

Todo

YAH/DS

E R R A T A

- Page 8 - ligne 7 lire 54,4°C
- Page 13 - ligne 20 au lieu de  $J(T_a - T_b)$ , lire  $J(T_a, T_b)$
- Page 24 - ligne 11 au lieu de  $1 + 0,70 N$ , lire  $1 + 7,0 N$
- Page 25 - ligne 22 supprimer  $T(T_b, T_a)$
- Page 30 - Ière ligne au lieu de Comme le cas, lire Comme dans le cas  
ligne 5 au lieu de celle en éliminant, lire celle  
obtenue en éliminant.
- Page 33 - ligne 3 au lieu de  $X_t(T_{16}, T_{60})$ , lire  $X_t(T_{16}, T_{60})$
- Page 67 - lignes 2 & 3 au lieu de pour un refroidissement que pour  
un échauffement, lire pour une diminution  
de tension que pour une augmentation

1948

1948

1948

1948

1948

1948

1948

1948

1948

1948

1948

1948

1948

1948

1948

1948

1948

1948

1948

1948

1948

# THÈSES

présentées

A LA FACULTÉ DES SCIENCES  
DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES PHYSIQUE

par

O. YAMADA

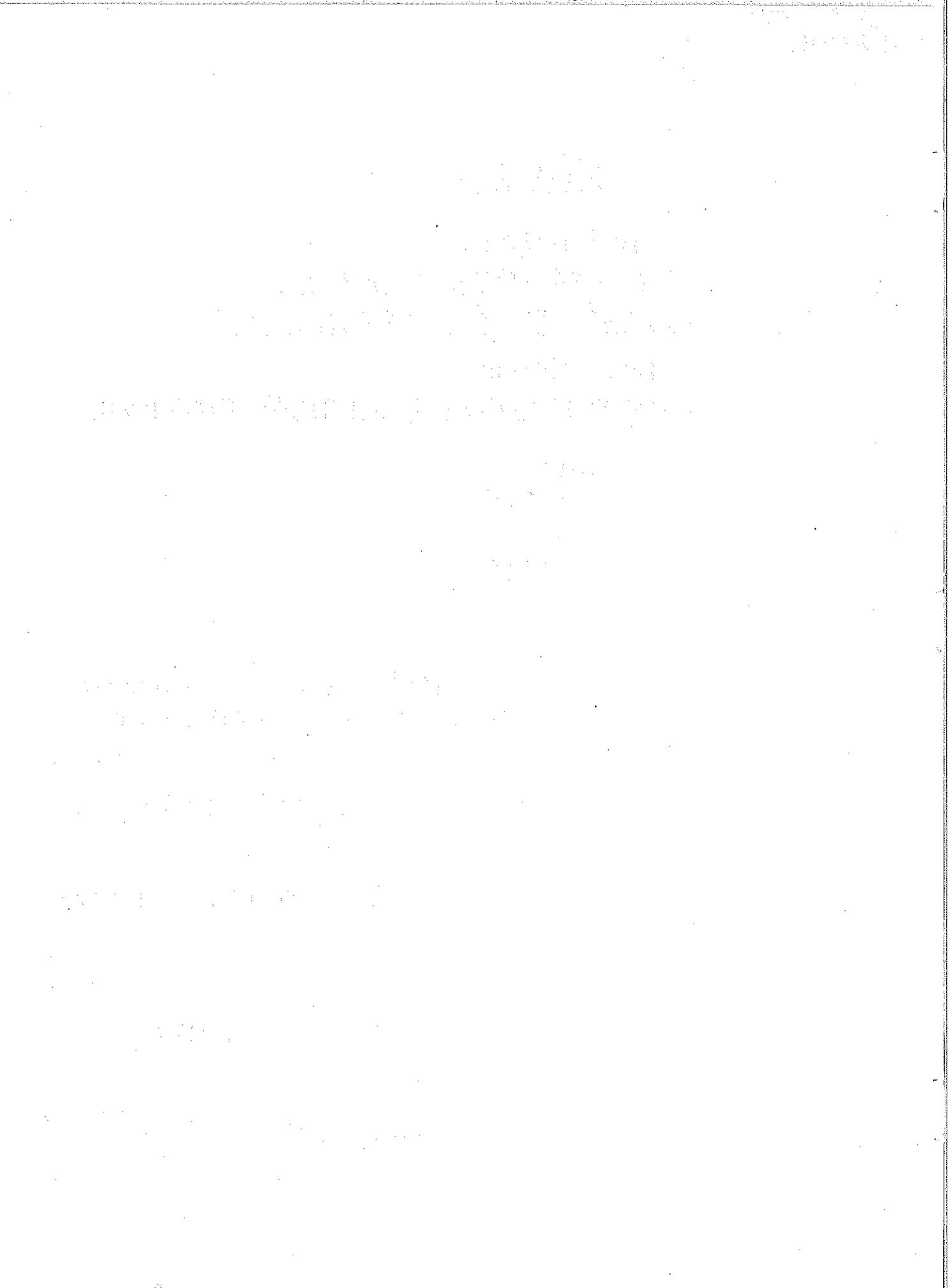
1<sup>re</sup> THÈSE : Sur les deux effets dûs aux variations  
de température et aux changements  
de tension.

2<sup>e</sup> THÈSE : Propositions données par la Faculté

Soutenues le 5 FEV 1962 devant la commission  
d'examen.

MM. L. NÉEL ..... Président

M. SOUTIF  
J.C. BARBIER } Examineurs

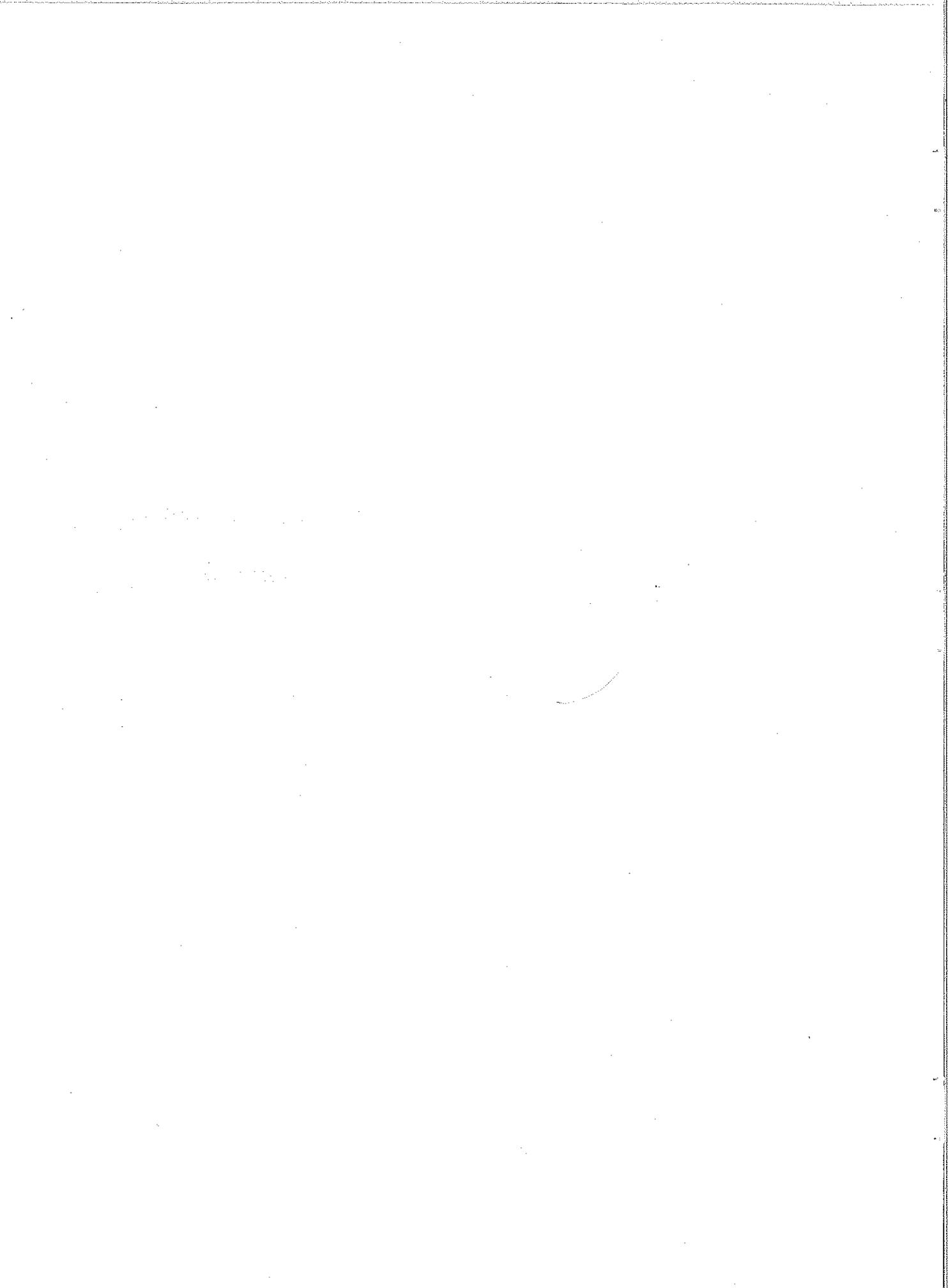


SUR les DEUX EFFETS dûs aux VARIATIONS

de TEMPERATURE et aux CHANGEMENTS

de TENSION

-----



UNIVERSITE de GRENOBLE

Faculté des Sciences

-:-:-:-:-

LISTE des PROFESSEURS

Doyens Honoraires : M. FORTRAT P.  
M. MORET L. Membre de l'Institut  
DOYEN : M. WEIL L.

Professeurs : MM. NEEL L. PHYSIQUE EXPERIMENTALE  
MEMBRE DE L'INSTITUT  
WOLFERS F. PHYSIQUE  
DORIER A. ZOOLOGIE  
HEILMANN R. CHIMIE ORGANIQUE  
KRAVTCHENKO J. MECANIQUE RATIONNELLE  
PARDE M. POTAMOLOGIE  
BENOIT J. RADIOELECTRICITE  
CHENE M. CHIMIE PAPETIERE  
NOBECOURT P. MICROGRAPHIE PAPETIERE  
BESSON J. CHIMIE  
WEIL L. THERMODYNAMIQUE  
FELICI N. ELECTROSTATIQUE  
KUNTZMANN J. MATHEMATIQUES APPLIQUEES  
BARBIER R. GEOLOGIE APPLIQUEE  
SANTON L. MECANIQUE DES FLUIDES  
CHABAUTY C. CALCUL DIFFERENTIEL & INTEGRAL  
OZENDA P. BOTANIQUE  
FALLOT M. PHYSIQUE INDUSTRIELLE  
GALVANI O. MATHEMATIQUES  
MOUSSA A. CHIMIE NUCLEAIRE & RADIOACTIVITE  
TRAYNARD P. CHIMIE GENERALE  
SOUTIF M. PHYSIQUE GENERALE  
CRAYA A. HYDRODYNAMIQUE  
REEB G. STATISTIQUES MATHEMATIQUES  
REULOS R. THEORIE DES CHAMPS  
AYANT Y. PHYSIQUE APPROFONDIE  
GALLISSOT F. MATHEMATIQUES PURES  
Mlle LUTZ E. MATHEMATIQUES GENERALES  
BLAMBERT M. MATHEMATIQUES  
BOUCHEZ R. PHYSIQUE NUCLEAIRE  
LLIBOUTRY L. GEOPHYSIQUE  
MICHEL R. GEOLOGIE & MINERALOGIE  
BONNIER E. ELECTROCHIMIE

Professeurs sans chaire MM. SILBER R. MECANIQUE DES FLUIDES  
EESSAUX G. PHYSIOLOGIE ANIMALE  
MOUSSIEGT J. ELECTRONIQUE  
PILLET E. ELECTROTECHNIQUE  
BARBIER J.C. PHYSIQUE  
BUYLE-BODIN ELECTRONIQUE  
PAUTHENET R. ELECTROTECHNIQUE  
Mme KOFLER L. BOTANIQUE

autres de  
conférences

MM.	VAILLANT F.	ZOOLOGIE & HYDROBIOLOGIE
	DREYFUS	THERMODYNAMIQUE
Mle	NAIM L.	MATHEMATIQUES
	PERRET R.	SERVOMECHANISME
	ARNAUD P.	CHIMIE
Mme	BARBIER M.J.	ELECTROCHIMIE
	BRISSONNEAU P.	PHYSIQUE
	COHEN J.	PHYSIQUE
	DEBELMAS J.	GEOLOGIE & MINERALOGIE
Mme	SOUTIF J.	PHYSIQUE
	VAUQUOIS B.	MATHEMATIQUES APPLIQUEES
	DEPASSEL R.	MECANIQUE DES FLUIDES
	GERBER R.	MATHEMATIQUES
	ROBERT A.	CHIMIE PAPETIERE
	ANGLES D'AURIAAC P.	MECANIQUE DES FLUIDES
	BIAREZ	MECANIQUE PHYSIQUE
	COUMES A.	ELECTRONIQUE
	DODU J.	MECANIQUE DES FLUIDES
	DUCROS P.	MINERALOGIE ET CRISTALLOGRAPHIE
	GIDON P.	GEOLOGIE & MINERALOGIE
	GLENAT R.	CHIMIE
	HACQUES G.	CALCUL NUMERIQUE
	LANCIA R.	PHYSIQUE AUTOMATIQUE
	PEBAY-PEROULA	PHYSIQUE
	GASTINEL	Chargé d'enseignement mathématiques appliquées
	LACAZE A.	Chargé d'enseignement thermodynamique

Secrétaire Principal

M. MONTAGNAT

A Monsieur Louis NÉEL  
Membre de l'Institut  
Directeur du Laboratoire d'Electrostatique  
et de Physique du Métal

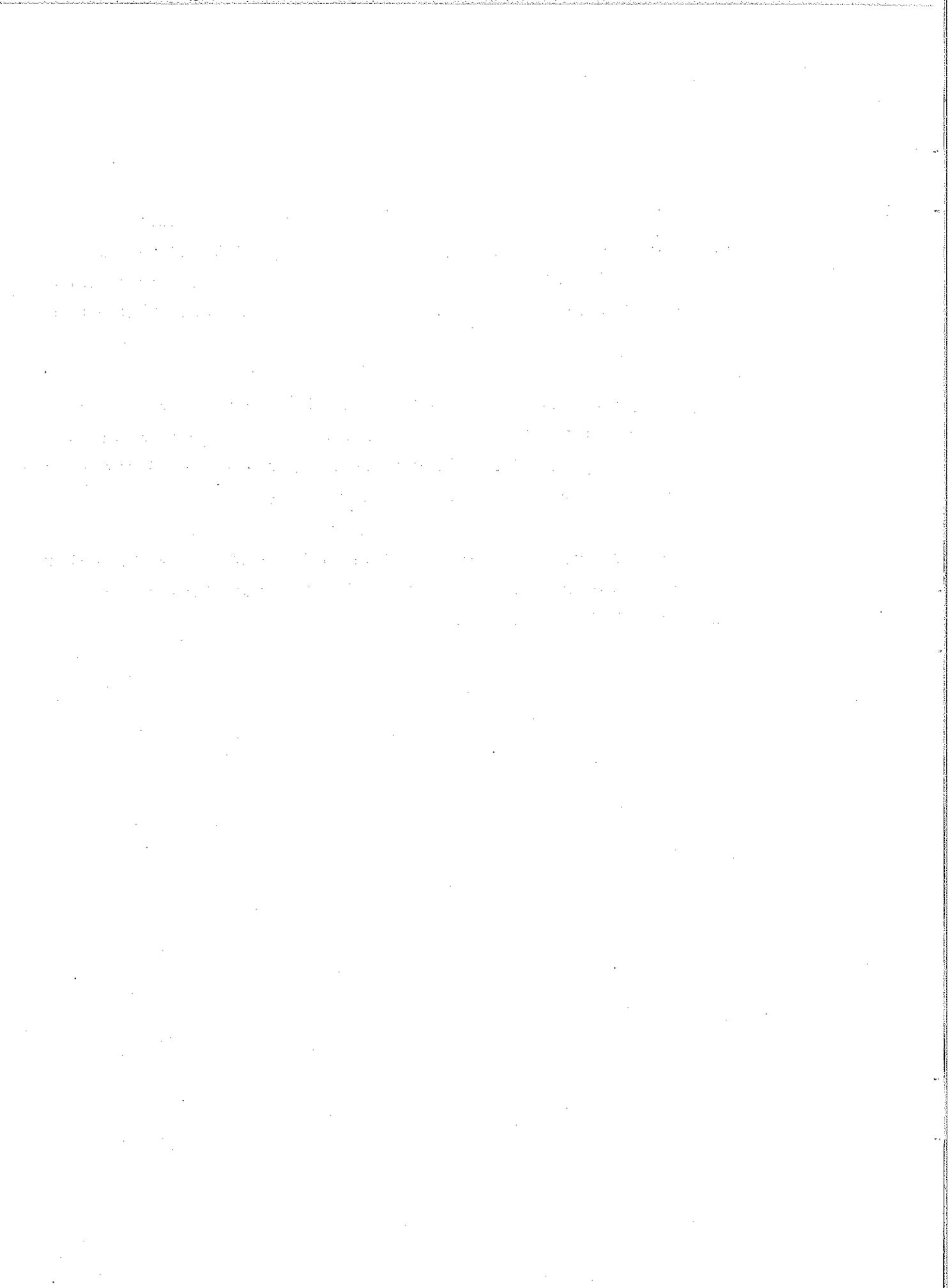
Hommages respectueux



Je suis heureux de pouvoir exprimer ici ma profonde et très respectueuse reconnaissance à M. le Professeur L. NEEL qui m'a accueilli avec tant de bienveillance dans son Laboratoire et a constamment dirigé mes travaux qui font l'objet de ce mémoire.

Je remercie M. le Professeur M. SOUTIF pour l'intérêt qu'il a porté à ces recherches. Je remercie également M. le Professeur J.C. BARBIER pour son précieux concours et les encouragements qu'il m'a toujours prodigués.

Je remercie enfin tous mes camarades du Laboratoire d'Electrostatique et de Physique du Métal pour leur aide et leur dévouement à mon égard.



## PREMIERE PARTIE

### LES EFFETS DUS AUX VARIATIONS DE TEMPERATURE

---

#### I - INTRODUCTION

Depuis longtemps on sait qu'une variation de température à champ magnétique constant ou nul peut provoquer le changement de l'aimantation d'un matériau ferromagnétique et ce phénomène a conduit empiriquement à un procédé de stabilisation des aimants permanents qui consiste en un léger recuit <sup>(1)(2)(3)</sup>. Mais jusqu'à présent le mécanisme de ce phénomène n'a pas été entièrement expliqué. Il ne semble pas en particulier que le changement d'aimantation, accompagnant la variation de température, soit produit par la variation d'aimantation spontanée ou par la variation thermique de l'anisotropie.

Lorsqu'un échantillon initialement désaimanté à la température  $T_a$  au moyen d'un champ alternatif lentement décroissant jusqu'à zéro et soumis à un champ magnétique continu, subit une variation de température de  $T_a$  à  $T_b$ , on observe une variation de l'aimantation. Sur la courbe de première aimantation et en différents points du cycle d'hystérésis décrit après saturation, on étudie les variations d'aimantation, dans un champ appliqué constant, dues à des variations de température. Sur la figure 1 sont portées les valeurs des aimantations d'un fil d'acier au carbone ( $H_c = 16 \text{ Oe}$ ) en fonction du nombre de cycles thermiques décrits entre  $16^\circ\text{C}$  et  $60^\circ\text{C}$  en partant soit de  $16^\circ\text{C}$ , soit de  $60^\circ\text{C}$ . Dans le domaine de Rayleigh (figure 1 (a)), on observe nettement que le premier changement de la température est toujours accompagné d'une augmentation d'aimantation de l'échantillon, quel que soit le sens de variation de la température. Les augmentations d'aimantation produites par la première variation de température sont en général plus faibles pour un refroidissement que pour un échauffement.

Température initiale 60°C

Fig 1

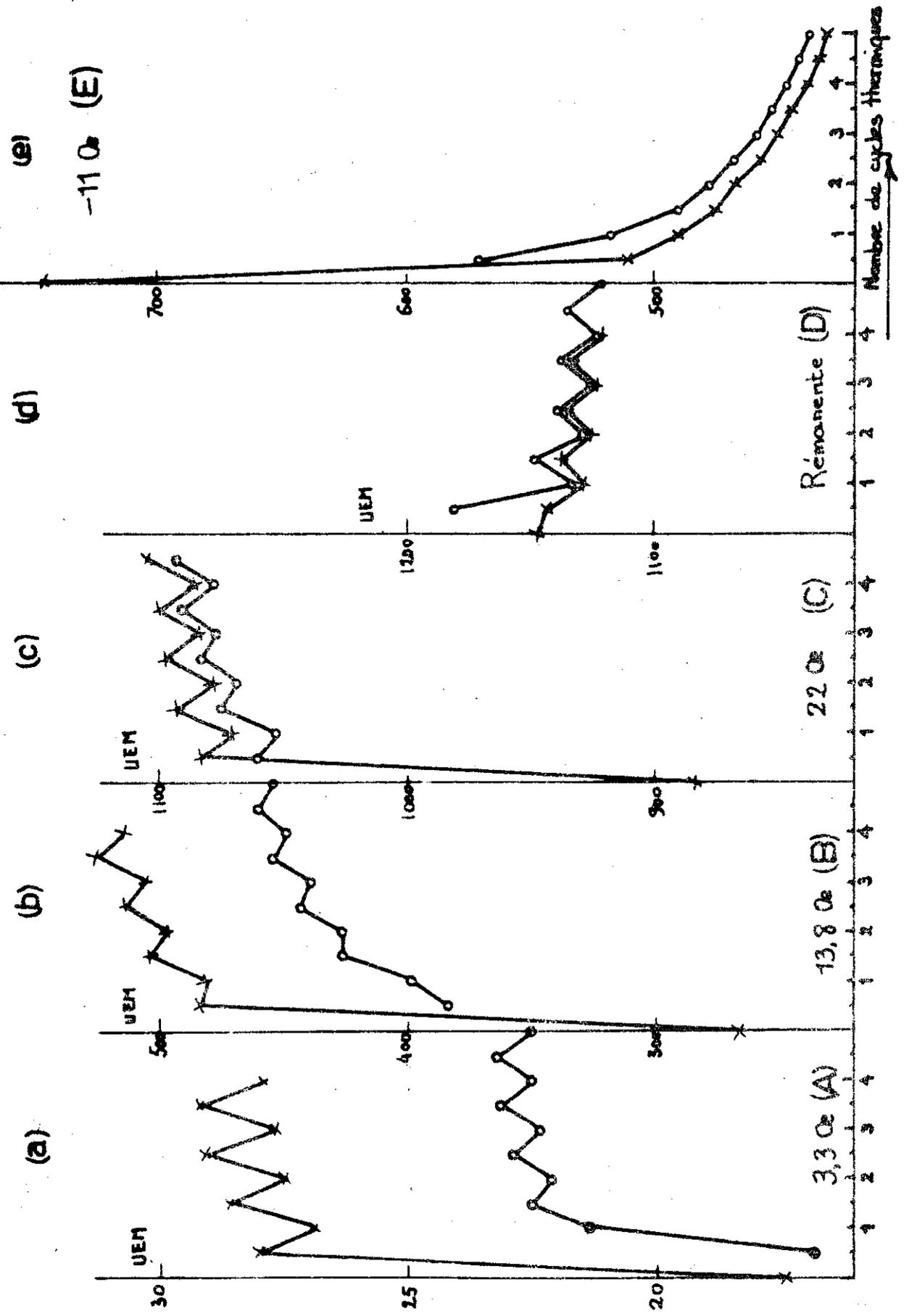


Fig. 1

Variations d'aimantation d'un fil d'acier ( $H_c = 160\text{e}$ ) en fonction du nombre de cycles thermiques décrits entre  $16^\circ\text{C}$  et  $60^\circ\text{C}$ :

- (a) dans le domaine de Rayleigh, correspondant au point A sur la courbe de première aimantation dans la figure 2;
- (b) au point B avant le point correspondant au maximum de la susceptibilité irréversible;
- (c) au point C après le maximum de la susceptibilité irréversible;
- (d) rémanente, correspondant à D sur le cycle d'hystérésis;
- (e) au point E sur la branche descendante du cycle d'hystérésis.

Lorsque le champ magnétique dépasse la valeur correspondant au maximum de la susceptibilité irréversible, on observe, dans le cas du refroidissement, des diminutions d'aimantations à la suite de la première variation de température. On peut penser que le phénomène d'augmentation est masqué par l'abaissement de la courbe d'aimantation dû à un refroidissement. Sur la branche descendante du cycle d'hystérésis, on observe cependant les diminutions de l'aimantation.

On remarque aussi que la valeur de l'aimantation évolue avec le nombre de cycles thermiques entre deux températures différentes, comme dans le cas de la reptation du champ magnétique. (4)(5)

## II - LES AUGMENTATIONS ANOMALES DES AIMANTATIONS DANS LE DOMAINE DE RAYLEIGH DANS LE CAS DE DEPASSEMENT DE LA TEMPERATURE DE DESAIMANTATION.

La figure 2 montre que dans le domaine de Rayleigh les courbes de première aimantation à 16°C et à 60°C sont presque identiques. D'ailleurs on sait que dans cette région, l'aimantation J se représente en fonction du champ H par la formule très simple connue sous le nom de première loi de Rayleigh.

$$J = a_0 H + b_0 H^2$$

Le coefficient  $a_0$  du terme en H représente la susceptibilité réversible et le terme en  $b_0$  ( constante de Rayleigh) correspond à la variation irréversible de l'aimantation. En raison de la simplicité des lois d'aimantation dans cette région, nous limiterons presque exclusivement notre étude expérimentale au domaine de Rayleigh.

Après avoir vérifié que la variation de l'aimantation provoquée par la variation de température est indépendante de la vitesse du changement de la température, on a représenté dans le cas de l'échauffement l'évolution de l'aimantation d'un fil d'acier au carbone ( $H_0 = 16 \text{ Oe}$ ) en fonction de la température, à champ constant, pour différentes températures de désaimantation.

Fig 2

La courbe de première aimantation et le cycle d'hystérésis de l'échantillon d'acier étudié

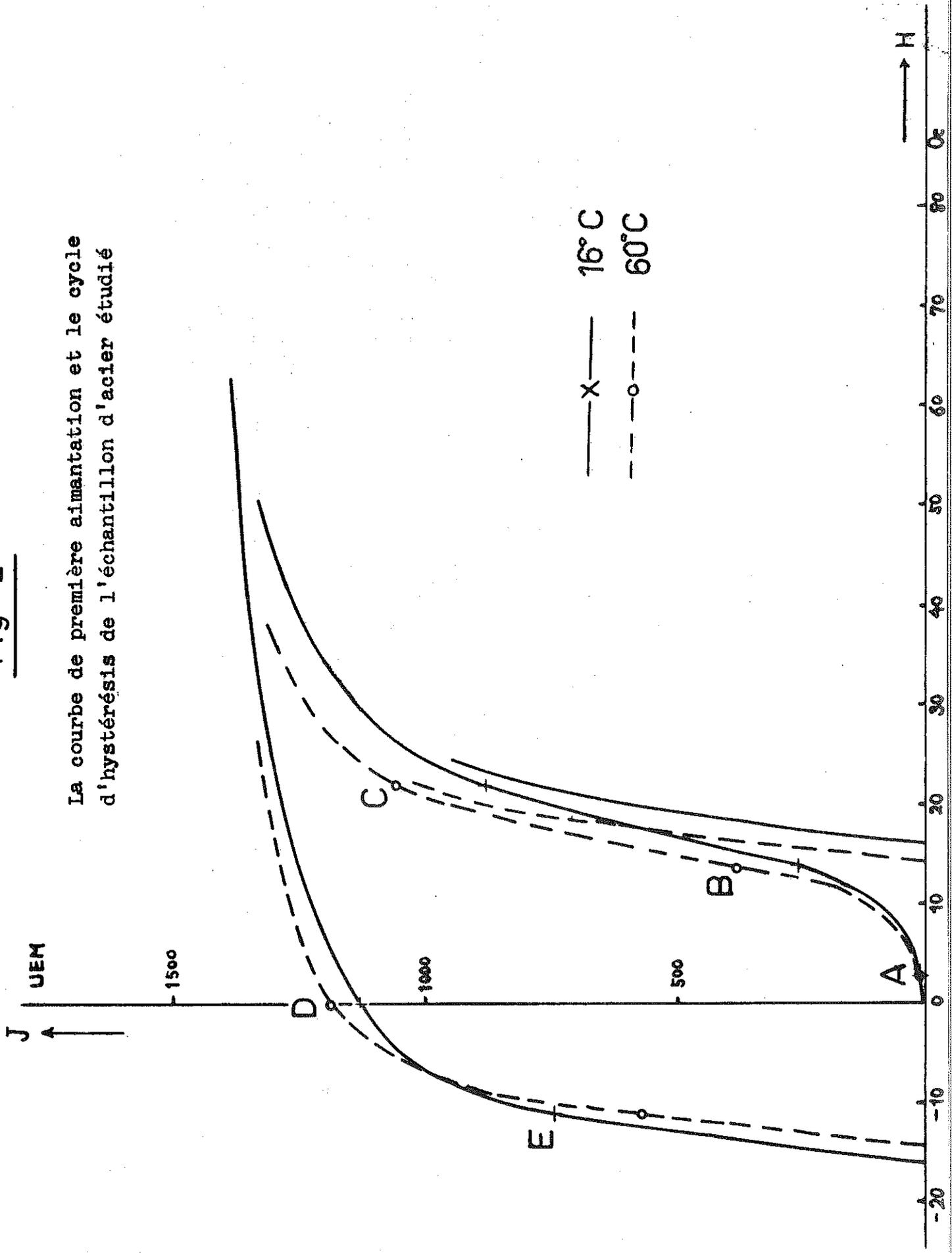
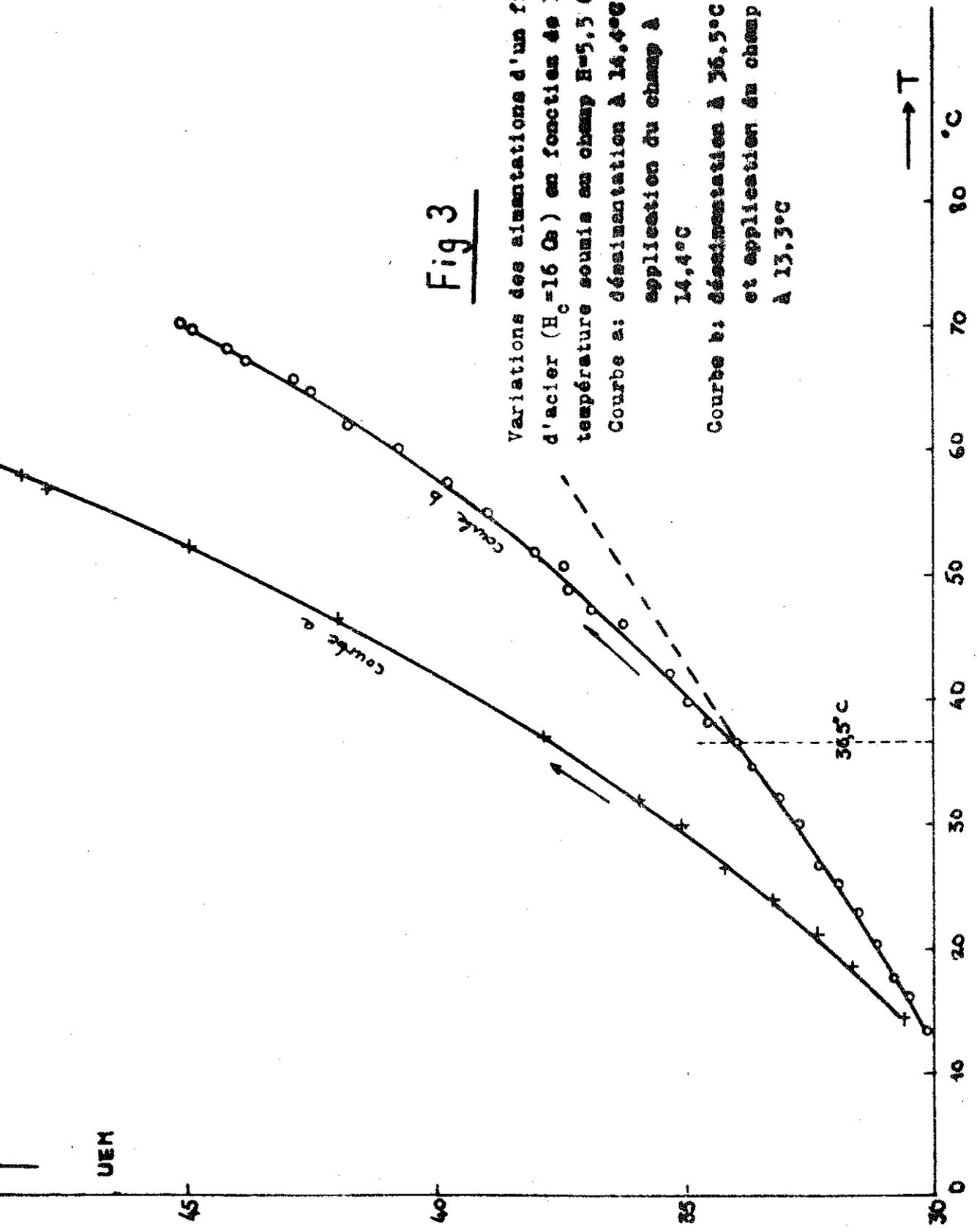


Fig 3

Variations des aimantations d'un fil  
d'acier ( $H_c = 16 \text{ Oe}$ ) en fonction de la  
température soumis au champ  $H = 5,3 \text{ Oe}$ .  
Courbe a: désaimantation à  $14,4^\circ\text{C}$  et  
application du champ à  
 $14,4^\circ\text{C}$   
Courbe b: désaimantation à  $36,5^\circ\text{C}$   
et application du champ  
à  $13,3^\circ\text{C}$



UEM

→ T

La courbe a de la figure 3 représente la variation de l'aimantation de l'échantillon, en fonction de la température, soumis au champ  $H = 5,5 \text{ Oe}$ , après avoir été désaimanté à  $14,4^\circ\text{C}$  et soumis au champ  $H = 5,5 \text{ Oe}$  à  $14,4^\circ\text{C}$ .

Sur la courbe b sont portées les valeurs des aimantations du même échantillon en fonction de la température, après le traitement initial suivant : désaimantation à  $36,5^\circ\text{C}$ , diminution de la température de  $36,5^\circ\text{C}$  à  $13,3^\circ\text{C}$ , application de  $H = 5,5 \text{ Oe}$  à  $13,3^\circ\text{C}$

On trouve une grande différence entre les valeurs des aimantations des deux courbes a et b, correspondant à la température  $60^\circ\text{C}$ , par exemple, bien qu'elles aient presque les mêmes points initiaux. En particulier on remarque sur la courbe b très nettement un changement d'allure à  $36,5^\circ\text{C}$  température de désaimantation : quand on dépasse la température de désaimantation, le taux de variation de l'aimantation augmente de plus en plus.

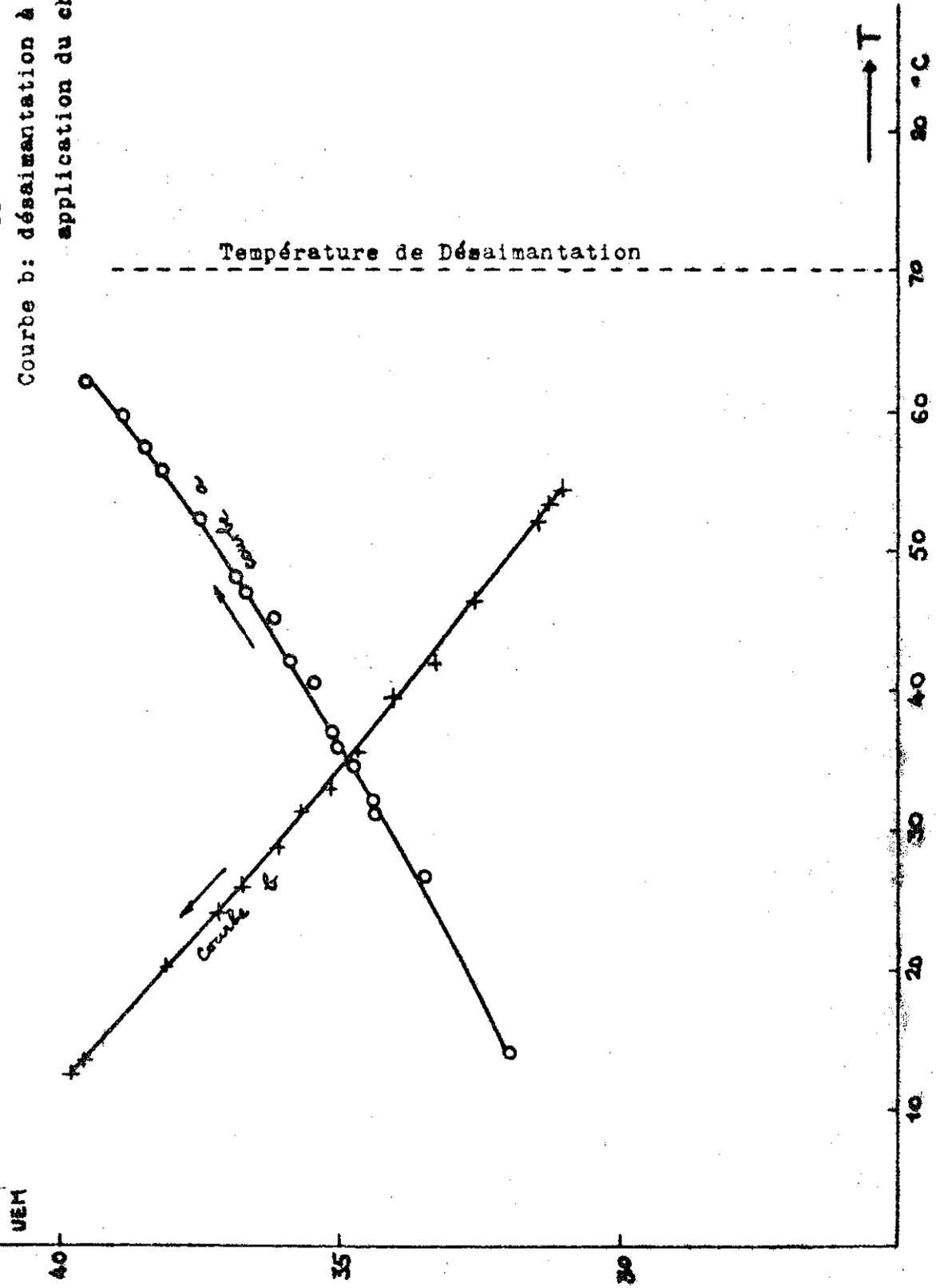
La courbe a de la figure 4 représente la variation de l'aimantation du même échantillon d'acier au carbone, dans le cas de l'échauffement, à champ constant  $H = 5,5 \text{ Oe}$ , en fonction de la température inférieure à la température de désaimantation, en partant de  $14^\circ\text{C}$ , après avoir désaimanté à  $70^\circ\text{C}$ , refroidi sans champ de  $70^\circ$  à  $14^\circ\text{C}$  et puis appliqué le champ  $H = 5,5 \text{ Oe}$  à  $14^\circ\text{C}$ . Dans ce cas on obtient moins d'augmentation que dans le cas de la courbe a ou b de la figure 3.

La courbe b de la figure 4 indique la variation de l'aimantation pour le refroidissement en fonction de la température inférieure à la température de désaimantation. Quand on compare la courbe a avec la courbe b sur la figure 4, on remarque à peu près les mêmes augmentations des aimantations pour l'échauffement et pour le refroidissement.

Enfin, on peut dire d'après ces expériences qu'il y a une augmentation d'aimantation qui se produit dans le cas de dépassement de la température de désaimantation et qui se superpose à une autre augmentation d'aimantation, quand on chauffe l'échantillon d'acier dans un champ constant.

Fig 4

d'acier ( $H_c=16$  Oe) en fonction de la  
température soumis au champ  $H=5,5$  Oe  
Courbe a: désaimantation à  $70^\circ\text{C}$  et  
application du champ à  $14^\circ\text{C}$   
Courbe b: désaimantation à  $70^\circ\text{C}$ . et  
application du champ à  $14^\circ\text{C}$



III - VARIATION DE L'AIMANTATION EN FONCTION DU CHAMP, APRES  
L'ECHAUFFEMENT DE L'ECHANTILLON SOUMIS AU CHAMP CONSTANT.

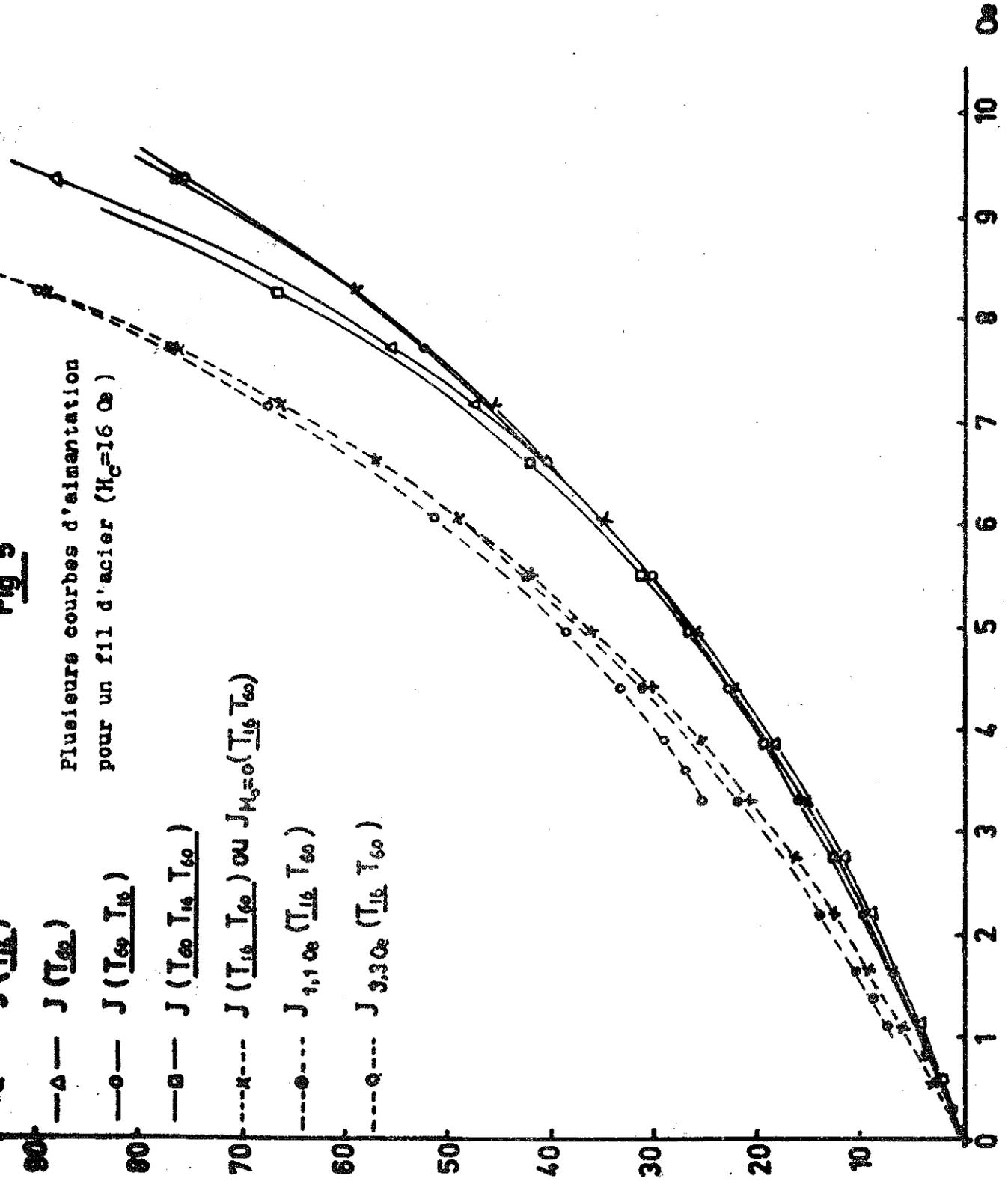
Pour déterminer la nature de la variation d'aimantation provoquée par le changement de la température, il est très important de tracer la courbe d'aimantation après la variation de la température de l'échantillon, soumis à un champ constant. Nous allons examiner d'abord le cas de l'échauffement de l'acier au carbone que nous avons utilisé pour les expériences des § I et § II.

La courbe  $J_{3,3 \text{ Oe}} (T_{16} T_{60})$  portée sur la figure 5 représente l'aimantation en fonction du champ  $H$ , à  $60^\circ\text{C}$ , pour  $H$  supérieur à  $H_0 = 3,3 \text{ Oe}$  après le traitement initial suivant : désaimantation à  $16^\circ\text{C}$ , application de  $H_0$  à  $16^\circ\text{C}$ , élévation de la température de  $16$  à  $60^\circ\text{C}$  dans ce même champ  $H_0$ . De la même façon on peut tracer plusieurs courbes, en partant de  $H_0 = 1,1 \text{ Oe}$  ou même de  $H_0 = 0$ , par exemple, qui sont portées sur la figure 5 comme  $J_{1,1 \text{ Oe}} (T_{16} T_{60})$  ou  $J_{H_0=0} (T_{16} T_{60})$ . Ces trois courbes se raccordent les unes aux autres, mais elles ne se raccordent pas avec la courbe  $J (T_{60})$  représentant la courbe de première aimantation à  $60^\circ\text{C}$ , après désaimantation à  $60^\circ\text{C}$ .

D'une manière générale, convenons de représenter par  $J (T_a, T_b, \dots, T_i, T_j)$  l'aimantation prise à  $T_j$  d'un échantillon soumis successivement aux températures  $T_a, \dots, T_j$ , désaimanté à la première température  $T_a$ , le champ magnétique ayant été appliqué au moment où l'échantillon possède la dernière température souligné  $T_i$ .

On peut donc désigner par  $J (T_{16} T_{60})$  la courbe  $J_{H_0=0} (T_{16} T_{60})$  représentant la variation de l'aimantation en fonction du champ, à  $60^\circ\text{C}$ , après désaimantation à  $16^\circ\text{C}$  et réchauffement dans un champ nul jusqu'à  $60^\circ\text{C}$ .

La différence entre les courbes  $J (T_{60})$  et  $J (T_{16} T_{60})$  signifie que la désaimantation à la température inférieure à celle du tracé de la courbe de l'aimantation cause l'augmentation de la susceptibilité. Ce résultat correspond à l'augmentation anormale de l'aimantation en cas de dépassement de la température de désaimantation, que nous avons étudiée au paragraphe précédent. Nous reviendrons plus tard sur ce problème.



#### IV - LE PREMIER EFFET DU A LA VARIATION DE TEMPERATURE

D'après les résultats des paragraphes II et III on peut admettre que la variation d'aimantation due à un échauffement de 16 à 60°C comprend deux parties dont la première que nous désignerons par  $X_t (T_{16} T_{60})$  représente l'effet pur de l'échauffement et la seconde provient du changement de la courbe de l'aimantation, c'est-à-dire, de la différence entre les courbes  $J (T_{16} T_{60})$  et  $J (T_{16})$ . Par conséquent on peut écrire pour l'effet pur de l'échauffement

$$X_t (T_{16} T_{60}) = J (T_{16} T_{60}) - J (T_{16} T_{60}) \quad (1)$$

De même l'effet pur du refroidissement peut être représenté par :

$$X_t (T_{60} T_{16}) = J (T_{60} T_{16}) - J (T_{60} T_{16}) \quad (2)$$

Cependant la comparaison de  $X_t (T_{16} T_{60})$  et de  $X_t (T_{60} T_{16})$  est rendue difficile par le fait qu'à champ égal les aimantations de comparaison sont très différentes : en effet, tandis que les courbes  $J (T_{16})$ ,  $J (T_{60})$ ,  $J (T_{60} T_{16})$  sont voisines les unes des autres, la courbe  $J (T_{16} T_{60})$  en est nettement séparée.

Comme le montre la figure 5, on remarque cependant que la courbe  $J (T_{60} T_{16} T_{60})$  est très voisine du groupe des trois premières courbes, tout au moins au-dessous de 5,5 Oe. Il semble alors préférable de définir l'effet pur de l'échauffement par la différence :

$$X_t (T_{16} T_{60}) = J (T_{60} T_{16} T_{60}) - J (T_{60} T_{16} T_{60}) \quad (3)$$

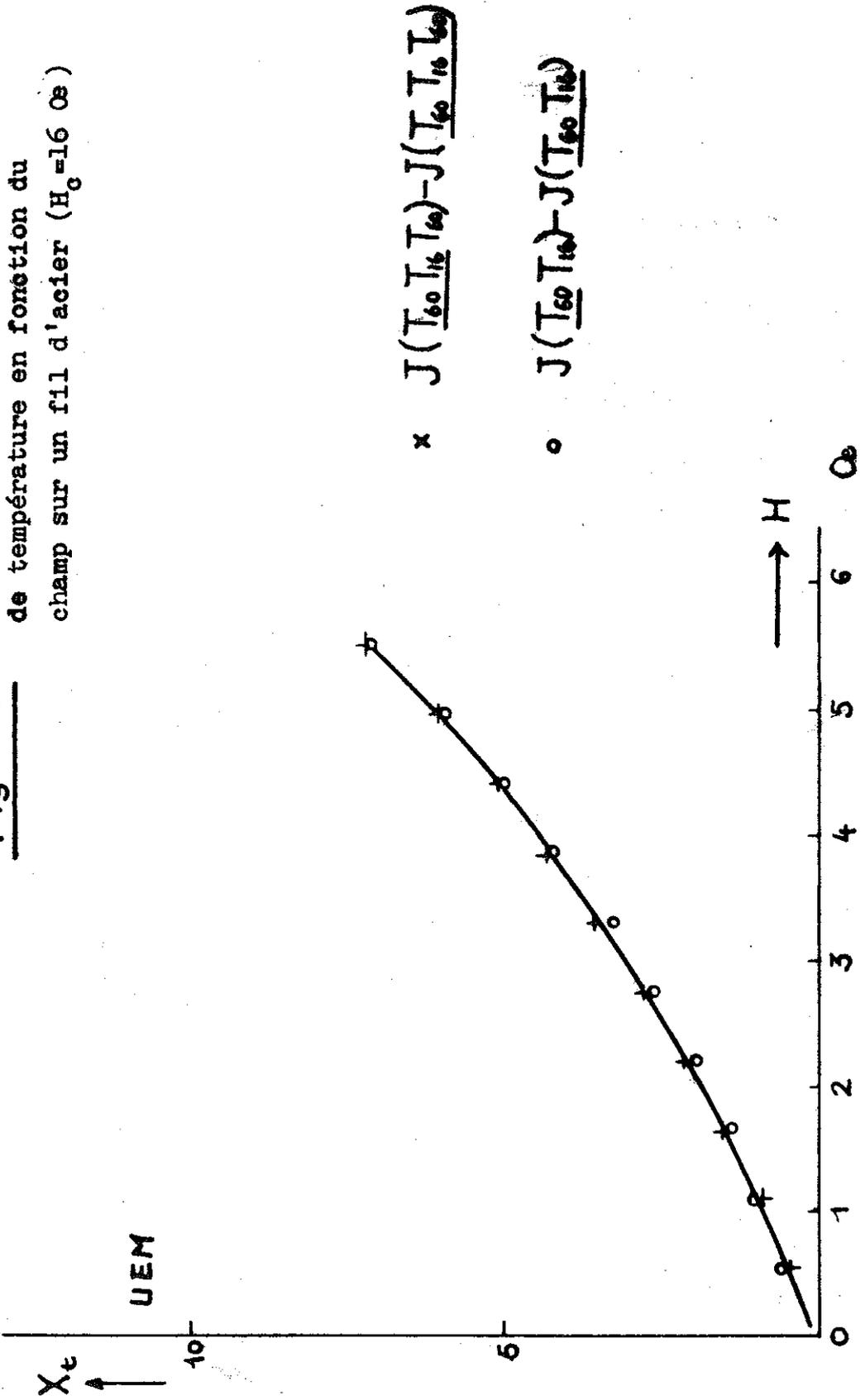
Nous avons alors comparé sur la figure 6 les valeurs de  $X_t (T_{60} T_{16})$  et de  $X_t (T_{16} T_{60})$  défini par la relation (3).

On constate alors que les effets purs de l'échauffement ou du refroidissement sont égaux tout au moins jusqu'à 5,5 Oe :

$$X_t (T_{16} T_{60}) = X_t (T_{60} T_{16}) \quad (4)$$

**Fig 6**

Le premier effet dû à la variation de température en fonction du champ sur un fil d'acier ( $H_0 = 16 \text{ Oe}$ )



D'une manière générale un échauffement produirait le même effet qu'un refroidissement si les conditions suivantes étaient réalisées :

$$J(\underline{T_a}) = J(\underline{T_b}) = J(\underline{T_a, T_b}) = J(\underline{T_b, T_a}) \quad (5)$$

Nous désignerons cet effet par  $X_t$  de l'échauffement ou du refroidissement sous le nom du premier effet dû à la variation de température.

V - SUSCEPTIBILITE APRES CHANGEMENT DE LA TEMPERATURE DE L'ECHANTILLON SOUMIS AU CHAMP CONSTANT.

Par analogie avec la représentation des effets des fluctuations thermiques ou de la reptation au moyen d'un "champ de fluctuations thermiques" (6) ou d'un "champ de reptation" (7)(8), il serait très intéressant de pouvoir déterminer un "champ thermique" provoquant une variation irréversible de l'aimantation égale à celle donnée par le premier effet, par la méthode du tracé de la susceptibilité irréversible après changement de la température de l'échantillon soumis à un champ constant. Au paragraphe III nous avons tracé la variation de l'aimantation avec le champ après réchauffement dans un champ constant. Quand on modifie l'amplitude de variation de température  $T_b - T_a$ ,  $J(\underline{T_a - T_b})$  change très nettement s'il s'agit d'un échauffement, tandis que s'il s'agit d'un refroidissement les courbes  $J(\underline{T_b T_a})$  sont voisines les unes des autres.

En conséquence en cas de refroidissement, on pourrait déterminer un "champ thermique", en comparant la manière de la variation de l'aimantation avec le champ après refroidissement de l'échantillon.

Sur la figure 7 sont portées les trois courbes des aimantations, partant de  $J_{3,3} \text{ Oe}(\underline{T_{38} T_{16}})$ , de  $J_{3,3} \text{ Oe}(\underline{T_{60} T_{16}})$  et de  $J_{3,3} \text{ Oe}(\underline{T_{78} T_{16}})$ . On remarque ici que les valeurs des différences entre  $J_{3,3} \text{ Oe}(\underline{T_{38} T_{16}})$ ,  $J_{3,3} \text{ Oe}(\underline{T_{60} T_{16}})$  et  $J_{3,3} \text{ Oe}(\underline{T_{78} T_{16}})$ , qui proviennent des différences des valeurs du premier effet  $X_t$ , ne diminuent pas d'une manière très sensible lorsque le champ augmente. On montre sur la figure 8 les susceptibilités, qui sont comptées à partir de 3,3 Oe, en fonction du champ pour chaque courbe de la figure 7.

$\circ$  de  $J_{3,30e}(T_{60} T_{16})$   
 $+$  de  $J_{3,30e}(T_{38} T_{16})$

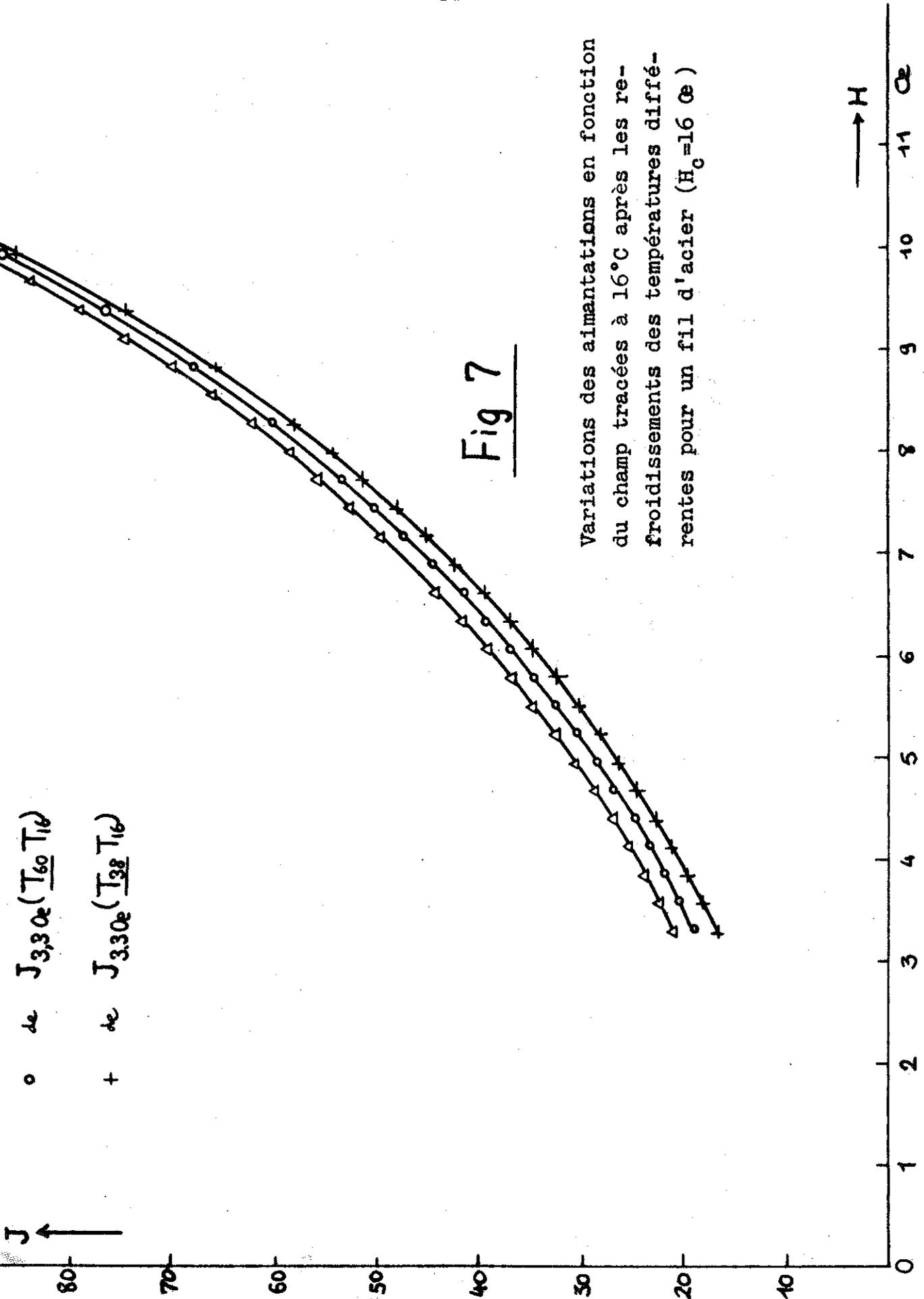
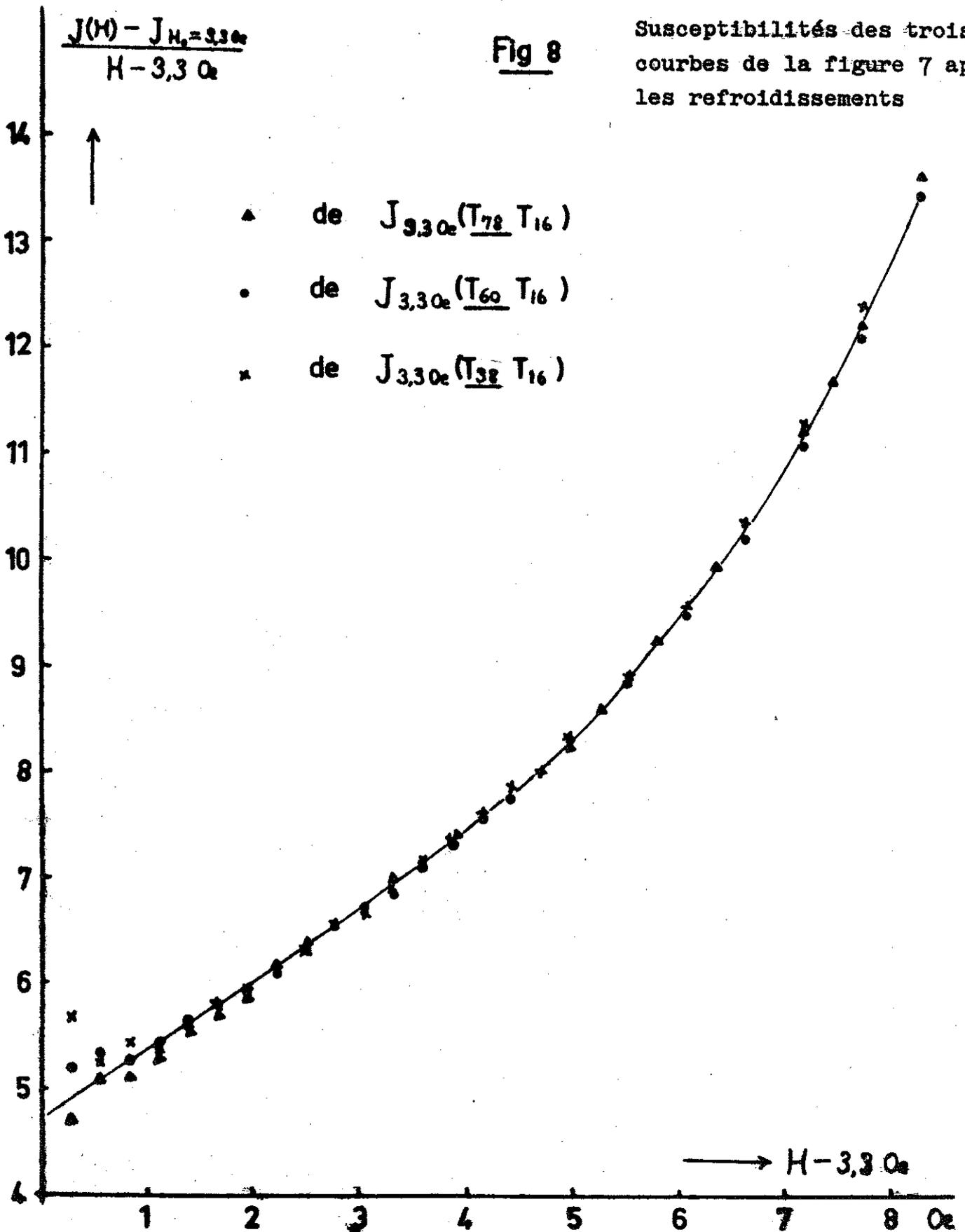


Fig 7

Variations des aimantations en fonction du champ tracées à 16°C après les refroidissements des températures différentes pour un fil d'acier ( $H_c=16$  Oe)

$\rightarrow H$



On ne trouve presque aucune différence entre les trois cas, à part dans la partie initiale de la courbe quelques écarts probablement dûs à des erreurs de mesure. C'est-à-dire qu'on ne peut pas déterminer un "champ thermique" pour le premier effet au moyen du tracé des variations d'aimantations avec le champ, après changement de la température.

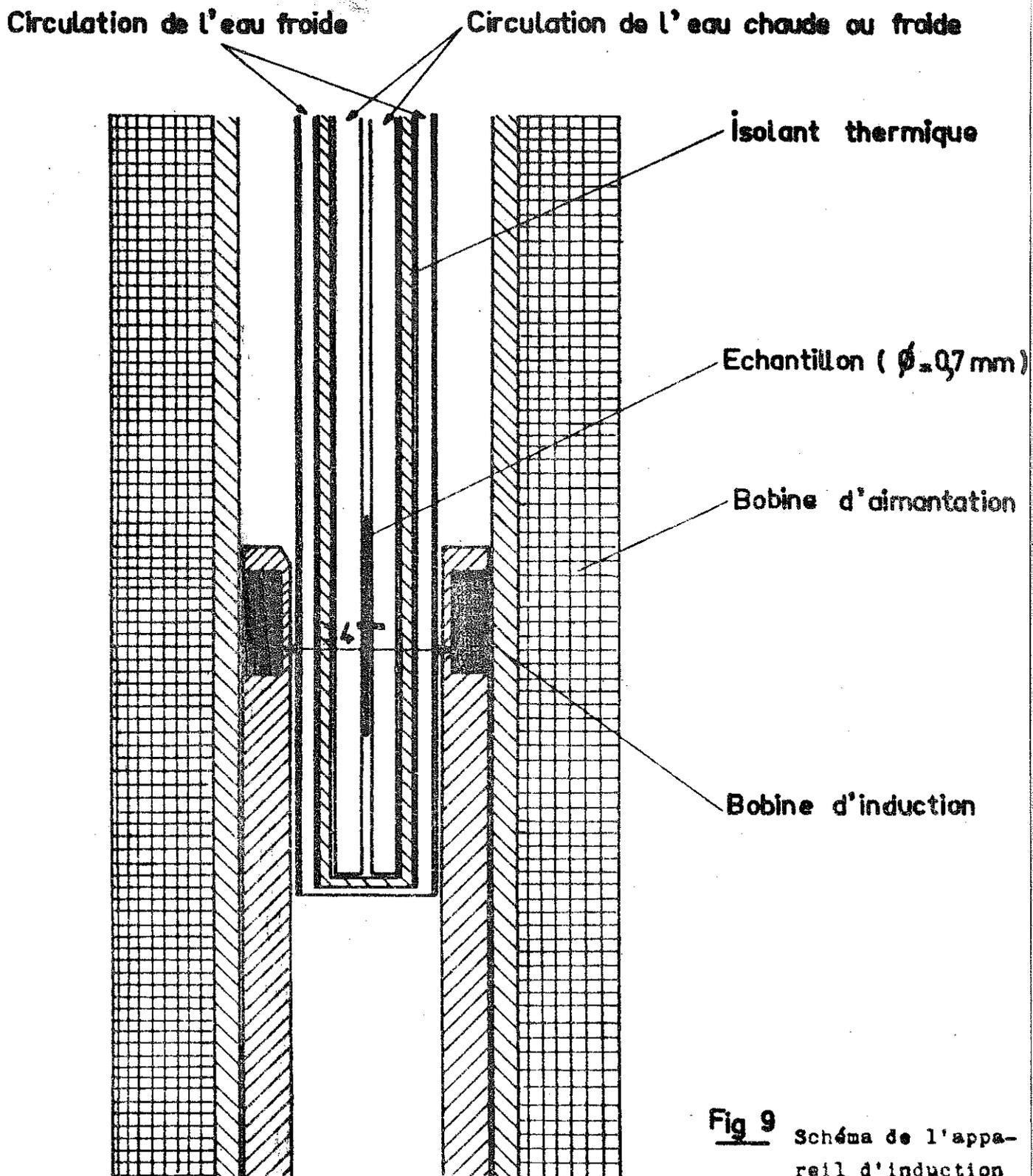
#### VI - INFLUENCE DU CHAMP DEMAGNETISANT SUR LE PREMIER EFFET DU $\hat{A}$ A LA VARIATION DE TEMPERATURE.

Ainsi que dans le cas de la variation de l'aimantation en fonction du champ après changement de la température, il est très important d'étudier l'influence du champ démagnétisant sur le premier effet, afin de tenter d'en élucider la nature.

Nous avons préparé six échantillons (acier au carbone,  $H_c = 16$  Oe) dont cinq avaient des formes approximativement ellipsoïdales. Les mesures ont été faites par la méthode d'extraction d'une bobine placée au milieu de l'échantillon.

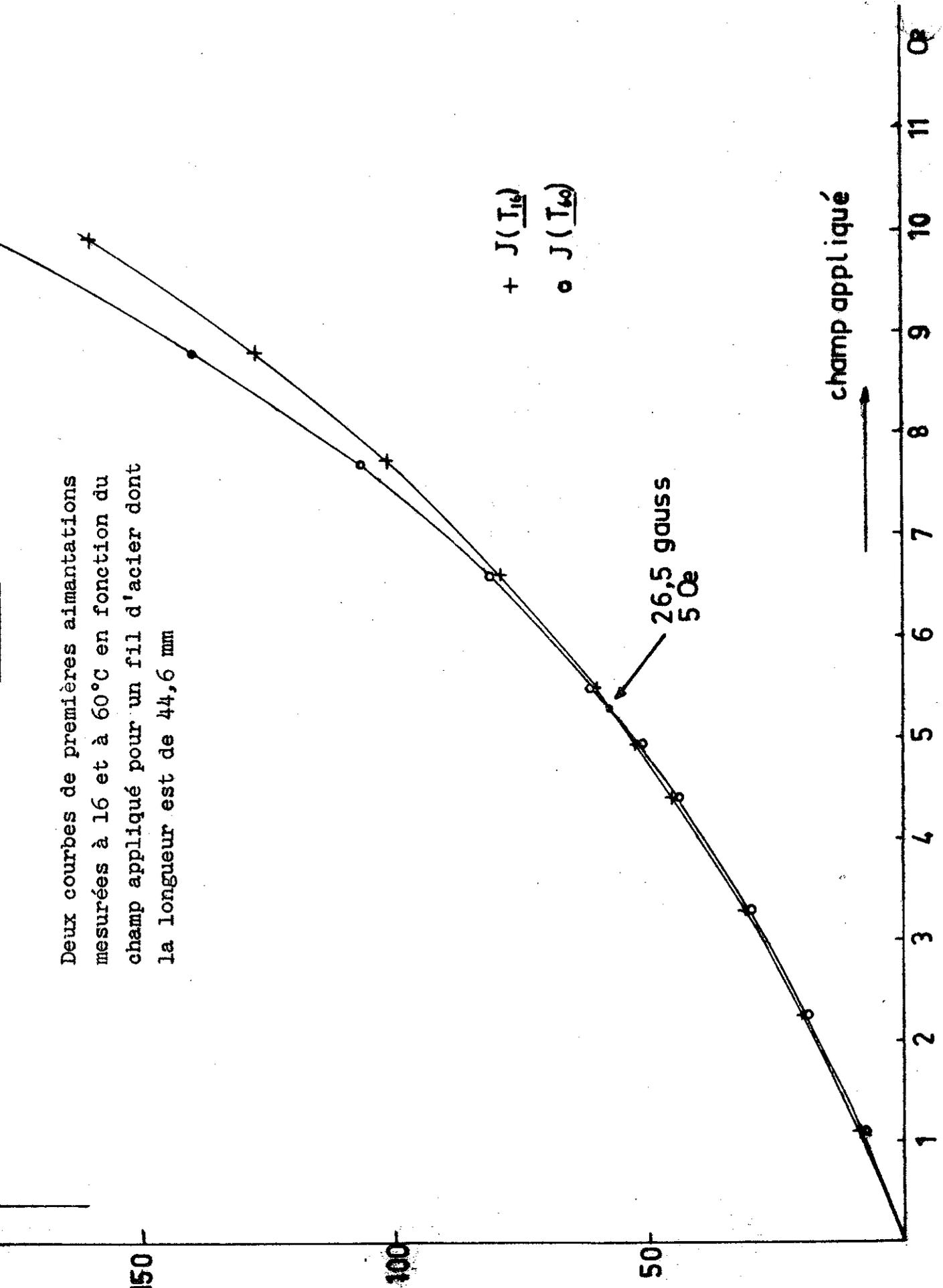
Comme le montre la figure 9, la section de la bobine induite est très grande par rapport à la section de l'échantillon, à cause de la présence de deux circulations d'eau (pour changer la température de l'échantillon et pour refroidir la bobine induite) placées entre la bobine et l'échantillon. L'extraction de la bobine dans un champ constant provoque une déviation du galvanomètre proportionnelle au moment magnétique de l'échantillon ; la constante de proportionnalité est différente pour chaque échantillon en raison simplement de la différence d'allongement des échantillons. D'ailleurs, on ne sait pas exactement le coefficient de champ démagnétisant de chaque échantillon, puisque les échantillons ne sont pas tout à fait ellipsoïdaux. Il faut déterminer expérimentalement pour chaque échantillon le coefficient de champ démagnétisant et la constante de proportionnalité de la déviation du galvanomètre à la valeur de l'aimantation.

Nous avons mesuré d'abord les déviations du galvanomètre en fonction du champ magnétique appliqué pour les trois courbes  $J(T_{16})$ ,  $J(T_{60})$  et  $J(T_{16} T_{60})$  de chaque échantillon. D'après les résultats de III on sait que les deux courbes  $J(T_{16})$  et  $J(T_{60})$  sont presque identiques au-dessous de 5,5 Oe, ou plus exactement



**Fig 9** Schéma de l'appareil d'induction

Deux courbes de premières aimantations mesurées à 16 et à 60°C en fonction du champ appliqué pour un fil d'acier dont la longueur est de 44,6 mm



que la courbe  $J(T_{60})$  est un peu au-dessous de la courbe  $J(T_{16})$  jusqu'à 5 Oe et qu'au-dessous de 5 Oe,  $J(T_{60})$  est un peu au-dessus de  $J(T_{16})$ . Le croisement des deux courbes donne toujours la valeur de l'aimantation correspondant à 26,5 gauss, ce qui permet de déterminer le coefficient de champ démagnétisant et la constante de proportionnalité de la déviation du galvanomètre à la valeur de l'aimantation. C'est ce que montre la figure 10 dans le cas de l'échantillon dont la longueur est 44,6 mm, le diamètre 0,7 mm.

Après la détermination de ces deux valeurs, nous avons vérifié qu'elles permettaient d'obtenir des courbes  $J(T_{16} T_{60})$  correctes à partir des déviations du galvanomètre en fonction des champs appliqués, et après correction du champ démagnétisant.

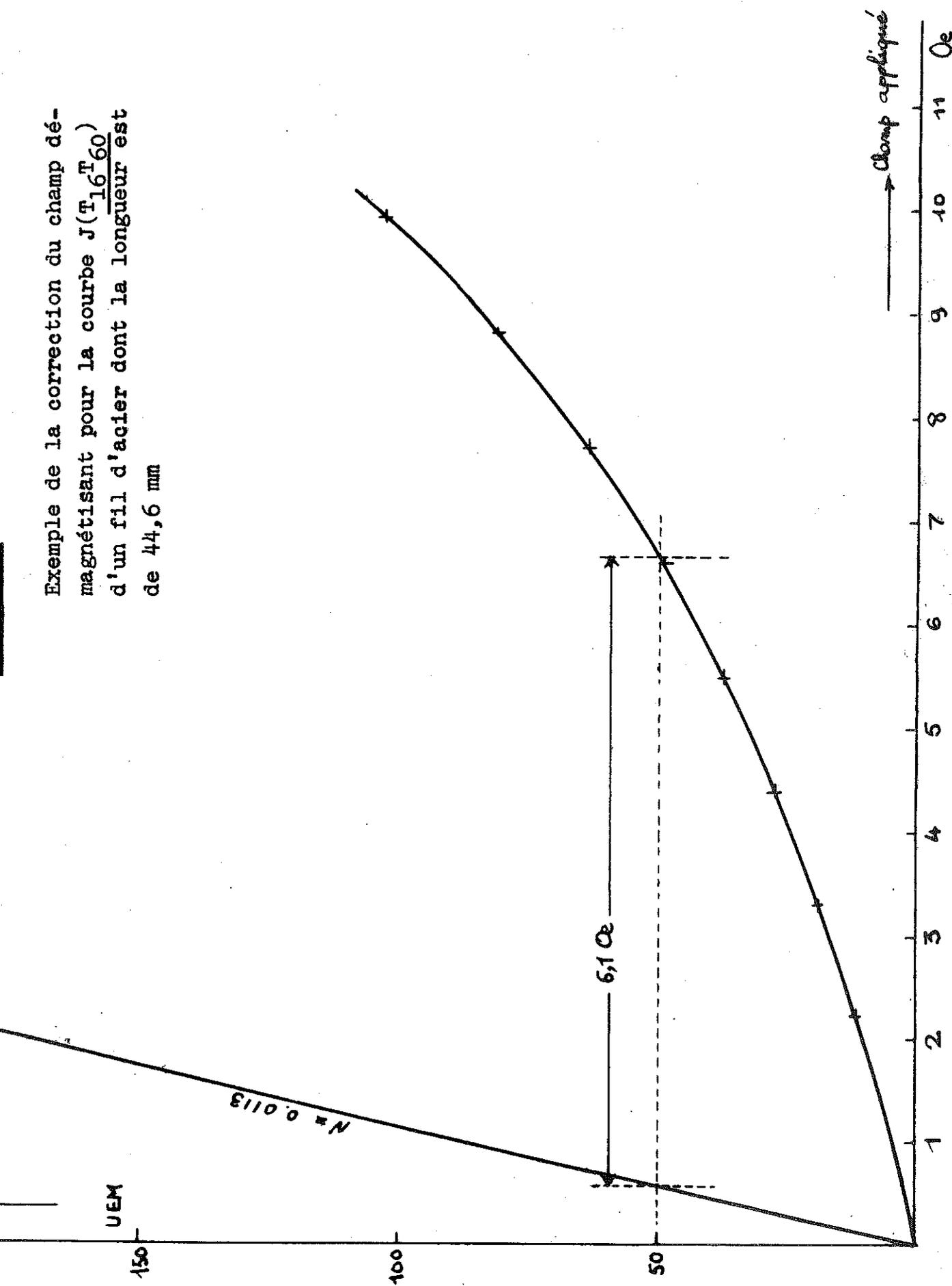
Sur la figure 11 est porté un exemple de cette vérification pour le même échantillon de la figure 10 : le champ interne correspondant à l'aimantation 50 uem, par exemple, est 6,1 Oe d'après la figure 11, ce qui est exactement la même valeur du champ pour l'aimantation 50 uem de la courbe  $J(T_{16} T_{60})$  sur la figure 5.

Voici les valeurs des coefficients de champs démagnétisants que nous avons déterminées expérimentalement pour chaque échantillon, en comparant avec les valeurs calculées pour les ellipsoïdes.

TABLEAU I

FORME	LONGUEUR	DIAMETRE MAXIMAL	Coefficient de champ démagnétisant	
			Valeur déterminée expérimentalement	Valeur calculée pour un ellipsoïde
ellipsoïde approximatif	14,8 mm	0,7 mm	0,074	0,077
"	19,3 mm	"	0,049	0,050
"	24,3 mm	"	0,031	0,0326
"	31,7 mm	"	0,0208	0,0214
"	44,6 mm	"	0,0113	0,0118
fil	100,5 mm	"	0,001	—

Exemple de la correction du champ dé-  
magnétisant pour la courbe  $J(T_{16}, T_{60})$   
d'un fil d'acier dont la longueur est  
de 44,6 mm



Pour étudier l'influence du champ démagnétisant sur le premier effet, nous avons tracé des valeurs :

$$X_t (T_{16} T_{60}) = J (\underline{T_{60} T_{16} T_{60}}) - J (\underline{T_{60} T_{16} T_{60}})$$

en fonction du champ appliqué pour chaque échantillon et nous avons ensuite déduit de ces courbes les valeurs de  $X_t (T_{16} T_{60})$  correspondant à un champ interne de 5 Oe au moment de l'application du champ.

La figure 12 représente un exemple de la détermination de la valeur de  $X_t (T_{16} T_{60})$  dans le cas de l'échantillon de longueur égale à 44,6 mm. La valeur de la correction du champ démagnétisant étant toujours :

$$J (\underline{T_{60} T_{16}}) N = 27,0 \text{ (UEM) } N,$$

on obtient pour cet échantillon

$$J (\underline{T_{60} T_{16}}) N = 0,31 \text{ Oe}$$

et la valeur de  $X_t (T_{16} T_{60})$  correspondant au champ interne 5 Oe au moment de l'application du champ est :

$$X_t (T_{16} T_{60}) = 5,9 \text{ UEM}$$

De même on peut déterminer les valeur de  $X_t (T_{16} T_{60})$  pour les autres échantillons. Sur la figure 13 a, sont portées les valeurs de  $X (T_{16} T_{60})$  correspondant au champ interne 5 Oe en fonction du coefficient de champ démagnétisant.

D'après les études de traînage magnétique de fluctuation<sup>(9)</sup> on sait que, s'il s'agissait de la partie différentielle irréversible de l'aimantation, l'influence du champ démagnétisant serait représentée par la formule suivante :

$$\Delta J = \frac{\Delta J_0}{1 + (a_0 + c_0)N} \quad (6)$$

où  $\Delta J$  est la valeur de l'augmentation d'aimantation provenant du premier effet pour l'échantillon du coefficient de champ démagnétisant  $N$ ,  $\Delta J_0$  celle pour  $N = 0$ ,  $a_0$  la susceptibilité réversible

Fig 12

Détermination du premier effet  
correspondant à champ interne  
5 Oe pour un fil d'acier dont la  
longueur est de 44,6 mm

o  $J(\underline{T_{60} T_{16}})$   
+  $X_t(T_{16} T_{60})$

EM

$J(\underline{T_{60} T_{16}})$

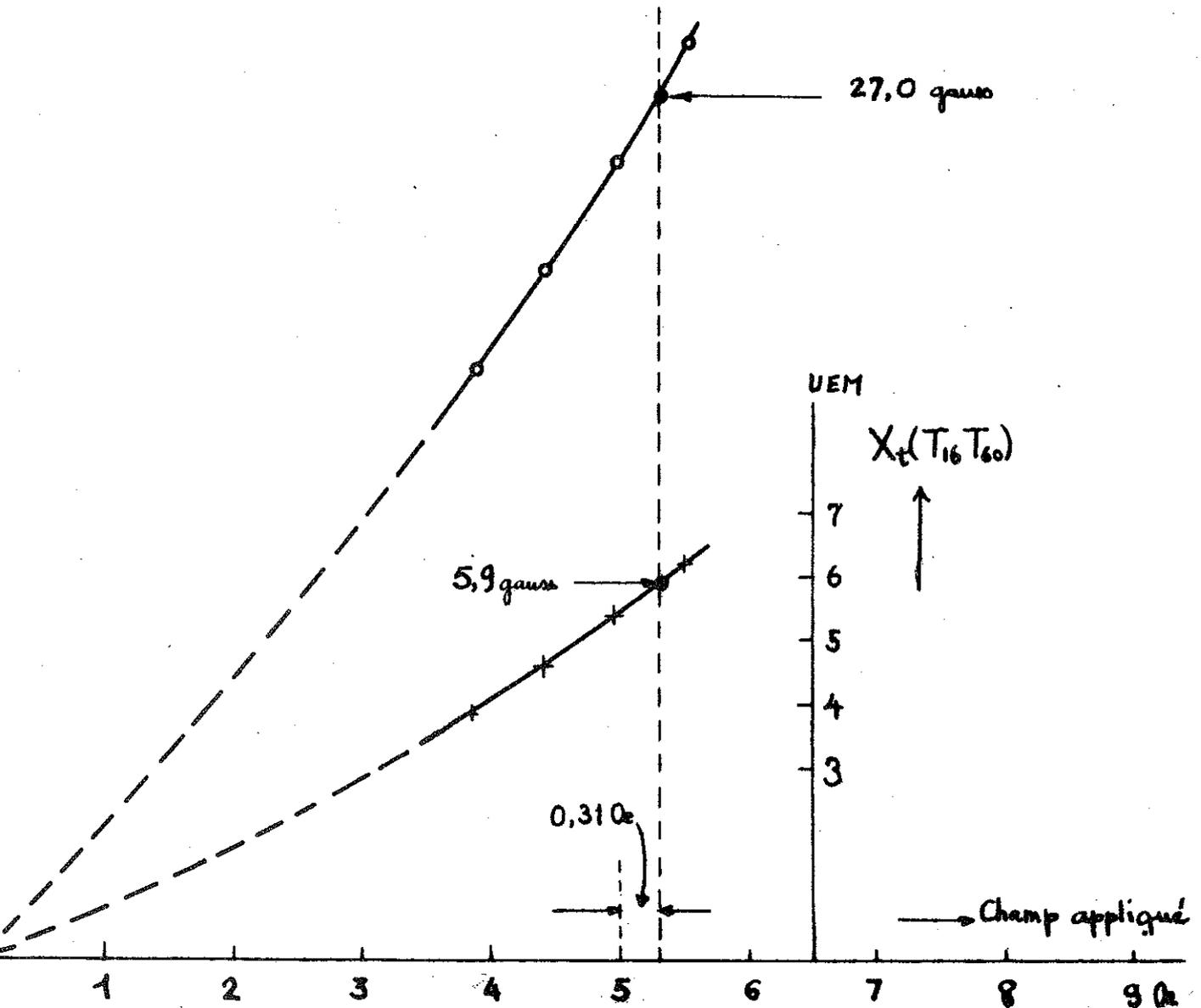
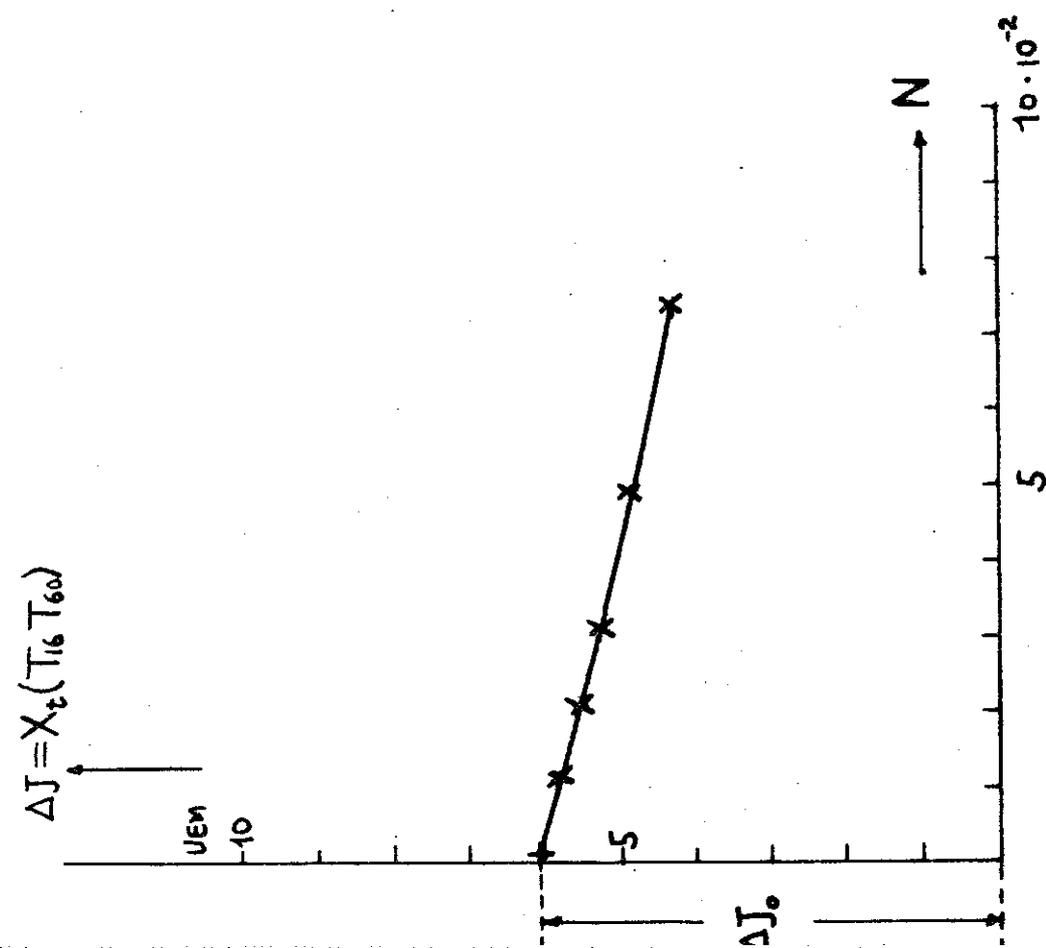
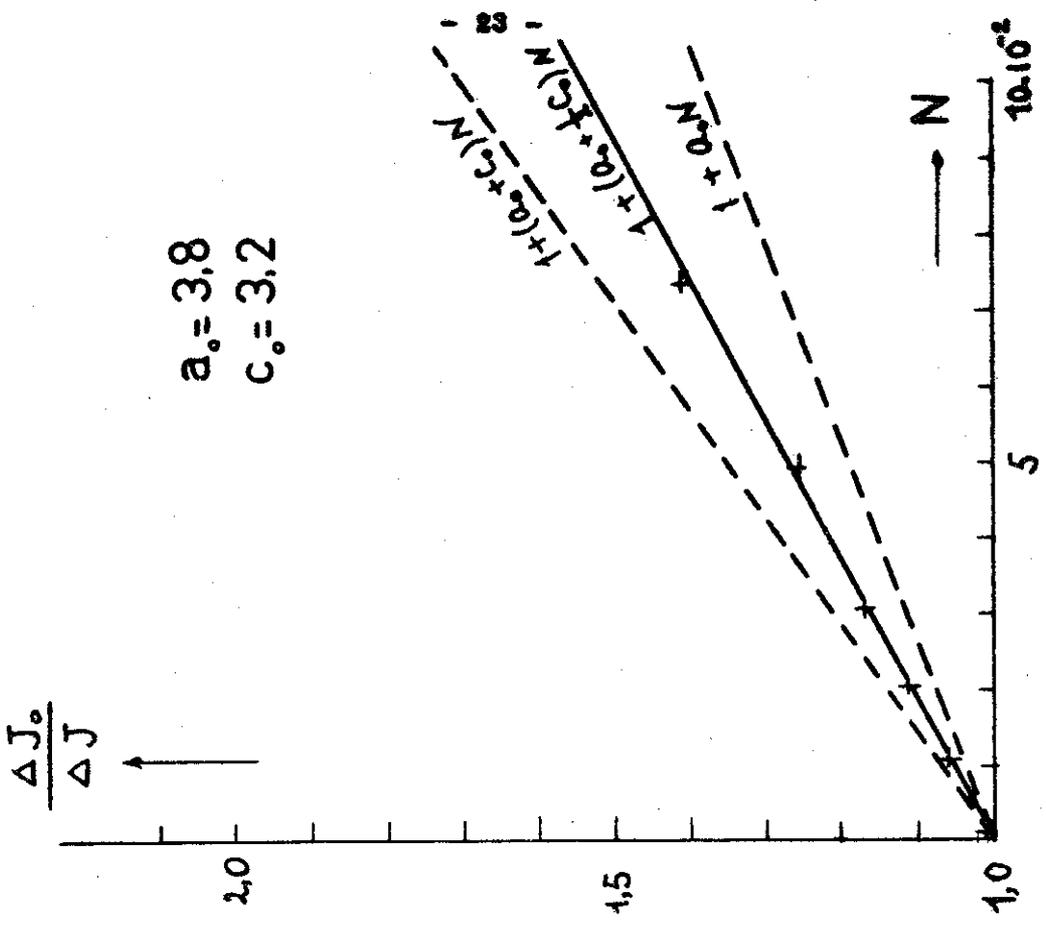


Fig 13

Le premier effet dû à la variation de température en fonction du coefficient de champ démagnétisant N pour un fil d'acier ( $H_c = 16 \text{ Oe}$ )



b

a

et  $c_0$  la susceptibilité différentielle irréversible. Nous avons donc tracé sur la figure 13 b les valeurs  $\frac{\Delta J_0}{\Delta J}$  en fonction de  $N$ , après avoir déterminé la valeur  $\Delta J_0$  sur la figure 13 a. Les deux courbes  $J(T_{60} T_{16})$  et  $J(T_{60} T_{16} T_{60})$  sont presque identiques et correspondent à une susceptibilité réversible  $a_0 = 3,8$  et une constante de Rayleigh  $b_0 = 0,32$ . Nous avons donc pour la valeur de  $c_0$  à 5 Oe

$$c_0 = 2 b_0 H = 3,2$$

Comme le montre la figure 13 b, les valeurs  $\frac{\Delta J_0}{\Delta J}$  déterminées expérimentalement sont nettement séparées de la droite de :

$$1 + (a_0 + c_0)N = 1 + 0,70 N$$

Les résultats obtenus montrent que  $\frac{\Delta J_0}{\Delta J}$  doit être représentée par :

$$\frac{\Delta J_0}{\Delta J} = 1 + (a_0 + \frac{1}{2} c_0) N = 1 + \chi N$$

$$\Delta J = \frac{\Delta J_0}{1 + \chi N} \quad (7)$$

où  $\chi$  signifie la susceptibilité totale de la courbe de première aimantation.

Supposons que l'augmentation de l'aimantation provenant du premier effet ne dépende que de  $J_0$ , la valeur de  $J(T_{60} T_{16})$  à 5 Oe, par exemple, et ne change pas, même si le champ magnétique varie. Cependant l'aimantation  $J_0$ , qui est provoquée par le champ magnétique, devient  $J_1$ , après la variation de la température à cause du champ démagnétisant  $-\Delta JN$ . Dans ces conditions, on peut écrire :

$$\Delta J = (\Delta J_0 + J_1) - J_0 \quad (8)$$

Puisque l'aimantation totale augmente toujours pendant le changement de la température de l'échantillon, on peut admettre que l'aimantation  $J_1$  ne prend pas la branche descendante du cycle d'hysté-

résis et reste sur la courbe de première aimantation. On a donc :

$$J_1 = \chi H_1 = \chi (H_0 - N \Delta J) \quad (9)$$

où  $H_1$  est le champ interne après la variation de la température de l'échantillon.

En supposant que  $\chi$  ait la même valeur à  $H_0$  et à  $H_1$ ,  $J_0$  s'écrit :

$$J_0 = \chi H_0 \quad (10)$$

D'après (8) (9) et (10) on obtient la formule (7)

$$\Delta J = \frac{\Delta J_0}{1 + \chi N} .$$

## VII - LES LOIS DU PREMIER EFFET DÛ A LA VARIATION DE TEMPERATURE

D'après les résultats des paragraphes V et VI, on sait maintenant que le premier effet ne dépend que de la valeur de l'aimantation et non pas de la susceptibilité irréversible ou même pas du champ magnétique.

Si la température  $T_a$  est inférieure à la température  $T_b$  en désignant par  $X_t (T_a T_b)$  l'effet de l'échauffement et par  $X_t (T_b T_a)$  l'effet du refroidissement, nous obtenons :

$$X_t (T_a T_b) = J (\underline{T_a T_b}) - J (\underline{T_a T_b}) \quad (11)$$

$$X_t (T_b T_a) = J (\underline{T_b T_a}) - J (\underline{T_b T_a}) \quad (12)$$

$$X_t (T_a T_b) = J (\underline{T_b T_a T_b}) - J (\underline{T_b T_a T_b}) \quad (13)$$

Nous allons d'abord étudier les résultats des formules (12) et (13), puisque les courbes  $J (\underline{T_b})$ ,  $J (\underline{T_b T_a})$ ,  $J (\underline{T_b T_a})$  et  $J (\underline{T_b T_a T_b})$  sont voisines les unes des autres.

Lorsqu'on trace les valeurs de  $X_t$  en fonction de la

Fig 14

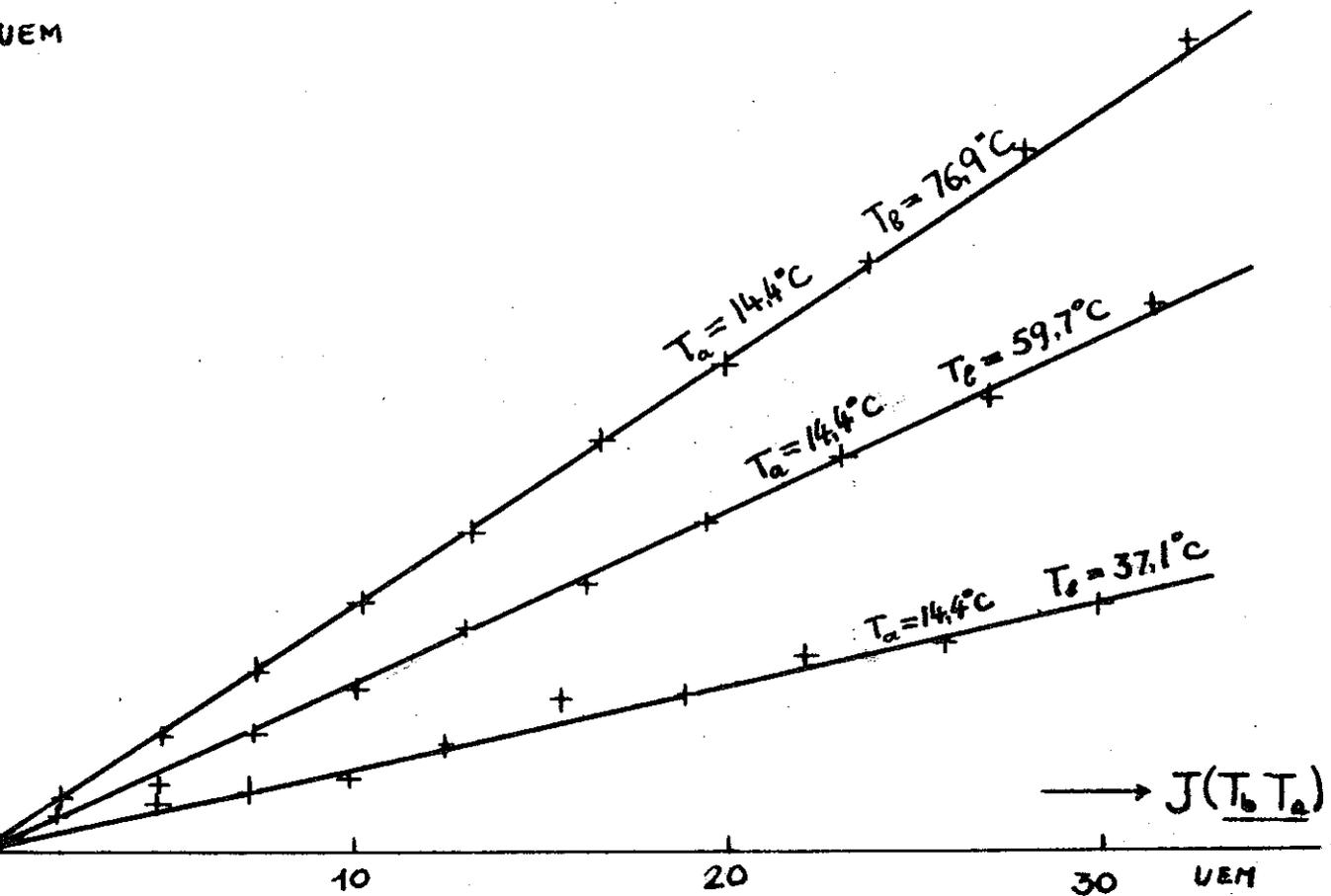
Le premier effet dû aux variations des températures en fonction de l'aimantation obtenue avant la variation de température.

Acier ( $H_1 = 16 \text{ Oe}$ )

$$J(\underline{T_b T_a T_b}) - J(\underline{T_b T_a T_b})$$

↑  
 $T_a < T_b$

UEM



valeur de l'aimantation avant variation de la température sous champ, on obtient des droites correspondant chacune à une valeur déterminée de la différence  $T_b - T_a$ . Sur la figure 14 nous avons représenté en fonction de  $J(T_b, T_a)$  des résultats correspondant à la formule (13), pour l'acier mi-doux que nous avons étudié dans les paragraphes précédents.

La figure 15 donne les valeurs de  $X_t(T_a, T_b)$  ou  $X_t(T_b, T_a)$  en fonction de la différence  $T_b - T_a$  : on remarque encore que les points sont alignés sur la même droite, qu'il s'agisse d'un refroidissement ou d'un échauffement.

Par conséquent, compte tenu de la proportionnalité à l'aimantation observée sur la figure 14  $X_t(T_a, T_b)$  et  $X_t(T_b, T_a)$  peuvent se représenter par la formule suivante :

$$X_t(T_a, T_b) = X_t(T_b, T_a) = k_t J T \quad (14)$$

où l'on désigne par  $T$  la différence entre les deux températures  $T_a$  et  $T_b$  et par  $k_t$  une constante.

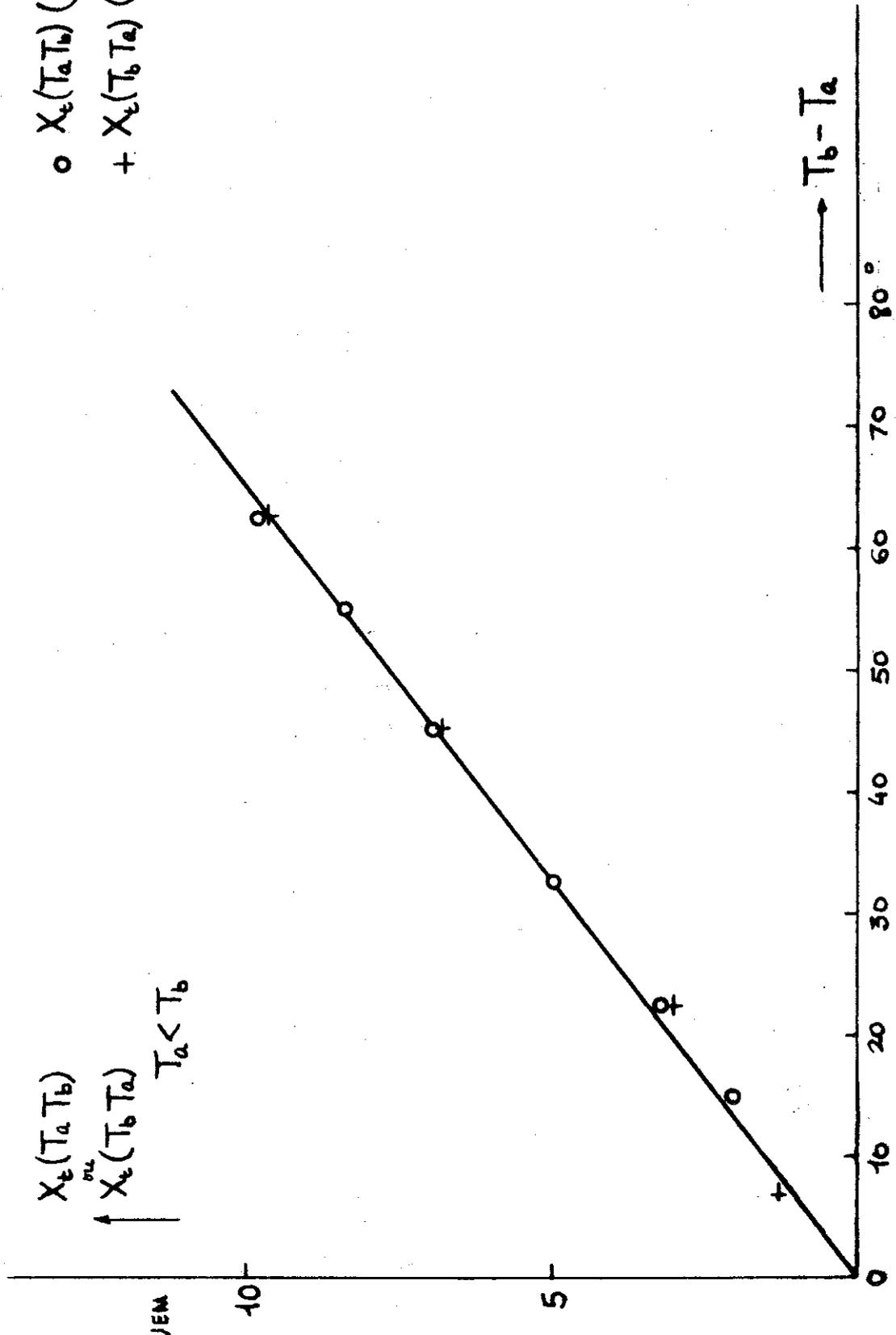
D'après des résultats expérimentaux sur l'acier mi-doux ( $H_c = 16 \text{ Oe}$ ) nous avons obtenu :  $k_t = 5,1 \cdot 10^{-3} / \text{deg}$ .

Les valeurs de  $X(T_a, T_b)$  correspondant à la formule (11) sont plus grandes que celles de la formule (13) ce qui provient de la grande différence entre les deux courbes  $J(T_a)$  et  $J(T_a, T_b)$ . Si l'on trace les valeurs de  $X$  en fonction de la valeur moyenne de  $J(T_a)$  et de  $J(T_a, T_b)$  on obtient approximativement des droites auxquelles correspondent à peu près la même constante  $k_t$  dans les formules (12) et (13). Sur la figure 16 nous avons représenté les résultats de la formule (11) pour le cas  $T_a = 16^\circ\text{C}$   $T_b = 60^\circ\text{C}$  : en abscisse on a porté :

$$\frac{1}{2} J(T_{16}) + \frac{1}{2} J(T_{16}, T_{60})$$

D'après ce qui précède on peut penser que le premier effet ne dépend que de l'état de l'aimantation, c'est-à-dire, de la distribution des parois à  $90^\circ$  et des parois à  $180^\circ$ , par exemple.

Acier ( $H_f = 16 \text{ Oe}$ )  
à 30 UEM

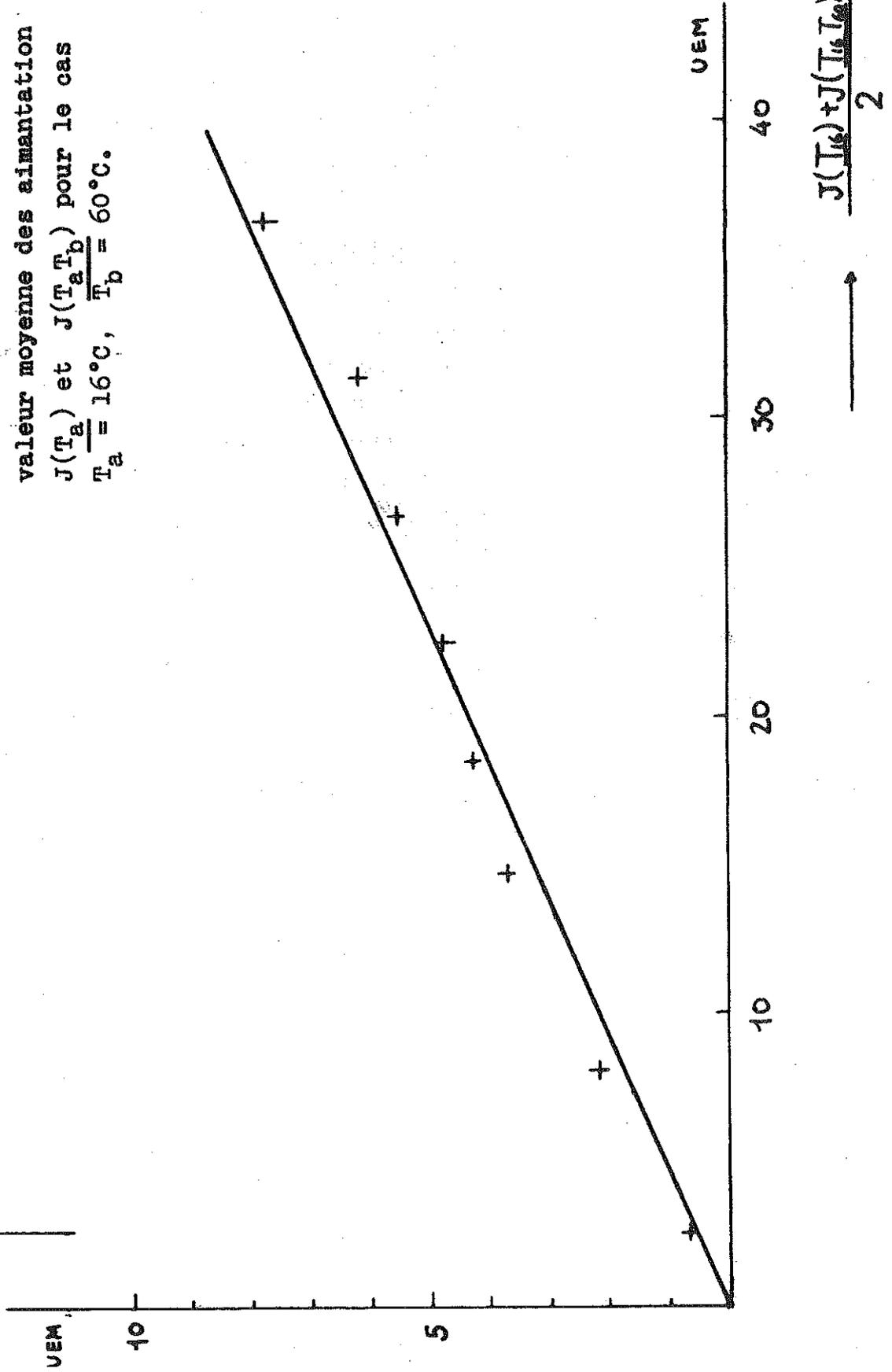


o  $X_E(T_a, T_b)$  (échauffement)  
 +  $X_E(T_b, T_a)$  (refroidissement)

Fig 16

$$J(\overline{I_{16} T_{60}}) - J(\overline{I_{16} T_{60}})$$

Le premier effet correspondant à la formule (11) en fonction de la valeur moyenne des aimantation  $J(\overline{T_a})$  et  $J(\overline{T_a T_b})$  pour le cas  $\overline{T_a} = 16^\circ\text{C}$ ,  $\overline{T_b} = 60^\circ\text{C}$ .



Comme le cas de la formule (11), s'il y a un changement de l'état de l'aimantation pendant la variation de la température, pour la valeur de l'aimantation il faut tenir compte de la différence entre la valeur de l'aimantation avant variation de la température et celle en éliminant le premier effet après variation de la température.

### VIII - LE PREMIER EFFET SUR LA BRANCHE DESCENDANTE DU CYCLE D'HYS- TERESIS DANS LE DOMAINE DE RAYLEIGH

Nous avons montré sur la figure 1 que le premier effet se produit aussi sur la branche descendante du cycle d'hystérésis. Sur la figure 17 sont portés des résultats expérimentaux sur l'acier mi-doux pour le cas de l'échauffement dans le domaine de Rayleigh. La courbe  $J(T_{16}T_{60})$  signifie la valeur de l'aimantation obtenue en fonction du champ H, en désaimantant à la température initiale 16°C, en appliquant le champ 5,5 Oe à 16°C, puis en ramenant à la valeur du champ H à la même température 16°C et ensuite en élevant la température de l'échantillon de 16° à 60°C dans ce même champ H, la courbe  $J(T_{16})$  étant l'aimantation obtenue à 16°C avant élévation de la température de 16 à 60°C.  $J(T_{16}T_{60})$  représente la branche descendante du cycle d'hystérésis de 5,5 à -5,5 Oe à la température 60°C, après le traitement initial suivant : désaimantation à 16°C, élévation de la température de 16 à 60°C dans un champ nul, application du champ 5,5 Oe à la température 60°C.

De 5,5 à 1,2 Oe l'aimantation augmente par l'échauffement de 16 à 60°C, tandis que de 1,2 à -5,5 Oe la variation de l'aimantation change son signe. Chacune des deux courbes  $J(T_{16})$  et  $J(T_{16}T_{60})$  correspond à des aimantations à peu près égales en valeur absolue à 5,5 Oe et à -5,5 Oe, ce qui permet de dire que les changements d'aimantations accompagnant la variation de température sont égaux en valeur absolue à 5,5 Oe et à -5,5 Oe. Par contre pour la courbe de  $J(T_{16}T_{60})$ , les aimantations sont très différentes en valeur absolue à 5,5 Oe et à -5,5 Oe : c'est-à-dire que  $J(T_{16}T_{60})$  correspond à des cycles dissymétriques.

Quand on applique la formule (1) :

$$X_t(T_{16}T_{60}) = J(T_{16}T_{60}) - J(T_{16}T_{60})$$

Fig 17

Les effets dans le cas de l'échauffement de 16 à 60°C sur la branche descendante du cycle d'hystérésis pour un fil d'acier ( $H_c = 16 \text{ Oe}$ )

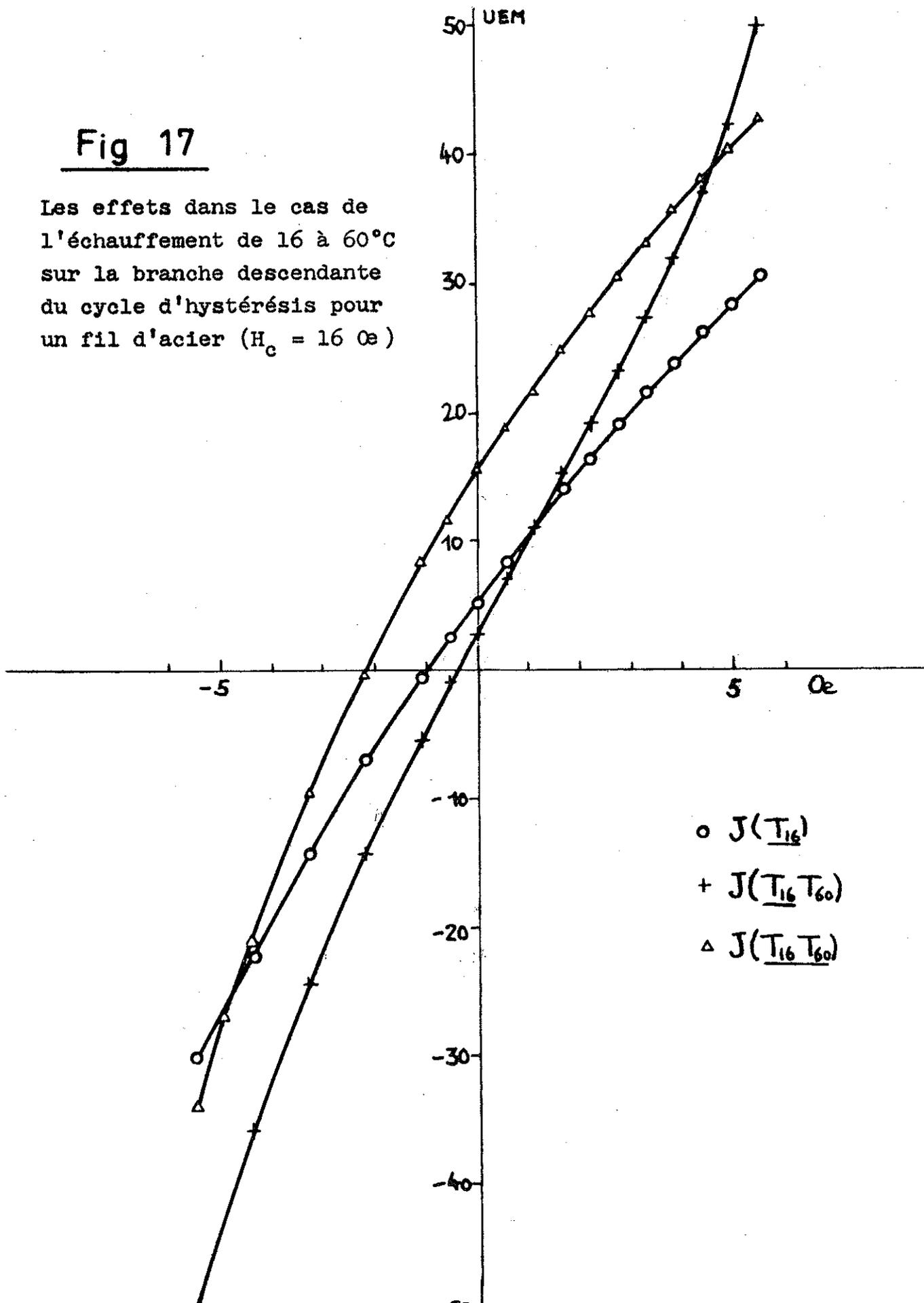
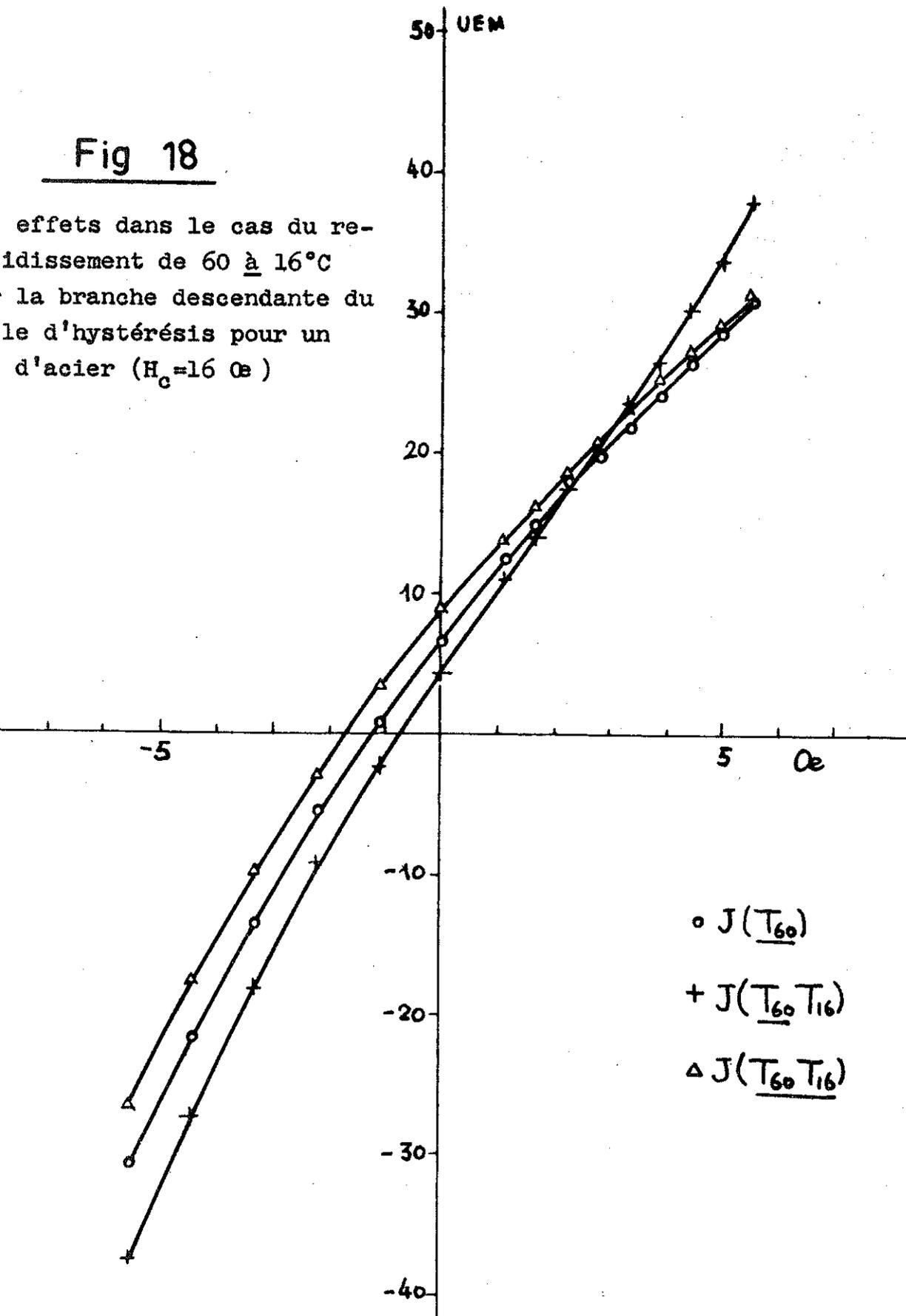


Fig 18

effets dans le cas du re-  
idissement de 60 à 16°C  
la branche descendante du  
le d'hystérésis pour un  
d'acier ( $H_c = 16 \text{ Oe}$ )



aux valeurs de  $J(T_{16}T_{60})$  et  $J(T_{16}T_{60})$  correspondant à  $- 5,5 \text{ Oe}$  on obtient  $X_t(T_{16}T_{60})$  correspondant à  $- 5,5 \text{ Oe}$ , qui est très différente en valeur absolue de  $X_t(T_{16}T_{60})$  à  $5,5 \text{ Oe}$ : c'est une preuve que la formule (1) n'est pas valable dans la région de  $5,5 \text{ Oe}$  à  $- 5,5 \text{ Oe}$ . Alors on ne peut pas déterminer les valeurs de  $X_t(T_{16}T_{60})$  sur la branche descendante du cycle d'hystérésis dans le domaine de Rayleigh par la formule (1) que nous avons utilisée sur la courbe de première aimantation.

De même nous avons représenté sur la figure 18 des résultats pour le refroidissement de l'acier. On remarque encore que  $J(T_{60}T_{16})$  est dissymétrique, tandis que chacune des courbes  $J(T_{60})$  et  $J(T_{60}T_{16})$  correspond à des aimantations à peu près égales en valeur absolue à  $5,5 \text{ Oe}$  et à  $- 5,5 \text{ Oe}$ .

#### IX - LE DEUXIEME EFFET DU A LA VARIATION DE TEMPERATURE

Rappelons que la variation de l'aimantation due à un échauffement de  $16$  à  $60^\circ\text{C}$  dans un champ constant comprend deux parties dont la première que nous avons désignée par  $X_t(T_{16}T_{60})$  et la seconde qui provient du changement de la courbe de l'aimantation. Nous allons étudier maintenant cette seconde partie.

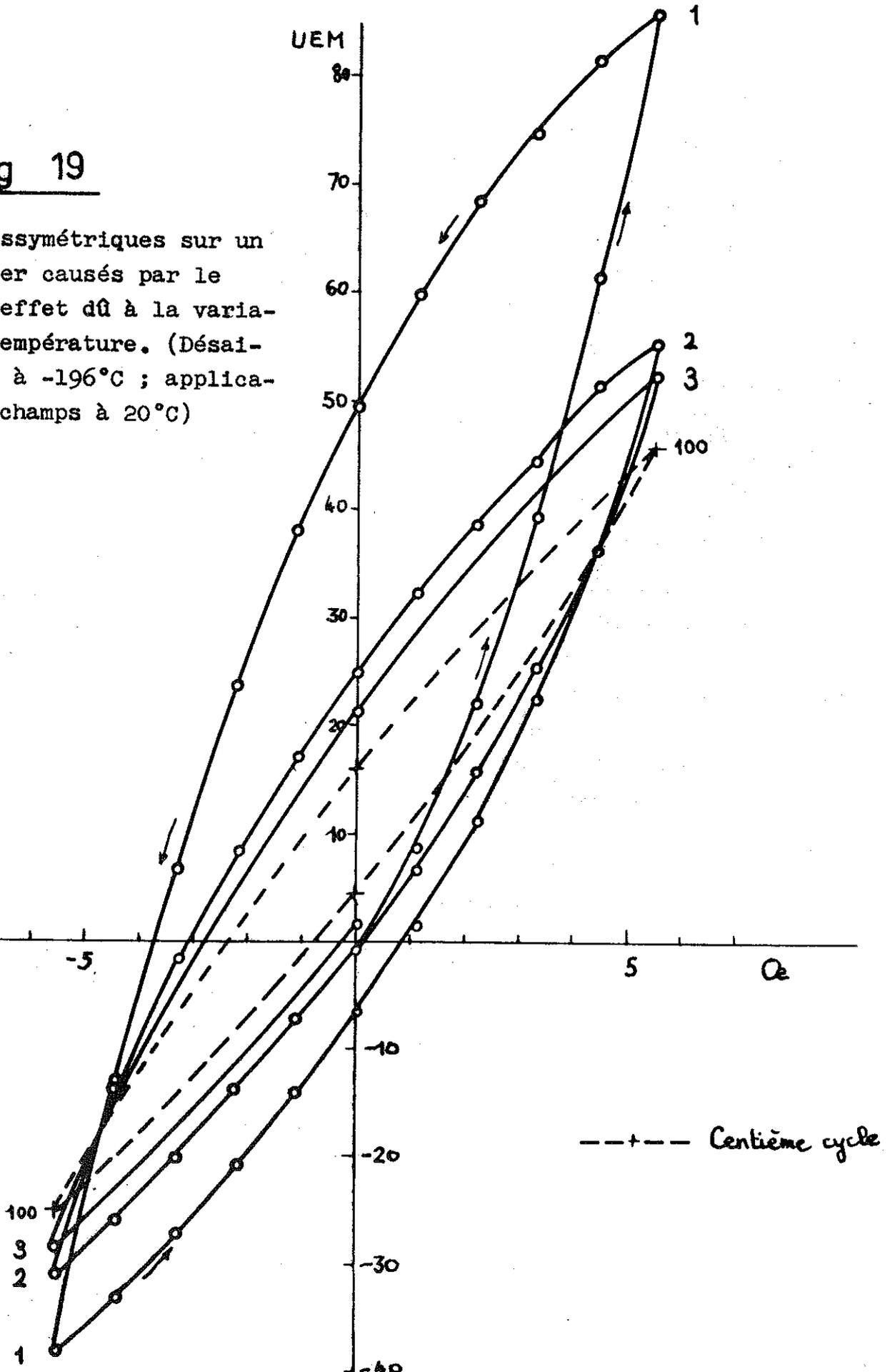
La figure 5 montre que la courbe  $J(T_{16}T_{60})$  est très différente de la courbe  $J(T_{60})$ , bien que les deux courbes soient mesurées à la même température  $60^\circ\text{C}$ . Nous désignerons cette anomalie de l'isotherme de première aimantation sous le nom du deuxième effet dû à la variation de température.

Lorsqu'un échantillon initialement désaimanté à la température  $T_a$  subit une variation de la température de  $T_a$  à  $T_b$  puis est soumis au champ magnétique, on observe en général ce deuxième effet dû à la variation de température. En désignant par  $X_{te}(T_aT_b)$  les valeurs des différences des aimantations  $J(T_aT_b)$  et  $J(T_b)$ , nous obtenons comme la représentation du deuxième effet la formule suivante :

$$Y_{te}(T_aT_b) = J(T_aT_b) - J(T_b) \quad (15)$$

Fig 19

les dissymétries sur un  
d'acier causés par le  
ième effet dû à la varia-  
n de température. (Désai-  
tation à  $-196^{\circ}\text{C}$  ; applica-  
n des champs à  $20^{\circ}\text{C}$ )



---+--- Centième cycle

La figure 5 montre que pour l'acier mi-doux ( $H_c = 16 \text{ Oe}$ ) on observe très nettement le deuxième effet pour un échauffement de  $T_a = 16^\circ\text{C}$  à  $T_b = 60^\circ\text{C}$  mais très peu pour un refroidissement de  $T_a = 60^\circ\text{C}$  à  $T_b = 16^\circ\text{C}$ .

Le deuxième effet donne toujours naissance à des cycles dissymétriques comme dans le cas de la branche descendante du cycle d'hystérésis pour  $J(T_{16}T_{60})$  de la figure 17. Sur la figure 19 sont représentées les dissymétries des cycles d'hystérésis que nous avons observées sur le même acier dans le cas où  $T_a$  est  $-196^\circ\text{C}$ , la température de l'azote liquide et  $T_b + 20^\circ\text{C}$ . Nous avons une grande susceptibilité anormale de la courbe de première aimantation et une grande aimantation rémanente à la branche descendante de premier cycle d'hystérésis. Les champs magnétiques correspondant à une aimantation nulle sont tout à fait différents à la branche descendante et à la branche montante. Le cycle d'hystérésis se stabilise de plus en plus avec le nombre de cycles. Nous avons porté sur la même figure le centième cycle où les deux aimantation rémanentes ont le signe positif et où les deux champs correspondant à une aimantation nulle ont le signe négatif.

Si la première application du champ magnétique après la variation de la température est effectuée en sens contraire, tous les caractères des dissymétries des cycles d'hystérésis sont inversés.

#### X - CARACTERISTIQUES DU DEUXIEME EFFET DU A LA VARIATION DE TEMPERATURE.

Au paragraphe VI on a constaté que, quand on fait la correction du champ démagnétisant, la courbe  $J(T_{16}T_{60})$  ne change pas avec la variation de la dimension de l'échantillon ce qui permet de dire que  $J(T_aT_b)$  correspond à des propriétés intrinsèques de l'échantillon.

Sur la figure 20 nous avons représenté pour l'acier mi-doux les variations de  $Y_{te}(T_aT_b)$  de la formule (15) en fonction des valeurs des aimantations  $J(T_b)$  dans le cas où  $T_a < T_b$ . On constate une bonne proportionnalité entre ces deux valeurs, pour plusieurs valeurs des différences entre  $T_a$  et  $T_b$ . On peut donc écrire :

$$Y_{te}(T_aT_b) = k_{ye} J(T_b) \quad (16)$$

Fig 20

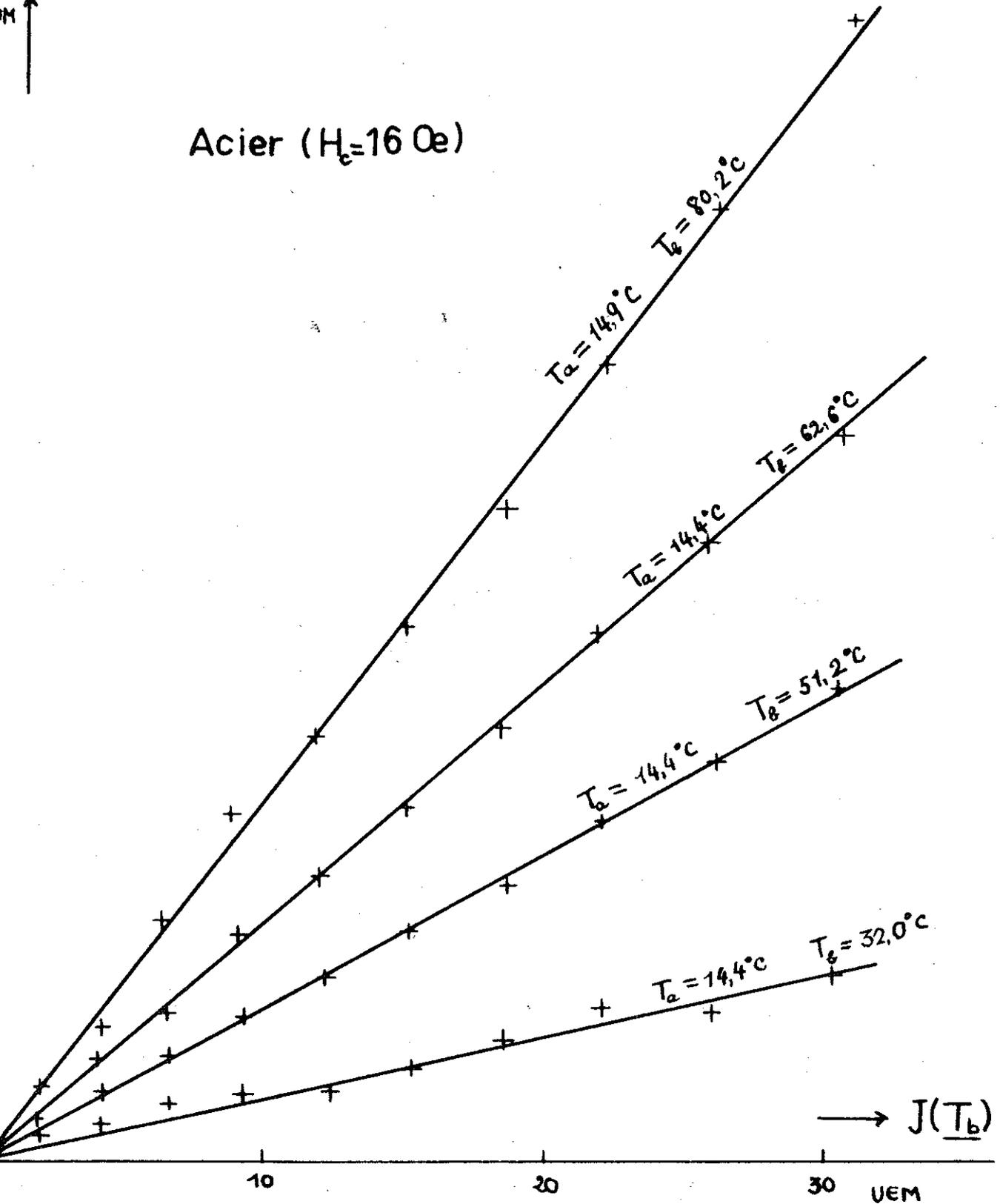
Le deuxième effet dû aux variations des températures en fonction de l'aimantation

$Y_{te}(T_a, T_b)$

$T_a < T_b$

$\uparrow M$

Acier ( $H_e = 16 \text{ Oe}$ )



où  $k_{ye}$  est une constante. Compte tenu de la première loi de Rayleigh

$$J(T_b) = a_0 H + b_0 H^2$$

on obtient d'après (15) et (16)

$$J(T_a T_b) = (1 + k_{ye}) \cdot J(T_{60}) = (1 + k_{ye})(a_0 H + b_0 H^2) \quad (17)$$

La formule (17) signifie que la première loi de Rayleigh est valable pour la courbe  $J(T_a T_b)$ .

La figure 21 donne les valeurs de  $Y_{te}(T_a T_b)$  correspondant à  $J(T_b) = 30$  u é m pour le même échantillon en fonction des différences des températures  $T_b$  et  $T_a$ . Dans ce cas on n'obtient pas une ligne droite. D'après ces résultats expérimentaux  $k_{ye}$  de la formule (16) peut se représenter par la formule suivante :

$$k_{ye} = \alpha T^n \quad (18)$$

où l'on désigne par  $T$  la différence des deux températures  $T_a$  et  $T_b$  et par  $\alpha$  une constante. Nous avons obtenu pour cet échantillon

$$n = 1,345 \simeq \frac{4}{3}$$

$$\alpha = 2,3 \cdot 10^{-3}$$

Le deuxième effet se produit dans le cas où l'on modifie la température de l'échantillon après désaimantation. Expérimentalement, on ne l'observe pas si l'on modifie la température de l'échantillon sur le cycle d'hystérésis décrit après saturation.

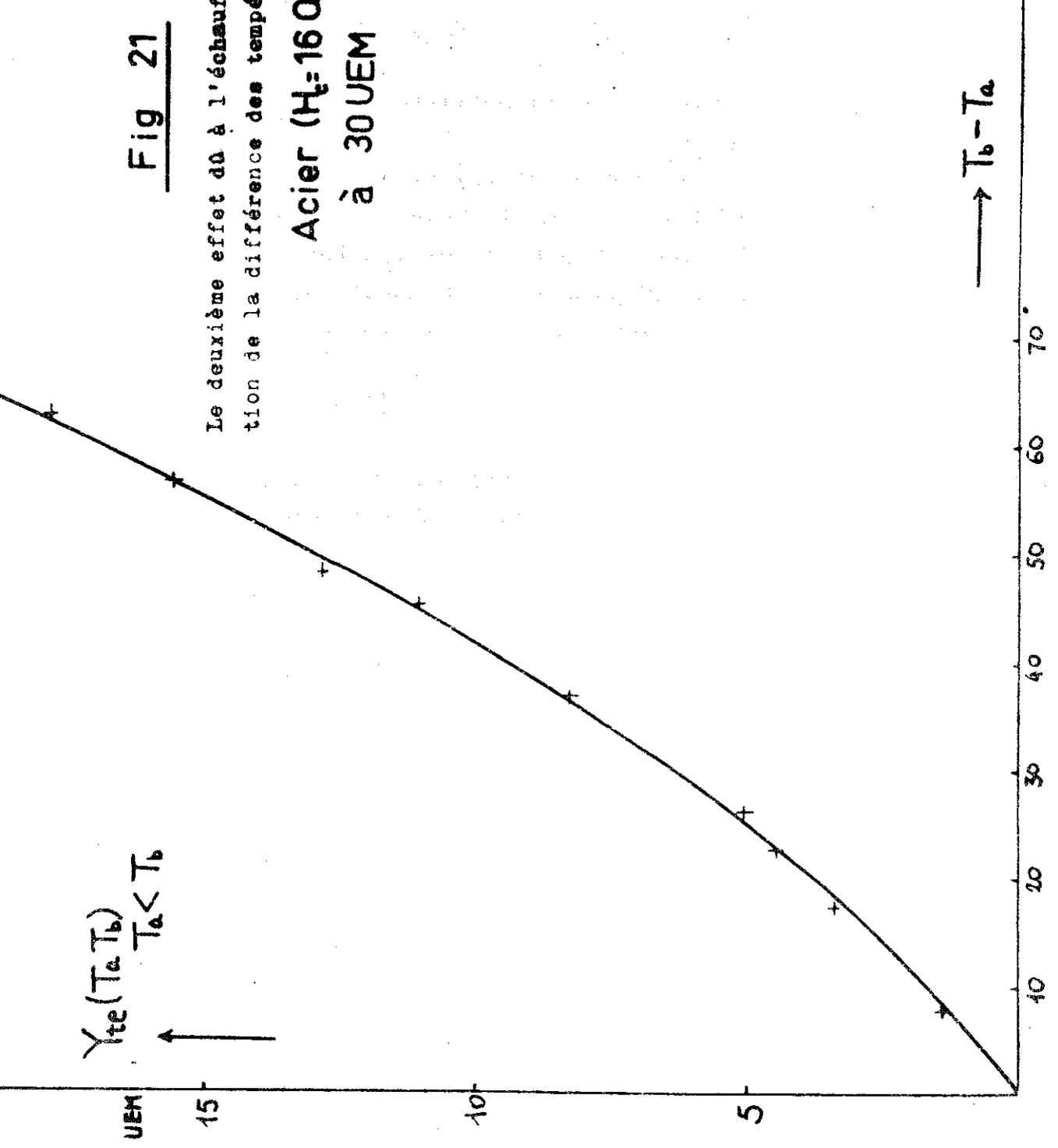
Les formules (11)(12) et (13) signifient qu'on observe le deuxième effet quel que soit l'ordre de la variation de la température et de l'application du champ. Cependant dans le cas où l'on applique d'abord le champ après désaimantation puis que l'on fait varier la température, le deuxième effet est toujours accompagné du premier effet.

Fig 21

Le deuxième effet dû à l'échauffement en fonction de la différence des températures

Acier ( $H_f = 16 \text{ Oe}$ )  
à 30 UEM

$\chi_{te}(T_a, T_b)$   
 $\frac{T_a < T_b$



Lorsqu'on chauffe un échantillon de  $T_a$  à  $T_b$  après désaimantation à  $T_a$ , qu'on le refroidit de  $T_b$  à  $T_c$ , qui est plus haute que  $T_a$ , et puis qu'on trace la courbe de première aimantation on obtient en général une courbe qui est un peu au-dessous de la courbe  $J(T_a T_c)$ . Nous avons représenté sur la figure 22 la courbe de  $J(T_{16} T_{79} T_{60})$  en comparant avec les courbes  $J(T_{16} T_{60})$  et  $J(T_{60})$ . On remarque que  $J(T_{16} T_{79} T_{60})$  est au-dessous de  $J(T_{16} T_{60})$  surtout dans la région du champ faible.

De toutes façons il est certain qu'une variation de température après désaimantation provoque des déplacements de parois, même en champ nul.

#### XI - LE DEUXIEME EFFET DU A LA VARIATION DE TEMPERATURE SUR UN FIL DE NICKEL.

Il est nécessaire d'étudier ces phénomènes sur de nombreuses substances pour en éclaircir le mécanisme. Nous présenterons d'abord les résultats expérimentaux du deuxième effet sur un fil de nickel.

Sur un fil d'acier nous avons observé très nettement le deuxième effet pour un échauffement, mais très peu pour un refroidissement. Par contre, sur un fil de nickel ( $H_c = 11,9$  Oe), le deuxième effet apparaît aussi bien pour un échauffement que pour un refroidissement, comme le montre la figure 23. En désignant par  $Y_{te}(T_a T_b)$  la valeur du deuxième effet pour l'échauffement et par  $Y_{tr}(T_b T_a)$  pour le refroidissement nous avons donc :

$$\begin{aligned} Y_{te}(T_a T_b) &= J(T_a T_b) - J(T_b) \\ Y_{tr}(T_b T_a) &= J(T_b T_a) - J(T_a) \end{aligned} \quad (19)$$

où  $T_a < T_b$ . La proportionnalité de  $Y_{te}$  ou  $Y_{tr}$  à l'aimantation  $J$  étant toujours valable, nous avons :

$$\begin{aligned} Y_{te}(T_a T_b) &= k_{ye} J(T_b) \\ Y_{tr}(T_b T_a) &= k_{yr} J(T_a) \end{aligned} \quad (20)$$

Fig 22

Comparaison des courbes  $J(T_a, T_b, T_c)$   
et  $J(T_a, T_c)$  dans le cas où  $T_a = 16^\circ\text{C}$ ,  
 $T_b = 79^\circ\text{C}$  et  $T_c = 60^\circ\text{C}$  sur un fil d'acier ( $H_c = 160e$ )

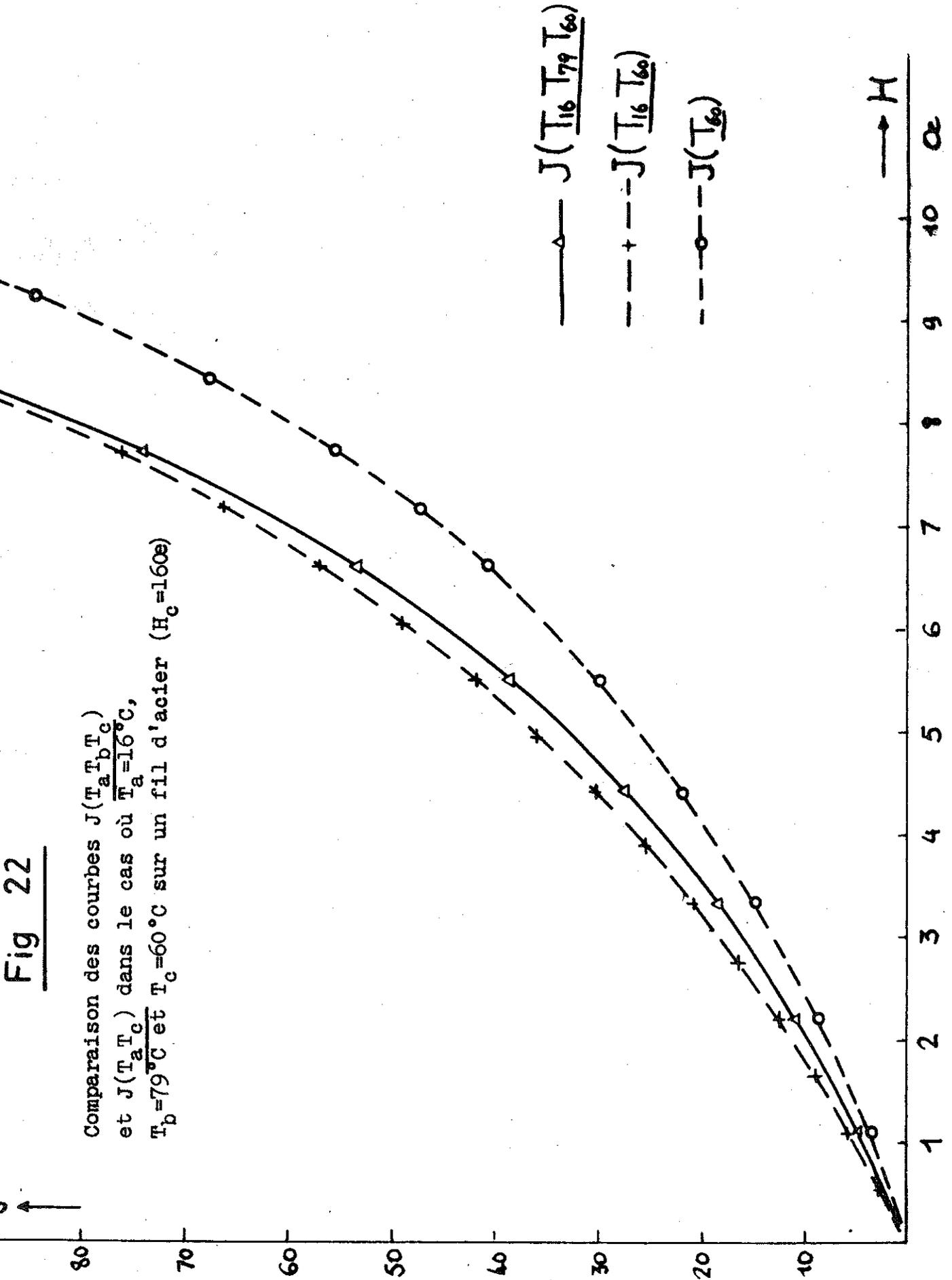
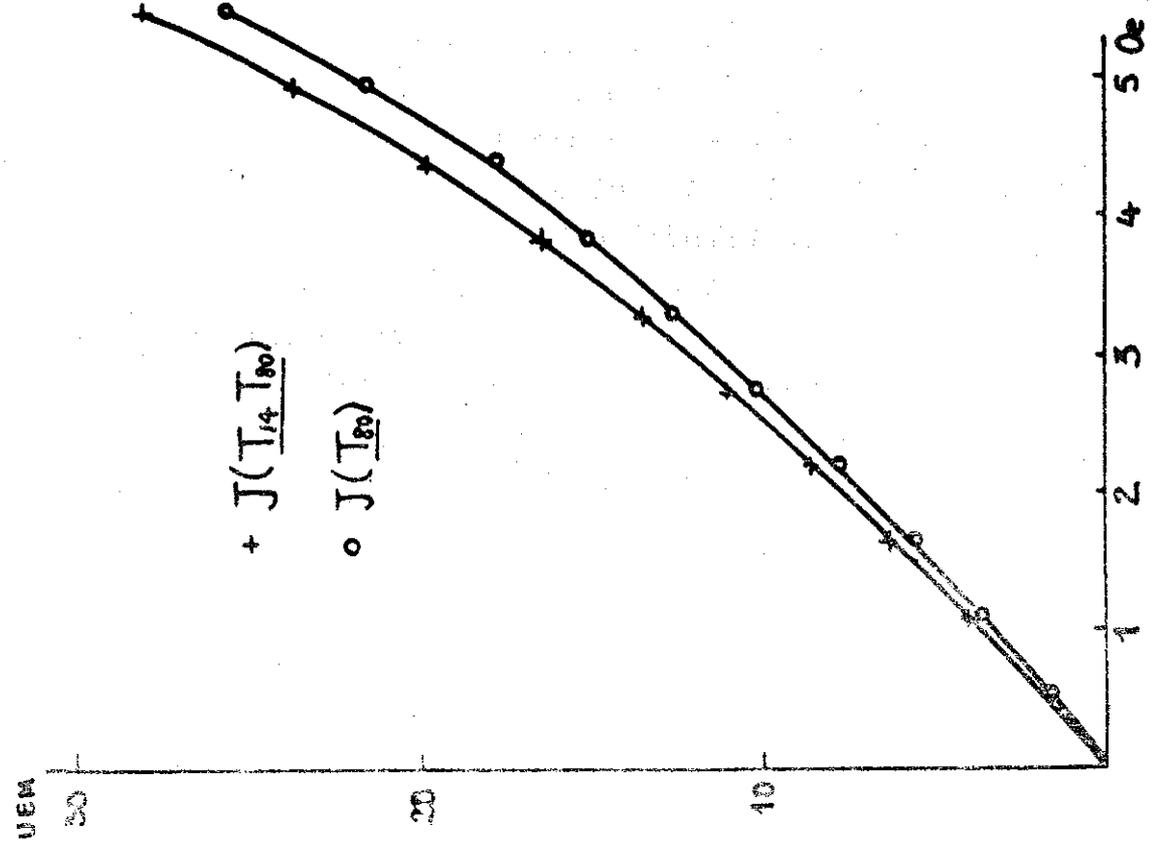
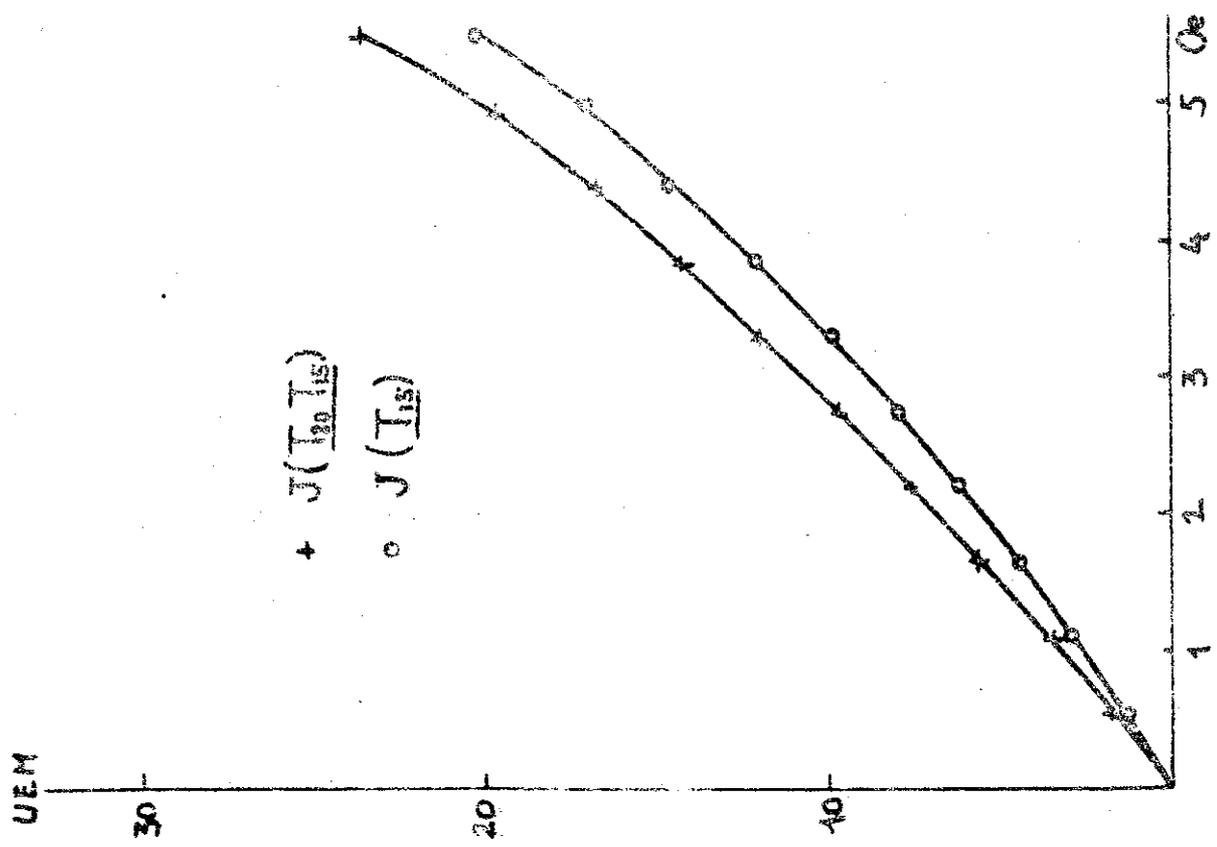


FIG 23

Le deuxième effet dû à un échauffement et à un refroidissement pour un fil de nickel ( $H_c = 11,9$  Oe)



où  $k_{ye}$  est une constante dans le cas d'échauffement et  $k_{yr}$  pour le cas de refroidissement.

La figure 24 donne les valeurs  $Y_{te}(T_a T_b)$  et  $Y_{tr}(T_b T_a)$  pour  $J(T_b) = 10 \text{ u é m}$  et  $J(T_a) = 10 \text{ u é m}$  en fonction des différences des températures  $T_b$  et  $T_a$ . On remarque ici que le deuxième effet dû à la variation de température est plus grand pour un refroidissement que pour un échauffement ce qui est le contraire du résultat obtenu dans le cas d'un acier.

En appliquant la formule (18) :

$$k_{ye} = \alpha T^n$$

et la formule :

$$k_{yr} = \alpha T^n \quad (18)'$$

aux résultats de la figure (24), nous avons obtenu pour un échauffement et pour un refroidissement à peu près la même valeur de  $n$  :

$$n = 0,90$$

Les valeurs  $\alpha$  sont déterminées pour un échauffement :

$$\alpha = 2,2 \cdot 10^{-3} \quad (\text{échauffement})$$

et pour un refroidissement :

$$\alpha = 4,8 \cdot 10^{-3} \quad (\text{refroidissement})$$

On peut penser que le grand effet du refroidissement sur un fil de nickel provient de la magnétostriction négative de cette substance, tandis que le grand effet de l'échauffement d'un fil d'acier est causé par la magnétostriction positive de la direction [100] de l'acier.

Fig 24

# Nickel à 10 UEM

Le deuxième effet dû aux variations des températures en fonction de la différence des températures

$Y_{te} \text{ ou } Y_{tr}$

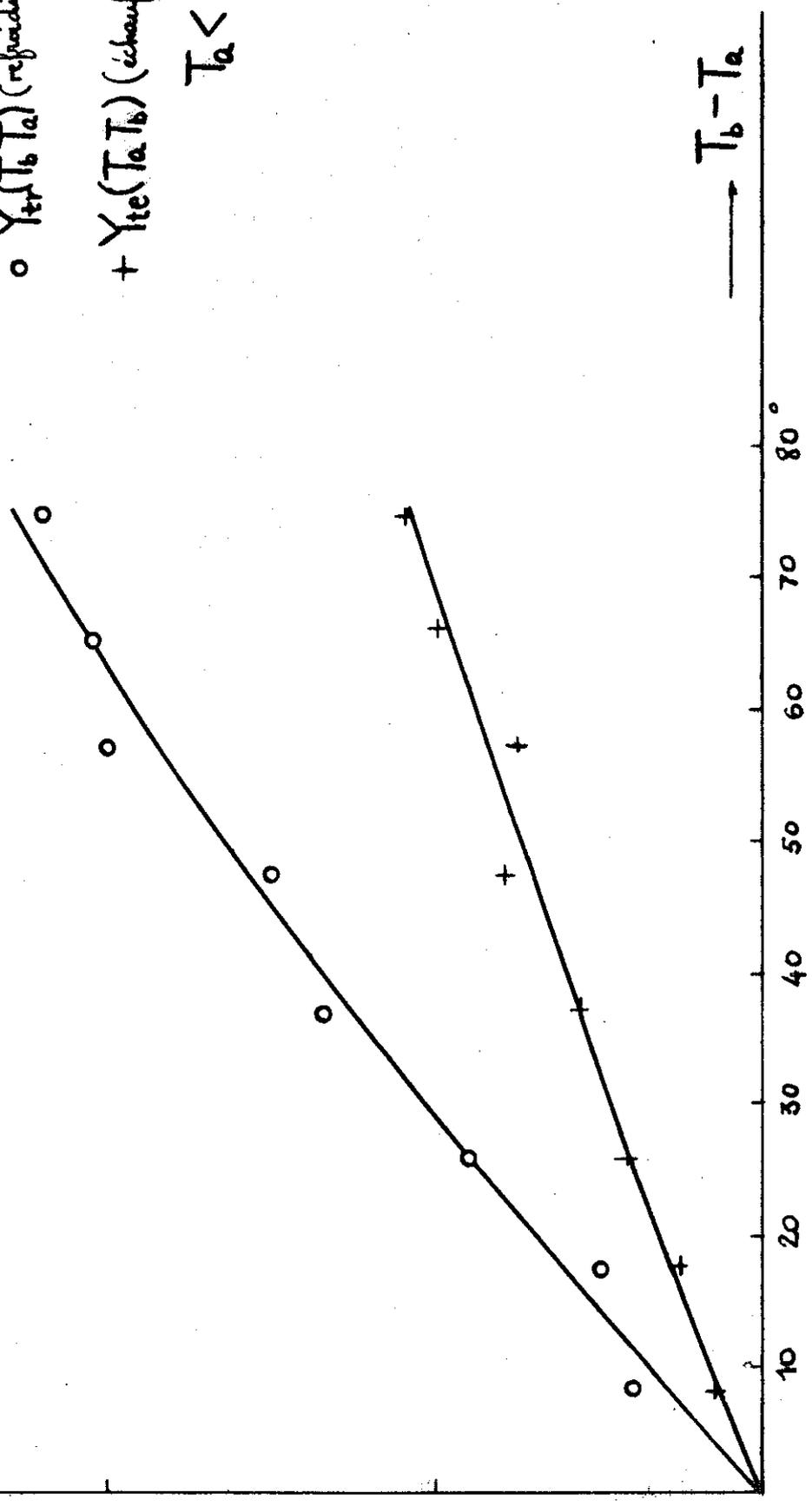


EM 3

2

1

$$\begin{aligned}
 & \circ Y_{tr}(T_b, T_a) \text{ (refroidissement)} \\
 & + Y_{te}(T_a, T_b) \text{ (échauffement)} \\
 & \qquad T_a < T_b
 \end{aligned}$$



$\longrightarrow T_b - T_a$

Dans l'expérience du nickel on n'observe presque pas le deuxième effet, si l'amplitude de la variation de la température est très grande. Nous avons désaimanté l'échantillon à la température ambiante et refroidi jusqu'à  $-196^{\circ}\text{C}$  puis mesuré le deuxième effet. Dans ce cas, nous n'avons observé qu'un effet très faible et peu reproductible. On constate aussi que pour cette variation de la température les formules (11) et (12) etc... ne sont pas valables.

XII - LES DEUX EFFETS SUR DIVERSES SUBSTANCES ET SUR DES ECHANTILLONS DIFFERENTS.

On observe en général plus ou moins le premier et le deuxième effet sur tous les matériaux ferromagnétiques. Etant donné qu'on a constaté que les formules (18) et (18)' ne sont pas toujours valables surtout pour les matériaux doux, les valeurs  $k_t$ ,  $k_{ye}$  et  $k_{yr}$  (pour la variation de la température de  $16^{\circ}$  à  $60^{\circ}\text{C}$ ) sont déterminées pour diverses substances d'après les formules (14), (16) et (20) et elles sont indiquées sur le tableau II.

TABLEAU II

Substance	$H_c$	$k_t$	$k_{ye} = \frac{Y_{te}(T_{16}T_{60})}{J(T_{60})}$	$k_{yr} = \frac{Y_{tr}(T_{60}T_{16})}{J(T_{16})}$
Acier mi-doux	16,0 G	$5,1 \cdot 10^{-3} \text{deg}^{-1}$	$37,4 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$
Nickel	11,9	2,5	7,2	15,6
Permalloy à 50 % Ni	6,7	1,9	8	6
Anhyser D	5,0	2,2	7	7
Ferrite de manganèse (rectalite 4001)	1,3	4,2	0	23

Cependant si l'on étudie des échantillons différents on obtient souvent des valeurs très différentes de  $k_t$ ,  $k_{ye}$  et  $k_{yr}$  pour la même substance comme le tableau III montre des résultats sur plusieurs échantillons d'aciers.

TABLEAU III

Echantillon	$H_c$	$k_t$	$k_{ye} = \frac{Y_{te}(T_{16}T_{60})}{J(T_{60})}$	$k_{yr} = \frac{Y_{tr}(T_{60}T_{16})}{J(T_{16})}$
Fil d'acier	10,0 Oe	$5,1 \cdot 10^{-3} \text{ deg}^{-1}$	$37,4 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$
Fil d'acier	14,7	2,3	22	1,5
Fil d'acier	20,0	4,5	42,0	13,5
Bloc d'Acier	14,6	0,3	0	0,3
Ruban d'acier	17	2,5	6,3	1,8

XIII - INFLUENCES DES TRAITEMENTS THERMIQUES SUR LES DEUX EFFETS.

Les résultats du paragraphe précédent nous montrent qu'il est nécessaire d'étudier l'influence des traitements thermiques, pour un échantillon donné.

Nous avons fait comme première expérience, un traitement sous hydrogène à 1000°C pendant deux heures suivi par un refroidissement très lent dans un four. Pour un fil d'acier mi-doux ( $H_c = 16$  Oe) les valeurs de  $k_t$  et  $k_{ye}$  avant et après ce traitement thermique sont indiquées sur le tableau IV.

TABLEAU IV

	$H_c$	$k_t$	$k_{ye} = \frac{Y_{te}(T_{16}T_{60})}{J(T_{60})}$
Avant traitement thermique	16,0 Oe	$5,1 \cdot 10^{-3} \text{ deg}^{-1}$	$37,4 \cdot 10^{-2}$
Après traitement thermique	1,54	2,4	3,7

(a)

Avant le traitement thermique

UEM

30

20

10

+  $J(\frac{T_{16}}{T_{60}})$

o  $J(\frac{T_{60}}{T_{60}})$

$H_c = 14,7 \text{ Oe}$

1

2

3

4

5

6 Oe

(b)

Après le traitement thermique  
(Pour ce traitement thermique l'échantillon est recuit à 1000°C et trempé à l'huile)

UEM

60

40

20

+  $J(\frac{T_{16}}{T_{60}})$

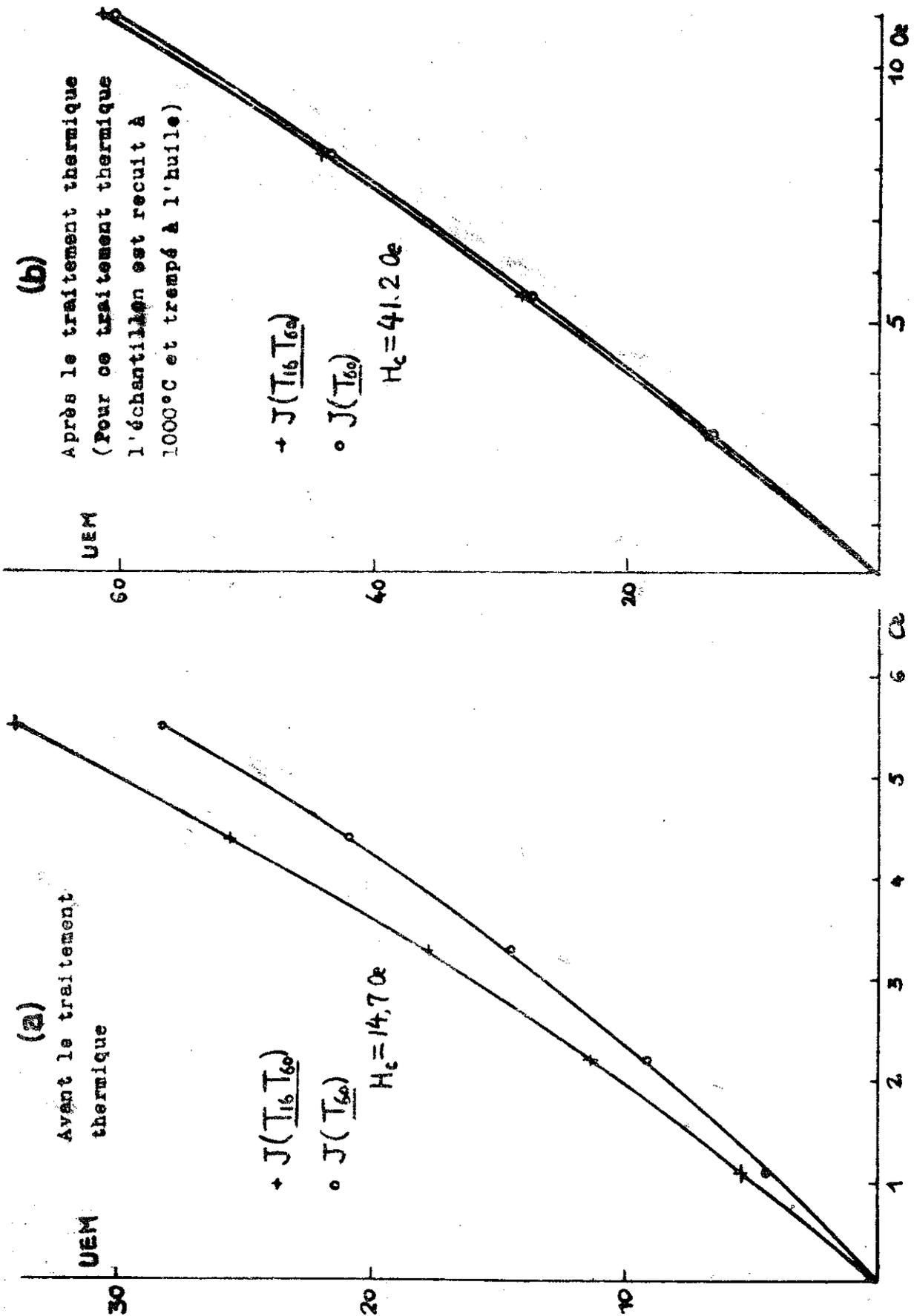
o  $J(\frac{T_{60}}{T_{60}})$

$H_c = 41,2 \text{ Oe}$

6 Oe

5

10 Oe



Dans ce cas l'amplitude du phénomène est réduite pour le premier effet à la moitié à peu près et pour le deuxième effet au dixième.

Comme deuxième expérience nous avons recuit un fil d'acier ( $H_c = 14,7 \text{ Oe}$ ) jusqu'à  $1000^\circ\text{C}$ , puis nous l'avons trempé à l'huile. Bien que le champ coercitif augmente ( $H_c = 41,2 \text{ Oe}$ ) dans ce cas, l'amplitude du phénomène diminue comme la figure 25 le montre dans le cas du deuxième effet. Nous avons indiqué sur le Tableau V les valeurs précises de  $k_t$  et  $k_{ye}$  pour cette expérience.

TABLEAU V

	$H_c$	$k_t$	$k_{ye} = \frac{Y_{te}(T_{16}T_{60})}{J(T_{60})}$
Avant traitement thermique	14,7 Oe	$2,3 \cdot 10^{-3} \text{ deg}^{-1}$	$22,0 \cdot 10^{-2}$
Après traitement thermique	41,2	1,1	1,6

D'après ces deux expériences on sait maintenant que l'amplitude du phénomène diminue par un traitement thermique pour chacun des deux effets, que la variation du champ coercitif causée par ce traitement correspond à une augmentation ou à une diminution. On peut déduire qu'il existe probablement des relations entre ces deux effets et les tensions internes des échantillons, tensions qui diminuent après traitement thermique.

DEUXIEME PARTIE

LES EFFETS DUS AUX CHANGEMENTS DE TENSION

-----

XIV - ANALOGIE DES EFFETS DUS AUX CHANGEMENTS DE TENSION AVEC LES  
EFFETS DUS AUX VARIATIONS DE TEMPERATURE

Rappelons d'abord les travaux expérimentaux de L.Lliboutry  
(10) sur les effets des tensions mécaniques pour un acier. Il a  
trouvé que l'aimantation augmente toujours, si l'on change la  
tension dans un champ faible après désaimantation, qu'il s'agisse  
d'une application de tension ou d'une suppression de tension.  
Quand on compare ce fait avec le résultat de la figure 1 (a), on  
trouve une analogie entre l'effet de tension et celui de température.

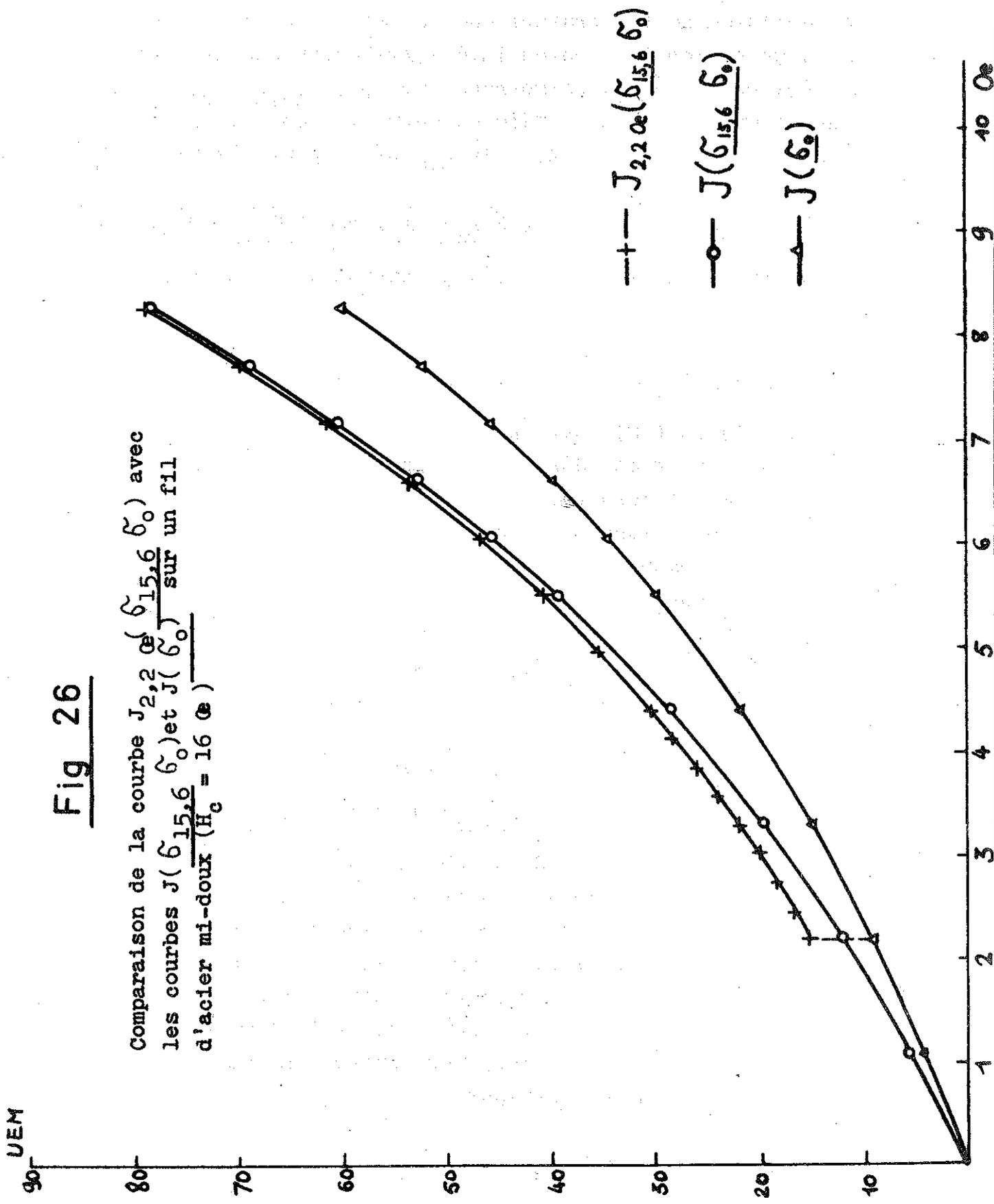
De la même façon que dans le cas de la figure 5, nous  
avons étudié la variation de l'aimantation avec le champ pour un  
fil d'acier mi-doux ( $H_0 = 16 \text{ Oe}$ ) après changement de tension.

La courbe  $J_{2,2 \text{ Oe}}(\underline{\sigma_{15,6}} \sigma_0)$  portée sur la figure 26 re-  
présente l'aimantation en fonction du champ H sous une tension nulle  
pour H supérieur à  $H_0 = 2,2 \text{ Oe}$  après le traitement initial suivant :  
désaimantation sous une tension  $15,6 \text{ Kg/mm}^2$ , application de  $H_0$  sous  
la même tension  $15,6 \text{ Kg/mm}^2$ , suppression de la tension dans ce même  
champ  $H_0$ . Cette courbe ne se raccorde pas avec la courbe  $J(\underline{\sigma_0})$   
tracée sans tension après avoir désaimanté sans tension, mais elle  
se raccorde rapidement avec la courbe  $J(\underline{\sigma_{15,6}} \sigma_0)$  représentant  
la variation de l'aimantation en fonction du champ sous une tension  
nulle, après désaimantation sous une tension  $15,6 \text{ Kg/mm}^2$  et sup-  
pression de la tension dans un champ nul.

Nous représentons d'une manière générale par  $J(\underline{\sigma_a \sigma_b \sigma_c} \rightarrow \sigma_e)$   
une valeur d'aimantation sous une tension  $\sigma_e$ , les tensions souli-  
gnées représentant les tensions successives de l'échantillon avant  
l'application d'un champ magnétique, la première indiquée étant

Fig 26

Comparaison de la courbe  $J_{2,2}(\sigma_{15,6} \sigma_0)$  avec  
les courbes  $J(\sigma_{15,6} \sigma_0)$  et  $J(\sigma_0)$  sur un fil  
d'acier mi-doux ( $H_c = 16 \text{ G}$ )



toujours celle de la désaimantation.

On peut donc considérer, comme dans le cas des effets dûs à la variation de température, que la variation d'aimantation due à une suppression de tension  $15,6 \text{ kg/mm}^2$  comprend deux parties dont la première que nous désignerons par  $X_{\sigma} (\sigma_{15,6} \sigma_0)$  et la seconde qui provient de la différence entre les courbes  $J (\sigma_{15,6} \sigma_0)$  et  $J (\sigma_{15,6})$ . La valeur de  $X_{\sigma} (\sigma_{15,6} \sigma_0)$  peut s'écrire :

$$X_{\sigma} (\sigma_{15,6} \sigma_0) = J (\sigma_{15,6} \sigma_0) - J (\sigma_{15,6}) \quad (21)$$

Il en est de même dans le cas de l'application de tension : on obtient :

$$X_{\sigma} (\sigma_0 \sigma_{15,6}) = J (\sigma_0 \sigma_{15,6}) - J (\sigma_0) \quad (22)$$

Les formules (21) et (22) correspondent exactement aux formules (1) et (2) pour les effets dûs à la variation de température.

D'après les résultats précédents on sait maintenant qu'il y a des ressemblances essentielles entre les effets dûs à la variation de la température et les effets dûs aux changements de la tension. Nous désignerons donc  $X_{\sigma}$  qui se représente par les formules (21) ou (22), par exemple, sous le nom du premier effet dû au changement de tension et  $Y_{\sigma e}$  ou  $Y_{\sigma d}$  qui est représenté par les formules suivantes, par exemple :

$$Y_{\sigma e} (\sigma_0 \sigma_{15,6}) = J (\sigma_0 \sigma_{15,6}) - J (\sigma_{15,6}) \quad (23)$$

$$Y_{\sigma d} (\sigma_{15,6} \sigma_0) = J (\sigma_{15,6} \sigma_0) - J (\sigma_0) \quad (24)$$

sous le nom du deuxième effet dû au changement de tension.

Cependant on observe d'autre part, une différence entre le cas de la variation de température et celui de tension : dans le cas de la variation de tension sur un fil d'acier mi-doux, il existe le deuxième effet pour une application de tension et pour une suppression de tension, tandis que dans le cas de la variation de température du même échantillon, nous avons observé le deuxième effet seulement pour un échauffement.

On remarque encore que dans le cas des variations de tension, il est difficile d'éviter complètement des vibrations mécaniques, quand on met ou qu'on enlève les poids, tandis que, du point de vue de la technique, il est facile d'arriver directement à la valeur finale de la température, lorsqu'il s'agit d'une variation de température. Les vibrations mécaniques produisent des erreurs dans les résultats expérimentaux. Donnons un exemple de ces erreurs, dans le cas du deuxième effet : lorsqu'on augmente la valeur de tension de  $\sigma_a$  à  $\sigma_b$  après désaimantation sous  $\sigma_a$ , qu'on la diminue de  $\sigma_b$  à  $\sigma_c$  où  $\sigma_a < \sigma_c$  et puis qu'on trace la courbe de première aimantation, on observe en général une courbe située au-dessous de la courbe  $J(\sigma_a, \sigma_c)$ .

En comparant avec les courbes  $J(\sigma_0, \sigma_{10,4})$  et  $J(\sigma_{10,4})$  nous avons représenté sur la figure 27 la courbe de  $J(\sigma_0, \sigma_{15,4}, \sigma_{10,4})$  qui correspond à  $J(T_{16}, T_{79}, T_{60})$  de la figure 22 dans le cas de la variation de température. Il en est de même si l'on considère le cas de la diminution de tension. Alors les vibrations mécaniques produisent toujours la diminution du deuxième effet.

#### XV - LE PREMIER EFFET DU AU CHANGEMENT DE TENSION

Nous allons étudier d'abord le premier effet dû au changement de tension sur un fil d'acier mi-doux, que nous avons étudié dans la première partie.

Les formules générales pour le premier effet sont :

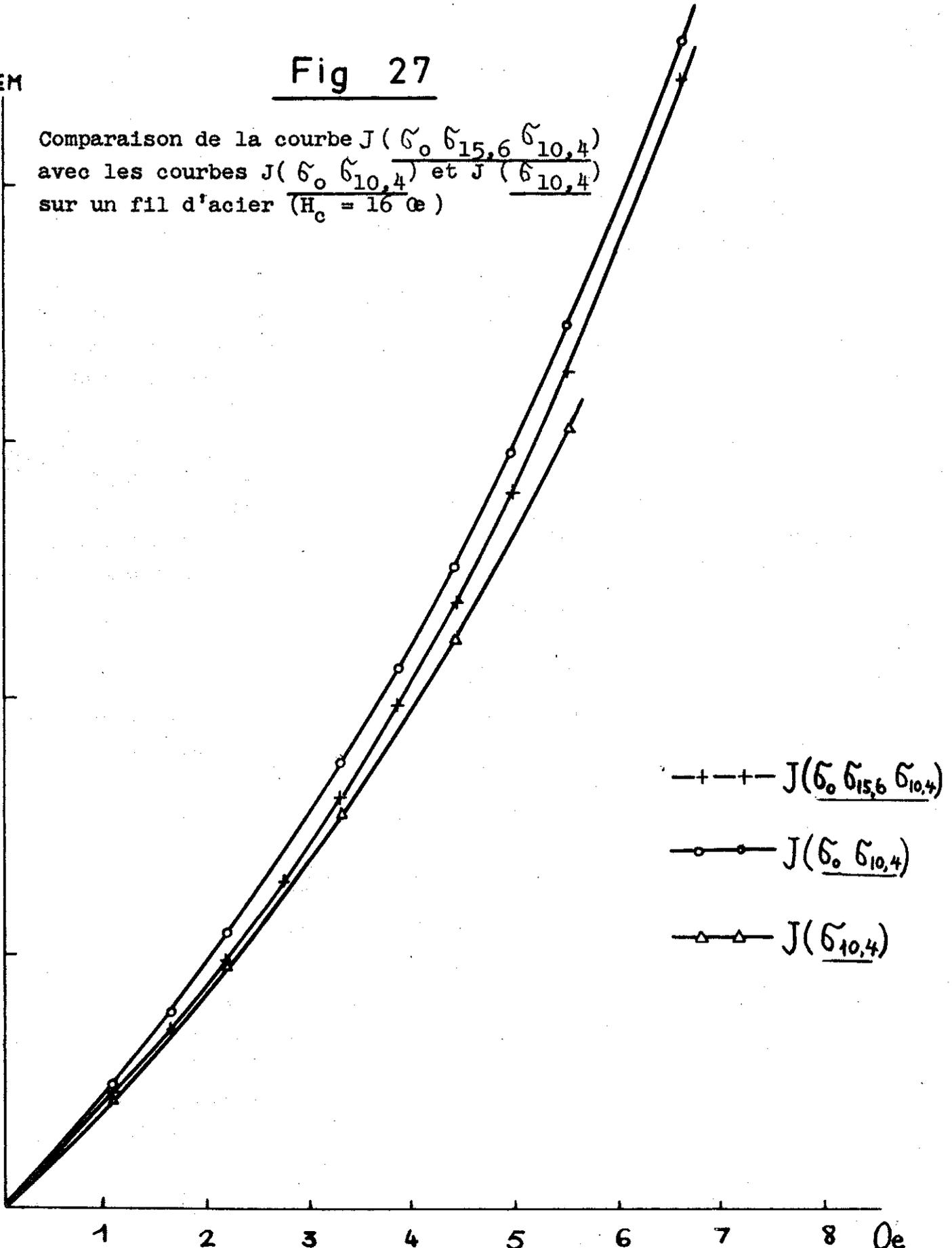
$$X_{\sigma}(\sigma_a, \sigma_b) = J(\sigma_a, \sigma_b) - J(\sigma_a, \sigma_b) \quad (25)$$

$$X_{\sigma}(\sigma_b, \sigma_a) = J(\sigma_b, \sigma_a) - J(\sigma_b, \sigma_a) \quad (26)$$

où  $\sigma_a < \sigma_b$ . Etant donné que le deuxième effet se présente pour une augmentation de tension et pour une diminution de tension, on ne peut pas l'éliminer en utilisant les formules qui correspondent aux formules (12) et (13). Il faut alors tenir compte du changement de l'état de l'aimantation comme dans le cas de la formule (11).

Fig 27

EM  
Comparaison de la courbe  $J(\underline{\sigma}_0 \underline{\sigma}_{15,6} \underline{\sigma}_{10,4})$   
avec les courbes  $J(\underline{\sigma}_0 \underline{\sigma}_{10,4})$  et  $J(\underline{\sigma}_{10,4})$   
sur un fil d'acier ( $H_c = 16 \text{ Oe}$ )



Lorsqu'on trace les valeurs de  $X_G$  en fonction de la valeur moyenne de l'aimantation obtenue avant variation de la tension sous champ et de l'aimantation correspondant au deuxième terme de la différence définissant  $X_G$ , on obtient à peu près des droites correspondant chacune à une valeur déterminée de la différence  $\tilde{\sigma}_b - \tilde{\sigma}_a$ . Sur la figure 28, nous avons représenté les valeurs  $X_G$  en fonction de l'aimantation moyenne dans le cas où  $\tilde{\sigma}_a = 0$  et  $\tilde{\sigma}_b = 10,4 \text{ Kg/mm}^2$ .

La figure 29 donne les valeurs de  $X_G (\tilde{\sigma}_a \tilde{\sigma}_b)$  ou  $X_G (\tilde{\sigma}_b \tilde{\sigma}_a)$  en fonction de la différence  $\tilde{\sigma}_b - \tilde{\sigma}_a$  : on remarque aussi que les points sont alignés à peu près sur la même droite, qu'il s'agisse d'une augmentation de tension ou d'une diminution de tension. En considération des erreurs qui interviennent facilement dans le cas des changements de tension, il faut considérer ce résultat approximatif comme très satisfaisant.

Par conséquent, compte-tenu de la proportionnalité à l'aimantation observée sur la figure 28  $X_G (\tilde{\sigma}_a \tilde{\sigma}_b)$  et  $X_G (\tilde{\sigma}_b \tilde{\sigma}_a)$  peuvent se représenter par la formule suivante :

$$X_G (\tilde{\sigma}_a \tilde{\sigma}_b) = X_G (\tilde{\sigma}_b \tilde{\sigma}_a) = k_G J \tilde{\sigma} \quad (27)$$

où l'on désigne par  $\tilde{\sigma}$  la différence entre les deux tensions  $\tilde{\sigma}_a$  et  $\tilde{\sigma}_b$  et par  $k_G$  une constante.

D'après les résultats précédents sur un fil d'acier mi-doux ( $H_c = 16 \text{ Oe}$ ) nous avons obtenu :  $k_G = 1,29 \cdot 10^{-2} (\text{Kg/mm}^2)^{-1}$ . Après un traitement sous hydrogène à  $1000^\circ\text{C}$ , le même échantillon a son champ coercitif divisé environ par 10 ( $H_c = 1,54 \text{ Oe}$ ) et l'on a  $k_G = 0,3 (\text{Kg/mm}^2)^{-1}$ . Dans ce cas l'amplitude du phénomène augmente à peu près de vingt fois.

## XVI - LE DEUXIEME EFFET DU AU CHANGEMENT DE TENSION

Lorsqu'un échantillon initialement désaimanté sous une tension  $\tilde{\sigma}_a$  subit une variation de tension de  $\tilde{\sigma}_a$  à  $\tilde{\sigma}_b$  et est soumis ensuite à un champ magnétique, on observe en général le deuxième effet dû au changement de tension. En désignant par  $Y_{\tilde{\sigma}_e} (\tilde{\sigma}_a \tilde{\sigma}_b)$  les valeurs des différences des aimantations  $J (\tilde{\sigma}_a \tilde{\sigma}_b)$  et  $J (\tilde{\sigma}_b)$  et par  $Y_{\tilde{\sigma}_d} (\tilde{\sigma}_b \tilde{\sigma}_a)$  celles de  $J (\tilde{\sigma}_b \tilde{\sigma}_a)$  et de  $J (\tilde{\sigma}_a)$ , nous obtenons

Valeurs de  $X_{\sigma}$  en fonction de l'aimantation sur un fil d'acier ( $H_0 = 16 \text{ Oe}$ ) dans le cas où  $\sigma_a = 0$  et  $\sigma_b = 10,4 \text{ Kg/mm}^2$

Fig 28

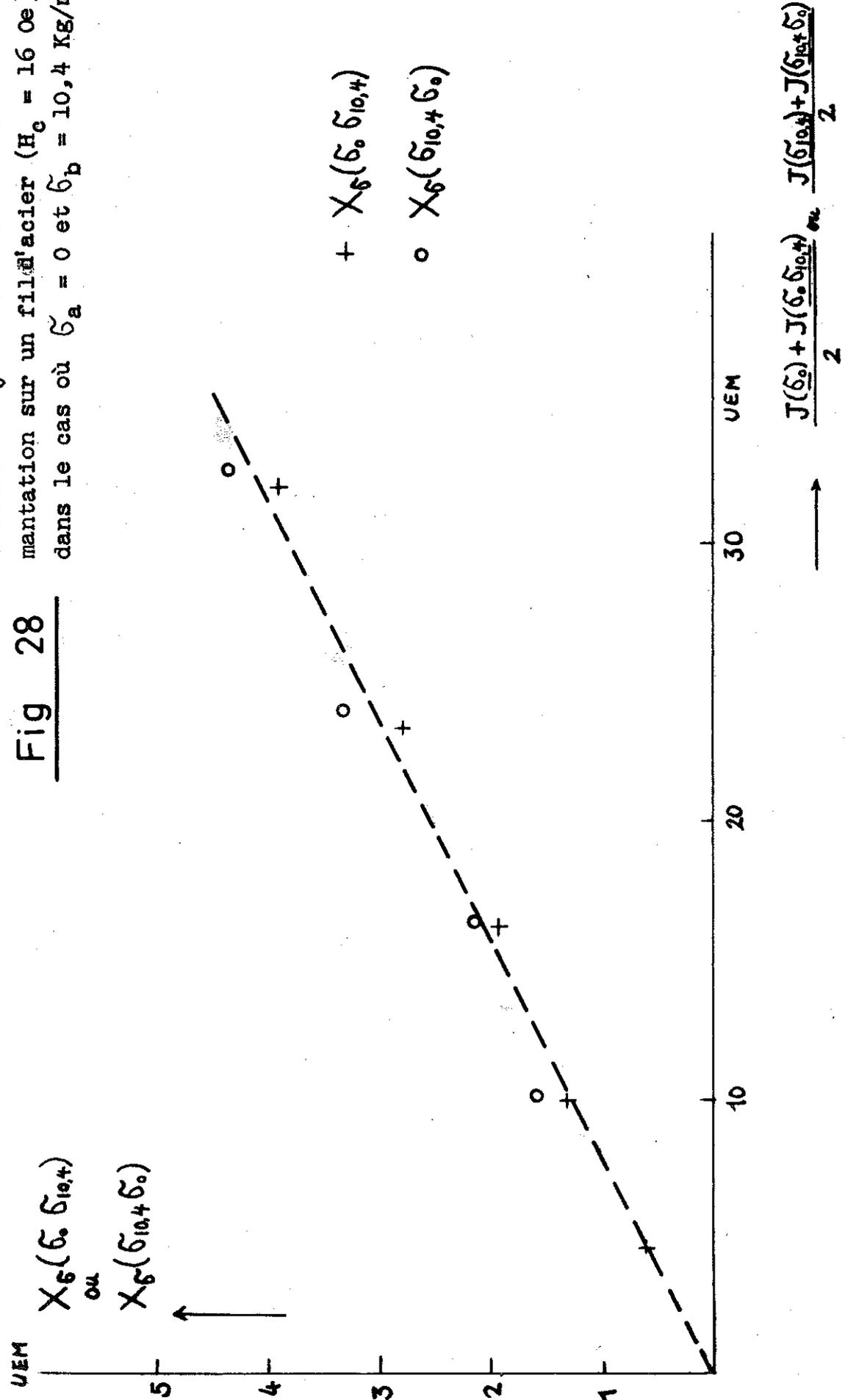
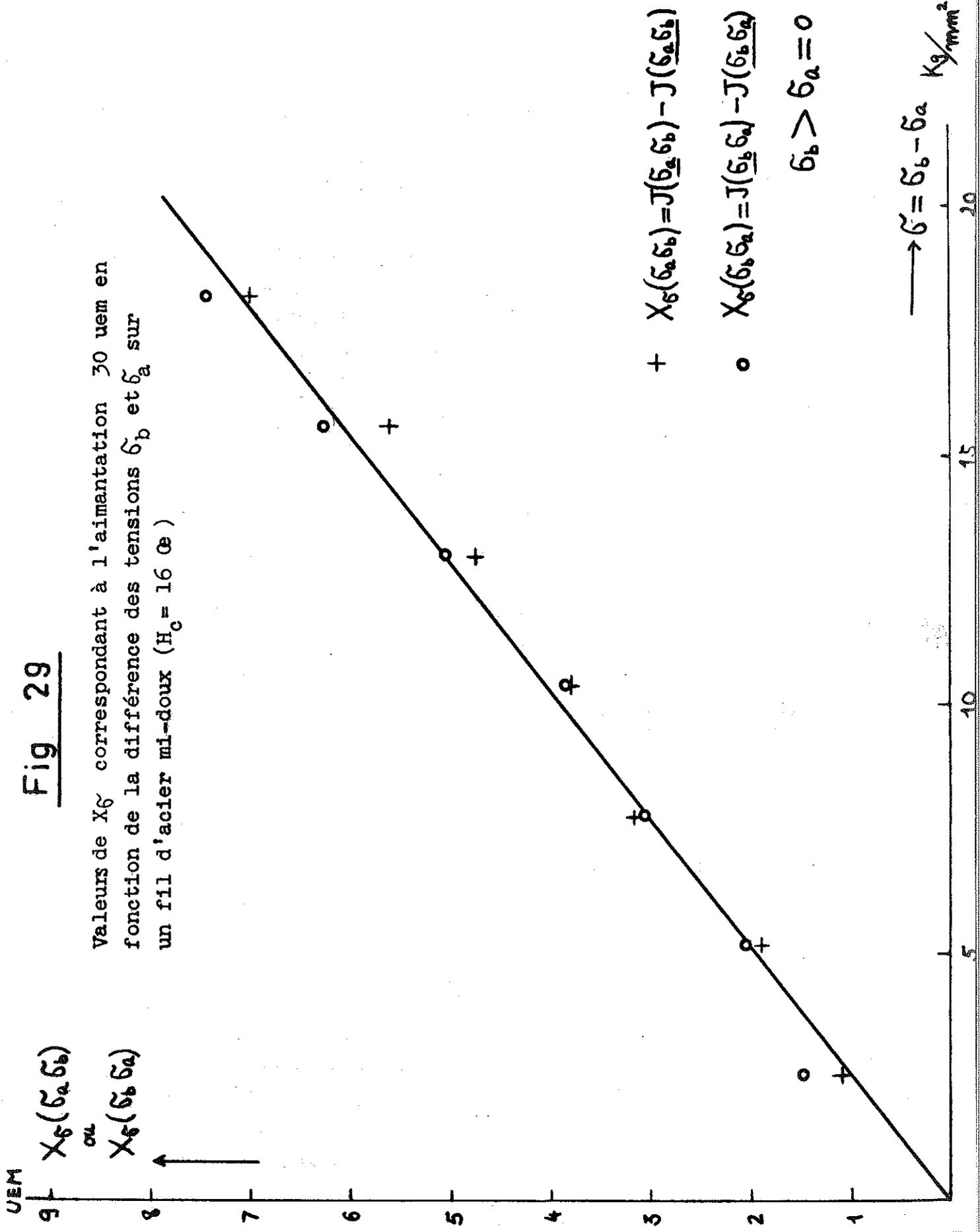


Fig 29

Valeurs de  $X_G$  correspondant à l'aimantation 30 uem en fonction de la différence des tensions  $\sigma_b$  et  $\sigma_a$  sur un fil d'acier mi-doux ( $H_c = 16 \text{ Oe}$ )



comme formules générales, pour le deuxième effet :

$$Y_{\sigma_e}(\sigma_a, \sigma_b) = J(\sigma_a, \sigma_b) - J(\sigma_b) \quad (28)$$

$$Y_{\sigma_d}(\sigma_b, \sigma_a) = J(\sigma_b, \sigma_a) - J(\sigma_a) \quad (29)$$

où  $\sigma_a < \sigma_b$ .

Sur la figure 30, nous avons représenté pour un fil d'acier les variations de  $Y_{\sigma_e}(\sigma_a, \sigma_b)$  et  $Y_{\sigma_d}(\sigma_b, \sigma_a)$  en fonction de l'aimantation dans le cas où  $\sigma_a = 0$  et  $\sigma_b = 13,0 \text{ Kg/mm}^2$ . On obtient une bonne proportionnalité entre ces deux valeurs pour l'augmentation de tension et pour la diminution de tension : on peut écrire d'une manière générale :

$$Y_{\sigma_e}(\sigma_a, \sigma_b) = k_{ye} J(\sigma_b) \quad (30)$$

$$Y_{\sigma_d}(\sigma_b, \sigma_a) = k_{yd} J(\sigma_a) \quad (31)$$

où  $k_{ye}$  est une constante dans le cas de l'augmentation de tension,  $k_{yd}$  celle de la diminution de tension.

La figure 31 donne les valeurs  $Y_{\sigma_e}(\sigma_a, \sigma_b)$  et  $Y_{\sigma_d}(\sigma_b, \sigma_a)$  pour  $J(\sigma_b) = 30 \text{ u é m}$  et  $J(\sigma_a) = 30 \text{ u é m}$  en fonction des différences des tensions  $\sigma_b$  et  $\sigma_a$ . En appliquant aux résultats de la figure 31 les formules :

$$k_{ye} = \alpha \sigma^n \quad (32)$$

$$k_{yd} = \alpha \sigma^n \quad (32)'$$

où l'on désigne par  $\sigma$  la différence des tensions  $\sigma_b$  et  $\sigma_a$  et par  $\alpha$  une constante, nous avons obtenu pour une augmentation de tension et pour une diminution de tension exactement la même valeur de  $n$  :

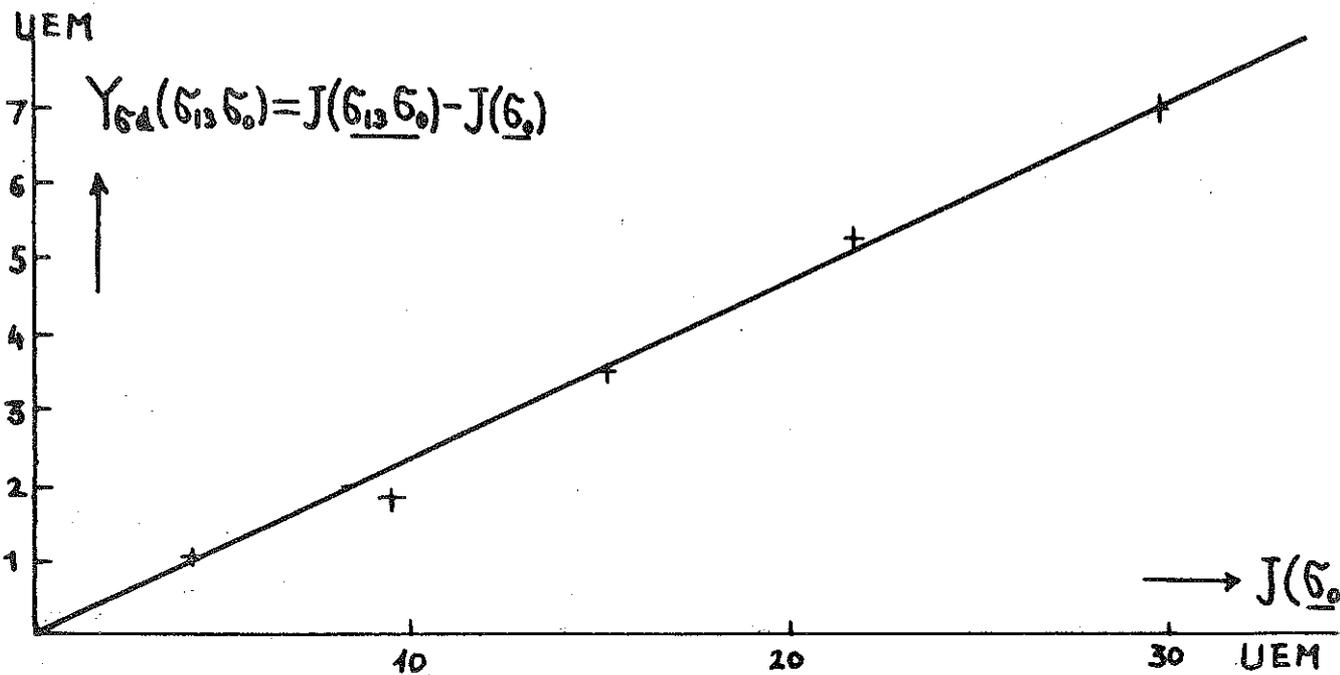
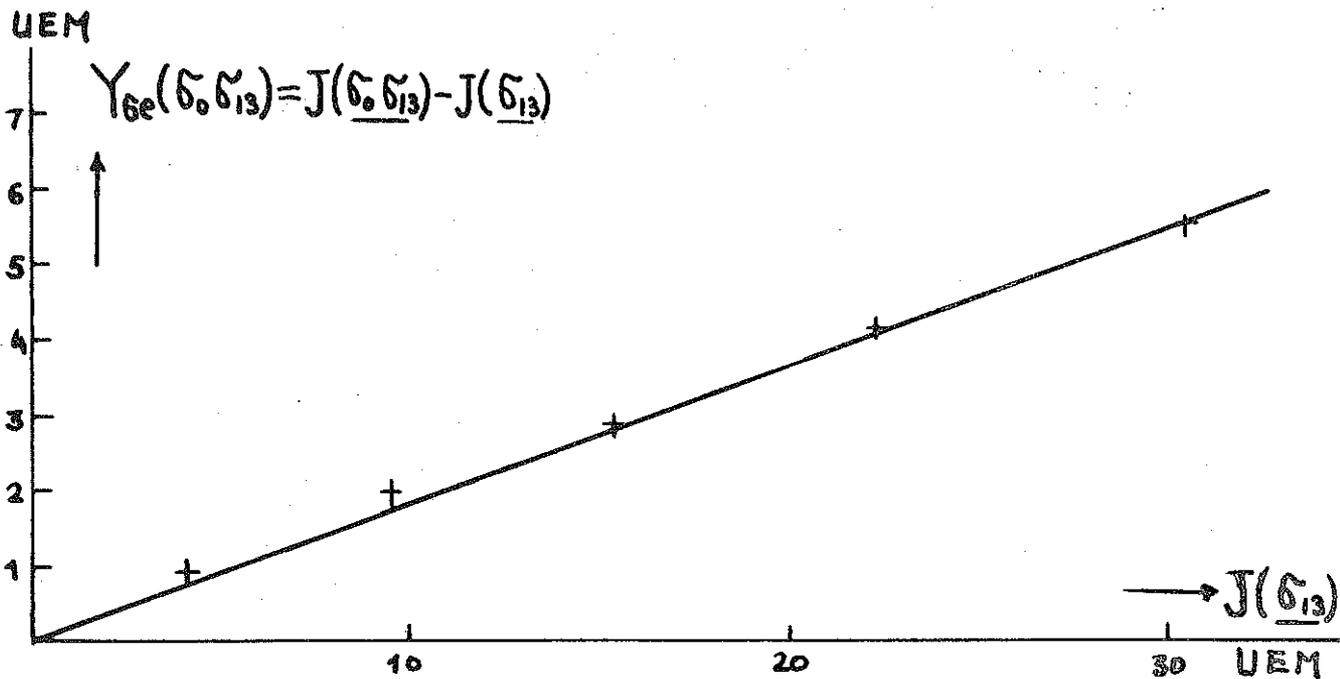
$$n = 1,525$$

Nous avons déterminé les valeurs  $\alpha$  pour une augmentation de tension :

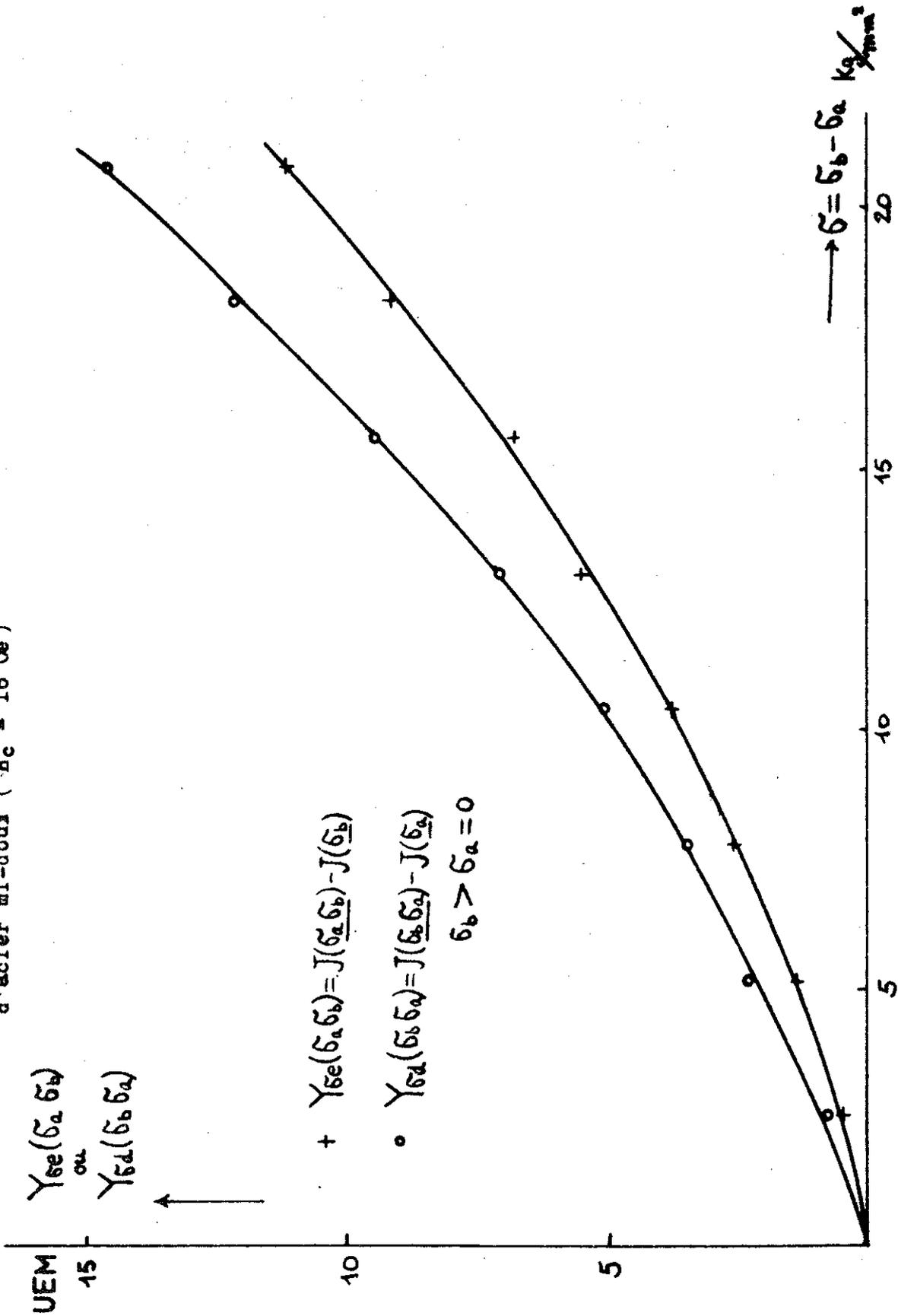
$$\alpha = 3,62 \cdot 10^{-3} \quad (\text{pour l'augmentation de tension})$$

Fig 30

Valeurs de  $Y_{\delta e}$  et de  $Y_{\delta d}$  en fonction de l'aimantation sur un fil d'acier ( $H_c = 16 \text{ Oe}$ ) dans le cas où  $\delta_a = 0$  et  $\delta_b = 13,0 \text{ Kg/mm}^2$



Valeurs de  $\gamma_{se}$  et de  $\gamma_{sa}$  correspondant à l'alimentation 30 uem en fonction de la différence des tensions  $\sigma_b$  et  $\sigma_a$  sur un fil d'acier mi-doux ( $H_c = 16 \text{ Oe}$ )



et pour une diminution de tension :

$$\alpha = 4,87 \cdot 10^{-3} \quad (\text{pour la diminution de tension})$$

Pour le même échantillon traité sous hydrogène à 1000°C ( $H_c = 1,54 \text{ Oe}$ ) l'amplitude du phénomène augmente à peu près de dix fois.

Le deuxième effet dû au changement de tension fait apparaître des cycles dissymétriques comme dans le cas de variation de température. Sur la figure 32, nous observons une grande dissymétrie du premier cycle d'hystérésis et des formes stabilisées des deuxième et troisième cycles dans le cas de diminution de la tension de  $\sigma_b = 20,8 \text{ Kg/mm}^2$  à  $\sigma_a = 0$  sur un fil d'acier mi-doux ( $H_c = 16 \text{ Oe}$ )

#### XVII - LA MAGNETOSTRICTION ET LE DEUXIEME EFFET DU AU CHANGEMENT DE TENSION

Nous avons montré au paragraphe XI que le deuxième effet dû à une variation de la température était probablement associé à la magnétostriction. Il est donc nécessaire maintenant d'étudier le deuxième effet dû au changement de tension sur deux substances possédant des magnétostrictions de signe contraire. Nous avons pris un permalloy à 60 % de nickel comme substance à magnétostriction positive et du nickel comme substance à magnétostriction négative.

Sur la figure 33 sont portées 4 courbes  $J(\sigma_a, \sigma_b)$ ,  $J(\sigma_b)$ ,  $J(\sigma_b, \sigma_a)$  et  $J(\sigma_a)$ , sur un fil de permalloy à 60 % de nickel dans le cas où  $\sigma_a = 0$ ,  $\sigma_b = 2,76 \text{ Kg/mm}^2$ .

La figure 34 montre les mêmes courbes sur un fil de nickel dans le cas où  $\sigma_a = 0$ ,  $\sigma_b = 2,5 \text{ Kg/mm}^2$ .

D'après les résultats de ces deux figures, on constate que le deuxième effet se produit très nettement pour une augmentation de tension, si la magnétostriction est positive et pour une diminution de tension, si la magnétostriction est négative.

D'ailleurs dans le cas du permalloy à 60 % Ni, la magnétostriction est à peu près isotrope. Il est intéressant du point de vue théorique d'étudier le deuxième effet sur une substance à magnétostriction isotrope. Nous avons donc mesuré le deuxième effet

Fig 32

Cycles dissymétriques sur un fil d'acier ( $H_c=16 \text{ Oe}$ ) causés par le deuxième effet dû au changement de tension. (Désaimantation à  $\tilde{\sigma}_b = 20,8 \text{ Kg/mm}^2$  ; application des champs à  $\tilde{\sigma}_a = 0$ )

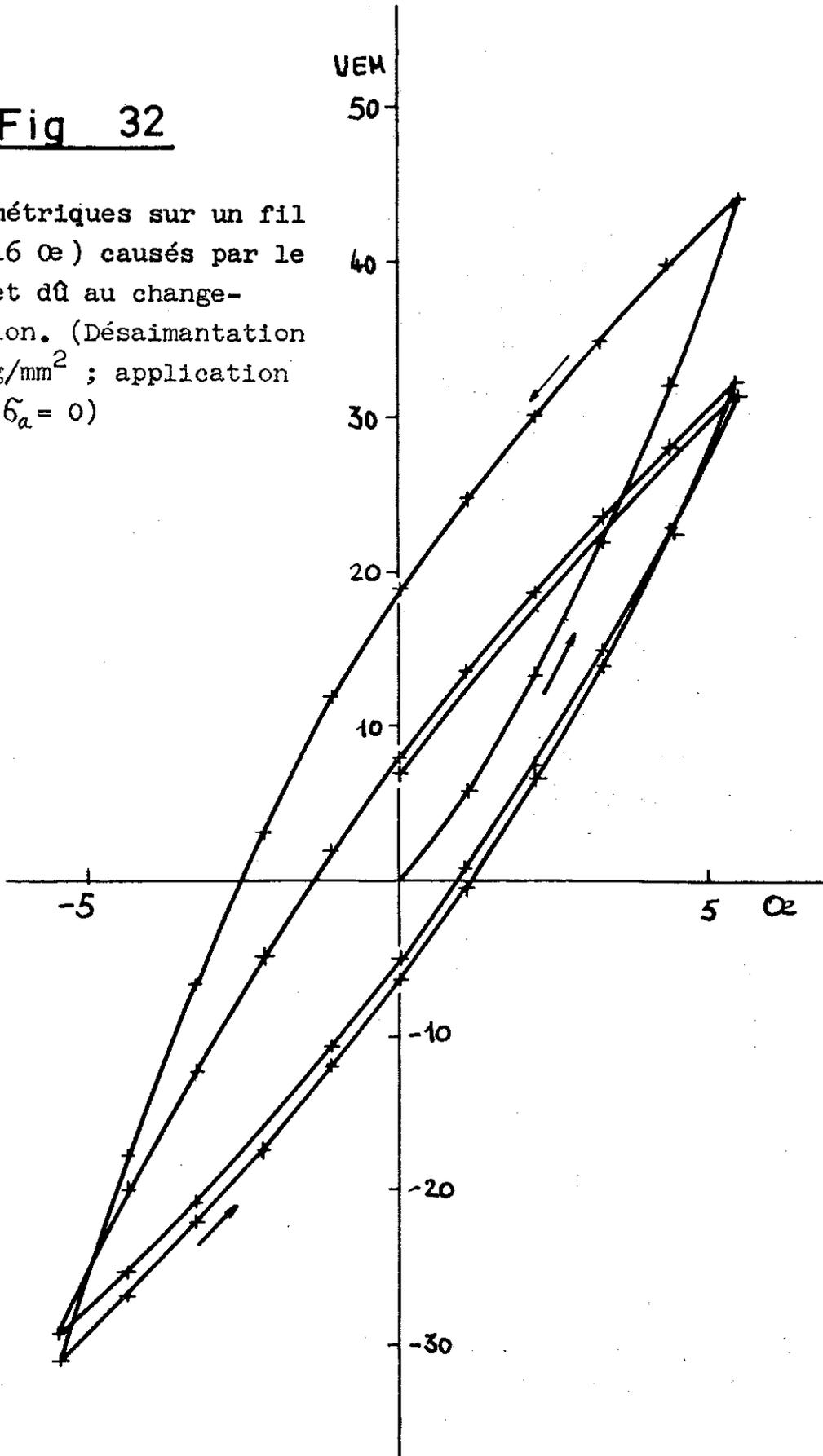
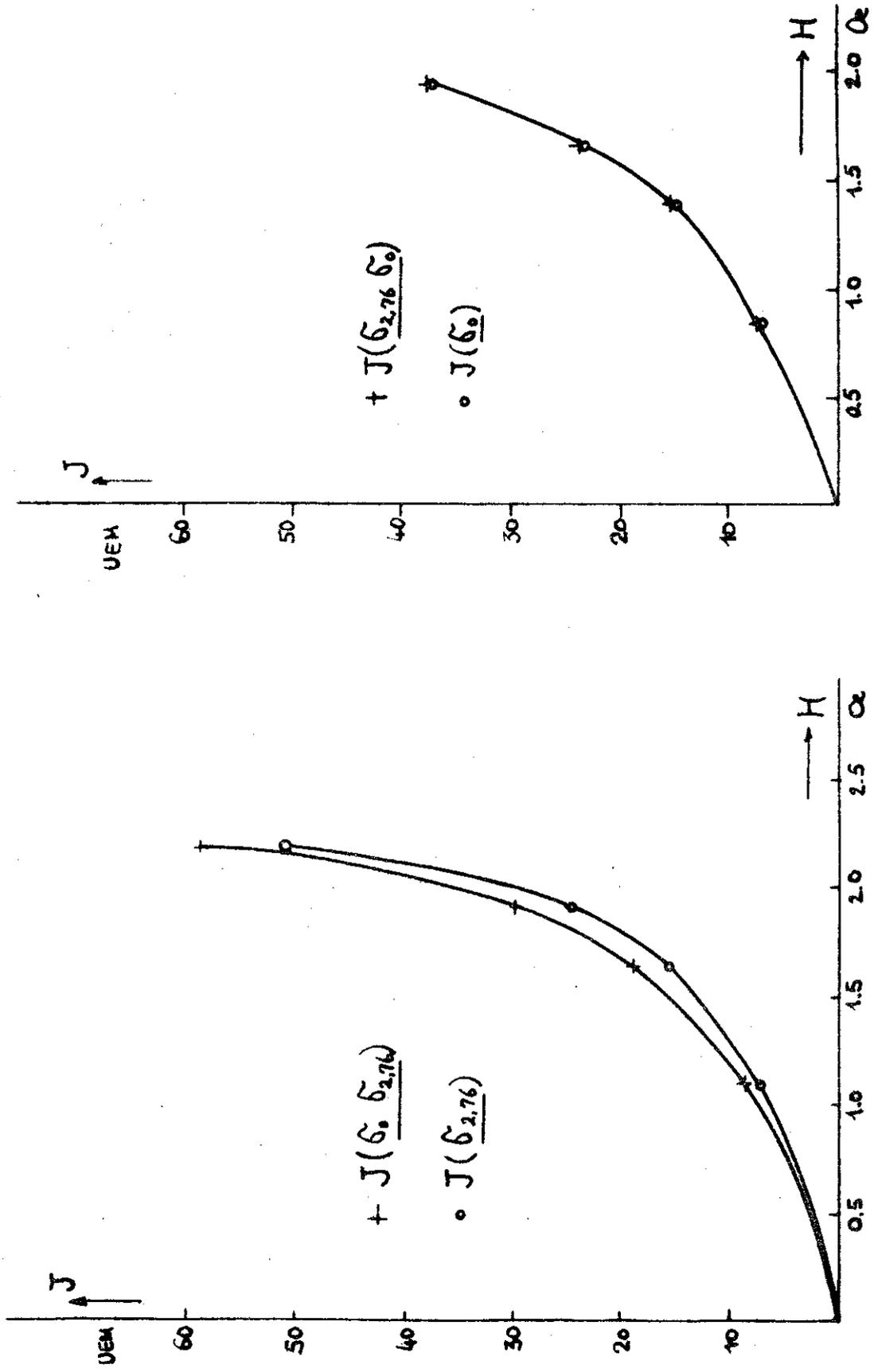
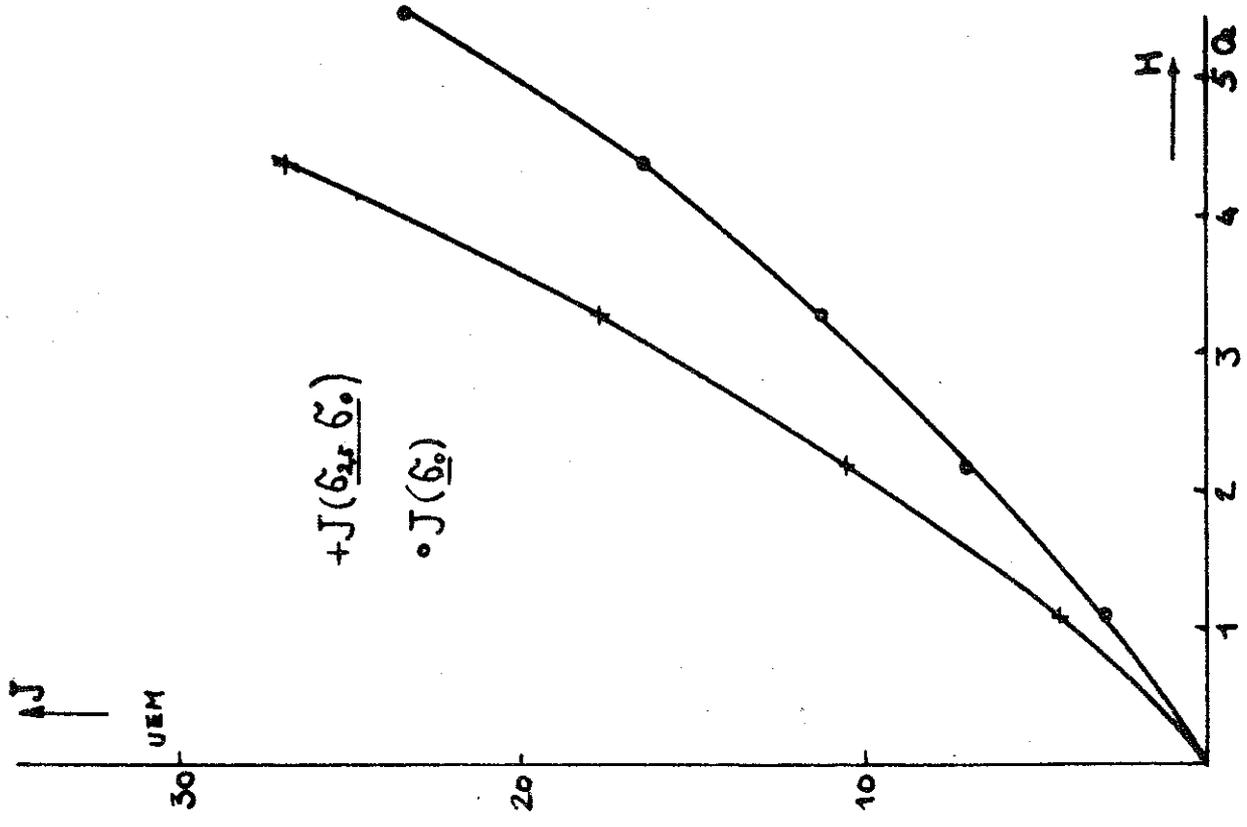
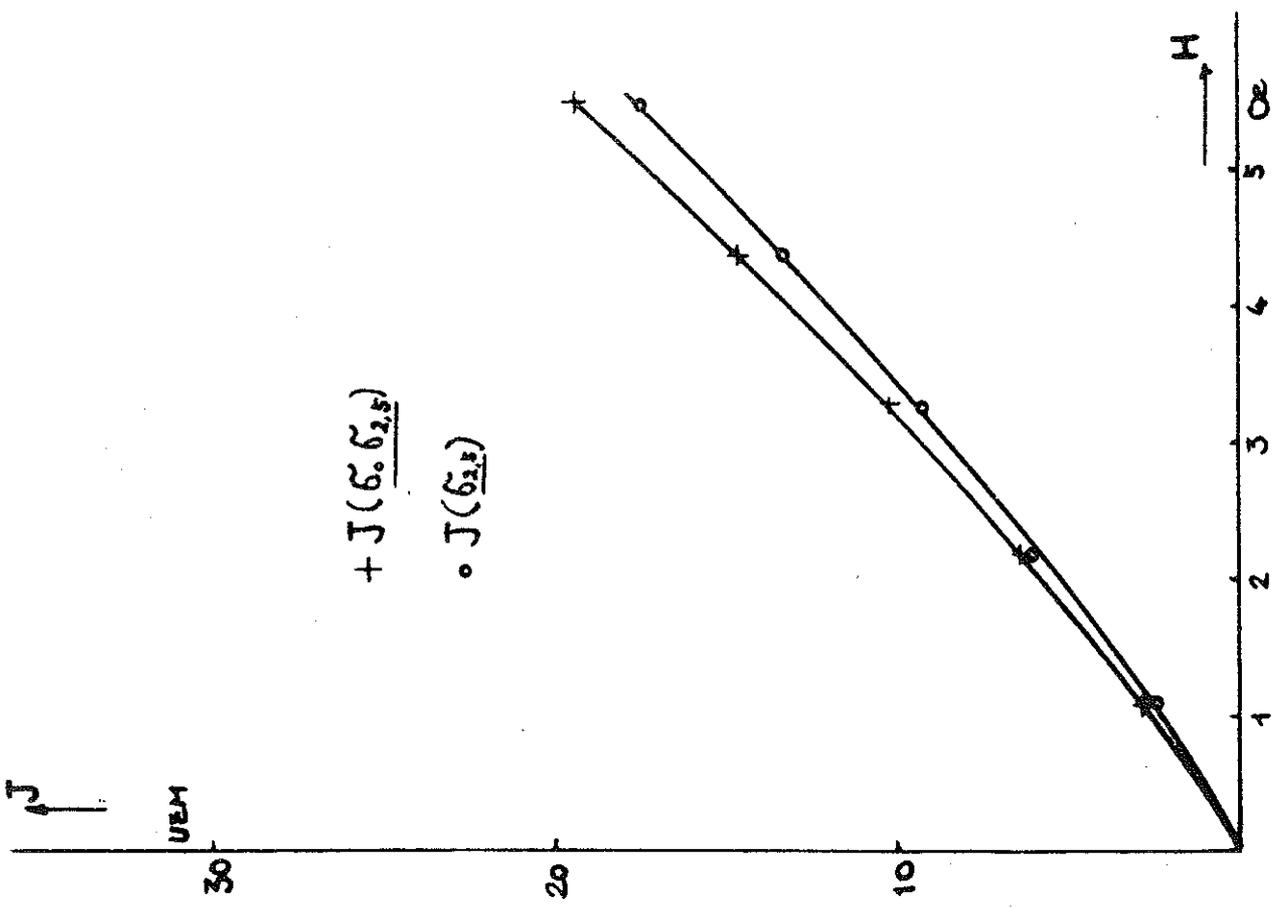


Fig 33

Courbes  $J(\underline{\sigma_a}, \underline{\sigma_b})$ ,  $J(\underline{\sigma_b})$ ,  $J(\underline{\sigma_a}, \underline{\sigma_b})$  et  $J(\underline{\sigma_a})$  sur un fil de permalloy à 60% de nickel dans le cas où  $\underline{\sigma_a} = 0$  et  $\underline{\sigma_b} = 2,76 \text{ Kg/mm}^2$



fil de nickel dans le cas où  $\sigma_a = 0$  et  $\sigma_0 = 2,5 \text{ Kg/mm}^2$ .



correspondant à plusieurs différences de tensions  $\sigma_a$  et  $\sigma_b$ . Sur la figure 35 sont représentées les valeurs  $Y_{\sigma_e}(\sigma_a, \sigma_b)$  pour  $J(\sigma_b) = 10$  u é m en fonction des différences des tensions. En appliquant les formules (30) et (32) aux résultats de la figure 35, nous avons obtenu pour une augmentation de tension la valeur de  $n$  :

$$n = 1,74$$

et la valeur de  $\alpha$  :

$$\alpha = 4,1 \cdot 10^{-2}$$

Nous avons montré aussi sur la même figure 35 les valeurs  $Y_{\sigma_d}(\sigma_b, \sigma_a)$  pour  $J(\sigma_a) = 10$  u é m en fonction des différences des tensions. Dans ce cas on obtient la même valeur de  $n = 1,74$  jusqu'à  $8 \text{ kg/mm}^2$  pour une diminution de tension mais au-dessus de  $8 \text{ kg/mm}^2$  on observe une déviation par rapport à la courbe correspondant à  $n = 1,74$ . On retrouve souvent cette déviation dans les matériaux très doux.

#### XVIII - LES EFFETS DANS LES MATERIAUX DOUX.

Il serait très instructif d'étudier les deux effets sur des monocristaux de fer, par exemple, Cependant jusqu'à présent nous n'avons pas réussi cette expérience pour les raisons suivantes (si les matériaux sont très doux) :

1°) les résultats expérimentaux du deuxième effet ne sont pas reproductibles comme la figure 36 en montre un exemple sur la direction  $[100]$  d'un monocristal de fer.

2°) les formules (25) et (26) ne sont pas valables ; c'est-à-dire que l'on ne peut pas séparer correctement le premier et le deuxième effet.

3°) les erreurs qui proviennent des vibrations mécaniques sont très importantes.

Rappelons que, dans le cas du nickel, on observe que le deuxième effet dû à la variation de température est très petit si l'amplitude de la variation de température est très grande. C'est un caractère que l'on trouve souvent dans les matériaux doux. On observe le même phénomène si l'amplitude de la tension est très

# Fig 35

Valeurs de  $Y_{\sigma_e}$  et de  $Y_{\sigma_d}$  correspondant à l'aimantation 10 uem en fonction de la différence des tensions  $\sigma_b$  et  $\sigma_a$  sur un fil de permalloy à 60 % de nickel

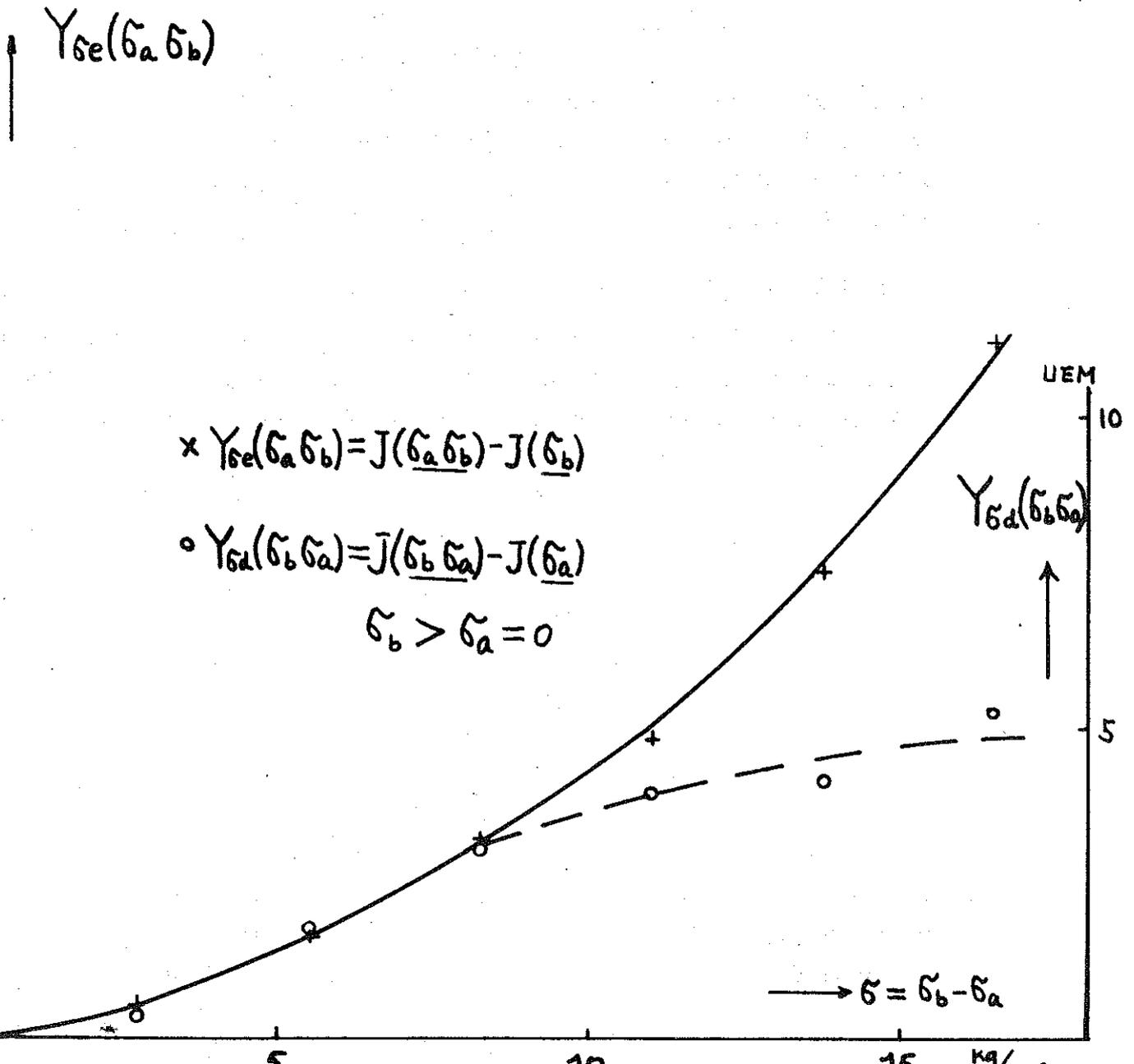
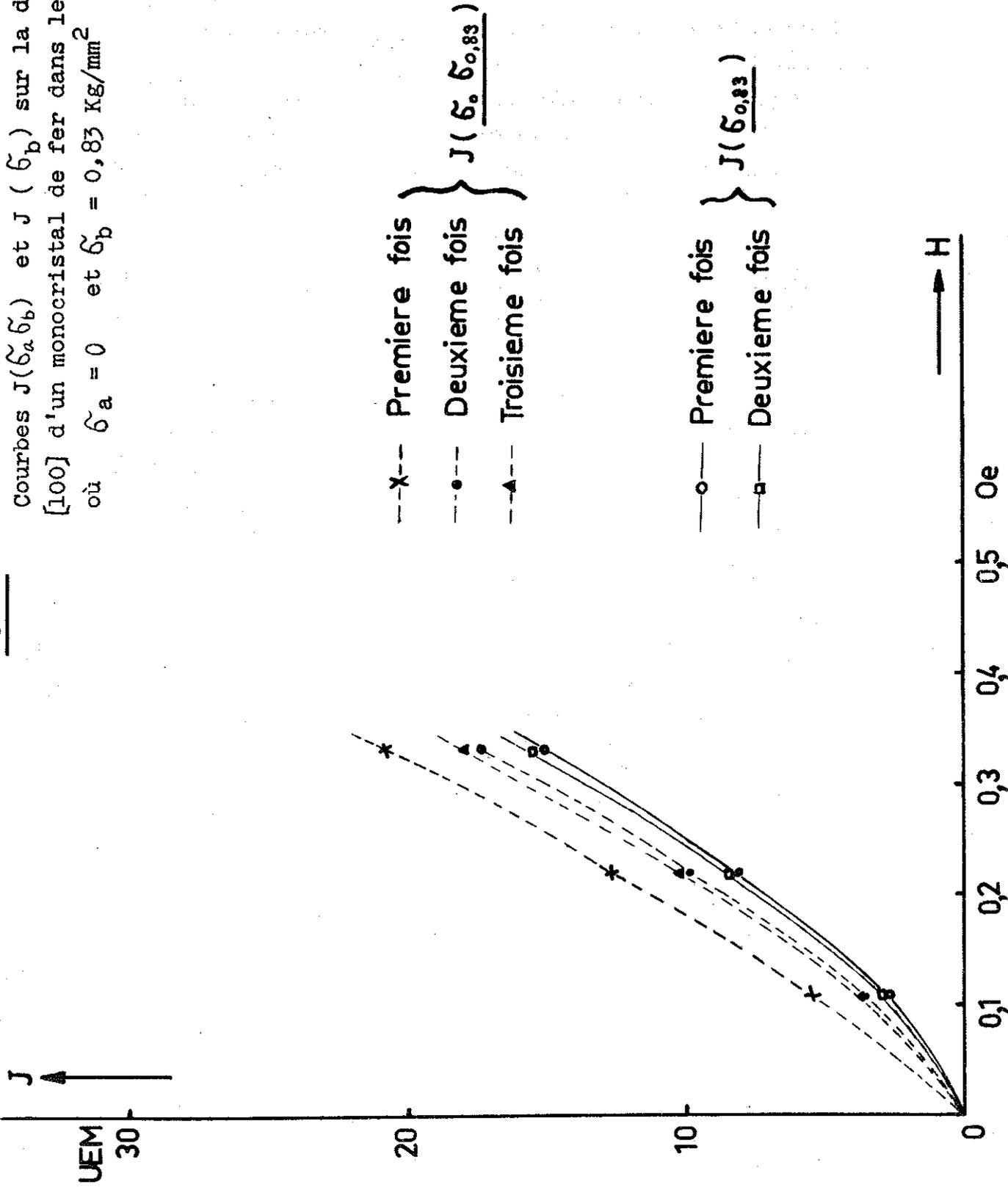


Fig 36

Courbes  $J(\sigma_a \sigma_b)$  et  $J(\sigma_b)$  sur la direction [100] d'un monocristal de fer dans le cas où  $\sigma_a = 0$  et  $\sigma_b = 0,83 \text{ Kg/mm}^2$



grande : nous en avons déjà vu un exemple sur la figure 35, comme la déviation de la courbe normale, dans le cas de diminution de la tension sur le permalloy à 60 % Ni. On constate que, dans le cas où l'on observe cette déviation, les formules (25) et (26) ne sont pas valables.

Nous estimons également que la petite valeur du  $n$  de la formule (18), sur un fil de nickel, ( $n = 0,90$ ) citée au paragraphe XI, provient aussi de cet effet de déviation, dans la courbe  $\gamma - \delta$ .

XIX - VARIATION DE LA TENSION INTERNE CAUSEE PAR LA VARIATION DE TEMPERATURE SUR L'ECHANTILLON DEFORME.

Des résultats obtenus dans les paragraphes précédents (deuxième partie), nous constatons maintenant que les effets dus aux variations de température et les effets dus aux changements de tension paraissent essentiellement analogues. D'où l'idée que les effets dus aux variations de température proviennent des modifications de l'état des tensions internes produites par la variation de la température.

Nous avons donc déterminé la valeur de la variation de tension interne dans le cas où  $T_a = 16^\circ\text{C}$  et  $T_b = 60^\circ\text{C}$  et pour un fil d'acier mi-doux (Tableau VI), en comparant les valeurs des effets dus à la variation de température avec les valeurs des effets dus au changement de tension appliquée.

TABLEAU VI

(pour  $T_a = 16^\circ$   $T_b = 60^\circ\text{C}$ )

	$H_c$	d'Après 1er effet	d'Après 2ème effet
Avant traitement thermique	16,0 œ	18 ~ 19 kg/mm <sup>2</sup>	17,5 ~ 20,8 kg/mm <sup>2</sup>
Après traitement sous hydrogène à 1000°C	1,54	0,33 ~ 0,35 kg/mm <sup>2</sup>	0,3 ~ 0,5 kg/mm <sup>2</sup>

Comme nous l'avons montré sur la figure 31, le deuxième effet dû au changement de tension est un peu plus grand pour un refroidissement que pour un échauffement, tandis que, dans le cas de variation de la température, sur le même échantillon le deuxième effet est très grand pour un échauffement mais très faible pour un refroidissement. Nous avons aussi les valeurs différentes de  $n$  des formules (18) et (32) pour une variation de température ( $n = 1,345$ ) et pour une variation de tension ( $n = 1,525$ ).

Il est certain que la direction de la variation de tension causée par la variation de la température n'est pas la même que celle du champ magnétique appliqué. De ce fait, on peut, peut-être, expliquer les différences entre les effets produits par une variation de température et ceux produits par une variation de tension.

La tension étant appliquée toujours dans la même direction que le champ magnétique, on ne peut pas estimer exactement la valeur des variations de tensions internes produites par les variations de température, d'après les résultats dans le cas de variation de la tension. Cependant on peut avoir une idée de la grandeur des variations des tensions internes, comme le montre le Tableau VI.

TROISIEME PARTIE

CONTRIBUTIONS DES PAROIS A 180° ET DES PAROIS A 90°  
-----

XX - LE DEUXIEME EFFET SUR UN FIL DE PERMALLOY SOUS TENSION

Depuis longtemps on sait que dans un fil de permalloy sous tension il n'existe pas de parois à 90°, si la tension est très grande. Nous avons donc étudié le deuxième effet sur un fil de permalloy à 60 % Ni pour la même valeur de  $\Delta\sigma$

$$\Delta\sigma = \sigma_b - \sigma_a = 2,76 \text{ kg/mm}^2$$

en faisant varier  $\sigma_a$ . L'amplitude du phénomène diminue de plus en plus à mesure que la tension  $\sigma_a$  augmente. Nous avons représenté sur la figure 37 les courbes  $J(\sigma_a, \sigma_b)$  et  $J(\sigma_b)$  dans les cas où  $\sigma_a = 0$  et  $\sigma_a = 33,5 \text{ kg/mm}^2$ .

On déduit de ces résultats que le deuxième effet est associé aux parois à 90° et disparaît lorsqu'il n'y en a pas.

XXI - LE PREMIER EFFET SUR UN FIL DE COBALT HEXAGONAL

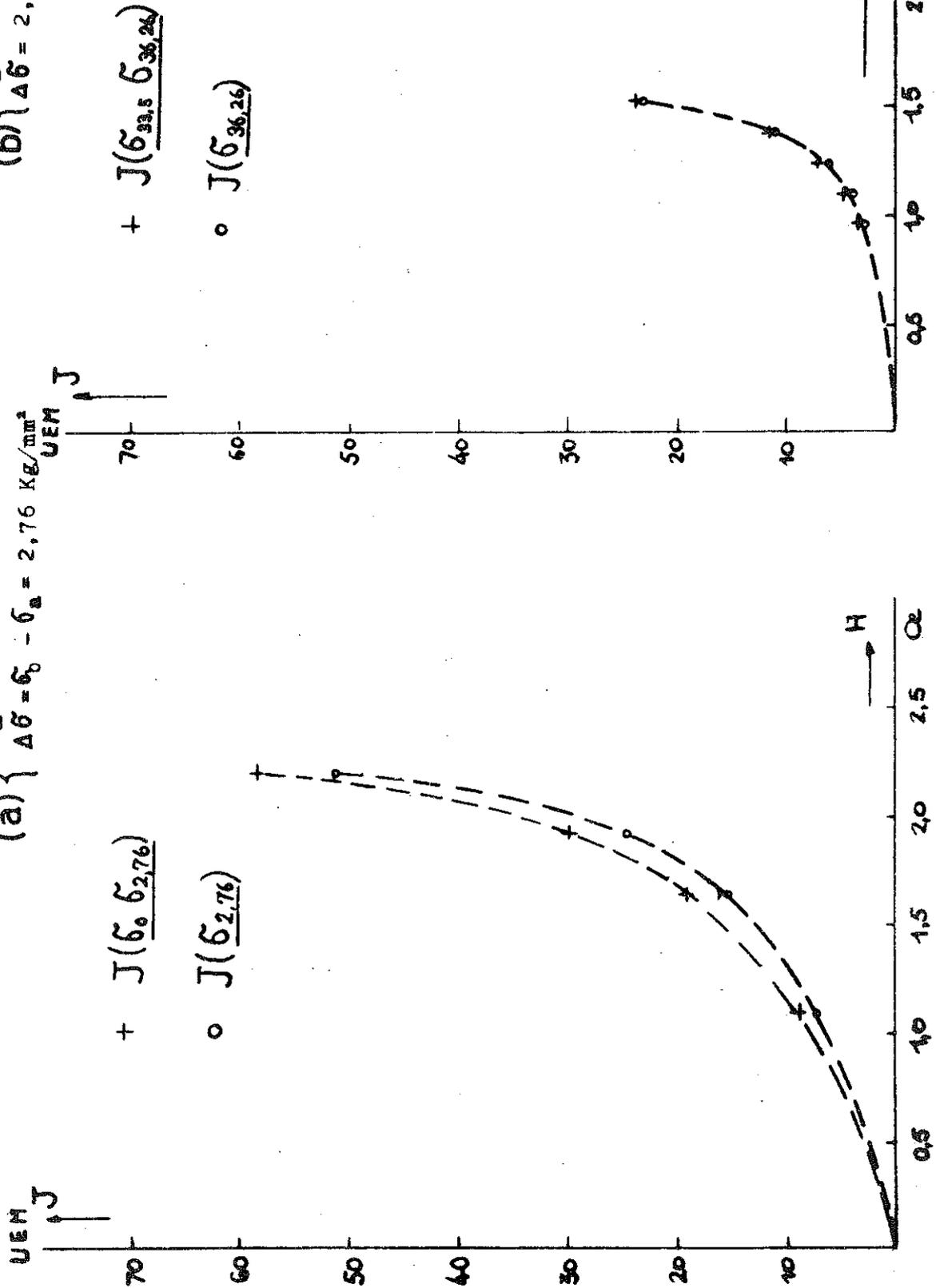
D'après l'expérience du paragraphe précédent, on prévoit que le deuxième effet ne doit pas exister dans les substances à anisotropie uniaxiale et que le premier effet doit exister seul dans ce cas. On pourrait ainsi dans une telle substance étudier le premier effet d'une manière plus précise que dans le cas où les deux effets se superposent. Sur les figures 38 et 39 sont portés les résultats expérimentaux du premier effet sur un fil de cobalt polycristallin qui a été refroidi en passant très lentement le point de la transformation cubique-hexagonale et qui a presque partout une structure hexagonale : on constate évidemment la validité de la formule (27).

Puisqu'il ne reste que des parois à 180° dans le cobalt hexagonal, on peut en conclure que le premier effet est produit par les déplacements des parois à 180°.

Fig 37

Courbes  $J(\sigma_a)$  et  $J(\sigma_b)$  sur un fil de permalloy à 60% de nickel.

$$(a) \left\{ \begin{array}{l} \sigma_a = 0 \\ \Delta \sigma = \sigma_b = 2,76 \text{ KG/mm}^2 \end{array} \right. \quad (b) \left\{ \begin{array}{l} \sigma_a = 33,5 \text{ KG/mm}^2 \\ \Delta \sigma = 2,76 \text{ KG/mm}^2 \end{array} \right.$$



Valeurs de  $X_G$  en fonction de l'aimantation  
sur un fil de cobalt hexagonal dans le cas  
où  $\tilde{\sigma}_a = 0$  et  $\tilde{\sigma}_b = 10,92 \text{ Kg/mm}^2$

Fig 38

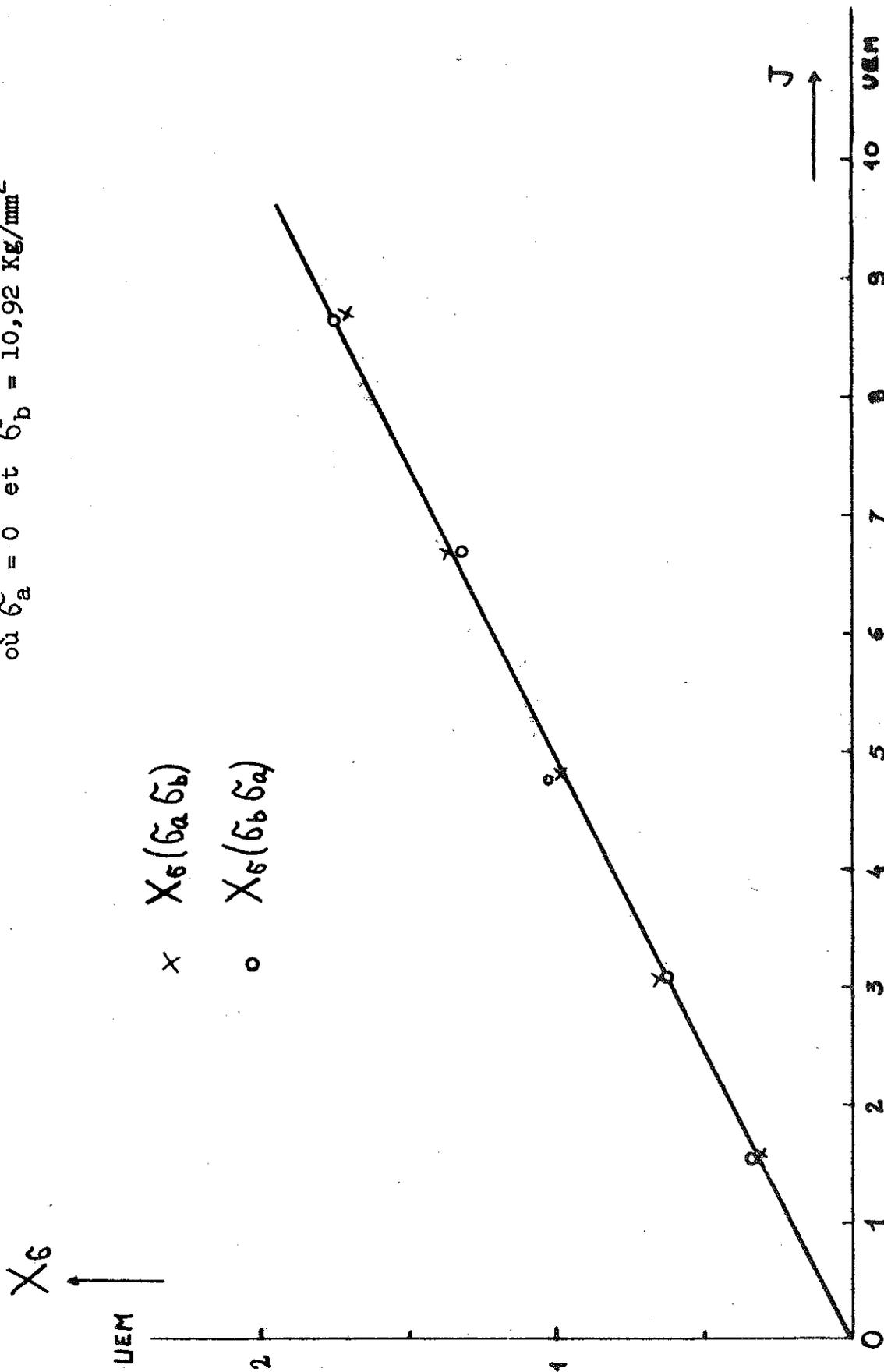
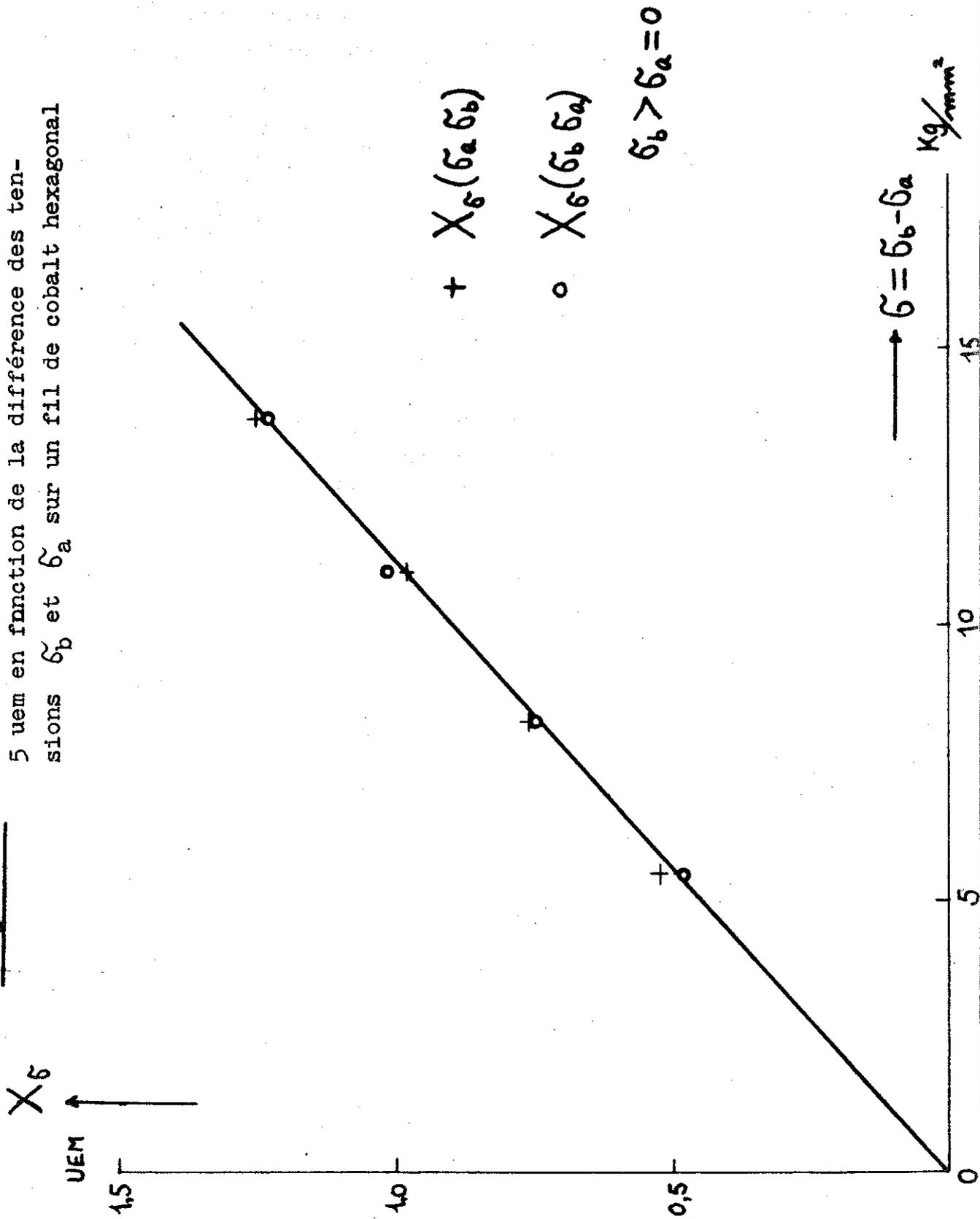


Fig 39

Valeurs de  $X_G$  correspondant à l'aimantation  
 5 uem en fonction de la différence des ten-  
 sions  $\sigma_b$  et  $\sigma_a$  sur un fil de cobalt hexagonal



XXII - COMPARAISON DES DEUX EFFETS.

Lorsqu'un échantillon ferromagnétique initialement désaimanté sous tension  $\zeta_a$  est soumis à un champ magnétique maintenu désormais constant puis subit une variation de tension de  $\zeta_a$  à  $\zeta_b$ , on observe en général le premier et le deuxième effet, c'est-à-dire qu'il se produit une superposition des deux effets, comme le montrent les formules suivantes :

$$X\zeta (\zeta_a \zeta_b) + Y\zeta_e (\zeta_a \zeta_b) = J (\zeta_a \zeta_b) - J (\zeta_b) \quad (33)$$

$$X\zeta (\zeta_b \zeta_a) + Y\zeta_d (\zeta_b \zeta_a) = J (\zeta_b \zeta_a) - J (\zeta_a) \quad (34)$$

que l'on obtient d'après les formules (25), (26), (28) et (29).

Les deux effets produisent toujours des modifications d'aimantation et sont accompagnés de l'apparition de cycles dissymétriques.

Dans le domaine de Rayleigh les deux effets sont proportionnels à la valeur de l'aimantation.

Les deux effets augmentent en général si le champ coercitif diminue.

D'autre part, les deux effets présentent quelques caractéristiques différentes.

Le premier effet apparaît dans tous les processus de déplacements des parois et naturellement aussi sur les cycles d'hystérésis décrits après saturation, tandis que le deuxième effet se présente surtout dans le domaine de Rayleigh et dans le cas où l'on change la tension après désaimantation et l'on n'observe pas le deuxième effet sur des cycles d'hystérésis décrits après saturation.

On observe le deuxième effet quel que soit l'ordre de la variation de tension et de l'application du champ magnétique. Par contre on obtient le premier effet seulement dans le cas où l'on applique d'abord le champ puis que l'on modifie la tension.

L'effet de l'augmentation de tension et celui de la diminution de tension sont toujours égaux pour le premier effet, tandis qu'ils sont en général différents pour le deuxième effet.

Le premier effet est causé par des déplacements de parois à  $180^\circ$ . Par contre le deuxième effet est associé aux parois à  $90^\circ$ .

B I B L I O G R A P H I E

- (1) - K. KRONENBERG -  
Arch. Eisenhüttenwesen 24 (1953) p.441
- (2) - A.G. CLEGG -  
Brit. J. Appl. Phys. 6 (1955) p.120  
A.G. CLEGG et M.McLAIG -  
Brit. J. Appl. Phys. 9 (1958) p.194
- (3) - M. KAWANO -  
Keisoku 6 (1956) p.380
- (4) - L. NEEL -  
C.R. Acad. Sci. 244 (1957) p.2441 et 2668
- (5) - NGUYEN van DANG -  
C.R. Acad. Sci. 246 (1958) p.3034
- (6) - L. NEEL -  
J. Physique Rad. 11 (1950) p.49
- (7) - L. NEEL -  
J. Physique Rad. 20 (1959) p.215
- (8) - L. NEEL -  
C.R. Acad. Sci. 248 (1959) p.2676
- (9) - J.C. BARBIER -  
Ann. Physique, Paris 9 (1954) p.84
- (10) - L. LLIBOUTRY -  
Ann. Physique, Paris 6 (1951) p.731

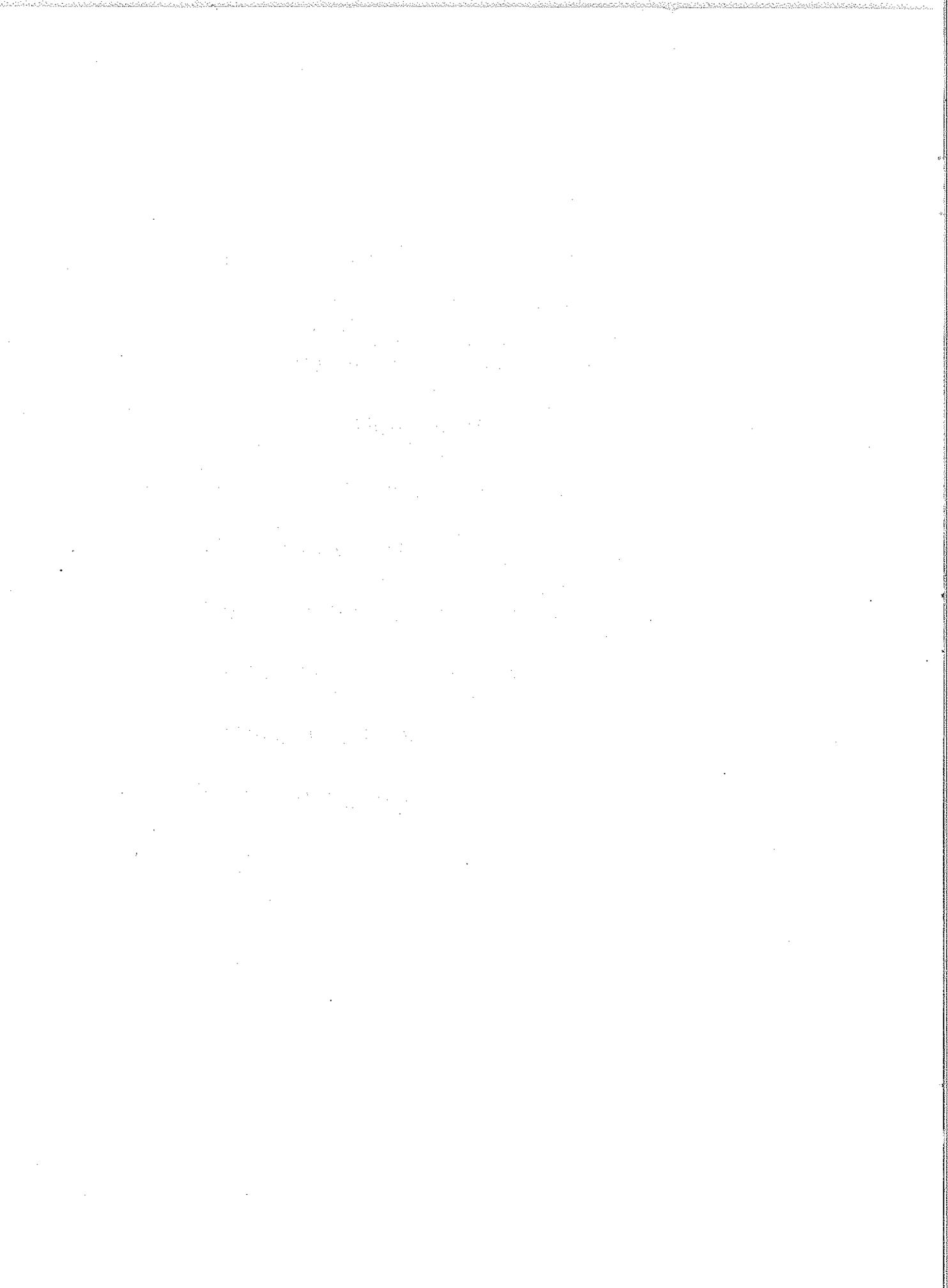


TABLE des MATIERES

PREMIERE PARTIE

LES EFFETS DÛS AUX VARIATIONS DE TEMPERATURE  
-----

§ I	-	Introduction .....	1
§ II	-	Les augmentations anormales des aimantations dans le domaine de Rayleigh dans le cas de dépassement de la température de désaimantation .....	4
§ III	-	Variation de l'aimantation en fonction du champ, après l'échauffement de l'échantillon, soumis au champ constant .....	9
§ IV	-	Le premier effet dû à la variation de température .....	11
§ V	-	Susceptibilité après changement de la température de l'échantillon soumis au champ constant .....	13
§ VI	-	Influence du champ démagnétisant sur le premier effet dû à la variation de température .....	16
§ VII	-	Les lois du premier effet dû à la variation de température .....	25
§ VIII	-	Le premier effet sur la branche descendante du cycle d'hystérésis dans le domaine de Rayleigh .....	30
§ IX	-	Le deuxième effet dû à la variation de température .....	33
§ X	-	Caractéristiques du deuxième effet dû à la variation de température .....	35
§ XI	-	Le deuxième effet dû à la variation de température sur un fil de nickel .....	39
§ XII	-	Les deux effets sur diverses substances et sur des échantillons différents .....	44
§ XIII	-	Influences des traitements thermiques sur les deux effets .....	45

DEUXIEME PARTIE

LES EFFETS DÛS AUX CHANGEMENTS DE TENSION

-----

§ XIV	- Analogie des effets dûs aux changements de tension avec les effets dûs aux variations de température .....	48
§ XV	- Le premier effet dû au changement de tension ...	51
§ XVI	- Le deuxième effet dû au changement de tension ..	53
§ XVII	- La magnétostriction et le deuxième effet dû au changement de tension .....	59
§ XVIII-	Les effets dans les matériaux doux .....	63
§ XIX	- Variation de la tension interne causée par la variation de température sur l'échantillon déformé .....	66

TROISIEME PARTIE

CONTRIBUTIONS DES PAROIS A 180° ET DES PAROIS A 90°

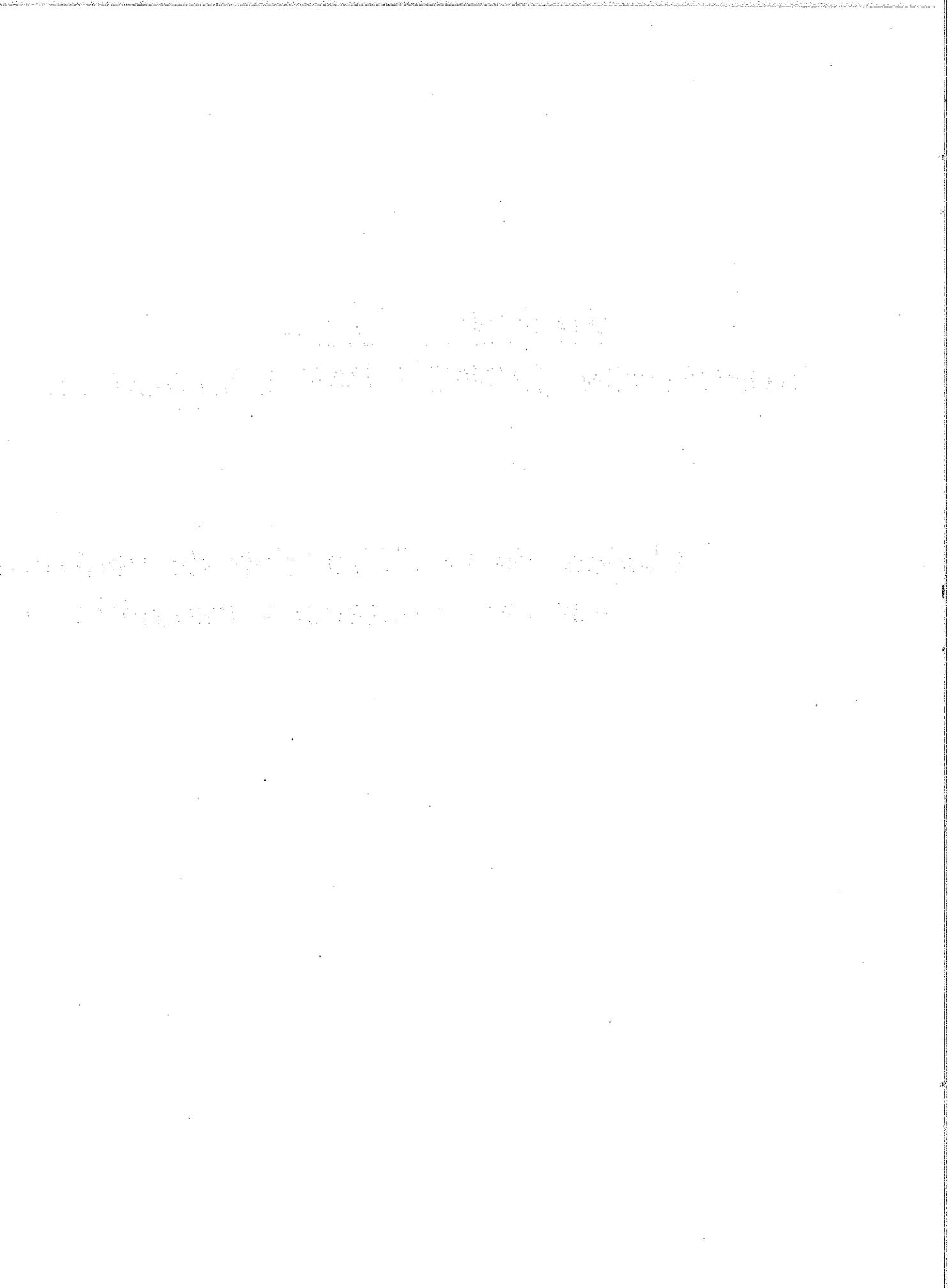
-----

§ XX	- Le deuxième effet sur un fil de permalloy sous tension .....	68
§ XXI	- Le premier effet sur un fil de cobalt hexagonal.	68
§ XXII	- Comparaison des deux effets .....	72

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITION DONNÉE PAR LA FACULTÉ

" Études de la diffraction de neutrons  
sur les substances magnétiques "



VU

Grenoble, le 22/11/1961

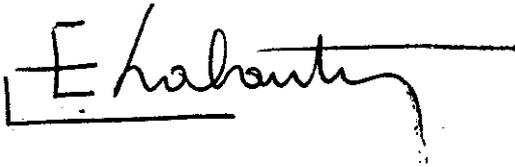
Le Président de la Thèse,



Vu,

Grenoble, le 22/11/1961.

Le Doyen de la Faculté des Sciences



VU, et permis d'imprimer,

Le Recteur de l'Académie de  
Grenoble

