

INFLUENCE DE LA FORME DES CYCLES D'IMPULSIONS SUR LE CHAMP REMANENT

(Maquettes V - VI - VII)

Ce rapport contient les résultats d'une étude systématique du comportement du champ remanent dans les maquettes à l'échelle 1 en fonction des paramètres qui caractérisent les cycles d'impulsions.

Il comprend quatre parties:

Introduction
Dispositif de mesures
Résultats des mesures
Conclusions.

Introduction.

Les premières mesures du champ rémanent, effectuées sur la maquette III (maquette à l'échelle $\frac{1}{3}$, toles de 45 mm) (CERN-PS/MM 8) ont révélé:

- a) que le champ rémanent diffère le long de l'orbite d'équilibre;
et
- b) qu'en chaque point, sa valeur dépend de la forme des cycles d'aimantation qui ont précédé la mesure.

L'effet a) s'explique par les variations des caractéristiques magnétiques des matériaux constituant les différentes tôles: comme nous l'avons vérifié en mesurant celles-ci (CERN-PS MM 10 - MM 18).

L'effet b) provient de deux choses:

- b₁) la succession des valeurs du courant d'aimantation (c.à.d. la courbe d'hystérésis que l'on fait suivre au matériel.
- b₂) la loi de variation du courant en fonction du temps.

L'effet b₁ a été étudié séparément au moyen de cycles d'aimantation lents. Cette étude a montré que dans toutes les mesures de comparaison qui nous intéressent cet effet ne produit pas de variations appréciables à condition d'atteindre la saturation pourvu que le courant ne devienne jamais négatif.

L'effet b₂ peut être expliqué par l'influence des courants de Foucault produits dans le fer par la variation rapide du champ magnétique: les mesures faites pour obtenir la loi de variation du rémanent après l'arrêt du courant ont donné une constante de temps qui correspond à la valeur calculable théoriquement pour les courants de Foucault dans les plaques

Lors de mesures préliminaires en impulsions sur la maquette V (profil ouvert; échelle 1; tôles de 1 mm) (rapport CERN=PS/MM 14 et 15) un autre effet a été mis en évidence: celui-ci consiste en une réduction progressive de la valeur du champ remanent du centre aux extrémités de l'aimant, après les cycles d'impulsions. Cette réduction augmente avec la vitesse de descente à zero du courant; par contre on n'a pas détecté de différences pour différentes vitesses de montées.

Cet effet a été attribué aux courants de Foucault induits dans les tôles par les composantes transversales du flux: Cet effet n'a pas été observé dans la maquette 3 parce qu'il était masqué par les effets des courants de Foucault dus au flux principal. A une certaine distance du centre de l'aimant le gradient du champ et la loi de variation de n en fonction du déplacement radial Δy dépendent eux aussi de la vitesse du cycle (CERN=PS/MM 15).

L'ensemble de ces résultats a montré que les valeurs du champ remanent et de son gradient dans l'entrefer de la machine dépendent de la forme du cycle d'alimentation. Ces considérations nous ont conduit à faire une série de mesures systématiques sur les 3 maquettes V - VI et VII dont les résultats sont exposés dans ce rapport.

Dispositif de mesures.

Pour obtenir une précision suffisante dans les comparaisons, le dispositif à bobines tournantes, déjà décrit dans le rapport CERN=PS/MM 5, a été modifié de façon à permettre l'emploi d'une méthode de zéro pour la mesure du champ. Un système de deux bobines a été monté sur la tige qui porte les bobines sondes, bien en dehors de l'aimant. Ces bobines tournent au centre de deux bobines d'Helmoltz fixes, montées sur la base qui porte le stator du moteur. Elles sont liées rigidement et peuvent être orientées autour de l'axe de rotation du système. Les deux bobines de chaque couple sont connectées

en série de telle façon que l'ensemble constitue un système astatique.

Lorsqu'on alimente les bobines d'Helmoltz en courant continu on peut recueillir, au moyen d'un collecteur, aux bornes du couple de bobines tournantes un signal ayant une composante en parfait synchronisme avec le signal des bobines sondes, et comprenant divers harmoniques. Le plus important d'entre eux est l'harmonique 5, les harmoniques inférieurs étant éliminés par la géométrie des bobines d'Helmoltz. Pratiquement il est apparu préférable d'alimenter les bobines tournantes et de recueillir le signal aux bornes des bobines d'Helmoltz, pour rendre négligeable l'influence des flux de fuites de l'aimant à étudier, ce qui naturellement ne change rien aux considérations précédentes..

Le signal obtenu est opposé à celui qui sort de la bobine sonde, placée à la position voulue dans l'aimant. Le signal résultant est envoyé sur un oscilloscope, à travers un amplificateur sélectif à gain élevé. L'opposition en phase des deux signaux peut être obtenue en orientant convenablement les bobines d'Helmoltz et de petites retouches peuvent être faites au moyen d'un condensateur variable en parallèle, de capacité assez faible pour ne pas changer d'une façon appréciable la valeur du signal. Le zéro qui est observé sur l'oscilloscope est obtenu en réglant le courant dans les bobines tournantes auxiliaires.

La sensibilité du système est meilleure que $5 \cdot 10^{-4}$, mais la présence de fluctuations dues sans doute à l'aimantation remanente des roulements à billes supportant l'arbre, et au bruit des balais, a réduit la reproductibilité des mesures du champ remanent à $\pm 0,2$ o/o. (Un nouveau système sans roulement à billes en acier est actuellement en construction).

La complexité de ce circuit nécessite d'étudier avec beaucoup de soins les questions de blindage et de masse.

La valeur de n sur l'orbite d'équilibre a aussi été mesurée par une méthode de zéro réalisée en opposant entr'elles les tensions de sortie des bobines sondes, dont l'une d'entr'elles était convenablement atténuée.

Résultats des mesures.

Maquette V (tôles de 1 mm - forme ouverte). Longueur 710 mm.

Les courbes de la fig.2 représentent les valeurs du champ remanent le long de l'orbite d'équilibre, après différents cycles. Les cycles correspondants sont schématisés sur la fig.1.

Les cycles standards que nous avons effectués sont:

- courbe a): cycle "lent" - montée lente à 14000 gauss (environ 40 sec) et descente lente (environ 100 sec).
- courbe b): cycle "rond" - montée du champ à 14000 gauss en 1,25 sec - inversion de l'excitation de la génératrice - descente du champ de 14000 gauss en remanent en 1,05 sec.
- courbe c): cycle "aigu" - montée à 14000 gauss en 1,1 sec - ouverture du circuit sur un pont d'ignitrons - descente au remanent en 0,8 sec environ.

Les courbes d) et e) correspondent à deux cycles lents, dont la fin de la descente est constituée par une partie à descente rapide, exécutée pour déterminer l'influence de la dernière partie du cycle.

- courbe d): descente rapide de 1400 gauss au remanent (en 0,3 sec)
- courbe e): descente rapide de 7200 gauss au remanent (en 1,1 sec).

Le champ remanent au centre de l'aimant reste le même après tous les cycles: il ne dépend que de la valeur maximum du champ que l'on atteint au cours du cycle, et non de la vitesse d'exécution du cycle.

Vers les extrémités de l'aimant, la réduction du champ remanent déjà remarquée croît avec la vitesse et la longueur de la descente. Cette réduction est plus faible si la descente rapide commence à 7.000 au lieu que de 14.000 gauss, et elle devient très petite lorsque cette descente rapide commence à 1400 gauss. Ceci vient de la constante de temps des courants de Foucault dans les tôles.

Cette constante de temps a pu être mesurée au moyen d'un enregistrement photographique de la loi de variation du champ remanent après coupure du courant d'excitation de l'aimant. (fig.3 - le signal sinusoïdal proportionnel à l'intensité du remanent est donné par une bobine tournante). La valeur trouvée est d'environ 0,5 sec. Cette valeur étant comparable avec la durée de la descente, la réduction du champ remanent produite par les courants de Foucault dépend de la vitesse de variation du champ dans toute la descente.

Par contre, nous n'avons remarqué, dans la loi de réduction du champ remanent après les cycles "rona" au "aigu", aucune différence qui puisse être attribuée à l'influence de la forme du sommet du cycle. La petite différence entre les deux courbes du champ remanent s'explique par la plus grande vitesse de descente obtenue dans le cycle "aigu".

Les courbes de la fig.4 représentant les valeurs de n_0 le long de l'orbite d'équilibre après des cycles identiques (n_0 en un point est défini par

$$n_0 = \left(\frac{\Delta B}{B_0} \cdot \frac{R_2}{4R} \right)$$

Les valeurs que nous obtenons pour n_{ϕ} dépendent elles aussi de la forme des cycles que nous avons effectués avant la mesure, sans toutefois présenter assez de différences pour qu'il soit possible d'en déduire une loi simple. On observe que les variations de n_{ϕ} le long de l'orbite d'équilibre après les cycles rapides ne sont pas plus grandes qu'après des cycles lents.

Maquette VI - (forme fermée - tôles 1 mm) - longueur 710 mm.

Les courbes du champ remanent et de n_{ϕ} après le cycle indiquées en fig.1 sont représentées fig.5 et 6. Ces figures correspondent aux fig.2 et 4 pour la maquette V.

Il n'y a aucune différence sensible entre le comportement des deux maquettes à la suite des différents cycles. Les considérations faites précédemment s'appliquent donc également à la maquette VI.

Maquette VII (forme ouverte - tôles 10 mm) - longueur 710 mm.

Les courbes des fig. 7 et 8 représentent les valeurs du champ remanent et de $n_{\phi} (= \frac{\Delta B_{\phi}}{B_{\phi}} \cdot \frac{R}{\Delta r})$ le long de l'orbite d'équilibre après un cycle "lent" et un cycle "rond" (fig.1).

En plus de la réduction du champ remanent vers les bords, déjà observée dans les autres maquettes, on a après le cycle rapide une diminution du champ remanent au centre de l'aimant (environ 20 o/o dans les cas mesurés). Ce phénomène peut encore être attribué aux courants de Foucault induits par la descente du champ: cette fois il s'agirait de courants circulant dans l'épaisseur des tôles.*

Les valeurs de n_{ϕ} sont aussi modifiées par cette influence.

* Le même phénomène a été observé dans la maquette III et au cours des mesures sur des tôles lors de l'étude des caractéristiques des matériaux.

Conclusions.

Les résultats des mesures du champ remanent effectuées sur les maquettes V, VI et VII confirment les considérations faites dans l'introduction.

En plus, ils nous fournissent des données quantitatives sur les variations du champ remanent dans la machine.

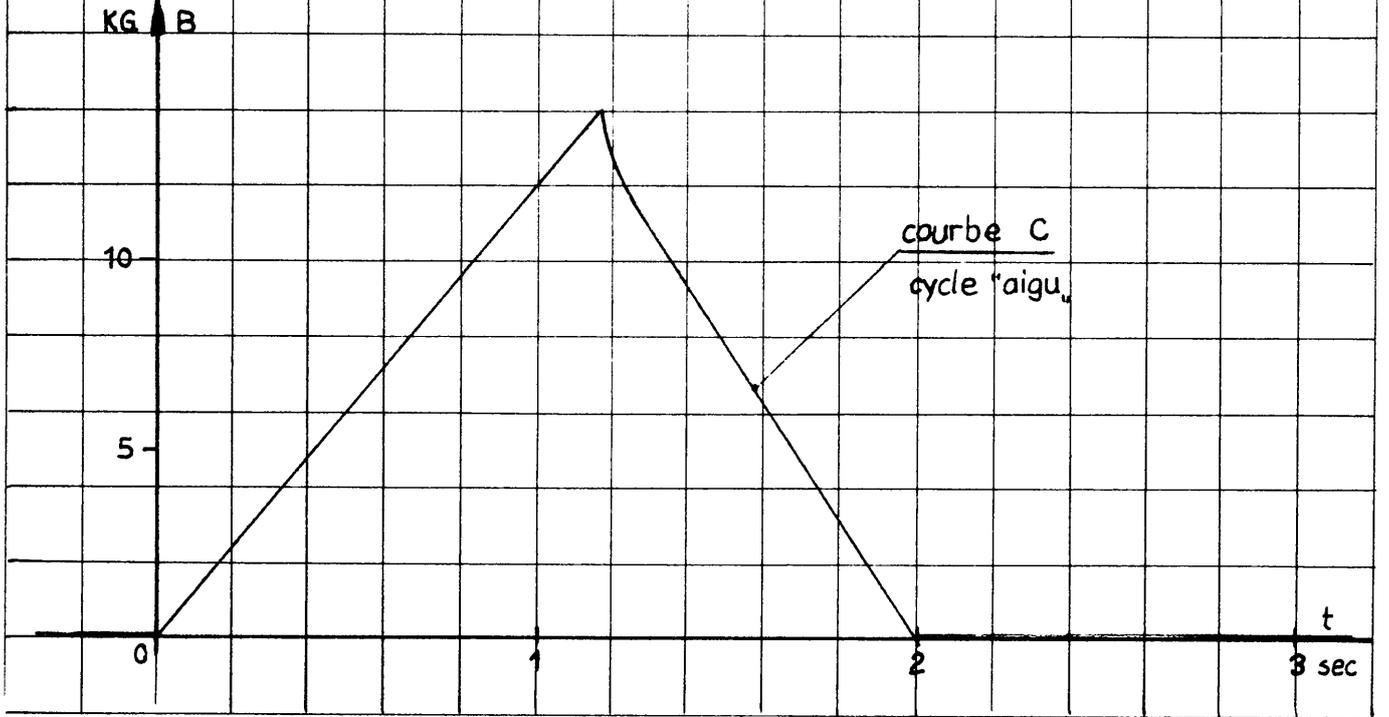
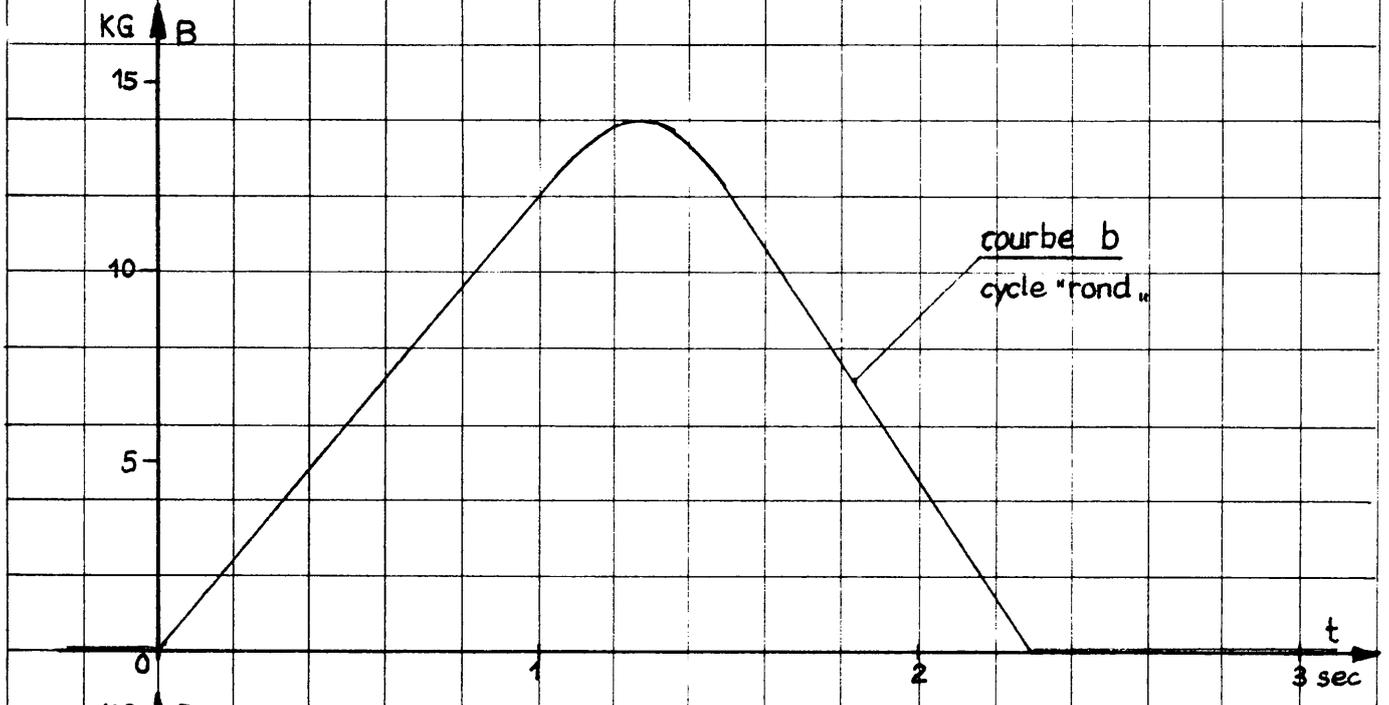
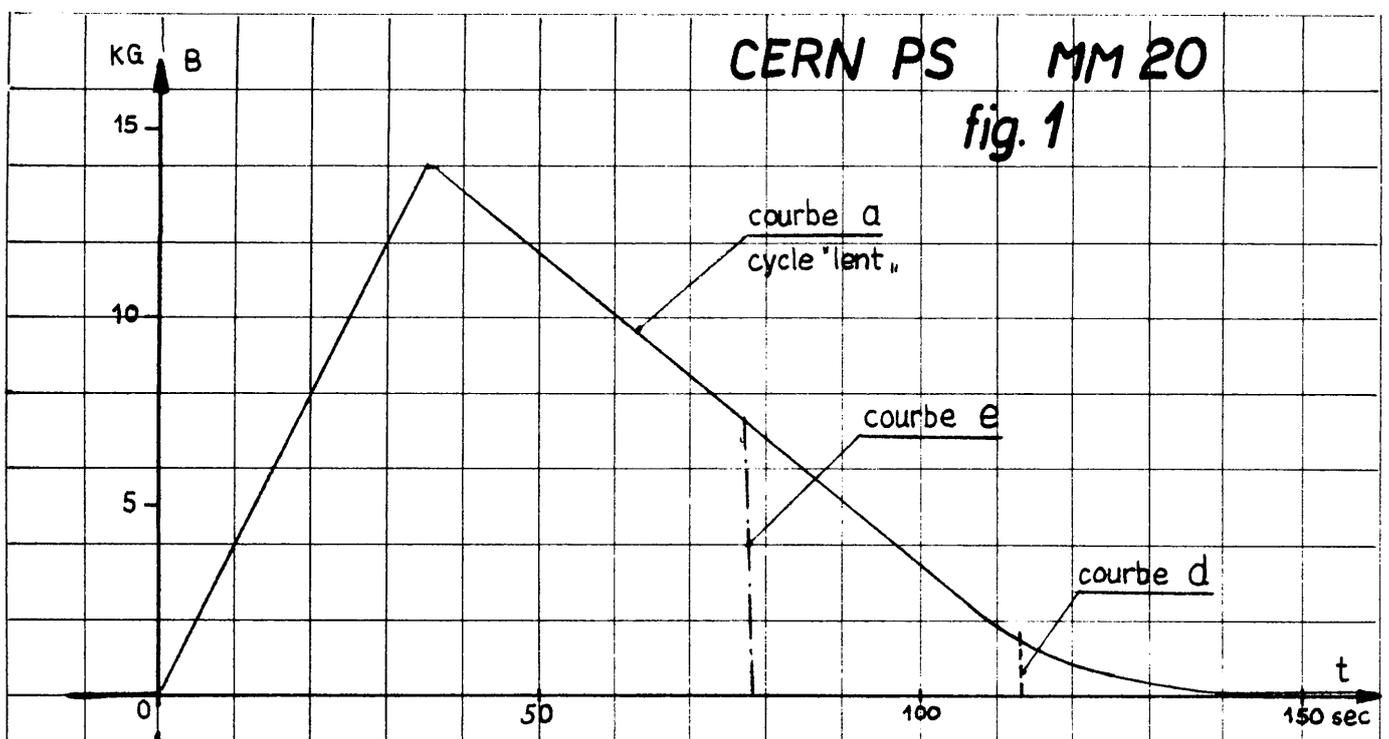
Le champ remanent au centre des blocs en tôles de 1 mm ne dépend que de la valeur maximum atteinte par le champ au cours du cycle à condition que le courant ne s'inverse jamais. Aux autres points de l'entrefer l'influence de la forme et de la durée de la descente est importante. Mais la longueur de la constante de temps des courants de Foucault dans les tôles rend négligeable l'influence de petites modifications de la courbe de descente dans les dernières centièmes de seconde.

Le fait que la forme du sommet du cycle n'a aucune influence spéciale sur le champ remanent nous autorise à envisager l'emploi d'un cycle "rond" au lieu d'un cycle "aigu" dans tout le programme de mesures sur les blocs et les unités de l'aimant.

Les irrégularités toujours présentes dans le champ remanent rappellent d'ailleurs la nécessité de réduire celui-ci, soit par l'emploi de matériaux à petit champ coercitif, soit au moyen de cycles qui permettent de désaimanter l'aimant.

CERN PS MM 20

fig. 1



Maquette IV

Champ rémanent le long de l'orbite d'équilibre

- 1 Champ rémanent après montée et descente lente
- 2 après cycle lent et descente lente
- 3 après cycle lent et descente rapide de 1400 gauss
- 4 après cycle "rond"
- 5 après cycle "aigu"

B_z gauss

70

60

50

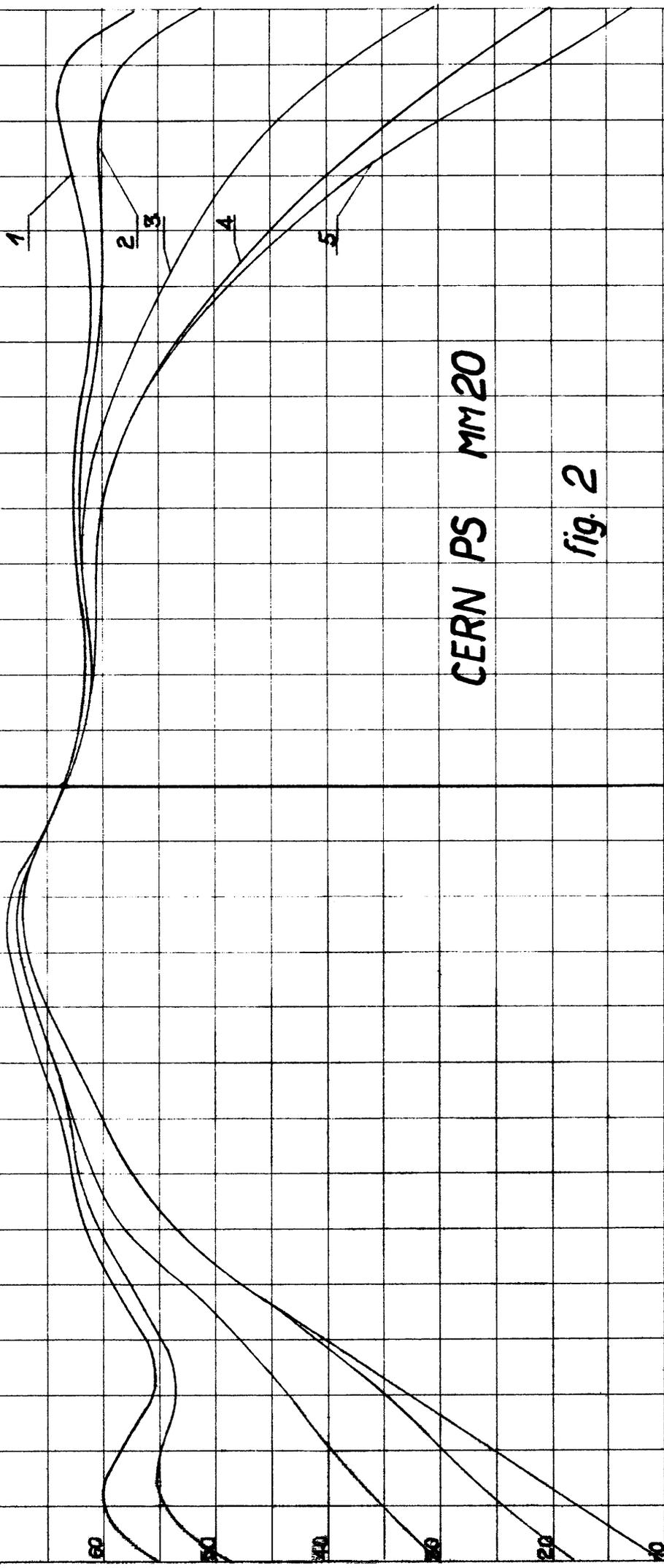
40

30

20

10

0



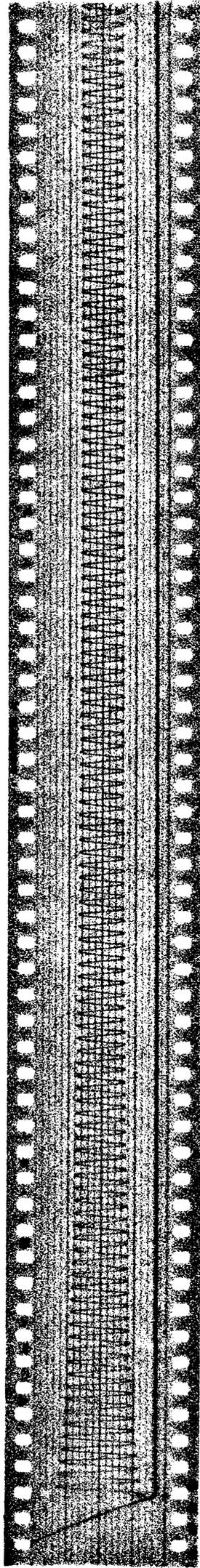
CERN PS MM20

fig. 2

Distance du centre de l'aimant

mm

350 300 250 200 150 100 +50 0 -50 -100 -150 -200 -250 -300 -350



Réduction du champ rémanent après la fin du cycle -

(Maquette V - cycle "rond" - $\phi = -300$ mm)

Oscillogramme de la bobine tournante -

Période $T = \frac{1}{25}$ sec -

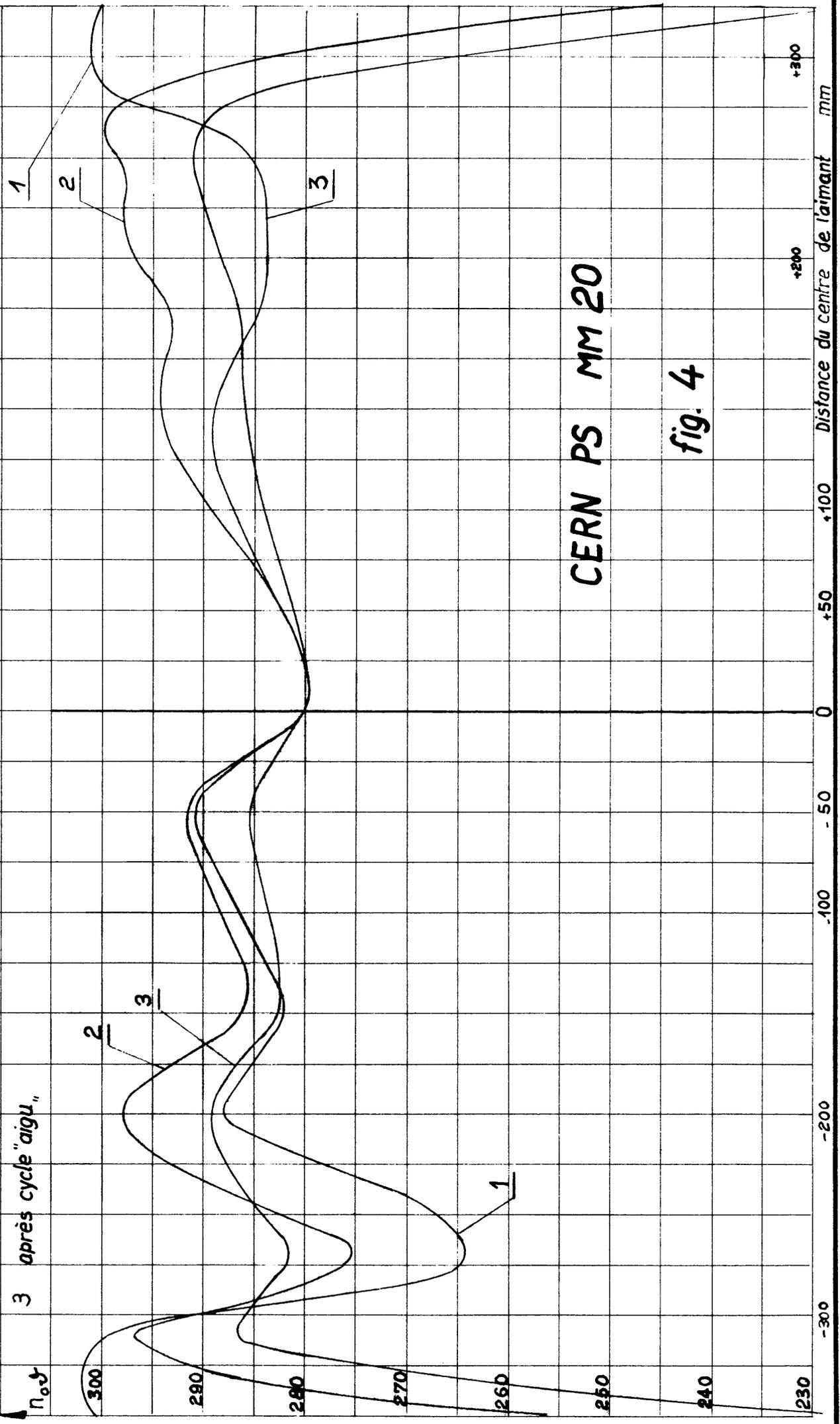
CERN PS MM 20

fig. 3

Valeur de n_{0y} le long de l'orbite d'équilibre au champ rémanent

Maquette II

- 1 après cycle "lent"
- 2 après cycle "rond"
- 3 après cycle "aigu"



CERN PS MM 20

fig. 4

Chomp rémanent le long de l'orbite d'équilibre

Maquette VI

- 1- Rémanent après un cycle "lent."
- 2- après un cycle rapide et "rand."
- 3- après un cycle "aigu."

B_0
70 Gauss

1

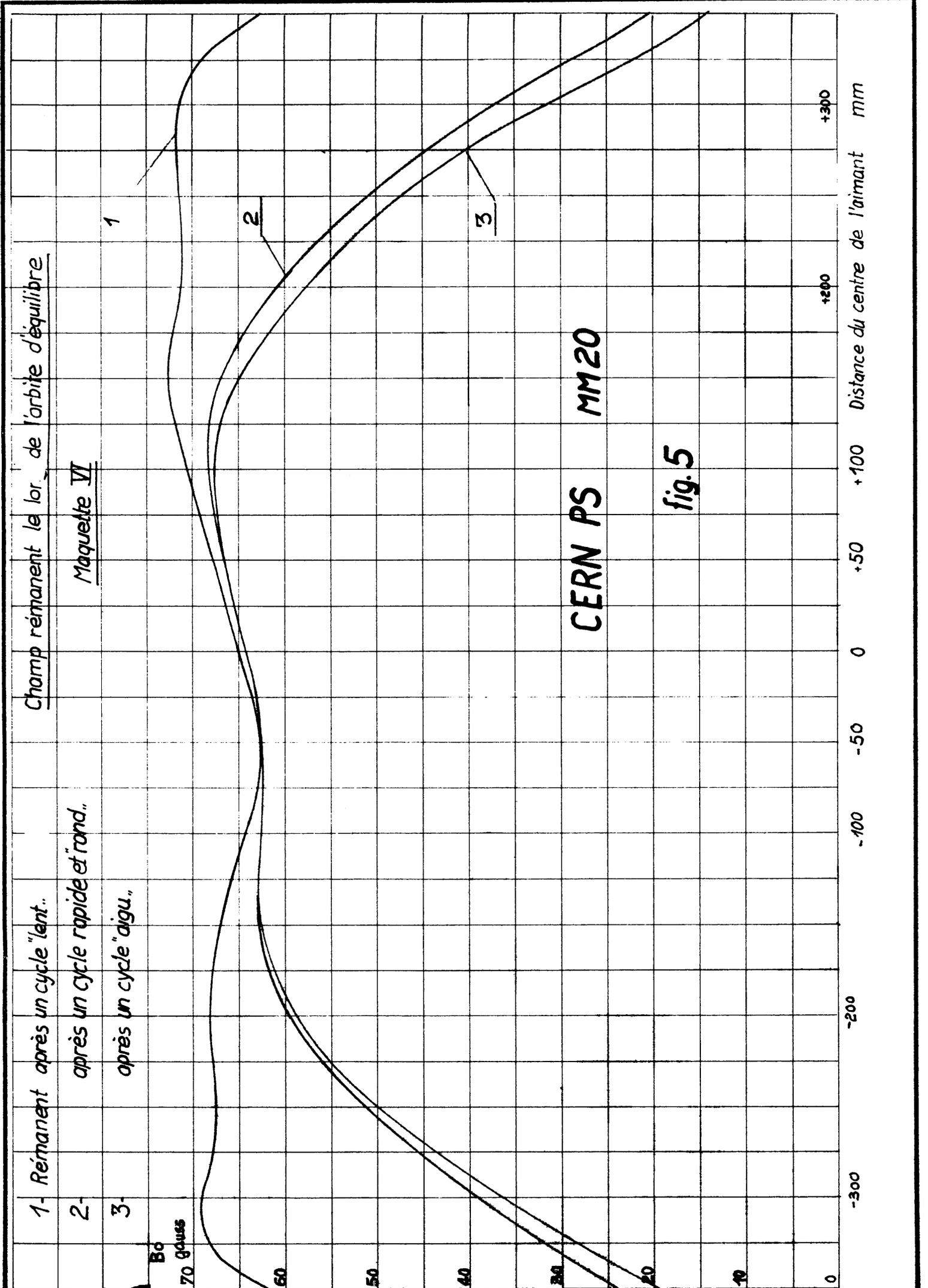
2

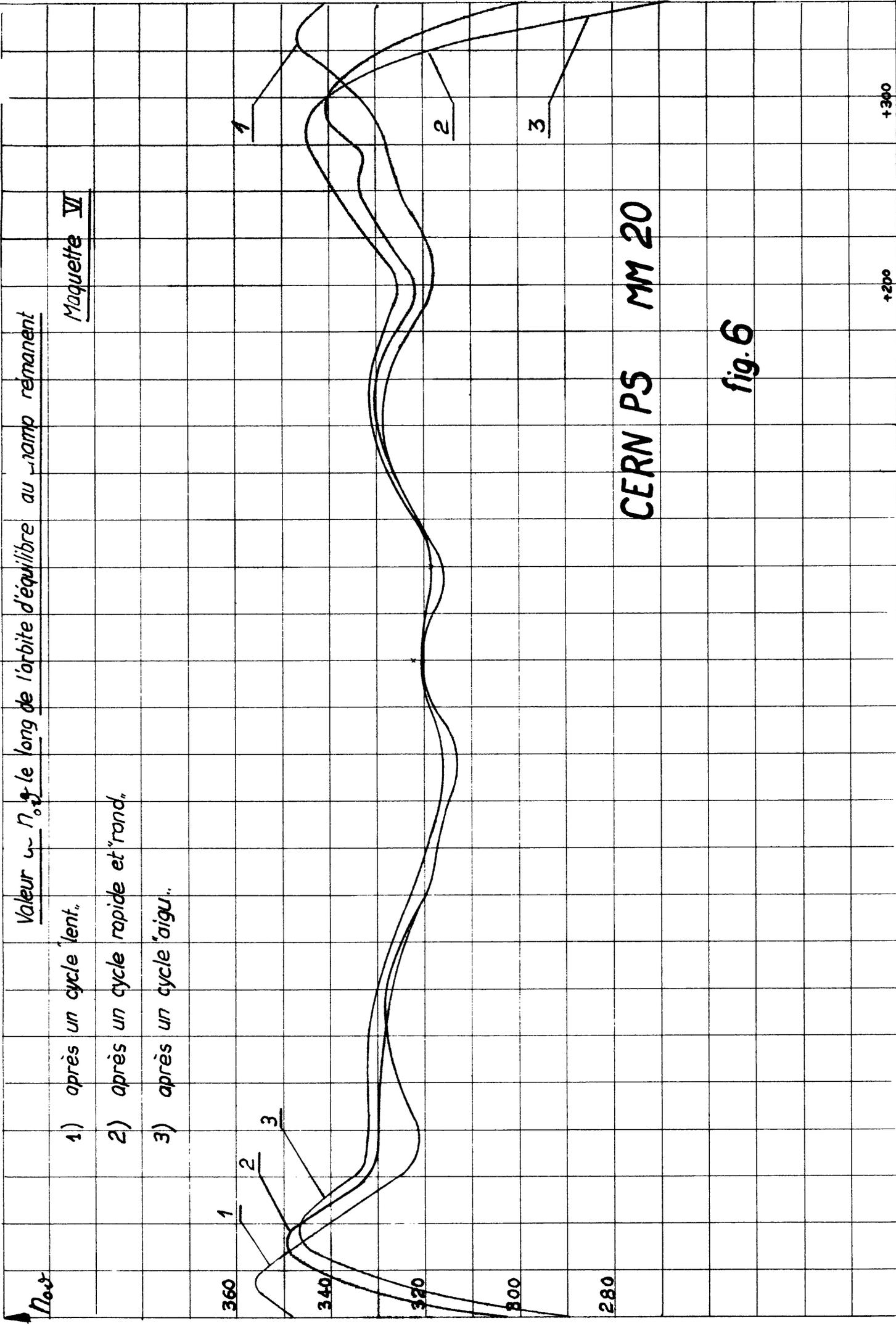
3

CERN PS MM20

fig. 5

-300 -200 -100 0 +50 +100 +200 +300 Distance du centre de l'aimant mm





Valeur ω π le long de l'orbite d'équilibre au ω remanent

Maquette VI

- 1) après un cycle lent.
- 2) après un cycle rapide et "rand."
- 3) après un cycle "aigu."

CERN PS MM 20

fig. 6

distance du centre de l'aimant mm

Maquette VII

Champ rémanent le long de l'orbite d'éq. libre

A : Courbe du rémanent après un cycle rapide montant à 14000 gauss (cycle "ronde.")

B : Courbe du rémanent après un cycle lent montant à 14000 gauss

B gauss

60

50

40

30

20

10

0

-350

-300

-250

-200

-150

-100

-50

0

+50

+100

+150

+200

+250

+300

+350

mm



B

A

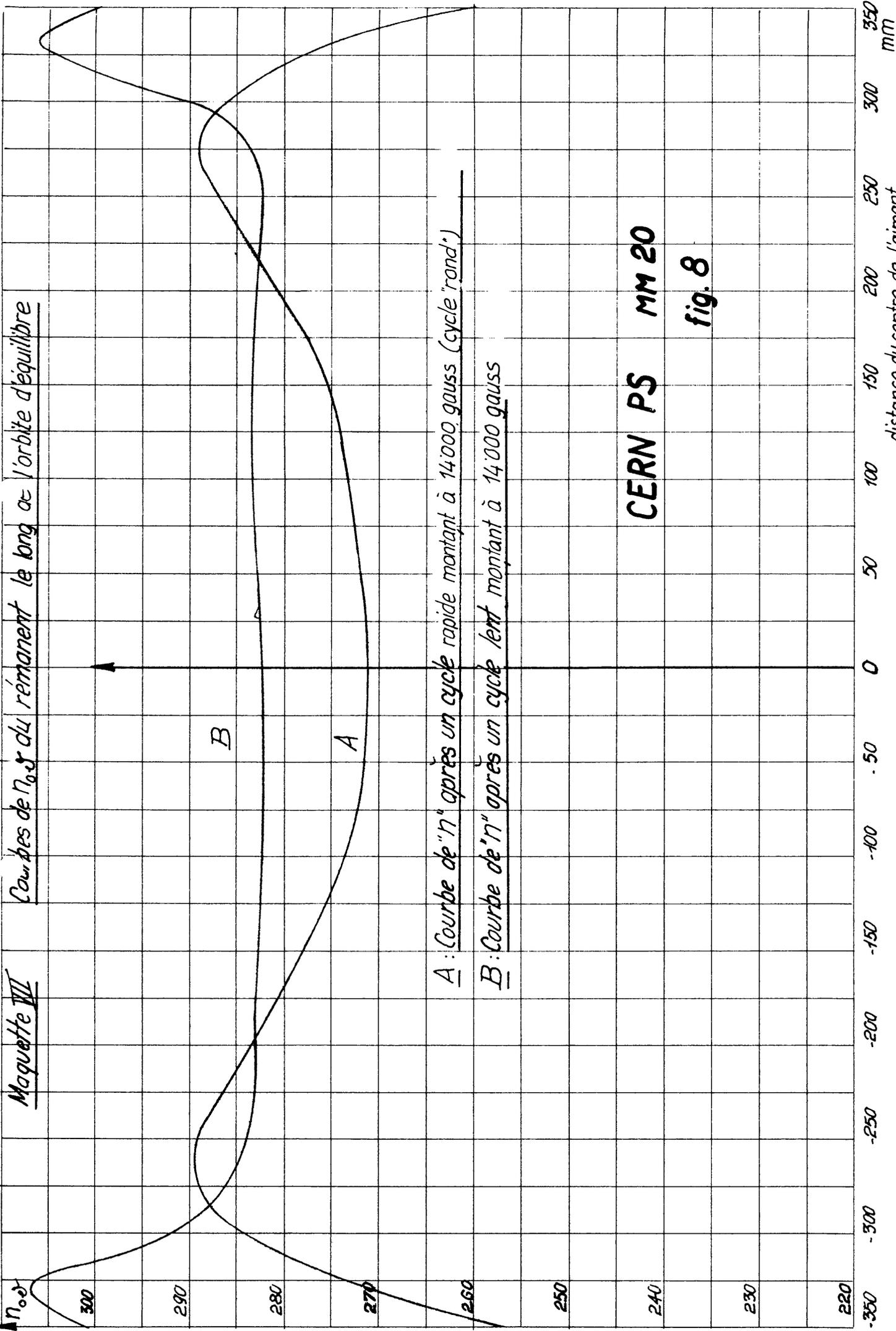
CERN PS MM 20

fig. 7

Distance du centre de l'aimant

Maquette VII

Courbes de $n_0 \sigma$ du rémanent le long de l'orbite d'équilibre



A: Courbe de "n" après un cycle rapide montant à 14000 gauss (cycle "rapide")

B: Courbe de "n" après un cycle lent montant à 14000 gauss

CERN PS MM 20

fig. 8

-350 -300 -250 -200 -150 -100 -50 0 50 100 150 200 250 300 350
mm

distance du centre de l'aimant