



CM-P00063711

18 décembre 1975

SYSTEME AUTOMATIQUE DE MESURE UTILISE
POUR CONTROLER UN PERMEAMETRE

E. Rossa

R é s u m é

Ce rapport décrit l'appareillage qui a permis de faire le contrôle des caractéristiques magnétiques de l'acier des aimants de l'accélérateur de 300 GeV CERN.

Sur les lieux de la production à l'usine Cockerill de Liège en Belgique, des échantillons ont été prélevés sur les 25.000 tonnes d'acier. Les mesures réalisées sur place ont permis la classification des tôles en fonction du champ coercitif.

Cet appareillage a été développé à partir d'un projet ISR. Il en diffère surtout par sa flexibilité et peut être utilisé pour des mesures autres que magnétiques. Il est entièrement sous le contrôle d'une petite calculatrice. En modifiant les programmes, le système peut être adapté rapidement à d'autres types de mesures.

SOMMAIRE

1. Préliminaire
2. Principe de la mesure
3. Description de l'appareillage
 - 3.1 Calculatrice
 - 3.2 Circuit de puissance
 - 3.3 Perméamètre
 - 3.4 Circuit de mesure
4. Procédure de mesure
 - 4.1 Prélèvement des échantillons
 - 4.2 Calibration
 - 4.3 Paramètres
 - 4.4 Démagnétisation
 - 4.5 Mesures $B = f(H)$
 - 4.6 Mesure du champ coercitif H_c
5. Résultats obtenus
 - 5.1 Reproductibilité de la mesure $B = f(H)$
 - 5.2 Précision de la mesure $B = f(H)$
 - 5.3 Stabilité de la mesure du champ coercitif
 - 5.4 Stabilité de la constante de temps de l'intégrateur
 - 5.5 Vitesse de mesure

Conclusion

Courbes (C1 à C6) : donnant la stabilité de l'appareillage pour plus de deux années de mesure.

Annexe 1 : Répertoire des commandes d'entrée-sortie

Annexe 2 : Répertoire des 'labels' utilisés dans la programmation

Annexe 3 : Calculs relatifs au perméamètre

Annexe 4 : Vue d'ensemble de l'appareillage et schémas.

1. Préliminaire

Ce rapport décrit le perméamètre automatique construit par le Groupe-Aimant du Laboratoire II en 1972. Cet appareil est utilisé pour mesurer les caractéristiques magnétiques (champ coercitif et $B = f(H)$) des aciers à faible teneur de carbone utilisés dans la construction des aimants du SPS.

Il existait aux ISR à cette époque un ancien perméamètre qui nous a servi de référence^{1,2)}. Nous avons construit un nouvel appareillage pour avoir un ensemble fiable, permettant de réaliser des mesures reproductibles pendant trois ans, durée de toute la production d'acier.

Il se distingue des systèmes précédemment construits, d'une part par son automaticité - tout le processus est sous contrôle d'une calculatrice HP 9810 A - et, d'autre part, sa flexibilité lui permet de s'adapter à d'autres types de mesures (mesures de petits aimants par exemple).

Après une description sommaire de l'appareillage et des programmes, les résultats obtenus sont donnés : précision, vitesse de mesure, stabilité à long terme.

La partie mécanique du 'perméamètre' proprement dit est identique à celle des perméamètres qui ont servi aux ISR et au CPS, mais un refroidissement forcé a été ajouté.

2. Principe de la mesure

Toutes les mesures $B = f(H)$ sont faites sur la courbe de première aimantation en régime continu. La méthode est analogue à celle dite du 'galvanomètre balistique' : un échantillon torique d'acier à mesurer est placé dans un enroulement d'excitation soumis à une variation de courant I .

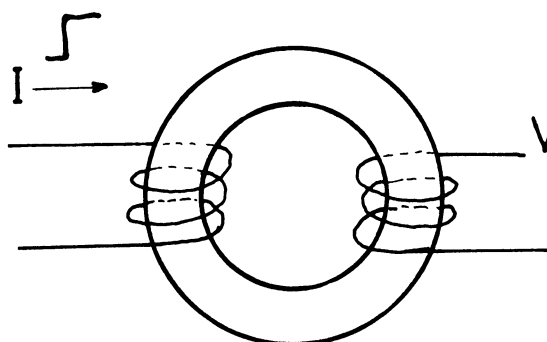


fig. 1

L'intégration de la tension induite dans un deuxième enroulement permet de mesurer la variation de flux dans l'échantillon et de calculer les caractéristiques magnétiques de l'acier. Il faut connaître les caractéristiques géométriques de l'échantillon, les valeurs du courant d'entrée, les nombres de spires primaires et secondaires. L'ensemble de l'appareillage peut se diviser en trois grandes parties.

3. Description de l'appareillage

1ère partie : une calculatrice HP 9810 A.

2ème partie : c'est un circuit de puissance qui pourrait fournir de l'ordre de 1 kW utile. Le courant peut être contrôlé par la calculatrice entre 0,1 mA et ± 50 A.

3ème partie : perméamètre

4ème partie : c'est un circuit de mesure constitué d'un voltmètre digital type HP 3480 B, de deux shunts de 0,5 Ω et 0,02 Ω , classe de précision 10^{-4} , et d'un intégrateur-calibrateur permettant une précision absolue de quelques 10^{-4} du maximum de l'échelle.

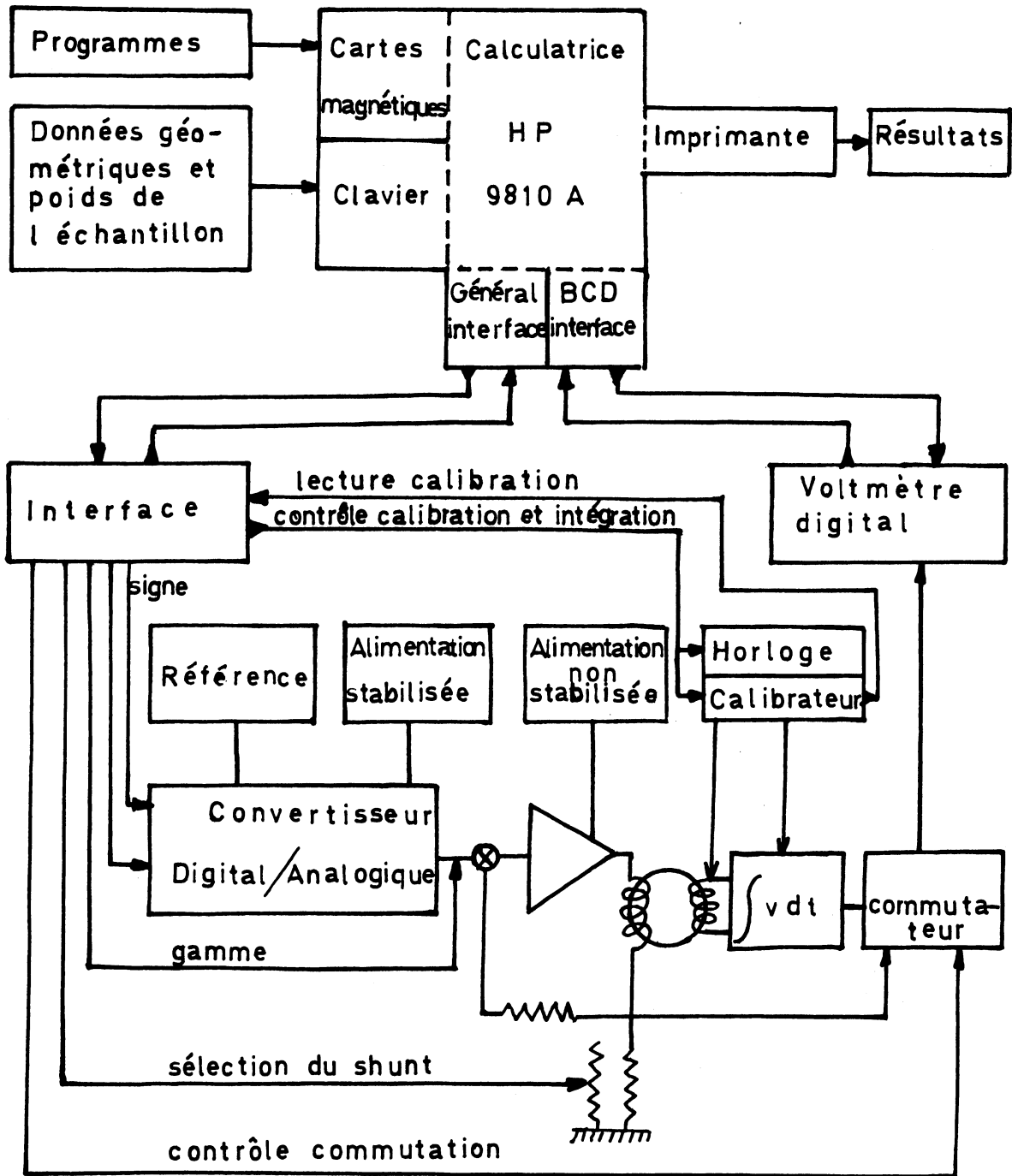
Tout l'ensemble est sous le contrôle de la calculatrice.

La 3e partie peut être constituée par un autre équipement; ici c'est le perméamètre semi-ouvrant qui est branché, mais on pourrait aussi bien connecter un petit aimant à mesurer. Les bobines de mesure dans l'entrefer seraient l'équivalent du secondaire du perméamètre.

Depuis la rédaction du rapport interne Lab II/MA/ER/10^{*)} du 15 mai 1972, fixant les principaux paramètres du système de mesure des échantillons d'acier, il y a eu une évolution vers une simplification de l'appareillage. En particulier, nous n'avons pas construit les circuits logiques, assez complexes, qui devaient programmer les séquences de démagnétisation et de mesure en position 'manuelle' sans l'aide de la calculatrice. Les risques de pannes de cette calculatrice restent assez faibles; cela faisait une économie de temps et d'argent appréciables.

*) Note No. 4, E. Rossa, M. Chassard, C. Simonnot.

Schéma synoptique du perméamètre automatique



3.1 Calculatrice

Il s'agit d'une petite calculatrice HP 9810 A dans sa configuration minimum. Il y a 500 pas de programme que l'on peut charger avec des cartes magnétiques et 51 registres. Les options sont les suivantes :

- une imprimante alpha numérique
- deux interfaces pour les entrées-sorties
- (i) un interface BCD destiné au contrôle d'un voltmètre digital
- (ii) un 'general interface' destiné au reste de l'appareillage.

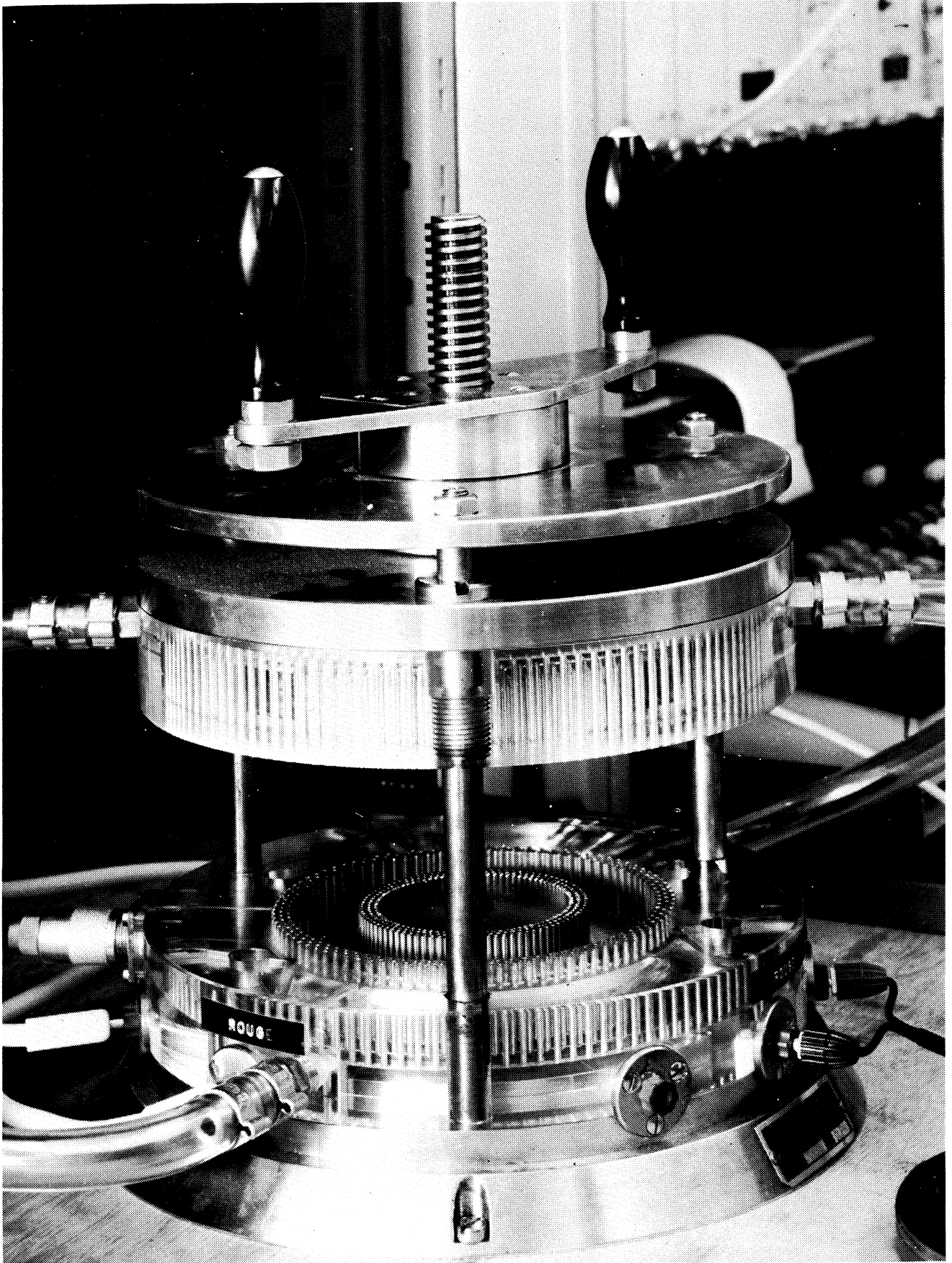
3.2 Circuit de puissance

Le schéma détaillé se trouve en annexe 4. A l'époque il n'y avait pas encore de convertisseur digital analogique en option standard pour la calculatrice HP 9810 A. Nous avons dû construire un interface et l'ensemble du circuit de puissance :

- puissance utile 15 V, 50 A. Le circuit est limité à 50 A actuellement pour cette application, mais le circuit pourrait fournir près de 70 A.
- résolution 10^{-3} , 3 digits BCD
- 3 gammes 1, 10, 50 A programmables
- une 4e gamme donnant 0,1 A à pleine échelle a été ajoutée; elle peut être sélectionnée manuellement.

3.3 Perméamètre

Le perméamètre semi-ouvrant utilisé est du même genre que ceux ayant servi pour mesurer les aciers des ISR ou du CPS, mais nous l'avons équipé d'un système de refroidissement à air pour diminuer l'élévation de température de l'échantillon. Comme on peut le voir sur la photo ci-après, chaque demi-broche est alimentée par des conduites d'air comprimé qui évacue la chaleur à l'extérieur.



3.4 Circuit de mesures

3.4.1 Shunts

Il existe deux shunts qui mesurent le courant. Pour un courant inférieur à 10 A, le shunt utilisé a $0,5 \Omega$ de résistance. Au-dessus de 10 A le shunt utilisé fait $0,02 \Omega$. Leur classe de précision est 10^{-4} .

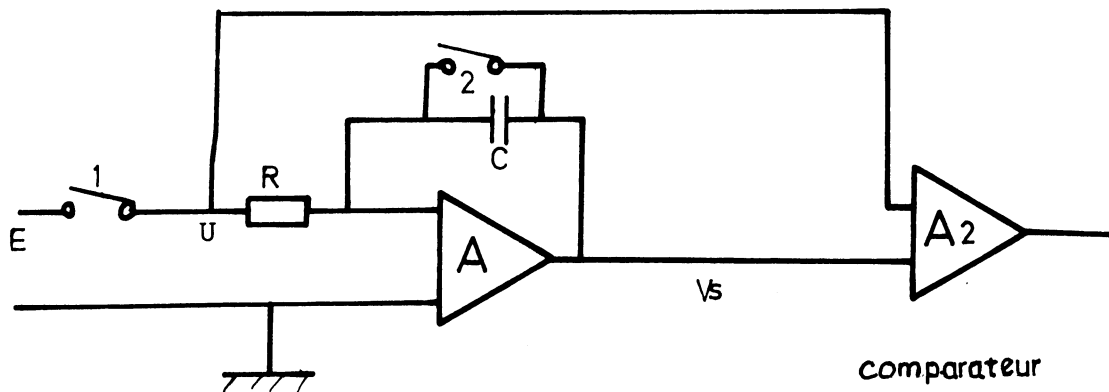
3.4.2 Voltmètre

C'est un voltmètre HP 3480 B qui est entièrement sous contrôle de la calculatrice.

3.4.3 Intégrateur-calibrateur

Un circuit intégrateur de tension analogique de bonne qualité fait partie de l'équipement. La tension de sortie de cet intégrateur est lue par le voltmètre. La détermination de constante de temps RC de l'intégrateur peut se faire automatiquement avec une bonne résolution.

Principe de la calibration automatique



L'interrupteur No. 2 s'ouvre à l'instant $t = 0$ lorsqu'on applique la tension E à l'entrée (1 se ferme). Le signal de sortie devient :

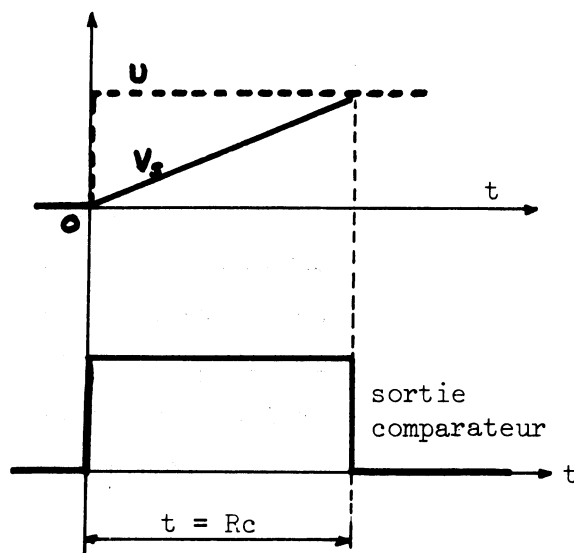
$$V_s = 1/Rc \int_0^t E dt = \frac{1}{Rc} Et$$

Le comparateur A_2 bascule lorsque :

$$V_s = E = \frac{1}{Rc} Et$$

donc

$$t = Rc.$$



La mesure de l'intervalle de temps t donne directement la valeur de la constante de l'intégrateur.

Le comparateur déclenche le début et la fin du comptage d'impulsions provenant d'un quartz de haute stabilité. L'ensemble de ces opérations est sous le contrôle de la calculatrice qui peut lire le contenu du compteur et mettre en mémoire la valeur de la constante de temps.

Un soin particulier a été apporté à la construction de l'appareillage. Toute la partie analogique de mesure est flottante par rapport aux circuits logiques, les signaux d'entrée-sortie rapides sont transmis par photo-coupleur et les commandes lentes par relais.

Le schéma de l'ensemble est en annexe 4.

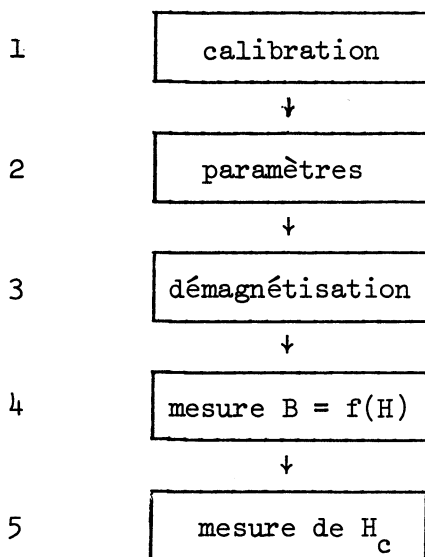
En réalité pour avoir une meilleure résolution on mesure $t = 10 RC$ en appliquant à travers un atténuateur très stable seulement $E/10$ à l'entrée. Le comparateur lui reçoit toujours E . La résistance du circuit secondaire du perméamètre est toujours dans le circuit pendant cette calibration.

4. Procédure de mesure

4.1 Prélèvement des échantillons

Tous les échantillons toriques ont été découpés dans les tôles utilisées pour la construction des aimants \varnothing ext. = 114 mm, \varnothing int. = 76 mm. Un soin particulier a été pris pendant le découpage et l'ébavurage pour ne pas perturber les caractéristiques magnétiques de l'échantillon.

Les tôles sont groupées par paquets de huit et sont placées ensemble dans le perméamètre et mesurées simultanément. La séquence de mesure utilisée pour les mesures en série des échantillons d'acier des aimants du SPS est donnée ci-après. (Tout l'ensemble étant contrôlable par programme, cette séquence pourrait être modifiée et adaptée à tout autre genre de mesures.)



Chacune de ces séquences correspond à un programme particulier qui est écrit sur une carte magnétique. Quand une séquence est terminée l'opérateur charge le programme suivant avec une autre carte magnétique.

4.2 Calibration

Le programme de calibration permet de mesurer la constante de temps de l'intégrateur. Ce programme mesure 10 fois la constante de temps, calcule la valeur moyenne et l'écart quadratique moyen. Il imprime ces deux résultats ainsi que la valeur nominale que devrait avoir l'intégrateur et qui se trouve en mémoire dans la calculatrice. Cela permet à l'opérateur de contrôler le résultat obtenu.

L'écart quadratique moyen de la mesure de la constante de temps est habituellement $\leq 3 \cdot 10^{-5}$. La stabilité dans le temps est portée plus loin sur la courbe C6.

Sur une période de deux mois la variation mesurée sur la valeur moyenne a été de $3 \cdot 10^{-5}$. Cette stabilité nous a montré qu'il n'était pas utile de faire une calibration à chaque mesure d'échantillon, trois calibrations par semaine étant suffisantes. La constante de temps mesurée reste en mémoire dans la calculatrice pendant le reste des mesures.

4.3 Paramètres

Le programme 'paramètres' demande à l'opérateur : la date, le code de l'échantillon, le diamètre intérieur des anneaux, le diamètre extérieur des anneaux et le poids des anneaux.

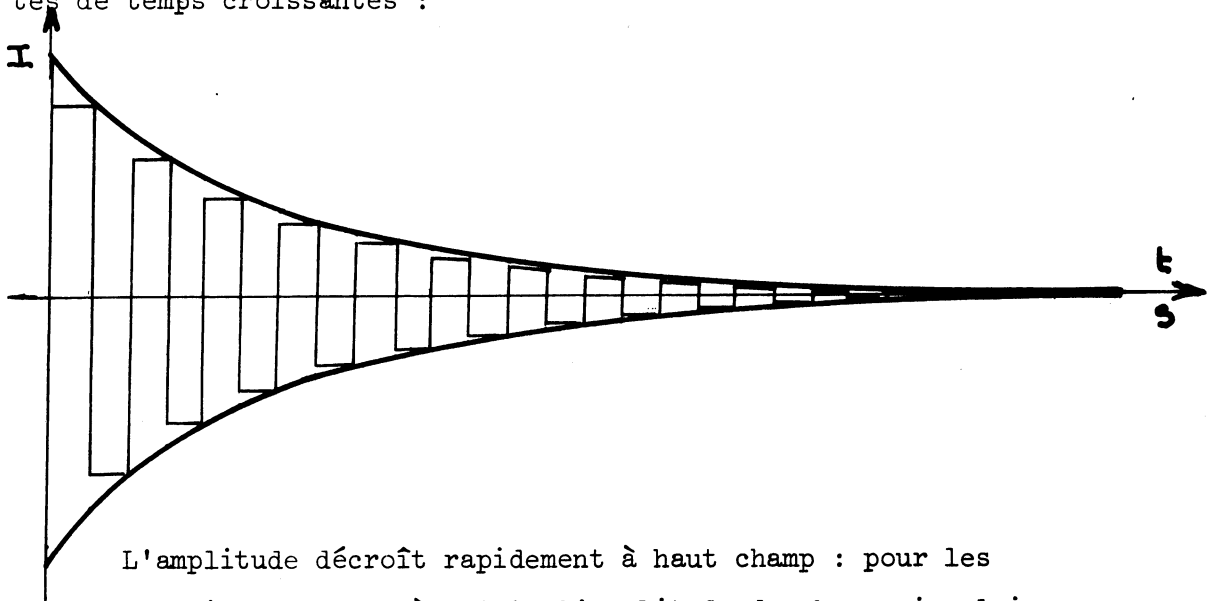
Ce programme :

- (a) contrôle que les paramètres: diamètre intérieur, diamètre extérieur ou poids des anneaux, sont proches des paramètres qu'il a en mémoire. Cela permet d'éviter les erreurs grossières de l'opérateur avant de commencer une mesure.
- (b) avertit l'opérateur qu'il y a une anomalie dans les chiffres qu'il a écrits sur le clavier. Un message est imprimé, le programme attend que l'opérateur vérifie ce qu'il a écrit et, soit le corrige ou l'accepte. Le programme se poursuit quand l'opérateur appuie sur 'continue'.
- (c) calcule les paramètres qui vont servir par la suite aux mesures magnétiques, les imprime et les garde en mémoire :
 k_1, k_2, k_3 .

On peut trouver en annexe le calcul complet et la signification de ces paramètres. Lorsque le programme 'paramètres' est terminé il s'imprime 'faire la démagnétisation'. L'opérateur charge le programme démagnétisation.

4.4. Démagnétisation

Ce programme permet une démagnétisation très poussée de l'échantillon. Des créneaux de courant positifs et négatifs suivent une décroissance exponentielle dans le temps. Pour avoir une démagnétisation rapide et efficace à bas champ, l'amplitude du courant suit une courbe en fonction du temps qui est constitué de trois exponentielles successives ayant des constantes de temps croissantes :



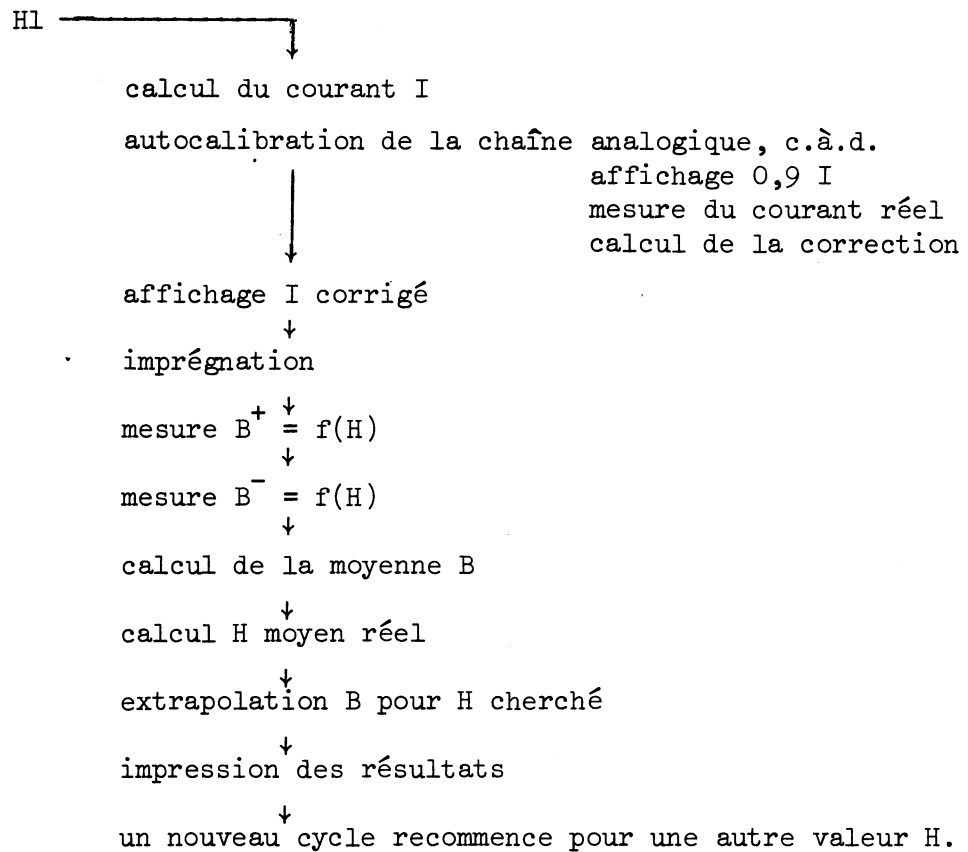
L'amplitude décroît rapidement à haut champ : pour les courants variant de 10 A à 0,2 A, l'amplitude de chaque impulsion successive est divisée par 1,5, ensuite par 1,2 et enfin par 1,1 au-dessous de 85 mA. Chaque impulsion dure 4 secondes,

Lorsque la démagnétisation est terminée, il s'imprime le chiffre 0. Il faut charger le programme de mesures $B = f(H)$.

4.5 Mesures $B = f(H)$

Ce programme contrôle tout le cycle de mesure de la courbe de première aimantation $B = f(H)$.

Actuellement nous mesurons B aux 4 valeurs suivantes de champ: 0,5, 15, 110 et 300 Oersted. Pour chaque valeur H la séquence simplifiée est la suivante :



Remarques

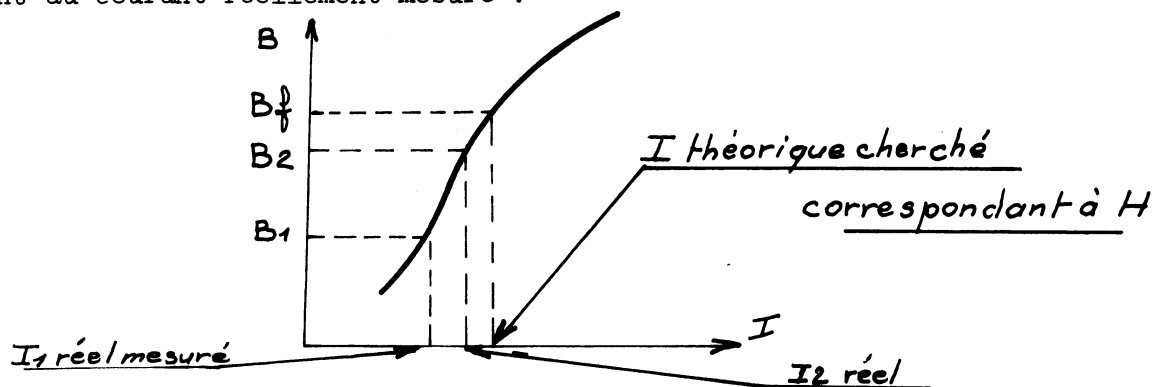
(1) L'autocalibration de la chaîne analogique est faite sur un courant de 0,9 I pour être sûr de suivre le cycle d'hystérésis dans le même sens, car l'erreur attendue sur la chaîne analogique est toujours très inférieure à 0,1 I.

(2) En réalité le programme est un peu plus compliqué. Il faut noter que pour avoir une extrapolation plus précise de B pour H cherché (0,5, 15, 110 ou 300 Oersted), on fait deux mesures de B correspondant aux valeurs de courant I_1 et I_2 proches de I théorique :

$$I_1 = I_{th}(1 - 10^{-3})$$

$$I_2 = I_{th}(1 + 10^{-3}).$$

Ensuite le programme fait le calcul de B final correspondant au courant réellement mesuré :



$$B_f = B_1 + \frac{B_2 - B_1}{I_2 - I_1} (I_{th} - I_1)$$

(3) Les commutations des shunts se font toujours à courant nul.

Imprégnation

Pour des courants d'excitation inférieurs à 10 A, 7 impulsions positives et négatives fixent l'état magnétique de l'échantillon, ensuite seulement il y a : une mesure B^+ et une mesure B^- . Calcul de la moyenne ; impression des résultats. Un nouveau cycle de mesure recommence pour une nouvelle valeur de H.

4.6 Mesure du champ coercitif H_c

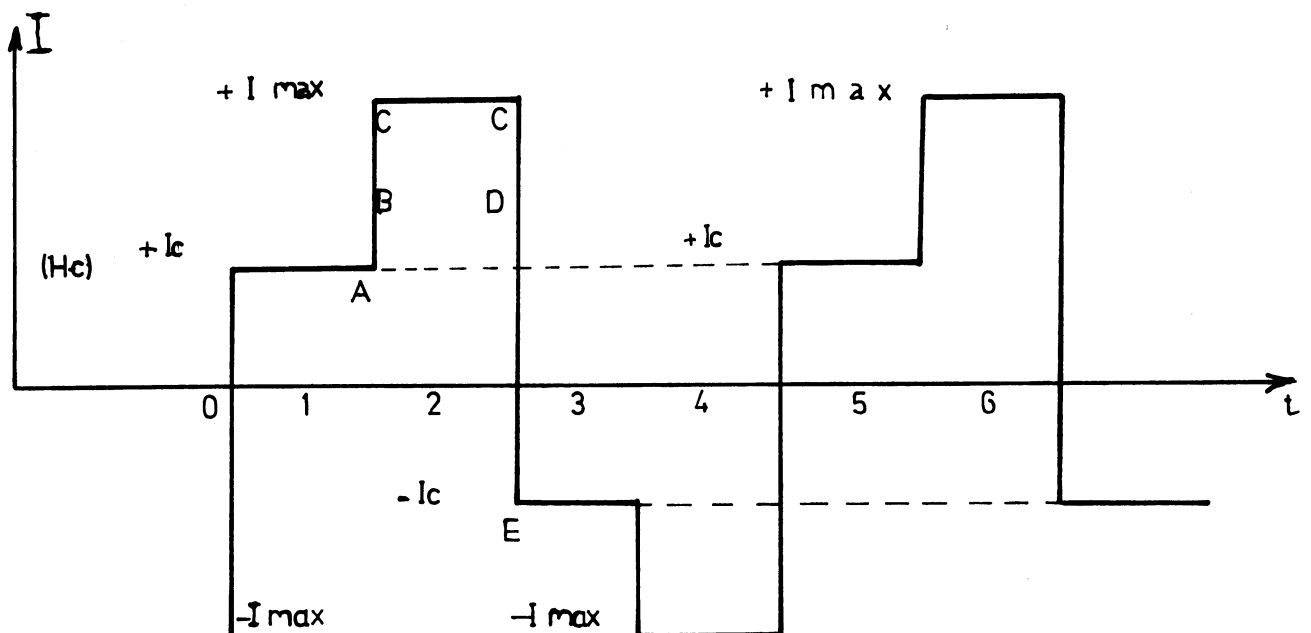
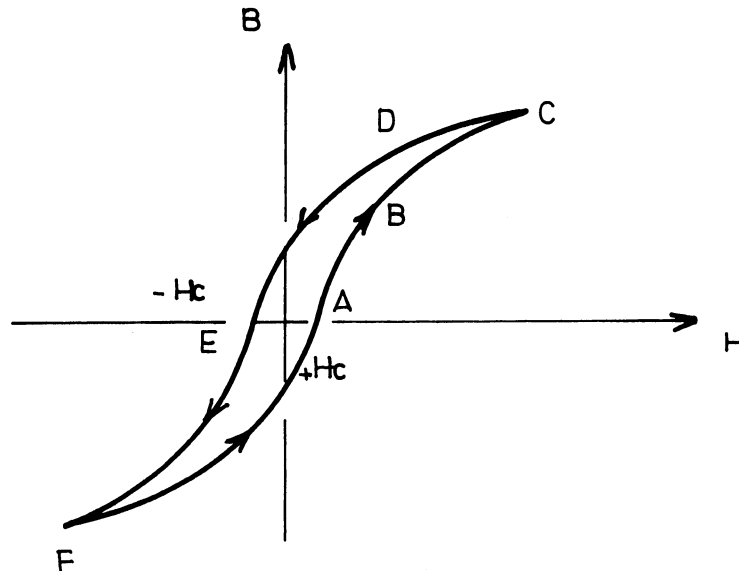
Cette mesure est très importante, car c'est elle qui définit le classement des tôles d'acier et permet de grouper en paquets déterminés toute la production d'acier. Le champ coercitif étant faible (en moyenne $H_c = 0,45$ Oersted), la largeur finale des paquets a été fixée à 40 mOe lorsque le 1/10e de la production totale a été atteint.

En mai 1972 nous avons fixé une résolution de 10 mOe pour le perméamètre à construire (Note 4 Lab II/MAER/10) qui est apparue insuffisante. L'expérience a montré au début des

mesures de l'acier à l'usine Cockerill de Liège qu'il était utile d'accroître cette résolution pour faire plus aisément des comparaisons entre différentes méthodes de découpage des échantillons.

Nous sommes arrivés à obtenir une résolution et une stabilité de $\pm 2 \text{ mOe}$ en ajoutant une gamme de courant allant jusqu'à $0,1 \text{ mA}$, mais surtout en développant le programme de mesure automatique de façon à obtenir une bonne compensation des dérives et des décalages de zéro.

Principe de la mesure de H_c



Si le courant est programmé comme ci-dessus, nous décrivons la courbe A, B, C, D et E du cycle d'hystérésis de l'échantillon : le champ final induit est nul. Donc l'intégrale de la tension induite dans le secondaire est nulle entre les points A et E. En mesurant le courant I_c on déduit par calcul la valeur H_c . Le programme fait décrire au courant le cycle ci-dessus et fait la mesure de l'intégrale de la tension induite dans le secondaire quand on parcourt la courbe A, B, C, D et E.

Si l'intégrale n'est pas nulle, le programme calcule la correction sur I_c et essaye de nouveau en faisant plusieurs cycles pour stabiliser l'état de l'échantillon. La correction appliquée sur le courant ne peut être proportionnelle à la tension intégrée, car les caractéristiques de l'acier ne sont pas du tout linéaires.

Pour avoir une convergence rapide avec un minimum d'oscillations dans un tel système, tout à fait non-linéaire, le programme est construit de la façon suivante :

Soit, $\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3 > \alpha_4$ des coefficients de correction en mémoire dans la calculatrice. Après un cycle de courant $I_c, I_{max}, -I_c$ (comme sur la figure précédente), la tension intégrée trouvée est V :

$V/\alpha_1 = n$, si $|n| > 1$, le programme fait la correction $I_c + n$, nouvel essai jusqu'à ce que la correction apporte $|n| < 1$; dans ce cas on prend le coefficient α_2 et le cycle recommence.

La correction devient de plus en plus fine lorsqu'on se rapproche de zéro. Les coefficients $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ et α_4 ont été ajustés expérimentalement pour avoir la convergence la plus rapide et la plus monotone possible. La valeur initiale du courant I_c correspond à 360 mOe environ. Le programme converge rapidement à la valeur finale qu'elle soit au-dessus ou au-dessous de la valeur initiale.

Lorsque la tension intégrée minimum est atteinte, il y a 6 cycles de courant qui sont faits et les courants positif et négatif sont mesurés chaque fois. La moyenne de ces mesures permet de compenser les décalages de zéro et donne la valeur finale du champ coercitif.

Exemple de résultats fournis sur l'imprimante de la calculatrice :

CALIBRATION PRESSER SUR CONTINUE	ANNEE 74.*	DEMAGNETISATION
1.	MOIS 9.*	PRESSER SUR
1439.	JOUR 24.*	CONTINUE
1.	CODE	0.
1426.	COCK 2	B=(H)
1.	COEF=	0.500000
1429.	D.IN	0.065156
1.	7.6080000*	3543.715381
1442.	D.EX	3568.365282
1.	11.4130000*	0.064393
1430.	K1=	0.065172
1.	7.6738663	<u>3567.852755</u>
1442.	T=	15.000000
1.	0.0101436	1.954686
1436.	P=	0.100000
1.	537.8000000*	B=(H)
1445.	K2=	15.000000
1.	2.467485151 03	1.954686
1440.	K3=	1.577645513 04
1.	FAIRE LA	1.579495870 04
1429.	DEMAGNETISATION	1.947676
10.		1.986307
1436.		<u>1.577981281 04</u>
INTEGRATEUR		110.000000
CTE No. 1		14.334365
103472.		1.817045973 04
CTE No. 2		1.818898624 04
101468.		14.382485
?		14.574601
2.*		<u>1.816581930 04</u>
CALIB. MOY.		300.000000
0.0101436		39.093722
ECART MOY.		2.025429209 04
6.		2.026641035 04
		39.169162
		39.368762
		<u>2.024971198 04</u>
		HC= OER
		-0.478082
		0.479463
		-0.478389
		0.480077
		-0.478235
		0.479924
		<u>0.479028</u>

5. Résultats obtenus

5.1 Reproductibilité de la mesure B = f(H)

La stabilité des mesures de la courbe B = f(H) dépend de la valeur du champ choisi. Plutôt que de faire un développement mathématique de la précision des différentes mesures, nous allons montrer les courbes obtenues en fonction du temps pour les mesures d'un même échantillon de référence.

Sur une période de deux ans la reproductibilité moyenne ($\bar{\epsilon}$) de la valeur absolue de B est la suivante :

H Oe = 0,5	$\bar{\epsilon} = \pm 2 \cdot 10^{-3}$	sur B = 3570 G
	$\epsilon_{\max} = \pm 4 \cdot 10^{-3}$	
<hr/>		
H Oe = 15	$\bar{\epsilon} = \pm 2 \cdot 10^{-4}$	sur B = 15800 G
	$\epsilon_{\max} = \pm 4 \cdot 10^{-4}$	
<hr/>		
H Oe = 110	$\bar{\epsilon} = \pm 2 \cdot 10^{-4}$	sur B = 18000 G
	$\epsilon_{\max} = \pm 3 \cdot 10^{-4}$	
<hr/>		
H Oe = 300	$\bar{\epsilon} = \pm 1,5 \cdot 10^{-4}$	sur B = 20000 G
	$\epsilon_{\max} = \pm 3 \cdot 10^{-4}$	
<hr/>		

Le voltmètre digital (HP 3480 B) utilisé a une précision de $\pm 10^{-4}$ de la lecture + 10^{-4} du maximum de la gamme, soit dans le meilleur des cas la précision est de $\pm 2 \cdot 10^{-4}$. La tension mesurée n'est pas toujours au maximum de la gamme utilisée. C'est le cas de la mesure pour H = 0,5 Oe, qui correspond en plus à une perméabilité très élevée et entraîne une plus grande imprécision sur B. Voir les courbes ci-jointes C₁, C₂, C₃ et C₄.

La reproductibilité des résultats se trouve dans la gamme de précision du voltmètre digital. Le reste de l'équipement a donc une stabilité de l'ordre de 10^{-4} .

5.2 Précision de la mesure $B = f(H)$

La précision absolue dépend du niveau de champ magnétique; dans une zone de perméabilité très grande la précision est moindre. On ne peut donner une valeur fixe pour la précision mais en général elle est surtout limitée par la précision des mesures mécaniques des échantillons. Elle est de l'ordre de 1 à $1,5 \cdot 10^{-3}$.

5.3 Stabilité de la mesure du champ coercitif

La résolution et la stabilité du champ coercitif sont restées à ± 2 mOe de la valeur absolue trouvée sur l'échantillon de référence pendant deux ans. Voir la courbe ci-jointe C5.

5.4 Stabilité de la constante de temps de l'intégrateur

La constante de temps de l'intégrateur est mesurée régulièrement avec une résolution et une reproductibilité du calibrateur de 10^{-5} ; cela nous a permis d'éviter de stabiliser en température l'intégrateur qui a une dérive de $0,1 \mu V/^{\circ} C$.

La capacité en vieillissant fera apparaître une variation de la constante de temps mais puisque le programme de calcul connaît toujours la vraie valeur il n'y aura pas de variation sur les résultats des mesures (voir la courbe C6).

5.5 Vitesse de mesure

Sur le perméamètre lui-même un échantillon est mesuré complètement en moins de 15 minutes (y compris la démagnétisation). Les impulsions de courant ont une durée de 5 à 6 secondes de façon à avoir un état magnétique très stable de l'échantillon ce qui limite la vitesse de mesure.

Conclusion

Le perméamètre automatique permet de mesurer le champ coercitif avec une résolution et une stabilité de ± 2 mOe.

Les mesures $B = f(H)$ sont faites avec une reproductibilité de quelques 10^{-4} , sauf dans les zones de très haute perméabilité à 0,5 Oe où la reproductibilité devient égale à $\pm 3 \cdot 10^{-3}$ en valeur absolue.

Par son automaticité les mesures sont rapides et indépendantes de l'opérateur et les résultats des calculs apparaissent immédiatement sur l'imprimante de la calculatrice.

En changeant les programmes de la calculatrice cet équipement peut servir à mesurer de petits aimants par exemple, car il peut délivrer une puissance de 1 kW environ avec un courant de 50 A.

Ce perméamètre automatique doit être considéré comme une petite centrale de mesure qui peut être adaptée à un grand nombre de problèmes simplement en modifiant les programmes.

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord R. Billinge et V. Hatton pour le soutien qu'ils nous ont apporté, M. Chassard, J. Brahy, J. Leroux et C. Simonnot pour leur participation à la construction de cet équipement.

C. Simonnot a en outre fait les mesures de tous les échantillons d'acier du SPS avec cet appareil à l'usine Cockerill à Liège.

Références

1. Henriksen, AR/Int.SG/65-7, Permeameter.
2. Perméamètre avec système de démagnétisation automatique, CERN/ISR/PO/71-27, A. Délizée et J.P. Zanasco.
3. Perméamètre destiné à la mesure des caractéristiques magnétiques des aciers utilisés dans la construction du SPS, Note No. 4, E. Rossa, M. Chassard, C. Simonnot (15.5.1972).

Valeur absolue de
B en Gauss

STABILITE DES MESURES DU
PERMEAMETRE AUTOMATIQUE 300 MA
Echantillon de reference n° 2

20260
20250
20240

Courbe C4

Mesure de B pour H = 300 Oersteds

18170
18160
18150

Courbe C3

Mesure de B pour H = 110 Oersteds

15780
15770
15760

Courbe C2

Mesure de B pour H = 15 Oersteds

3580
3570
3560

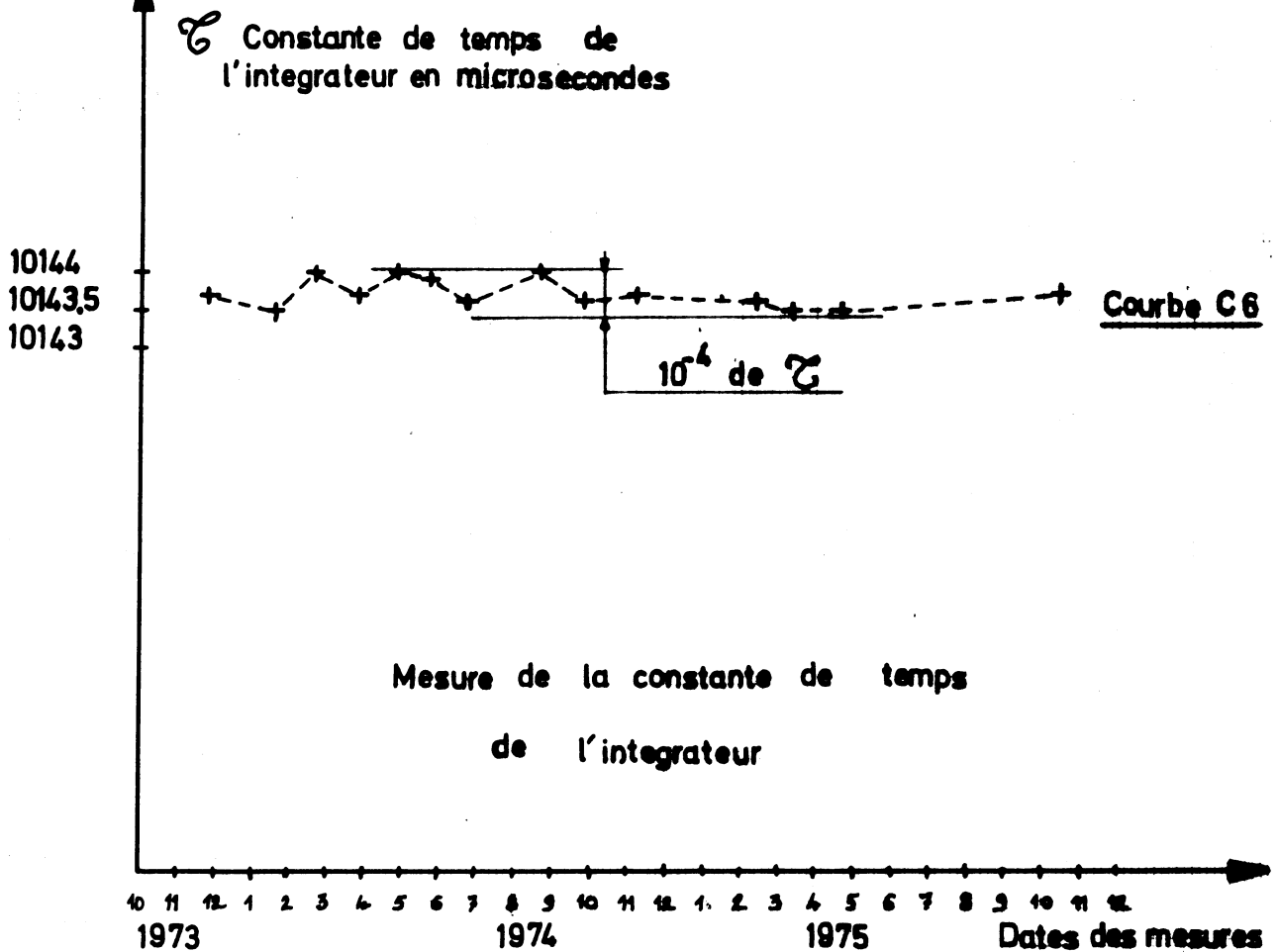
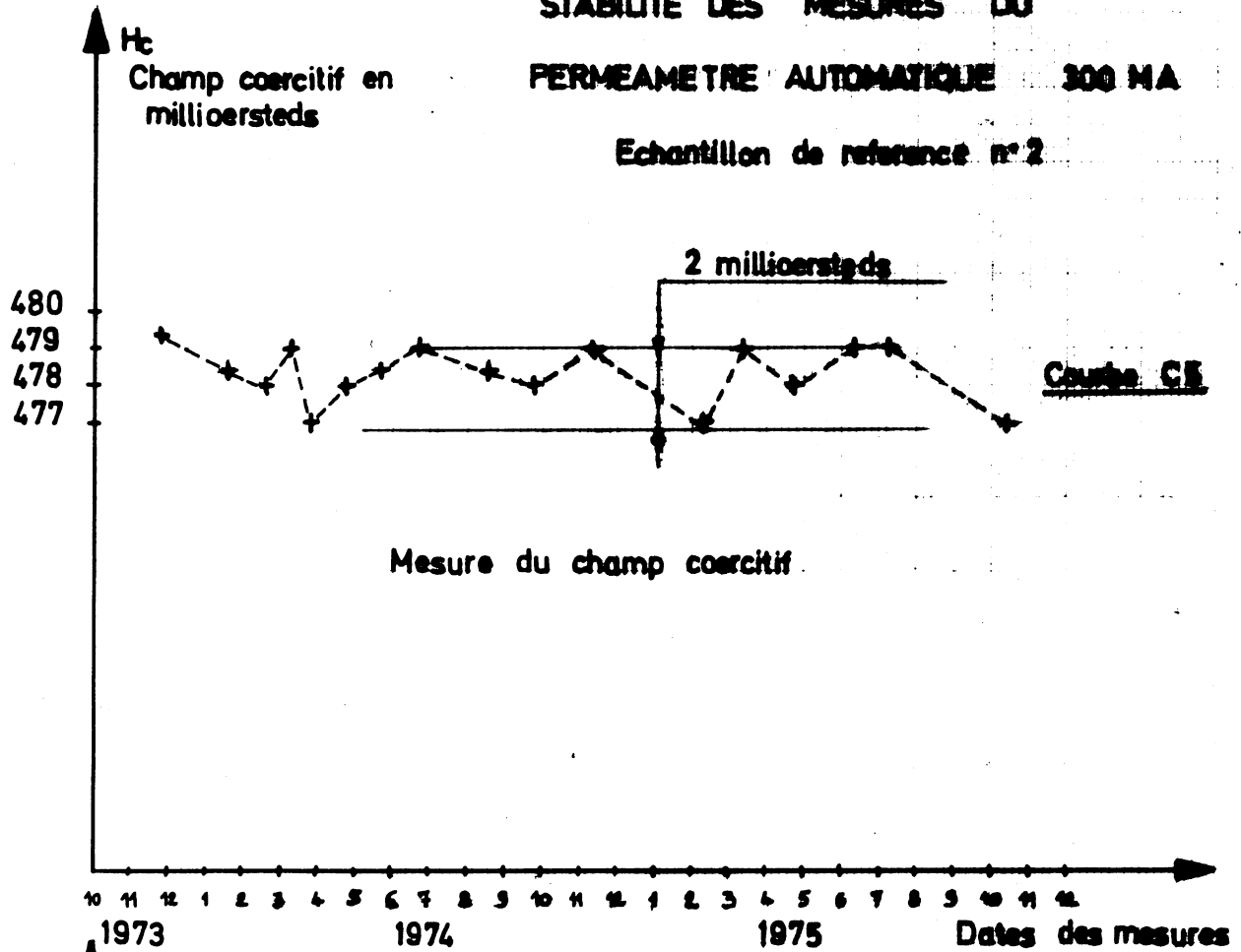
Courbe C1

Mesure de B pour H = 0.5 Oersted

10 11 12 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
1973 1974 1975 Dates des mesures

STABILITE DES MESURES DU
PERMEAMETRE AUTOMATIQUE 300 MA

Echantillon de reference n° 2



Répertoire des commandes d'entrée-sortie
de la calculatrice vers l'équipement

1. vers le convertisseur D/A
mettre 1 à 3 chiffres entiers dans le registre x
polarité + ou -
transfert par le code G.

2. Gammes et shunts
gamme 0.999 shunt 0.5 Ω code K
gamme 9.99 shunt 0.5 Ω code M
gamme 99.9 shunt 0.02 Ω code N.

3. Commutation sur voltmètre digital
shunt code S
intégrateur code U

4. Intégrateur
mesure code V
reset code Y

5. Horloge
comptage code C
arrêt comptage code F

6. Etalonnage
commande départ étalonnage code E
reset compteur code R

7. Commande d'entrée de données
calibration code I arrêt code J
erreur de comptage code L arrêt code a
type de shunt code A arrêt code B
entrée de réserve code H arrêt code P

8. Séquence d'entrée-sortie

F M T

4

1

F M T

.... code K, M, N, etc...

F M T

Répertoire des 'labels' utilisés dans la programmation,
très utiles pour écrire rapidement de nouveaux programmes.

Lab V . Met l'intégrateur sur mesure

Lab
V
F M T
4
1
F M T
V
F M T
S/R

Lab R Fait le reset de l'intégrateur

Lab
R
F M T
4
1
F M T
Y
F M T
S/R

Lab E Etalonnage de la constante de temps Rc

Lab
E
F M T
4
1
F M T
C
E
F M T
S/R

Lab T

Pause T

Lab
T
C N T
P S E
P S E
P S E
P S E
P S E
P S E

.....
S/R

Lab N

Gamme 99,9 shunt 0,02 Ω

Lab
N
F M T
4
1
F M T
N
F M T
S/R

Lab L

Lecture du voltmètre et calcul du courant pour
shunt 0,5 Ω .

Lab
L
F M T
4
.
7
.
6
C N T

Sélectionne le nombre de digit

F M T
3
3
.

Lecture du voltmètre

C N T
U P
0
.
5
D I V
D N
P N T
1
x→()
+

Divise par 0,5 Ω

Print I en ampères

0 stocke la lecture du voltmètre dans $l_i \rightarrow R_i$

↓

x→()

ind

0 stockage des résultats

F M T remet le format normal

4

.

3

.

0

C N T

S/R

Calculs relatifs au perméamètre

Définitions des symboles utilisés :

 N_1 = nombre de spires au primaire N_2 = nombre de spires au secondaire B_F = induction dans le fer B_o = induction dans l'air S_o = surface de la section dans l'air S_f = surface de la section du fer $\tau = Rc$ = constante de temps de l'intégrateur E_o = f e m sans fer E_f = f e m avec fer H_c = champ coercitif1) f e m sans fer

$$E_o = \frac{1}{\tau} \int_{-B_o}^{+B_o} H_2 S_o dB = \frac{1}{Rc} 2N_2 S_o B_o = \frac{2N_2}{Rc} S_o B_o$$

2) f e m avec fer

$$E_f = \frac{1}{\tau} \int_{-B_o}^{+B_o} N_2 (S_o - S_f) dB_o + \frac{1}{\tau} \int_{-B_o}^{+B_o} N_2 S_f dB_f$$

$$= \frac{2N_2}{Rc} S_o B_o - \frac{2N_2}{Rc} S_f B_o + \frac{2N_2}{Rc} S_f B_f$$

$$= E_o - \frac{2N_2}{Rc} S_f \mu_o H + \frac{2N_2}{Rc} S_f B_f$$

$E_f = E_o - \frac{2N_2}{Rc} S_f \mu_o H + \frac{2N_2}{Rc} S_f B_f$

3) Calcul de B_f, H, H_c

$$\frac{2N_2 S_f}{R_c} B_f = E_f - E_o + \frac{2N_2 S_f}{R_c} \mu_o H$$

$$B_f = E_f \frac{R_c}{2N_2 S_f} - E_o \frac{R_c}{2N_2 S_f} + \mu_o H$$

Posons

$K_1 = \mu_o \frac{H}{I} \quad ; \quad K_2 = \frac{R_c}{2N_2 S_f}$
--

$$K_3 = \frac{1}{I} (E_o \frac{R_c}{2N_2 S_f} - \mu_o H)$$

$$= \frac{E_o}{I} \frac{R_c}{2N_2 S_f} - \mu_o \frac{H}{I}$$

$K_3 = \frac{E_o}{I} K_2 - K_1$
$B_{fer} = E_{fer} K_2 - I K_3$
$H = K_1 I$

d'où

4) Calcul des coefficients

$$H = \frac{N_1 I}{L} \quad K_1 = \frac{N_1}{L}$$

où L = longueur magnétique moyenne de l'échantillon,

$$H_{moyen} = \frac{1}{R_{ex} - R_{int}} \int_{R_{int}}^{R_{ext}} \frac{N_1 I}{2\pi r} dr = \frac{N_1 I}{2\pi} \frac{\text{Log } R_{ex} - \text{Log } R_{int}}{R_{ex} - R_{int}}$$

$$L = 2\pi \frac{R_{ext} - R_{int}}{\text{Log } \frac{R_{ex}}{R_{int}}}$$

$$K_1 = \frac{N_1 \text{Log} \frac{R_{ex}}{R_{int}}}{2\pi(R_{ex} - R_{int})} \frac{4\pi}{10}$$

$$K_2 = \frac{Rc}{2N_2 S_f} = \frac{Rc}{2N_2} \frac{\pi(R_{int} + R_{ex})}{v}$$

$$K_2 = \frac{Rc}{2N_2} \frac{R_{int} + R_{ex}}{v} 10^8 \text{ Gauss/V}$$

$$K_3 = \left(\frac{E_o}{I} K_2 \right) - K_1$$

K_1 en Oe/A
R en cm

K_2 = Gauss/V
 R_{int} = cm
 R_{ex} = cm
 v = cm³
Rc = secondes

Résumé des calculs

$$H = K_1 I \quad B = K_2 E - K_3 I$$

$$K_1 = \frac{N_1 \text{Log} \frac{R_{ex}}{R_{int}}}{2\pi R_{ex} - R_{int}} \frac{4\pi}{10}$$

$$K_2 = \frac{Rc}{2N_2} \frac{R_{int} + R_{ex}}{v} 10^8$$

$$K_3 = \left(\frac{E_o}{I} K_2 \right) - K_1$$

H = oersted

I = ampères

B = gauss

E_o = volts

R_{ex} , R_{int} = cm

$\tau = Rc =$ secondes

v = volume de l'échantillon en cm³

Pendant la production d'acier à l'usine Cockerill, nous avons déterminé le volume v à partir de la masse de l'échantillon en prenant une densité constante des anneaux et en pesant les anneaux.

1. Vue d'ensemble de l'appareillage.
2. Schéma du calibrateur-intégrateur.
3. Schéma du générateur de courant.

Figure 1

