



HAL
open science

Etude d'une application de l'effet Hall à la réalisation d'éléments de circuits logiques

Jacques Vermot-Gaud

► **To cite this version:**

Jacques Vermot-Gaud. Etude d'une application de l'effet Hall à la réalisation d'éléments de circuits logiques. Modélisation et simulation. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 1959. Français. NNT : . tel-00277341

HAL Id: tel-00277341

<https://theses.hal.science/tel-00277341>

Submitted on 6 May 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre :

T H E S E S

présentées

A LA FACULTE DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITE DE GRENOBLE

pour obtenir le grade d'Ingénieur-Docteur

par

Jacques VERMOT-GAUD

Ingénieur IRG

1ère THESE

ETUDE D'UNE APPLICATION DE L'EFFET HALL
A LA REALISATION D'ELEMENTS DE CIRCUITS LOGIQUES

2ème THESE

COMMANDE NUMERIQUE DES MACHINES-OUTILS

Soutenues, le janvier 1959, devant la Commission d'Examen

Jury

MM. L. NEEL

Président

J. BENOIT)

R. PERRET) Examineurs

J. MOUSSIEGT)

THÈSES

présentées

**A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE**

pour obtenir le grade d'Ingénieur - Docteur

par

Jacques VERMOT-GAUD

Ingénieur I. R. G.

1^{re} THÈSE

**Étude d'une application de l'effet Hall
à la réalisation d'éléments de circuits logiques.**

2^{me} THÈSE

Commande numérique des machines-outils

Soutenues le 28 Janvier 1959, devant la Commission d'Examen

JURY :

MM. L. NÉEL : *Président*

J. BENOIT

R. PERRET

J. MOUSSIEGT

} *Examineurs*

INTRODUCTION

L'effet Hall fait correspondre à une induction magnétique et à un courant électrique, une force électromotrice proportionnelle au produit de ces deux grandeurs [2] [3]. C'est pourquoi, il a reçu de nombreuses applications dans le domaine des mesures de champ magnétique et de puissance, ainsi que dans celui des machines à calculer analogiques, où il est employé comme multiplieur [7] [10] [11].

Notre travail a porté sur l'étude des possibilités d'utilisation de ce phénomène dans les machines à calculer numériques et dans les automatismes à séquences, où le fonctionnement repose essentiellement sur la manipulation d'impulsions.

Le premier chapitre de cette étude est consacré à des rappels sur l'effet Hall, et le suivant à la description du dispositif envisagé pour son application dans les circuits logiques. Dans les chapitres III et IV, nous étudions des points de vue théorique puis pratique, l'énergie mise en jeu dans ce dispositif en fonction des paramètres géométriques et électriques qui le caractérisent. Le chapitre V traite des procédés technologiques utilisés pour la réalisation d'un appareil conforme aux conclusions des chapitres précédents. Enfin, le chapitre VI donne les résultats des études expérimentales effectuées en impulsions sur les appareils réalisés avec les méthodes du chapitre V.

DOYEN : M. MORET, Correspondant de l'Institut,

PROFESSEURS : MM. MORET, Géologie et Minéralogie, Correspondant de l'Institut
ANDRIEUX, Chimie, Correspondant de l'Institut
NEEL, Physique Expérimentale, Membre de l'Institut
PARDE, Hydrologie fluviale,
DORIER, Zoologie
HEILMANN, Chimie
KRAVTCHENKO, Mécanique Rationnelle
BENOIT, Radioélectricité
CHENE, Chimie Papetière
NOBECOURT, Micrographie Papetière
WEIL, Physique,
FELICI, Physique,
KUNTZMANN, Analyse Appliquée
DODERO, Electrochimie et Electrométallurgie
BARBIER, Géologie Appliquée
SANTON, Mécanique des Fluides
OZENDA, Botanique
CHABAUTY, Calcul différentiel et intégral,
FALLOT, Physique,
GALVANI, Mathématiques,
TRAYNARD, Chimie,
SOUTIF, Physique,

PROFESSEURS

sans CHAIRE

MM. REULOS, Physique,
SILBER, Mécanique des Fluides,
Mle. LUTZ, Mathématiques,
REEB, Mathématiques,
GALLISSOT, Mécanique,

MAITRES de

CONFERENCES

MM. CRAYA, Mécanique, Physique
AYANT, Physique,
MICHEL, Géologie,
MOUSSIEGT, Electrotechnique,
BONNIER, Chimie
BOUCHEZ, Physique Nucléaire,
PILLET, Electrotechnique
LLIBOUTRY, Physique,
BARBIER J. C., Physique,
BLAMBERT, Calcul numérique,
VAILLANT, Zoologie
PAUTHENET, Electrotechnique,
DREYFUS, Thermodynamique,

Mle. NAIM, Mathématiques,
BUYLE-BODIN, Electronique,
PERRET, Servomécanismes,
DEPASSEL, Mécanique,
Mme SOUTIF, Physique,
DEBELMAS, Géologie,
Mme KOFLER, Botanique,
COHEN, Physique,
Mme BARBIER, Electrochimie
BRISSONNEAU, Physique
VAUQUOIS, Mathématiques Appliquées

SECRETARIAT PRINCIPAL : M. BURNET

SECRETAIRE : M. BICHET

CHAPITRE I

GENERATEUR A EFFET HALL

I. 1 - Effet Hall

L'effet Hall, découvert en 1879 [1], n'a été expliqué complètement que ces dernières années.

L'étude approfondie de cet effet entre dans le cadre des théories modernes de la physique du solide, et plus particulièrement de l'action simultanée d'un champ électrique et magnétique sur un solide homogène ou non [2] [3].

L'effet Hall peut aussi être relié directement aux lois générales de l'induction électromagnétique [4] et, dans le domaine des micro-ondes, à la pression de radiation [5].

Il est cependant possible de le mettre en évidence de façon plus simple [6] en étudiant l'action d'une induction magnétique sur le courant électrique.

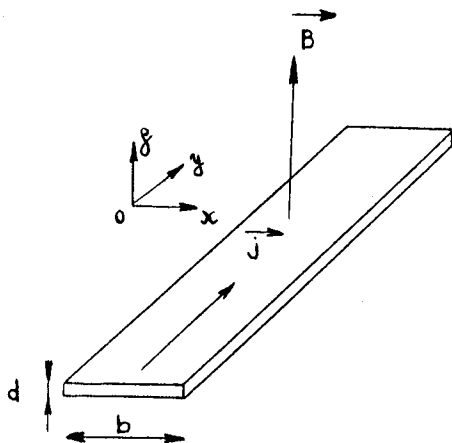


Figure 1

Considérons en effet, un ruban conducteur (fig. 1) contenant une densité cubique d'électrons de conduction : n , et, parcouru longitudinalement par une densité de courant \vec{j} , la vitesse moyenne des électrons de conduction dans la direction oy étant \vec{v} .

La charge contenue dans un élément de volume (Δp) est : $ne(\Delta p)$, e étant la charge d'un électron.

L'induction magnétique B produit sur les charges mobiles contenues dans (Δp) une force :

$$\begin{aligned} \vec{F} &= ne (\Delta p) \cdot \vec{v} \wedge \vec{B} \quad \text{ou} \\ \vec{F} &= \vec{j} \wedge \vec{B} (\Delta p) \end{aligned}$$

Cette force modifie de façon transitoire le mouvement des charges mobiles, de sorte qu'une accumulation de charges apparaît sur un des bords du ruban, tandis qu'un excès de charges de signe contraire prend naissance sur l'autre bord. Le champ électrique \vec{E} créé par ces charges exerce sur les électrons contenus dans (Δp) une force :

$$\vec{F}' = ne (\Delta p) \vec{E}$$

L'état d'équilibre est atteint lorsque : $\vec{F}' + \vec{F} = 0$

$$\text{Finalement : } \vec{E} = - \frac{1}{ne} \cdot \vec{j} \wedge \vec{B}$$

Si I est le courant total qui traverse le ruban, on peut écrire la relation scalaire : $I = b \cdot d \cdot j$

D'autre part, la f. e. m. de Hall qui apparaît entre les 2 bords du ruban est :

$$V_h = E \cdot b$$

L'expression finale de la f. e. m. de Hall est donc :

$$V_h = R_h \cdot \frac{IB}{d} \quad (1)$$

où $R_h = - \frac{1}{ne}$ est la constante de Hall du matériau constituant le ruban.

Si on exprime V_h en volts, R_h en $\text{cm}^3/\text{coulomb}$, B en gauss, d en cm et I en ampères, la formule (1) s'écrit :

$$V_h = 10^{-8} R_h \cdot \frac{IB}{d} \quad (2)$$

Dans le cas des matériaux bons conducteurs, la constante de Hall est extrêmement faible à cause de la forte valeur de la concentration en électrons de conduction. Par contre les semi-conducteurs se caractérisent par une densité de porteurs de charges beaucoup plus faible, c'est pourquoi ils présentent un effet Hall plus marqué.

1.2 - Effet Hall dans les semi-conducteurs

Dans certains semi-conducteurs, on observe un effet Hall de signe contraire à celui qui résulte de la simple action d'une induction magnétique sur des électrons en mouvement. Ces corps se comportent donc comme s'ils contenaient des charges positives de même valeur absolue que l'électron. Ce sont des semi-conducteurs de type p, c'est à dire dans lesquels les impuretés sont

constituées d'atomes comportant moins de 4 électrons de valence. Dans ce cas la constante de Hall est :

$$R_h = \frac{1}{pe} \quad p \text{ étant la densité cubique de porteur de charges positives}$$

alors que pour les semi-conducteurs de type n, elle est : $R_h = -\frac{1}{ne}$

La théorie approfondie de l'effet Hall [2] [3] conduit à modifier l'expression de ces constantes, qui devient alors :

$$R_h = -\frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{ne} \quad \text{ou} \quad R_h = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{pe}$$

Si les 2 types de porteurs de charges sont présents dans le semi-conducteur, la constante de Hall est :

$$R_h = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{p - nb^2}{e(p + nb)^2}$$

expression dans laquelle b est le rapport $\frac{\mu_n}{\mu_p}$ des mobilités des porteurs de charges de type n et de type p. Mais il suffit que b soit grand pour que tout se passe comme si le semi-conducteur était seulement de type n.

I.3 - Générateur à effet Hall

Un générateur à effet Hall est constitué, en principe, d'une plaquette de semi-conducteur sur laquelle sont connectées 4 électrodes (fig. 2). Deux électrodes, par exemple I et I, sont utilisées pour l'excitation en courant du générateur. Les 2 autres donnent la tension de Hall qui apparaît lorsque le générateur est soumis à une induction magnétique.

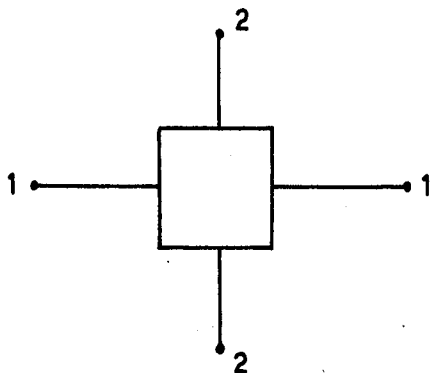


Figure 2

Pour une induction donnée, le générateur se comporte comme un quadripôle passif caractérisé par les 2 relations :

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= Z_{11} I_1 + Z_{12} I_2 \\ V_2 &= Z_{21} I_1 + Z_{22} I_2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Z_{11} , Z_{22} , Z_{12} et Z_{21} sont des résistances dépendant de l'induction magnétique B à laquelle est soumis le générateur.

Lorsque $B = 0$, on a : $Z_{12} = Z_{21} = Z_0$.

Mais si B est différent de zéro, on a :

$$Z_{12} = Z_0 + Z_t \quad \text{et} \quad Z_{21} = Z_0 - Z_t$$

(Z_0 dépend de la position des électrodes. Si celles-ci sont symétriques, on a $Z_0 = 0$).

Z_t est l'impédance de transfert de Hall. Sa valeur, déduite de la formule (2) est :

$$Z_t = \frac{V_h}{I} = 10^{-8} \frac{R_h B}{d} \quad (4)$$

Les applications du générateur de Hall sont nombreuses [7] . Il permet de faire des mesures de champ magnétique et de puissance. En l'associant à un circuit magnétique, il est possible de réaliser un amplificateur de puissance. D'autre part, en utilisant les propriétés de gyrateur de l'effet Hall, on peut aussi constituer un système de transmission de puissance unidirectionnelle [8] [9]

La tension de Hall est proportionnelle au produit du courant d'excitation par l'induction magnétique. Ce fait a permis la réalisation de multiplieurs analogiques [10]

L'application, dont nous avons poursuivi l'étude, est basée en partie sur cette propriété.

CHAPITRE II

PRINCIPE DE L'APPLICATION DE L'EFFET HALL A LA REALISATION D'ELEMENTS DE CIRCUITS LOGIQUES

II.1 - Généralités

Les circuits logiques ont des champs d'application extrêmement variés, et sont utilisés dans tout ce qui touche à la manipulation d'information : opérations arithmétiques, mémoire, régénération, etc... Ils sont appelés à fonctionner dans un domaine de fréquences pouvant s'étendre de 0 à 1 ou 10 mégacycles. Les fréquences basses correspondent, par exemple, à tous les circuits à relais. Quant aux fréquences élevées, on les recherche principalement pour accroître la rapidité de calcul des grandes machines numériques modernes.

Les circuits logiques doivent aussi répondre à d'autres exigences. En effet, il est nécessaire que les énergies mises en jeu et le volume des différents éléments constitutifs soient aussi faibles que possible.

Nous ne pouvons, naturellement, espérer satisfaire toutes ces conditions. Nous nous sommes cependant, efforcés de répondre au plus grand nombre d'entre elles. Pour cela, nous avons cherché les caractéristiques optimales permettant d'atteindre les meilleures performances, tant au point de vue fonctionnement en impulsions, qu'au point de vue des énergies mises en jeu et des dimensions géométriques.

II.2 - Dispositif envisagé : ensemble à effet Hall

L'idée de base est de mettre à profit, en les associant, les propriétés d'un circuit magnétique rémanent et d'un générateur à effet Hall.

Le dispositif envisagé pour l'application de l'effet Hall dans les circuits logiques sera donc essentiellement constitué d'un générateur à effet Hall placé dans l'entrefer d'un circuit magnétique rémanent muni d'une bobine de commande (fig. 3).

Cette association constitue un "ensemble à effet Hall".

Le générateur est une plaquette rectangulaire munie de 2 électrodes longitudinales et de 2 électrodes transversales. Les électrodes longitudinales (1, 1) sont soudées sur toute la largeur de la plaquette, tandis que les électrodes transversales (2, 2) sont soudées ponctuellement.

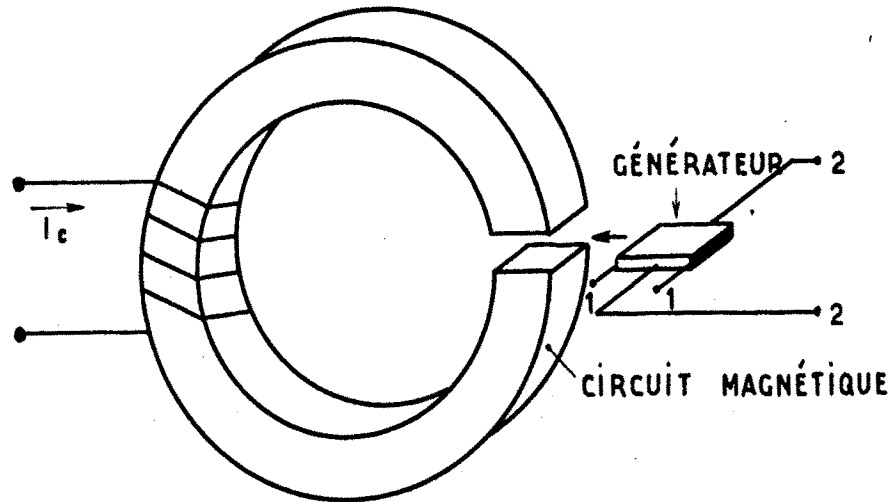


Figure 3 : Ensemble à effet Hall

Afin de rendre les notations plus claires, nous affecterons chacune des grandeurs caractérisant l'ensemble d'indices spéciaux :

- c pour la bobine de commande
- 1 ou e (excitation) pour les électrodes longitudinales
- 2 ou s (sortie) pour les électrodes transversales

II.3 - Principe de fonctionnement de l'ensemble à effet Hall

Des relations (3) on peut tirer les expressions des tensions de Hall :

$$V_1 = Z_{12} I_2 \text{ pour } I_1 = 0 \quad \text{et} \quad V_2 = - Z_{12} I_1 \text{ pour } I_2 = 0$$

valables dans le cas où $Z_{21} = - Z_{12}$ ($Z_0 = 0$)

Comme Z_{12} a le même signe que l'induction on aura plus précisément :

$$B > 0 \quad \begin{cases} V_1 = Z_{12} I_2 \\ V_2 = - Z_{12} I_1 \end{cases} \quad B < 0 \quad \begin{cases} V_1 = - Z_{12} I_2 \\ V_2 = Z_{12} I_1 \end{cases}$$

On voit que le générateur de Hall fournit une tension dont le signe est celui de B et que, d'autre part, la forme de cette tension est la même que celle du courant d'excitation. C'est ce caractère fondamental qui donne tout son intérêt à l'association :

circuit magnétique rémanent + générateur à effet Hall

Supposons, en effet, que le circuit magnétique ne puisse prendre que 2 états inductifs : $+ B_r$ et $- B_r$, déterminés par les courants de commande : $+ I_c$ et $- I_c$.

A ces deux valeurs de l'induction correspondent les deux valeurs particulières de l'impédance de transfert : $+ Z_t$ et $- Z_t$.

Le fonctionnement est alors le suivant :

- si une impulsion de courant $+ I_c$ est envoyée dans l'enroulement de commande, on a : $V_2 = Z_t I_1$

- si, au contraire, l'impulsion de courant est $- I_c$, on a : $V_2 = - Z_t I_1$

D'autre part, en polarisant convenablement le circuit de sortie du générateur de Hall, on peut faire correspondre à $+ I_c$ la relation : $V_2 = +2Z_t I_1$

et à $- I_c$ la relation : $V_2 = 0 I_1$

En conclusion, il sera donc possible :

1°) d'enregistrer une information de commande I_c dans le circuit magnétique et de la lire par l'intermédiaire du signal de sortie V_2 sans l'effacer, et cela, à un instant et sous une forme déterminés par le courant d'excitation I_1 (l'information I_c pouvant être dégénérée).

2°) de régénérer une information, puisque la tension de sortie V_2 a une forme uniquement déterminée par I_1 .

3°) de réaliser les opérations données dans les tableaux I, et celles du tableau II, si le générateur est correctement polarisé.

I_c	I_1	V_2
+ 1	+ 1	+ 1
+ 1	- 1	- 1
- 1	+ 1	- 1
- 1	- 1	+ 1

Tableau I

I_c	I_1	V_2
+ 1	± 1	± 1
+ 1	0	0
- 1	± 1	0
- 1	0	0

Tableau II

Ces différentes possibilités constituent la base des applications de l'ensemble à effet Hall. Cependant, en disposant plusieurs enroulements de commande, il est possible d'accroître la capacité de l'ensemble. Ces enroulements permettent, en effet, de réaliser une opération logique qui, combinée à celles qui sont indiquées dans les tableaux I et II, conduit à la plupart des opérations logiques classiques.

CHAPITRE III

ETUDE THEORIQUE DE L'ENSEMBLE A EFFET HALL

III. 1 - Généralités.

Cette étude a pour but de déterminer les conditions théoriques d'optimisation d'un ensemble à effet Hall. Notre travail portera essentiellement sur les énergies mises en jeu.

Nous commencerons par dénombrer les différents paramètres régissant le dispositif. Ensuite, après avoir fait des hypothèses simplificatrices, nous aborderons l'étude de l'énergie disponible à la sortie du générateur de Hall, puis celle qui est nécessaire à la commande du circuit magnétique.

Enfin, la comparaison de ces deux énergies nous permettra de préciser l'influence des différents paramètres sur les performances du dispositif.

III. 2 - Description des paramètres caractérisant l'ensemble à effet Hall.

L'ensemble à étudier se compose essentiellement d'un circuit magnétique coupé par un entrefer, dans lequel se trouve une plaquette de semi-conducteur montée en générateur de Hall.

Les paramètres caractérisant cet ensemble peuvent être classés en 2 groupes :

1°) Dimensions géométriques. Il faut essentiellement considérer :

- la longueur totale du circuit magnétique
- la longueur de matériau magnétique
- la longueur de l'entrefer
- la section de matériau magnétique
- l'épaisseur du générateur de Hall
- la surface du générateur

2°) Paramètres électriques et magnétiques :

- Circuit magnétique :

- Type de matériau magnétique
- Forme du cycle d'hystérésis
- Valeur du champ coercitif pour une induction maximum donnée
- Valeur de l'induction rémanente correspondante.
- Bobine de commande : nombre de spires et résistance.

- Générateur à effet Hall :

- Le type de semi-conducteur
- Le coefficient de Hall

III.3 - Hypothèses simplificatrices

Comme nous venons de le voir, le nombre des paramètres est élevé. C'est pourquoi, en vue de faciliter l'étude théorique de l'ensemble à effet Hall, nous allons faire quelques hypothèses simplificatrices.

Tout d'abord, nous supposons que le circuit magnétique est de forme toroïdale et que l'entrefer est entièrement occupé par la plaquette constituant le générateur.

D'autre part, nous admettons que le matériau magnétique est un ferrite à cycle d'hystérésis parfaitement rectangulaire.

Dans l'étude énergétique qui va suivre nous négligerons, toujours dans un but de simplification, les pertes ohmiques dues à la résistance de la bobine de commande, les pertes par courants de Foucault et les flux de fuites.

Nous supposerons enfin, que le générateur de Hall est exactement équilibré, c'est à dire que la tension de sortie est nulle en même temps que l'induction.

III.4 - Notations

1°) Tore de ferrite

Longueur moyenne de ferrite : L (cm)
Section de ferrite : $a \cdot b = S$ (cm²)

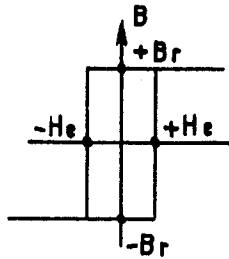
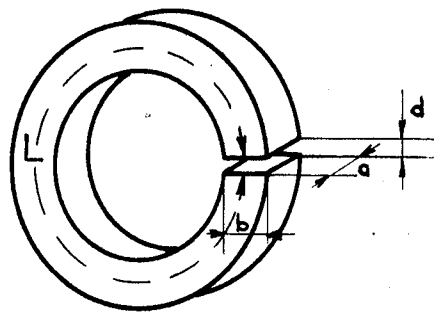


Figure 4

Longueur de l'entrefer : d (cm)

Champ magnétique dans le ferrite : H
(Oersteds)

Induction dans le ferrite : B (Gauss)

Induction dans l'entrefer : B_e (Gauss)

Champ coercitif du ferrite : H_c (Oe)

Induction rémanente : B_r (Gauss)

Energie de commande du tore : E_c
(Joules)

Nombre de spires de la bobine de commande : N

Courant de commande : I_c (Ampère)

2°) Générateur à effet Hall

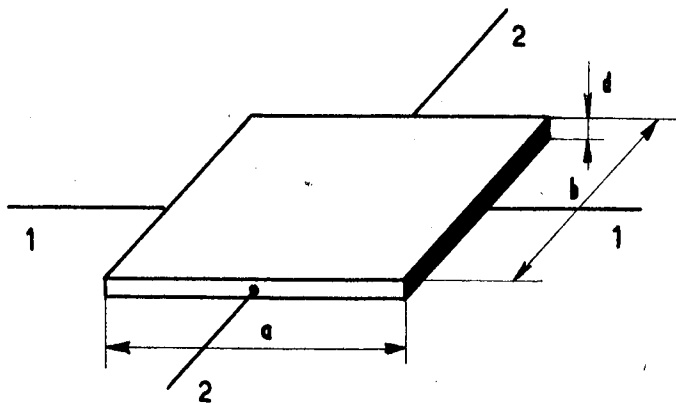


Figure 5

- Dimensions de la plaquette :

largeur : b (cm)

longueur : a (cm)

épaisseur : d (cm)

- Caractéristiques du semi-conducteur :

densité des porteurs de charges : n/cm^3

mobilité des porteurs de charges : μ ($cm^2/volt \cdot sec.$)

conductivité : σ (mhos. cm^{-1})

coefficient de Hall :

R_h ($cm^3/coulomb$)

- Courant passant par une paire d'électrodes : I (Amp)

- Différence de potentiel apparaissant entre les bornes d'une paire d'électrodes : V (volts)

- Puissance mise en jeu : P (watt)

- Energie : E (joules)

- Impédance : Z (Ohm)

On affectera l'indice 1 aux électrodes longitudinales et l'indice 2 aux électrodes transversales telles qu'elles ont été définies précédemment.

De même l'indice e désigne les grandeurs d'excitation et l'indice s les grandeurs de sortie.

III. 5 - Etude énergétique du générateur de Hall.

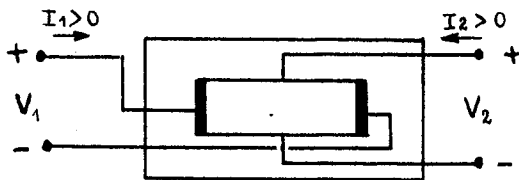


Figure 6

Pour étudier les différentes énergies mises en jeu dans le générateur de Hall, nous nous baserons sur les relations générales (3) :

$$V_1 = Z_{11} I_1 + Z_{12} I_2$$

$$V_2 = Z_{21} I_1 + Z_{22} I_2$$

avec $Z_{12} = Z_0 + Z_t$

et $Z_{21} = Z_0 - Z_t$

De plus, nous adopterons les conventions de signes de la figure 6.

III. 5. 1 - Calcul de la puissance d'excitation

Supposons tout d'abord qu'une impédance de charge Z_{ch} est branchée aux électrodes 2 du générateur.

Un certain courant I_2 passera dans la charge Z_{ch} et on aura, compte tenu des conventions de signes : $V_2 = -Z_{ch} I_2$

Les relations (3) s'écrivent alors :

$$V_1 = Z_{11} I_1 + Z_{12} I_2$$

$$-Z_{ch} I_2 = Z_{21} I_1 + Z_{22} I_2$$

On peut tirer de ces relations la valeur de V_1 en fonction de I_1 . Ensuite, on calcule la puissance d'excitation :

$$P_e = V_1 I_1.$$

$$\text{ou } P_e = \left[\begin{array}{c} Z_{11} - \frac{Z_{21} Z_{12}}{Z_{22} + Z_{ch}} \end{array} \right] I_1^2 \quad (5)$$

III. 5.2 - Calcul de la Puissance de sortie

La puissance de sortie est : $P_s = Z_{ch} I_2^2$, ce qui donne en exprimant I_2 en fonction de I_1 :

$$P_s = Z_{ch} \cdot \frac{Z_{21}^2}{(Z_{22} + Z_{ch})^2} \cdot I_1^2 \quad (6)$$

Cette puissance passe par un maximum, pour $Z_{22} = Z_{ch}$:

$$P_{s \text{ max}} = \frac{Z_{21}^2}{4 Z_{22}} \cdot I_1^2 \quad (7)$$

Etudions, d'autre part le rapport P_s/P_e qui est le rendement η du générateur. On a :

$$\eta = \frac{Z_{21}^2}{(1 + Z_{22} / Z_{ch}) (Z_{11} Z_{ch} + Z_{11} Z_{22} + Z_{21} Z_{12})}$$

Ce rendement passe par un maximum η_{max} pour la valeur particulière de Z_{ch} :

$$Z_{ch} = Z_{22} \left(1 + \frac{Z_{21} Z_{12}}{Z_{11} Z_{22}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Si on donne à Z_{ch} la valeur Z_{22} , η prend une valeur η'_{max} légèrement inférieure à η_{max} :

$$\eta'_{\text{max}} = \frac{Z_{21}^2}{4 Z_{11} Z_{22} + 2 Z_{21} Z_{12}} \quad (8)$$

Mais si l'on admet que Z_{21} et Z_{12} ont une valeur ne dépassant pas 10 à 20 % des valeurs de Z_{11} et Z_{22} , on a pratiquement :

$$\eta'_{\text{max}} = \eta_{\text{max}} = \frac{Z_{21}^2}{4 Z_{11} Z_{22}} \quad (9)$$

Ce résultat montre que le rendement et la puissance de sortie sont maximum simultanément.

Nous avons supposé précédemment que le générateur de Hall était symétrique. Cela implique $Z_0 = 0$, c'est à dire : $Z_{12} = -Z_{21} = Z_t$

Dans ces conditions, le rendement maximum devient :

$$\eta_{\max} = \frac{Z_t^2}{4 Z_{11} Z_{22}} \quad (10)$$

Signalons le cas où $Z_0 = Z_t$. Cela entraîne : $Z_{12} = 2Z_t$ et $Z_{21} = 0$. Le rendement est nul, mais si l'induction change de sens, on a : $Z_{12} = 0$ et $Z_{21} = 2Z_t$. Le rendement maximum est 4 fois plus élevé que dans le cas où $Z_0 = 0$

Dans la suite de l'étude, nous nous ramènerons toujours au cas théorique simple : $Z_0 = 0$, où n'intervient pas une dissymétrie des électrodes transversales.

La puissance de sortie est donc liée à la puissance d'excitation par la relation :

$$P_s = \frac{Z_t^2}{4 Z_{11} Z_{22}} \cdot P_e \quad (11)$$

III. 5. 3 - Valeurs numériques

Les valeurs numériques des impédances Z_{11} , Z_{22} , Z_t sont aisément mesurables.

On atteint la valeur de Z_t indirectement à partir des valeurs des impédances de transfert : Z_{21} et Z_{12} auxquelles est liée Z_t par la relation :

$$Z_t = \frac{1}{2} (Z_{12} - Z_{21})$$

Nous nous bornerons ici à donner les ordres de grandeur des valeurs des impédances Z_{11} , Z_{22} et Z_t . Ces valeurs dépendent essentiellement de la pureté du semi-conducteur, des dimensions géométriques de la plaque constituant le générateur, et, principalement pour Z_t de l'induction magnétique à laquelle est soumis le générateur.

De plus il faut remarquer que Z_{11} et principalement Z_{22} dépendent beaucoup de la qualité des soudures. Z_t en dépend aussi, mais à un moindre degré.

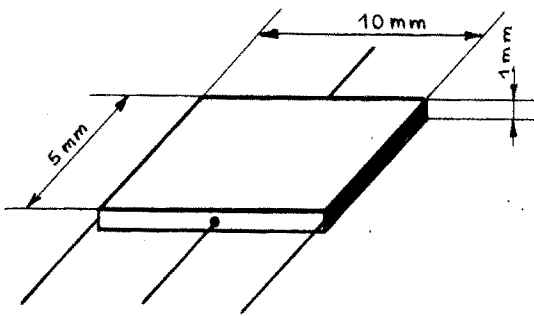


Figure 7

Pour fixer les idées, nous indiquons dans le tableau III, des valeurs calculées concernant des générateurs types (figure 7) constitués d'une plaquette en antimonure d'Indium (In Sb) ayant une longueur de 1 cm, une largeur de 0,5 cm et une épaisseur de 0,1 cm, et possédant des coefficients de Hall de $100 \text{ cm}^3 / \text{Cb}$ et de $500 \text{ cm}^3 / \text{Cb}$. De plus on suppose que ces générateurs sont soumis à une induction de 1000 gauss.

R_h	Z_{11}	Z_{22}	Z_t	max
cm^3 / C_b	Ohm	Ohm	Ohm	%
100	0,1	0,08	0,01	0,31
500	0,25	0,20	0,05	1,25

pour
B = 1 000
Gauss

Tableau III

Les figures 8, 9, et 10 donnent des résultats de mesures sur 2 générateurs : G_1 et G_2 dont les constantes de Hall moyennes sont respectivement :

$$325 \text{ cm}^3 / \text{C}_b \text{ et } 70 \text{ cm}^3 / \text{C}_b .$$

On voit que les variations de Z_{11} et Z_{22} sont assez faibles tant que l'induction ne dépasse pas 1 500 Gauss. D'autre part, on constate que la courbe $Z_t = f(B)$ n'est pas exactement une droite, mais qu'elle présente une légère concavité tournée vers le haut. Cela est dû au fait que les soudures transversales ne sont pas rigoureusement ponctuelles [11]. Quand au rendement η_{max} on voit que, pour les faibles inductions, la concavité de la courbe est tournée vers le haut, tandis que pour les inductions supérieures à 3 000 Gauss, elle est tournée vers le bas. Cela est dû à la variation de la mobilité des porteurs avec l'induction.

La figure 11 montre les variations des coefficients de Hall R_h , déterminés à partir de Z_t , des générateurs G_1 et G_2 . Ces variations s'expliquent de la même façon que la concavité des courbes $Z_t = f(B)$ des figures 8 et 9:

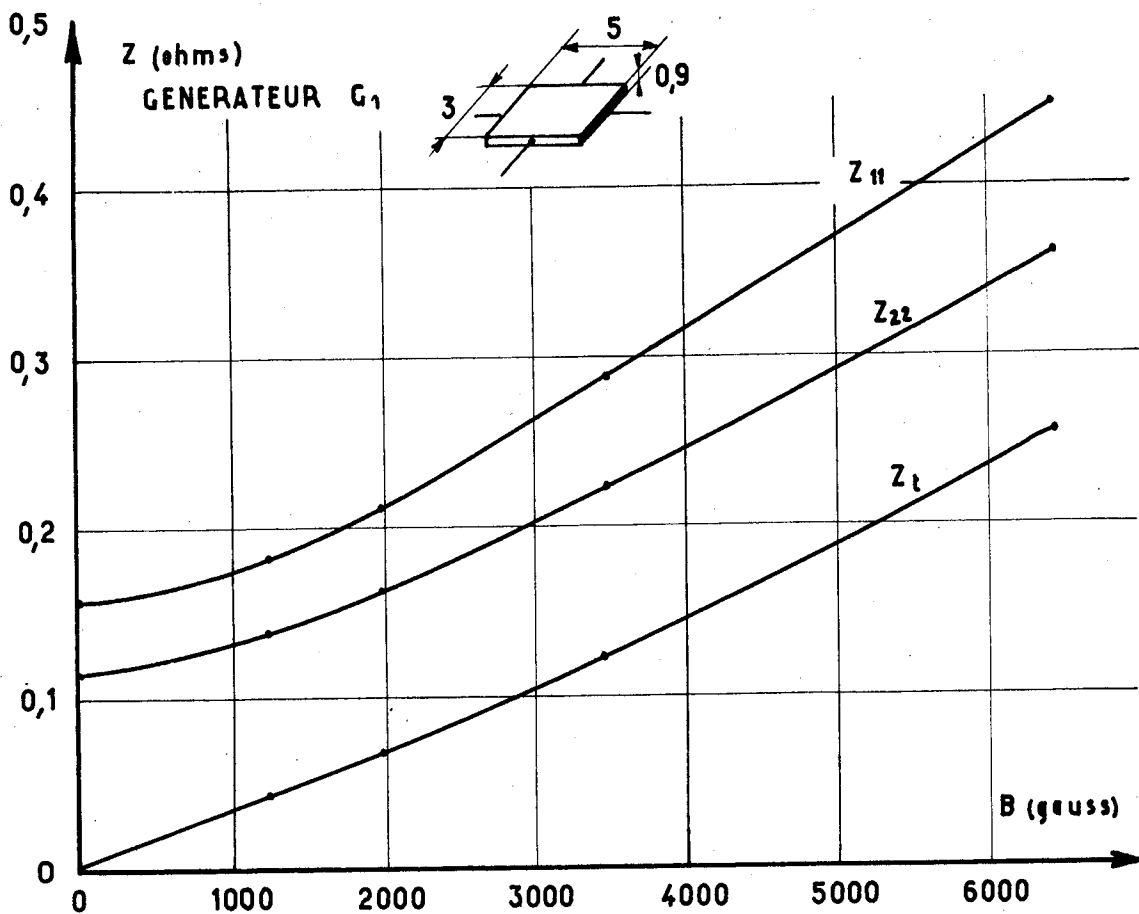


fig. 8

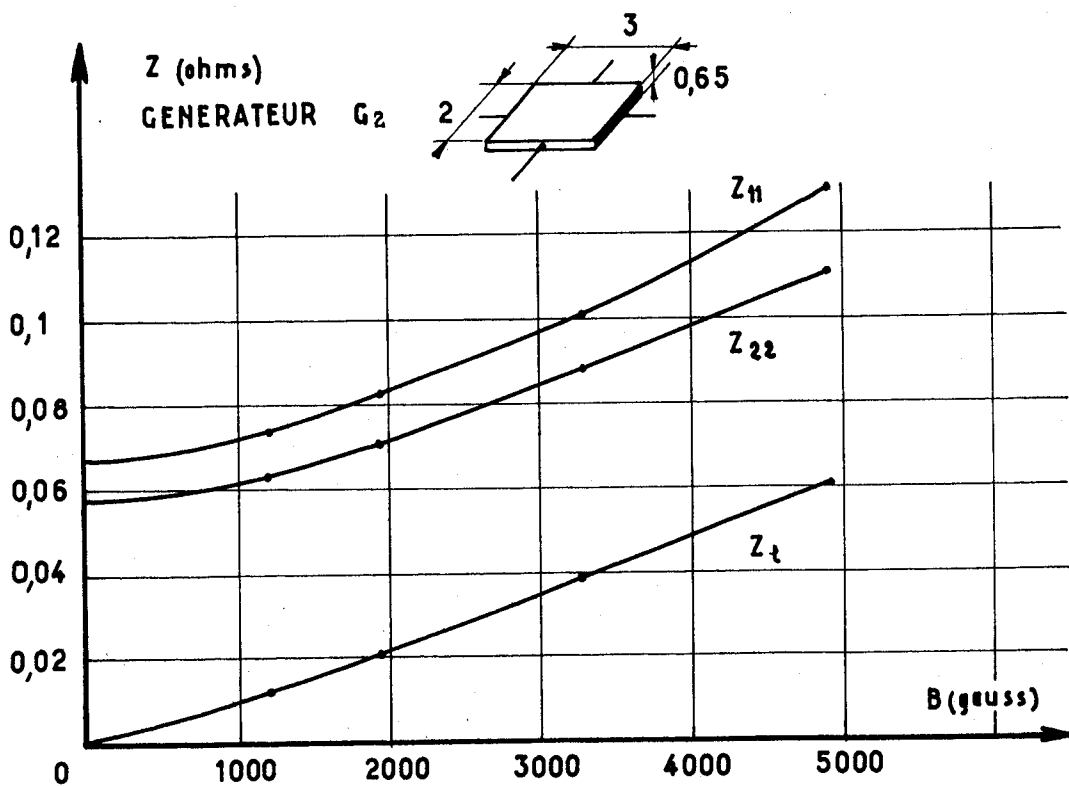


fig. 9

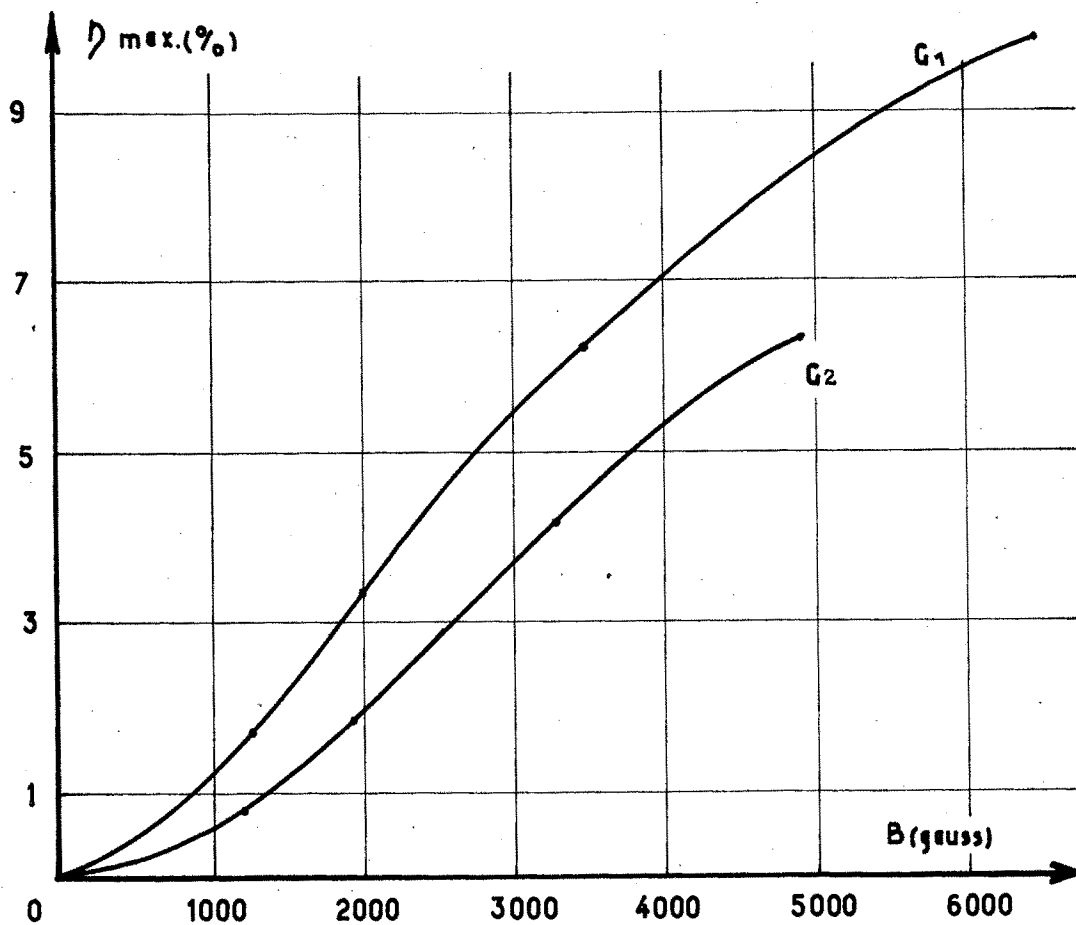


fig. 10

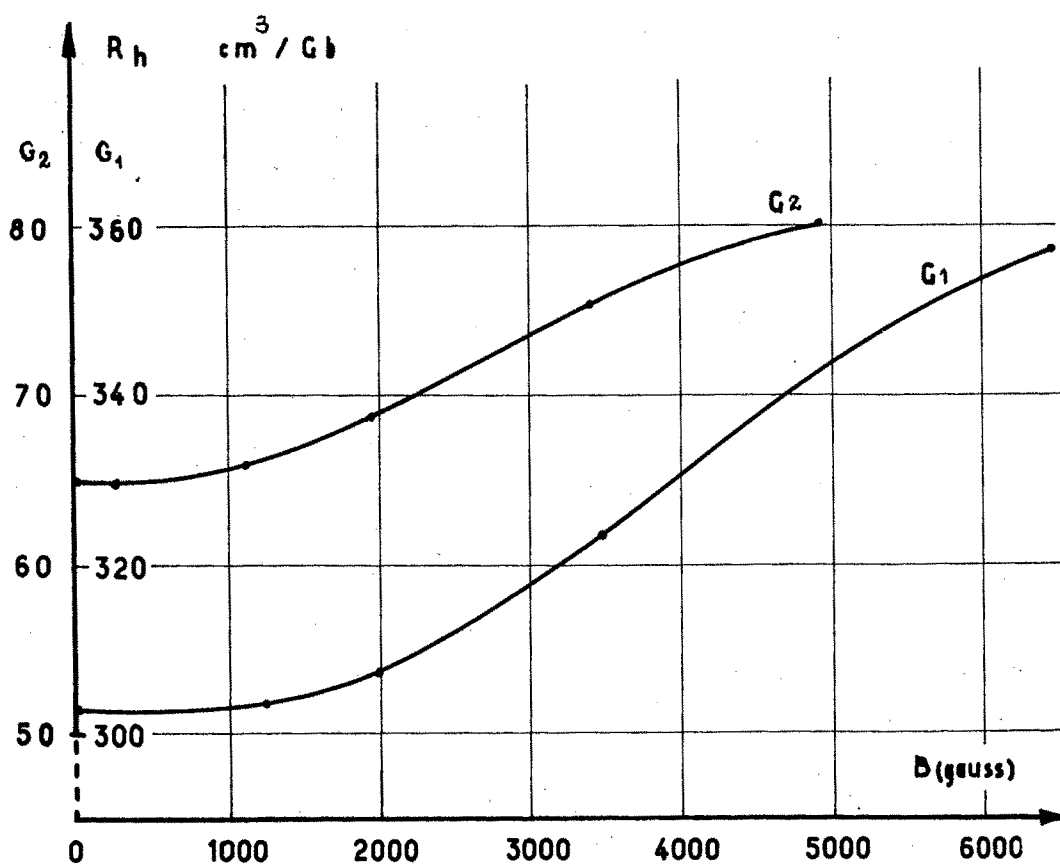


fig. 11

III. 5. 4 - Expression de la puissance de sortie en fonction des caractéristiques physiques du générateur de Hall.

La formule (11) donne la valeur de la puissance de sortie en fonction de la puissance d'excitation dans le cas où le rendement est maximum :

$$P_s = \frac{Z_t^2}{4 Z_{11} Z_{22}} \cdot P_e$$

Nous calculerons Z_t , Z_{11} , et Z_{22} en fonction des dimensions de la plaquette constituant le générateur, de la mobilité des porteurs de charge, de la constante de Hall R_h du semi-conducteur et de l'induction B .

Calcul de Z_t : Z_t est donné par la formule (4) :

$$Z_t = 10^{-8} \frac{R_h B}{d}$$

Calcul de Z_{11} : Exprimons Z_{11} en fonction de la conductivité :

$$Z_{11} = \frac{a}{b d} \cdot \frac{1}{\sigma}$$

On a d'autre part : $\sigma = ne\mu$, ou

$$\sigma = \frac{3\pi}{8} \frac{\mu}{R_h}$$

Donc : $Z_{11} = k \cdot \frac{R_h}{\mu} \cdot \frac{a}{b} \cdot \frac{1}{d}$ en posant

$$k = \frac{8}{3\pi}$$

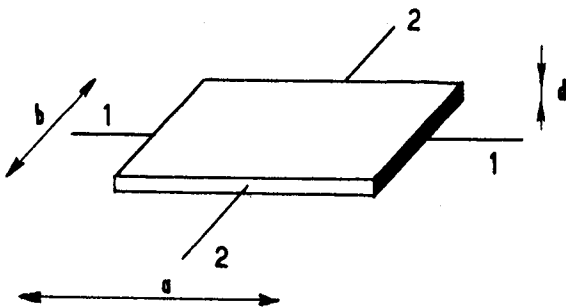


Figure 12

Calcul de Z_{22} : il n'est pas possible d'exprimer simplement Z_{22} . En effet, Z_{22} dépend, non seulement de la qualité du semi-conducteur, mais encore du rapport b/a et de la qualité des soudures.

Comme cela a été fait par ailleurs [12], nous posons dans un but de simplification :

$$Z_{22} = \alpha \cdot \frac{k R_h b}{\mu a d}$$

expression dans laquelle α est un facteur de forme dépendant à la fois du rapport

a/b et de la qualité des soudures transversales. La valeur de α est comprise, en général, entre 1,5 et 4.

Nous pouvons donner maintenant l'expression de la puissance de sortie :

$$P_s = 10^{-16} \frac{\mu^2 B^2}{4 k^2 \alpha} P_e \quad (12)$$

où $k = \frac{8}{3\pi}$

On voit que le rendement d'un générateur de Hall est proportionnel au facteur $(\mu B)^2$. Ce fait a été signalé par différents auteurs [12] [13]. Ce résultat semble montrer que le rendement croît comme B^2 . Cela n'est pas exact, comme on peut s'en rendre compte sur les résultats de la figure 10, parce que la mobilité décroît quand l'induction augmente.

On peut montrer [4] que la limite supérieure absolue du rendement est 25 %.

III.5.5 - Valeurs numériques

Comme précédemment (Tableau III) nous donnerons dans le tableau IV des valeurs numériques à titre d'exemple pour 2 qualités d'Antimoniure d'Indium ($R_h = 100 \text{ cm}^3/C_b$ et $R_h = 500 \text{ cm}^3/C_b$). Ces valeurs, concernant μ et α , ont été calculées à partir des valeurs données dans le tableau III au moyen des formules :

$$\mu = k R_h \sigma \quad \text{et} \quad \alpha = \frac{a^2}{b^2} \cdot \frac{Z_{22}}{Z_{11}}$$

R_h	μ	α
en cm^3/C_b	$\text{cm}^2/\text{volt. sec.}$	
100	$17. 10^3$	3, 2
500	$34. 10^3$	3, 2

Tableau IV

Dans la figure 13 sont groupés les résultats correspondant à ceux des figures 9 et 10. On constate que α est pratiquement constant. D'autre part, on remarque que la mobilité décroît fortement lorsque l'induction augmente. Cela explique l'allure des courbes de rendement de la figure 10.

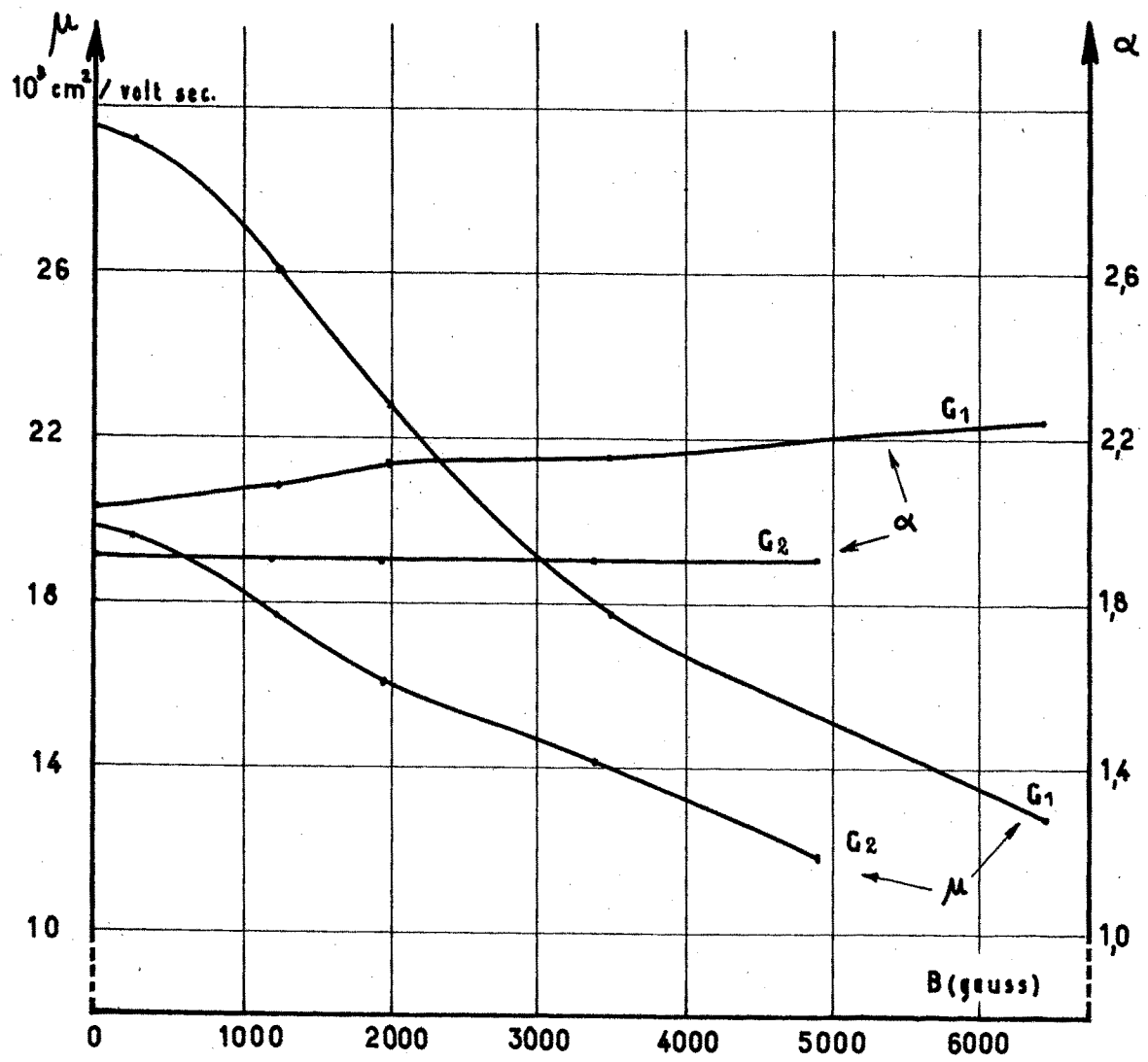


fig.13

III. 5. 6 - Energie délivrée par le générateur à effet Hall

Fonctionnement en impulsions

Le générateur de Hall se prête bien à un fonctionnement impulsif. Son temps de reponse à un échelon est très bref. Nous n'avons pu déceler aucune déformation due au générateur lui-même. Un relais à mercure fournissait un échelon de courant et un oscilloscope, dont le temps de montée propre était 12 millimicroseconde, permettait d'observer la forme de cet échelon du côté excitation et du côté sortie du générateur. Nous n'avons pu déceler aucune différence. Seules les oscillations parasites dues à la self propre des connexions apparaissaient.

Nous avons ainsi mis en évidence des temps de montée de l'ordre de $0,03 \mu$ seconde. Des impulsions de $0,1 \mu$ seconde sont donc parfaitement réalisables à condition de soigner particulièrement bien les connexions.

Supposons, donc, que le générateur fonctionne en impulsions de durée τ

L'énergie de sortie contenue dans une impulsion est :

$$E_s = \int_t^{t+\tau} P_s (dt)$$

P_s étant la puissance instantanée de sortie.

Si P_s est la puissance moyenne de sortie, on a :

$$E_s = P_s / F$$

où F est la fréquence de récurrence.

Remarquons que, P_s étant donnée, on peut obtenir une énergie de sortie E_s d'autant plus grande que la fréquence F est faible. D'autre part, P_s sera d'autant plus élevée que τ sera faible devant la période. Il est donc possible, par un choix judicieux de τ et de F , d'obtenir, dans une certaine limite, une énergie E_s et une puissance instantanée p_s déterminées.

II. 6 - Etude de l'énergie de commande

Les hypothèses simplificatrices faites précédemment permettent de considérer que l'énergie de commande E_c est seulement constituée par l'énergie magnétique à fournir au tore pour que le point de fonctionnement

passer d'un point du cycle d'hystérésis à un point symétrique par rapport à l'origine, par exemple du point A_1 au point A_2 , ou réciproquement. (figure 14)

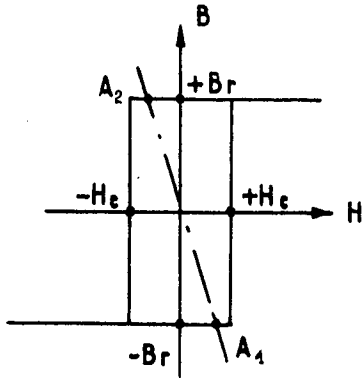


Figure 14

La relation entre le courant de commande I_c et le champ magnétique H existant à l'intérieur du ferrite est :

$$HL + Bd = 4\pi NI_c / 10$$

La quantité d'énergie fournie au tore pendant un temps est :

$$E_c = \int_0^{\tau} e I_c (dt)$$

expression dans laquelle : $e = 10^{-8} \text{ NS} \frac{(dB)}{(dt)}$

Finalement, l'énergie de commande est :

$$E_c = \frac{10^{-7}}{4\pi} S L \int_{A_1}^{A_2} H (dB) + d \int_{A_1}^{A_2} B (dB)$$

La première intégrale correspond à l'énergie électromagnétique d'hystérésis et la seconde à l'énergie électromagnétique localisée dans l'entrefer. Cette dernière intégrale est nulle lorsque l'on passe d'une valeur de l'induction à la valeur opposée. Il ne faut donc fournir que l'énergie :

$$E_c = \frac{10^{-7}}{4\pi} V \int_{A_1}^{A_2} H (dB) \quad (14)$$

où V est le volume de ferrite.

Dans le cas de la figure 14, on a :

$$\int_{A_1}^{A_2} H dB = 2 H_c B_r$$

L'énergie de commande théorique est donc :

$$E_c = \frac{10^{-7}}{2\pi} V H_c B_r \quad (15)$$

III.7 - Comparaison de l'énergie de commande et de l'énergie de sortie

III.7.1 - Indice de qualité d'un ensemble à effet Hall

Etudions le rapport : $g = E_s / E_c$.

E_c est donnée par la formule (15) et E_s par les formules (12) et (13).

$$E_s = 10^{-16} \frac{\mu^2 B_e^2}{4 k^2 \alpha F} \cdot P_e$$

où B_e est l'induction dans l'entrefer du tore.

On peut interpréter la présence de B_e^2 dans l'expression de E_s de la façon suivante : puisque l'énergie localisée sous forme magnétique E_e dans l'entrefer du tore est proportionnelle à B_e^2 , l'énergie de sortie E_s du générateur dépend directement de l'énergie magnétique E_e .

On peut exprimer B_e^2 en fonction de E_e et du volume v de l'entrefer :

$$B_e^2 = 10^7 \cdot 8\pi \cdot \frac{E_e}{v}$$

L'énergie de sortie E_s devient alors :

$$E_s = 10^{-9} \cdot \frac{2\pi}{k^2 \alpha F} \cdot \mu^2 \cdot E_e \cdot \frac{P_e}{v}$$

g peut maintenant s'écrire :

$$g = 10^{-9} \frac{2\pi}{k^2 \alpha F} \cdot \mu^2 \cdot \frac{P_e}{v} \cdot \frac{E_e}{E_c} \quad (16)$$

Etudions le rapport E_e / E_c

E_e est liée au volume V de ferrite par la relation :

$$E_e = \frac{10^{-7}}{8\pi} \cdot BH \cdot V$$

où B et H sont les coordonnées du point de fonctionnement sur le cycle d'hystérésis. D'autre part, l'énergie de commande est, d'après (15) :

$$E_c = 10^{-7} \frac{V}{2\pi} H_c B_r$$

On aura donc :

$$E_e / E_c = \frac{E_c}{4} \cdot \frac{BH}{B_r H_c}$$

Le rapport E_e / E_c sera maximum avec le produit (BH), c'est à dire lorsque :

$$L/d = B_r / H_c \quad (18)$$

On aura en même temps : $BH = B_r H_c$

et finalement :

$$E_e / E_c = 1/4 \quad (19)$$

De (16) et (19) on peut déduire la valeur de g. Nous calculerons de préférence la quantité (gF)

$$gF = \frac{10^{-9} \pi}{2 k^2 \alpha} \cdot \frac{\mu^2 P_e}{v} \quad \text{avec } k = 8/3 \pi \quad (20)$$

Nous appellerons la quantité gF : "Indice de qualité" d'un ensemble à effet Hall.

L'expression (20) ne donne qu'une valeur théorique de cet indice. Elle est cependant intéressante car elle ne fait intervenir qu'un nombre restreint de paramètres : α , μ , et P_e / v . compte tenu de la condition d'optimisation (18) $L/d = B_r / H_c$.

III. 7. 2 - Discussion de l'influence des paramètres intervenant dans l'expression de l'indice de qualité théorique.

L'étude théorique de l'ensemble à effet Hall peut maintenant être faite de façon simple au moyen des 3 paramètres contenus dans l'expression (20). Nous allons passer en revue chacun de ces paramètres.

1°) Facteur de forme α . Nous avons vu que : $\alpha = \frac{Z_{22}}{Z_{11}} \left(\frac{a}{b}\right)^2$

Pour diminuer α , il faudrait donc construire des générateurs tels que les rapports Z_{22} / Z_{11} et $(a/b)^2$ soient aussi faibles que possibles. Mais Z_{22} / Z_{11} a tendance à croître lorsque a/b décroît. Il y aurait donc un rapport a/b optimum tel que α soit minimum. Cependant, il faut tenir compte aussi de la variation de la f. é. m. de Hall avec a/b : en effet, lorsque a/b devient inférieur à 3, la f. é. m. de Hall mesurée diminue. Une étude à ce sujet a été faite par la Société SIEMENS [11]. Nous reproduisons dans la

figure 15 la courbe donnant le coefficient de réduction $f(a/b)$ de la f. é. m. de Hall, en fonction de a/b .

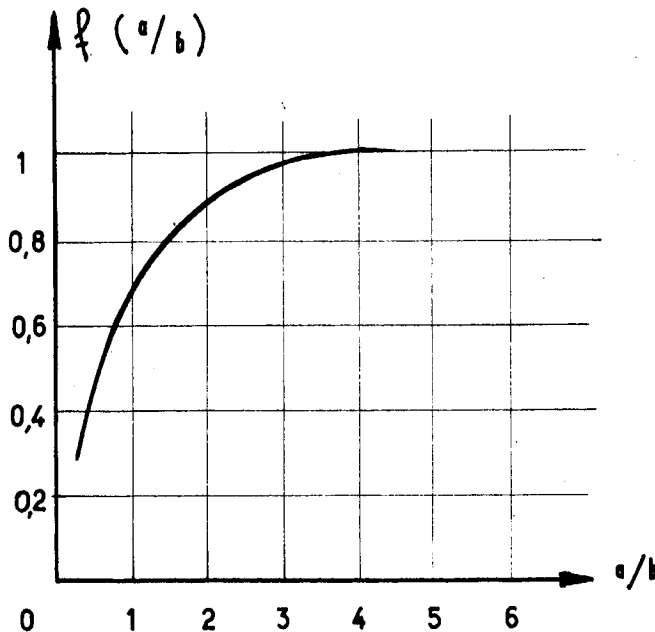


Figure 15

Cette diminution correspondrait, dans la formule (20), à une réduction de la mobilité calculée.

Il faut donc faire un compromis entre la valeur de α et celle de la mobilité calculée.

Un rapport a/b , compris entre 1,5 et 2 est satisfaisant. D'autre part, afin de réduire le plus possible Z_{22} , il faut soigner les soudures correspondantes, sans toutefois qu'elles soient trop larges, sinon on s'exposerait à une diminution supplémentaire de la mobilité calculée.

2°) Mobilité μ : On a évidemment intérêt à utiliser un semi-conducteur ayant une mobilité élevée. C'est le cas de l'Antimoniure d'Indium [13][14]. De plus, nous avons constaté que la mobilité calculée au moyen de la formule : $\mu = k R_h \sigma$ est croissante avec la pureté de l'échantillon.

Dans le choix du semi-conducteur, il faut aussi tenir compte du fait que l'influence de la température croît avec la pureté de l'échantillon. Si l'on s'intéresse seulement au rendement comme c'est le cas ici, où le fonctionnement est du type tout ou rien, on choisira des échantillons de grande pureté ($R_h = 400$ à $500 \text{ cm}^3 / C_b$).

3°) Puissance d'excitation spécifique : P_e/v : La puissance d'excitation P_e est presque entièrement dissipée dans l'échantillon qui, monté dans l'entrefer du tore de ferrite, ne peut éliminer la chaleur que par conduction, la transmission se faisant évidemment par la surface limitant l'échantillon. La quantité de chaleur dissipée est donc

proportionnelle à cette surface.

Considérons P_e/v et définissons le symbole D comme étant représentatif de l'ordre de grandeur des dimensions de l'échantillon. On peut admettre que P_e croît comme D^2 et v comme D^3 . Par conséquent, le rapport P_e/v croît comme $1/D$. Donc P_e/v sera d'autant plus élevé que D sera faible. Ce résultat est extrêmement important car il oriente de façon très stricte la réalisation de l'ensemble à effet Hall vers les petites valeurs de D , ce qui est favorable, puisque cela conduit à la miniaturisation de l'ensemble.

III. 8 - Conclusion de l'étude théorique de l'ensemble à effet Hall.

Cette étude nous a permis, compte tenu d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, d'établir la formule (20)

$$gF = 10^{-9} \frac{\pi}{2} \frac{\mu^2}{k^2 \alpha} \frac{P_e}{v}$$

qui, régit de façon relativement simple la qualité de l'ensemble à effet Hall.

L'examen de cette formule conduit à quelques conclusions importantes permettant de lever l'indétermination sur quelques uns des paramètres cités au début de ce chapitre. Ces conclusions peuvent se résumer ainsi :

- Dimensions du générateur de Hall aussi petites que possible, étant entendu que les dimensions de l'entrefer sont exactement les mêmes.
- Echantillon d' $I_n S_b$ de fort coefficient de Hall :

$$R_h = 400 \text{ à } 500 \text{ cm}^3 / C_b.$$

- Valeur du rapport a/b de 1,5 à 2.
Soudures transversales relativement ponctuelles.

Quand au circuit magnétique, rien de précis ne sort de cette étude, à part la condition d'optimisation :

$$L/d = B_r / H_c .$$

Remarquons enfin, que, une valeur de (gF) étant donnée, il est possible de choisir une fréquence de fonctionnement F telle que g soit égal ou supérieur à 1, ce qui permettrait éventuellement de commander, au moyen de l'énergie de sortie d'un premier ensemble, un second ensemble identique.

CHAPITRE IV

ETUDE PRATIQUE DE L'ENSEMBLE A EFFET HALL

IV. 1 - Généralités :

Quelques uns des paramètres cités au début de l'étude théorique n'interviennent pas dans la formule (20) qui donne la valeur théorique de l'indice de qualité (gF) de l'ensemble à effet Hall. C'est le cas des pertes ohmiques dans la résistance r_c de la bobine de commande, du flux de fuite dans le circuit magnétique et des pertes par courant de Foucault.

Dans ce chapitre, nous nous proposons d'étudier la validité des hypothèses simplificatrices faites précédemment et de préciser l'influence sur la valeur de (gF) d'un certain nombre de paramètres secondaires tels que les pertes.

IV. 2 - Description des paramètres secondaires

L'importance des paramètres secondaires peut être mise en évidence en comparant une valeur numérique de (gF) calculée à partir de la formule théorique (20) et une valeur pratique mesurée sur un ensemble existant : (gF) théorique vaut environ 50, tandis que (gF) pratique atteint seulement quelques unités.

Cette différence vient de ce que l'énergie de commande réelle est supérieure à l'énergie d'hystérésis et de ce que, d'autre part, l'énergie utilisable à la sortie du générateur de Hall est inférieure à celle que l'on calculerait théoriquement à partir du cycle d'hystérésis du ferrite et des caractéristiques du générateur.

IV. 2. 1 - Energie de commande : L'énergie de commande est l'énergie à fournir au tore par l'intermédiaire du courant I_c , pour faire passer son état magnétique de $-B_r$ à $+B_r$, ou réciproquement. Du fait que le cycle d'hystérésis n'est pas exactement rectangulaire (fig. 16), il faudra fournir une énergie $\int HdB$ correspondant à l'aire abc, alors que l'énergie d'hystérésis E_h ne correspond qu'à l'aire abc'.

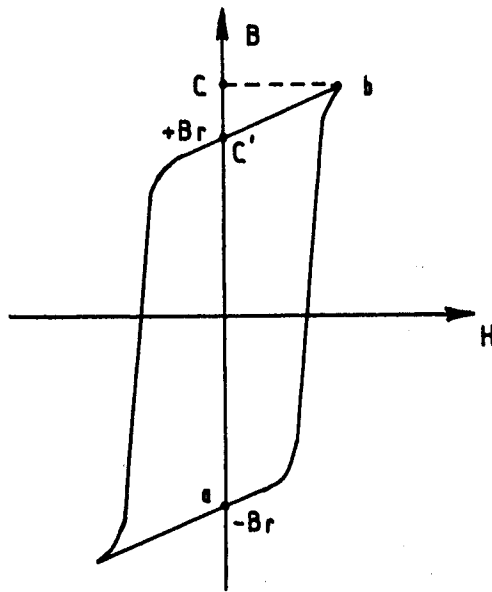


Figure 16

D'autre part, une certaine quantité d'énergie E_j est perdue dans la résistance r_c de l'enroulement de commande.

Finalement, l'énergie de commande est :

$$E_c = E_h \text{ (aire abc) } + E_j$$

IV.2.2 - Energie utile : L'énergie utile disponible à la sortie du générateur de Hall est fonction de l'induction magnétique B existant dans l'entrefer et de la puissance moyenne maximum dissipable dans le générateur.

L'induction magnétique B dépend de l'induction rémanente B_r . Or B est inférieure à B_{max} et d'autre part B est inférieure à B_r à cause des fuites magnétiques. Cela provoque une diminution de l'énergie utile d'autant plus forte que le rendement d'un générateur à effet Hall dépend du carré du champ magnétique.

Les paramètres secondaires peuvent être résumés ainsi :

- Forme non rectangulaire du cycle d'hystérésis
- Résistance de la bobine de commande
- Fuites magnétiques.

Il convient de leur ajouter l'influence des dimensions relatives du générateur de Hall et de l'entrefer du circuit magnétique. En effet, les procédés technologiques utilisés pour la réalisation ne permettent pas de les faire coïncider. Il en résulte une mauvaise utilisation de l'entrefer, son volume étant supérieur à celui du générateur.

IV.3 - Etude expérimentale de l'énergie de commande

Dans l'étude théorique, nous avons supposé que l'énergie de commande était constituée uniquement par l'énergie magnétique $\int H(dB)$. Afin de le vérifier, nous avons étudié expérimentalement le cycle d'hystérésis et l'énergie de commande.

de en alternatif de différents tores de ferrite. La mesure directe de l'énergie de commande en régime alternatif donne la valeur de l'énergie dissipée par le ferrite au cours d'un cycle magnétique complet. Si notre hypothèse initiale est exacte, cette énergie doit être égale à celle que l'on peut évaluer à partir de la surface du cycle d'hystérésis et du volume de matériau.

IV. 3. 1 - Mesure directe de l'énergie de commande en alternatif

Pour effectuer cette mesure, nous avons utilisé la méthode connue qui consiste à faire décrire par le spot d'un oscilloscope une courbe fermée, limitant une aire s correspondant à l'énergie dissipée dans un élément linéaire ou non. Pour cela, nous avons utilisé le montage de la figure 17.

La capacité C effectue l'opération : $\mu = \int I_c dt.$

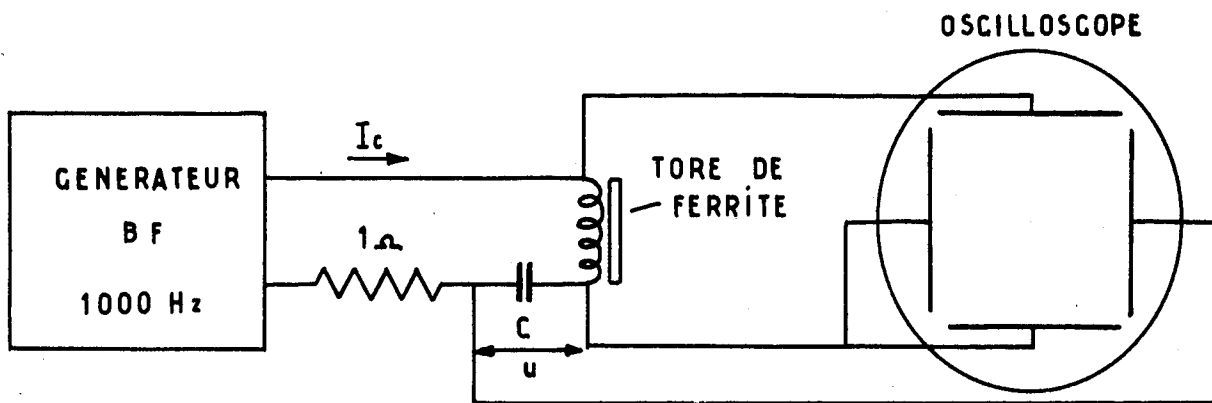


Figure 17

L'énergie dissipée au cours d'un cycle est liée à la surface s par la formule :

$$E = C \cdot s \cdot S_x \cdot S_y \quad (21)$$

où

E est l'énergie en Joules

C est la capacité en Farads

s est la surface limitée par le spot en cm²

Sx et Sy sont les sensibilités horizontales et verticales en volts/cm.

La fréquence de mesure est fixée à 1.000 Hz.

La surface s est relevée photographiquement, ce qui permet un planimétrage commode.

IV.3.2. - Etude du cycle d'hystérésis - Energie correspondante

Pour l'étude du cycle d'hystérésis, le montage utilisé est celui de la figure 18.

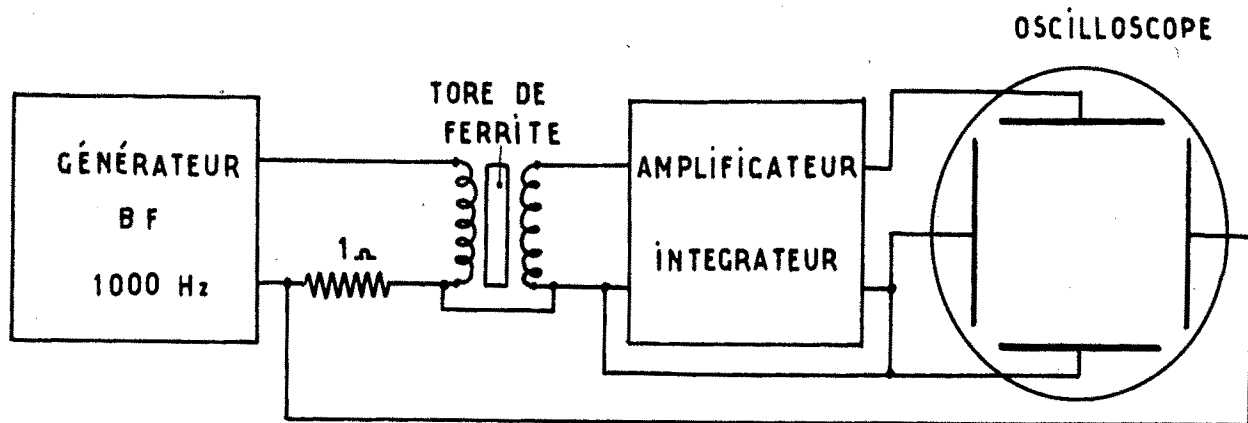


Figure 18

L'intégrateur transforme la tension apparaissant aux bornes du secondaire en une grandeur proportionnelle à l'induction, de sorte que l'oscillogramme représente le cycle d'hystérésis décrit par le tore.

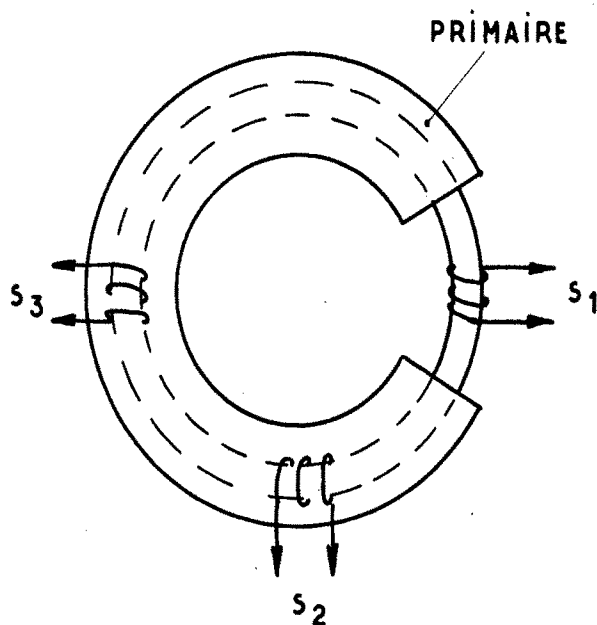


Figure 19

Pratiquement, les tores à étudier sont bobinés conformément à la figure 19. Ils sont munis d'un bobinage primaire destiné à produire le champ magnétique d'excitation. Ce primaire est disposé sur la plus grande partie du tore, la région découverte devant être fendue ultérieurement pour produire un entrefer. De plus 2 ou 3 secondaires de quelques spires sont disposés suivant la figure 19 de façon à permettre l'étude des cycles d'hystérésis dans les sections S_1 , S_2 et S_3 .

L'énergie correspondant à la surface du cycle est donnée par la formule (14)

$$E_h = \frac{10^{-7}}{4\pi} V \int H(dB)$$

où E_h est l'énergie en Joules, V le volume de ferrite en cm^3 , H le champ magnétique d'excitation en Oersteds, B l'induction en Gauss.

IV. 3. 3 - Résultats

Nous avons effectué cette étude sur 3 tores de ferrite préparés commercialement en vue des applications radioélectriques dans la bande des 100 MHz (LTT Fernilite 1105)¹. La figure 20 montre les oscillogrammes de mesure d'énergie pour différentes valeurs du champ maximum d'excitation. Dans la figure 21 sont groupés les cycles d'hystérésis correspondant aux mêmes champs maximum. Les cycles d'hystérésis relevés au moyen des secondaires S_1 , S_2 ou S_3 peuvent être différents à cause des fuites magnétiques. On ne peut donc calculer exactement l'énergie d'hystérésis E_h , mais seulement les énergies E_{h1} , E_{h2} ou E_{h3} qui correspondent aux cycles relevés sur S_1 , S_2 ou S_3 . La véritable valeur de E_h doit être comprise entre E_{h1} et E_{h3} . L'examen des résultats montre que $E_{h3} = E_{h2}$, ce qui permet de voir que E_h doit être plus proche de E_{h3} que de E_{h1} .

Dans cette étude, il faut tenir compte de l'énergie dissipée dans la résistance r_c de l'enroulement primaire d'excitation E_j , qui est de la forme :

$$E_j = r_c I_{\text{eff}}^2 T$$

L'ensemble des résultats numériques se trouvent réunis dans le tableau V. On peut constater que l'on a, à quelques % près :

$$E_{h3} + E_j = E_{ca}$$

E_{ca} étant l'énergie de commande en régime alternatif.

On remarque, en outre, que E_j vaut environ $E_h/10$. On peut donc admettre que, pour une fréquence supérieure à 1000 Hz, ou pour un fonctionnement en impulsions de durée inférieure à 0,5 milliseconde, les pertes Joules E_j sont négligeables.

L'énergie de commande E_c a été définie comme étant l'énergie à fournir au tore pour faire passer son induction de la valeur $+B$ à $-B$ ou réciproquement. Dans ces conditions, E_c est légèrement supérieure à $E_r/2$ puisque la moitié seulement d'un cycle est décrit et que, d'autre part, l'énergie magnétique correspondant au passage de $+B_{\text{max}}$ à $+B_r$ est perdue.

(1) Nous tenons à remercier Monsieur PRACHE, Directeur de Recherches à la Société LTT qui nous a fourni avec la plus grande amabilité les échantillons de ferrites.

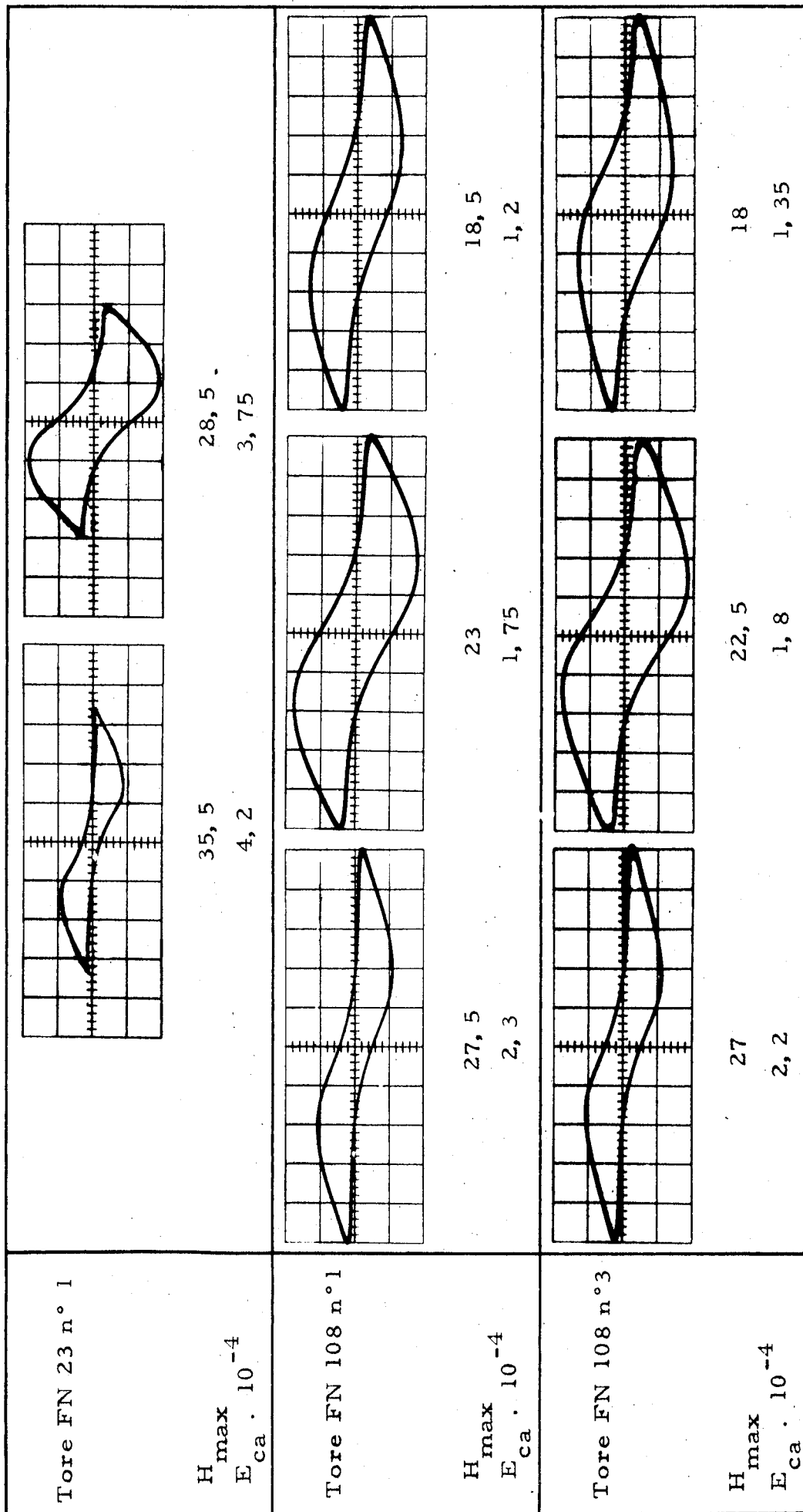


Figure 20

H_{\max} est le champ alternatif d'excitation (en Oersteds)

E_{ca} est l'énergie de commande en régime alternatif (en Joules)

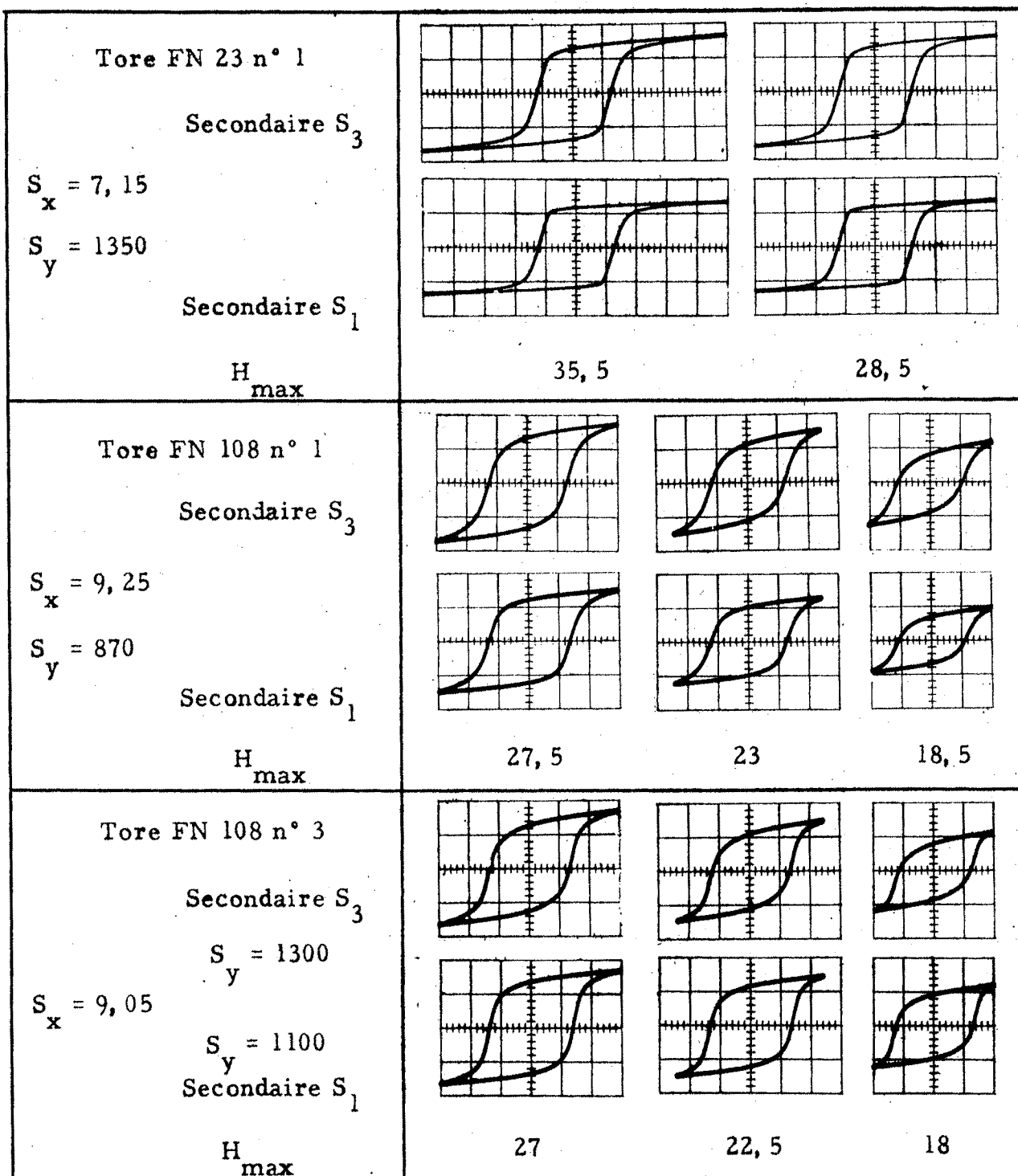


Figure 21

H_{max} est le champ alternatif maximum d'excitation (en Oersteds)

S_x est la sensibilité horizontale (en Oe/carreau)

S_y est la sensibilité verticale (en Gauss/carreau)

Type de tore	H_{\max} Oe	Secondaire	E_h 10^{-4} joules	$E_h + E_j$ 10^{-4} joules	E_{ca} 10^{-4} joules
FN 23 n°1	35,5	S ₃	3,75	4,35	4,2
		S ₁	3,2	3,8	
	28,5	S ₃	3,5	3,85	3,75
		S ₁	3,1	3,45	
FN 108 n°1	27,5	S ₃	1,95	2,25	2,3
		S ₁	1,85	2,15	
	23	S ₃	1,55	1,75	1,75
		S ₁	1,4	1,6	
	18,5	S ₃	1,15	1,25	1,2
		S ₁	0,85	0,985	
FN 108 n°3	27	S ₃	1,95	2,2	2,2
		S ₁	1,85	2,1	
	22,5	S ₃	1,6	1,75	1,8
		S ₁	1,55	1,7	
	18	S ₃	1,1	1,2	1,35
		S ₁	1,15	1,25	

Tableau V

On peut conclure de cette étude que l'énergie de commande E_c est constituée essentiellement par l'énergie d'hystérésis E_h et par l'énergie^c de pertes Joules dans la résistance r_c de l'enroulement de commande : E_j . Cette énergie Joules étant directement fonction^c du temps de basculement, elle devient rapidement négligeable lorsque ce temps décroît.

IV. 4 - Influence de la forme du cycle d'hystérésis sur la valeur de l'indice de qualité (gF)

Il n'existe pas de matériau magnétique ayant un cycle d'hystérésis réellement rectangulaire, c'est-à-dire tel que le rapport B_r/B_{\max} soit égal à 1. Les cycles d'hystérésis tels que ceux des figures 21 et 25 ont des coefficients de rectangularité B_r/B_{\max} valant environ 0,8 à 0,9.

On peut assimiler la forme de ce type de cycle à celle d'un quadrilatère limité par les parallèles MN, PQ et MQ, NP (fig. 22).

IV. 4. 1 - Point de fonctionnement : La condition d'optimisation (18) était :

$$L/d = B_r/H_c$$

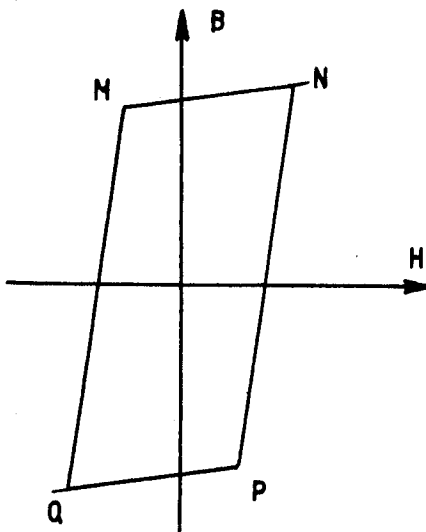


Figure 22

Dans le cas d'un cycle tel que celui de la figure 22, cette condition peut être légèrement différente. Nous admettons cependant qu'elle est toujours valable.

Dans le cas d'un cycle d'hystérésis parfaitement rectangulaire, la présence d'un entrefer dans le tore ne modifie pas la valeur de l'induction rémanente. Il n'en va pas de même ici, car si le coefficient de rectangularité du tore non fendu est de l'ordre de 0,8 à 0,9, celui du tore fendu n'est plus que de 0,7 à 0,8 environ.

Si la longueur d de l'entrefer est telle que les points de fonctionnement soient effectivement M et P (fig. 22), le cycle d'hystérésis : $B = f(H)$ sera identique à celui de la figure 23a, H étant le champ magnétique d'excitation : $4\pi NI/(L+d)$ NI étant en ampères tours et $(L+d)$ en mm.

Cette nouvelle forme de cycle d'hystérésis peut encore être schématisée par un quadrilatère limité par des droites parallèles 2 à 2 (fig. 23b). L'induction rémanente est alors symbolisée par B'_r , B_r étant l'induction rémanente du ferrite en l'absence d'entrefer.

IV. 4. 2. - Calcul de l'énergie de commande

Nous avons vu précédemment que, si on ne tient pas compte de la résistance r de l'enroulement de commande, l'énergie de commande E est égale à l'énergie^C magnétique fournie au tore pour passer d'une valeur de l'induction^C à la valeur imposée.

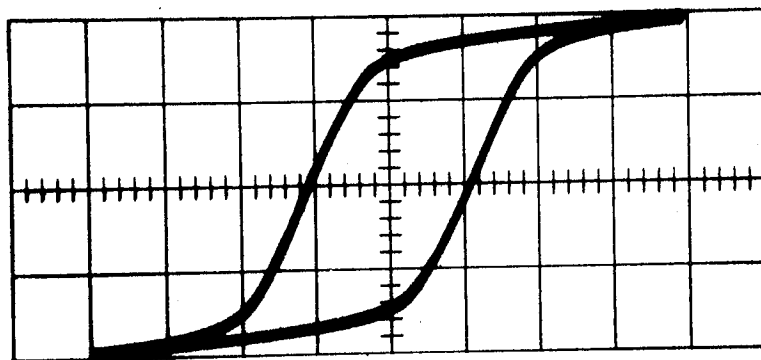


fig. 23 a

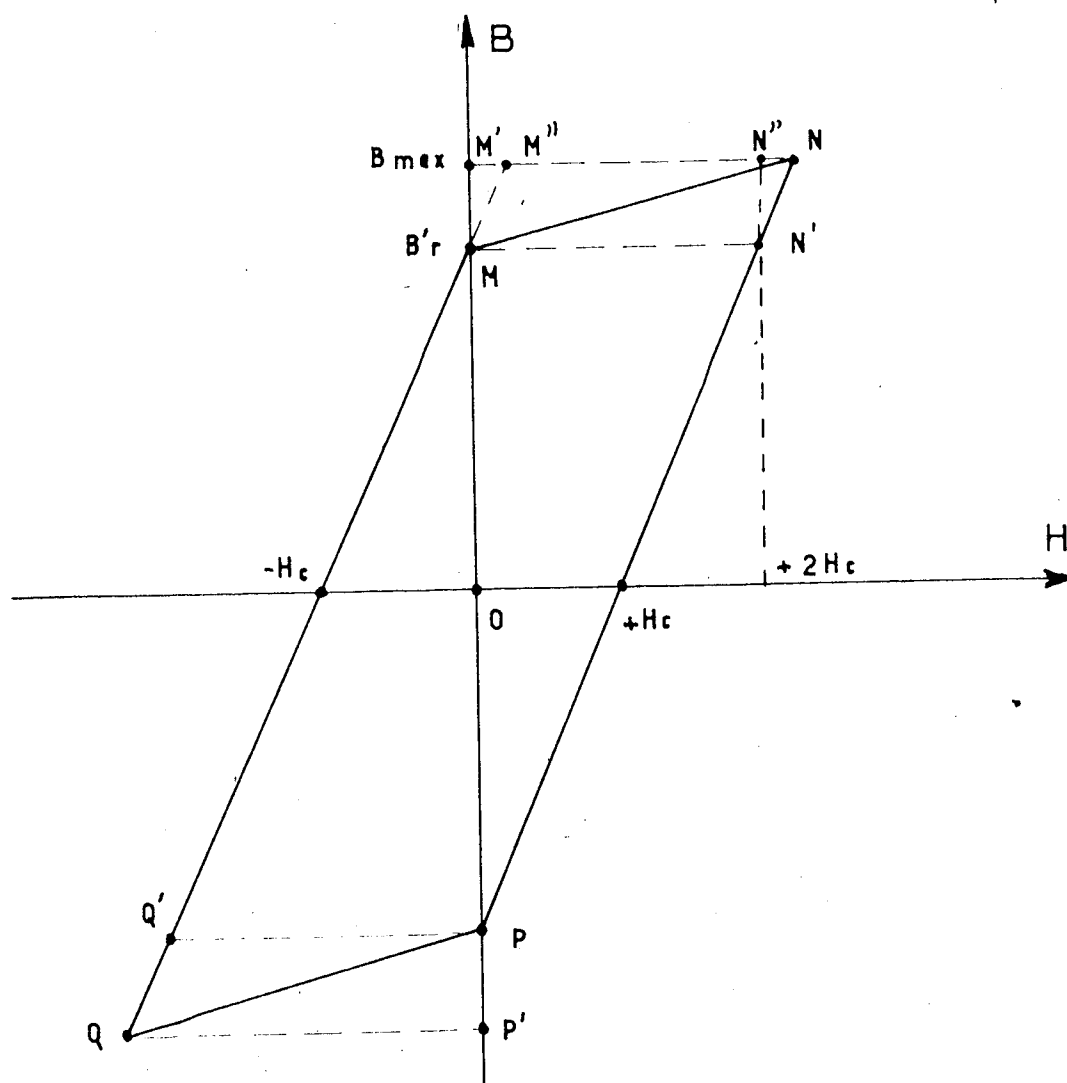


fig. 23 b

Calculons tout d'abord l'énergie de commande en régime alternatif E correspondant au cycle d'hystérésis. Cette énergie est proportionnelle à $\int H(\text{dB})$ l'intégrale étant prise le long du parcours PNMQP (figure 23b)

On a : Aire P N M Q P = Aire P N M'' Q' P

$$\text{et : Aire P N M'' Q' P} = \overline{PM'} \cdot \overline{Q'P} = 2H_c (B'_r + B_{\text{max}})$$

Finalement :

$$E_{\text{ca}} = \frac{10^{-7}}{2\pi} V \cdot H_c (B_{\text{max}} + B'_r) \quad (22)$$

ou, en posant :

$$\gamma'' = B'_r / B_{\text{max}}$$

$$E_{\text{ca}} = \frac{10^{-7}}{2\pi} V \cdot H_c B_{\text{max}} (1 + \gamma'') \quad (23)$$

L'énergie de commande réelle E_c correspond à l'aire : P N M' P.

Cette aire peut se calculer aisément en fonction de H_c , B'_r et B_{max} .
On trouve :

$$\text{Aire P N M' P} = H_c \frac{(B'_r + B_{\text{max}})^2}{2 B'_r}$$

$$\text{ou } H_c B_{\text{max}} \frac{(1 + \gamma'')^2}{2 \gamma''}$$

En négligeant l'aire $N' N N'' N'$, on trouve une expression plus simple :
 $2 H_c B_{\text{max}}$

Si on admet cette deuxième expression, l'énergie de commande est :

$$E_c = \frac{10^{-7}}{2\pi} V \cdot H_c B_{\text{max}} \quad (24)$$

IV.4.3 - Vérification expérimentale des formules (22) et (24)

Cette vérification a été faite en comparant les valeurs de l'intégrale $\int H(\text{dB})$ prise le long des parcours PNMQP ou PNM'P calculée au moyen des formules (22) ou (24) avec les valeurs déduites d'un planimétrage direct de l'aire correspondante.

La figure 24 montre les oscillogrammes obtenus avec les tores :
FN 23 n°1 et FN 104 n°2.

Le tableau VI donne l'ensemble des résultats numériques. On peut constater que les écarts entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées par planimétrage ne dépassent presque jamais 3 % et sont souvent voisins de 1 %. Il est donc possible d'admettre les formules (22) et (24)

H_{\max} (Oe)	$H_c (B_{\max} + B'_r)$ (Oe. Gauss)	Planimétrage aire PNMQP (Oe. Gauss)	$2 H_c B_{\max}$ (Oe. Gauss)	Planimétrage aire PNM'P (Oe. Gauss)
<u>TORE FN 23 N° 1</u>				
35, 7	34. 200	34. 500	39. 200	41. 200
28, 5	32. 300	32. 600	37. 200	37. 600
21, 4	29. 000	29. 200	32. 800	32. 000
14, 3	17. 500	17. 400	20. 300	19. 700
<u>TORE FN 104 N° 2</u>				
45, 4	30. 400	30. 400	34. 400	34. 400
36, 3	28. 400	28. 800	31. 600	32. 800
27, 2	26. 200	25. 700	28. 800	28. 000
22, 8	22. 800	22. 300	25. 000	24. 100
18, 1	17. 200	16. 900	18. 800	18. 400

Tableau VI

IV. 4. 4 - Expression de l'indice de qualité (gF) en fonction des coefficients de rectangularité du cycle d'hystérésis

Nous avons établi, dans le chapitre précédent, la valeur théorique de l'indice de qualité de l'ensemble à effet Hall. La non-rectangularité des cycles d'hystérésis réels conduit à modifier cette valeur. Pour cela il faut revenir à l'expression (16) qui donne la valeur de g en fonction de E_e/E_c . Etudions ce rapport en tenant compte de la forme réelle des cycles d'hystérésis : E_e est donnée par (17) et E_c par (24)

$$\text{et on a : } E_e/E_c = \frac{1}{4} \cdot \frac{BH}{H_c B_{\max}}$$

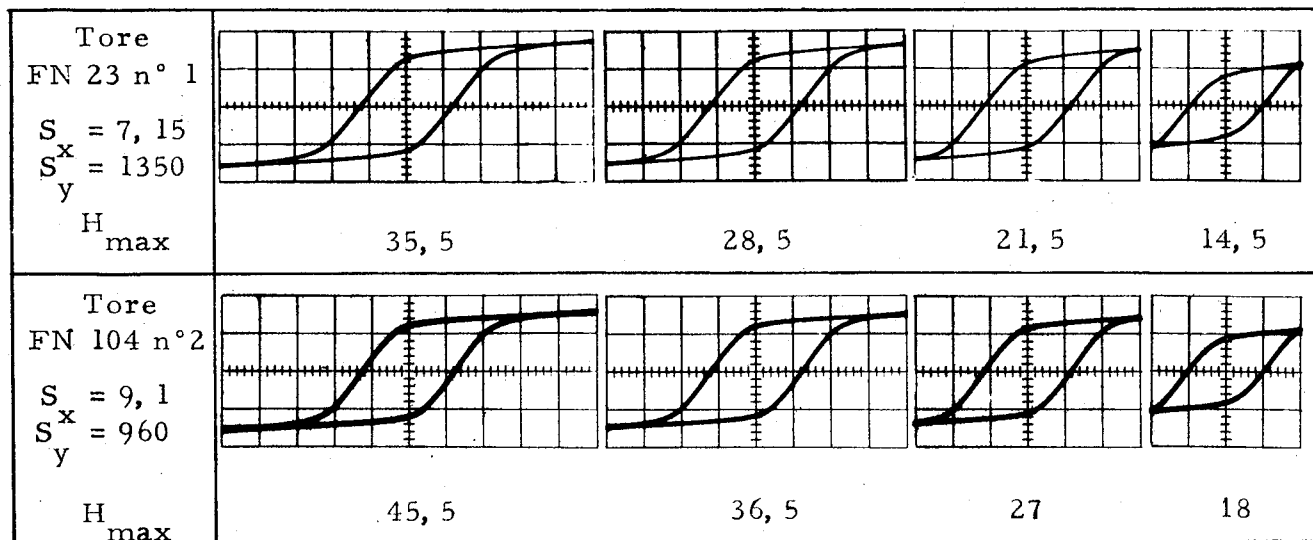


Figure 24

H_{max} : champ alternatif maximum d'excitation (Oersteds)

S_x sensibilité horizontale (Oe/carreau) - S_y sensibilité verticale (Gauss/carreau)

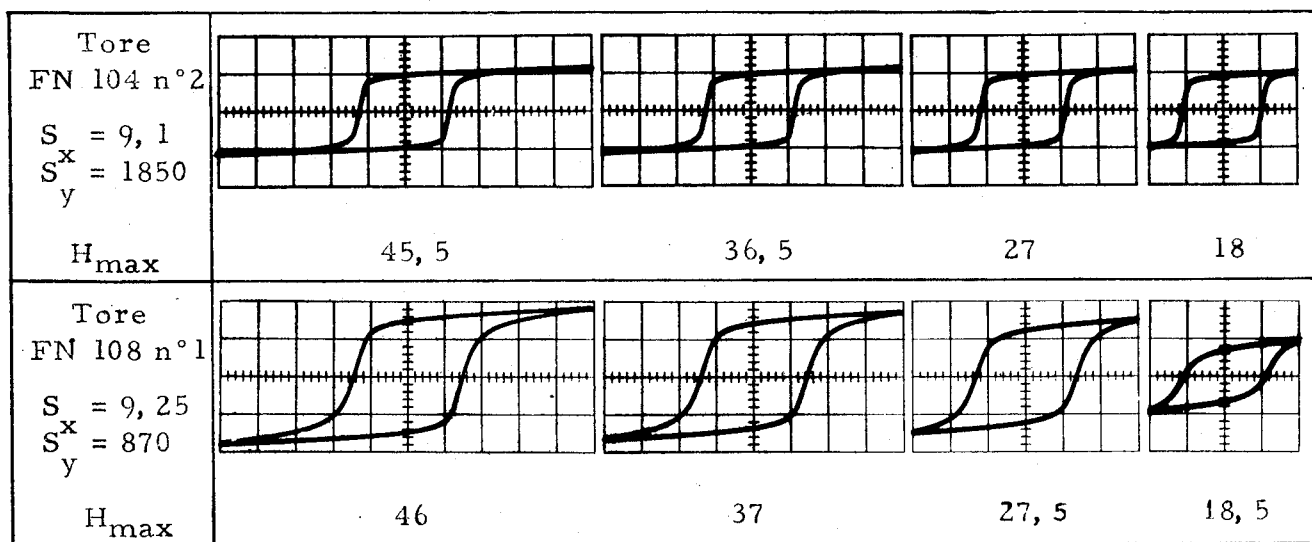


Figure 25

H_{max} : champ alternatif maximum d'excitation (Oersteds)

S_x sensibilité horizontale (Oe/carreau) - S_y sensibilité verticale (Gauss/carreau)

Avec $B/H = B_r/H_c$ et $B = B'_r$

Donc $H = H_c (B'_r/B_r)$ et $BH = H_c (B_r'^2/B_r)$

Finalement

$$E_e/E_c = \frac{1}{4} \frac{B_r'^2 H_c}{H_c B_{\max} B_r}$$

En posant : $\gamma = B_r/B_{\max}$ et $\gamma' = B_r'/B_r$

on a enfin : $E_e/E_c = \gamma \gamma'^2 \cdot \frac{1}{4}$ (25)

A partir de (16) et de (25) on peut calculer la nouvelle valeur de (gF). En appelant (gF) théorique l'expression (20), on trouve :

$$(gF) = (gF) \text{ théorique} \cdot \gamma \gamma'^2 \quad (26)$$

On voit que les coefficients de rectangularité γ et γ' interviennent directement dans la valeur de (gF)

IV.4.5 - Etude expérimentale des coefficients de rectangularité

Cette étude comporte essentiellement la détermination des coefficients de rectangularité γ et γ' de plusieurs tores de ferrite, à partir des oscillogrammes de leurs cycles d'hystérésis.

Les valeurs de B_r et de B_{\max} qui permettent de calculer $\gamma = B_r/B_{\max}$ sont directement accessibles sur les cycles d'hystérésis. Par contre, pour calculer $\gamma' = B_r'/B_r$, il faut tout d'abord construire sur l'oscillogramme la droite de pente $- B_r/H_c$.

Les ordonnées de l'intersection de cette droite avec le cycle correspondant à $\pm B_r'$.

La figure 25 montre les oscillogrammes obtenus avec les tores FN 104 n°2 et FN 108 n°1 pour différentes valeurs du champ maximum d'excitation : H_{\max}

Les courbes des figures 26a et 26b donnent les valeurs de γ, γ' et $\gamma \gamma'^2$ en fonction du champ : H_{\max} variant de 18 Oe à 46 Oe environ.

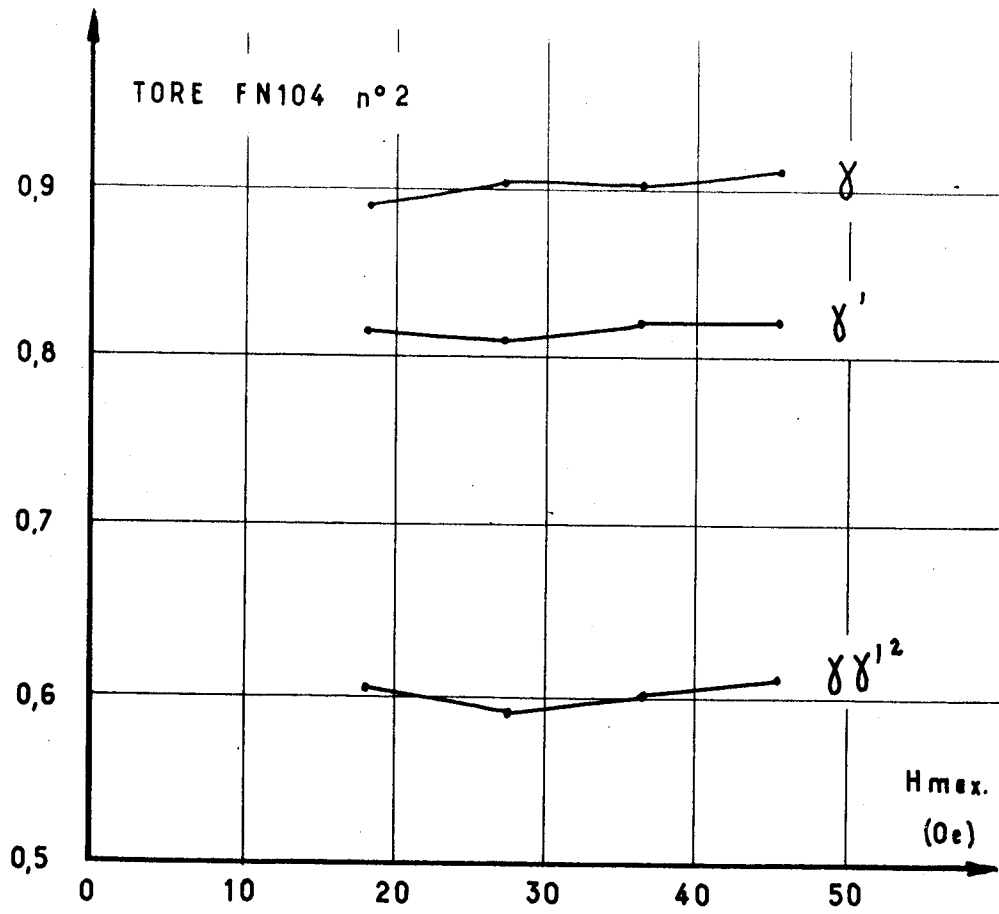


FIG. 26a

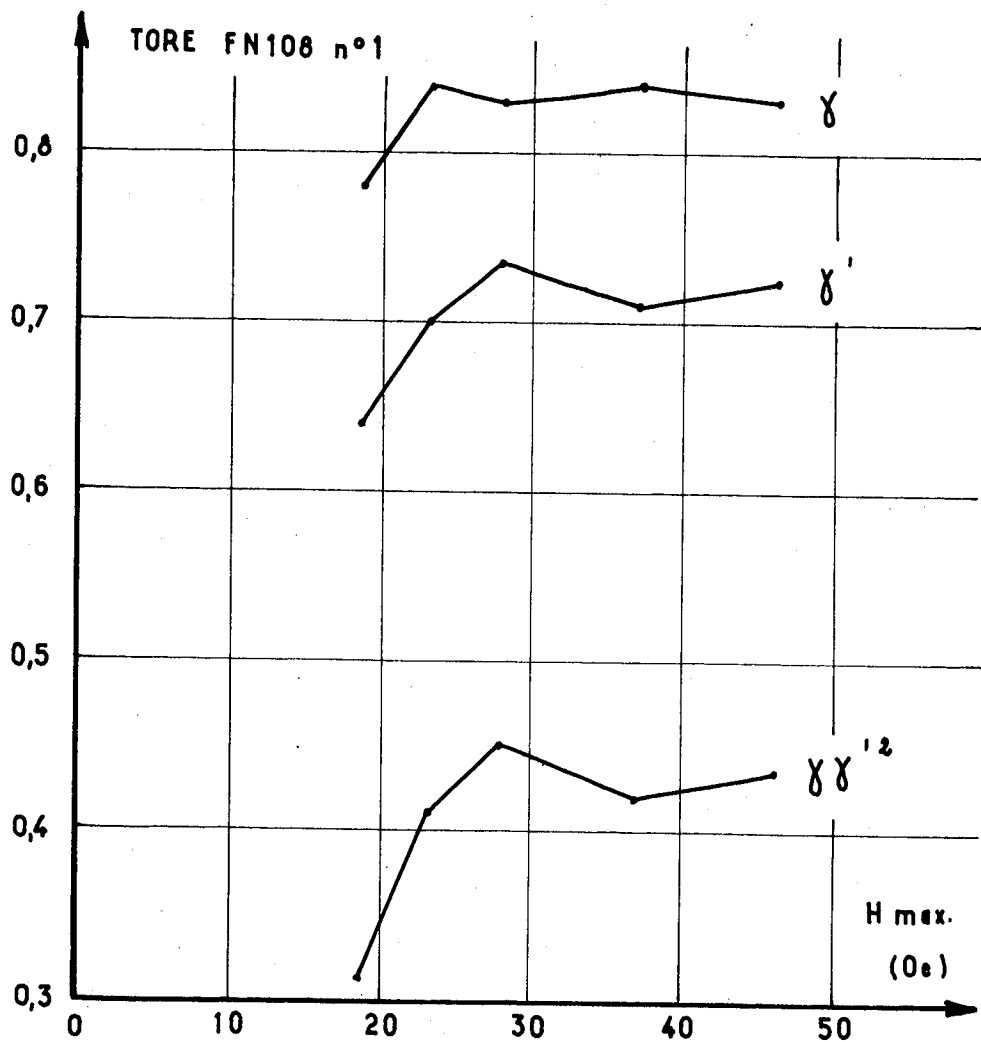


FIG. 26b

IV. 5 - Influence du flux de fuite magnétique

Nous avons supposé jusqu'à présent qu'il n'y avait pas de flux de fuites, c'est à dire que le flux d'induction était strictement concentré à l'intérieur d'un tube de forces se confondant avec le tore constituant le circuit magnétique. Il n'en est rien, du fait de la présence de l'entrefer et de la faible valeur de la perméabilité du ferrite. (Cette perméabilité vaut environ 15). Ceci se traduit par une diminution de l'énergie contenue sous forme magnétique dans l'entrefer. L'énergie de sortie étant directement proportionnelle, pour un volume donné, à celle-ci, on aura donc un abaissement de la valeur de l'indice de qualité (gF).

IV. 5. 1 - Expression de l'indice de qualité en fonction du coefficient de fuite

Nous avons vu précédemment que l'indice de qualité (gF) dépend du rapport E_c / E_e . En tenant compte de la forme réelle des cycles d'hystérésis, nous avons trouvé : $E_c / E_e = \gamma \gamma^2 / 4$. En réalité, à cause des fuites magnétiques, ce rapport est plus faible.

Posons : $\mathcal{J} = B'_r / B_e$, B'_r étant l'induction rémanente théorique existant dans le tore de ferrite muni d'un entrefer et B_e étant l'induction régnant dans l'entrefer.

Précisons le sens dans lequel il faut prendre ici B'_r . Du fait des fuites magnétiques et à plus forte raison si le tore n'a pas une section constante, la valeur de B'_r varie le long du tore. C'est pourquoi, il faut rattacher B'_r à une grandeur facilement accessible et tenant compte de l'état magnétique global du tore. C'est le cas de l'énergie de commande en régime alternatif E_{ca} , que l'on peut mesurer directement et qui est liée à B'_r par les relations (22)^{ca} ou (23). Pour atteindre B'_r , il faudra donc, tout d'abord, mesurer E_{ca} , puis soustraire de la valeur trouvée les pertes Joules E_j . Ensuite on peut appliquer les formules (22) ou (23) en donnant à V la valeur du volume d'un tore de section constante égale à la section de l'entrefer.

Remarquons que, dans le cas où les fuites sont localisées au niveau de l'entrefer, E_{ca} est pratiquement égale à E_{h3} et, par conséquent, on a :

$$B'_r = B'_{r3}$$

B'_{r3} étant l'induction rémanente mesurée dans la section S_3 située à l'opposé de l'entrefer.

S'il n'y avait pas de fuites, l'énergie magnétique E_e serait proportionnelle à $B_r'^2$. A cause des fuites, B_r' est remplacé par B_e .

$$\text{On a donc : } E_e/E_c = \gamma \gamma'^2 / 4 \delta^2 \quad (27)$$

L'expression définitive de l'indice de qualité est enfin :

$$gF = (gF) \text{ théorique} \cdot \frac{\gamma \gamma'^2}{\delta^2} \quad (28)$$

avec $(gF) \text{ théorique} = \frac{10^{-9}\pi}{2k^2} \cdot \frac{\mu^2 P_e}{\alpha v}$

Cette expression tient compte de la plupart des paramètres régissant l'ensemble à effet Hall.

La mesure de B_e se fait directement à l'aide d'un générateur de Hall, mais B_r' doit être déterminée par le calcul au moyen des formules (22) ou (23), ou par la mesure de B_{r3}' .

IV. 5. 2 - Etude expérimentale du coefficient de fuite δ :

Nous avons déterminé la valeur du coefficient de fuite de 2 tores munis d'un entrefer de dimensions telles que le point de fonctionnement soit optimum. L'énergie de commande E_e diminuée des pertes Joules étant pratiquement égale à l'énergie d'hystérésis E_{h3}^{ca} , nous avons admis que les fuites étaient localisées au niveau de l'entrefer. C'est pourquoi nous avons calculé δ à partir de B_{r3}' .

La figure 27 indique l'allure des variations de δ avec le champ maximum d'excitation H_{\max} pour les tores FN23 n°1 et FN 104 n°1.

On voit que δ est pratiquement constant à partir de 20 Oe. Il décroît légèrement lorsque H_{\max} est voisin du champ coercitif.

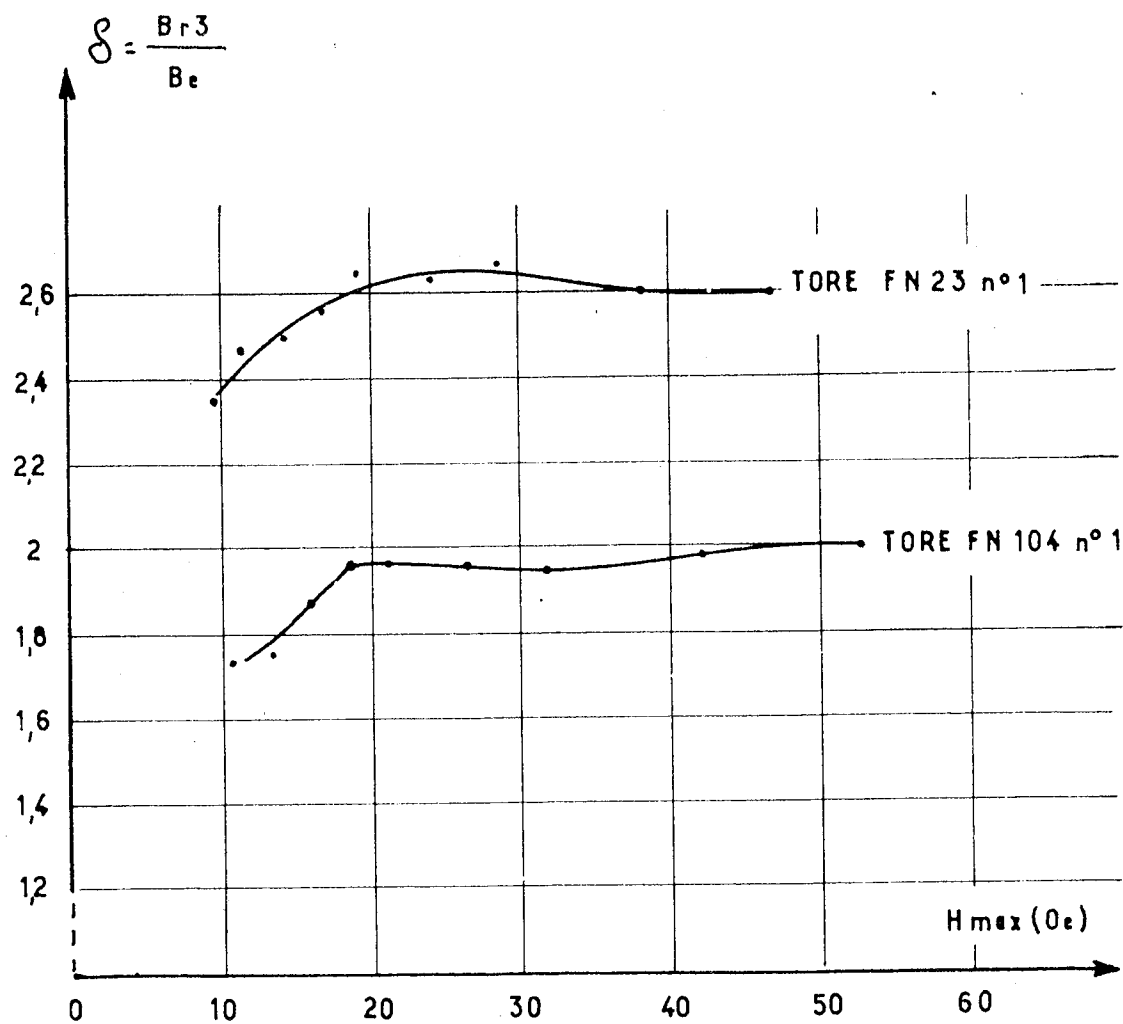


fig. 27

IV.6 - Echauffement du générateur de Hall. Puissance maximum d'excitation

IV.6.1 - Généralités : La puissance moyenne délivrée par un générateur de Hall, dépend, comme nous l'avons vu précédemment, de la puissance moyenne d'excitation et de l'énergie localisée sous forme magnétique dans l'échantillon. Comme le rendement est faible, la puissance d'excitation est presque entièrement dissipée dans l'échantillon. Il en résulte un échauffement qui produit, à partir du moment où le semi-conducteur devient intrinsèque, une décroissance des différentes impédances caractérisant le générateur de Hall. Cet échauffement dépend essentiellement des conditions de dissipation.

Une théorie a été faite [11] sur la dissipation calorifique dans le cas d'un échantillon mince de forme rectangulaire. Dans cette théorie on ne tient compte que de la transmission de chaleur s'effectuant par les 2 grandes faces de l'échantillon. Si on admet que la température de la plaquette est uniforme, on

trouve que l'élévation de température ΔT de l'échantillon par rapport à la température extérieure est inversement proportionnelle au coefficient h de transmission de chaleur dans la direction perpendiculaire aux grandes faces. Une série de mesures a permis de comparer les valeurs de ce coefficient de transmission pour une plaquette nue placée dans l'air, une plaquette enrobée dans l'araldite et une plaquette placée en contact avec les pièces polaires d'un électro-aimant. Dans ces 2 derniers cas, les coefficients sont respectivement 2, 4 et 14 fois plus grands. On peut calculer, en fonction de ΔT maximum la tension et la puissance maximum de sortie. On trouve que la tension maximum de sortie est proportionnelle à $(h/d)^{\frac{1}{2}}$ d étant l'épaisseur de l'échantillon. Par contre, la puissance maximum de sortie ne dépend que du coefficient h .

L'épaisseur de la plaquette n'intervient donc pas dans la valeur de la puissance maximum de sortie. Cette puissance est proportionnelle à ΔT_{\max} ; il semblerait donc que l'on ait intérêt à utiliser des semi-conducteurs dont la sensibilité à la température soit faible. Cette condition est, en général réalisée dans les semi-conducteurs impurs, c'est à dire de faible constante de Hall. Mais comme nous l'avons déjà vu, la mobilité des porteurs étant plus élevée dans les semi-conducteurs à forte constante, l'utilisation de ces derniers est préférable car ils donnent des rendements plus élevés.

IV.6.2 - Puissance maximum d'excitation. Valeurs numériques concernant P_e/v

La puissance maximum d'excitation est une donnée importante dont dépend essentiellement la valeur de l'indice de qualité d'un ensemble. Pour la déterminer il faut étudier expérimentalement les variations de l'impédance Z_t , caractérisant le générateur, en fonction de la puissance d'excitation.

On se fixe ensuite un abaissement limite de Z_t et la puissance maximum d'excitation est celle qui correspond à cet abaissement limite.

Nous avons admis un abaissement maximum de 20 %. Nous avons ensuite déterminé la puissance d'excitation P_e correspondante. Les générateurs étaient montés dans l'entrefer de circuits magnétiques de ferrite.

Le tableau VII donne les résultats des mesures effectuées sur 3 ensembles. v est le volume des entrefers, v' celui des générateurs de Hall. Le semi-conducteur constituant les générateurs a une constante de Hall d'environ $350 \text{ cm}^3/\text{Cb}$.

Ensembles	v 10^{-3} cm^3	v' 10^{-3} cm^3	P_e 10^{-3} watts	P_e/v watts/cm^3	P_e/v' watts/cm^3
B	4, 2	1, 6	155	37	100
C	4, 5	1	80	18	80
D	3, 4	0, 8	80	23, 5	100

Tableau VII

On voit que le rapport P_e/v' vaut environ 80 à 100 watts/cm^3 . Cette valeur élevée est évidemment due au fait que le générateur se trouve en contact thermique étroit avec le circuit magnétique.

Du fait que v est plus grand que v' on a : $P_e/v < P_e/v'$

Il y aurait donc lieu d'affecter l'expression (28) donnant la valeur de l'indice de qualité, d'un coefficient réducteur égal au rapport v'/v que l'on pourrait appeler coefficient de remplissage de l'entrefer.

IV.7 - Conclusion

L'étude poursuivie au cours de ce chapitre nous a conduit à l'établissement d'une expression complète de l'indice de qualité d'un ensemble à effet Hall. La formule (28) tient compte en effet, des paramètres secondaires les plus importants qui sont les fuites magnétiques et la forme exacte du cycle d'hystérésis. De plus, la mesure de la puissance maximum d'excitation nous permet de calculer la valeur numérique de l'indice de qualité (gF) d'un ensemble pratiquement réalisable.

En admettant les valeurs moyennes suivantes :

$$\mu = 34 \cdot 10^3 \text{ cm}^2/\text{volts. sec.} \quad ; \quad \alpha = 2,5 \quad ; \quad \gamma \gamma^2 = 0,6$$

$$\xi = 2 \quad \text{et} \quad P_e/v = 25 \text{ watts/cm}^3.$$

On trouve : (gF) = 4 environ.

Cette valeur correspondrait à un coefficient de remplissage d'environ 0,3. S'il était voisin de 1, on aurait (gF) = 12 environ. Cela est certainement

possible, en adoptant des procédés de réalisation perfectionnés. De même, il n'est certainement pas impossible d'améliorer le coefficient de fuite et la forme du cycle d'hystérésis. On obtiendrait alors des valeurs de (gF) supérieures à 12. Cela signifie que le fonctionnement d'une chaîne d'ensembles montés en cascade pourrait se faire à une fréquence supérieure à 12 Hz.

CHAPITRE V

REALISATION D'UN ENSEMBLE A EFFET

HALL

V.1 - Généralités

Les études théoriques et pratiques des chapitres précédents permettent de faire le choix des différents paramètres géométriques et électriques pouvant conduire à la réalisation d'un ensemble à effet Hall ayant un indice de qualité aussi élevé que possible. Les caractéristiques correspondantes ne sont pas toujours très faciles à obtenir, c'est pourquoi cette réalisation se heurte à des difficultés technologiques importantes.

L'objet de ce chapitre sera tout d'abord de faire le choix des paramètres en partant des conséquences des études précédentes et, ensuite, de décrire les procédés technologiques adoptés pour la réalisation pratique d'un ensemble à effet Hall.

V.2 - Caractéristiques géométriques

Le résultat le plus important concernant les dimensions géométriques est celui qui résulte de l'étude théorique de l'ensemble à effet Hall : dimensions du générateur de Hall aussi faibles que possible, ce qui entraîne, pour l'ensemble lui-même, une réduction de volume.

D'autre part, la relation (18) lie les dimensions géométriques aux propriétés magnétiques du circuit : $L/d = B_r/H_c$.

Nous avons vu déjà que le rendement du générateur de Hall est satisfaisant lorsque le rapport longueur/largeur vaut environ 1,5 à 2 et lorsque les soudures transversales sont ponctuelles.

L'étude théorique ne permet pas de déterminer l'épaisseur à donner à l'échantillon constituant le générateur. Différentes raisons conduisent cependant à la choisir aussi réduite que possible. On sait, en effet, que la résistance de sortie Z_{22} d'un générateur de Hall est inversement proportionnelle à l'épais-

seur de l'échantillon. On a vu, d'autre part, que la résistance de charge doit être égale à Z_{22} afin d'assurer une bonne adaptation. Z_{22} étant, en général, assez faible (de l'ordre de 1 ohm ou moins) il est assez difficile de réaliser cette adaptation.

C'est pourquoi on a intérêt à accroître Z_{22} en diminuant l'épaisseur du générateur. Cette diminution entraînera, en même temps, une réduction du flux de fuites et du volume de l'ensemble.

V. 3 - Caractéristiques électriques

V. 3. 1 - Circuit magnétique

Les principaux éléments caractérisant le circuit magnétique sont : le type de matériau magnétique, la forme du cycle d'hystérésis, le rapport B_r/H_c , la valeur de H_c , et enfin, l'enroulement de commande.

Nous avons vu que l'indice de qualité est proportionnel aux coefficients de rectangularité du matériau. Il faudra donc que ceux-ci soient aussi élevés que possible. Considérons maintenant, le rapport B_r/H_c . On sait qu'il doit être égal au rapport L/d ; d est essentiellement déterminé par l'épaisseur minimum qu'il est possible d'atteindre pour un générateur de Hall. Cette épaisseur est de l'ordre de 0, 1 à 0, 5 mm. Quant à L , qui est la longueur de matériau magnétique, on ne peut la choisir trop grande, ceci afin d'éviter que l'ensemble n'ait des dimensions trop importantes. Cette considération conduit à choisir un rapport L/d dont la valeur se situe entre 100 et 200. Si on admet, d'autre part, que B_r vaut environ 1500 Gauss (c'est le cas des ferrites les plus courants) il faudra que H_c soit compris entre 7, 5 et 15 Oersteds.

Il reste à faire le choix du matériau. Celui-ci doit être à forte résistivité afin d'éviter les pertes par courant de Foucault. Il doit, aussi, permettre l'obtention de cycles d'hystérésis quasi rectangulaires et de champs coercitifs relativement élevés. Ces conditions ne peuvent se trouver réunies qu'avec des ferrites, bien que, commercialement, il n'existe pas encore des ferrites ayant, à la fois, un champ coercitif de l'ordre de 10 Oersteds et un cycle d'hystérésis rectangulaire. Les seuls ferrites commerciaux ayant un champ coercitif convenable sont ceux qui ont été préparés en vue des applications radioélectriques dans la bande des 50 à 150 MHz. Ce sont, en général, des ferrites de Nickel Zinc, dont le cycle d'hystérésis n'est pas rectangulaire. Il est cependant possible, à partir des ferrites de ce type, d'obtenir, au moyen de traitements

thermiques ou magnétiques spéciaux des ferrites à cycles rectangulaires. En particulier l'orientation thermomagnétique sur des ferrites de Nickel Zinc, par exemple, contenant des traces d'oxyde de Cobalt et présentant le caractère permivar [15] donne des cycles d'hystérésis rectangulaires [16] [17].

Certains des échantillons de ferrites dont nous disposions étaient du type permivar. Nous avons pu, au moyen d'un traitement thermomagnétique d'orientation convenable, obtenir des cycles d'hystérésis dont le coefficient de rectangularité B_r/B_{\max} était légèrement supérieur à 0,9.

Les ferrites de Nickel Zinc présentant le caractère permivar sont donc parfaitement adaptés à l'application envisagée ici, à condition, bien entendu, de leur faire subir un traitement d'orientation.

Remarquons enfin que pour rendre l'énergie dissipée par les pertes Joules dans l'enroulement de commande aussi faible que possible, il faut augmenter au maximum le volume de cuivre.

V.3.2. - Générateur de Hall

Les considérations qui doivent guider dans le choix des caractéristiques du générateur sont essentiellement la valeur de la mobilité et l'influence de la température. Nous avons vu, en effet que le facteur de qualité dépend du carré de la mobilité, mais que d'autre part, l'influence de la température est d'autant plus importante que le coefficient de Hall du matériau est élevé. Comme, pour les échantillons d'InSb, la mobilité décroît en même temps que le coefficient de Hall, il faut faire un compromis.

Comme les applications envisagées sont toutes basées sur un fonctionnement en impulsions, dont le seul caractère important est le signe, nous avons opté pour un matériau à forte mobilité bien que l'influence de la température soit importante.

Nous avons donc choisi des échantillons d'InSb dont le coefficient de Hall vaut environ $400 \text{ cm}^3/C_b$.

V.4 - Tableau des caractéristiques d'un ensemble à effet Hall

Il est possible, maintenant, de faire le résumé des caractéristiques essentielles d'un ensemble à effet Hall :

1° - Générateur :

- Dimensions aussi faibles que possible
- Epaisseur aussi faible que possible
- Semi-conducteur : Antimonium d'Indium de constante de Hall
 $400 \text{ cm}^3/C_b$

2° - Circuit magnétique :

- Ferrite à cycle d'hystérésis rectangulaire
(par exemple ferrite de type perminvar)
- Champ coercitif de l'ordre de 10 Oe
- Enroulement de commande de résistance aussi faible que possible, donc volume de cuivre maximum.

De plus, les dimensions du circuit magnétique et du générateur sont liées aux caractéristiques magnétiques du ferrite par la relation :

$$L/d = B_r / H_c$$

V.5 - Etude des coefficients de rectangularité de différents types de tores de ferrite

V.5.1 - Généralités

Comme nous l'avons vu déjà, il n'existe pas de ferrites commerciaux répondant aux conditions requises de champ coercitif et de forme du cycle d'hystérésis. Nous avons donc étudié, afin de les comparer, les coefficients de rectangularité de différents types de tores de ferrite : les premiers sont exactement du type commercial, les seconds sont des tores constitués de ferrite du type perminvar, et les derniers sont des tores dont la section va en décroissant au voisinage de l'entrefer. Nous avons étudié les coefficients de rectangularité définis précédemment :

$$\gamma = B_r / B_{\max} \quad \text{et} \quad \gamma' = B'_r / B_r$$

en fonction du champ maximum d'excitation.

De plus nous avons calculé le facteur $\gamma \gamma'^2$ qui intervient dans l'expression de l'indice de qualité. Tous les ferrites étudiés étaient des ferrites de Nickel Zinc préparés industriellement par la Société LTT sous la dénomination : Fernilite 1105. Leurs caractéristiques nominales sont :

- Perméabilité initiale : 15
- Induction de saturation à 20°C : 2 500 Gauss
- Champ coercitif : 15 Oersteds
- Résistivité : 10^5 Ohm.cm
- Point de Curie : 580°C
- Fréquence d'utilisation dans les applications radioélectriques :
50 à 120 MHz

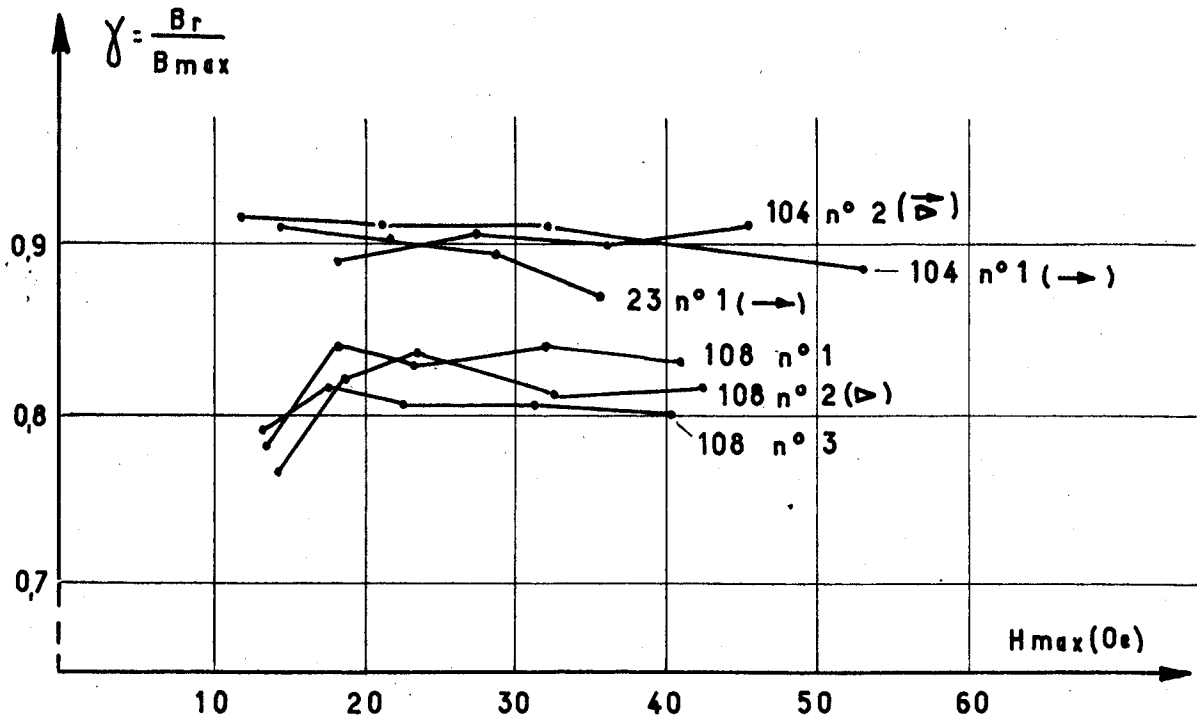


fig 28

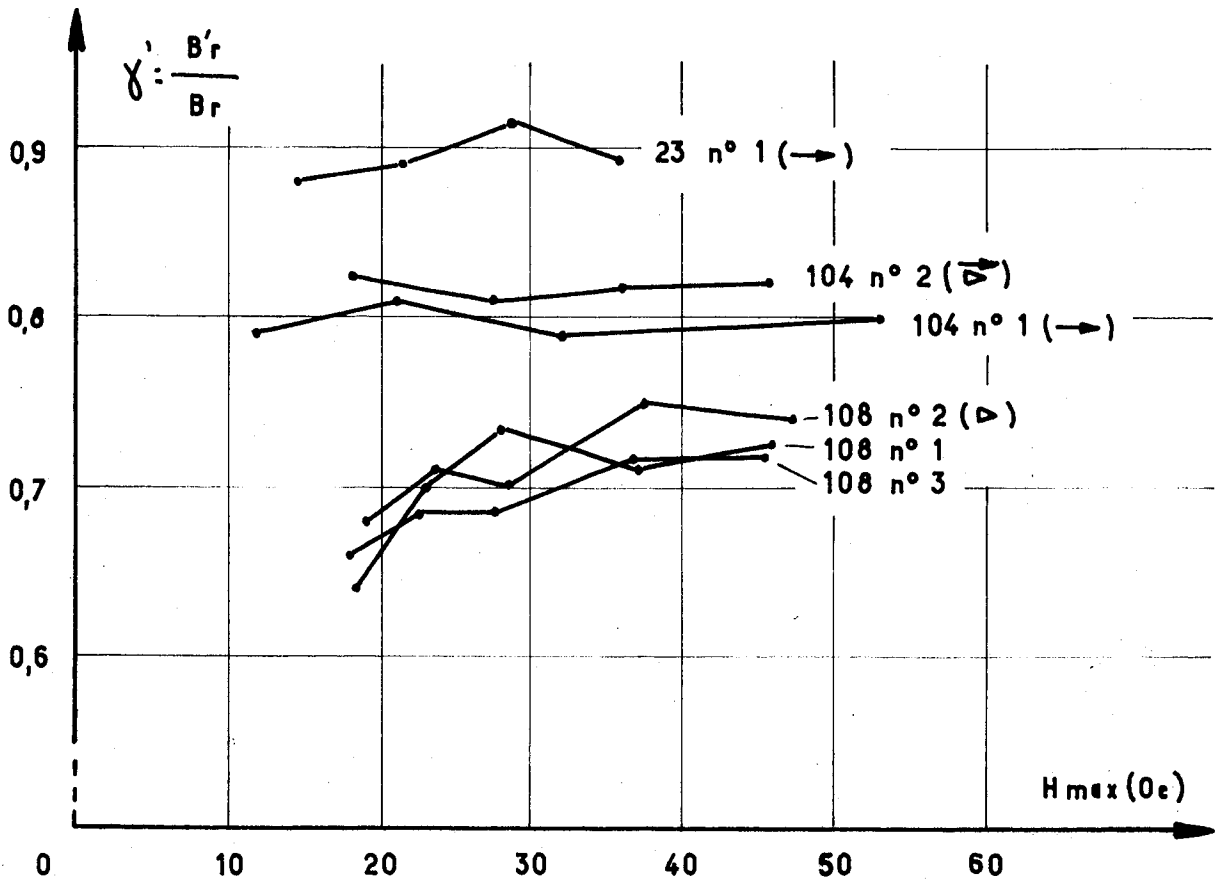


fig. 29

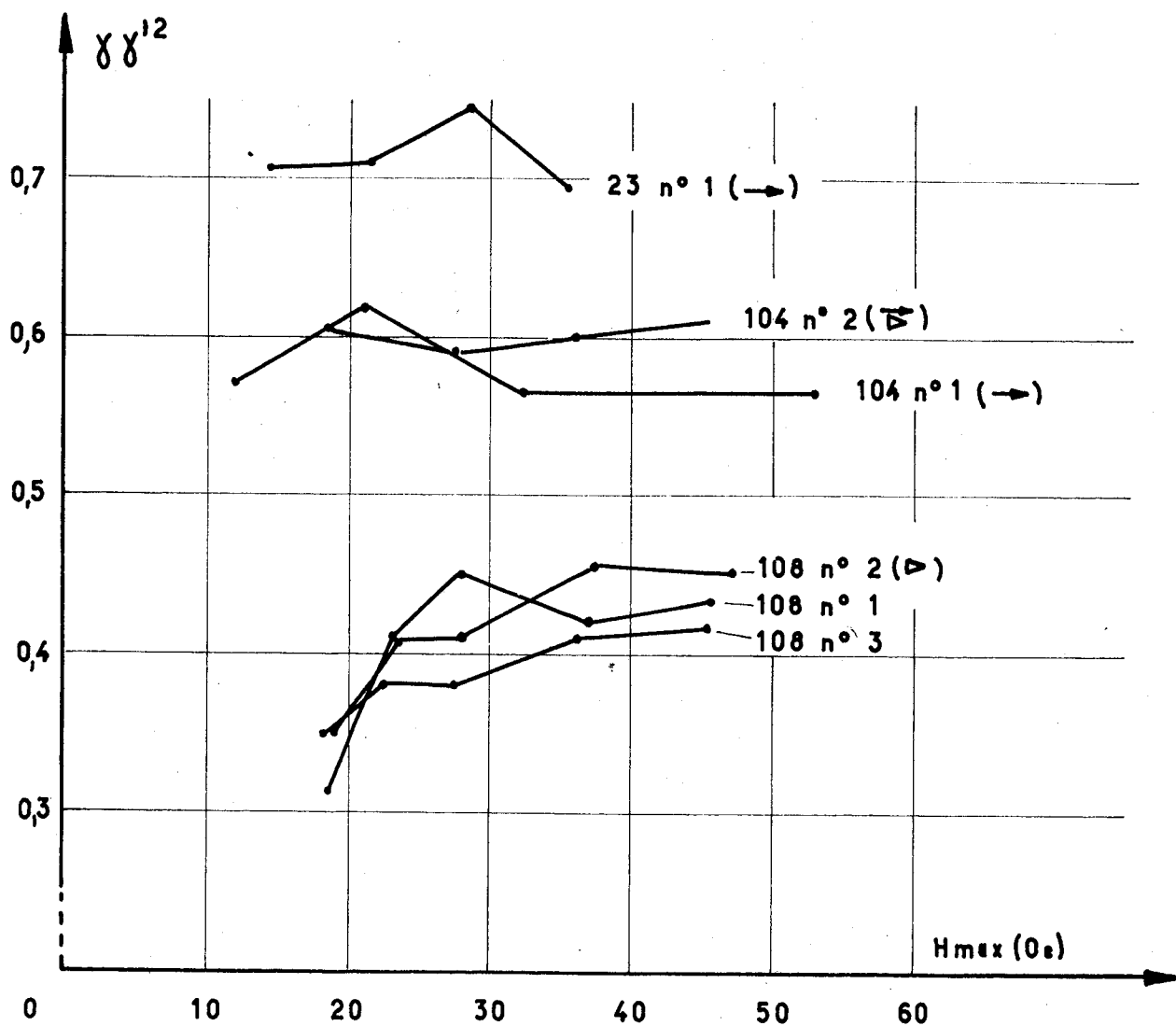


fig. 30

V. 5.2 - Résultats

Nous avons groupé les résultats dans les figures 28, 29 et 30 qui indiquent l'allure des variations de χ, χ' et $\chi \chi'^2$ en fonction du champ maximum d'excitation. Les tores à section variable sont repérés au moyen du symbole : (\triangleright) ceux qui sont du type perminvar et qui ont subi un traitement d'orientation sont repérés par le symbole : (\rightarrow) et ceux qui se rattachent à ces deux catégories simultanément sont caractérisés par le symbole : ($\overrightarrow{\triangleright}$).

Les résultats concernent 3 tores orientés et 3 tores de type classique, 1 tore de chacune de ces catégories étant à section variable.

Les valeurs de χ et χ' sont sensiblement plus élevées pour les tores orientés que pour les tores ordinaires. Cela se traduit par une différence importante des valeurs du facteur $\chi \chi'^2$ qui vaut environ 0,6 pour les premiers et seulement 0,4 pour les seconds.

De plus, si dans le cas des ferrites orientés le facteur $\chi \chi'^2$ reste constant pour les champs supérieurs à 10 Oersteds, il n'en va pas de même pour les ferrites ordinaires, car en dessous de 25 Oe ce facteur décroît rapidement.

Remarquons enfin, que les tores à section variable ne présentent aucun avantage au point de vue rectangularité.

On peut conclure de cette étude que les tores de ferrite de type perminvar et à section constante sont les mieux adaptés, au point de vue rectangularité, à l'application envisagée ici.

V. 5.3 - Traitement thermomagnétique des tores de ferrite de type perminvar

Les tores de ferrite de type perminvar, dont nous disposons, présentaient, avant le traitement thermomagnétique d'orientation, un cycle d'hystérésis de forme étranglée, ce qui les rendait tout à fait impropres à l'application envisagée. Nous leur avons donc fait subir un traitement destiné à rendre leur cycle d'hystérésis aussi rectangulaire que possible [16] [17]

Ce traitement consiste à appliquer au tore de ferrite préalablement porté à une température légèrement inférieure au point de Curie, un champ magnétique dans le sens longitudinal. Il faut ensuite diminuer la température jusqu'à l'ambiante en conservant le champ magnétique d'orientation.

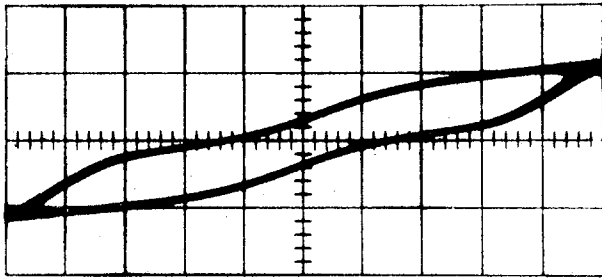


FIG. 31 a

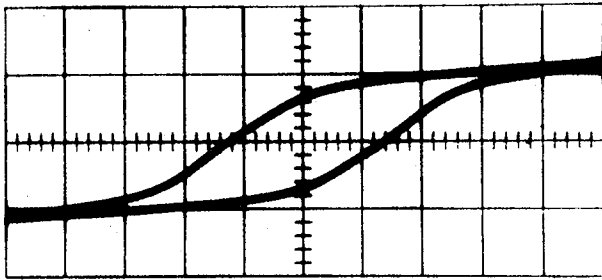


FIG. 31 b

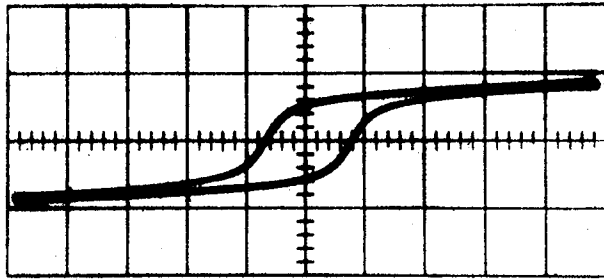


FIG. 31 c

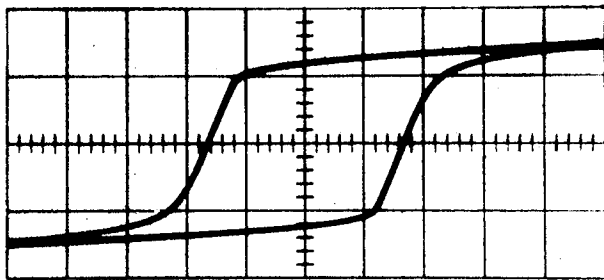


FIG. 31 d

Pour cela nous avons disposé, sur chacun des tores à traiter, 2 bobines en fil d'aluminium isolé à l'alumine : l'une destinée à produire le champ d'orientation, possède un grand nombre de spires, l'autre ne nécessite que quelques spires pour l'observation de l'induction. Ce système permet d'observer en permanence le cycle d'hystérésis pendant toute la durée du traitement. Le tore, ainsi bobiné, est plongé à l'intérieur d'un four permettant d'atteindre des températures voisines du point de Curie du ferrite (580°C environ). Pendant la période d'échauffement, on observe le cycle d'hystérésis. A partir d'une certaine température, le cycle commence à se déformer et l'induction maximum décroît.

Lorsque cette induction a diminué de moitié environ on applique le champ magnétique continu d'orientation en faisant passer dans le bobinage primaire un courant continu. Ensuite, après quelques minutes, on retire le tore du four tout en conservant le courant d'orientation jusqu'au moment où la température du tore est à nouveau voisine de l'ambiante.

Les photographies de la figure 31 montrent les cycles d'hystérésis observés au cours du traitement : 31a : à froid avant le traitement - 31b : sous l'influence de la température le cycle se déforme - 31c : l'instant précédant l'application du courant continu d'orientation - 31d : à froid après le traitement.

V.6 - Influence de la forme du tore sur le coefficient de fuite

Nous avons déjà étudié dans le chapitre précédent, le coefficient de fuite S des tores FN 23 n°1 et FN 104 n°1. Ces tores avaient une section constante. On peut se demander si un tore, dont la section est décroissante au voisinage de l'entrefer, a un coefficient de fuite inférieur à celui d'un tore à section constante. C'est pourquoi nous avons comparé les coefficients de fuite des tores FN 104 n°1 et FN 104 n°2, ce dernier ayant une section variable telle que $S_3/S_1 = 2,7$, S_3 et S_1 étant les sections situées à l'opposé de l'entrefer et au niveau de celui-ci.

Pour calculer le coefficient de fuite du tore FN 104 n°2 il faut revenir à la valeur exacte de B_r telle que nous l'avons définie dans le chapitre précédent à partir de E_{ca} au moyen des formules (22) ou (23). Cette méthode est rendue obligatoire par le fait que le tore FN 104 n° 2 n'a pas une section constante.

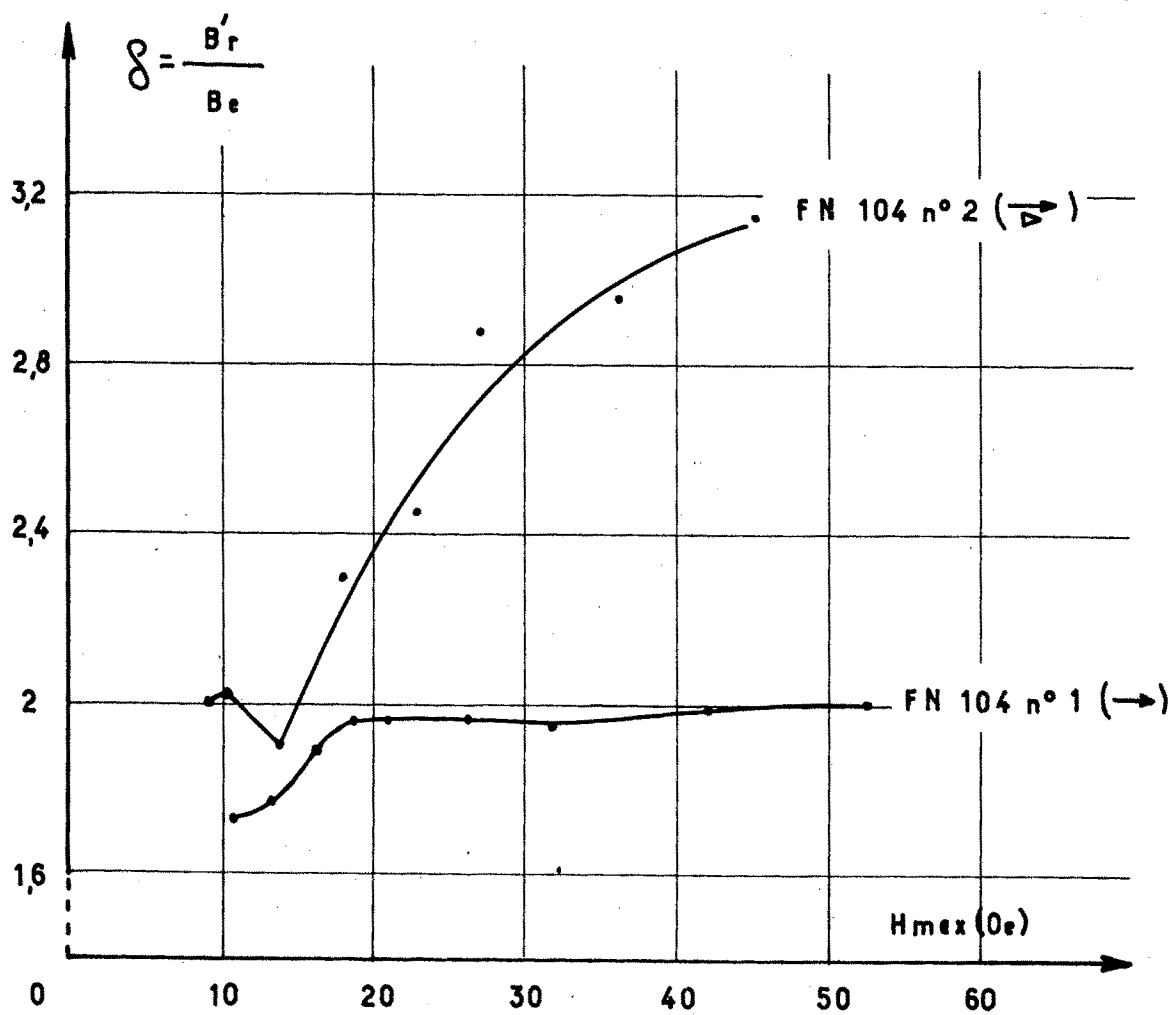


FIG 32

La figure 32 montre l'allure des variations du coefficient S des 2 tores étudiés, en fonction du champ maximum d'excitation. On voit que, si, pour le tore FN 104 n°1, S est presque constant, il n'en va pas de même dans le cas du tore FN 104 n°2, pour lequel S croît rapidement avec le champ maximum d'excitation. Ce n'est qu'aux environs de 10 à 15 Oersteds que les coefficients S sont identiques pour les deux tores. La croissance de S , pour le tore FN 104 n°2 s'explique par le fait que la zone de ferrite située de part et d'autre de l'entrefer se sature beaucoup plus vite que le reste du tore.

On peut conclure de cette étude qu'un tore à section variable ne présente aucun avantage par rapport à un tore à section constante.

V.7 - Réalisation

V.7.1 - Généralités

La réalisation des différents éléments d'un ensemble à effet Hall, conformément aux conclusions des études précédentes, se heurte à des difficultés technologiques dues, le plus souvent, aux faibles dimensions exigées et à la fragilité des matériaux employés. Ces difficultés sont particulièrement importantes pour le générateur de Hall et l'entrefer.

L'association correcte du générateur et du circuit magnétique n'est pas, non plus, très aisée. C'est pourtant d'elle que dépend, en partie, l'indice de qualité de l'ensemble par l'intermédiaire du coefficient de remplissage de l'entrefer.

V.7.2 - Réalisation du générateur de Hall

Pour la réalisation du générateur, nous avons procédé en 3 étapes :
1° Obtention d'une plaquette de semi-conducteur aux cotes voulues - 2° Soudures des 4 électrodes - 3° Amincissement du générateur par attaque chimique.

Les dimensions des plaquettes d'Antimoniure d'Indium que nous nous sommes proposés d'obtenir étaient environ 0,4 - 3 - 2 mm. Les échantillons d'InSb dont nous disposions ayant des dimensions supérieures, nous avons dû les user au moyen d'un marbre puis les couper à l'aide d'une lame d'acier finement acérée.

Pour monter le générateur lui-même nous avons opéré de la façon suivante :

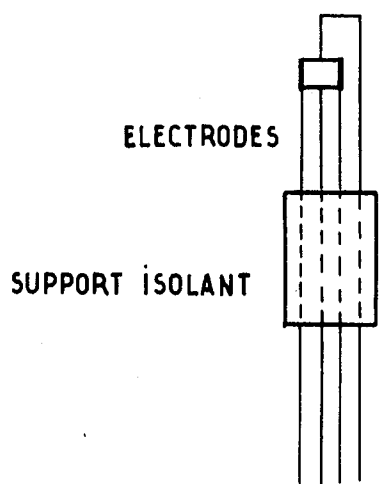


FIG 33

tout d'abord, nous avons fixé les électrodes, constituées de 4 fils de cuivre de 0,25 mm, dans un support isolant. Ensuite, après avoir donné aux électrodes une forme convenable (figure 33) nous les avons soudées sur la plaquette au moyen de soudure à l'étain. Pour amener l'épaisseur du générateur à une valeur voisine de 0,1 à 0,2 mm, nous avons utilisé une solution chimique composée de 20 cm³ d'eau, de 5 cm³ d'oxygène à 130 volumes et de 2 cm³ d'acide fluorhydrique à 40 %.

Signalons qu'il est possible d'opérer un contrôle quasi permanent du processus d'amincissement en mesurant périodiquement les impédances caractérisant le générateur, ce qui permet d'arrêter l'attaque chimique au moment où l'épaisseur voulue est atteinte. Nous avons pu ainsi obtenir des générateurs dont l'épaisseur était environ 0,12 mm. La photographie de la figure 34 montre l'un de ces générateurs.

V.7.3 - Réalisation du circuit magnétique

Pour cette réalisation il faut, d'une part, disposer sur un tore de ferrite de petites dimensions une bobine de commande possédant un volume de cuivre aussi grand que possible, et, d'autre part, couper le tore par un entrefer très étroit. De plus, il faudrait, que la bobine soit répartie sur l'ensemble du tore afin de diminuer les fuites magnétiques. Cela pose un problème difficile à résoudre; on devrait, en effet, monter le générateur de Hall dans l'entrefer avant de réaliser la bobine de commande qui le recouvrirait.

Nous n'avons pas trouvé de solution pratique à ce problème. C'est pourquoi le bobinage est interrompu sur une fraction de la périphérie du tore (voir figure 19) afin de laisser un libre accès à l'entrefer que nous avons réalisé au moyen d'une scie diamantée.

Les différents tores que nous avons utilisés étaient obtenus à partir des tores commerciaux (Fernilite 1105 de LTT) par rectification à la meule. Le diamètre moyen des tores rectifiés étaient d'environ 15 à 20 mm et leur section variait entre 6 et 12 mm². L'entrefer produit par la scie diamantée valait environ 0,5 mm.

La photographie de la figure 34 montre un tore de ferrite muni de son entrefer.

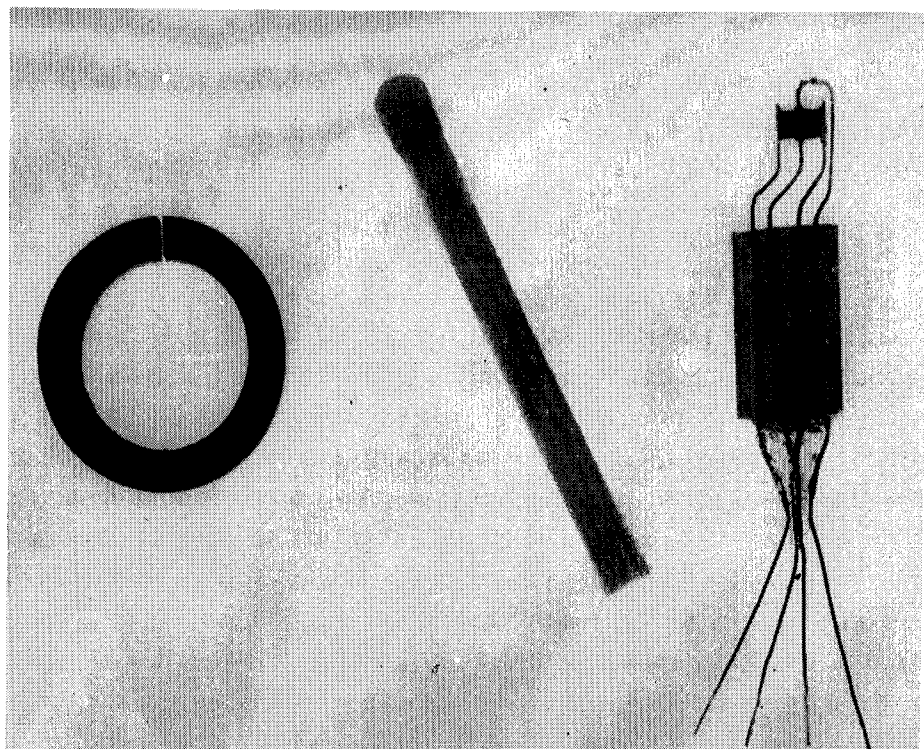


Figure 34 : Tore de ferrite
et générateur à effet Hall

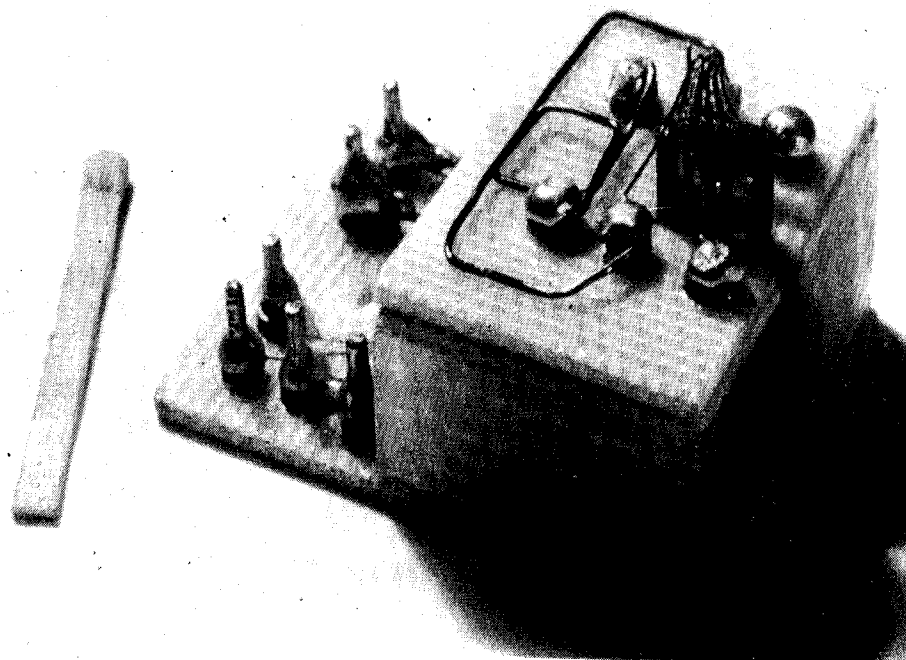


Figure 35 : Ensemble à effet Hall

Signalons enfin que nous sommes parvenus à placer environ 3 à 4 spires de fil de cuivre de 0,6 mm isolé émail, par millimètre de tore.

V.7.4 - Montage du générateur dans l'entrefer

Cette opération aboutit à la réalisation définitive d'un ensemble. La fragilité du générateur la rend délicate. De plus, comme nous venons de le voir l'épaisseur du générateur n'est que de 0,1 à 0,2 mm et celle de l'entrefer de 0,5 à 0,55 mm. Cet écart est la cause directe de la mauvaise utilisation de l'entrefer. Pour tenter de remédier à cet inconvénient, nous avons enrobé le générateur au moyen d'un amalgame de poudre de ferrite et de paraffine. Cela fait, nous avons placé le générateur dans l'entrefer en le fixant par l'intermédiaire du support isolant contenant les électrodes sur le circuit magnétique. Enfin, nous avons enrobé le circuit magnétique et le générateur avec de la paraffine. Cet enrobage fait perdre à l'ensemble la plus grande partie de sa fragilité.

La photographie de la figure 35 montre l'aspect d'un ensemble complètement terminé. On distingue sur le dessus, le support isolant et les sorties des électrodes du générateur, et, de côté, les sorties des enroulements de commande et d'étude.

De plus, on voit, de chaque côté du support isolant, 2 spires connectées sur l'entrée et la sortie du générateur. Ces spires sont couplées de façon à réaliser un neutrodynage pour les surtensions d'origine selfique apparaissant à l'entrée et à la sortie du générateur de Hall, lorsqu'il est excité par des impulsions dont les temps de montée et de descente sont très brefs.

V.8 - Résultats

Nous avons réalisé plusieurs ensembles conformément aux méthodes décrites plus haut. Nous avons déterminé leur indice de qualité (gF) en étudiant expérimentalement, d'une part leur puissance maximum d'excitation, et d'autre part, leur énergie de commande E_c que nous avons admis être égale à la moitié de l'énergie de commande en régime alternatif E_{ca} . Les valeurs de (gF) ainsi déterminées sont de l'ordre de quelques unités. Ce résultat est en assez bon accord avec ceux de la fin du chapitre précédent.

Il est cependant certain que des perfectionnements technologiques permettraient d'accroître les valeurs de (gF), en particulier, en ce qui concerne le bobinage qui devrait recouvrir la totalité du tore, et le coefficient d'utilisation de l'entrefer.

CHAPITRE VI

FONCTIONNEMENT, en REGIME IMPULSIF, D'UN ENSEMBLE A EFFET HALL

VI.1 - Introduction

L'utilisation d'un ensemble à effet Hall doit se faire en régime impulsif. C'est pourquoi nous avons étudié différents modes de fonctionnement impulsif, soit pour la commande d'un ensemble, soit pour l'excitation de son générateur de sortie.

Dans ce chapitre, nous étudierons, tout d'abord, l'indice de qualité (gF) d'un ensemble en fonction du champ magnétique maximum qui lui est appliqué, afin de choisir un point de fonctionnement correct. Ensuite nous étudierons les impulsions de tension ou de courant de commande, ou d'excitation d'un ensemble.

Enfin, nous donnerons les résultats d'un essai de commande d'un ensemble par un autre ensemble.

VI.2 - Point de fonctionnement d'un ensemble

Certains des facteurs qui interviennent dans l'expression de l'indice de qualité (gF) d'un ensemble dépendent du champ magnétique maximum d'excitation H_{\max} appliqué au tore par l'intermédiaire de l'enroulement de commande. C'est le cas de la mobilité μ , des coefficients de rectangularité γ et γ' et du coefficient de fuite δ . En fait, μ et δ varient peu, tandis que γ et γ' décroissent rapidement lorsque H_{\max} tend vers zéro à partir du champ coercitif H_c . Cela montre que, pour les faibles valeurs de H_{\max} , la valeur de (gF) dépend principalement du facteur $\gamma \gamma'^2$ et par conséquent, décroît lorsque H_{\max} diminue.

Pour les fortes valeurs de H_{\max} , tous les facteurs cités plus haut restent approximativement constants. Il faut alors considérer l'influence des pertes Joules dans la résistance de l'enroulement de commande. L'énergie correspondante croît rapidement. Il en résulte une augmentation de l'énergie de commande réelle et, par conséquent une décroissance de l'indice de qualité effectivement mesurable sur un ensemble.

Ces considérations montrent que l'indice de qualité effectif (gF) doit présenter un maximum pour une certaine valeur de H_{\max} , puisque, pour les faibles valeurs de H_{\max} , (gF) croît et pour les fortes valeurs il décroît.

Pour vérifier cela, nous avons étudié expérimentalement les variations de l'indice de qualité de 2 ensembles (C et D). Plus précisément nous avons étudié le rapport gF/Pe.

Revenons à la définition de l'indice (gF). On sait que $g = E_s/E_c$ (E_s : énergie de sortie, E_c : énergie de commande).

On a évidemment : $E_s = \eta_{\max} E_{ex}$; E_{ex} étant l'énergie d'excitation et finalement, on a : $gF = \eta_{\max} \frac{P_e}{E_c}$

η_{\max} est le rendement maximum du générateur de Hall de l'ensemble envisagé, P_e , qui est la puissance maximum d'excitation, est indépendante de H_{\max} . Il est donc commode d'étudier, de préférence, le rapport $gF/Pe = \eta_{\max}/E_c$ qui ne fait plus intervenir cette puissance.

Nous avons mesuré, pour les ensembles C et D, les valeurs du rendement maximum η_{\max} et celles de l'énergie de commande E_c que nous avons confondues avec la moitié de l'énergie de commande en régime alternatif mesurée directement à 1000 Hz.

Le rendement maximum a été déterminé à partir des impédances Z_{11} , Z_{22} et Z_t au moyen de la formule (10) :

$$\eta_{\max} = \frac{Z_t^2}{4 Z_{11} Z_{22}}$$

Les figures 36 et 37 donnent l'allure des variations du rapport gF/Pe en fonction de H_{\max} pour les ensembles C et D.

On constate effectivement l'existence d'un maximum. Ce maximum correspond à un point de fonctionnement optimum qui se situe, pour l'ensemble C aux environs de 16 Oe, et pour l'ensemble D un peu au dessus de 20 Oe.

VI.3 - Fonctionnement en régime impulsif

VI.3.1 - Généralités

Le fonctionnement en impulsions est d'une grande souplesse.

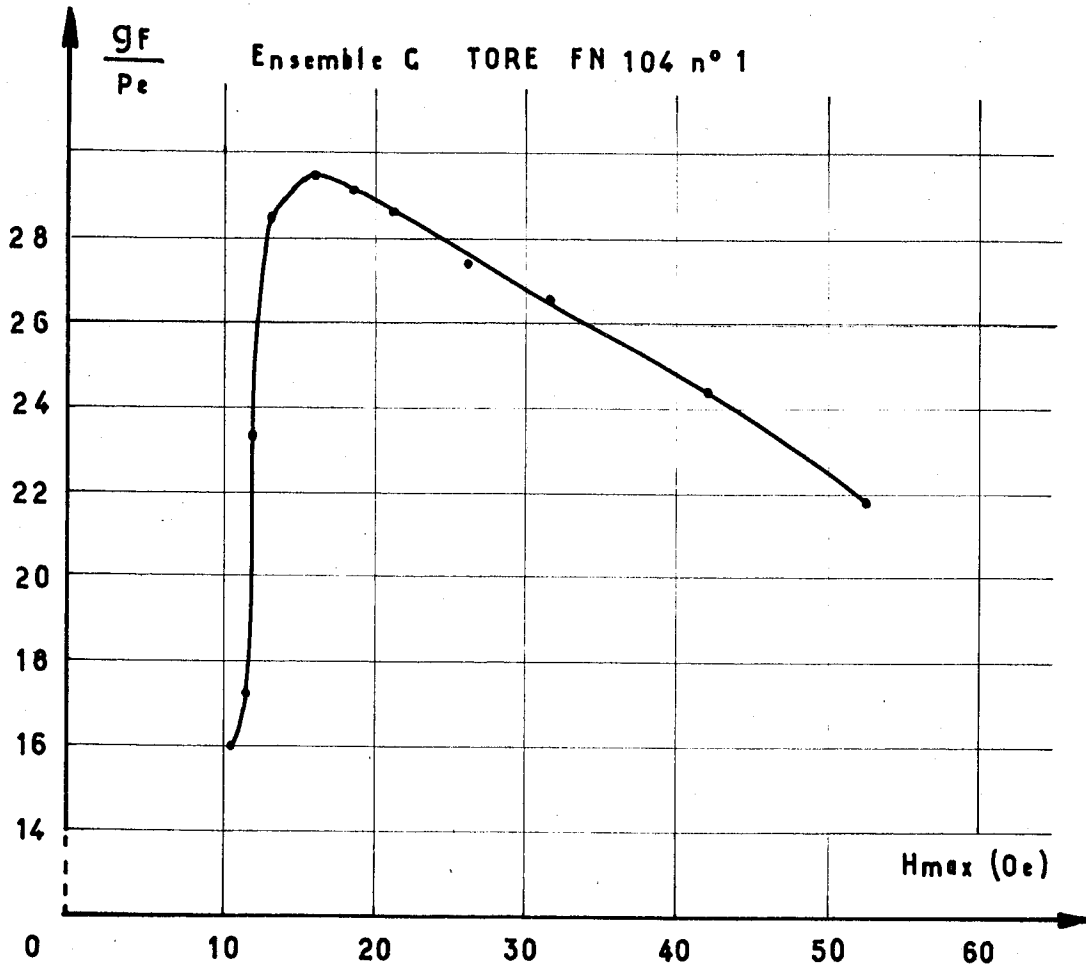


FIG. 36

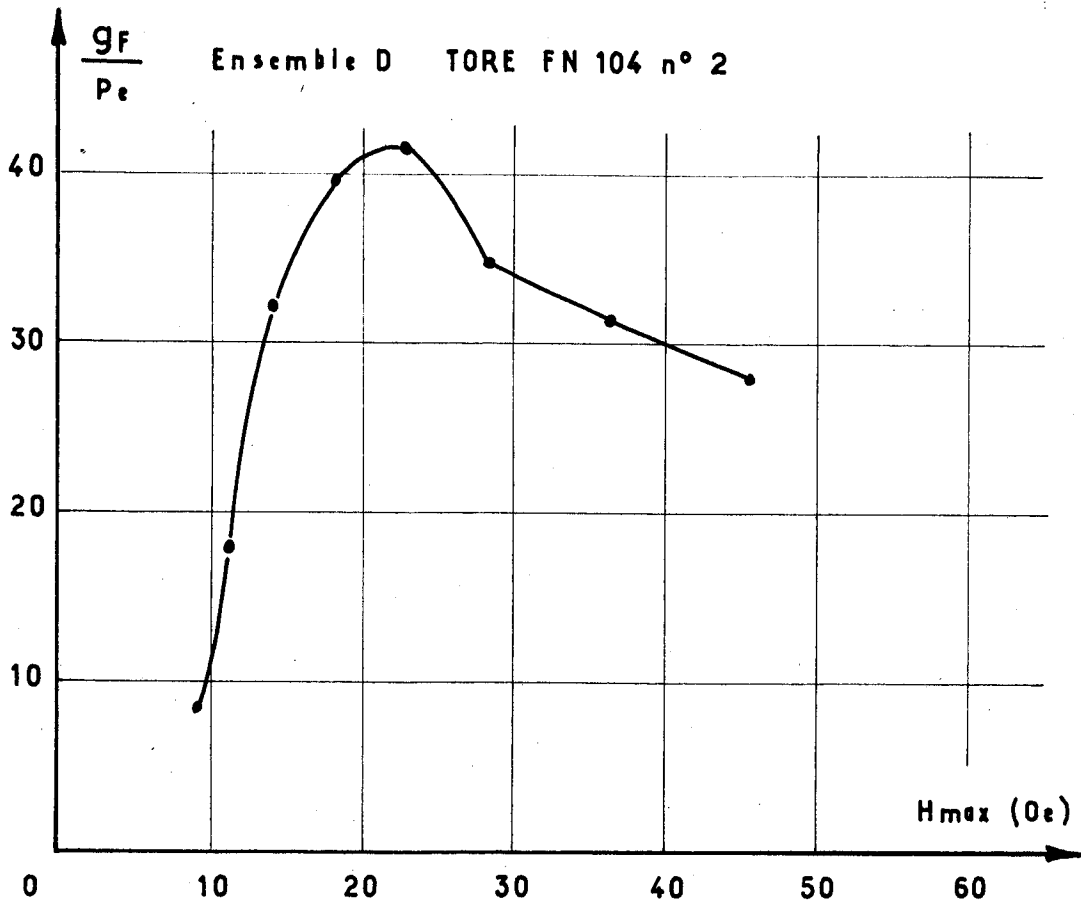


FIG. 37

En effet, il permet par un choix judicieux de la fréquence de récurrence F , de la largeur τ des impulsions, de la forme même des impulsions, de réaliser la commande d'un ensemble au moyen de procédés très divers. De plus, on peut obtenir, à la sortie de l'ensemble, une énergie répartie dans le temps sous la forme la mieux adaptée à une utilisation déterminée. En outre, comme nous l'avons déjà vu, il est possible de trouver une fréquence de fonctionnement telle que la mise en cascade de plusieurs ensembles soit possible.

La commande en impulsions consiste à fournir, à l'ensemble commandé, en une ou plusieurs impulsions, l'énergie nécessaire pour faire passer son état magnétique d'une valeur à la valeur opposée. Il revient au même de dire que la commande sera effectuée lorsque le courant de commande aura atteint la valeur I_{cmax} correspondant au point de fonctionnement de l'ensemble considéré.

Remarquons que l'utilisation d'un train d'impulsions, à la place d'une seule impulsion, permet de mieux répartir la commande dans le temps.

Une question importante doit être envisagée. C'est le rendement de la commande. Ce rendement correspond au rapport de l'énergie de commande à l'énergie qu'il faut fournir au générateur de commande. Ce rendement dépend de la bonne adaptation de la charge au générateur de commande, principalement dans le cas où ce générateur est le générateur de Hall d'un autre ensemble. Cette adaptation est difficile à réaliser parce que la charge est constituée par une self-inductance.

Cette adaptation dépend de la forme des impulsions. C'est pourquoi nous avons étudié la commande d'un ensemble dans le cas de 2 formes particulières d'impulsions : rectangulaires et exponentielles.

VI. 3. 2 - Commande en impulsions rectangulaires

L'impulsion de commande est fournie par un générateur de tension impulsive V_o ayant une résistance interne ρ . Ce générateur débite sur la self-inductance constituée par la bobine de commande de l'ensemble. Le courant de commande I_c suivra donc les lois bien connues d'établissement d'un courant électrique dans un circuit résistif et selfique. La valeur maximum du courant de commande sera : $I_{cmax} = V_o / (\rho + r_c)$; r_c étant la résistance de l'enroulement de commande. Ce courant ne sera atteint qu'au bout d'un certain temps qui est le temps de commande de l'ensemble.

Pour obtenir un courant I_{cmax} correspondant au point de fonctionnement de l'ensemble à commander, il faut donc choisir en conséquence les valeurs de V_0 et de ρ . Pour faire varier la constante de temps du circuit et par conséquent le temps de commande, il faudra agir sur ρ .

Bien entendu, dès que le courant I_{cmax} est atteint, l'impulsion de commande doit être terminée.

Remarquons enfin, qu'une bonne adaptation est impossible puisque la tension V aux bornes de l'enroulement de commande et le courant I_c sont constamment variables en sens inverse.

L'adaptation optimum n'est réalisée qu'au moment précis où l'on a :

$$V/I_c = \rho$$

VI. 3. 3 - Etude expérimentale de la commande en impulsions rectangulaires

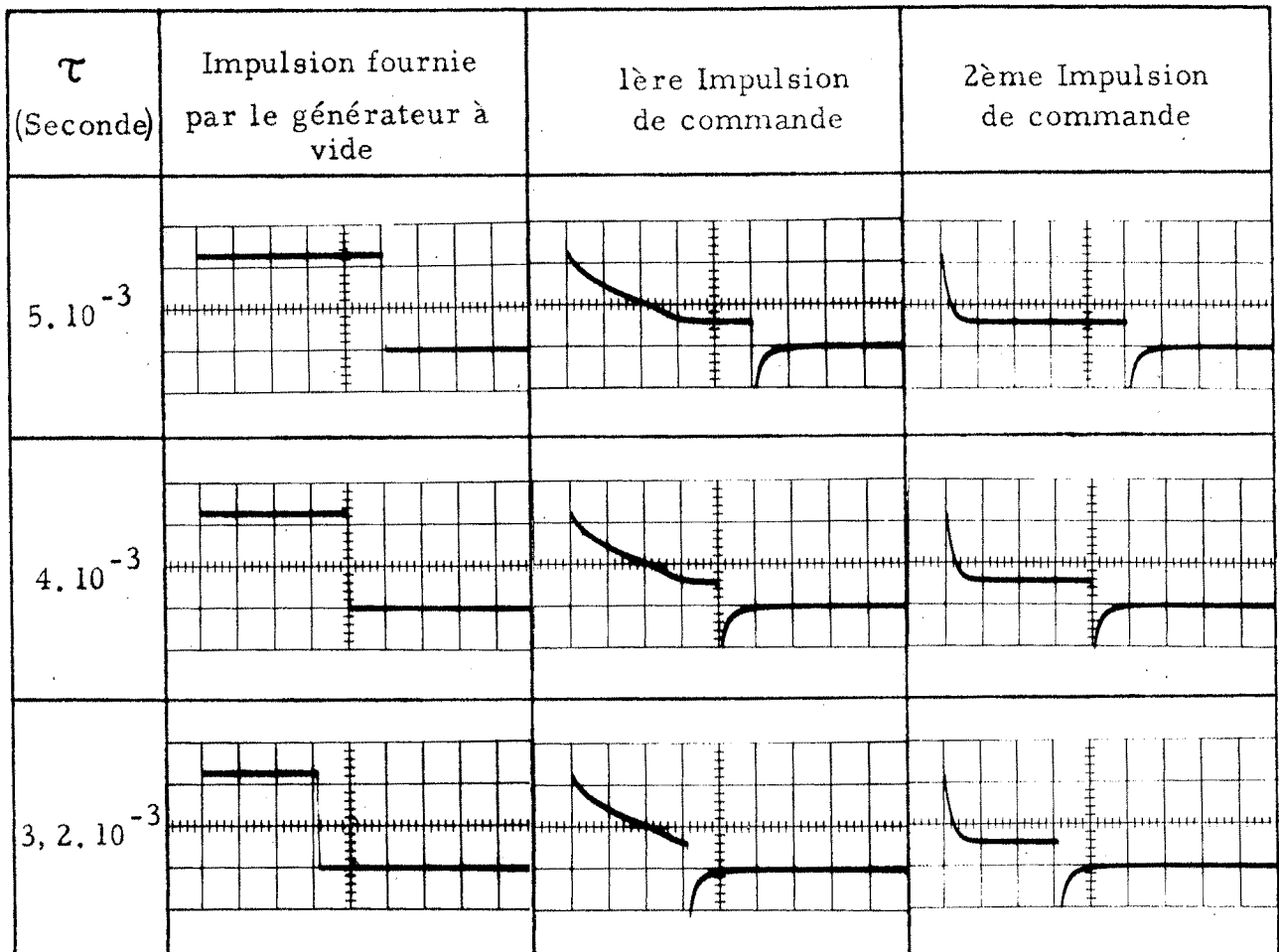
Nous avons étudié expérimentalement la commande en impulsions rectangulaires de l'ensemble C. Pour cela, nous avons utilisé un générateur d'impulsions de tension dont la résistance interne est égale à un Ohm.

Ce générateur, qui peut fournir des impulsions isolées, comporte des étages de commande constitués de bascules monostables et des étages de sortie réalisant une forte amplification de courant au moyen de transistors de puissance.

Nous avons choisi un courant de commande de 350 mA, légèrement supérieur à celui qui correspond au point de fonctionnement de l'ensemble C. La résistance interne de la bobine de commande valant 0,31 ohm, le générateur doit fournir une tension à vide de 460 millivolts.

Pour déterminer le temps de commande, nous avons effectué des essais avec des impulsions de durée variant de 1 milliseconde à 6 millisecondes.

Après chaque impulsion de commande le nouvel état magnétique de l'ensemble est indiqué par le générateur de Hall placé dans l'entrefer. Nous avons trouvé ainsi que la durée minimum de commande permettant au courant de commande d'atteindre la valeur choisie : 350 mA est légèrement supérieure à 3 millisecondes.

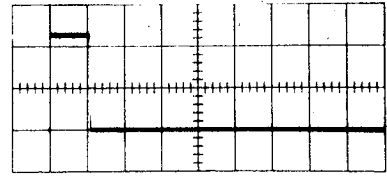


Sensibilité verticale : $S_y = 0,2$ volt/carreau
 Sensibilité horizontale : $S_x = 10^{-3}$ seconde/carreau

Figure 38 a

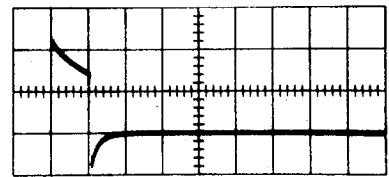
Commande en impulsions rectangulaires

Impulsion fournie
par le générateur à vide

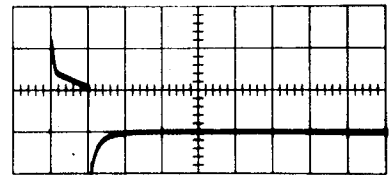


Avant la commande : $Z_t = -130 \cdot 10^{-3}$ Ohm $B'_r = -660$ Gauss

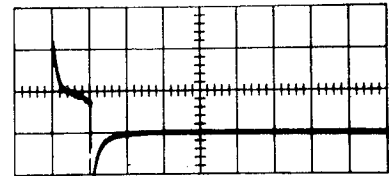
Première commande :
 $Z_t = +12 \cdot 10^{-3}$ ohm $B'_r = +60$ gauss



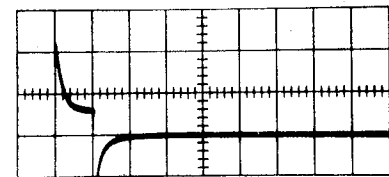
Deuxième commande :
 $Z_t = +86,5 \cdot 10^{-3}$ ohm $B'_r = +435$ gauss



Troisième commande :
 $Z_t = +120 \cdot 10^{-3}$ ohm $B'_r = +600$ gauss



Quatrième commande :
 $Z_t = +130 \cdot 10^{-3}$ ohm $B'_r = +660$ gauss



$S_y = 0,2$ volt/carreau $S_x = 10^{-3}$ seconde/carreau

Figure 38 b

Si l'impulsion de commande n'a que 1 milliseconde de durée, il en faut au moins 3 pour effectuer la commande. En fait, 3 impulsions ne suffisent pas tout à fait pour effectuer complètement la commande. Il faudrait, en réalité, 3 impulsions d'une durée légèrement supérieure à 1 milliseconde.

Ce résultat est très intéressant car il montre que l'on peut aussi bien réaliser la commande avec une seule impulsion de durée τ qu'avec un nombre n d'impulsions de durée τ/n .

Les oscillogrammes de la figure 38a montrent, d'une part, les impulsions de tension à vide fournies par le générateur de commande, et d'autre part, les impulsions de tension apparaissant aux bornes mêmes de l'enroulement de commande.

On voit que la première impulsion de commande présente, à son début, une tension égale à la tension fournie à vide par le générateur de commande. Ensuite cette tension décroît jusqu'à un palier dont l'amplitude est égale à $r_c I_{c\max}$. Dans la seconde impulsion, il n'y a plus que les pointes de tension dues à la self-inductance de fuite et au passage de l'induction rémanente B_r à l'induction maximum B_{\max} ou réciproquement. Dans le cas de l'impulsion de 1 milliseconde, c'est seulement la quatrième impulsion qui prend cet aspect.

La figure 38b montre les différentes impulsions correspondant au cas de $\tau = 1$ milliseconde. Pour chaque impulsion de commande, l'état magnétique de l'ensemble est indiqué, ainsi que la valeur de l'impédance de transfert Z_t du générateur de Hall.

VI. 3. 4 - Commande en impulsions de forme exponentielle

Dans le cas de la commande en impulsions rectangulaires, nous avons vu qu'il n'est pas possible d'adapter la charge au générateur de commande. Il faudrait, en effet, que l'on ait en permanence : $V/I_c = \rho$; V étant la tension apparaissant aux bornes de l'enroulement de commande, on a :

$$V = K(dI_c)/(dt)$$

Il faudrait donc que I_c soit de la forme : $I_c = I_0 \cdot \exp(+at)$ (29)

i_0 et a étant des constantes et t représentant le temps.

Si K est constant, on peut donc réaliser une bonne adaptation à condition d'effectuer la commande avec des impulsions de courant I_c ayant cette forme, et, en choisissant a de façon à satisfaire la relation :

$$Ka = \rho$$

De plus, il faut que I_c puisse atteindre à la fin de l'impulsion de durée τ la valeur $I_{c \text{ max}}$ correspondant au point de fonctionnement de l'ensemble à commander. ($a \tau$) est alors égal à $\text{Log} (I_{c \text{ max}} / i_o)$.

Dans ce fonctionnement, la charge présentée par l'ensemble est équivalente à une résistance R constante dans les domaines où la réluctance du circuit magnétique est constante.

Dans ces conditions, l'énergie fournie à l'enroulement de commande est :

$$R \int_0^{\tau} I_c^2 \cdot dt$$

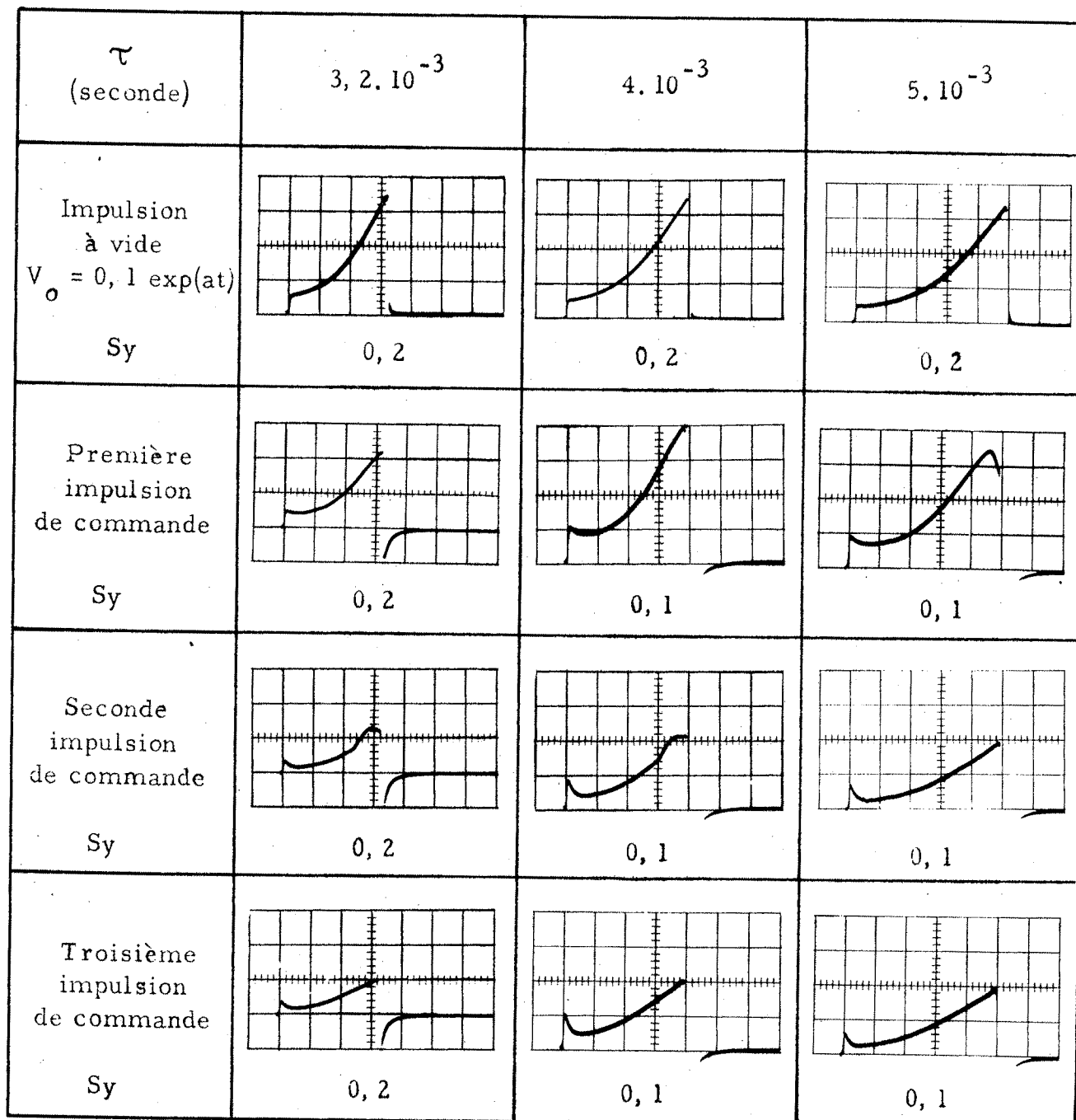
τ étant la durée de l'impulsion. Finalement, compte tenu de la forme exponentielle de I_c , la relation énergétique caractérisant la commande est :

$$E_c = R \frac{i_o^2}{2a} \left[\exp (+2a\tau) - 1 \right] \quad (30)$$

E étant donnée, ainsi que le produit $a\tau$, on peut, à partir de cette relation, calculer pour chaque valeur de R choisie, la valeur de τ correspondante, ou réciproquement. En particulier, on peut très bien déterminer τ pour avoir $R = \rho$ et réaliser ainsi une bonne adaptation.

VI. 3.5 - Etude expérimentale de la commande en impulsions de forme exponentielle

Nous avons étudié expérimentalement la commande en impulsions exponentielles de l'ensemble C. Nous avons, tout d'abord déterminé au moyen de la formule (30) le temps de commande τ . Les données permettant de faire le calcul sont, d'une part, l'énergie de commande E de l'ensemble C, d'autre part, l'expression du courant fourni par le générateur de commande. Ce générateur, qui a une résistance interne de 1 Ohm, est constitué des mêmes éléments de base que le générateur utilisé dans la commande en impulsions rectangulaires. Il est muni en plus, d'étages intermédiaires constitués d'un intégrateur de Miller et d'un tube à pente variable, permettant d'obtenir un courant



Sy : sensibilité verticale en volt/carreau
 Sx : sensibilité horizontale : 10^{-3} seconde/carreau

Figure 39

Commande en impulsions exponentielles

de sortie de forme exponentielle. Ce générateur fournit une tension :
 $V_o = 0,1 \exp(a t)$ (V_o est en volts). Si l'on admet que $R = \rho = 1$ Ohm,
 et si l'on veut obtenir un courant $I_{cmax} = 350$ mA, il faudra que :

$$V_{omax} = 2 \rho I_{cmax} = 700 \text{ mV.}$$

La valeur de $a \tau$ correspondante est donc : 1,95. Le courant de commande sera évidemment de la forme : $I_c = i_o \exp(a t)$ avec $i_o = 0,05$ Ampères. De plus, on sait que E_c vaut environ 10^{-4} Joules. La formule (30) permet de calculer a et par conséquent τ . On trouve $\tau = 3,2 \cdot 10^{-3}$ secondes.

Afin de vérifier ce résultat, nous avons effectué différents essais de commande avec des valeurs de τ allant de 3,2 msec à 5 msec. Nous avons constaté qu'il fallait environ 4 msec pour obtenir une commande normale. Ce résultat est en assez bon accord avec la valeur calculée. Si le temps de commande réel est légèrement plus grand que le temps calculé, cela vient probablement de ce que la valeur de E_c , égale à 10^{-4} Joules, est une valeur correspondant à 0,25 milliseconde (mesurée en régime alternatif à 1000 Hz). Comme, le temps de commande réel est supérieur à cela, il faudrait majorer E_c d'une certaine valeur correspondant à l'accroissement des pertes Joules.

Les oscillogrammes de la figure 39 montrent les impulsions de tension à vide fournies par le générateur de commande ainsi que les 3 premières impulsions de commande apparaissant aux bornes de l'enroulement commandé. On voit que la forme de la première impulsion de commande est voisine, sur la plus grande partie de sa durée, de celle de l'impulsion fournie à vide par le générateur de commande. Cela montre que l'ensemble commandé se comporte bien comme une charge sensiblement constante.

Ce résultat est en bon accord avec l'hypothèse que nous avons faite, au cours du chapitre IV, et qui consistait à assimiler le cycle d'hystérésis à un quadrilatère limité par 2 paires de droites parallèles. Dans ces conditions, le point du cycle d'hystérésis correspondant à l'état magnétique du tore se déplace le long d'une droite pendant le passage de $-B'_r$ à $+B_{max}$. Par contre, comme c'est le cas pour $\tau = 5$ msec, si on atteint la zone de saturation, il y a une déformation de l'impulsion.

Les légères surtensions situées au début de chaque impulsion de commande correspondent à la brusque croissance du courant à la valeur i_o .

On peut expliquer les différences entre les deuxièmes et les troisièmes impulsions de commande dans les cas $\tau = 3,2$ msec et $\tau = 4$ msec de la façon suivante : la première commande a amené le tore dans l'état correspondant à l'induction rémanente B'_r . Lorsque l'on envoie une seconde impulsion de commande, la charge présentée par l'ensemble commandé est plus faible. Le courant atteint est donc plus élevé ; c'est pourquoi, à partir de B'_r , l'état magnétique du tore décrit un cycle d'hystérésis secondaire qui aboutit à une valeur de B'_r légèrement supérieure, d'où la légère anomalie présentée par les impulsions correspondantes.

Les impulsions suivantes font passer l'induction de B'_r à B'_{max} le long de la zone saturée du cycle d'hystérésis, sans décrire de cycle secondaire.

VI.3.6 - Cas où le générateur de commande est un générateur de Hall

Il est intéressant d'étudier les énergies d'excitation à fournir à un générateur de Hall susceptible de commander l'ensemble C dans les conditions que nous venons de décrire. Supposons que le générateur de Hall, devant fournir les impulsions de commande, soit caractérisé par l'impédance de transfert : Z_t et par l'impédance d'entrée : Z_{11} .

1° - Cas des impulsions rectangulaires :

L'amplitude des impulsions de commande doit être : 0,46 volts et leur durée : 3,2 millisecondes.

Le courant d'excitation devra donc être : $I_{ex} = 0,46/Z_t$. L'énergie d'excitation correspondante sera :

$$E_{ex} = \frac{Z_{11}}{Z_t^2} \cdot I_{ex}^2 = \frac{Z_{11}}{Z_t^2} \cdot 6,8 \cdot 10^{-4} \text{ Joules}$$

2° - Cas des impulsions exponentielles :

Nous avons vu que l'impulsion fournie à vide par le générateur de commande est : $V_o = 0,1 \exp(at)$ avec $(a\tau) = 1,95$ et $\tau = 4 \cdot 10^{-3}$ sec.

Le courant d'excitation sera donc : $I_{ex} = \frac{0,1 \exp(at)}{Z_t}$

L'énergie correspondante sera :

$$E_{\text{ex}} = \frac{Z_{11}}{Z_t^2} \int_0^{\tau} I_{\text{ex}}^2 (dt)$$

Ce qui donne :

$$E_{\text{ex}} = \frac{Z_{11}}{Z_t^2} \cdot 5 \cdot 10^{-4} \text{ Joules}$$

On voit que la commande en impulsions exponentielles nécessite une énergie d'excitation environ 25 % plus faible que la commande en impulsions rectangulaires.

VI.4 - Commande d'un ensemble par un autre ensemble

Pour commander un ensemble au moyen de l'énergie de sortie d'un ensemble identique, il faut que le rapport $g = E_s / E_c$ soit égal ou supérieur à 1. La valeur de l'indice de qualité (gF) des ensembles s_c utilisés est bien déterminée. Pour avoir $g = 1$, il suffit de choisir une fréquence de fonctionnement égale à l'indice de qualité.

Nous avons vu à la fin du chapitre IV que les valeurs de (gF), que nous pouvions atteindre, étaient égales à quelques unités (4 ou 5).

Nous sommes effectivement parvenu à commander l'ensemble C au moyen de l'ensemble E, dans un fonctionnement en impulsions rectangulaires.

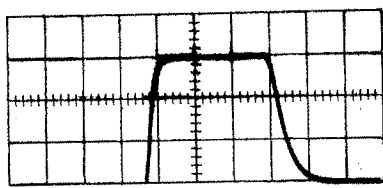
Nous avons vu précédemment que, pour commander l'ensemble C avec un générateur ayant une résistance interne de 1 Ohm, il fallait une impulsion de tension à vide dont l'amplitude soit de 0,46 volt et la durée :

$$\tau = 3,2 \text{ millisecondes.}$$

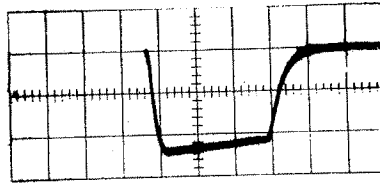
Pour obtenir, du générateur de l'ensemble C, une telle amplitude, il faut l'exciter avec un courant valant environ 6 ampères pendant 3,2 millisecondes.

L'élévation de température correspondante interdit ce mode de fonctionnement. Afin de mieux répartir l'énergie d'excitation, nous avons adopté un autre mode de fonctionnement, en remplaçant cette impulsion de 3,2 msec par un train d'impulsions de durée égale à 0,3 milliseconde. Théoriquement, il en faudrait 11. Afin de le vérifier, nous avons effectué la manipulation suivante :

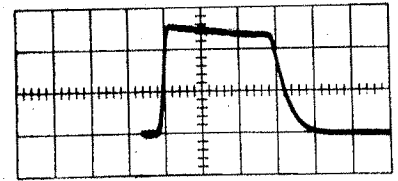
Excitation à 50 Hz du générateur de l'ensemble E



Courant d'excitation
 $S_y = 2 \text{ Amp/carreau}$



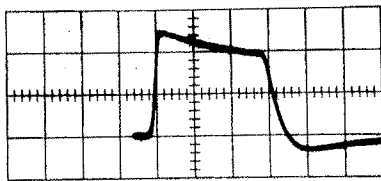
Commande négative



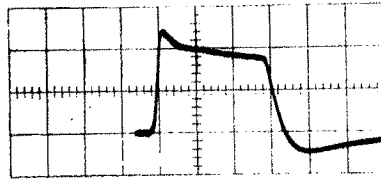
Commande positive

Impulsions de sortie
($S_y = 0,2 \text{ volt/carreau}$)

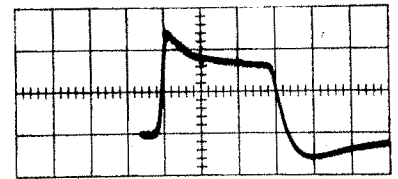
Commande de l'ensemble C
($S_y = 0,2 \text{ volt/carreau}$)



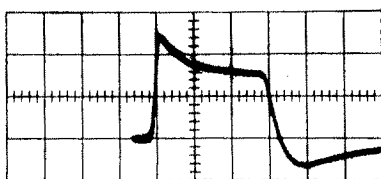
1ère commande



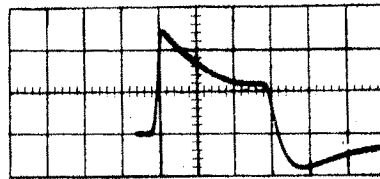
2ème commande



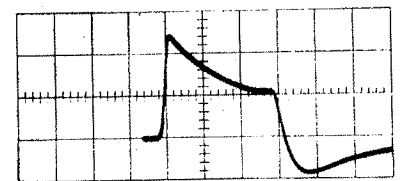
3ème commande



4ème commande



10ème commande



12ème commande

S_x : sensibilité horizontale : $0,1 \cdot 10^{-3} \text{ sec/carreau}$

Figure 40

Commande de l'ensemble C par l'ensemble E

Nous avons, tout d'abord, étudié l'excitation du générateur de l'ensemble E avec des impulsions de courant de 6 Ampères et de durée égale à 0,3 milliseconde. Leur fréquence de répétition était de 50 Hz. Nous n'avons pas fait directement l'essai impulsion par impulsion, car cette méthode n'aurait pas tenu compte de l'échauffement moyen du générateur.

Nous avons déterminé ainsi la forme des impulsions de sortie que le générateur de l'ensemble E peut délivrer. Ensuite, en opérant impulsion par impulsion, nous avons réglé l'excitation pour obtenir les mêmes impulsions de sortie.

Enfin, en contrôlant l'état magnétique de l'ensemble commandé, nous avons compté le nombre d'impulsions nécessaires pour effectuer complètement la commande. Nous avons ainsi déterminé qu'il fallait au moins 12 impulsions. Ce résultat est tout à fait satisfaisant car il correspond à une fréquence de fonctionnement de 4 Hz environ, puisque l'on peut disposer de 50 impulsions par seconde. En outre cette fréquence correspond aux résultats indiqués à la fin du chapitre IV.

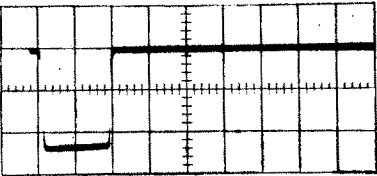
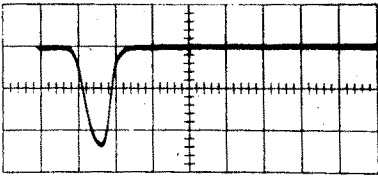
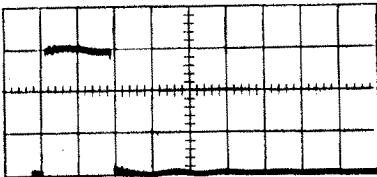
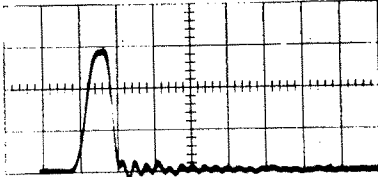
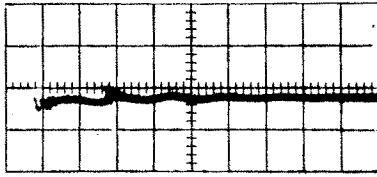
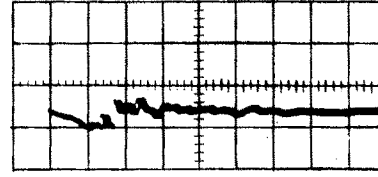
Les oscillogrammes de la figure 40 montrent tout d'abord, dans le fonctionnement à 50 Hz, les impulsions d'excitation et de sortie à vide, pour une commande positive et négative, du générateur de l'ensemble E. Ensuite on voit les 4 premières impulsions de commande ainsi que la dixième et la douzième.

VI.5 - Considérations diverses

VI.5.1 - Excitation d'un générateur de Hall en impulsions très courtes

Comme nous l'avons vu déjà, il est très possible de réaliser l'excitation d'un générateur de Hall au moyen d'impulsions de courant qui peuvent être brèves. Les seules limites que nous avons pu constater proviennent des éléments parasites propres aux connexions, principalement leur self-inductance qui provoque des surtensions d'autant plus importantes que les temps de montée et de descente des impulsions sont plus courts. Pour éviter cet inconvénient, nous avons dû réaliser un neutrodynage au moyen de spires connectées côté excitation et côté sortie du générateur, et couplées entre elles de façon à compenser les surtensions d'origine selfique. Ce procédé donne d'excellents résultats.

On peut voir, par exemple, dans les oscillogrammes de la figure 41, les impulsions d'excitation et de sortie de durée égale à 1 microseconde et 0,1 microseconde, concernant le générateur de l'ensemble D. Les impulsions de

Durée de l'impulsion en secondes	10^{-6}	$0,1 \cdot 10^{-6}$
Courant d'excitation $S_y = 0,5 \text{ Amp/carreau}$		
Tension de sortie commande positive $S_y = 0,1 \text{ volt/carreau}$		
Tension de sortie commande négative $S_y = 0,05 \text{ volt/carreau}$		
S_x en sec/carreau	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$0,1 \cdot 10^{-6}$

S_y : sensibilité verticale

S_x : sensibilité horizontale (en seconde/carreau)

Figure 41

Excitation en impulsions très courtes

sortie correspondent, d'une part, à une commande positive de l'ensemble D, d'autre part, à une commande négative. Dans le premier cas, on a une impulsion de sortie qui reproduit exactement la forme de l'impulsion d'excitation. On observe seulement une légère oscillation parasite. Dans le second cas, l'amplitude est nulle. Cela montre que le générateur de l'ensemble D est caractérisé par les impédances de transfert : $Z_{21} = 2Z_t$ et $Z_{12} = 0$.

On voit, par cet exemple, que, à condition, de soigner particulièrement les circuits extérieurs du générateur de Hall, il est possible de réaliser l'excitation en impulsions très courtes.

VI. 5. 2 - Ensemble à deux enroulements de commande

Un ensemble, muni de deux enroulements de commande, possède des avantages importants par rapport à l'ensemble simple. On peut en effet le commander simultanément par 2 voies. Mais il suffit qu'un seul des enroulements soit commandé pour que l'ensemble enregistre l'information correspondante. De plus, si les 2 enroulements sont commandés avec des informations de sens opposé, l'ensemble ne change pas d'état.

Nous avons réalisé un ensemble à 2 enroulements de commande. Afin de rendre les enroulements aussi symétriques que possible, ils ont été bobinés simultanément. Pour vérifier la symétrie, nous avons monté les 2 enroulements en opposition et nous les avons commandés au moyen de la même impulsion de courant. L'état de l'ensemble n'est pas modifié par une telle commande. De plus l'impulsion de tension apparaissant aux bornes des enroulements n'est absolument pas déformée et se confond avec celle que l'on aurait aux bornes d'une résistance égale à la résistance des 2 enroulements de commande.

VI. 5. 3 - Polarisation du générateur de Hall

Nous avons vu, dans le chapitre I, que les impédances de transfert réelles d'un générateur de Hall sont de la forme $Z_{21} = Z_t + Z_o$ et $Z_{12} = Z_t - Z_o$, Z_o pouvant d'ailleurs être nulle.

Il est donc intéressant de pouvoir agir sur Z_o , en particulier si l'on veut obtenir le fonctionnement correspondant à $Z_{21} = 2Z_t$ et $Z_{12} = 0$, ou bien pour équilibrer un générateur de façon à avoir :

$$Z_{21} = -Z_{12} = Z_t$$

Le premier de ces fonctionnements fait correspondre à une information de commande positive une grandeur de sortie positive ou négative, et à une information de commande négative une grandeur de sortie nulle. Quant au second il donne une grandeur de sortie de même signe que l'information de commande et dont la valeur absolue est la même quelque soit le signe de la commande. De plus, l'équilibrage des électrodes transversales réduit à zéro la tension de sortie lorsque l'induction magnétique est nulle.

Différents procédés ont été envisagés :

1° - Polarisation du circuit de sortie par l'intermédiaire d'un courant dérivé des électrodes d'excitation (figure 42)

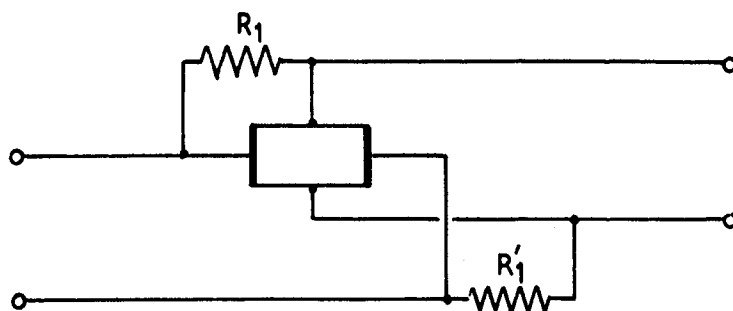


Figure 42

Les résistances R_1 et R'_1 permettent de faire varier les impédances de transfert Z_{21} et Z_{12} du quadripôle formé par le générateur et les résistances, dans de grandes proportions.

2° - On ajoute une f. e. m. en série dans le circuit de sortie, conformément à la figure 43.

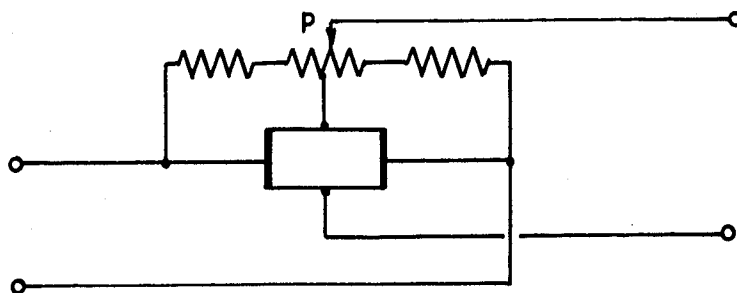


Figure 43

On règle Z_{21} et Z_{12} au moyen du potentiomètre P. Comme la précédente, cette méthode est très efficace, mais elle a l'inconvénient d'accroître la résistance du circuit de sortie.

3° - Une troisième méthode [18] utilisant un générateur à 5 électrodes (figure 44) permet d'ajuster les impédances Z_{21} et Z_{12} au moyen du potentiomètre P.

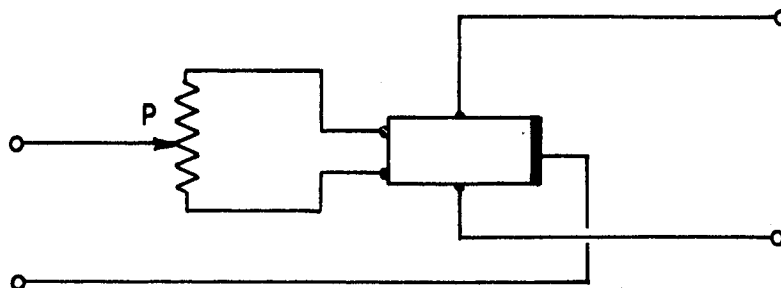


Figure 44

Cette méthode, contrairement aux précédentes, ne permet pas de faire varier les impédances de transfert dans de très grandes proportions.

VI.6 - Conclusion

Ce chapitre nous a permis, tout d'abord, de mettre en évidence le point de fonctionnement optimum d'un ensemble. Ensuite, nous avons étudié différents modes de commande en impulsions, en particulier avec des impulsions rectangulaires et exponentielles. Ces dernières permettent de réaliser l'adaptation de la charge présentée par l'ensemble commandé, au générateur de commande.

L'étude expérimentale de la commande de l'ensemble C par un générateur ayant une résistance interne de 1 Ohm a mis en évidence un temps de commande de l'ordre de 3 à 4 millisecondes.

De plus, nous sommes parvenus à effectuer la commande d'un ensemble, au moyen d'un autre ensemble et cela, à une fréquence d'environ 4 Hz.

PERSPECTIVES D'AVENIR

Pour juger des perspectives d'avenir, il faut envisager les deux caractéristiques essentielles de l'ensemble à effet Hall, tel que nous l'avons décrit :

- 1° - Difficultés technologiques de réalisation et mauvais rendement énergétique.
- 2° - Multiples possibilités de cet ensemble.

Nous en avons décrit quelques unes, en particulier dans le chapitre II, où nous avons mis en évidence les opérations logiques qu'un ensemble à un enroulement de commande permet de réaliser : opérations des tableaux I et II ; mémoire ; régénération.

Remarquons que les informations et les énergies associées sont transmises dans un seul sens, du circuit magnétique au générateur, car réciproquement, le générateur ne peut absolument pas réagir sur le circuit magnétique. Cela constitue un avantage important principalement dans les circuits à séquences.

En outre, il faut insister sur le fait que l'ensemble garde la mémoire de la dernière opération réalisée, opération dont le résultat peut être régénéré, puisque la grandeur de sortie est l'image de la grandeur d'excitation, que l'on peut calibrer convenablement.

Les propriétés d'un ensemble à deux enroulements de commande offrent des possibilités intéressantes au point de vue logique. Examinons ces propriétés :

- 1° - Il suffit qu'un des enroulements soit commandé pour que l'ensemble enregistre une information.
- 2° - Si les deux enroulements sont commandés simultanément par des informations de sens contraire, l'ensemble garde l'état qu'il avait auparavant.

Considérons maintenant les opérations logiques de base : "réunion" et "intersection" effectuées sur deux grandeurs A et B. Ces opérations sont schématisées dans le tableau VIII (A et B peuvent prendre les valeurs + 1 et - 1).

A	B	"réunion"	"intersection"	n° du résultat ou de la combinaison
+ 1	+ 1	+ 1	+ 1	1
+ 1	- 1	+ 1	- 1	2
- 1	+ 1	+ 1	- 1	3
- 1	- 1	- 1	- 1	4

Tableau VIII

On voit que les résultats 1 et 4 sont les mêmes pour les deux opérations. Seuls les résultats 2 et 3 diffèrent.

L'ensemble à deux enroulements de commande donne directement les résultats 1 et 4. Par contre, si les enroulements sont commandés simultanément par les informations de sens contraire : + 1 et - 1 (combinaison 2 et 3), le résultat correspondra à l'état initial de l'ensemble (propriété 2°). Par conséquent, il suffit, avant chaque opération, de mettre l'ensemble dans l'état + 1 pour obtenir une "réunion" et dans l'état - 1 pour une "intersection".

On peut aussi envisager de réaliser d'autres opérations, comme la commutation, en utilisant un générateur muni de 3 paires d'électrodes [9]. Avec un tel générateur, il est possible d'orienter l'énergie entrant dans une paire d'électrodes sur l'une des 2 autres paires d'électrodes, suivant le sens de l'induction magnétique.

Tous les ensembles que nous avons étudiés répondaient à la condition d'optimisation (18), c'est à dire que le point de fonctionnement magnétique se trouvait exactement au coude du cycle d'hystérésis. Il serait intéressant de construire des ensembles tels que le point de fonctionnement soit placé dans la partie quasi horizontale du cycle d'hystérésis. Cela donnerait un certain seuil à la commande, seuil qui permettrait d'utiliser les méthodes de sélection bien connues dans les techniques d'emploi des tores à cycle d'hystérésis rectangulaire. De plus cela rendrait l'ensemble moins sensible aux impulsions parasites.

On voit que les possibilités de l'ensemble à effet Hall sont nombreuses et intéressantes. Il conviendrait donc, pour les utiliser dans les meilleures conditions, de perfectionner les procédés technologiques de réalisation afin, d'une part de faciliter la fabrication des ensembles, et d'autre part, d'améliorer leur indice de qualité. Pour faciliter la fabrication, il faudrait mettre au point une forme de circuit magnétique permettant, à la fois de réaliser aisément un entrefer de faibles dimensions et de bobiner commodément un enroulement de commande. De plus, pour accroître l'indice de qualité, il faudrait utiliser des matériaux magnétiques aussi conformes que possible aux exigences théoriques (principalement cycle d'hystérésis rectangulaire) et parvenir à placer le bobinage sur l'ensemble du circuit magnétique, y compris l'entrefer, afin de diminuer les fuites magnétiques.

La résolution de ces problèmes technologiques permettrait la réalisation d'un certain nombre d'ensembles de haute qualité, ce qui ouvrirait la voie à des applications intéressantes, parmi lesquelles on peut citer essentiellement les opérations logiques, la mémoire, la régénération, la transmission et l'aiguillage des informations.

- CONCLUSION -

Les travaux, qui font l'objet de cette thèse, ont essentiellement porté sur l'étude d'un ensemble constitué par l'association d'un circuit magnétique rémanent et d'un générateur à effet Hall, en vue de son application aux circuits logiques.

Nous avons, tout d'abord, analysé les différents paramètres régissant ce dispositif, ce qui nous a conduit à établir l'expression d'un indice de qualité qui tient compte du rendement énergétique.

L'étude de ces paramètres a mis en évidence les caractères optimaux essentiels d'un ensemble à effet Hall : semi-conducteur à forte mobilité ; matériau magnétique à cycle d'hystérésis rectangulaire ; dimensions des différents éléments aussi faibles que possible. C'est pourquoi nous avons utilisé, pour les générateurs de Hall, de l'Antimoniure d'Indium, qui a une mobilité beaucoup plus élevée que le Germanium, et pour le circuit magnétique, du ferrite à cycle d'hystérésis aussi rectangulaire que possible.

Ensuite nous avons mis au point des procédés technologiques élémentaires permettant la réalisation des ensembles.

Enfin, une série de mesures nous a permis de préciser le comportement en régime impulsif de cet ensemble. Les résultats obtenus concernent, d'une part, l'énergie de commande, et l'indice de qualité, et d'autre part, le temps de commande. Les énergies de commande sont de l'ordre de 10^{-4} Joules, tandis que l'indice de qualité vaut environ 4 ou 5. Quant au temps de commande, il est de quelques millisecondes pour une tension de 0,5 volts environ.

En outre, nous avons pu réaliser, avec le dispositif étudié, un certain nombre d'opérations logiques qui ouvrent la voie à des applications intéressantes.

Dans les perspectives d'avenir, nous avons souligné la nécessité d'améliorer les procédés technologiques de réalisation ainsi que l'indice de qualité, afin de pouvoir utiliser au maximum les possibilités de ce montage.

Cette étude a été effectuée au Laboratoire de Haute Fréquence de la Faculté des Sciences de Grenoble, sous la direction de Monsieur le Professeur J. BENOIT. Je tiens à lui adresser mes plus vifs remerciements pour l'aide et les conseils avisés qu'il m'a prodigués et pour le bienveillant intérêt qu'il a toujours porté à mon travail.

Je remercie Monsieur le Professeur Louis NEEL, membre de l'Institut, qui s'est intéressé à cette recherche et a bien voulu me faire l'honneur de présider le Jury.

Que Monsieur R. PERRET, Maître de Conférences, qui m'a aidé et conseillé durant toute cette étude, trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je remercie également Monsieur J. MOUSSIEGT, Maître de Conférences, qui a bien voulu faire partie du Jury.

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur F. H. RAYMOND, Directeur de la Société d'Electronique et d'Automatisme, qui m'a suggéré cette recherche, ainsi qu'à Monsieur GUILLAUD, Directeur du Laboratoire de Magnétisme à Bellevue, et à Monsieur RODOT, qui m'ont fourni les échantillons d'Antimoniure d'Indium.

Il me reste enfin à dire combien, les multiples possibilités du Laboratoire, et surtout l'ambiance amicale que j'y ai trouvée, sans oublier les discussions profitables que j'ai eues avec Monsieur G. BLUM, ont grandement facilité mon travail.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - HALL (E.H.) - On the new Action of Magnetism on a permanent electric Current - Philosophical Magazine - Nov. 1880 - p 301 à 328.
- 2 - SHOCKLEY (W.) - Electrons and Holes in Semiconductors - Chap. 8 - New York, D. van Nostrand - 1950 -
- 3 - GOUDET (G.) et MEULEAU (C.) - Les semi-conducteurs - Chap. VI - Paris, Eyrolles - 1958 -
- 4 - DUMONTEL (M.) - L'Effet Hall et ses applications - Journal des Recherches du CNRS - Juin 1957 - p 131 à 135.
- 5 - BARLOW (H. E. M.) - Hall Effect and its counterpart Radiation Pressure in microwave Power Measurement - The Proceeding of the Institution of electrical Engineers - March 1957 - p. 35 à 42 -
- 6 - BRUHAT (G.) - 6° édition remaniée par GOUDET (G.) - Electricité - p 305 - Masson-Paris-1956 -
- 7 - ROSS (I. M.) and SAKER (E. W.) - Application of Indium Antimonide - Journal of Electronics - Vol. 1 - July 1955 to May 1956 - p 223 à 330.
- 8 - MASON (W. P.) HEWITT (W. H.) and WICK (R. F.) - Hall Effect Modulators and "Gyrators" Employing Magnetic Field Independent Orientation in Germanium - Journal of Applied Physics - Volume 24 - February 1953 p 166.
- 9 - WICK (R. F.) - Solution of the Field Problem of the Germanium Gyrator - Journal of Applied Physics - USA Juin 1954 - p 741. à 756.
- 10 - LOFGREN (L.) - Analog Multiplier based on the Hall Effect - Journées internationales de calcul analogique - Bruxelles 26 septembre 1955 - (Actes p. 111).
- 11 - KUHRT (F.) - Eigenschaften der Hallgeneratoren - Siemens Zeitschrift - Septembre 1954 - p 370 à 376 -

- 12 - SAKER (E. W.) CUNNELL (F. A.) EDMOND (J. T.) - Indium Antimonide as a Flux Meter Material - Brit. J. Appl. Physics - 1955 - n° 6 - p217 à 220 -
- 13 - WELKER (H.) - Semi-conducting Intermetallic Compounds - Physica XX - 1954 - p 893 à 909 -
- 14 - RODOT (M.) DUCLOS (P.) KOVER (R.) RODOT (H.) - Préparation d'Antimoniure d'Indium - CR. Ac. Sc. n° 21 - vol. 242 - p. 2522 -
- 15 - BOZORTH (R. M.) - Ferromagnetism - p. 160 - New York - D. van Nostrand - 1951 -
- 16 - ECKERT (O.) - Ferrites with constricted Loops and thermal Magnetic Treatment - The Institution of Electrical Engineers - (Convention on Ferrites - 29th oct ; to 2nd nov. 1956).
- 17 - KIENLIN (A. de) KORNETZKI (M.) RABL (H.) - Ferrites à cycle d'hystérésis modifié par traitement thermique dans un champ magnétique faible - Colloque international de Magnétisme de Grenoble - 2 au 6 Juillet 58.
- 18 - AIGRAIN (P.) - Sur un perfectionnement à la mesure des champs magnétiques par effet Hall - Annales de Radioélectricité - Janvier 1954 - p 44 à 46.

TABLE DES MATIERES

<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>CHAPITRE I</u> . Générateur à effet Hall	2
I. 1 - Effet Hall	2
I. 2 - Effet Hall dans les semi-conducteurs	3
I. 3 - Générateur à effet Hall	4
<u>CHAPITRE II</u> . Principe de l'application de l'effet Hall à la réalisation d'éléments de circuits logiques	6
II. 1 - Généralités	6
II. 2 - Dispositif envisagé : ensemble à effet Hall	6
II. 3 - Principe de fonctionnement de l'ensemble à effet Hall	7
<u>CHAPITRE III</u> . Etude théorique de l'ensemble à effet Hall	10
III. 1 - Généralités	10
III. 2 - Description des paramètres caractérisant l'ensemble à effet Hall ..	10
III. 3 - Hypothèses simplificatrices	11
III. 4 - Notations	11
III. 5 - Etudes énergétiques du générateur de Hall	13
III. 5. 1 - Calcul de la puissance d'excitation	13
III. 5. 2 - Calcul de la puissance de sortie	14
III. 5. 3 - Valeurs numériques	15
III. 5. 4 - Expression de la puissance de sortie en fonction des caractéristiques physiques du générateur de Hall	19
III. 5. 5 - Valeurs numériques	20
III. 5. 6 - Energie délivrée par le générateur à effet Hall. Fonctionnement en impulsions	22
III. 6 - Etude de l'énergie de commande	22
III. 7 - Comparaison de l'énergie de commande et de l'énergie de sortie ..	24
III. 7. 1 - Indice de qualité d'un ensemble à effet Hall	24
III. 7. 2 - Discussion de l'influence des paramètres intervenant dans l'expression de l'indice de qualité théorique	25

III. 8 - Conclusion de l'étude théorique de l'ensemble à effet Hall 27

CHAPITRE IV. Etude pratique de l'ensemble à effet Hall 28

IV. 1 - Généralités 28

IV. 2 - Description des paramètres secondaires 28

IV. 2. 1 - Energie de commande 28

IV. 2. 2 - Energie utile 29

IV. 3 - Etude expérimentale de l'énergie de commande 29

IV. 3. 1 - Mesure directe de l'énergie de commande en alternatif 30

IV. 3. 2 - Etude du cycle d'hystérésis. Energie correspondante 31

IV. 3. 3 - Résultats 32

IV. 4 - Influence de la forme du cycle d'hystérésis sur la valeur de l'indice de qualité (gF) 36

IV. 4. 1 - Point de fonctionnement 36

IV. 4. 2 - Calcul de l'énergie de commande 36

IV. 4. 3 - Vérification expérimentale des formules (22)et (24) 37

IV. 4. 4 - Expression de l'indice de qualité (gF) en fonction des coefficients de rectangularité du cycle d'hystérésis 38

IV. 4. 5 - Etude expérimentale des coefficients de rectangularité 40

IV. 5 - Influence du flux de fuite magnétique 42

IV. 5. 1 - Expression de l'indice de qualité en fonction du coefficient de fuite 42

IV. 5. 2 - Etude expérimentale du coefficient de fuite 43

IV. 6 - Echauffement du générateur de Hall. Puissance maximum d'excitation 44

IV. 6. 1 - Généralités 44

IV. 6. 2 - Puissance maximum d'excitation. Valeurs numériques concernant P_e/v 45

IV. 7 - Conclusion 46

CHAPITRE V. Réalisation d'un ensemble à effet Hall 48

V. 1 - Généralités 48

V. 2 - Caractéristiques géométriques 48

V. 3 - Caractéristiques électriques 49

V. 3. 1 - Circuit magnétique 49

V. 3. 2.- Générateur de Hall 50

V.4 - Tableau des caractéristiques d'un ensemble à effet Hall 50

V.5 - Etude des coefficients de rectangularité de différents types de tores de ferrite 51

 V.5.1 - Généralités 51

 V.5.2 - Résultats 54

 V.5.3 - Traitement thermomagnétique des tores de ferrite de type perminvar 54

V.6 - Influence de la forme du tore sur le coefficient de fuite 56

V.7 - Réalisation 58

 V.7.1 - Généralités 58

 V.7.2 - Réalisation du générateur de Hall 58

 V.7.3 - Réalisation du circuit magnétique 59

 V.7.4 - Montage du générateur dans l'entrefer 61

V.8 - Résultats 61

CHAPITRE VI . Fonctionnement en régime impulsif, d'un ensemble à effet Hall 62

VI.1 - Introduction 62

VI.2 - Point de fonctionnement d'un ensemble 62

VI.3 - Fonctionnement en régime impulsif 63

 VI.3.1 - Généralités 63

 VI.3.2 - Commande en impulsions rectangulaires 65

 VI.3.3 - Etude expérimentale de la commande en impulsions rectangulaires 66

 VI.3.4 - Commande en impulsions de forme exponentielle 69

 VI.3.5 - Etude expérimentale de la commande en impulsions de forme exponentielle 70

 VI.3.6 - Cas où le générateur de commande est un générateur de Hall 73

VI.4 - Commande d'un ensemble par un autre ensemble 74

VI.5 - Considérations diverses 75

 VI.5.1 - Excitation d'un générateur de Hall en impulsions très courtes 75

 VI.5.2 - Ensemble à deux enroulements de commande 78

 VI.5.3 - Polarisation du générateur de Hall 78

VI.6 - Conclusion 80

<u>PERSPECTIVES D'AVENIR</u>	81
<u>CONCLUSION</u>	84
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	86

Deuxième Thèse

Propositions données par la Faculté

COMMANDE NUMERIQUE DES MACHINES-OUTILS