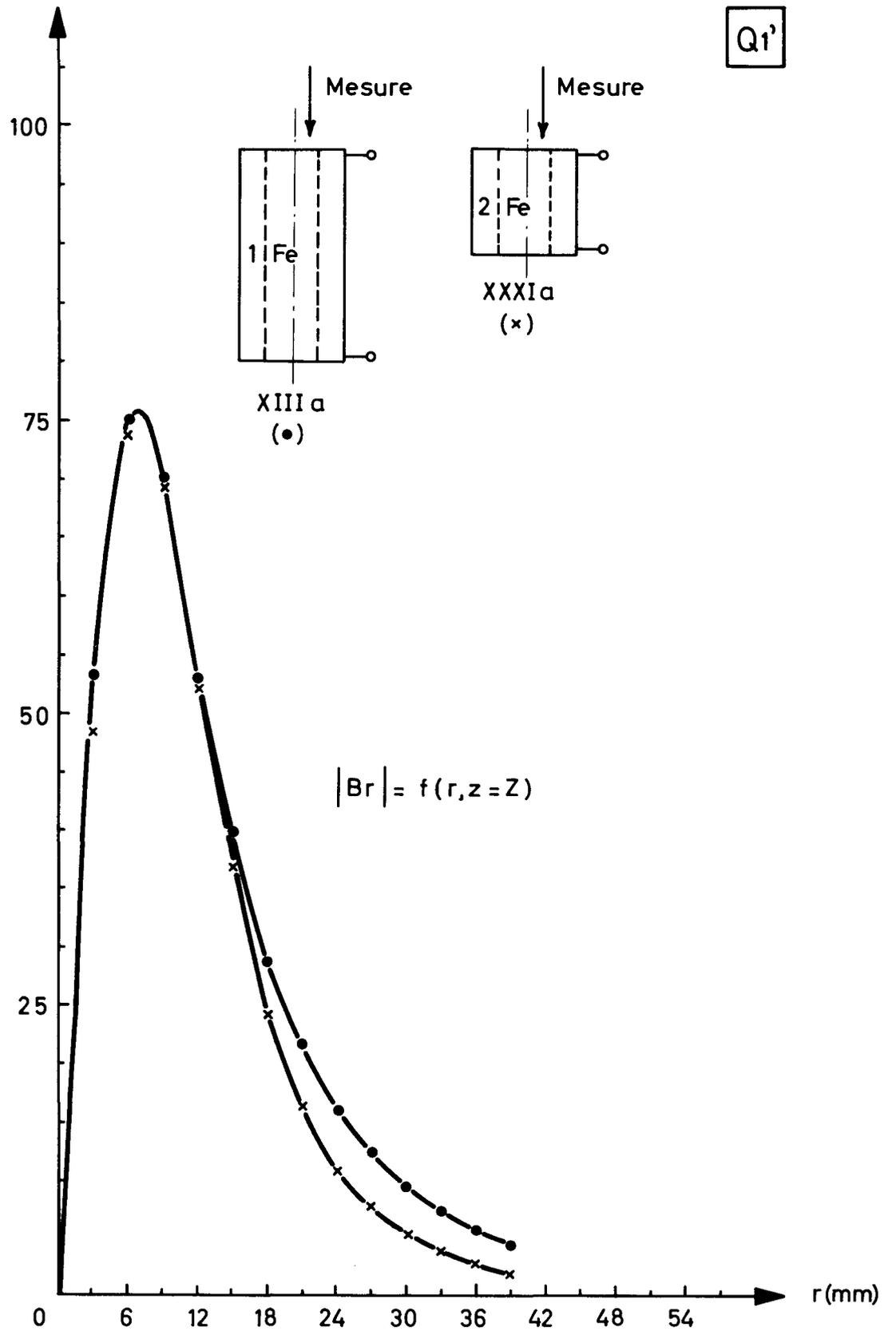
COMPARAISON DES GRAPHIQUES XIII b ET XXXI b APRES  
EGALISATION DES MAXIMA (Z = 5,5 mm. ET Z = 11,5 mm.)

$$|B_z| 10^{+8} \text{ m Veff. mm.}^{-2} \text{ sec.}^{-1}$$



COMPARAISON DES GRAPHIQUES XIIIa ET XXXIa  
APRES EGALISATION DES MAXIMA (Z = 5,5 mm)

$|Br| 10^8 \text{ m Veff. mm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$



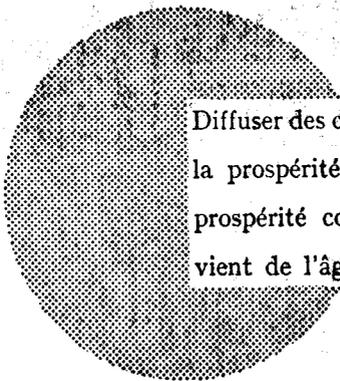
## AVIS AU LECTEUR

Tous les rapports Euratom sont signalés, au fur et à mesure de leur publication, dans le périodique mensuel **EURATOM INFORMATION**, édité par le Centre d'information et de documentation (CID). Pour souscrire un abonnement (1 an : FF 75, FB 750) ou recevoir un numéro spécimen, prière d'écrire à :

**Handelsblatt GmbH**  
**"Euratom Information"**  
**Postfach 1102**  
**D-4 Düsseldorf (Allemagne)**

ou à

**Office de vente des publications**  
**des Communautés européennes**  
**2, Place de Metz**  
**Luxembourg**



Diffuser des connaissances c'est distribuer de la prospérité — j'entends la prospérité collective et non la richesse individuelle — et cette prospérité contribue largement à la disparition du mal qui nous vient de l'âge des ténèbres.

**Alfred Nobel**

## BUREAUX DE VENTE

Tous les rapports Euratom sont vendus dans les bureaux suivants, aux prix indiqués au verso de la première page de couverture (lors de la commande, bien indiquer le numéro EUR et le titre du rapport, qui figurent sur la première page de couverture).

### OFFICE CENTRAL DE VENTE DES PUBLICATIONS DES COMMUNAUTÉS EUROPEENNES

2, place de Metz, Luxembourg (Compte chèque postal N° 191-90)

#### BELGIQUE — BELGIË

MONITEUR BELGE  
40-42, rue de Louvain - Bruxelles  
BELGISCH STAATSBLAD  
Leuvenseweg 40-42, - Brussel

#### LUXEMBOURG

OFFICE CENTRAL DE VENTE  
DES PUBLICATIONS DES  
COMMUNAUTÉS EUROPEENNES  
9, rue Goethe - Luxembourg

#### DEUTSCHLAND

BUNDESANZEIGER  
Postfach - Köln 1

#### NEDERLAND

STAATSDRUKKERIJ  
Christoffel Plantijnstraat - Den Haag

#### FRANCE

SERVICE DE VENTE EN FRANCE  
DES PUBLICATIONS DES  
COMMUNAUTÉS EUROPEENNES  
26, rue Desaix - Paris 15<sup>e</sup>

#### ITALIA

LIBRERIA DELLO STATO  
Piazza G. Verdi, 10 - Roma

#### UNITED KINGDOM

H. M. STATIONERY OFFICE  
P. O. Box 569 - London S.E.1

EURATOM — C.I.D.  
51-53, rue Belliard  
Bruxelles (Belgique)