

2/67
AED

UNIVERSITE D'ALGER
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
المكنسية

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
Département Télécommunications
المكنسية

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

L'EFFET HALL
ET SES
APPLICATIONS

PF67 3

1967

AMIROUCHEN CHERIF

UNIVERSITE D' ALGER

LE NATIONALE POLYTECHNIQUE

*Recu le 15/6/67
M. Amrouchen*

Département Télécommunications

F F I J E T

D E F I N D' E T U D E S

E F F E T I A L L

ET SES

A P P L I C A T I O N S

SUJET PROPOSE PAR M. ZERGUERRAS

- ET REALISE PAR M. Chérif AMIROUCHEN

ALGER. JUIN 1967

 O M M A I R E

- I - INTRODUCTION.
- II - THEORIE ELEMENTAIRE DE L'EFFET HALL.
- III - MATERIAUX UTILISES.
- IV - MESURE EXPERIMENTALE DE L'EFFET HALL.
- V - APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE L'EFFET HALL.
 - a) - Capteurs de déplacement.
 - b) - Multiplicateur à effet Hall.
 - c) - Synchro résolveur à effet Hall.
 - d) - Transformateur de coordonnées.
 - e) - Moteur à courant continu sans collecteur.
 - f) - Mesure du cycle d'hystéresis.
 - g) - Wattmètre à effet Hall.
- VI - CONCLUSION.

/// ' E F F E T H A L L
ET SES APPLICATIONS INDUSTRIELLES

I - INTRODUCTION.

Dans l'évolution des techniques, des phénomènes connus depuis de longues années, mais demeurés longtemps des curiosités de laboratoire peuvent permettre, à un moment donné de nombreuses et multiples applications, grâce aux progrès des moyens mis à la disposition des chercheurs.

Il en est ainsi des phénomènes piézo-électriques qui ont permis, par exemple, la réalisation des microphones, des haut-parleurs et des pick-up à cristal, ou pour l'effet Peltier, grâce auquel, on peut, désormais, produire directement du froid au moyen d'un courant électrique.

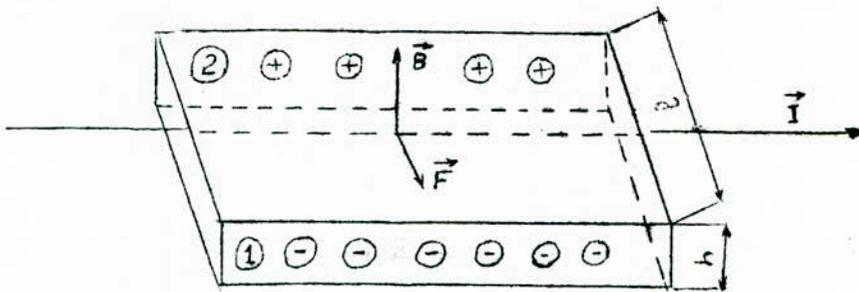
Le phénomène découvert en 1879 par E.H. HALL, physicien de l'Université de Harvard, et connu depuis cette date sous le nom "d'effet Hall" a été considéré aussi bien longtemps comme une curiosité de laboratoire ; mais depuis l'étude et les progrès des semi-conducteurs, après plus d'un demi-siècle d'oubli, il est devenu possible d'établir un grand nombre d'éléments basés sur ce phénomène et qui présentent de remarquables propriétés de sensibilité, de stabilité et d'amplification.

La première application essentielle a consisté dans la réalisation d'instruments destinés à la mesure du champ magnétique, ou à l'étude des propriétés magnétiques des matériaux ;

.../...

mais, des dispositifs basés sur le même principe, sont aussi envisagés pour la mesure du courant et de la puissance, pour établir des générateurs, des transducteurs, des multiplicateurs, des isolateurs, etc...

II - THEORIE ELEMENTAIRE DE L'EFFET HALL.



- figure 1 -

Considérons un ruban métallique d'épaisseur h traversé par un courant i (appelé courant de contrôle) et placé dans un champ magnétique B , perpendiculaire au ruban (figure 1). La conduction dans ce ruban est assurée par le déplacement des électrons. Ceci d'après la loi de Lorentz ($\vec{F} = e \vec{V} \wedge \vec{B}$) sont déviés de leur trajectoire rectiligne. Les électrons de la face 2 passent vers la face 1. Il y aura donc apparition de trous sur la face 2 et d'électrons sur la face 1. Cette répartition de charge crée donc un champ électrique dirigé d'arrière en avant qui exerce une force sur les électrons. $\vec{F}' = e \vec{E}$. Un régime permanent tend à s'établir. Quand il est établi, les lignes de courant

.../...

sont à nouveau parallèles à - i - et il y a équilibre entre la force de Lorentz et la force électrique. On aura :

$$F = F' = e V . B = e . E$$

Si N est le nombre d'électrons par cm³ ℓ et h la longueur et l'épaisseur du ruban métallique, on aura :

$$i = N h \ell V_0 e \quad V_0 = \frac{i}{N \ell h e} \quad . \text{ Or d'autre part } V_h = E \ell$$

$$V_h = \frac{i \ell B}{N \ell h e} = \frac{1}{N h e} i . B = K \frac{i B}{h} \quad \text{avec } K = \frac{1}{N e}$$

K est appelé constante de Hall. C'est une caractéristique du matériau utilisé.

Cette théorie montre que la constante de Hall est inversement proportionnelle au nombre d'électrons par cm³.

III - LES MATERIAUX UTILISES.

Pendant longtemps, les expériences effectuées d'après ce principe, étaient très limitées, parce que les matériaux utilisés ne présentaient pas les caractéristiques nécessaires.

L'antimoine, le cobalt, le sodium, ou le zinc adoptés avaient une résistance faible, et il était très difficile d'obtenir la production d'une tension suffisante pour avoir des résultats pratiques. Lorsqu'on utilisait, au contraire, des matériaux de résistance plus élevée, le rendement diminuait rapidement, de telle sorte que le système réalisé n'était pas utilisable. Les matériaux convenant à la production de ce phénomène, doivent avoir une grande mobilité des porteurs de charges, c'est-à-dire

.../...

des électrons, ou des trous, suivant l'expression adoptée pour expliquer le fonctionnement des transistors. Ce facteur est très important, puisque cette qualité conditionne la réponse du système sous l'action de la force appliquée et, par suite, la sensibilité du dispositif réalisé.

Cette mobilité élevée, cependant tend à réduire la résistance électrique du système de sorte que les adaptations d'impédances peuvent présenter des difficultés. Pour éviter cette difficulté sans réduire le rendement, il faut envisager la réduction du nombre des porteurs de charges par purification du matériau utilisé. La caractéristique qui indique ce fait pour un matériau déterminé, est appelée le coefficient de Hall : K_h .

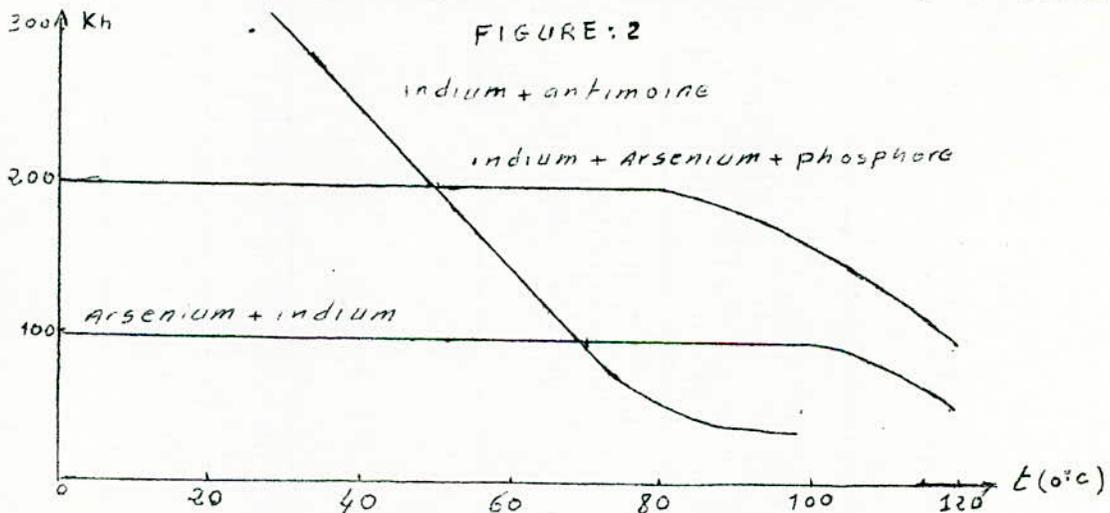
Ce coefficient est ainsi un facteur caractéristique, qui permet le choix des matériaux destinés à être employés dans les dispositifs, dont le fonctionnement est fondé sur ce principe. Jusqu'à une date récente, il n'existait pas de matériau présentant une mobilité de porteur de charges assez grande pour produire des tensions présentant un intérêt pratique. Mais, les progrès des composés intermétalliques, tels que l'arséniure d'indium et l'antimoniure d'indium, ont permis de rendre ces appareils pratiques et de leur donner un caractère industriel.

L'antimoniure d'indium constitue ainsi le matériau qui offre le rendement le plus élevé de tous ceux qui ont été découverts jusqu'ici. Cependant, il est sensible à l'influence de la température et de ce fait a pu limiter ses emplois; c'est pour quoi,

.../...

sur de nombreux dispositifs, on emploie, soit l'arséniure d'indium, soit le phosphore-arséniure d'indium. Ces matériaux possèdent une mobilité des porteurs de charges beaucoup plus grande que celles du germanium ou du silicium. Leur rendement n'est pas aussi élevé que celui de l'antimoniure d'indium, mais ils sont beaucoup moins sensibles à l'influence de la température.

Le tableau suivant donne une allure globale de la variation de la constante de Hall en fonction de la température pour les trois principaux semi-conducteurs les plus utilisés.



REMARQUES.

a) Avec les métaux : la tension de Hall est très faible
Avec les métaux, tels que Ag, AL, AU, on aura une tension de Hall dans le sens direct, alors qu'avec d'autres, tels que Zn, Fe, Co elle sera inversée

.../...

b) Avec les semi-conducteurs purs, la tension de Hall est relativement importante, mais il n'est pas possible de faire débiter cette tension dans une résistance, donc d'obtenir un courant de Hall notable car la résistance interne du semi conducteur est très élevée.

c) Avec les métaux spéciaux, comme l'antimoniure ou l'arsiniure d'indium, la puissance mise en jeu est utilisable pour des applications pratiques. A titre indicatif, avec une plaquette d'indium (In Sb) on obtient une puissance de l'ordre de 20 mw.

IV - MESURE EXPERIMENTALE DE L'EFFET HALL.

a) But. Cette manipulation a pour but de mesurer la tension de Hall et de calculer la mobilité et le nombre de porteurs dans une lame semi conductrice.

b) Disposition expérimentale et mode opératoire. Le dispositif expérimental est donné par la figure 3. Deux commutateurs Ca et Cb, permettent de mesurer la tension de Hall ou la d.d.p. entre G et H. On mesure les tensions à l'aide d'une méthode d'opposition constituée par la pile Er, les résistances R_1 et R_2 et le galvanomètre g. Les résistances R et r constituent un pont diviseur qui permet de réduire V_{gh} dans un rapport $K = \frac{r}{R}$.

c) Mesure de la tension de Hall. On place les commutateurs Ca et Cb dans la position 1.

.../...

On déplace le point K' à l'aide du bouton commandant le curseur de la résistance R de façon que g ne dévie plus.

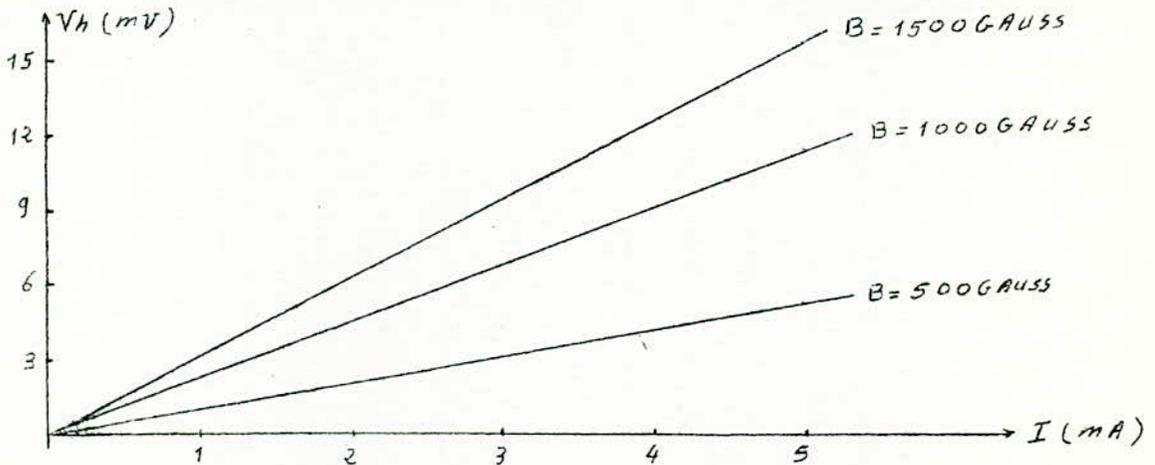
On applique une induction \vec{B} en fermant l'interrupteur qui alimente l'électro-aimant, le galvanomètre dévie.

On le ramène à zéro en agissant sur les résistances : R_1 et R_2 ($R_1 + R_2 = 1000 \Omega$). On déduit facilement $V_h = V_0 \times \frac{R}{1000}$ avec $V_0 = 1,5 \text{ V}$.

On construira $V_h = F(I, B)$ à $B = \text{constante}$ pour les valeurs suivantes de B. (500, 1000, 1500 gauss)

On obtient le tableau suivant :

I (m A)	1	2	3	4	5
V_{h1} (mV)	1	2,3	3,6	5	6,2
V_{h2} (mV)	2,3	3,8	6,5	8,25	11
V_{h3} (mV)	3	6,2	9,2	13	16



.../...

Pour $I = 3 \text{ mA}$ et $\bar{B} = 1500 \text{ gauss}$

$$\text{On aura : } V_{h_0} = \frac{6,75 \times 1,5}{1000} = 10 \text{ mV}$$

On pourra de là tirer la valeur de la constante de Hall

$$(K = \frac{hV_{h_0}}{IB} = \frac{1}{nq} \text{ et calculer le nombre de porteurs de charges } N = \frac{1}{qk}$$

d) Mesure de la mobilité.

On place C_a et C_b sur la position 2, le galvanomètre dévie on le ramène à zéro en jouant sur f_1 et f_2 . On tire V_{gh} en tenant compte des résistances R et r . On calculera la mobilité à l'aide de la formule :

$$= \frac{V_h}{V_c} \times \frac{L}{l} \times \frac{I}{B} \quad \text{on trouve } r = 1,4$$

$$V_c = 14 \times I_c \times 3 \cdot 10^{-3} = 52 \text{ mV} \quad \text{On prend } B = 0,15 \text{ tesla}$$

$$= \frac{10}{52} \times \frac{6}{5} \times \frac{3 \cdot 10^{-3}}{0,15} = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{V.s} \quad \underline{P = 4600 \text{ cm}^2 \text{Vs}}$$

e) Schéma, principe de la manipulation.

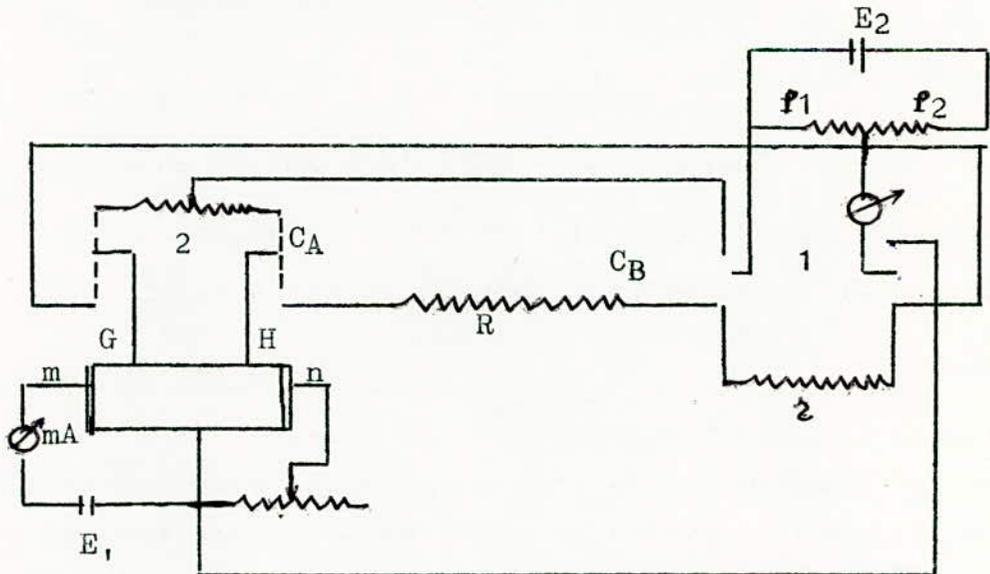


figure 3

.../...

f) Conclusions.

1°- La manipulation confirme la proportionnalité de la tension de Hall au courant de contrôle i et à l'induction magnétique B .

2°- D'autre part, la connaissance du réseau de courbes $V = F(I.B)$ nous permet de déterminer la mobilité et le nombre de porteurs de semi conducteurs. La connaissance de ces deux caractéristiques étant indispensable pour la réalisation de semi conducteurs bien déterminés.

V - APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE L'EFFET HALL.

Elles sont toutes basées sur l'équation de la formule donnant la tension de Hall ($V_h = K_o I B \sin \theta$). On voit d'une part qu'il existe un effet multiplicateur ($I.B$) et un effet de "déphasage" ($\sin \theta$) et que d'autre part, on peut déterminer une des valeurs de la formule connaissant les autres.

A) Capteur de déplacement à effet Hall.

C'est l'une des plus intéressantes applications de cet effet. Le capteur de déplacement permet la détection de proximité d'objet en mouvement.

1°- Générateur de Hall.

C'est essentiellement un générateur constitué par un semi conducteur (antimoniure, arseniophosphure ou arsenium d'indium) sensible à l'influence d'un champ magnétique. La tension de Hall est donnée comme on l'a vu par : $U = K \frac{iB}{d}$.

.../...

La constante K est de l'ordre de 200 pour l'arséniophosphure et 100 pour l'arsénium d'indium. Elle ne varie pas dans une plage de température comprise entre 0° et 100° . Elle varie de 370° à 10° à 80° à 100° , mais de manière non linéaire pour l'antimoniure d'indium (voir figure 2)

Pour une induction nulle, il subsiste aux bornes de sortie une tension résiduelle U_r faible, appelée par les fabricants, composante ohmique nulle due à la faible résistance interne du générateur (R_o) et qui est exprimée par $U_r = R_o I$ ou I est le courant de commande.

On peut la négliger dans le cas de dispositifs industriels ou si nécessaire, la compenser. Pour un courant de commande donné I , la tension de Hall dépendra donc uniquement de la valeur du champ d'induction.

On dispose donc ainsi d'un capteur sensible aux variations de ce champ et pouvant produire des signaux utilisables pour provoquer une action quelconque. Le champ d'induction magnétique B pouvant être produit par un simple aimant permanent et sa variation par le déplacement de celui-ci. Le générateur de Hall permet en conséquence, de réaliser des détecteurs de position. Si $B = \text{constante}$ et si I varie, on aura la possibilité de concevoir d'autres dispositifs simples et fort intéressants.

2°- Types de générateurs de Hall. Les générateurs de Hall fabriqués par Siemens et disponibles sur le marché français

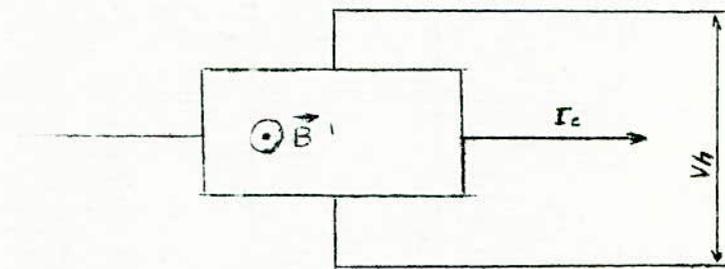
.../...

sont de deux types :

- L'un est constitué par une couche de semi conducteurs déposé par évaporation sous vide sur un support adéquat et protégé par une gaine de céramique frittée et de résine.

- L'autre, par une plaquette encastrée dans une gaine de matériau ferro-magnétique (généralement de fêrite).

Le schéma de principe est donné par la figure suivante :



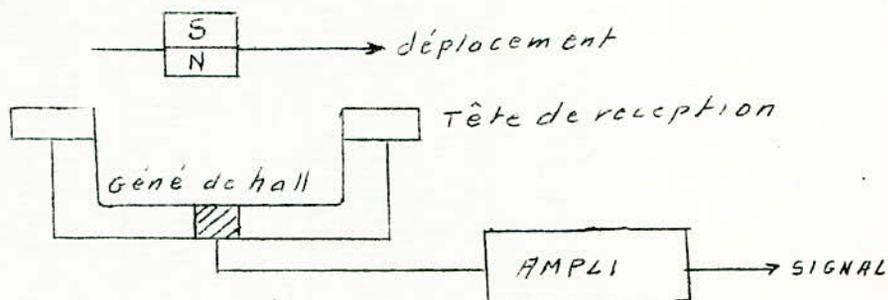
3°- Capteur de déplacement. Un capteur de déplacement mettant en oeuvre l'effet Hall, comprend trois éléments :

- Un aimant permanent fixé sur l'organe mobile.
- Une tête de réception à générateur de Hall incorporé.
- Un amplificateur.

a) L'aimant permanent. Il se déplace parallèlement à une

.../...

tête de réception dans le circuit magnétique dans lequel est encastré un générateur de Hall.

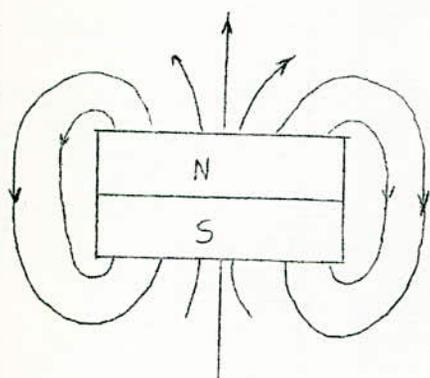


Le signal appliqué à l'amplificateur est produit par le mouvement relatif de l'aimant par rapport à la tête de réception qui fait varier le flux magnétique traversant la tête de réception. Le générateur de Hall incorporé à celle-ci est parcouru par un courant continu de commande et fournit une tension proportionnelle à la valeur du flux magnétique qui est amplifié par un amplificateur magnétique à tubes ou à transistors.

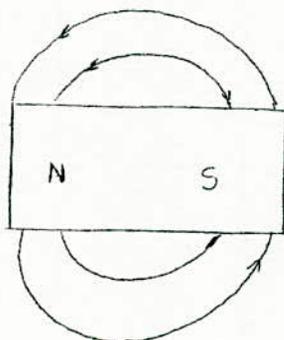
On peut utiliser selon les cas, soit un aimant permanent unique, soit un ensemble d'aimants permanents. Deux types se présentent :

- Un aimant plat magnétisé dans le sens transversal (figure 4) ou dans le sens longitudinal (figure 5) ou
- Un aimant double (figure 6). Cette dernière disposition présente l'avantage d'utiliser la totalité du flux magnétique pour la production des signaux.

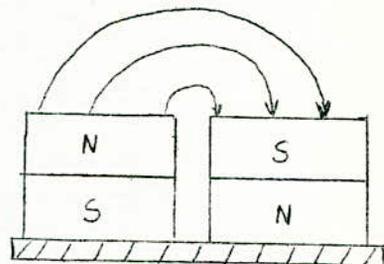
.../...



- 4 -



- 5 -



- 6 -

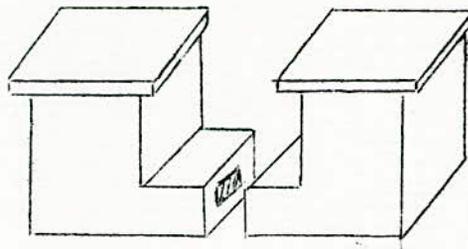
L'aimant étant solidaire de l'organe dont le déplacement doit être traduit en tension, il est évident que cet organe doit être dépourvu de pièces magnétiques en mouvement, sauf si celles ci sont sans influence sur la tête de réception.

b) La tête de réception. Elle peut être réalisée à l'aide de deux noyaux de fer doux en L juxtaposés afin de former un circuit magnétique en U dans l'entrefer duquel est encastré le générateur de Hall. Pour concentrer au maximum le flux magnétique de l'aimant dans l'entrefer, les faces de cet aimant doivent être pourvues de deux épanouissements formés par deux plaquettes en fer doux. La tête de réception peut être insérée dans un boîtier en métal amagnétique ou en matière plastique dans lequel on coule une résine afin d'obtenir un ensemble robuste.

Le générateur de Hall encastré dans l'entrefer du circuit magnétique, se compose de 2 minces plaques de fêrite entre lesquelles est placée la couche de semi conducteur de sorte que l'entrefer réel est égal à l'épaisseur du semi •onducteur qui est de l'arsénium d'indium. Il permet d'obtenir une puissance

.../...

de sortie élevée avec une faible variation en fonction de la température (environ 1 % par $^{\circ}$ C).

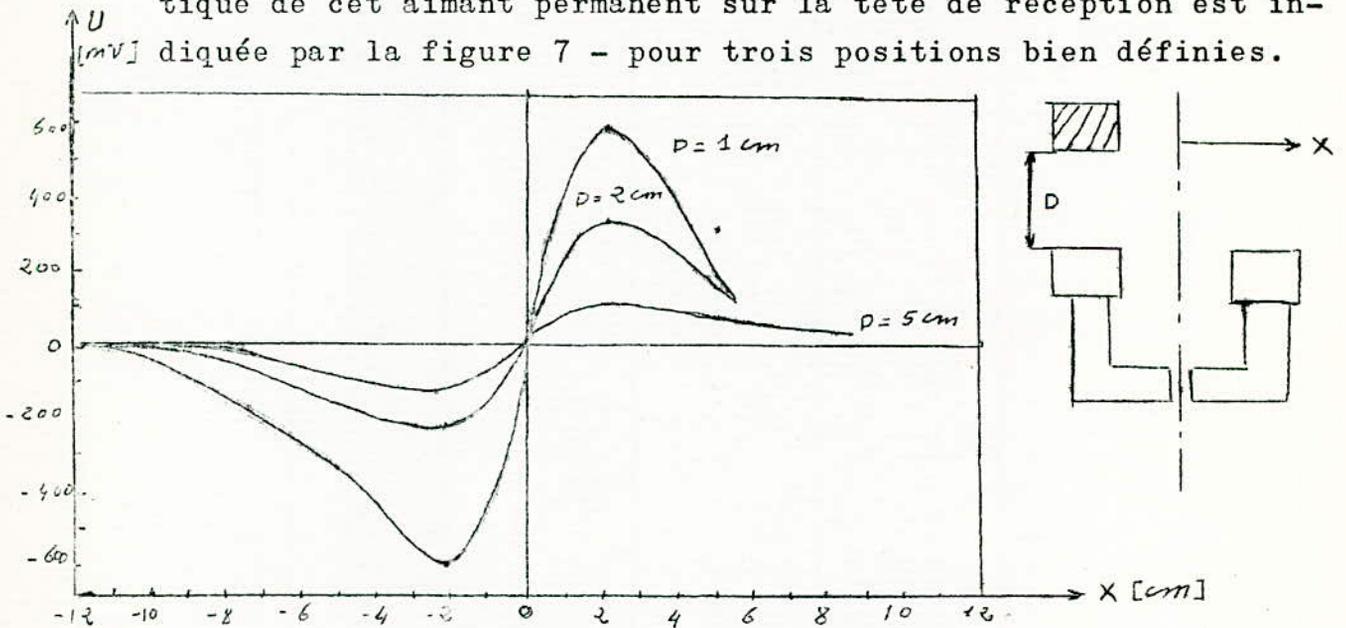


pieces polaires

noyau en U

Générateur de hall

Si pour produire un signal on utilise un aimant plat, celui-ci se déplaçant devant la tête de réception, dans la direction X à une distance D de celle-ci, l'influence du flux magnétique de cet aimant permanent sur la tête de réception est indiquée par la figure 7 - pour trois positions bien définies.



-figure 7 -

.../...

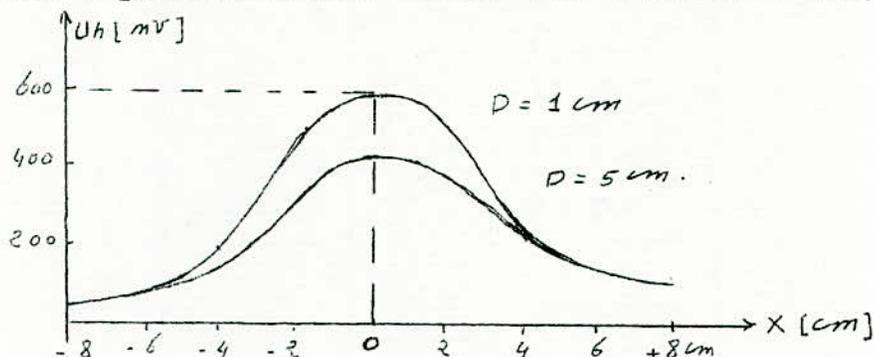
Quand l'aimant est symétrique par rapport à la tête de réception ($x = 0$), le flux magnétique ne traverse pas le générateur de Hall, cela entraîne : $U_h = 0$. Quand il se déplace par rapport à l'axe de symétrie dans un sens ou dans l'autre, le flux magnétique dévié, se referme par l'entrefer. Suivant le sens du déplacement, la tension de Hall produite est positive ou négative.

Les dimensions de l'aimant permanent plat utilisé, correspondent à celles de l'un des épanouissements polaires de la tête de réception. La figure (7) montre que la pente de la courbe est d'autant plus grande, que la distance D est plus faible. Le maximum de la tension de Hall se produit pour un faible déplacement de l'aimant, ce qui permet d'obtenir une grande précision. Le passage de l'aimant devant chaque épanouissement polaire, donne lieu à deux maximums de signes contraires.

Afin d'obtenir un seul maximum, il est intéressant d'employer un aimant bipolaire dont le flux magnétique, contrairement à celui de l'aimant précédent, se refermera totalement par l'entrefer de la tête de réception lorsqu'il se trouve sur la ligne de symétrie des épanouissements polaires.

Hors de cette position, le flux d'induction décroît rapidement. Il est facile de déduire que l'utilisation d'un aimant plat conviendrait lorsqu'il s'agit de détecter avec

précision, la position d'un objet en mouvement ; en revanche, pour accomplir une fonction de commande par tout ou rien, l'aimant bipolaire réunit toutes les conditions requises.



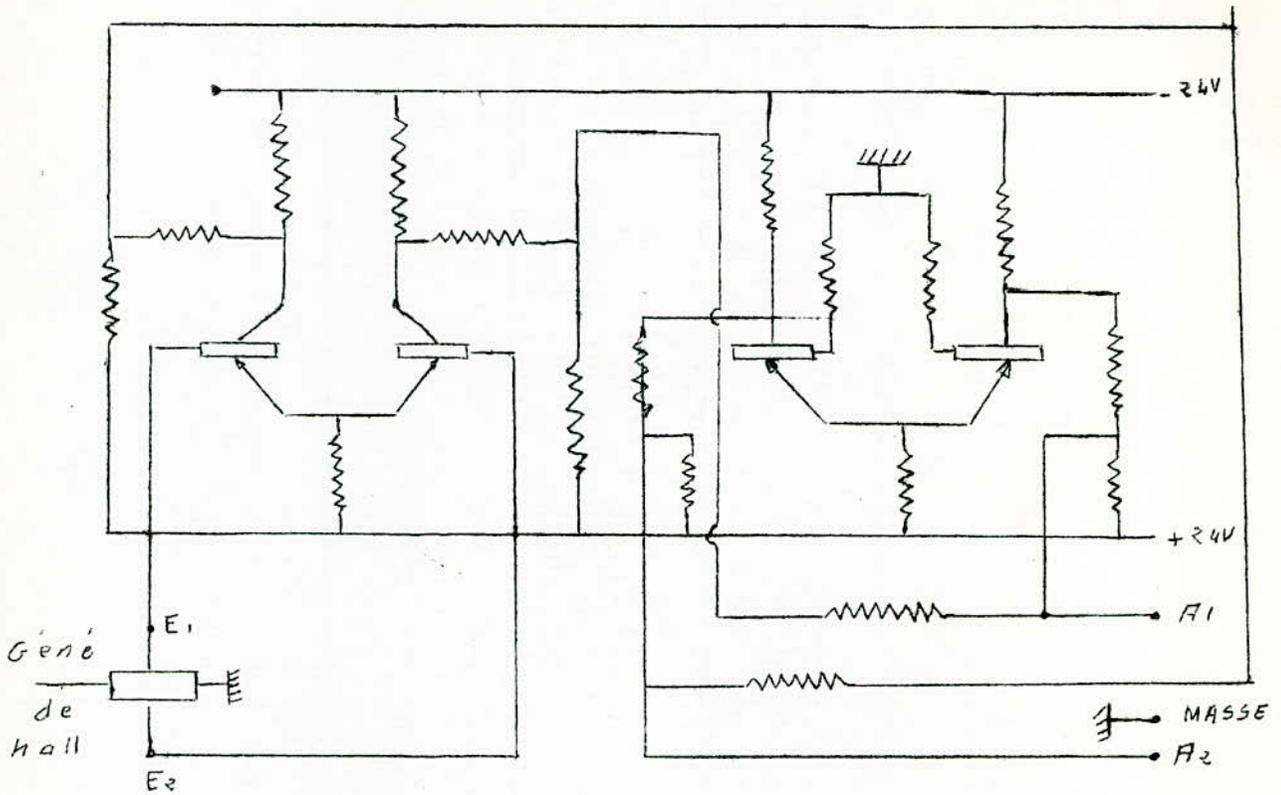
Les valeurs de U_h ont été relevées dans les deux cas pour des déplacements faibles. Les informations, tout ou rien, ne peuvent être obtenues pour des vitesses de déplacements supérieures à 30 m/s . Par exemple : pour $V_d = 60 \text{ m/s}$ et pour une largeur de réception de 20 cm, on aura une durée de l'influence du flux magnétique de 3 ms.

On appelle longueur de réception ou protégée, le secteur de déplacement de l'aimant en dehors de la ligne de symétrie de la tête de réception pour lequel la tension de Hall est supérieure à 10 mV.

4°- L'amplificateur.

Il comprend deux étages symétriques utilisant des transistors B.F. classiques dont celui de sortie suffit pour commander un relais électromagnétique courant - figure 8 -.

..../....



- figure 8 -

Il peut lui être adjoint un étage de puissance dans le cas où l'on désirerait déclencher le fonctionnement d'un contacteur coupant une puissance élevée.

Le premier étage dont l'impédance d'entrée est faible, est couplé au suivant qui fonctionne en bistable grâce à la symétrie du montage et au choix du point du fonctionnement du transistor.

L'influence de la température sur les deux étages est faible. La sensibilité à l'entrée de l'amplificateur est de ± 10 mV avec une variation de $0,1$ mV/°C. La tension de

.../...

sortie entre les bornes A₁ A₂ et la masse, est de 3,5 V à circuit ouvert. L'impédance de sortie est de 8 k Ω environ et la durée de commutation du bistable est de 10 μ s. La tension d'alimentation de l'amplificateur ainsi que celle appliquée au générateur de Hall de la tête de réception, sont obtenues par un ensemble alimenté par le secteur.

Un petit transformateur et 6 diodes permettent d'alimenter l'amplificateur de la figure (A) et le générateur de Hall. Une résistance réglable permet d'ajuster le courant traversant le générateur.

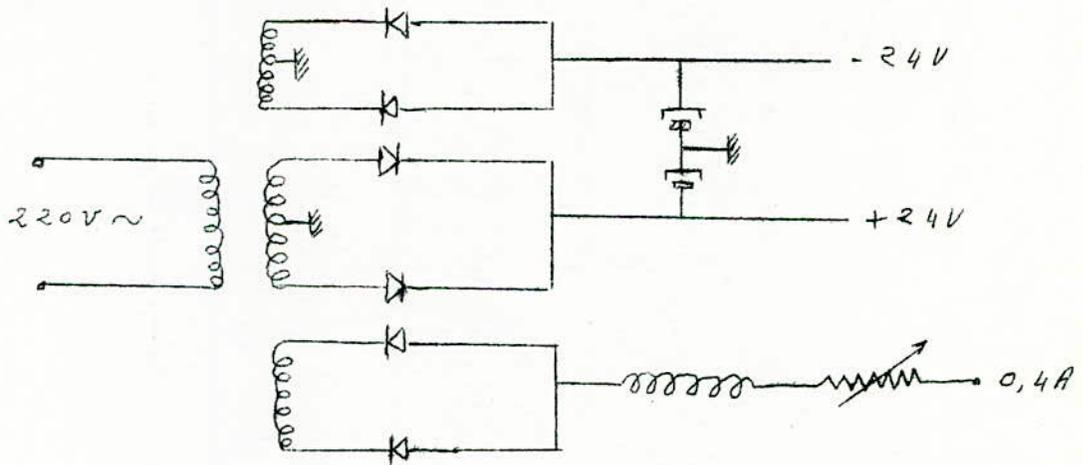


FIGURE A

6° - Exemples d'application.

L'équipement décrit ci-dessus convient entre autre, pour effectuer une commande à des vitesses différentes (aimant bipolaire) ou pour réaliser une commande précise (aimant plat).

.../...

Cet équipement présente un grand intérêt pour de nombreuses utilisations industrielles telles que commandes d'assensseurs, déclenchement de dispositifs de protection ou de manutention (convoyeur à bande).

B) Multiplicateur à effet Hall.

1°- Difficultés de la multiplication par effet Hall.

Nous avons vu précédemment que la tension de Hall peut s'écrire : $V_H = KIcB$ (en supposant que le courant de commande et le champ soient perpendiculaires). En fait il existe un certain nombre de termes correctifs. La tension de Hall s'écrit alors en ne tenant compte que des principaux :

$$V_H = KIcB + A_1 \frac{dB}{dt} + A_2 B \frac{dI_c}{dt} + A_3 I_c^2 + f(I_c) + g(B^2)$$

Nous allons étudier l'origine et l'importance de ces différents termes.

- $g(B^2)$, est l'erreur due à la magnétorésistance. Pour une plaque dont le rapport longueur à largeur est voisin de 1, nous avons :

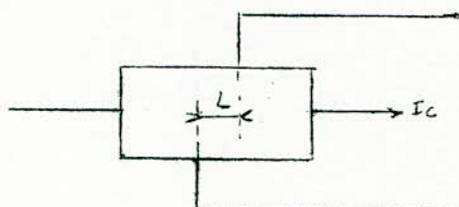
$$R = KR_0 (\mu nB)^2 \text{ avec : } R_0 \text{ résistance pour un champ nul}$$

K constante du matériau
 μn mobilité des électrons.

Pour l'antimoniure d'indium (semi-conducteur très employé dans la fabrication des sondes à effet Hall), cette variation de résistance peut atteindre 40 % par Tesla.

.../...

- $f(I_c)$. C'est la tension qui apparait aux bornes du côté Hall lorsqu'aucun champ n'est appliqué.

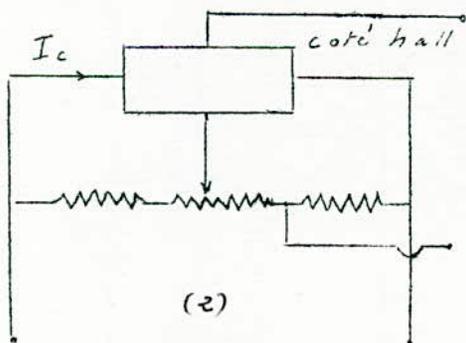


(1)

Une partie de cette tension est due au désalignement des électrodes de sortie (figure 1) sur l'élément à effet Hall.

Il arrive aussi que des variations dans l'épaisseur rendent la densité de courant non uniforme. De même la non uniformité de la puissance de dissipation entraîne un changement dans la distribution des courants.

Cette tension est extrêmement gênante, car elle peut atteindre 5 mV pour un courant de commande de 300 mA dans une sonde de résistance interne (côté commande de $1,5\Omega$) alors que nous travaillons avec des tensions de Hall de l'ordre de 200 V.



côté commande

En général on diminue considérablement cet effet par un circuit qui ramène une tension opposée en série dans la sortie (figure 2).

- $A_1 \frac{dB}{dt}$. C'est la f.e.m. induite dans la boucle constituant le circuit de sortie.

Cette tension est assez élevée et gêne donc le signal du

.../...

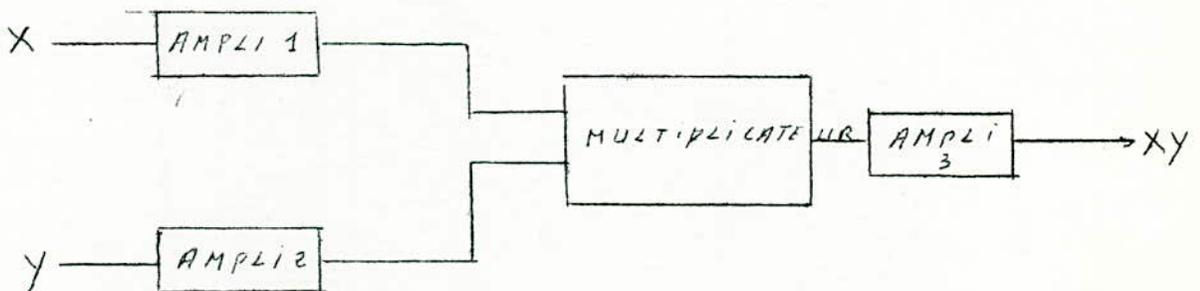
à l'effet Hall. Pour l'éliminer, on peut songer à opposer une tension de même fréquence mais, d'amplitude et de phase convenable.

- $A_2 B \frac{dB}{dt}$: Il apparait dans le circuit commande une f.e.m plus importante que la précédente car la surface du circuit de commande soumise au flux est par construction plus grande. Cette f.e.m. induite crée dans le circuit de commande un courant proportionnel à dB/dt . Ce courant soumis à l'induction B donne une tension de Hall proportionnelle à $B \cdot dB/dt$. Si le courant ainsi créé dans le circuit commande est important (impédance du circuit d'alimentation de la sonde faible), ce terme peut devenir très gênant.

- $A_3 I_c^2$: Cette tension est due à l'interaction du courant de commande avec le champ qu'il produit, ce qui a pour effet de déplacer les lignes de courants. Ce terme est en général très faible.

2°- Réalisations d'un multiplicateur à effet Hall.

a) Principe élémentaire de la multiplication : Schéma.



figure

.../...

- Ampli 1 - alimente le côté commande de la sonde.
- Ampli 2 - alimente les bobines créant le champ.
- Ampli 3 - amène la tension de Hall de la plaquette à un niveau convenable.

Le multiplicateur comprend l'ensemble bobines et plaquettes à effet Hall ainsi que les systèmes de compensation.

3°- Multiplication.

a) Avec onde porteuse.

Aspect théorique de la multiplication classique d'amplitude : position du problème.

On voudrait multiplier le signal $f_1(t)$ par le signal $f_2(t)$. Si nous modulons avec ces signaux la tension $V \cos t$ (avec) on obtient les signaux suivants :

$$E_1 = V \cos \Omega t (1 + m_1 f_1(t)) \text{ et } E_2 = V \cos \Omega t (1 + m_2 f_2(t))$$

Ce qui donne :

$$E_1 E_2 = V \cos^2 \Omega t (1 + m_1 f_1 + m_2 f_2 + m_1 m_2 f_1 f_2) = \frac{1}{2} V^2 + \left(\frac{m_1 f_1}{2} + \frac{m_2 f_2}{2} + \frac{m_1 m_2 f_1 f_2}{2} \right) V^2 + \frac{1}{2} V^2 \cos 2 \Omega t \times$$

$$\cdot (1 + m_1 f_1 + m_2 f_2 + m_1 m_2 f_1 f_2)$$

On peut éliminer les termes en $\cos 2 \Omega t$ par filtrage. Nous voyons donc apparaître le terme produit que nous voulions obtenir sans avoir besoin de détecter. Si le terme continu peut être facilement éliminé, il n'en sera pas de même des termes en $f_1(t)$ et $f_2(t)$.

.../...

b) Multiplication par effet Hall.

Si au lieu d'utiliser la classique modulation d'amplitude, nous multiplions la porteuse par le signal, nous aurons :

$$K_1 V \cos \Omega t f_1(t) \quad -1- \quad \text{et} \quad K_2 V \cos \Omega t f_2(t) \quad -2-$$

(Modulation d'amplitude avec suppression de porteuse)

Multiplions maintenant (1) par (2), nous aurons :

$$K_1 V \cos \Omega t f_1(t) \times K_2 V \cos \Omega t f_2(t) =$$

$$K_1 K_2 V^2 \cos^2 \Omega t f_1(t) f_2(t) =$$

$$\frac{K_1 K_2}{2} V^2 f_1(t) f_2(t) + \frac{K_1 K_2 V^2}{2} \cos 2\Omega t f_1(t) f_2(t)$$

Soit ω_1 et ω_2 les pulsations respectives du dernier harmonique de $f_1(t)$ et de $f_2(t)$. Le produit $f_1(t)$ et $f_2(t)$ donnera entre autres des termes en $\omega_1 - \omega_2$ et $\omega_1 + \omega_2$.

Comme nous avons supposé $\Omega \gg \omega_1$ et ω_2 . Le spectre de fréquence du deuxième terme de la multiplication sera donc proche et autour de 2Ω .

Par filtrage, on pourra supprimer facilement ce terme, il ne restera donc plus que le terme produit cherché :

$$\frac{K_1 K_2 V^2}{2} f_1(t) \times f_2(t)$$

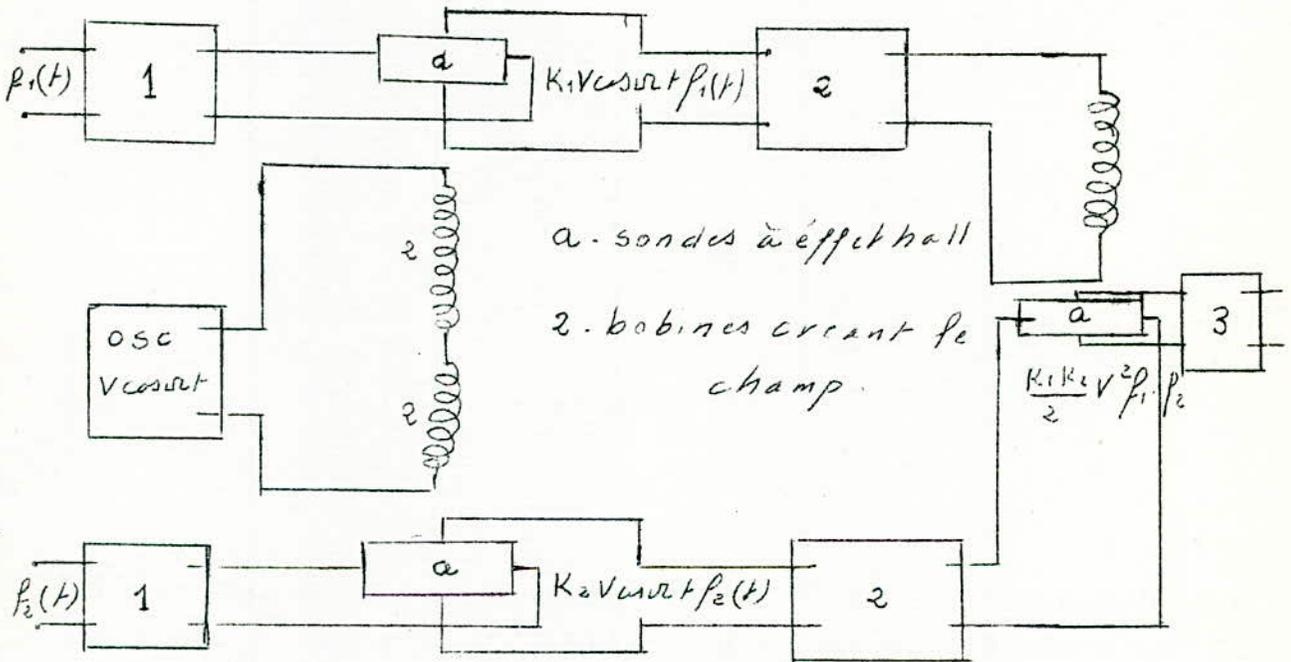
Le système utilisé consiste à faire trois multiplications au lieu d'une seule.

c) Schéma synoptique.

Etant donné les sondes à effet Hall actuellement sur le marché. Il est apparu difficile de vouloir multiplier des signaux dont au moins un dépasserait en fréquence le mégacycle. Nous nous

.../...

sommes donc fixé la fréquence porteuse à 1 MHz. Par conséquent la bande passante du multiplicateur se trouve limitée à 100 KHz vers les hautes fréquences. Ce qui nous permettra de multiplier des signaux $f_1(t)$ et $f_2(t)$ dont le développement en série de Fourier est compris au maximum entre 0 et 100 KHz.



- figure -

Ampli 1 : amplificateur B.F. (0 - 100 KHz) pour attaquer le côté commande des sondes.

Ampli 2 : Si nous appelons ω la pulsation du dernier harmonique du signal $f_1(t)$ ou $f_2(t)$ (100 KHz) $KV \cos \omega t \cos \omega t$ se décompose en $1/2 KV (\cos(\omega + \omega) t + \cos(\omega - \omega) t)$ ce qui nous donne les limites de la bande passante à imposer à cet amplificateur : 900 KHz - 100 KHz.

Ampli 3 : amplificateur B.F. de sortie.
.../...

d) Intérêt du procédé.

1°- Multiplication par la porteuse.

A la sortie des premières sondes, nous avons donc un signal $V \cos \Omega t f_1(t)$ ou $V \cos \Omega t f_2(t)$ dont la bande s'étend entre 900 KHz et 1.100 KHz.

Du côté commande, la fréquence du signal peut varier de 0 à 100 KHz, la tension de perturbation en f (I_c) n'intervient plus, car elle sera éliminée par la sélectivité de l'ampli II.

Il ne reste plus que la f.e.m. induite (terme en $A_1 \frac{dB}{dt}$) dont l'élimination sera facilitée par le fait que la fréquence est fixe.

On remarquera que le terme en $A_2 B \frac{dB}{dt}$ intervient sous la forme d'une tension à la fréquence 2 MHz additionnée d'une composante continue. Celle-ci est éliminée par l'ampli 2 ainsi que la tension à 2 MHz.

Le problème de l'alimentation des bobines créant l'induction magnétique est très simple pour cette phase de la multiplication. Il suffit d'accorder ces bobines sur la fréquence de la porteuse.

2°- Multiplication des deux porteuses modulées.

Le signal de sortie est de la forme $\frac{K_1 K_2}{2} V^2 f_1(t) f_2(t)$. Comme nous avons vu que la fréquence de l'harmonique le plus élevé de $f_1(t)$ ou $f_2(t)$ était 100 KHz, l'harmonique le plus élevé du signal $f_1(t) f_2(t)$ sera 200 KHz.

.../...

Le spectre de fréquence du côté commande s'étalant entre 900 KHz et 1 100 KHz, comme précédemment les termes en $f(I_c)$ n'interviennent pas du côté Hall.

De même le spectre de fréquence du signal alimentant les bobines est compris aussi entre 900 KHz et 1 100 KHz. Le spectre de fréquence de la f.e.m. induite produite par cette induction sera dans la même bande, cette f.e.m. induite sera donc dans ce cas filtrée par l'ampli B.F (0 - 200 KHz).

Le seul problème difficile qui demeure sera d'alimenter à courant constant (suffisamment élevé) les bobines créant l'induction dans la bande 900 KHz - 1 100 KHz. C'est finalement cette difficulté qui nous contraindra à limiter encore la bande passante du multiplicateur.

4°- Schémas de Montage. Il comprend :

-- Un générateur à 1 MHz qui lui même se subdivise en deux parties.

- a) un oscillateur à 1 MHz du genre colpitts.
- b) 2 amplis de puissance pour attaquer les bobines.

-- 2 voies (1 et 2) pour la multiplication du signal par la porteuse.

Ces voies comprennent chacune :

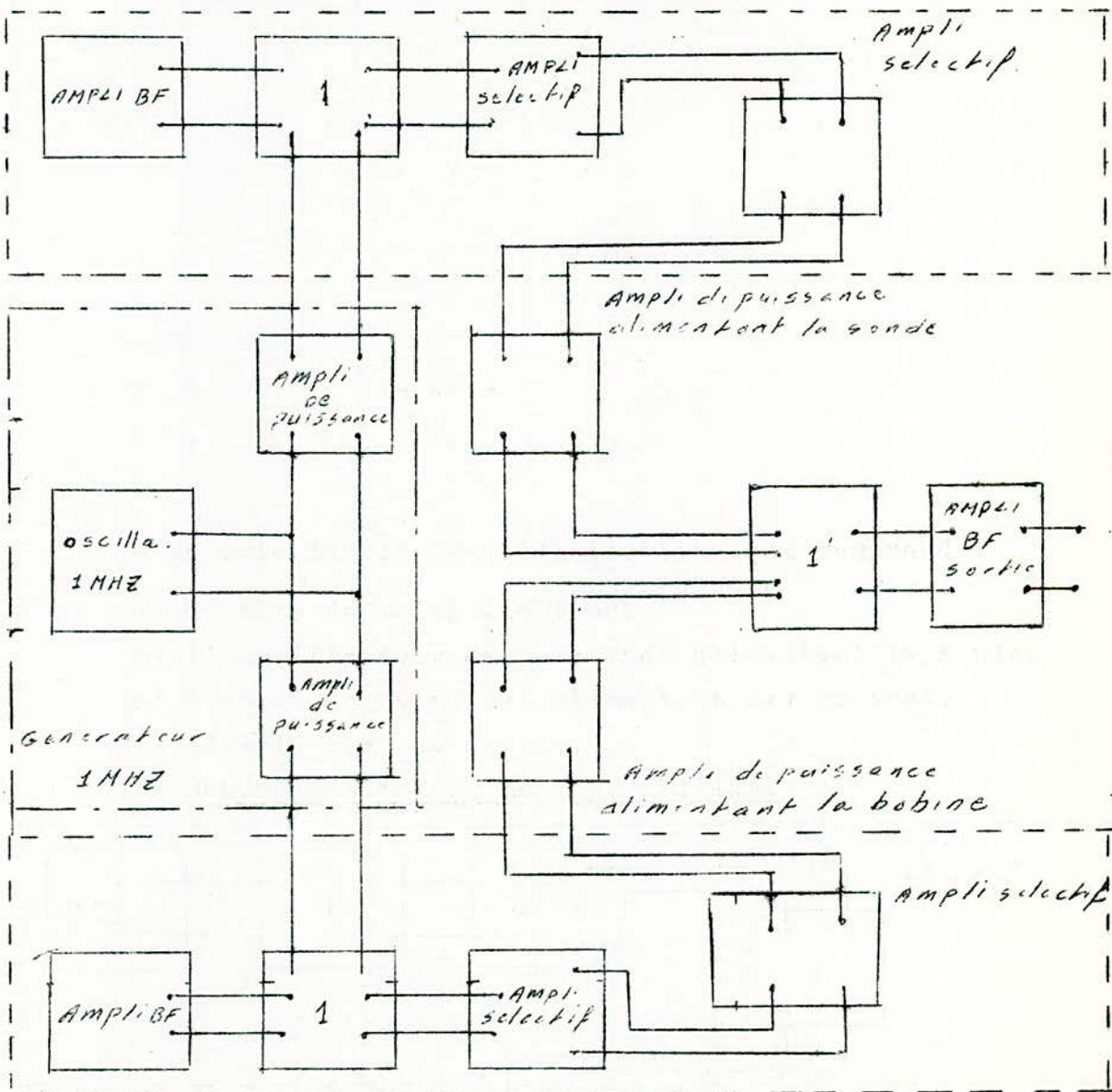
- a) une tête de multiplicateur à effet Hall.
- b) un ampli attaquant le côté commande des sondes.
- c) un ampli sélectif.
- d) ampli sélectif et adaptateur d'impédance.

.../...

- La voie finale de multiplication qui comprend :

- a) la tête de multiplication.
- b) l'amplificateur de puissance alimentant la sonde.
- c) l'ampli de puissance alimentant les bobines.
- d) l'ampli B.F. de sortie.

1/ Schéma général du montage utilisé.



.../...

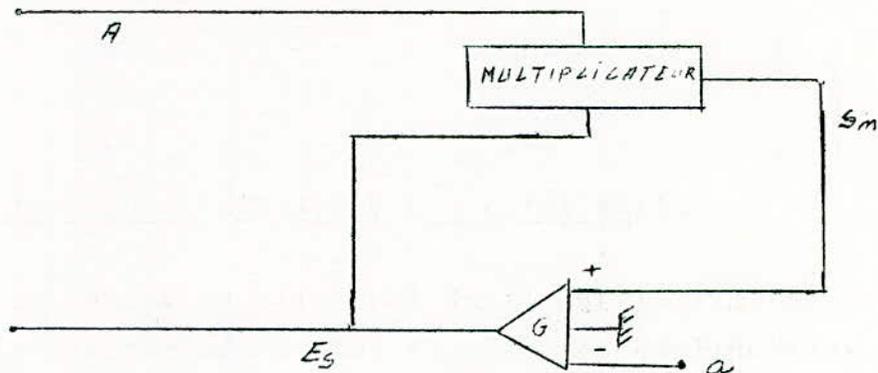
Applications du multiplicateur à effet Hall.

En dehors de l'intérêt de la multiplication en elle-même, le multiplicateur offre plusieurs autres utilisations.

Citons en tout premier lieu les procédés de CORRELATION pour l'étude de fonctions aléatoires (tel que le bruit) on pourra de même, réaliser le changement de fréquence grâce à l'effet multiplicateur de Hall (le principe du changement de fréquence étant basé sur la non linéarité des caractéristiques d'un tube).

On pourra citer aussi quelques applications de calcul analogique.

- Générateur de fonction inverse.



soit la fonction A entrant sur une voie du multiplicateur. L'amplificateur différentiel G admet à l'entrée une tension constante :

a) Soit S_n la tension de sortie du multiplicateur et E_s la tension d'entrée de l'ampli différentiel. On a :

$$E_s = G (S_n - a) \quad \text{avec} \quad S_n = E_s A$$

.../...

d'où :

$$E_s = \frac{-Ga}{1 - GA} \quad \text{et si } GA \gg 1 \quad E_s = \frac{a}{A}$$

Générateur de racine carrée d'une fonction. Avec un montage un peu différent, en utilisant toujours un amplificateur de grand gain, il est possible d'avoir : $E_s = K\sqrt{A}$. Il existe bien entendu d'autres possibilités.

- Synchro résolveur à effet Hall.

On peut définir le synchro résolveur comme une machine électrique fournissant une tension caractéristique de la position angulaire du rotor.

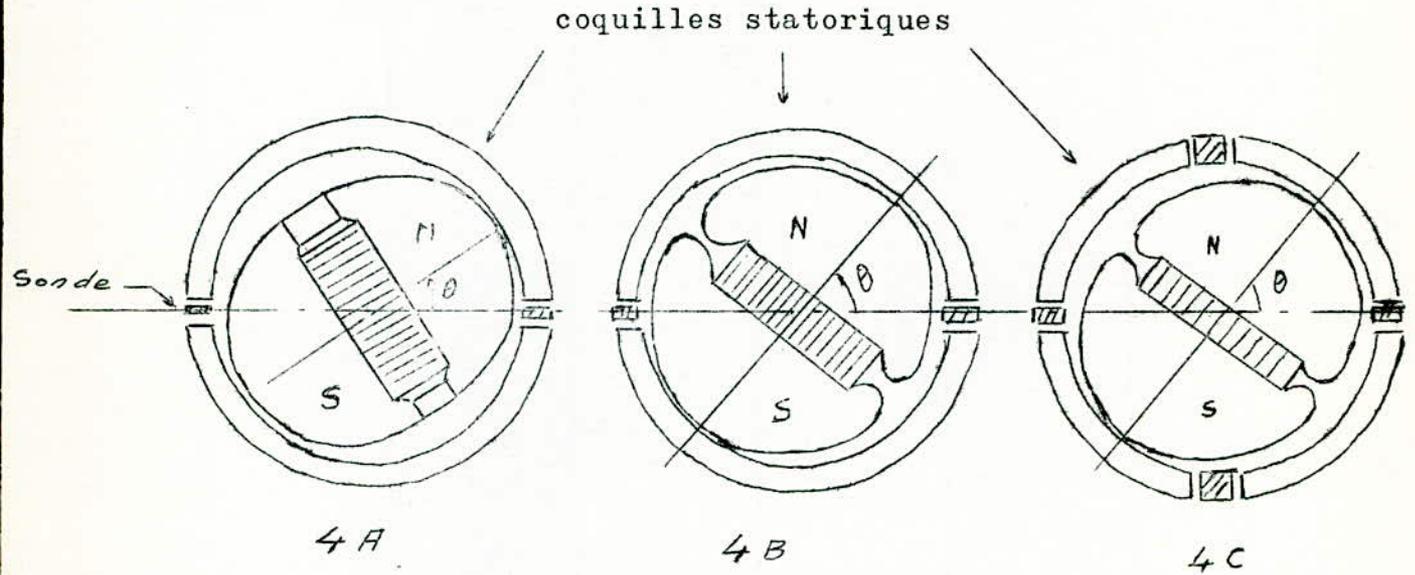
REMARQUE.

Pour les synchro résolveurs triphasés, au lieu d'une tension caractéristique, ils en fournissent trois toutes autant caractéristiques.

Considérons un synchro résolveur dont le rotor est un aimant permanent de forme appropriée (figure 4) mais dont le stator est constitué par deux coquilles semi-cylindriques laissant entre elles un mince entrefer, ou plus exactement deux diamétralement opposés. Dans chacun d'eux on introduit une sonde de Hall. Les 2 sondes étant montées en série, on recueille comme on le sait, une tension de Hall $V_h = K I B \theta$, $B \theta$ étant évidemment fonction de la position angulaire du rotor.

Dans la figure 4A, la forme de l'aimant statorique est telle, que $B \theta$ est proportionnel à θ . Ce qui donne une tension de Hall $V_h = K I \theta$.

Dans la figure 4 b, la forme de l'aimant est telle que B_{θ} est proportionnel à $\sin \theta$ ce qui entraîne $V_h = K I \sin \theta$ en figure 4 c, le stator comporte 4 entrefers en quadrature. Il y a donc un couple de sondes horizontales et un couple de sondes verticales. L'un nous permet d'obtenir : $V_{h1} = K I \sin \theta$, l'autre : $V_{h2} = K I \cos \theta$.



- Télé-transmissions. (Liaison de synchro détection)

Les résultats précédents sont valables aussi bien pour des courants continus que pour des courants alternatifs. Dans le 2^e cas, on prendra $I = I_e \text{ ff}$.

Un synchro résolveur à 2 couples de sondes Hall (fig. 4 c) alimentées par la même tension alternative U , fournit deux tensions ayant respectivement pour valeurs : $KU \sin \theta$ et $KU \cos \theta$ à la sortie du transformateur de rapport $\frac{1}{1}$ avec point neutre car ces deux tensions sont amplifiées identiquement en A_1 pour l'une

.../...

et en A₂ pour l'autre de façon à pouvoir alimenter les deux couples de sondes d'un synchro résolveur récepteur identique au synchro résolveur émetteur. Toutefois les connexions sont croisées c'est-à-dire que les sondes verticales du récepteur sont alimentées par les sondes horizontales de l'émetteur et vice versa. Les deux tensions de Hall recueillies au récepteur existent les deux primaires dont le secondaire unique, fournit une tension V. On démontre facilement que la tension est nulle si les deux rotors émetteur et récepteur occupent la même position :

$$U_1 = K U \sin \theta \cos (\theta - \alpha) \text{ et } U_2 = K U \cos \theta \sin (\theta - \alpha)$$

α = écart de position des deux rotors, il suffit d'écrire que : $V = U_1 - U_2$ en développant on trouve que : $V = 0$ pour $\alpha = 0$. On peut donc utiliser V comme signal de commande d'un petit servo moteur assurant la similitude des azimuts ; c'est-à-dire le synchro nisme de marche de deux rotors.

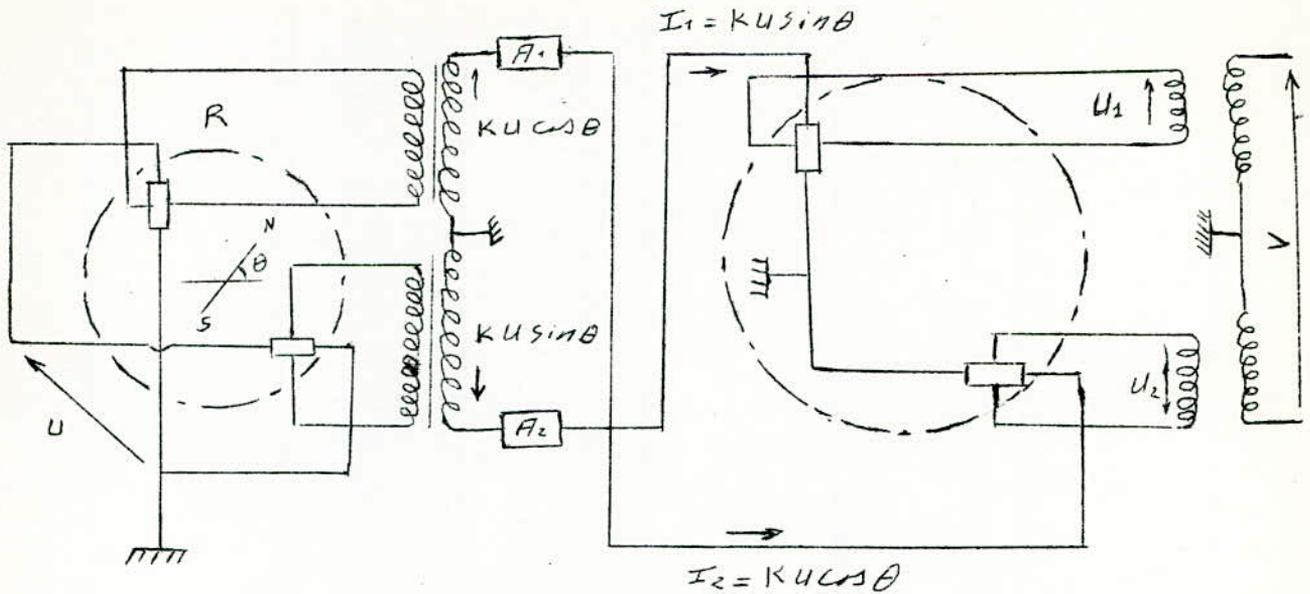
- Emploi des synchro résolveurs.

Un des emplois possible de ces montages, est la commande numérique des machines outils. On notera surtout que ce dispositif permettant la télé-transmission d'informations, fait appel à des machines sans collecteurs, sans bagues, sans bobinage ; de là son intérêt. De plus, les machines sont légères (environ 30 gr). Elles sont employées en aéronautique.

Le schéma de principe de la liaison de synchro résolveur à effet Hall en courant alternatif, est donnée ci-dessous :

(voir page suivante)

.../...



- Moteur à courant continu sans collecteur.

Examinons le montage de la figure (A) :

Il comprend : un synchro résolveur de commutation à effet Hall accouplé à un petit moteur. Le stator de ce dernier porte deux bobinages en quadrature, le rotor est un aimant rectiligne. Le synchro résolveur est bâti pour que les sondes de Hall, disposées dans les entrefers donnent les tensions :

$$U_2 = K I \sin \theta \quad \text{et} \quad U_1 = K I \cos \theta$$

donc les courants I_1 et I_2 sont proportionnels à U_1 et U_2 . Après amplification par A_1 et A_2 , les dits courants servent à alimenter chacun des deux enroulements statoriques du moteur en sorte, que l'on obtienne deux flux ayant pour valeur respectives :

$$\phi_1 = K \cos \theta \quad \text{et} \quad \phi_2 = K \sin \theta$$

on aura donc un flux résultant ϕ calé à l'angle θ comme l'est le rotor du synchro résolveur. Ce flux exerce sur l'aimant un couple de valeur : $C = K \mathcal{E} \phi$ - \mathcal{E} = flux émis par l'aimant.

.../...

on sait que le couple engendré par deux flux faisant un angle α est $C = K \cdot \Phi \cdot \sin \alpha$, or ici $\alpha = 90^\circ$. $\rightarrow C = K \Phi$

Sous l'action de ce couple, l'aimant se met à tourner entraînant à la même vitesse le rotor du résolveur en sorte que le flux Φ se dérobe constamment. Le couple conservant la valeur constante ci-dessus indiquée. Nous nous trouvons en présence d'un moteur à courant continu sans collecteur, tournant aussi longtemps que les sondes sont alimentées. Son intérêt est justement l'absence de collecteur supprimant ainsi tout entretien.

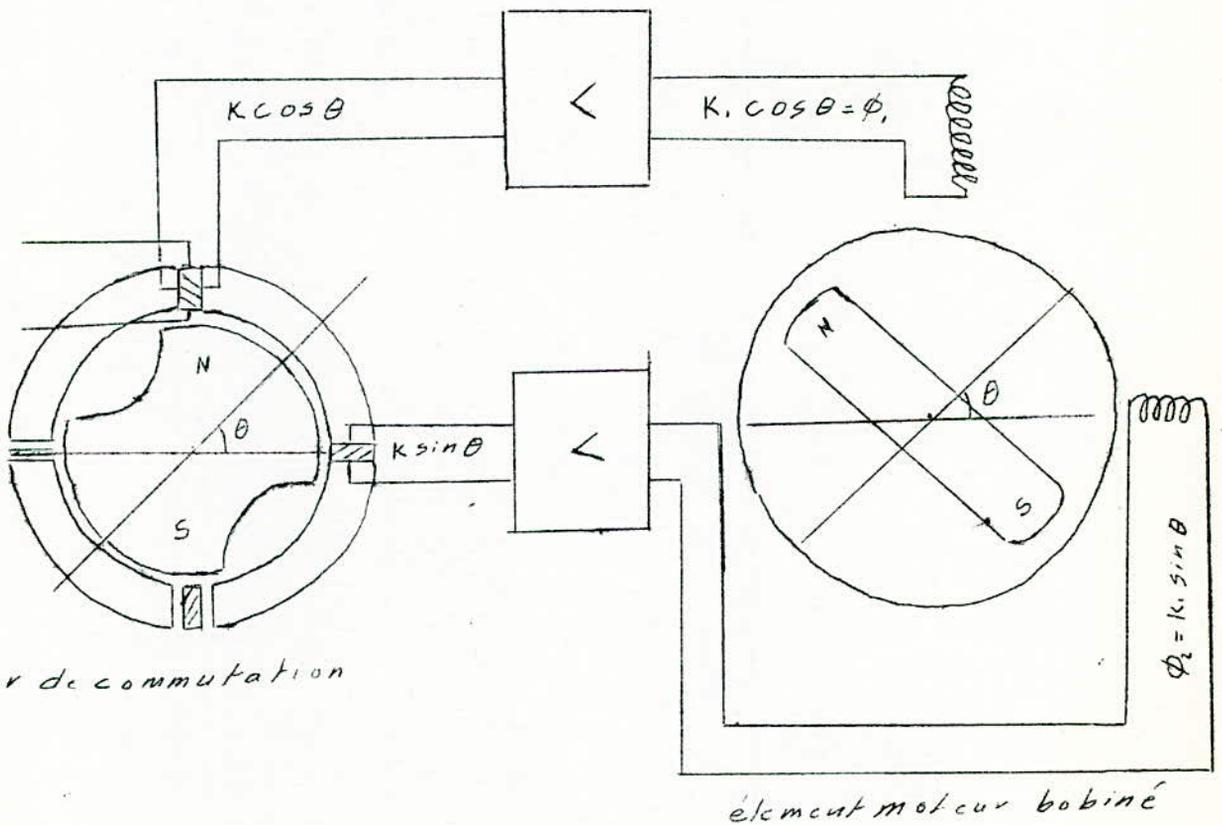


FIGURE A

.../...

- Utilisations :

Ce micro moteur fonctionne à haute altitude et dans le vide, d'où son emploi dans l'industrie aéro-spatiale comme moteur d'asservissement. Il développe une puissance de 2,5 W environ.

- Transformateur de coordonnées :

La transformation de coordonnées cartésienne est immédiatement résolue par la mise en oeuvre d'un synchro résolveur à 4 entrefers statoriques (figure 4 C).

Les sondes sont montées en série par deux, chacune d'elles étant reliée cette fois ci à la sonde voisine en quadrature avec elle (figure) et non pas comme précédemment à la sonde diamétralement opposée. Ceci étant, soit à faire un changement de coordonnées planes par rotation d'un angle θ des deux axes de coordonnées

$$\text{On aura : } X = x \cos \theta - y \sin \theta$$

$$Y = x \sin \theta + Y \cos \theta$$

x et y sont les anciennes coordonnées, X et Y les nouvelles après une rotation d'angle θ .

Ayant calé le retour à l'angle θ , il suffit d'alimenter les sondes en quadrature 1 et 2' par un courant $I_1 = x$ et les deux autres 1' et 2 un courant $I_2 = y$.

On recueille alors les 4 tensions :

$$V_1 = x \cos \theta \qquad V_2' = x \sin \theta$$

$$V_1' = y \cos \theta \qquad V_2 = y \sin \theta$$

à la sortie de l'un des transformateurs, celui de bas on

à :

$$X = V_1 - V_2 = x \cos \theta - y \sin \theta$$

à la sortie de l'autre, à droite on à :

$$y = V_1' + V_2' = x \sin \theta + y \sin \theta$$

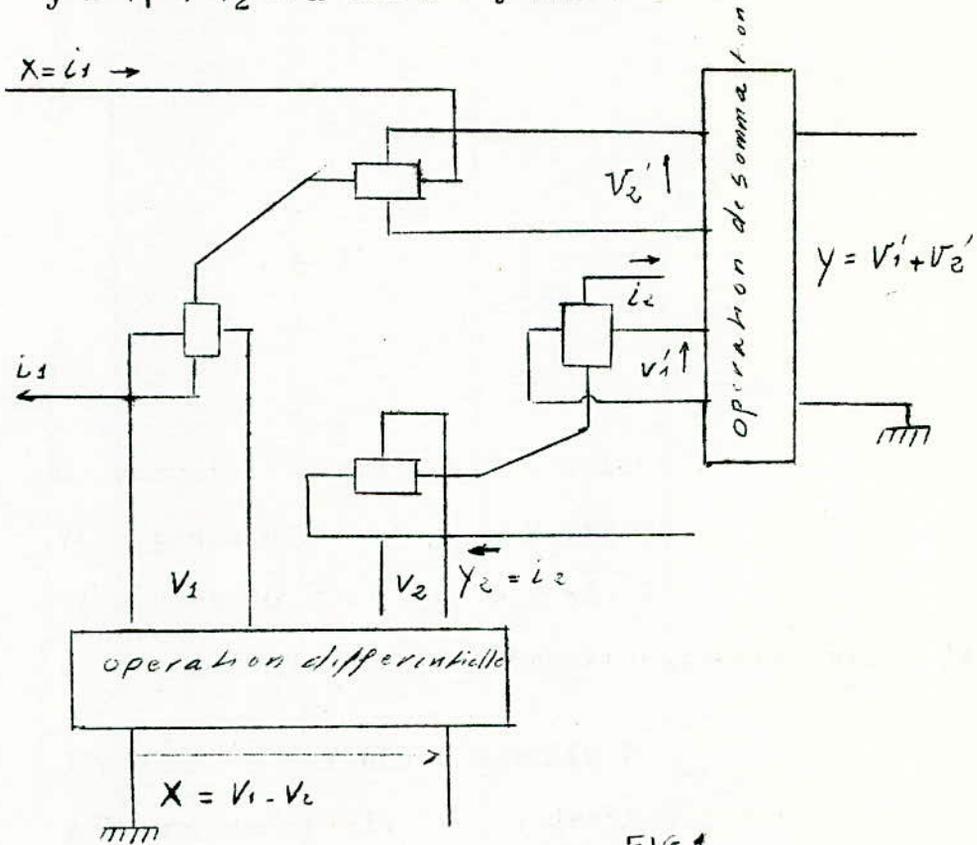


FIG 1

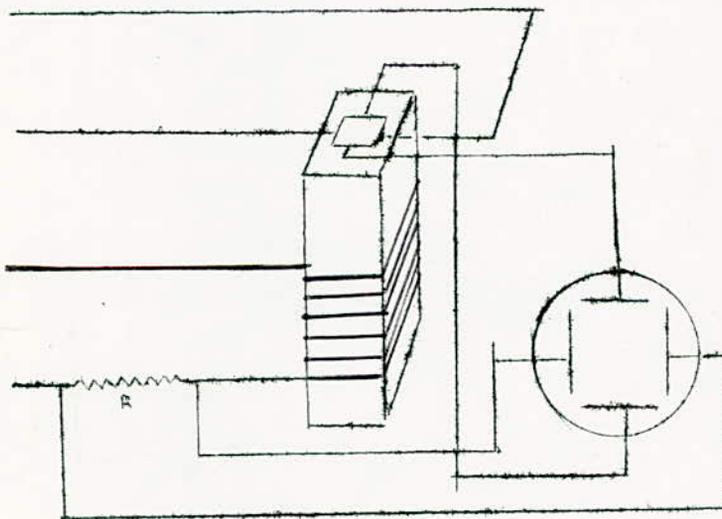
changement de coordonnées cartésiennes planes.

.../...

- Mesure du cycle d'hystérésis :

La mesure de l'hystérésis des matériaux magnétiques constitue également une application très importante, car on sait que cette caractéristique détermine les qualités d'un grand nombre de matériaux magnétiques utilisés dans les montages. Les générateurs de Hall sont spécialement efficaces, car ils permettent de mesurer le champ instantané sans risque de retard, et l'on obtient une courbe dite boucle d'hystérésis, que l'on peut observer sur l'écran d'un oscilloscope.

Les éléments essentiels du montage sont représentés sur la figure (1). Le matériau magnétique à essayer est placé dans une bobine, parcourue par un courant alternatif, qui est en phase avec le courant de contrôle. On obtient une chute de tension dans la résistance montée en série avec l'enroulement et la tension recueillie est appli-



quée sur les plaques de déviation horizontale de l'oscilloscope. Le générateur de Hall est placé en contact avec le matériau magnétique à essayer de telle sorte que le champ magnétique soit perpendiculaire et la tension obtenue est appliquée sur les plaques de déviation verticale.

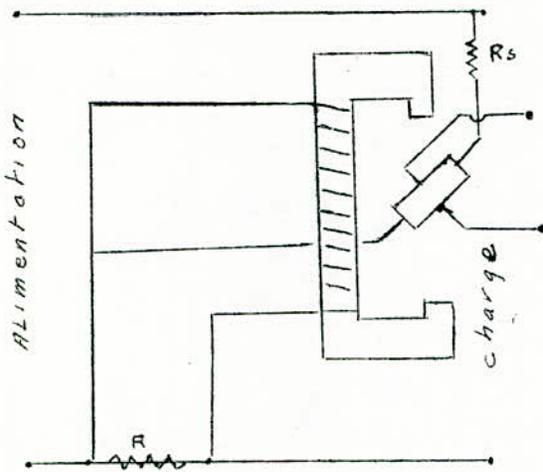
fig.1 - Etude d'un matériau magnétique-

- WATTMETRE A EFFET HALL.

Un générateur de Hall est essentiellement un dispositif

.../...

multiplicateur puisqu'il produit une tension de sortie proportionnelle au produit du courant de contrôle et du champ magnétique. Puisque la puissance est déterminée par le produit du courant et de la tension, suivant la formule bien connue $P = EI$, il est seulement nécessaire d'avoir un courant de contrôle proportionnel à la tension et le champ magnétique proportionnel au courant du circuit, pour obtenir une tension de sortie proportionnelle à la puissance obtenue dans le circuit.



On peut ainsi réaliser un wattmètre pour mesurer des puissances dans les circuits alternatifs. Le champ magnétique est fourni par un bobinage parcouru par le courant du secteur, et le courant de contrôle est obtenu au moyen d'un transformateur abaisseur de tension connecté aux bornes de la charge. Le signal de sortie est, d'ailleurs, une tension alternative de fréquence double superposée à une tension continue.

L'effet obtenu est extrêmement rapide et, si un oscilloscope est employé comme dispositif de contrôle de sortie, il est possible d'observer ainsi toutes les variations de la puissance instantanée. Ce dispositif est très utile pour étudier les phénomènes transitoires, qui se produisent en cas de troubles, lorsqu'un circuit a été coupé ou interrompu.

.../...

REMARQUE.

(Cas des ondes de très hautes fréquences).

Dans le vide de telles ondes propagent un champ électrique E et un champ magnétique $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu}$. E produisant un courant dans la sonde de Hall semi-conductrice, H fournissant le champ B nécessaire, on aura donc une tension de Hall proportionnelle à $E.H$, donc à la puissance HF transportée par l'onde. Un tel wattmètre de Hall peut être introduit dans un guide d'onde, il indiquera la puissance transportée par l'onde.

C O N C L U S I O N .

Le générateur de Hall joue de nos jours, un rôle de plus en plus important. Des multiples utilisations permettent déjà de réaliser un grand nombre d'appareils électroniques. Nous n'avons cité que les applications les plus courantes, mais il en existe bien d'autres que nous n'avons pas énumérées, car jusqu'à ce jour, celles-ci ne sont pas d'une utilisation pratique. Il est permis de penser que l'évolution de la technique et l'ingéniosité des hommes, pourront vaincre les difficultés et réaliser d'autres appareils basés sur l'effet Hall.
