

18/78

UNIVERSITE D'ALGER



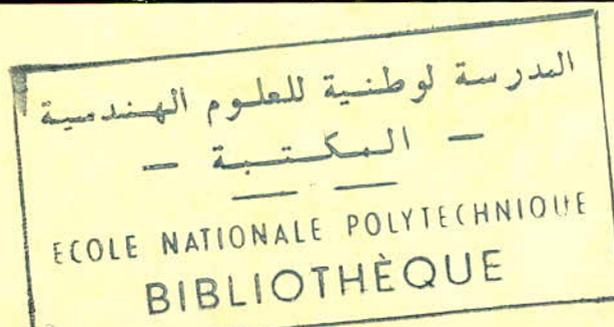
ECOLE NATIONALE
POLYTECHNIQUE

2ex

DEPARTEMENT ELECTRICITE

PROJET DE FIN D'ETUDES

VISUALISATION DES CHAMPS
MAGNETIQUES DANS UNE
MACHINE A COURANT CONTINU



Proposé et dirigé par :

Mr. Alain Gresillon

Professeur à l'E.N.P.

Etudié Par :

ZEGADI Nadir

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE
POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRICITE

PROJET DE FIN D'ETUDES

VISUALISATION DES CHAMPS
MAGNETIQUES DANS UNE
MACHINE A COURANT CONTINU

Proposé et dirigé par :

Mr. Alain Gresillon

Professeur à l'E.N.P.

Etudié Par :

ZEGADI Nadir

PROMOTION JUIN 1978

Je dédie ce mémoire

à ma famille.

à mes amis.

à tous les élèves de l'ENP

Remerciements

Je tiens à remercier personnellement toutes les personnes qui ont participé, de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Je remercie particulièrement, Monsieur Gréillon Professeur de "Régimes transitoires" à l'ENP qui, par sa simplicité et son exemplaire volonté, a su diriger ce travail de main de maître.

Qu'il me soit également permis d'exprimer ma sincère gratitude envers Monsieur Zégadi Ahmed et Madame Belarbi pour l'immense aide qu'ils ont fournie pour la réussite de ce mémoire.

Que Monsieur Khabouati et RABAH responsables du laboratoire d'électrotechnique de l'ENP; Monsieur Zaghouane Saïd, chef architecte à l'EPAU; Soient vivement remerciés pour l'aide matérielle qu'ils m'ont fournie

A - INTRODUCTION

Le développement des machines à courant alternatif n'a que très peu influé sur l'importance des machines à courant continu dans la pratique industrielle.

On essaye continuellement de les remplacer par d'autres machines à courant alternatif, mais leur ~~apport~~ reste considérable dans le domaine électrique.

La machine à courant continu date du Siècle dernier.

En effet, l'histoire de son évolution commence avec la découverte de l'induction électromagnétique (1831) par FARADAY.

Après cela, il y a eu graduellement les machines magnéto-électriques à aimants permanents, électromagnétiques à excitation indépendante, électromagnétiques à auto-excitation et induit élémentaire, multipolaires à induit perfectionné (1880).

Ainsi, depuis la fin du Siècle dernier, les changements qui ont été effectués sur cette machine sont uniquement d'ordre construction, matériaux, forme

L'entraînement des machines alternatives reste pratiquement une grande application des machines à courant continu.

Mais ce mémoire n'est pas destiné à l'étude de la machine à courant continu en elle-même, mais est destiné à la mise en relief du plus important phénomène dans les machines électriques tournantes : champs magnétiques au niveau de l'entrefer.

Visualiser ces champs nécessite l'usage d'un oscilloscope, pièce maîtresse de l'électronique.

La visualisation reste une expérimentation très appréciée pour la mise en relief de différents phénomènes électriques et la compréhension de la théorie.

B - Rappel théorique sur l'induction dans une machine à courant continu :

toute rotation dans une machine à courant continu a pour base une induction magnétique.

Selon le mode de fonctionnement affecté à la machine, divers champs magnétiques apparaissent au niveau de l'entrefer de la machine.

I - Champ magnétique principal :

C'est le champ magnétique créé par les pôles principaux de la machine jouant ainsi leur rôle d'aimants permanents.

Loin de la saturation (perméabilité magnétique de l'air supposée constante) le champ est proportionnel à l'induction magnétique du niveau de l'entrefer de la machine.

En développant l'entrefer de la machine et en portant en abscisses la distance comptée le long de la périphérie de l'induit et en ordonnée la valeur de l'induction magnétique, on note que l'induction est maximale positive sous le pôle NORD ; maximale négative sous le pôle SUD. Sa valeur est sensiblement constante (à la différence de reluctances près) sous les épanouissements polaires. Elle passe par une valeur nulle aux points correspondants à la ligne neutre théorique (ce qui précède concerne le fonctionnement de la machine en génératrice. Le cas du moteur correspond à une valeur maximale positive sous le pôle SUD et maximale négative sous le pôle NORD). (schématisation fig. 1)

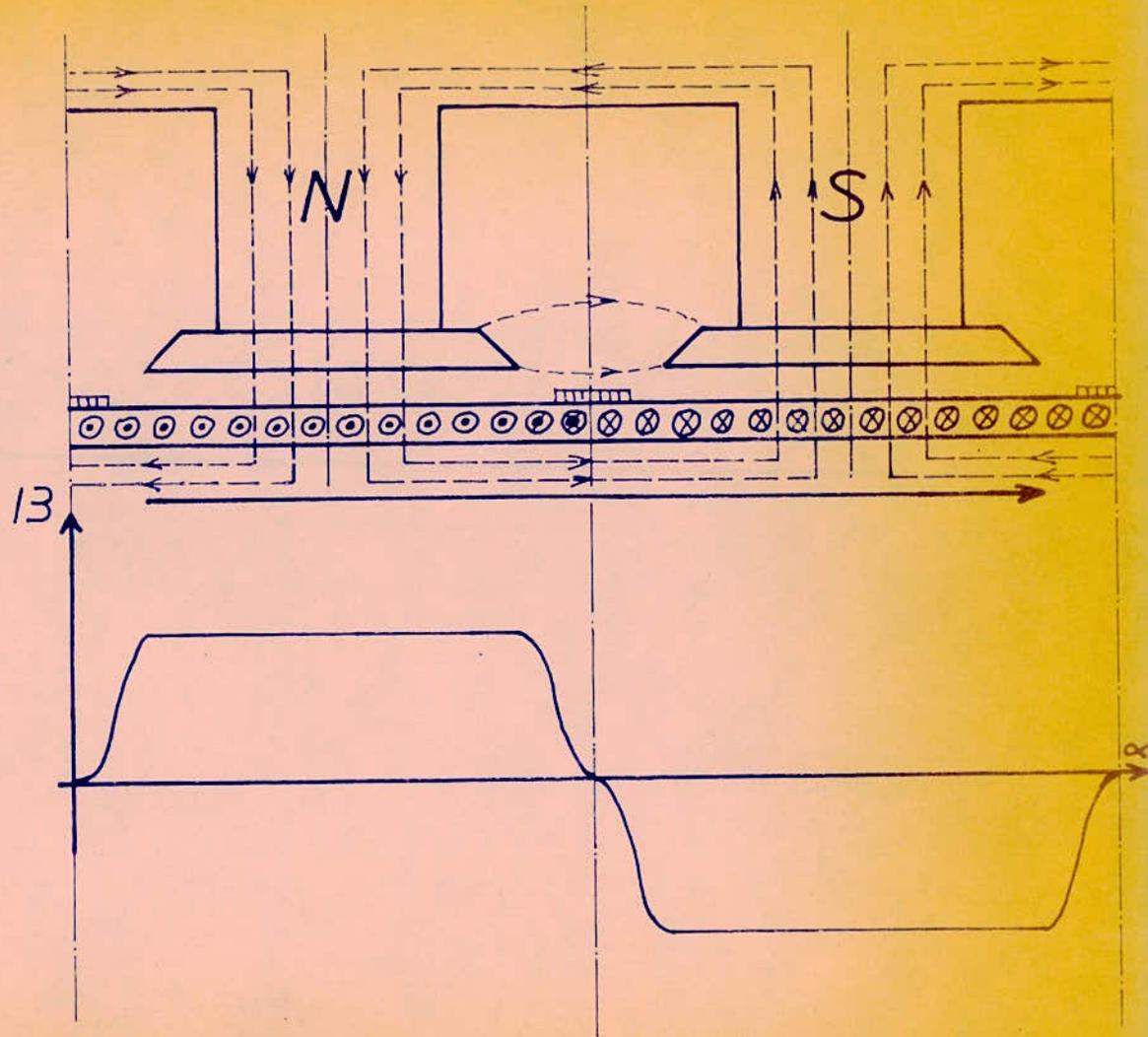
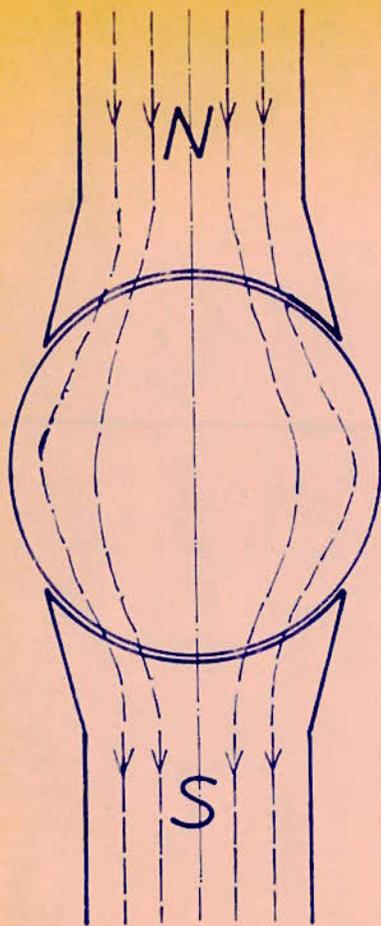


Fig1 Distribution de l'induction principale
le long de l'entrefer

II - Champ magnétique transversal d'induit :

1 - Loi de LENZ :

"tout effet tend à s'opposer à la cause qui le produit".

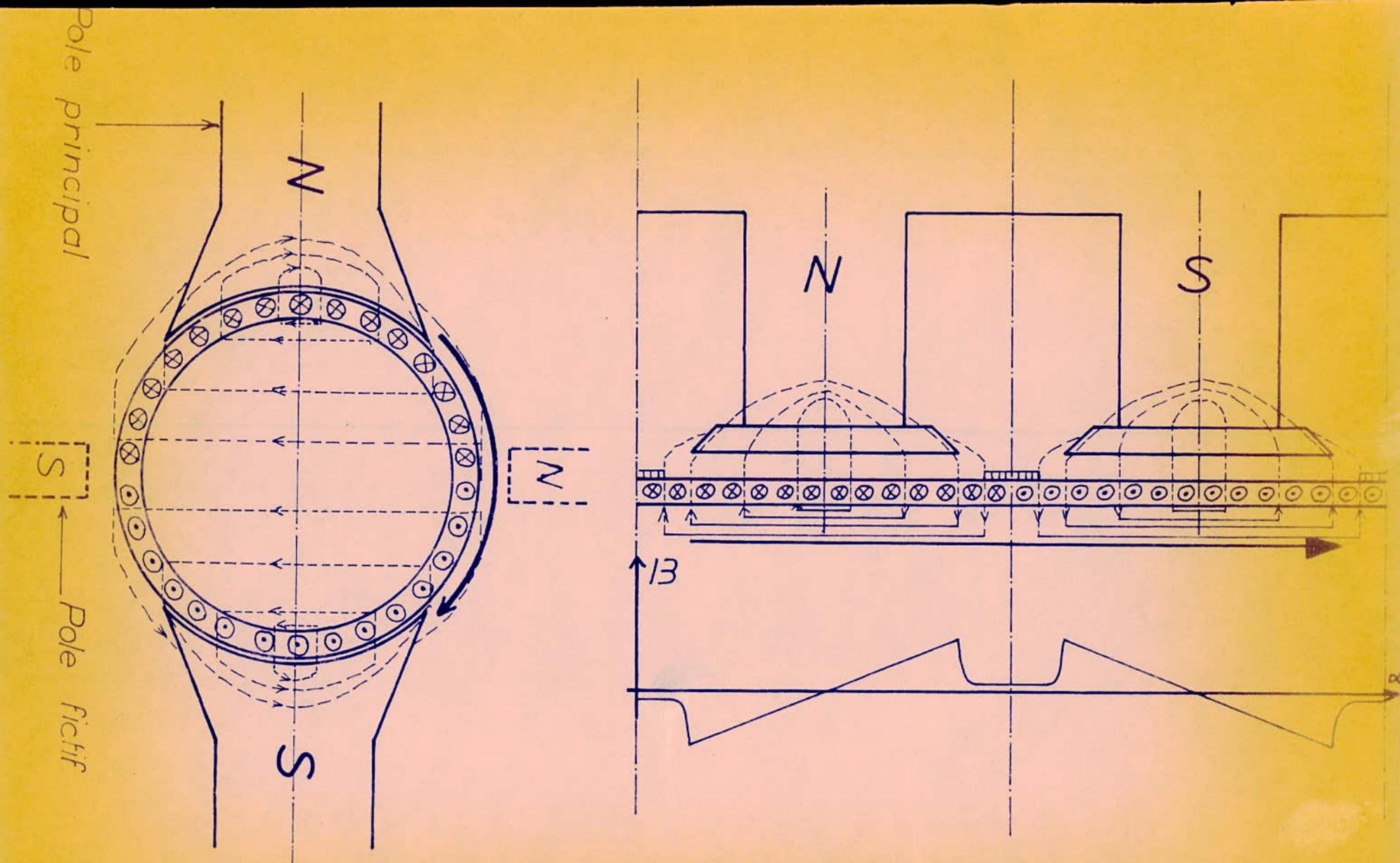
2 - Application à la machine à courant continu :

Les balais étant calés sur la ligne neutre théorique, les conducteurs situés sous le même pôle, parcourus par des courants de même sens, tendent à créer une force magnéto-motrice qui engendre un flux qui se ferme à travers l'entrefer et les pièces polaires de la machine. Le champ correspondant est perpendiculaire au champ principal le renforçant sous les cornes polaires d'entrée et l'atténuant sous celles de sortie.

Il est symétrique par rapport à la ligne neutre théorique perpendiculaire ainsi, à l'axe des pôles principaux d'où la dénomination : Champ TRANSVERSAL d'INDUIT.

On peut alors faire l'analogie entre ce champ et celui créé par deux pôles fictifs dont l'axe serait la ligne neutre théorique. La variation de l'induction magnétique (lignes d'induction) le long de l'entrefer est la suivante :

- nulle sur l'axe des pôles
- valeur minimale sur la ligne neutre (cette valeur est nulle si on ne tient compte dans la distribution du flux magnétique que de celui passant sous les épanouissements polaires, le flux de fuite devant passer à travers une grande reluctance est négligeable).



- Fig 2 - Distribution du champ transversal d'induit pour une génératrice

- la valeur maximale négative ou positive est située aux extrémités des épanouissements polaires.

III - Champ magnétique résultant :

1 - hypothèse de non saturation :

Si on travaille à induction suffisamment faible pour que la perméabilité des éléments du circuit magnétique puisse être considérée constante, le champ résultant est déterminé par la superposition des champs : transversal et principal.

On note ainsi que l'induction est renforcée sous les cornes polaires d'entrée et diminuée sous les cornes polaires de sortie (cas du moteur). Ce qui revient à dire qu'il y a démagnétisation des cornes polaires de sortie et magnétisation des cornes polaires d'entrée.

Du fait qu'on a supposé la non-saturation des éléments du circuit magnétique (principalement l'entrefer et les épanouissements polaires), le point de fonctionnement appartient à la partie linéaire de $\Phi = f(H)$. On voit ainsi que magnétisation et démagnétisation ne fait que changer la forme de l'induction sans influencer sur la valeur du flux total principal (voir figure 3).

2 - Cas de la saturation :

Pour une induction dépassant le coude de la saturation, la superposition des deux champs n'est plus possible du fait que la reluctance des cornes d'entrée (pour le moteur)

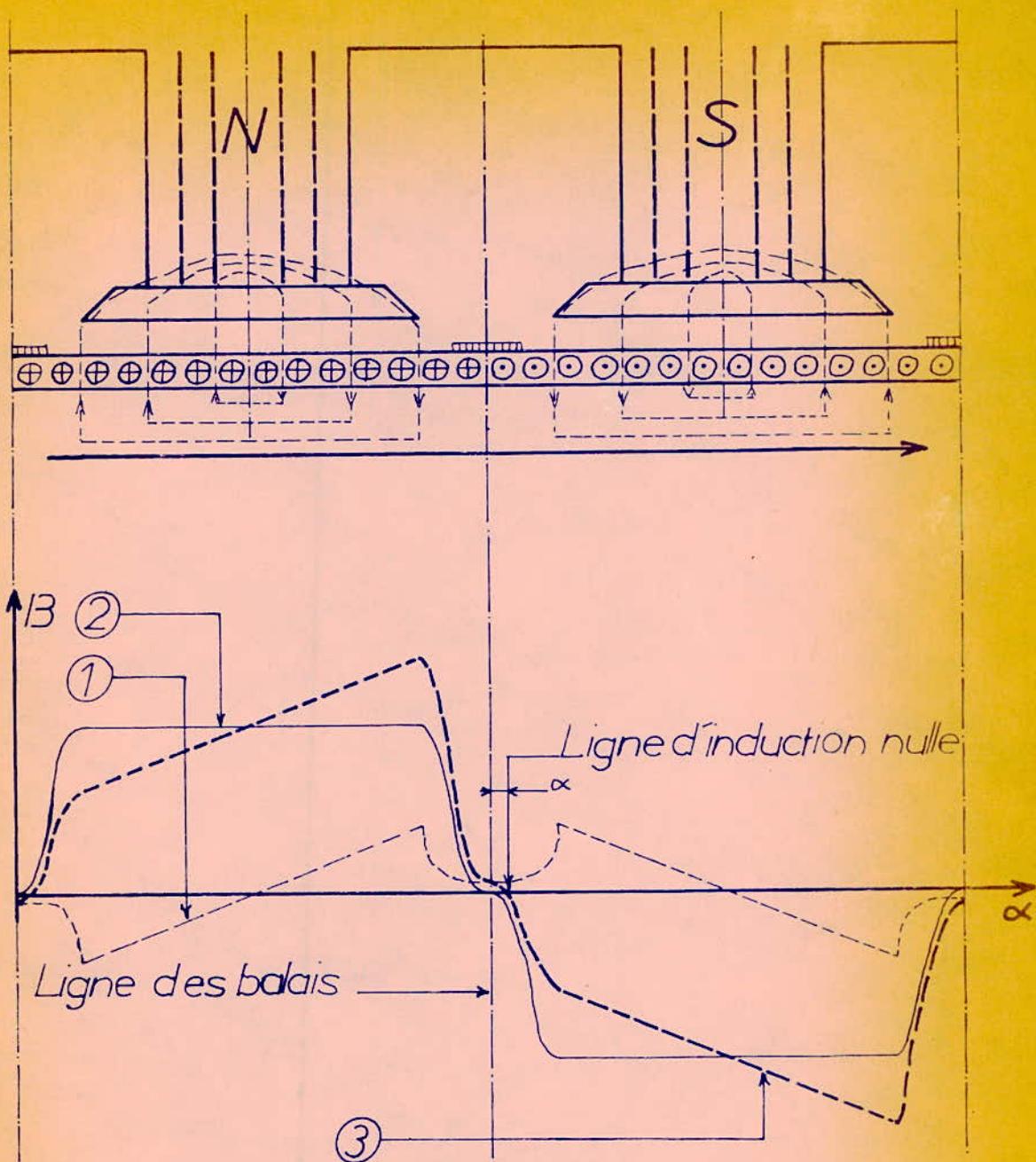


Fig3 Distribution du champ résultant pour une génératrice

- ① C.M. Transversal
- ② C.M. Principal
- ③ C.M. Resultant

et de sortie (pour la génératrice) croît plus qu'elle ne décroît sous les cornes de sortie. Raison pour laquelle la diminution du champ magnétique dans la partie saturée est plus grande que son accroissement sous l'autre corne polaire non saturée.

On notera enfin que ce n'est que par suite à la saturation du circuit magnétique qu'il y a existence d'une réaction magnétique transversale d'induit à cause de la diminution du flux principal (dans ce cas, la valeur ET la forme du flux sont changées).

Cet effet démagnétisant de la saturation engendre une chute de tension caractérisant la réaction d'induit.

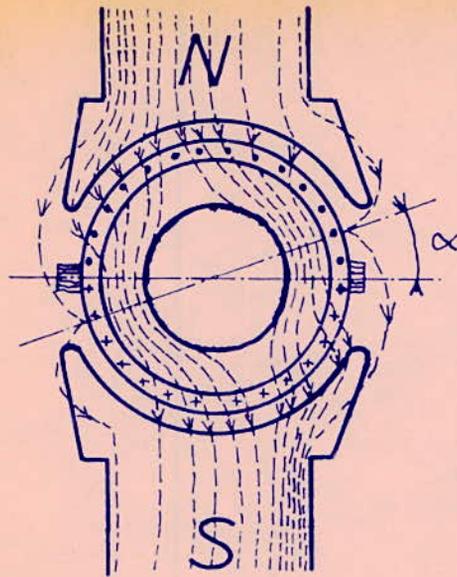
(consulter fig. 4)

3 - Distorsion magnétique des lignes d'induction :

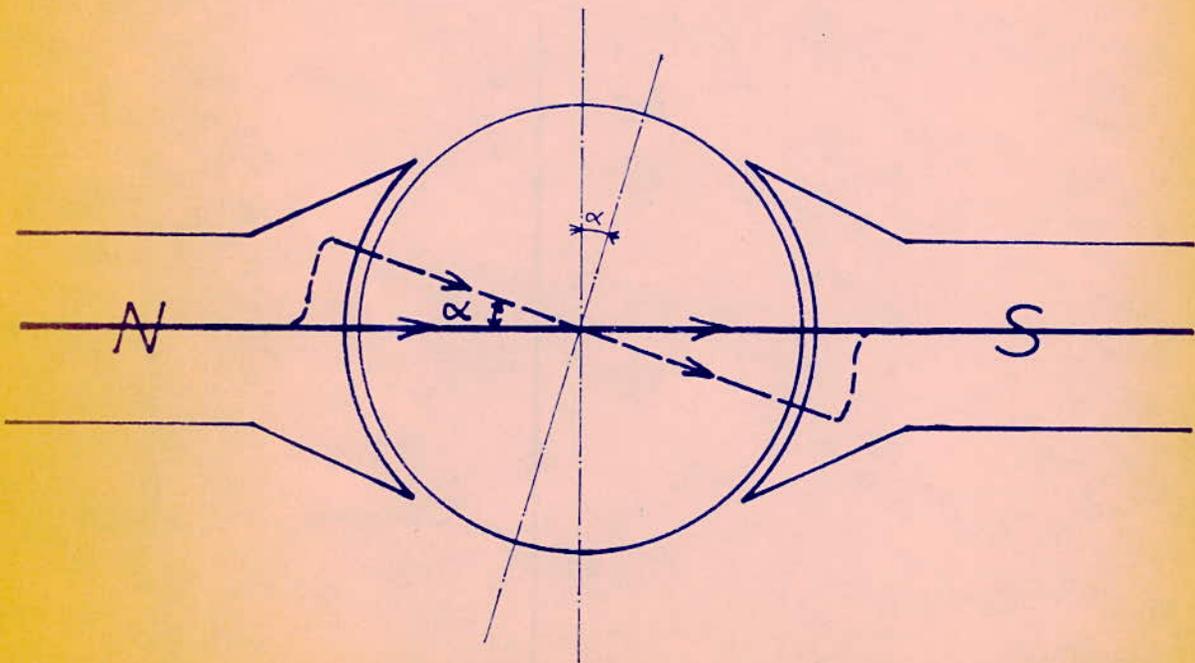
Lors de la détermination du champ résultant, on a conclu que pour une génératrice comme pour un moteur, il y a diminution de l'induction sous l'une des deux cornes polaires et augmentation sous l'autre.

La représentation des lignes d'induction par leur ligne moyenne montre que cette ligne a été, comparativement au fonctionnement à vide, "tordue" d'un angle α dans le sens de rotation de l'induit de la machine.

On a là, le phénomène de distorsion magnétique (fig. 5).



_Fig6_distorsion magnétique



_Fig5_distorsion de la ligne moyenne d'induction

4 - Décalage de la ligne neutre théorique :

4 - 1 . Définitions :

* ligne neutre théorique :

C'est la ligne déterminée par l'axe des balais dont le rôle est d'inverser le sens du courant dans le conducteur de passage sous ce balais

* ligne neutre magnétique :

C'est la ligne joignant les points aux caractéristiques suivantes :

- l'induction y est minimale
- le flux magnétique maximal
- la force électromotrice induite nulle

4 - 2 . Lorsqu'on n'a que le champ magnétique principal, la ligne neutre magnétique et théorique coïncident.

Mais, l'existence du champ magnétique transversal d'induit provoque une distorsion magnétique des lignes d'induction. Ainsi, les nouveaux points où l'induction est minimale, le flux maximale, la force électromotrice induite nulle sont déphasés d'un angle α (angle de torsion) par rapport à la ligne neutre théorique déterminée par la position des balais.

Ces points définissent la nouvelle ligne neutre magnétique. On note, du fait que la nullité de la force électromotrice induite et le changement du sens des courants dans les conducteurs en contact avec les balais s'effectuent en des points différents, la diminution de la qualité de la commutation. (schématisation figure 6)

IV - Moyens utilisés pour l'amélioration de la qualité de la commutation et l'élimination de la réaction transversale d'induit :

1 - Décalage des balais :

On sait que les balais doivent satisfaire la propriété consistant en ce qui suit :

"Lors de son passage sous un balai, une spire en commutation doit couper un flux constant (maximum) donc une induction et une force électromotrice induites nulles

$$(e = \frac{d\Phi}{dt} = 0 \text{ et } B = 0).$$

Pour cela, la première idée est de décaler les balais de façon à obtenir l'orthogonalité entre l'axe des balais et la ligne d'induction moyenne, c'est à dire un décalage d'un angle α égal à celui dont a tourné cette ligne d'induction moyenne.

Ce décalage, suite à la distorsion, devrait normalement être fonction de l'intensité du courant circulant dans l'enroulement d'induit.

Pratiquement, pour les machines à faible puissance, on adopte une valeur moyenne quelles que soient les intensités considérées. Le grand inconvénient, dans ce décalage, est la création d'une réaction directe (longitudinale) d'induit qu'on verra ultérieurement.

2 - Compensation du champ transversal :

La compensation est une opération qui consiste à opposer au champ magnétique transversal un champ de même valeur et de sens opposé, éliminant ainsi les phénomènes très gênants que sont la mauvaise commutation, la distorsion magnétique et principalement la chute de tension suite à la réaction transversale d'induit.

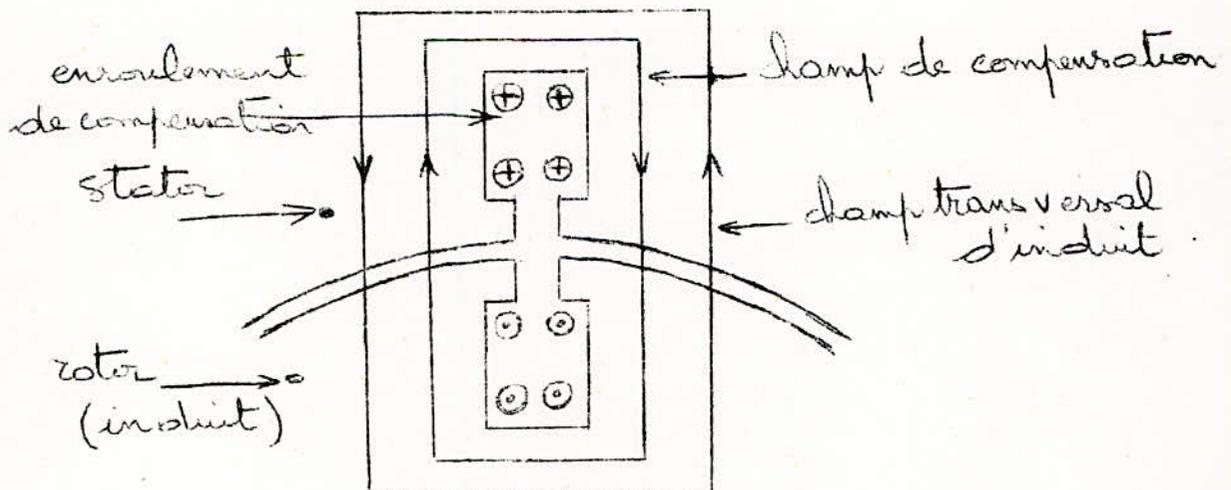
2 - 1 : Enroulements de compensation :

Le principe consiste à créer, pour chaque valeur de l'intensité, un champ égal et opposé en sens dit de compensation. Pour cela, une première méthode revient à un placement dans les épanouissements polaires (la reluctance de l'air étant supposé assez grande pour permettre de négliger le flux de suite) de conducteurs traversés par le MEME courant que celui de l'enroulement d'induit en valeur mais avec un sens opposé.

Ces conducteurs sont fixes et alimentés en série avec l'induit pour assurer une compensation parfaite du champ magnétique transversal d'induit.

Ainsi, chaque conducteur, sous les épanouissements polaires, a un conducteur fixe en face de lui parcouru par un courant de même intensité mais en sens opposé.

Malheureusement, ce procédé demande beaucoup de travail méticuleux. Il est très onéreux d'où une très rare utilisation pratique (constructions spéciales, servamécanismes).



2 - 2 : Pôles auxiliaires de commutation :

L'idée d'installer des pôles auxiliaires dans la compensation vient de la remarque faite auparavant et qui précisait que le champ transversal d'induit est équivalent au champ créé par deux pôles fictifs dont l'axe est la ligne neutre théorique.

Ainsi, pour compenser le champ transversal d'induit, il faut neutraliser l'effet de ces deux pôles fictifs.

Pour réaliser cela, plaçons à l'endroit du pôle fictif NORD un pôle réel SUD et vis-versa.

Ces pôles réels installés sont dits : Pôles auxiliaires de commutation.

Ils ont pour rôle de créer un champ magnétique capable :

- de compenser, quoiqu'imparfaitement, le champ magnétique transversal d'induit.
- d'améliorer notablement la qualité de la commutation.

Pour remplir ce double rôle, un pôle auxiliaire doit satisfaire les conditions suivantes :

a) sa polarité doit être celle du pôle inducteur qu'on rencontre en tournant, à partir de la ligne neutre, dans le sens du mouvement (ils doivent coïncider exactement avec les pôles fictifs précédemment cités mais avec des polarités inverses).

b) son flux doit être proportionnel au courant circulant dans l'enroulement d'induit de façon à ce qu'il y ait compensation du champ transversal. Pour cela :

- sa bobine inductrice doit être parcourue par le courant circulant dans l'enroulement d'induit.

- son circuit magnétique ne doit pas être saturé.

On verra lors de l'étude du champ créé par ces pôles auxiliaires, la meilleure position possible et les meilleures conditions de fonctionnement.

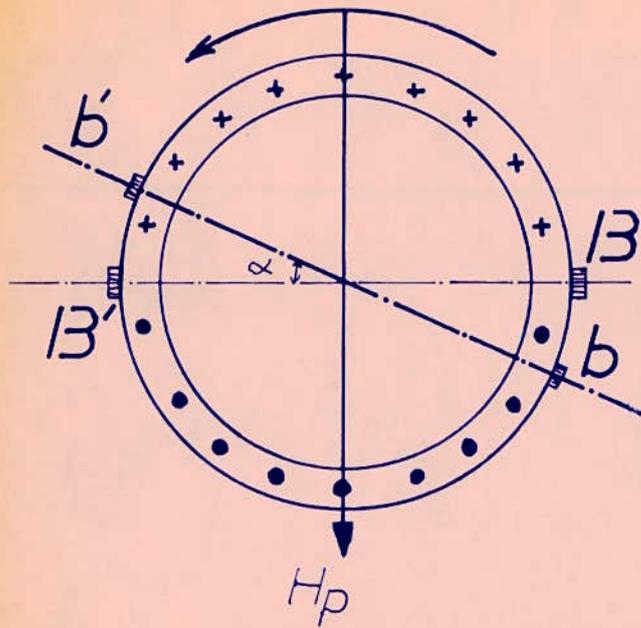
V - Champ direct d'induit :

On a précédemment énoncé que ce n'est que par suite au décalage des balais qu'il y a apparition d'un champ direct d'induit.

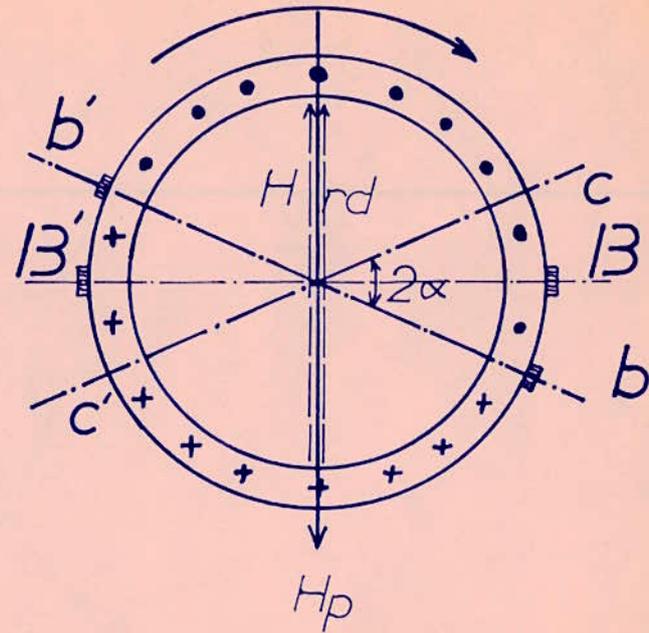
Le but de ce décalage étant la recherche de la qualité de la commutation essayant par là, de récolter aux balais un flux maximum donc une force électromotrice induite nulle. Pratiquement, on parle rarement de champ longitudinal d'induit du fait que le décalage des balais est très rarement effectué.

Pour mettre en relief ce champ, décalons la ligne neutre théorique caractérisée par l'axe des balais d'un angle égal à celui dont a tourné la ligne d'induction moyenne c'est à dire : α et considérons une machine bipolaire dont les balais sont décalés d'un angle α dans le sens de rotation si c'est une génératrice et dans le sens contraire si c'est un moteur :

(consulter la figure 7)

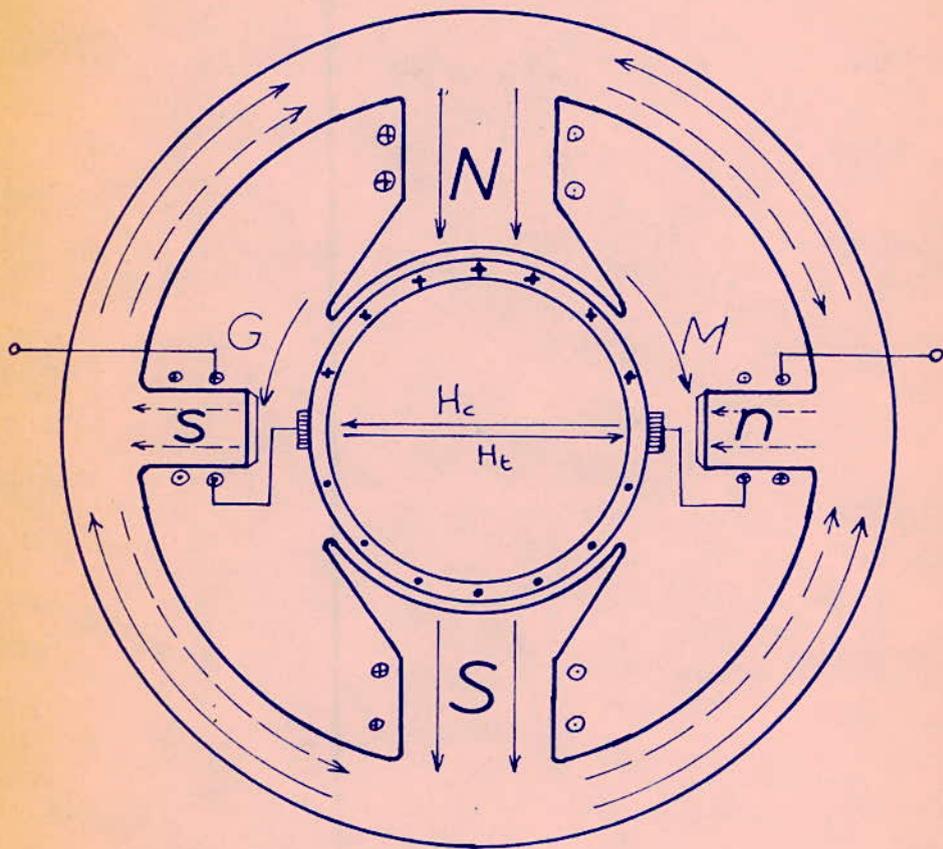


avant le décalage



après le décalage

- Fig 7 - Mise en relief du champ d'induit longitudinal



— Fig 8 —

Placement des poles auxiliaires

Mise en relief du champ de compensation

si on consulte les deux schémas de la figure 7 : avant et après le décalage, on note que le courant dans les conducteurs situés entre (B et b ; B' et b') a été inversé.

Si on considère maintenant les conducteurs situés dans un angle symétrique (2α), l'ensemble (b C b' C') est équivalent à une bobine dont l'axe correspond à celui des pôles.

Ils créent un champ qui s'oppose DIRECTEMENT au champ principal et dont les ampères-tours se retranchent de ceux des pôles inducteurs.

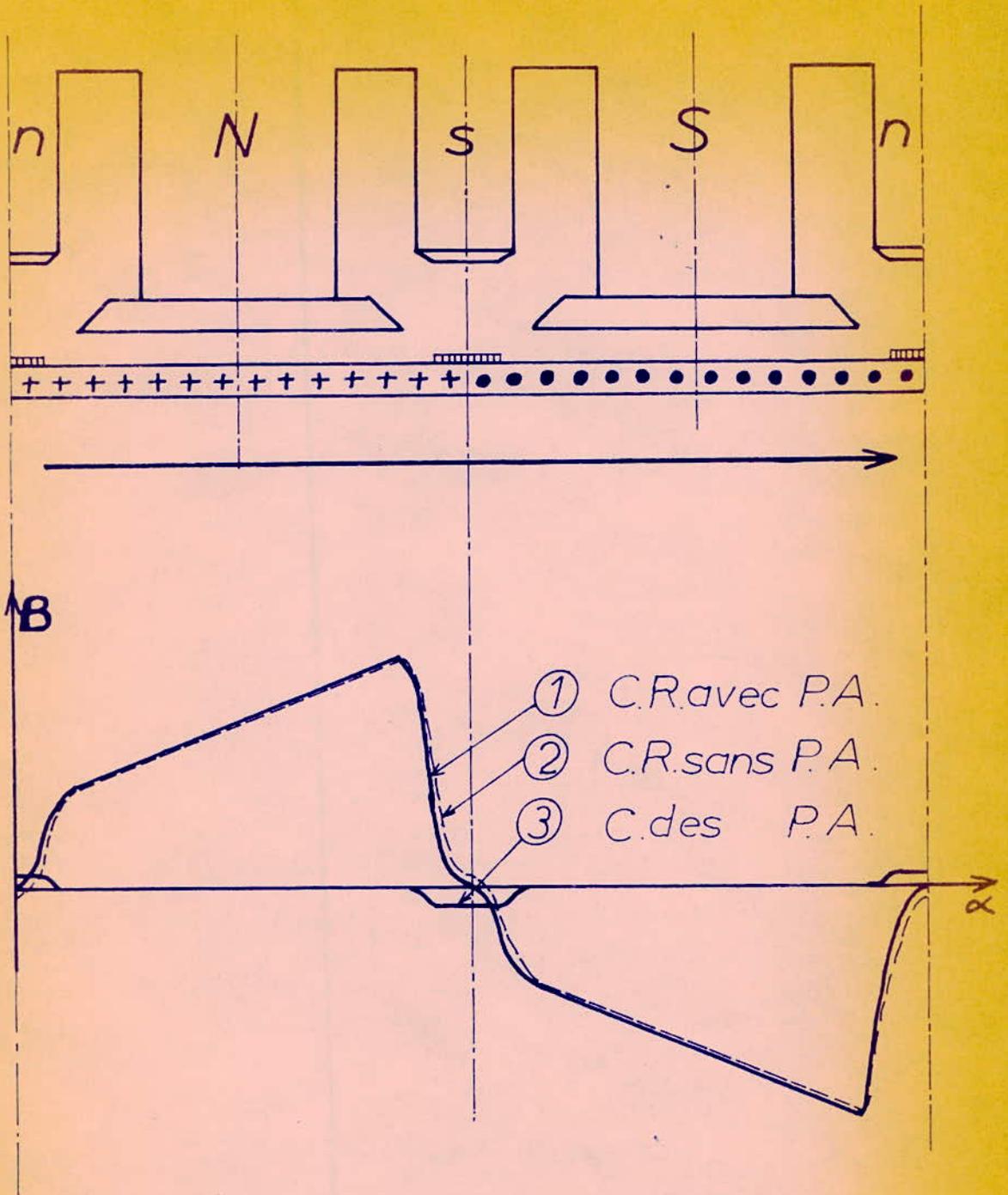
Ce champ est ainsi démagnétisant. On aurait pu avoir un champ direct magnétisant en effectuant le décalage dans le sens inverse à celui effectué précédemment.

(Ce décalage n'est pratiquement jamais effectué en raison de la très mauvaise commutation qui s'ensuit).

VI - Champ magnétique des pôles auxiliaires de commutation :

Lors de l'étude du champ magnétique principal, on a spécifié l'existence de pôles principaux pour la création de ce champ. De la même façon, on note, que pour créer le champ magnétique de compensation, il est possible d'utiliser des pôles auxiliaires de commutation.

On a déjà noté que l'enroulement inducteur de ces pôles doit être parcouru par le même courant que celui circulant dans l'enroulement d'induit. Pour cela on effectue un placement en série des deux enroulements.

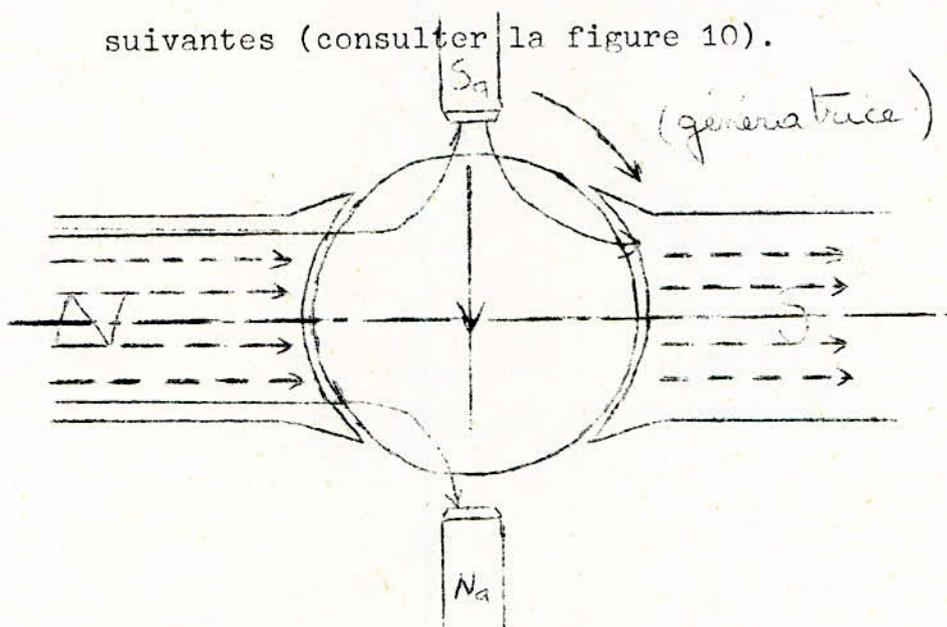


_ Fig9_ Distribution du champ resultant avec P.A..

Notons en plus que l'allure du champ créé par ces pôles est la même que celle du champ magnétique principal à des dimensions plus petites (fig. 8) et (fig. 9).

Mais ce procédé (usage des pôles auxiliaires) qui est d'une grande efficacité sur la qualité de la commutation ne remplit un rôle de compensation que très imparfaitement.

Cette imperfection est due principalement aux raisons suivantes (consulter la figure 10).



- 1 - le champ transversal d'induit étant créé par les conducteurs situés sous les pôles principaux n'est que faiblement compensé car les pôles auxiliaires sont assez loin des cornes polaires où naît le champ transversal.
- 2 - Ces pôles, placés entre les pôles principaux ont tendance à dériver une partie du flux principal créé par les pôles inducteurs. On remédie partiellement à ce défaut en conférant au pôle de commutation un entrefer

(2 à 3) fois plus grand que celui des pôles principaux.

3 - Les pôles ont un circuit magnétique à perméabilité magnétique très faible devant celle de l'air. C'est ainsi qu'on note un accroissement du flux de dispersion donc une exagération des fuites.

Là aussi, on remédie en écartant au maximum les cornes polaires des pôles inducteurs.

Aussi, la forme d'un pôle auxiliaire sera différente de celle du pôle principal.

Et, au lieu d'être évasé, le pôle auxiliaire est en section droite ou encore à épanouissements retrécis du côté de l'induit.

(représentation sur la figure 10)

En conclusion, on dira que le principal avantage obtenu par cet usage de pôles auxiliaire est le fait qu'on peut alors repasser du décalage des balais vers la ligne neutre magnétique. Ainsi, il n'est plus question de champ direct d'induit.

C - Théorie sur la visualisation et technologie :

1 - Loi de FARADAY

"tout conducteur linéaire de longueur "l" se déplaçant normalement à son axe, à la vitesse v dans un champ d'induction magnétique B voit naître à ses bornes une force électromotrice induite e telle que :

$$e = B. l. v.$$

2 - Application à la machine à courant continu :

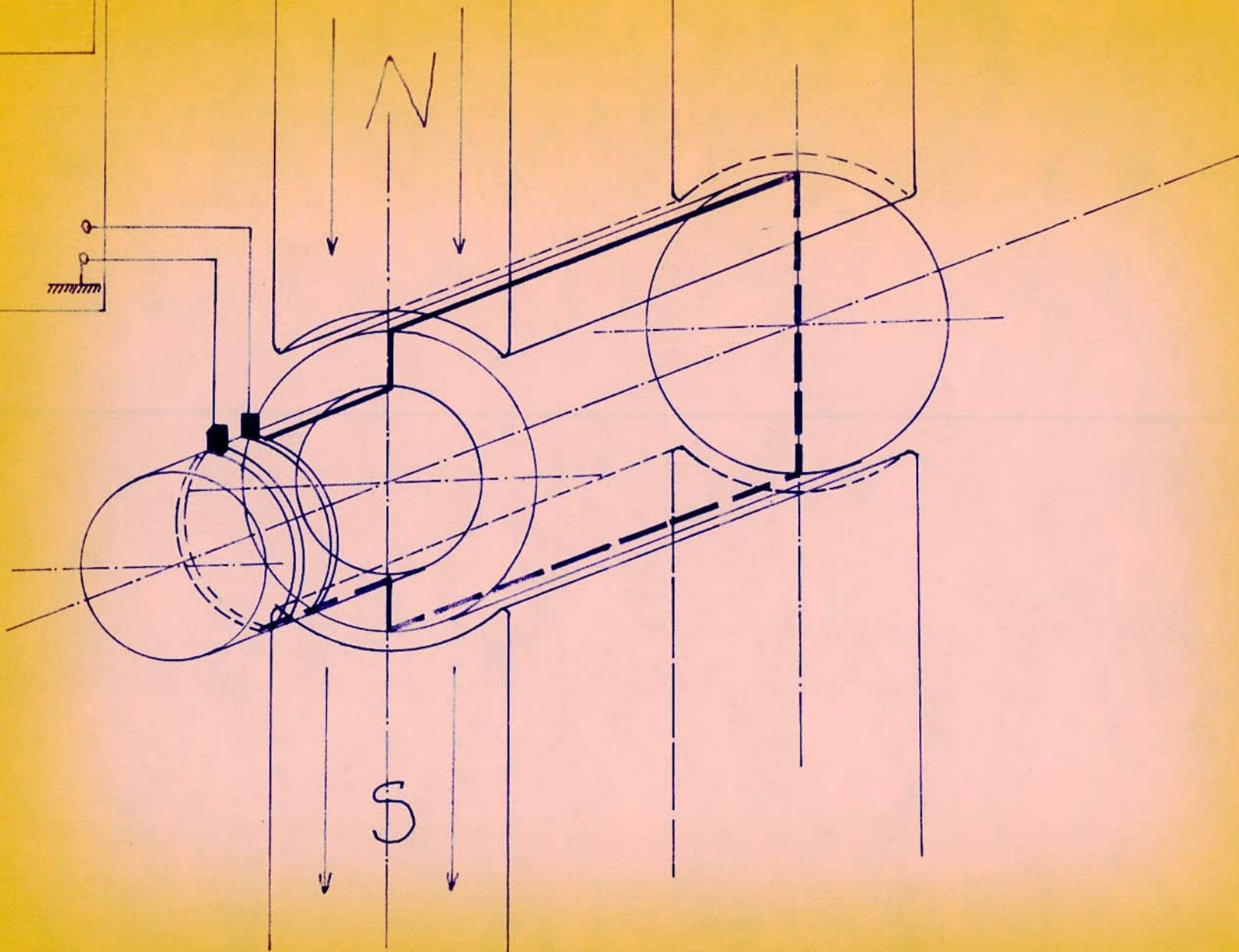
Pour pouvoir effectuer la visualisation : plaçons une spire (deux brins actifs) ou un seul brin actif diamétralement dans une encoche de l'induit.

Solidaire du rotor, cette spire se déplace parallèlement à elle-même. Placée, en plus, sous l'effet d'un champ magnétique (principal, transversal, direct ou des pôles auxiliaires). Cette spire voit naître à ses extrémités une force électromotrice induite e telle que :

$$e = B. l. v.$$

Avec une vitesse de rotation constante, on peut écrire que cette force électromotrice induite est proportionnelle à l'induction qui existe au niveau de l'entrefer : $e = k. B;$

Ici apparaît l'importance de la visualisation puisqu'à une constance près, on relève très précisément la courbe de l'induction existante au niveau de l'entrefer.



SCHEMA DE L'EXPERIMENTATION

3 - Moyens utilisés pour la visualisation

3 - 1 : bagues :

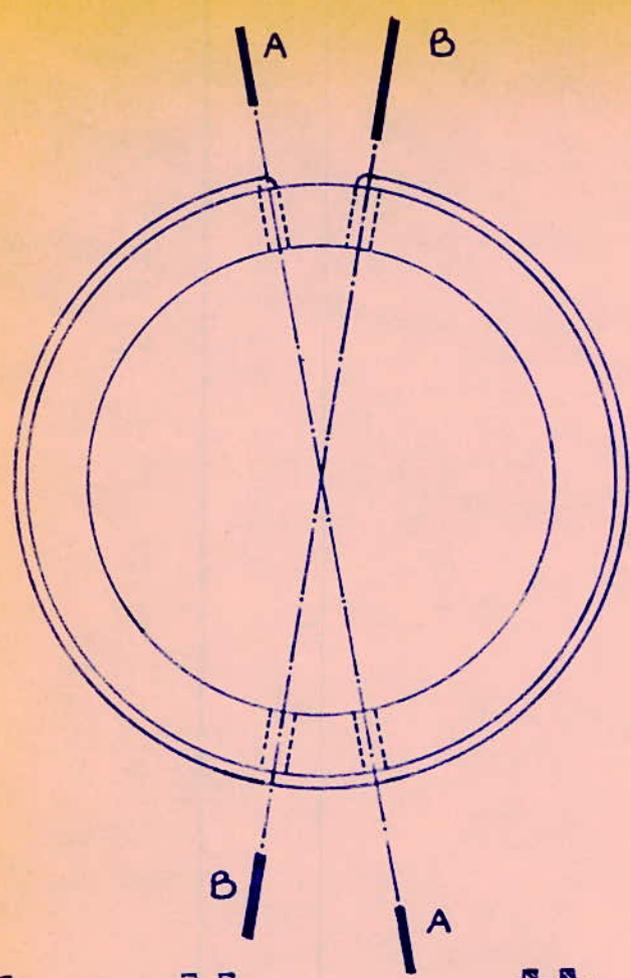
L'usage de toute une spire au lieu d'un seul conducteur actif nécessite la récolte de la force électromotrice induite aux extrémités de la spire d'un même côté de l'induit (Dans le cas de notre machine, l'usage d'une spire entière est nécessaire du fait qu'il n'y a aucun espace libre pour l'installation d'une bague du côté du ventilateur). Ainsi on est obligé, malgré le risque d'une diminution de la qualité de la commutation, d'éloigner les balais de l'induit de la collerette diminuant ainsi leur surface de contact avec le collecteur du huitième de sa valeur initialement fixée. L'espace libéré par ce décalage des balais est utilisé pour l'installation d'une bague en PLEXIGLAS d'une épaisseur de 10 mm très bien centrée autour du collecteur.

On utilise le plexiglas à cause de la bonne isolation qu'il procure vis à vis du collecteur éliminant ainsi le possible et dangereux court-circuit des lames du collecteur.

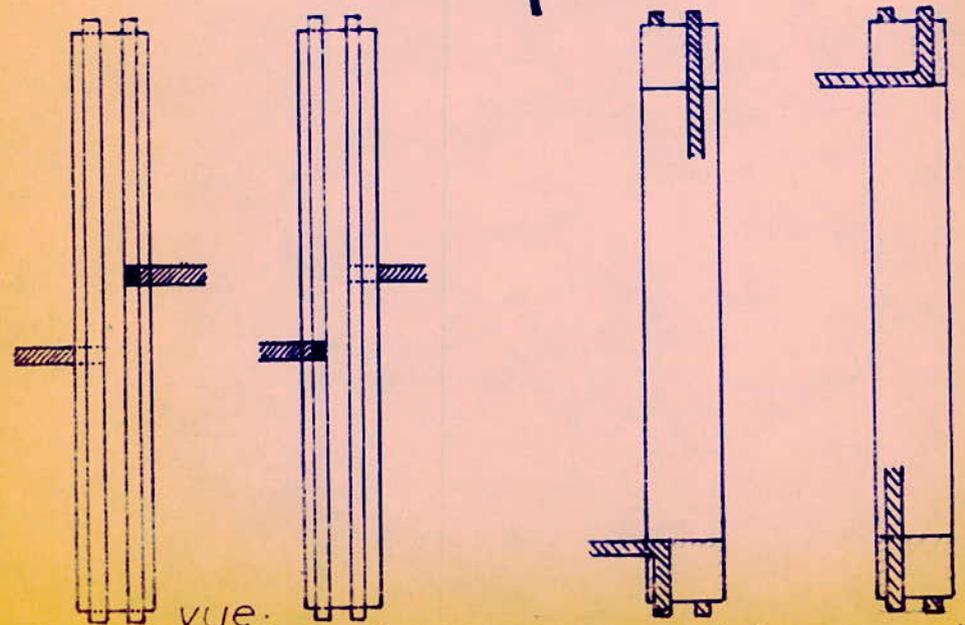
Sur cette bague en plexiglas, on creuse deux fines gorges le long de la circonférence extérieure qui servent à la stabilisation de deux conducteurs en cuivre.

Ces derniers sont des bagues de 2 mm de diamètre, de section circulaire. Elles sont fixées très solidement sur la bague isolante à l'aide d'une colle : l'ARALDITE.

13 AGUES INSTALLÉES POUR LA VISUALISATION



vue de face



vue de dessus vue de dessous coupe AA coupe 1313

La colle séchée (48 heures) on rectifie l'ensemble des deux bagues de cuivre de façon à créer un méplat sur les deux fils offrant ainsi une surface de contact plus grande et surtout uniformément plate avec les balais installés pour la visualisation.

Ainsi, en résumé, une spire est enroulée autour du rotor suivant deux encoches diamétralement opposées.

Ses extrémités sont solidement fixées sur une bague en plexiglas sur les deux bagues extrémités de la spire vont frotter deux balais servant à la visualisation.

TRES IMPORTANT :

Lors du relevé sur l'oscilloscope des courbes des bamps magnétiques, on ne sait, à priori, où installer les deux pôles principaux et la ligne neutre théorique.

Pour obtenir le repère nécessaire, effectuons l'enroulement des deux bagues de cuivre sur celle de plexiglas avec deux discontinuités diamétralement opposées (car les deux pôles de la visualisation sont installés diamétralement l'un vis à vis de l'autre).

Ainsi, ces balais de passage sur les deux discontinuités ne recueillent aucune force électromotrice induite. Ce qui se traduit par une nullité de l'induction vue sur l'écran de l'oscilloscope.

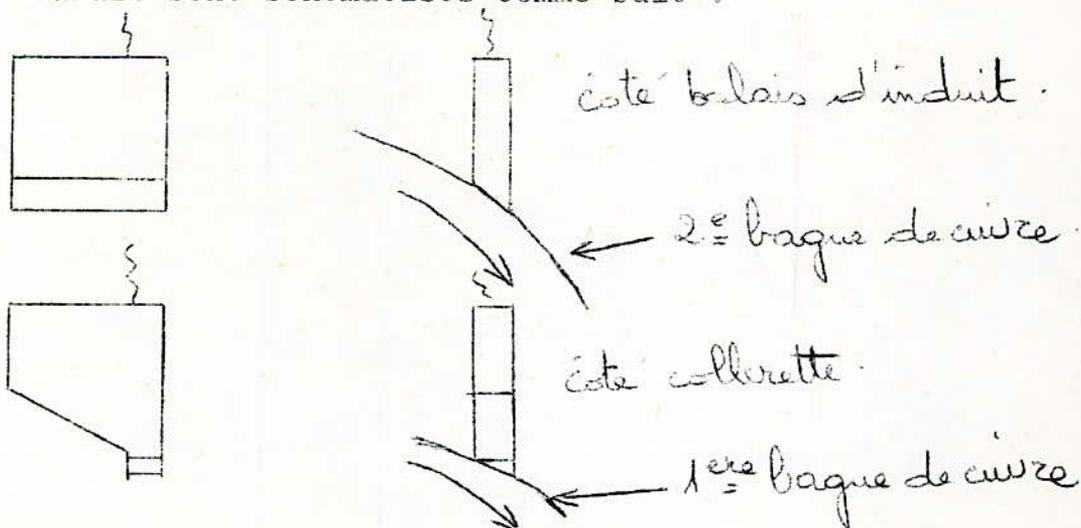
3 - 2 : balais :

Sur les deux bagues en cuivre précédemment citées, vont frotter deux balais qui permettent le recueil d'une force électromotrice aux extrémités de la spire.

L'emplacement de ces derniers balais, contrairement aux balais de l'induit, peut être quelconque vis à vis de la ligne neutre théorique. Adoptons alors une structure symétrique en installant les deux balais diamétralement l'un par rapport à l'autre perpendiculairement à la ligne neutre théorique.

Devant frotter en des endroits différents, les deux balais sont à des distances différentes vis à vis de la collerette de la machine. On apporte cependant la transformation suivante en raison de la grande épaisseur de la bague en plexiglas (10 mm) et de l'étroit espace libéré par le décalage vers la couronne.

Ces balais sont schématisés comme suit :



D - Description de l'expérimentation :

1 - but de l'expérimentation :

tout d'abord, on dira que l'expérimentation consiste à recueillir par l'intermédiaire des deux balais installés sur les deux bagues de cuivre, une force électromotrice proportionnelle à l'induction magnétique existante au niveau de l'entrefer. Cette induction est visualisée sur l'écran d'un oscilloscope.

Divers champs magnétiques sont visualisés :

- champ magnétique principal
- champ transversal d'induit
- champ de compensation (pôles auxiliaires)
- champ magnétique résultant.

1 - 1 : visualisation du champ magnétique principal :

Pour ne mettre en relief que ce champ, on doit suivre un fonctionnement à vide pour la machine ($I = 0$)

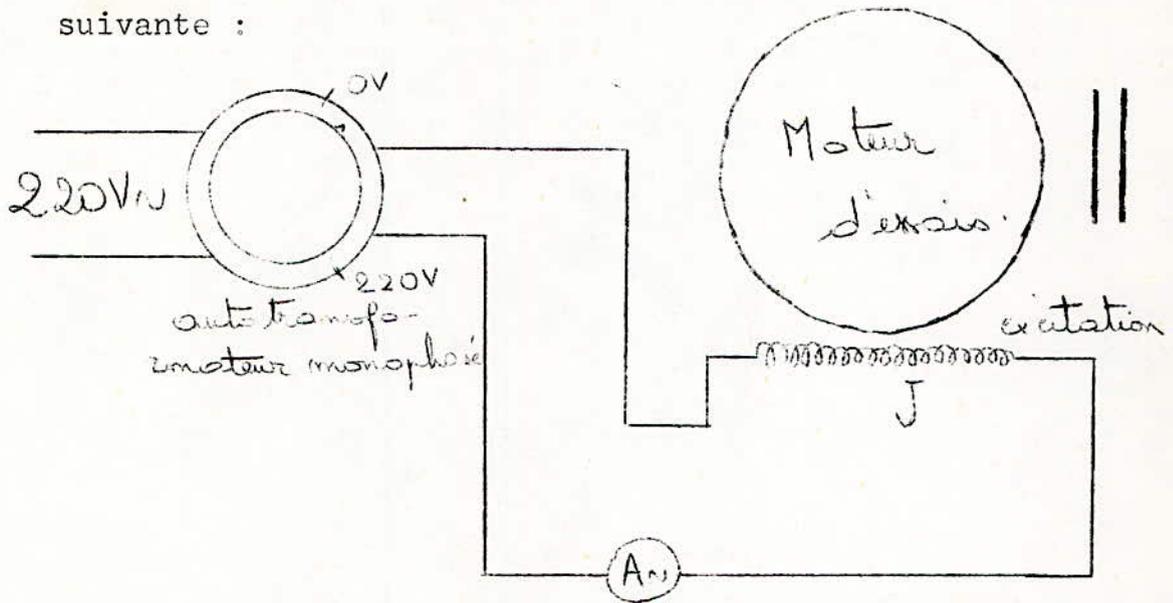
La machine est alors excitée mais fonctionne à vide (position des balais de l'induit quelconque puisqu'aucun courant ne circule dans l'enroulement d'induit).

1 - 2 : Visualisation du champ transversal d'induit :

La machine n'étant, dans ce cas, pas excitée, amenons aux balais de l'induit un courant d'une source quelconque de courant continu. La machine entraînée à sa vitesse fixée

lors de la visualisation du champ principal est alors le siège d'un champ magnétique transversal d'induit caractérisé par l'induction qui existe au niveau de l'entrefer.

Un problème subsiste encore : c'est celui de l'existence d'un flux rémanent ne permettant pas la démagnétisation complète de l'inducteur de la machine. Pour y remédier, démagnétisons **TOTALEMENT** la machine (son inducteur) de la façon suivante :



A partir d'une tension alternative nulle aux bornes de sortie de l'autotransformateur monophasé, obtenir un courant dans l'enroulement d'excitation de $1,25 J_n$.

Faire décroître alors lentement le courant j jusqu'à l'annuler. La démagnétisation de l'inducteur est ainsi effectuée.

1 - 3 : Champ magnétique résultant :

Loin de la saturation, le champ résultant est obtenu par la superposition des deux champs principal et transversal d'induit. La visualisation de ce champ nécessite la présence d'une excitation accompagnée d'un fonctionnement en charge.

Si, par contre, le point de fonctionnement appartient ou dépasse le coude de la saturation (cas général) la méthode de superposition devient très approximative. La visualisation met alors en valeur la réaction transversale d'induit caractérisée par une chute de tension.

1 - 4 : Champ des pôles auxiliaires :

La visualisation de ce dernier champ se fait comme pour le champ principal avec un courant nul dans l'enroulement d'induit (fonctionnement à vide) avec une démagnétisation totale. On pourra, par la suite, voir son effet sur le champ transversal d'induit en alimentant simultanément l'enroulement d'induit et l'enroulement inducteur des pôles auxiliaires de commutation.

D - II - Résultats de l'expérimentation :

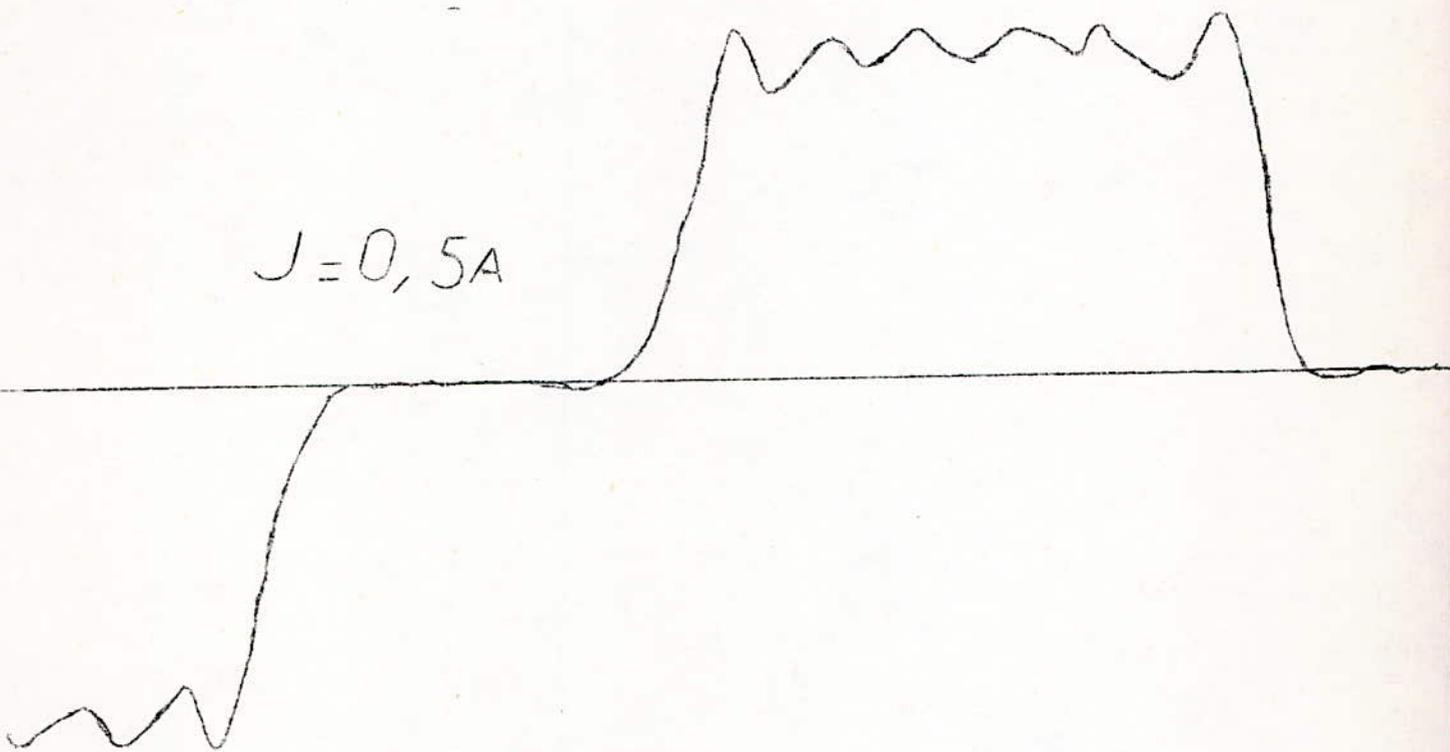
Comme on l'a précédemment énoncé, on relève de l'écran de l'oscilloscope les courbes des différents champs magnétiques qui peuvent exister au niveau de l'entrefer de la machine.

On remarque plusieurs tares en comparant les courbes théoriques et les courbes relevées de l'écran de l'oscilloscope. Cette différence est due à plusieurs facteurs :

- * technologie de la machine (usage des toles minces, installation des encoches)
- * placement approximatif de certains éléments de la machine (balais de l'induit)
- * qualité des éléments installés pour la visualisation (médiocre rectification des bagues de cuivre, friabilité des balais).

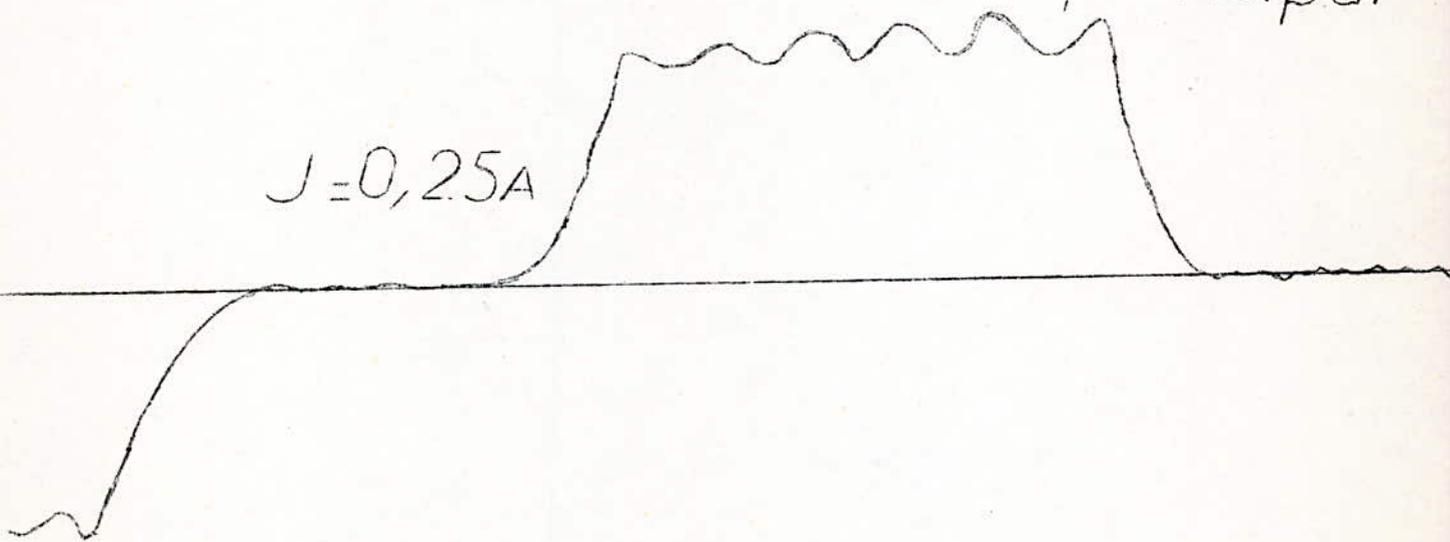
On déplore, enfin, le manque de moyens nécessaires pour réaliser une excellente visualisation.

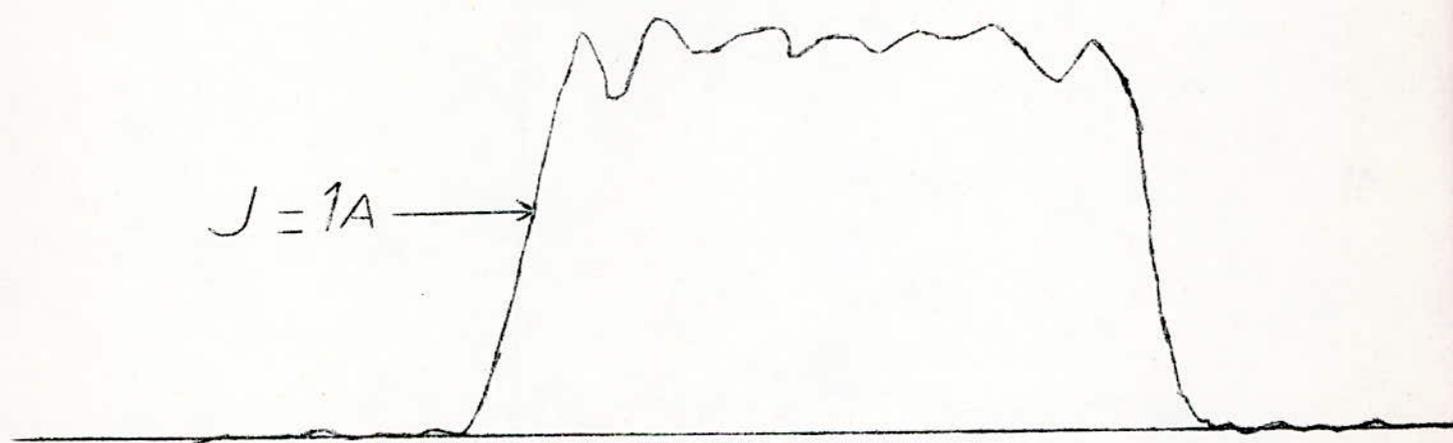
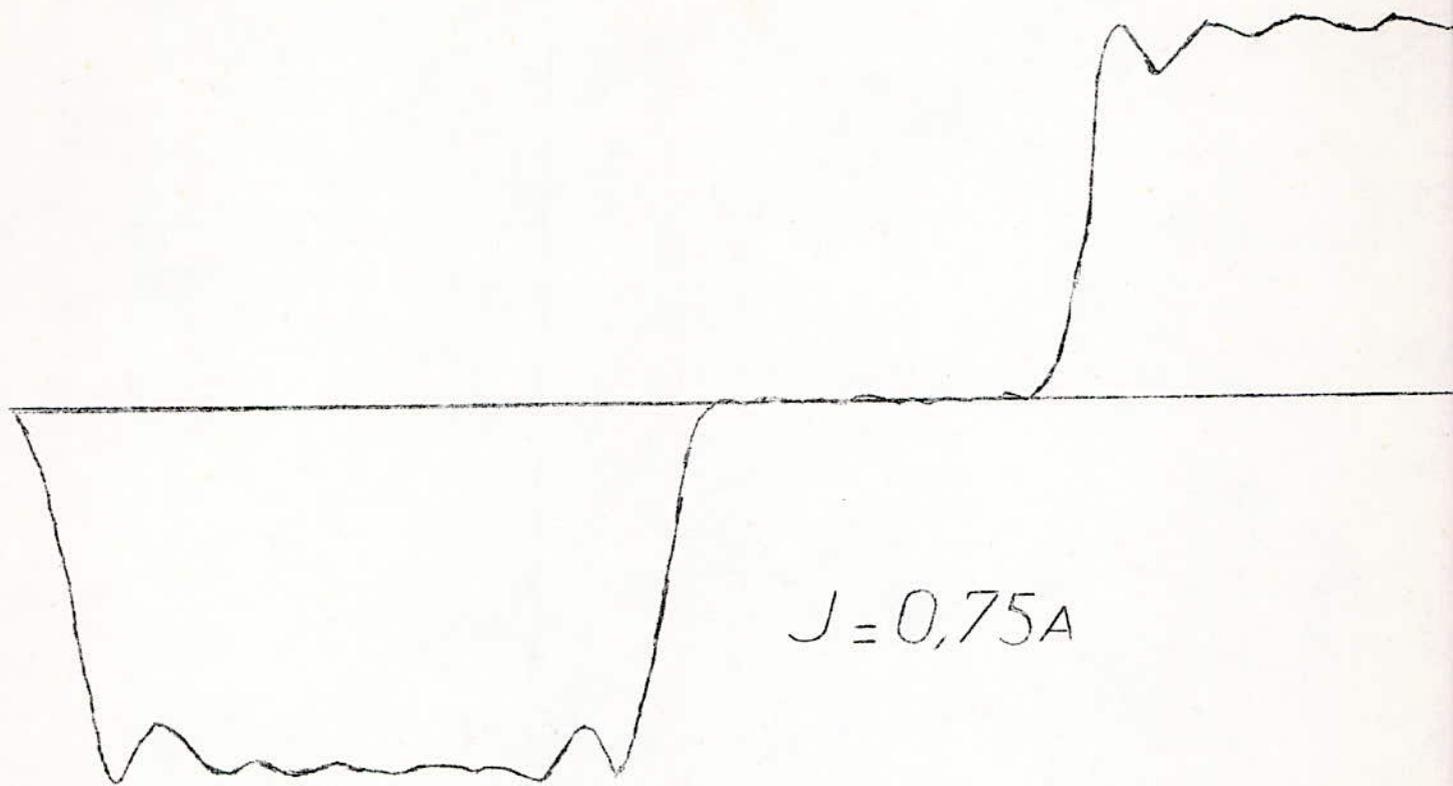
$J = 0,5A$



- Fig 1 - Champ magnétique principal

$J = 0,25A$





- Fig 2 - Champ magnétique principal

~

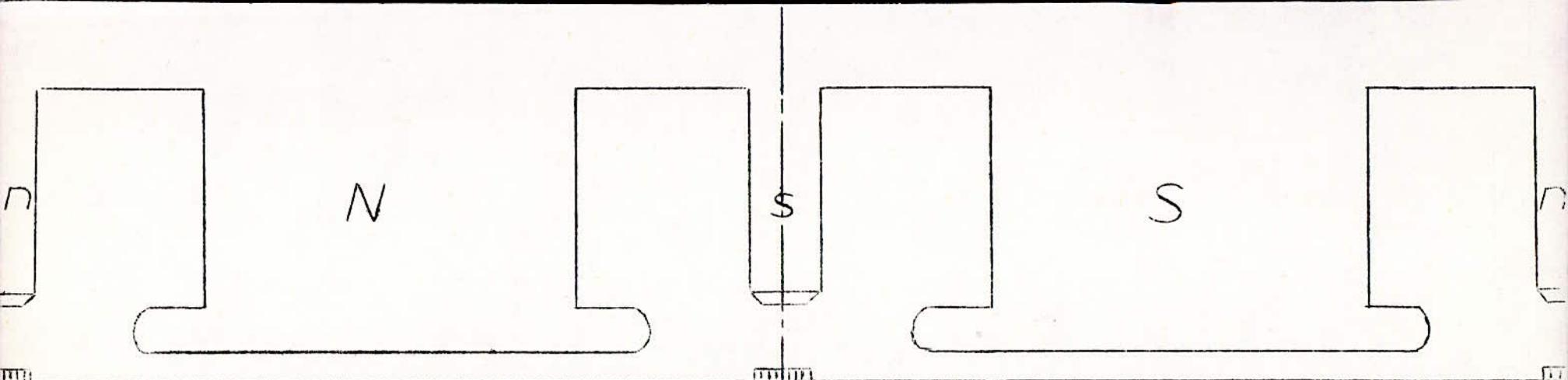
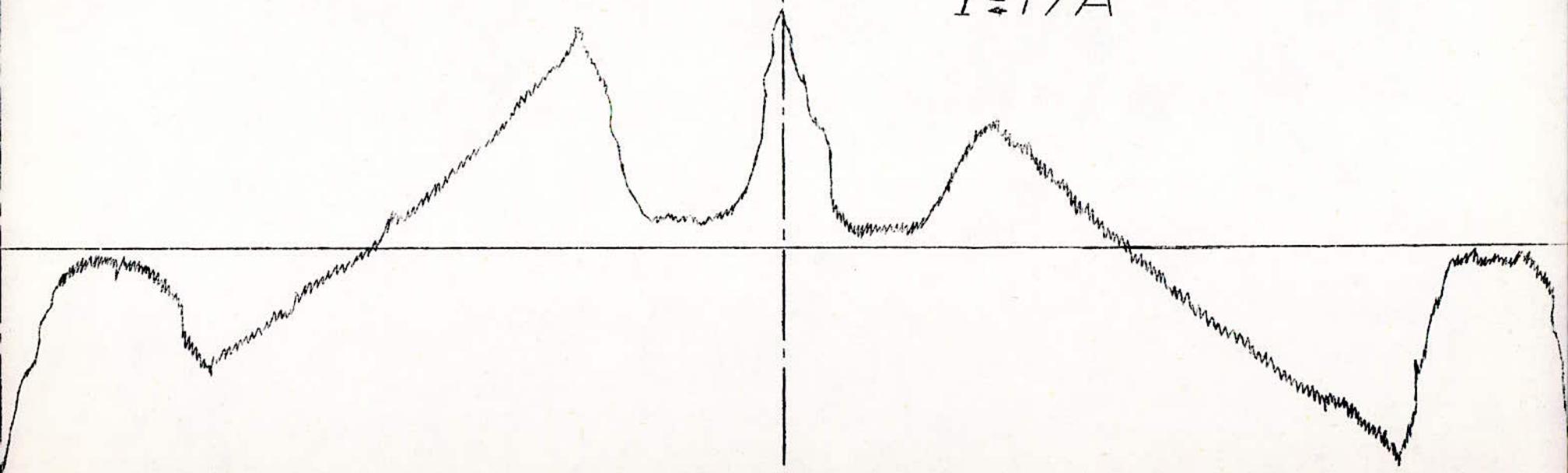


Fig 4 Champ magnétique transversal

$I = 17A$



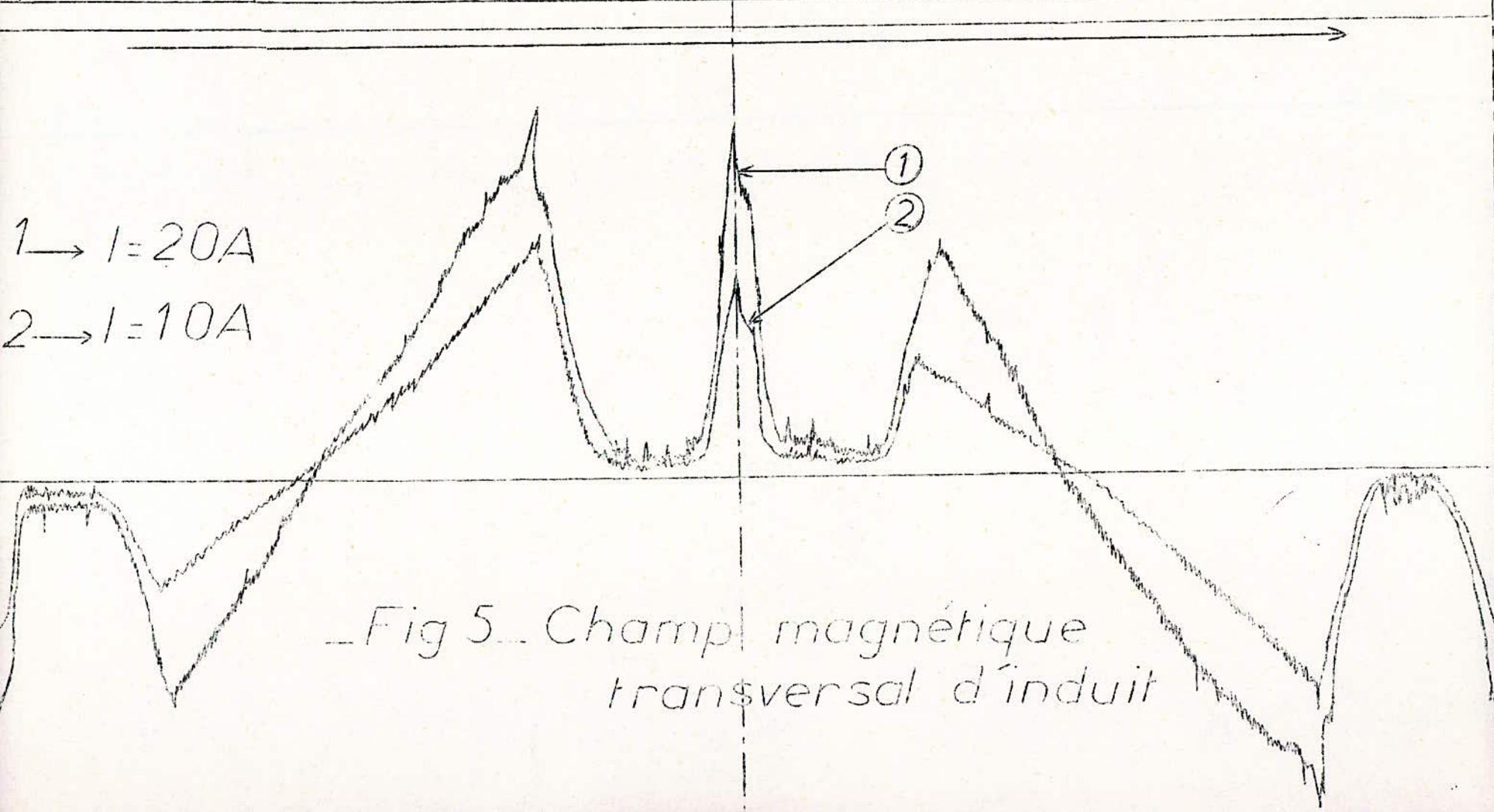
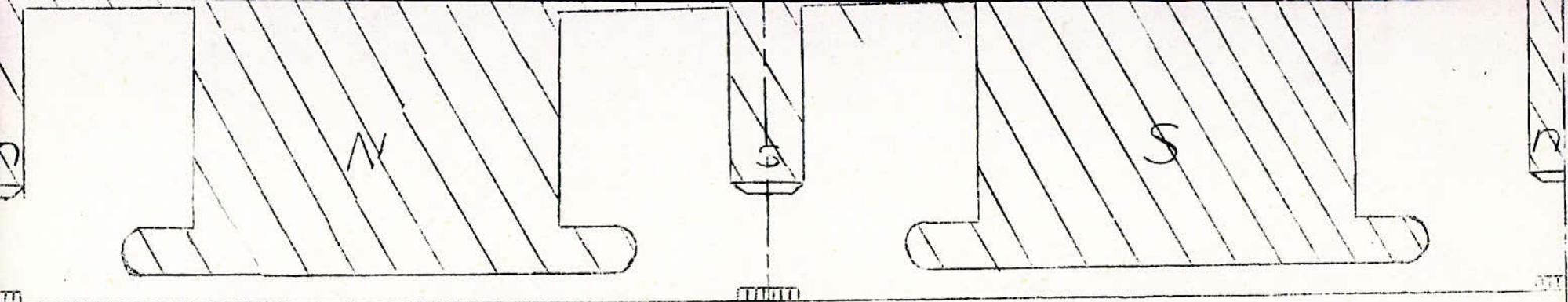
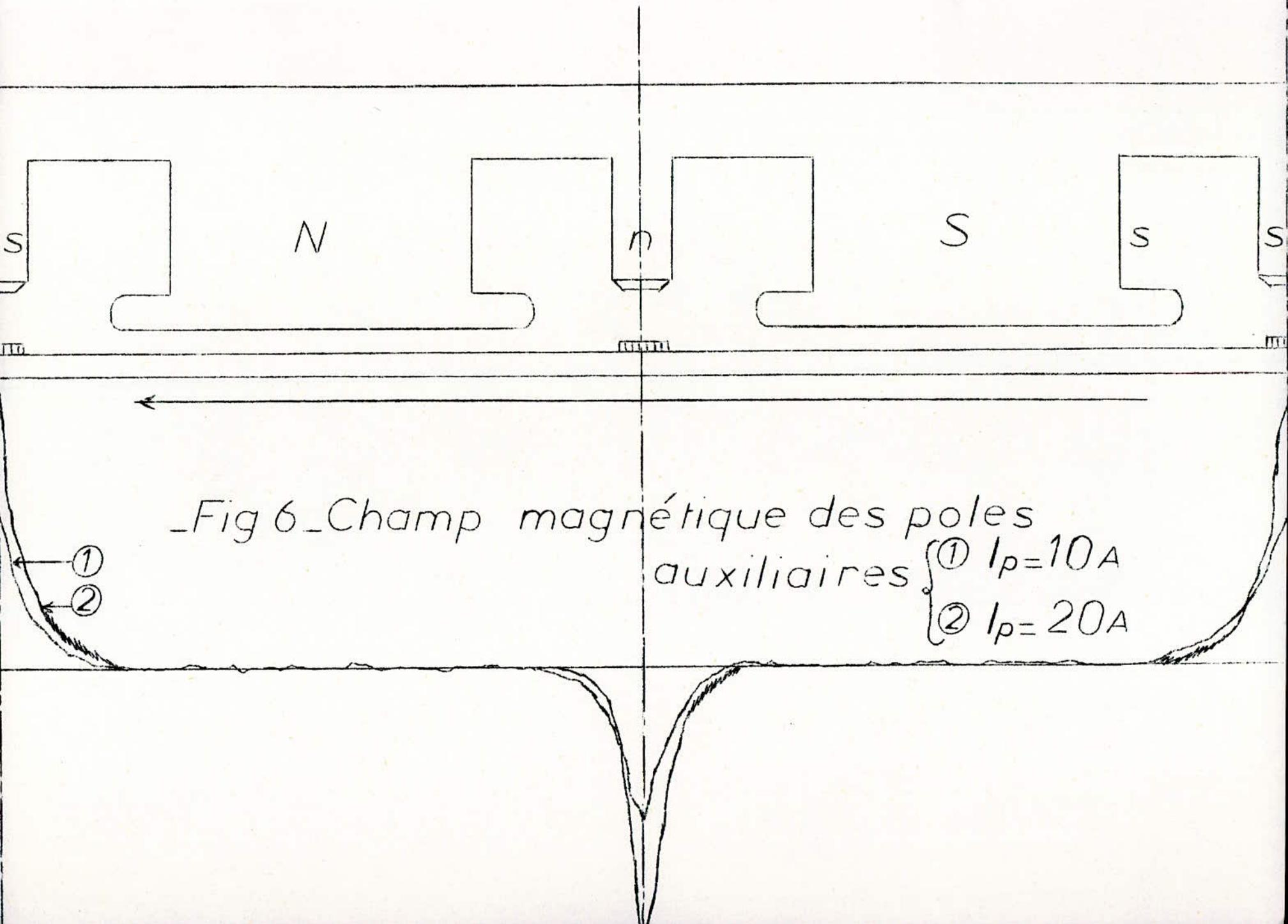
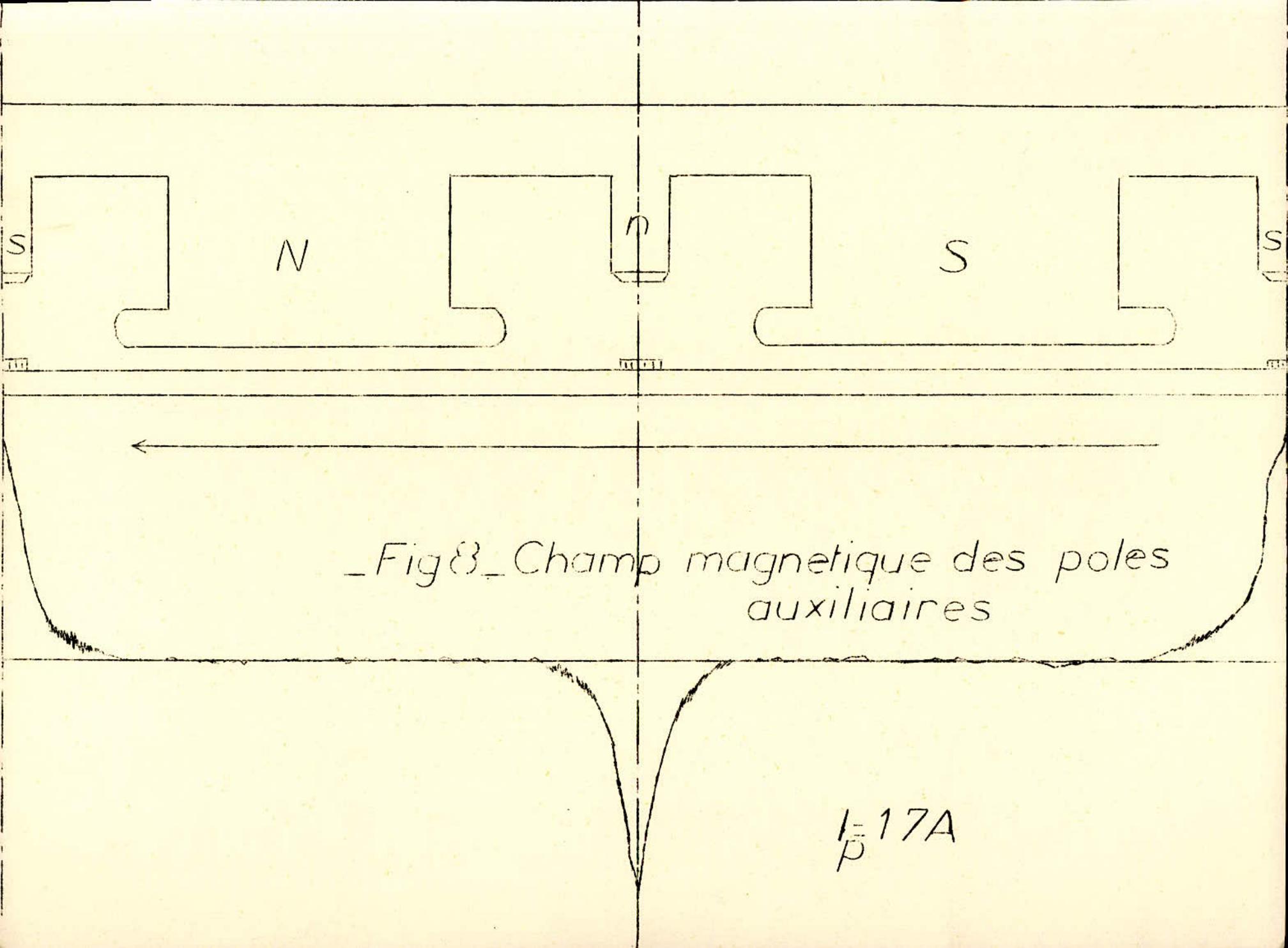


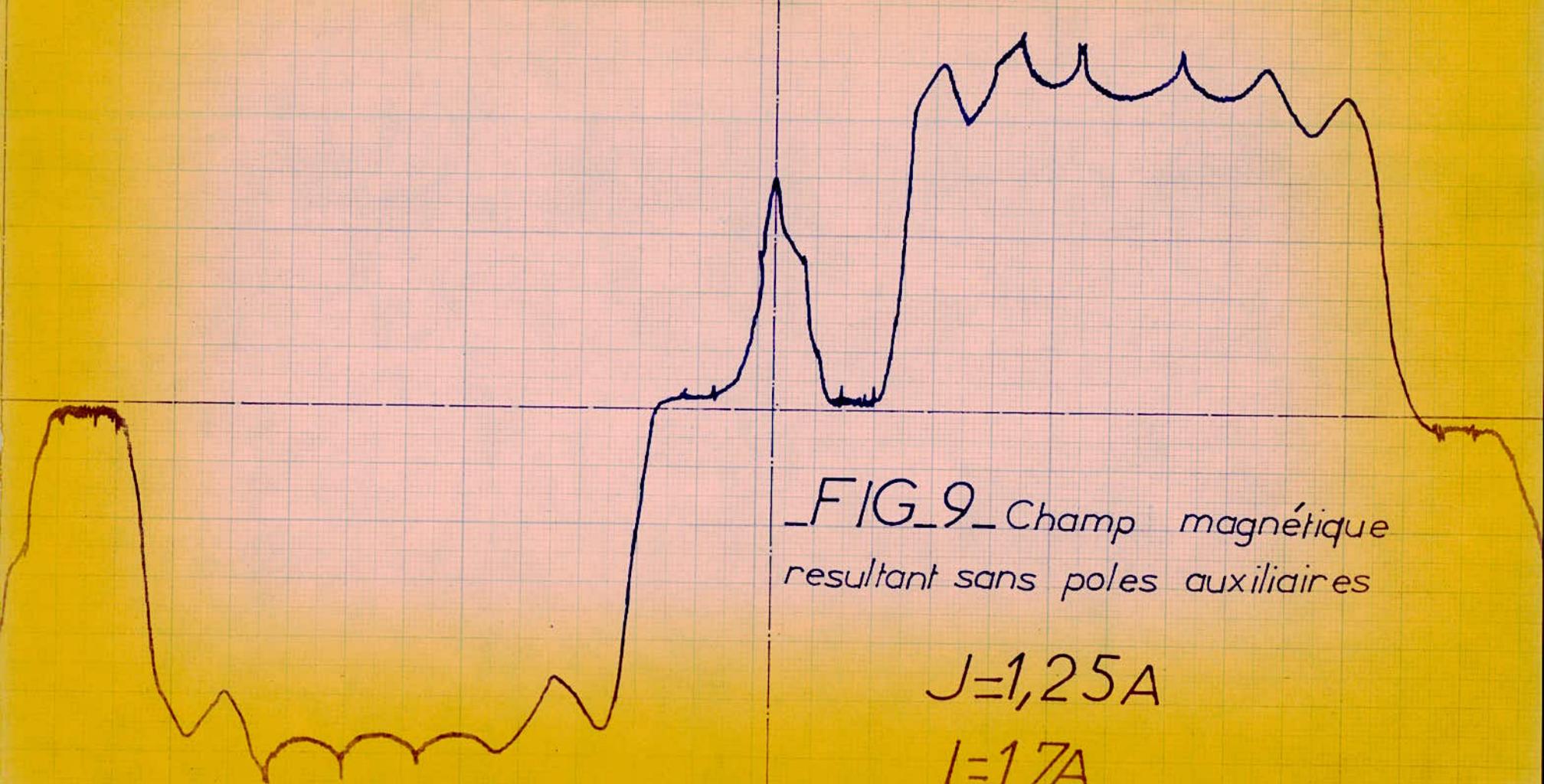
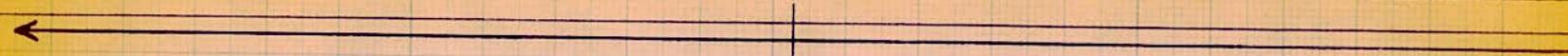
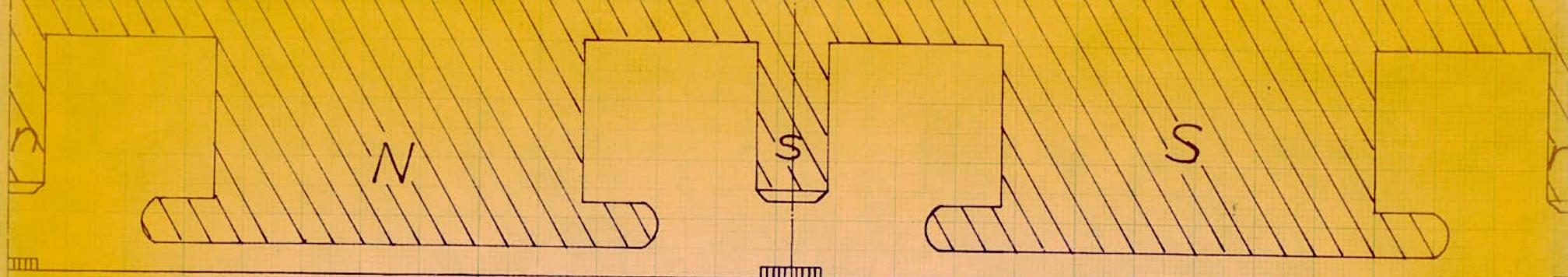
Fig 5. Champ magnétique transversal d'induit





*_Fig 8_ Champ magnetique des poles
auxiliaires*

$I_p = 17A$



*FIG_9_ Champ magnétique
resultant sans poles auxiliaires*

J=1,25A

I=17A

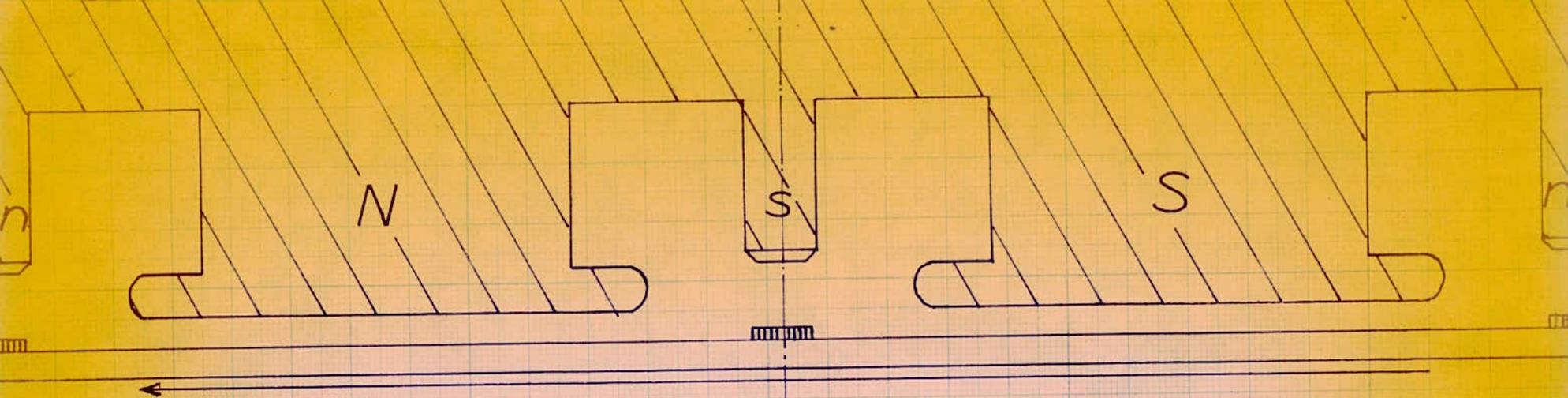
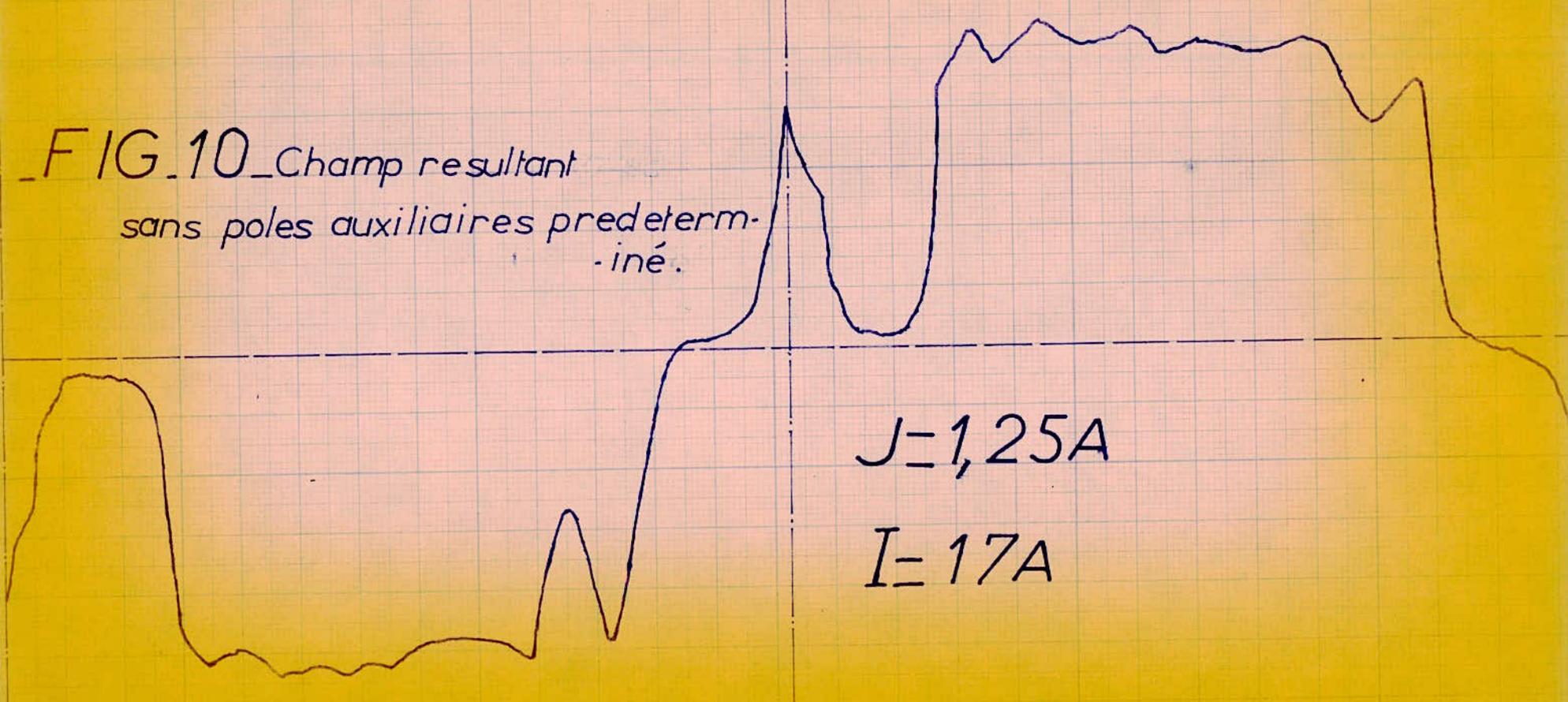
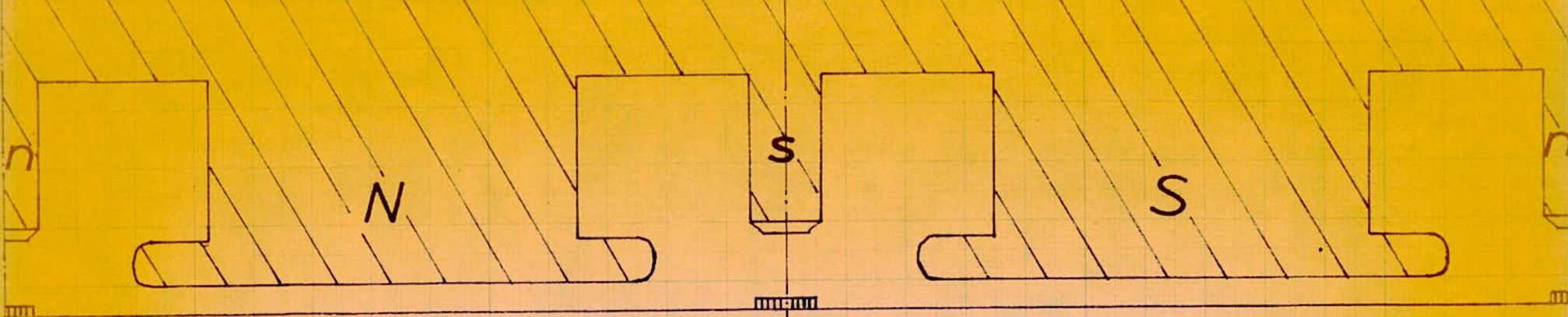


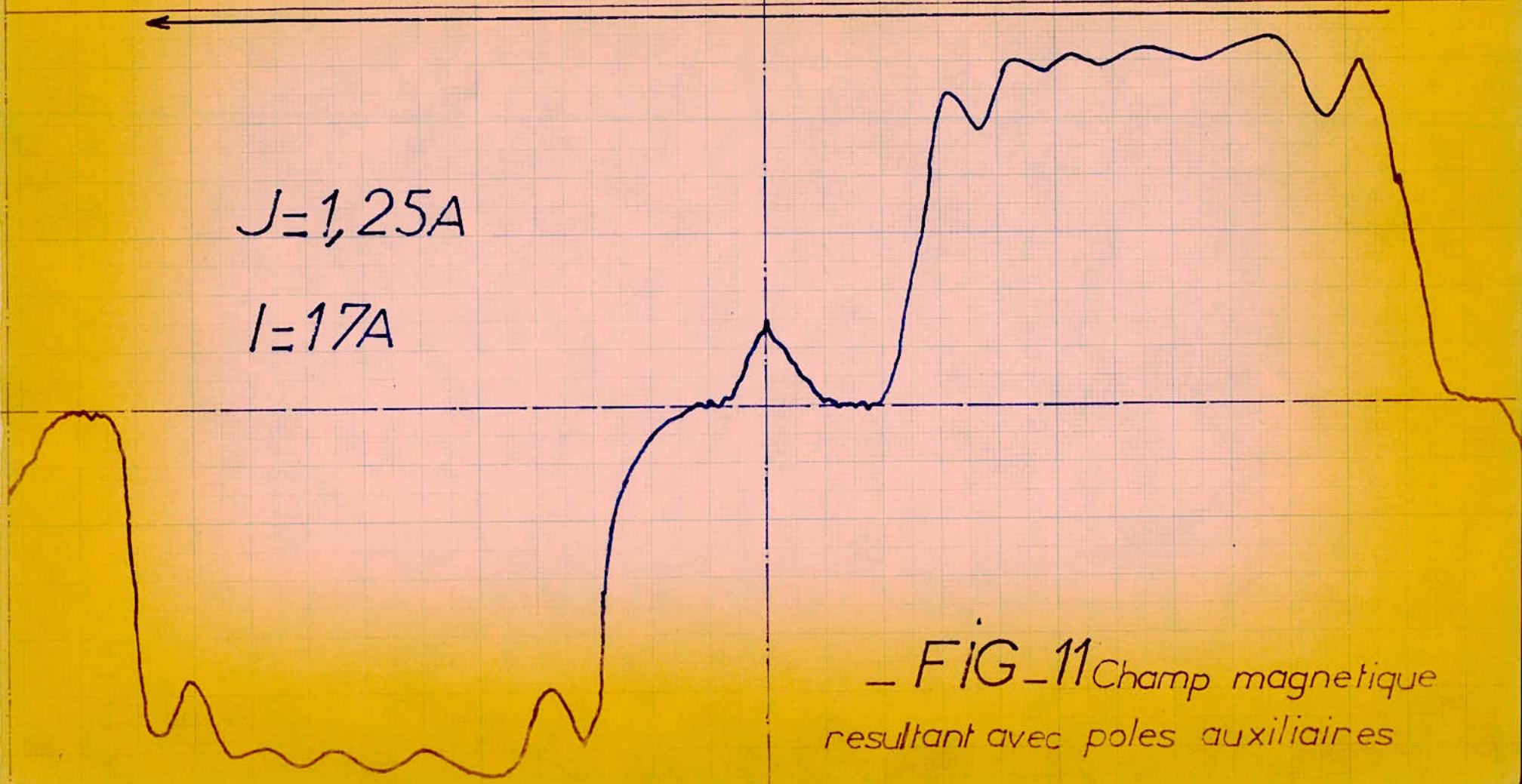
FIG. 10_Champ resultant
sans poles auxiliaires predeterm-
-iné.



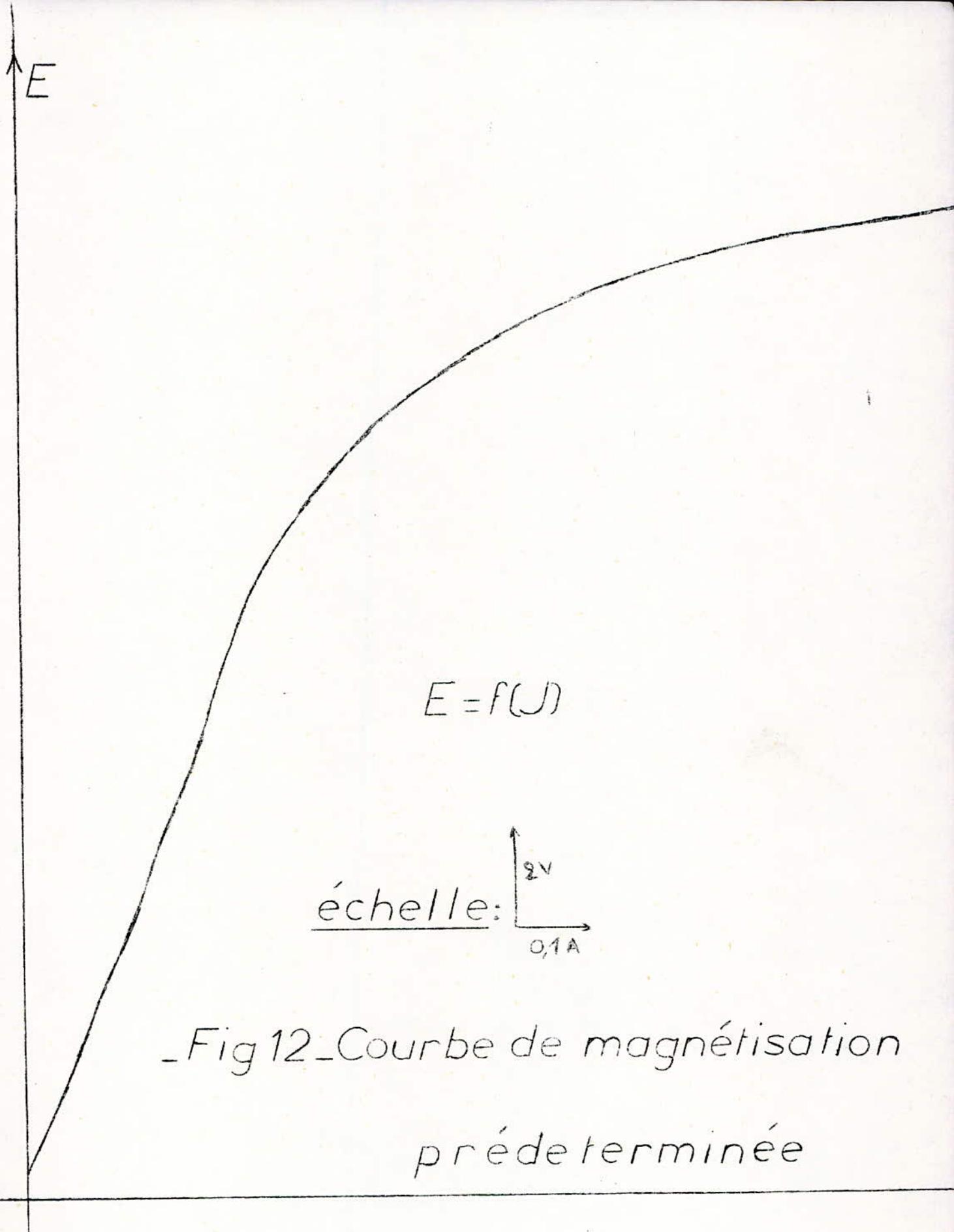


$J=1,25A$

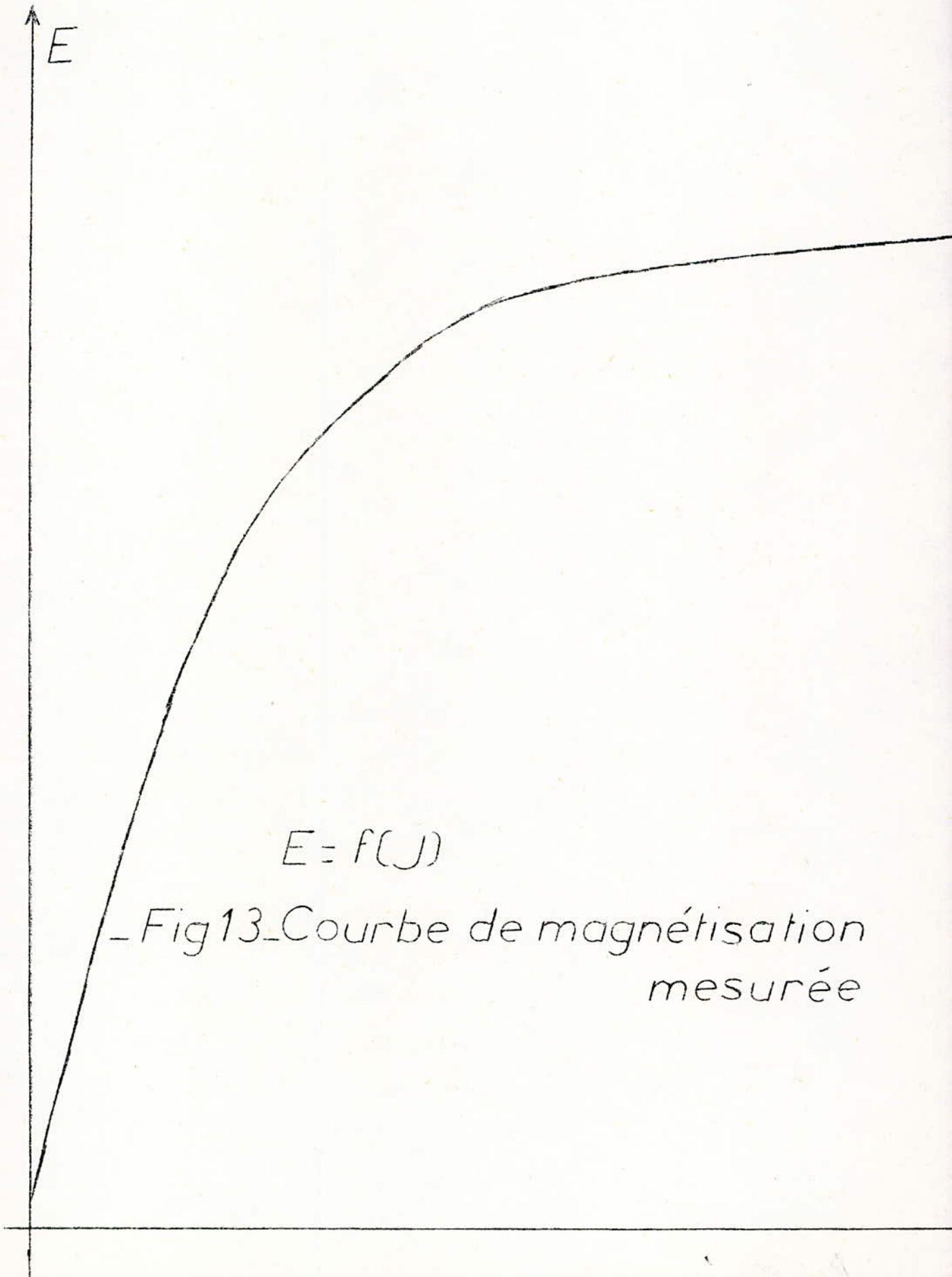
$I=17A$



— FIG-11 Champ magnetique
resultant avec poles auxiliaires



- Fig 12 - Courbe de magnétisation
préde terminée



$$E = f(J)$$

- Fig 13 - Courbe de magnétisation
mesurée

Comparaison : Théorie - Expérimentation

- 1 - En premier lieu, on remarque que l'allure générale des courbes théoriques est retrouvée chez les courbes relevées de l'écran de l'oscilloscope.
- 2 - En deuxième lieu, il faut noter la bonne correspondance des valeurs de l'induction magnétique sous les cornes polaires et sur la ligne neutre théorique.
- 3 - Remarquons, enfin, que la non synchronisation de l'oscilloscope ne nous a pas permis de prendre d'excellentes mesures avec une bonne netteté et une grande précision.

De même, la luminosité de l'écran de l'oscilloscope n'a pas permis l'obtention des photos avec une bonne clarté et des dimensions normales.

La comparaison met en verve un lot de différences dont les plus notables sont les suivantes :

* lors de la visualisation du champ magnétique transversal (fig 4 et 5) on note que l'induction correspondante oscille très faiblement sous les pôles principaux, sans pourtant le faire sous les pôles auxiliaires.

La raison n'est autre que les pôles principaux, contrairement aux pôles auxiliaires, sont formés d'un assemblage de plusieurs tôles très minces entre lesquelles est mis un isolant créant une différence de reluctance vis à vis du champ magnétique donc une variation en oscillation de l'induction.

* On remarque aussi que d'un côté et de l'autre de la ligne neutre théorique, le maximum (positif ou négatif) de l'induction magnétique transversale d'induit n'a pas la même valeur. Ce fait est totalement dû au placement approximatif des balais vis à vis de la ligne neutre théorique. Ce déphasage entre eux entraîne l'augmentation d'un côté et une diminution de l'autre côté.

* Lors de la visualisation du champ magnétique principal, on note que pour $\bar{J} = 0,25 \text{ A}$ et $\bar{J} = 0,5 \text{ A}$ il n'y a que six pointes d'induction (équivalent à 5 encoches sous le pôle principal)

$$- \bar{J} = 0,75 \text{ A} ; \bar{J} = 1 \text{ A}, \quad = 1,25 \text{ A}$$

il y a sept pointes d'induction (équivalent à 6 encoches sous le pôle principal).

La seule raison possible à ce curieux fait est que lorsque l'excitation est faible, le champ magnétique ne décèle pas la sixième encoche qui est mise à jour lorsque l'excitation approche ou dépasse sa valeur nominale)

* La plus importante remarque est la suivante : lors de la visualisation des champs magnétiques principaux et résultants, on note des oscillations notables lorsque la spire est de passage sous les pôles principaux.

Ce fait est totalement dû à la différence de reluctance rencontrée par le champ des inducteurs en raison de la présence d'encoches sur la périphérie de l'induit.

En effet, une ligne d'induction de passage à travers une encoche traverse une grande partie d'air, ce qui affaiblit notablement le flux magnétique et donc par là, l'induction magnétique au niveau de l'entrefer.

E - Introduction au texte de la manipulation

La manipulation qui va suivre, destinée aux étudiants qui suivent le module "Machines à courant continu", n'est en fait que le résumé de tout ce qui a été déjà énoncé.

Cette manipulation concerne la visualisation des différents champs magnétiques au niveau de l'entrefer de la machine à courant continu, il n'est ainsi que normal qu'on retrouve un texte au même contenu que celui précédemment rédigé.

On remarque, tout de même, que plusieurs valeurs nominales des paramètres de la machine (I_n , $1,25 J_n$...) ne peuvent être atteintes du fait que le moteur d'essais considéré est, selon les normes du producteur, à excitation composée, alors qu'on n'a utilisé que son excitation shunt.

Notons, de plus, que la médiocre rectification des bagues de cuivre, l'usage de balais plus ou moins friables, ne permettent pas le fonctionnement du moteur d'essais à une vitesse supérieure à $N = 500$ trs/mn sans risque de détérioration rapide des balais en contact avec les deux bagues de cuivre.

On se limitera à cette vitesse $N = 500$ trs/mn.

On dira enfin que cette manipulation est conçue pour être réalisée au laboratoire d'électrotechnique de l'ENPA, donc qu'il existe de meilleures conditions pour avoir des résultats plus significatifs.

FEN 216 Machines à courant continu

T. P. N°

VISUALISATION DES CHAMPS MAGNETIQUES dans une machine à courant continu

REALISE DANS LE CADRE D'UN
PROJET DE FIN D'ETUDE

F - Texte de la manipulation :

I - Rappel théorique :

I - 1 : Principe de la visualisation :

a - Loi de Faraday :

soumis à une induction magnétique B , un conducteur linéaire de longueur l , se déplaçant à une vitesse v voit apparaître à ses extrémités une force électromotrice induite : $e = B.l.v$

b - Cas de la machine à courant continu :

Analogiquement, on raisonne pour une spire diamétralement collée sur le rotor.

Ajoutons qu'à la condition primordiale : vitesse constante on relève sur l'oscilloscope l'induction magnétique au niveau de l'entrefer de la machine.

I - 2 : Objet de la visualisation :

La visualisation concerne les champs magnétiques suivants

- * champ magnétique principal
- * champ magnétique transversal d'induit
- * champ magnétique résultant
- * champ magnétique des pôles auxiliaires

a - Champ magnétique principal :

C'est le champ créé par l'enroulement inducteur de la machine c'est à dire les pôles principaux.

b - Champ magnétique transversal d'induit :

Ce champ naît suite à la circulation d'un courant dans l'enroulement d'induit de la machine.

La ligne d'induction moyenne correspondante à ce champ est perpendiculaire à la direction de l'induction caractérisant le champ magnétique principal. Son effet est démagnétisant sous les cornes polaires d'entrée et magnétisant sous les cornes polaires de sortie (cas de la génératrice).

c - champ magnétique résultant :

hors de la zone de saturation, le champ magnétique résultant est obtenu directement par la superposition des deux précédents champs magnétiques.

Dans la zone de saturation (cas pratique) on notera que l'effet démagnétisant du champ transversal dépasse son effet magnétisant, donnant naissance à la réaction transversale d'induit caractérisée par une chute de tension.

d - champ des pôles auxiliaires de commutation :

Cette méthode de compensation est très fréquemment rencontrée.

Ces pôles auxiliaires sont placés parallèlement à la ligne neutre théorique et ont, à des dimensions près, le même effet que les pôles principaux (champ et induction

magnétique).

Ces pôles auxiliaires ont un double rôle :

- améliorer la qualité de la commutation
- contribuer très imparfaitement à la compensation du champ transversal.

Malgré les grands inconvénients qu'il fait intervenir, l'usage des pôles auxiliaires a un avantage très précieux : éviter le décalage des balais (donc inexistence du champ direct d'induit).

II - Manipulation :

II - 1 : Moteur d'entraînement :

a) type de moteur utilisé :

Le moteur d'essais devant fonctionner selon plusieurs modes, il est nécessaire de l'entraîner par un autre moteur qui sera dit "d'entraînement" qu'on choisit à excitation séparée pour qu'on puisse faire varier la vitesse dans une large plage par :

- action sur l'excitation lorsqu'il s'agit d'un réglage très précis et dans une faible plage
- action sur la tension d'alimentation de l'induit si on veut de grandes variations.

b) méthode de mesure :

Le but recherché à travers l'usage de ce moteur est l'entraînement du moteur d'essais à une vitesse **CONSTANTE**. Son réglage est ainsi d'une grande importance quant à la qualité des mesures qu'on fera ultérieurement.

b - 1 : Montage du moteur d'essais :

Matériel à utiliser :

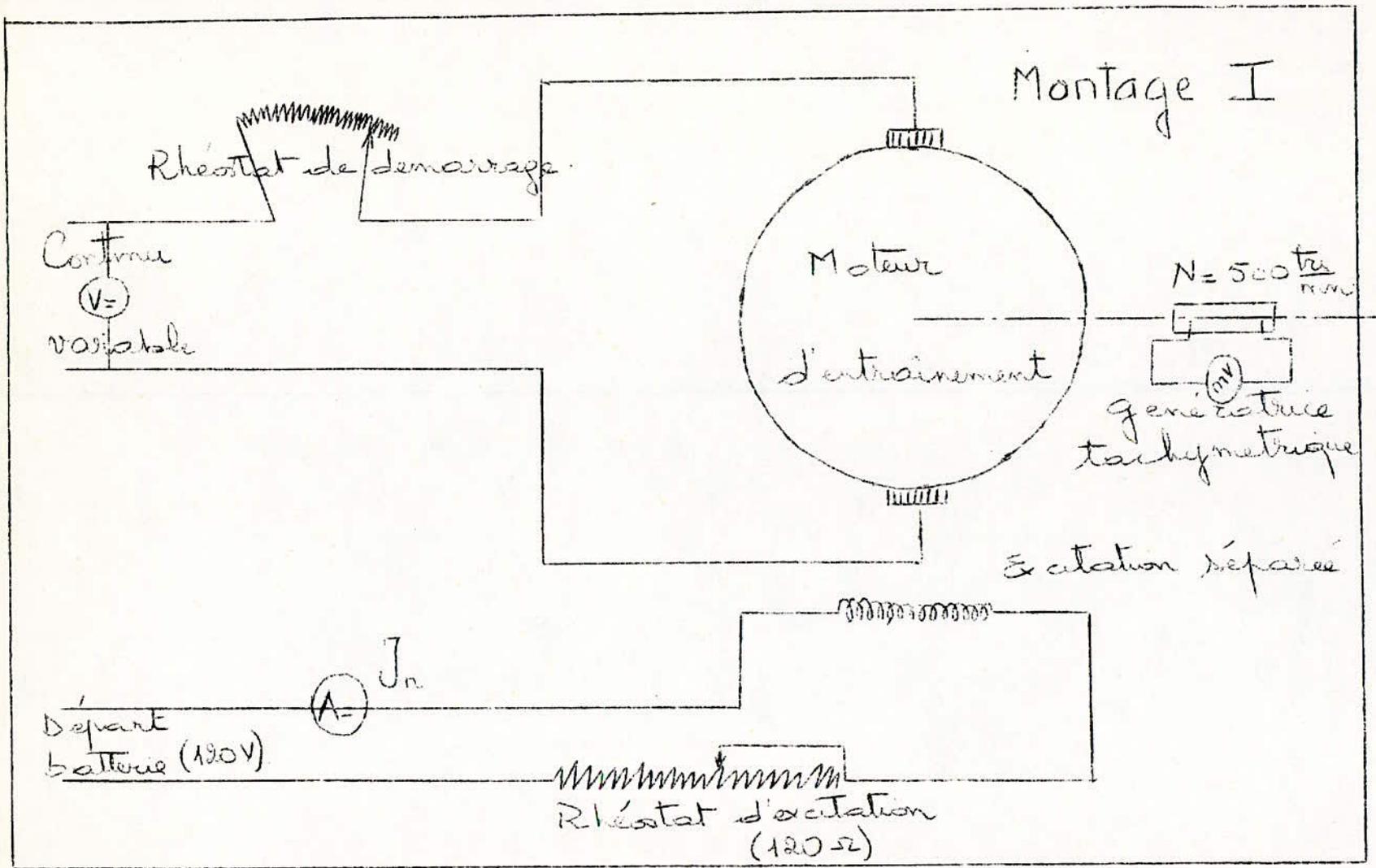
- 1 rhéostat de démarrage
- 1 tachymètre
- 1 rhéostat d'excitation 120Ω
- 1 ampèremètre continu
- 1 voltmètre continu

b - 2 : Démarrage du moteur d'entraînement :

- Exciter le moteur d'entraînement en branchant le "Départ batterie" afficher sur l'ampèremètre du circuit d'excitation la valeur
- mettre en service le "Continu Variable" et démarrer le moteur à l'aide du rhéostat de démarrage
- Régler et stabiliser la vitesse du moteur à la valeur FIXE ($N = 500 \text{ trs/mn}$) par action sur l'excitation ou sur l'alimentation en continu variable sur le pupitre.

TRES IMPORTANT

VEILLES A CE QUE LA VITESSE DE ROTATION RESTE RIGOREUSEMENT CONSTANTE TOUT LE LONG DES VISUALISATIONS A FAIRE. On notera en plus que ce montage et ce démarrage du moteur d'entraînement doit être repris à chaque visualisation à faire.



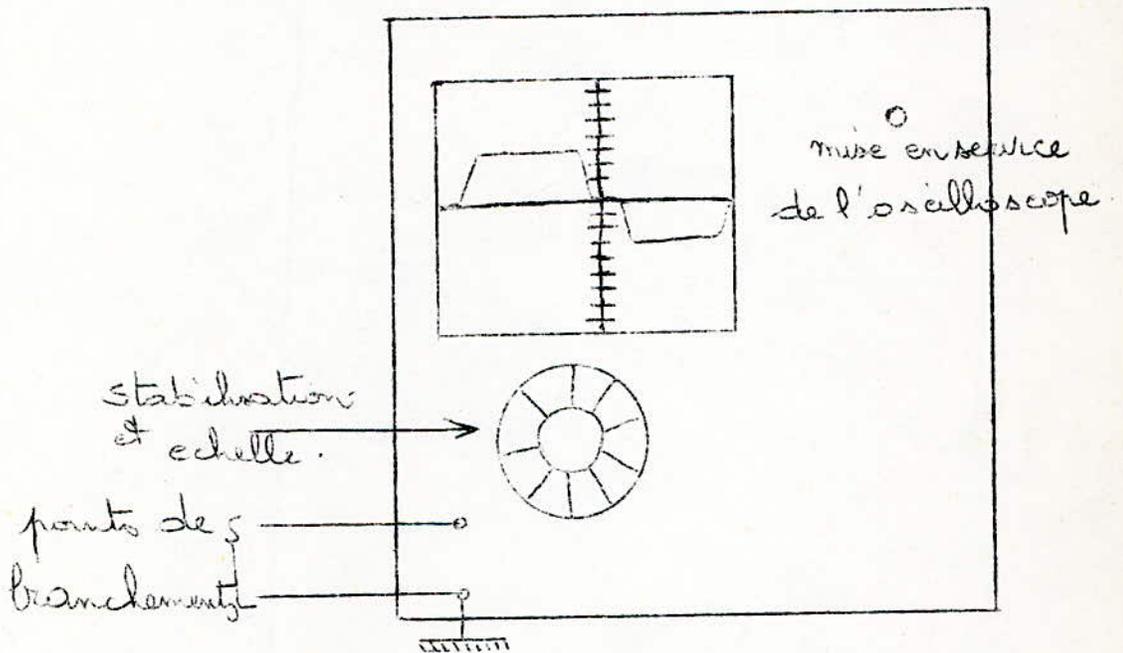
20

Montage du moteur d'entraînement.

II - 2 : Oscilloscope :

Après avoir stabilisé la vitesse du moteur d'entraînement, régler l'oscilloscope pour le balayage horizontal d'une façon stable.

Se fixer alors sur la position "Etalonnage" des boutons réglant le balayage en temps



* * Important : Ne plus toucher aux boutons de l'oscilloscope tout le long de la manipulation relevant ainsi les courbes à la même échelle.

II - 3 : Moteur d'essais :

On ne considèrera que l'excitation shunt de ce moteur prévu avec une excitation composée.

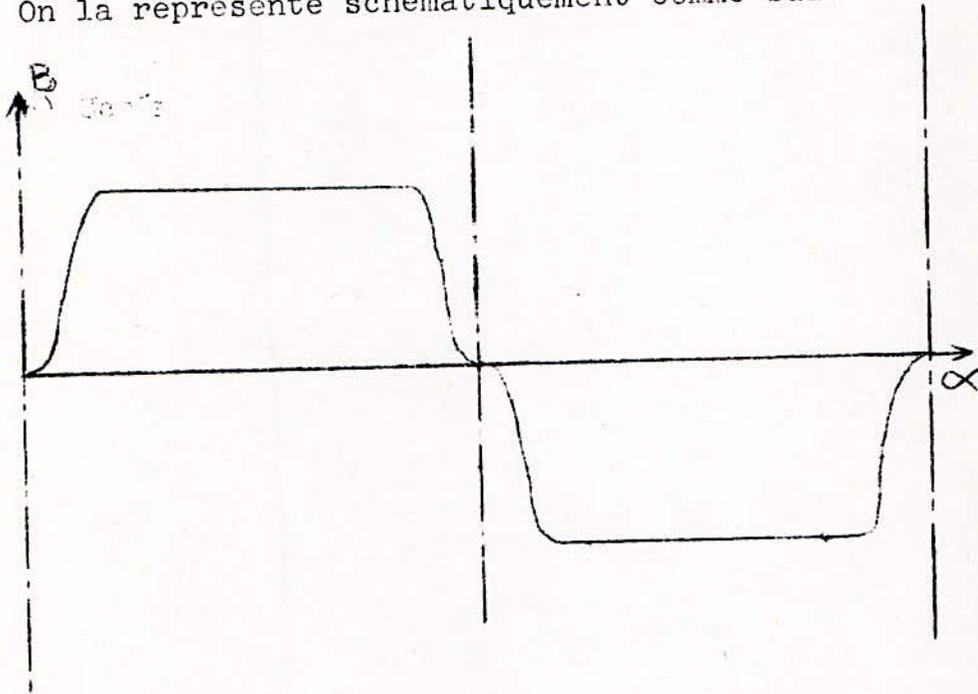
Ce moteur est muni aussi de pôles auxiliaires de commutation.

II - 3 - 1 : Visualisation du champ magnétique principal :

a) allure théorique :

Notons que l'induction magnétique principale est nulle sur la ligne neutre théorique, maximale sous les cornes polaires de la machine.

On la représente schématiquement comme suit :



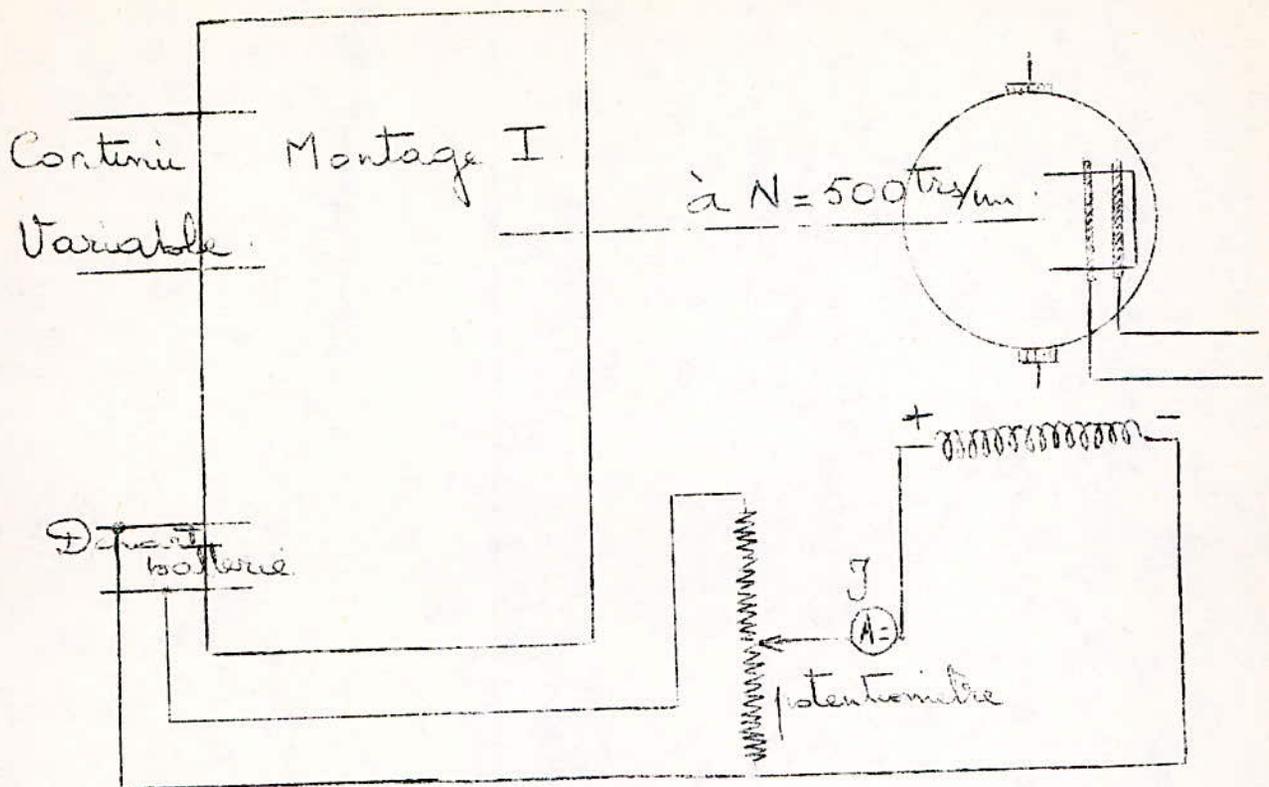
b) Schéma du montage :

* Matériel utilisé :

1 rhéostat d'excitation (monté en potentiomètre)

1 ampèremètre continu

+ Montage du moteur d'entraînement.



C - 1 - 3 - Travail à effectuer :

- * brancher le départ batterie pour l'excitation des deux moteurs
- * Démarrer le moteur d'entraînement comme décrit précédemment
- * agir sur le rhéostat d'excitation concernant le moteur d'essais de façon à avoir

$$J = J_n / 4 ; J = J_n / 2 ; J = 3/4 J_n ; J = J_n ; J = 1,25 J_n$$

- * Pour les quatre premiers courants d'excitation, dessiner sur deux graphiques séparés les courbes visualisées sur l'écran de l'oscilloscope.

$$J = 0,25 \text{ A} ; J = 0,5 \text{ A}$$

1 même graphique

$$J = 0,75 \text{ A} ; J = 1 \text{ A}$$

1 même graphique

* pour un certain angle α vis à vis de la ligne neutre théorique, fixer une échelle pour l'induction magnétique et tracer la courbe de magnétisation de cette machine. Noter alors le phénomène de la saturation.

* Tracer séparément la courbe visualisée de l'induction principale à $J = 1,25$ A (usage ultérieur).

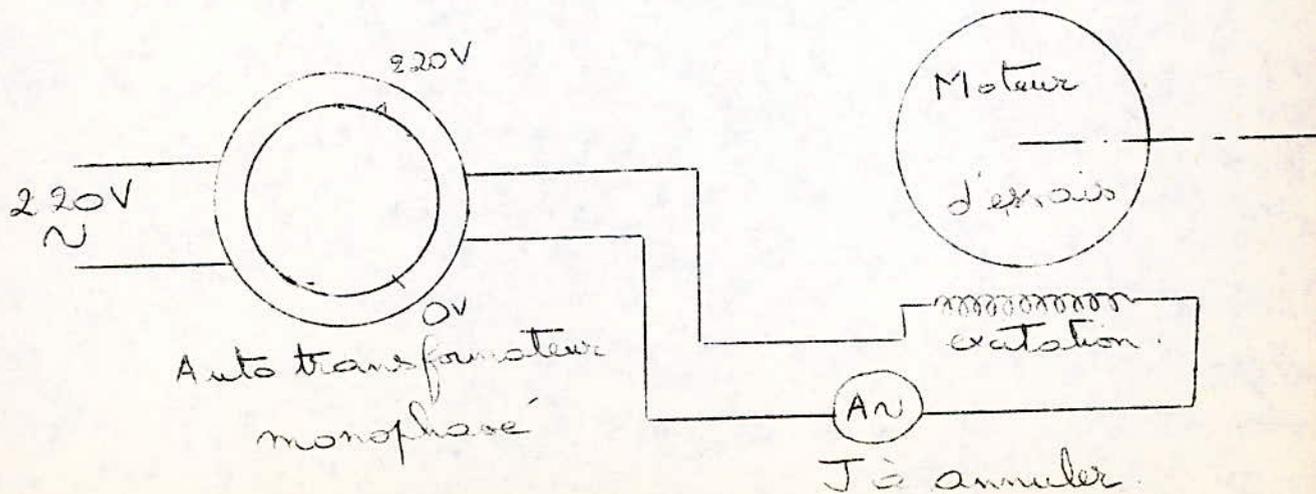
* pour pouvoir superposer les différentes courbes, donc le déphasage précédemment utilisé, repérer le Top laissé par le passage des balais sur les discontinuités effectuées sur les deux bagues en cuivre.

* * * Ne pas changer les bases de l'oscilloscope ni le balayage.

C - 2 - Champ magnétique transversal d'induit :

C 2 - 1 - démagnétisation des pôles principaux :

faire le montage suivant :

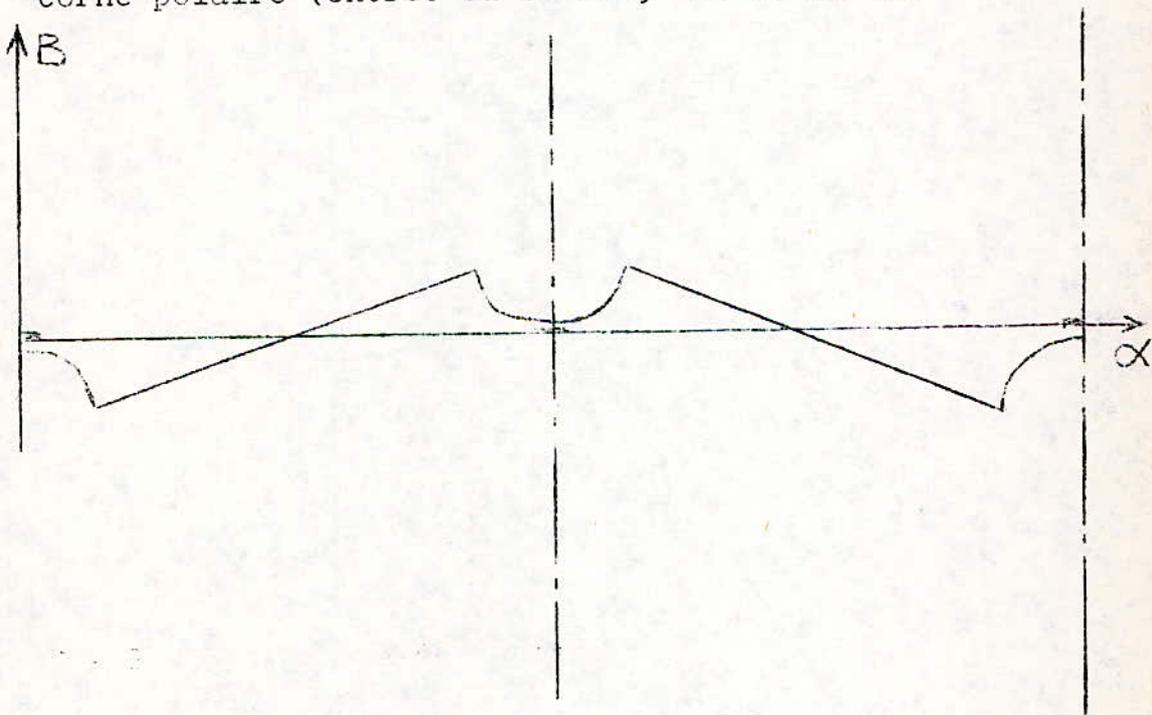


Partir d'une tension nulle et l'augmenter jusqu'à obtenir un courant $J = 1,25 \text{ A}$

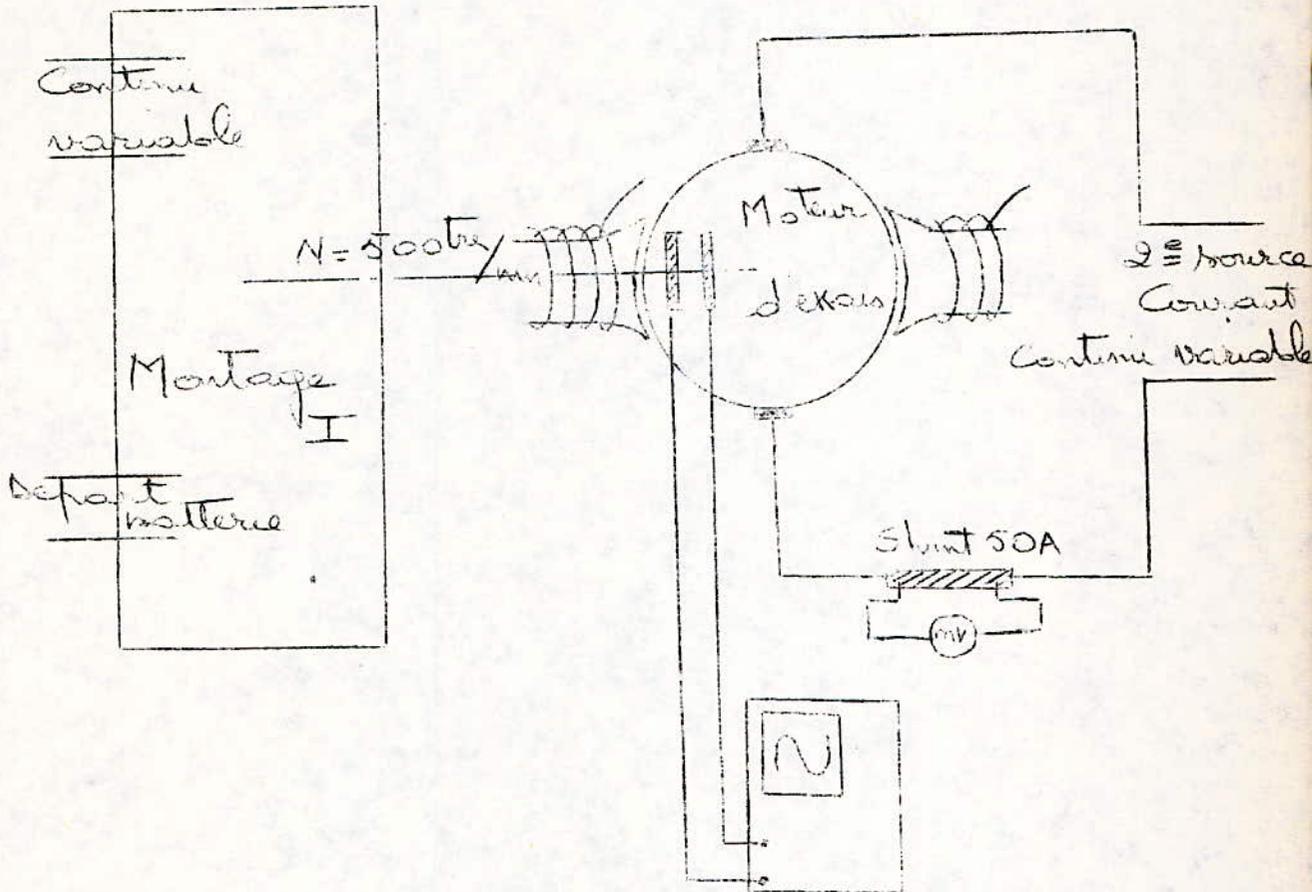
Faire alors décroître lentement le courant jusqu'à annuler le courant J . La démagnétisation est ainsi effectuée.

C - 2 - 2 : Allure théorique :

Le champ magnétique transversal est nul au milieu des pôles principaux, a une valeur minimale sur la ligne neutre théorique et une valeur maximale (positive ou négative) à la corne polaire (entrée ou sortie, Sud ou Nord).



C - 2 - 3 : Schéma du montage :



Notons d'abord la nécessité d'avoir deux sources de courant continu variable. On utilisera deux pupitres pour répondre à cette nécessité.

C - 2 - 4 : Travail à effectuer :

Le moteur d'entraînement et l'oscilloscope restant inchangés, on se tiendra à un travail sur le moteur d'essais. Ainsi, après avoir démarré le moteur d'entraînement comme conseillé précédemment, stabilisé l'oscilloscope, agir sur l'alimentation "continu variable" de façon à obtenir plusieurs valeurs du courant dans l'enroulement d'induit (cet induct jouant le rôle d'une résistance en rotation).

* * Une très faible tension est suffisante
afficher sur l'ampéremètre du circuit d'induit les valeurs
suivantes du courant d'induit I :

$$I = 10 \text{ A} \quad I = 15 \text{ A} \quad I = 20 \text{ A}$$

* pour ces trois courants d'induit tracer sur 2 graphiques
séparés les courbes visualisées sur l'écran de l'oscillos-
cope.

$$I = 10 \text{ A} \quad \text{et} \quad I = 20 \text{ A} \quad \text{sur un même graphique}$$

$$I = 15 \text{ A} \quad \text{sur un graphique (usage ultérieur)}$$

* * repérer les différentes courbes les unes vis à vis
des autres à l'aide du "Top" dû aux discontinuités

TRES IMPORTANT :

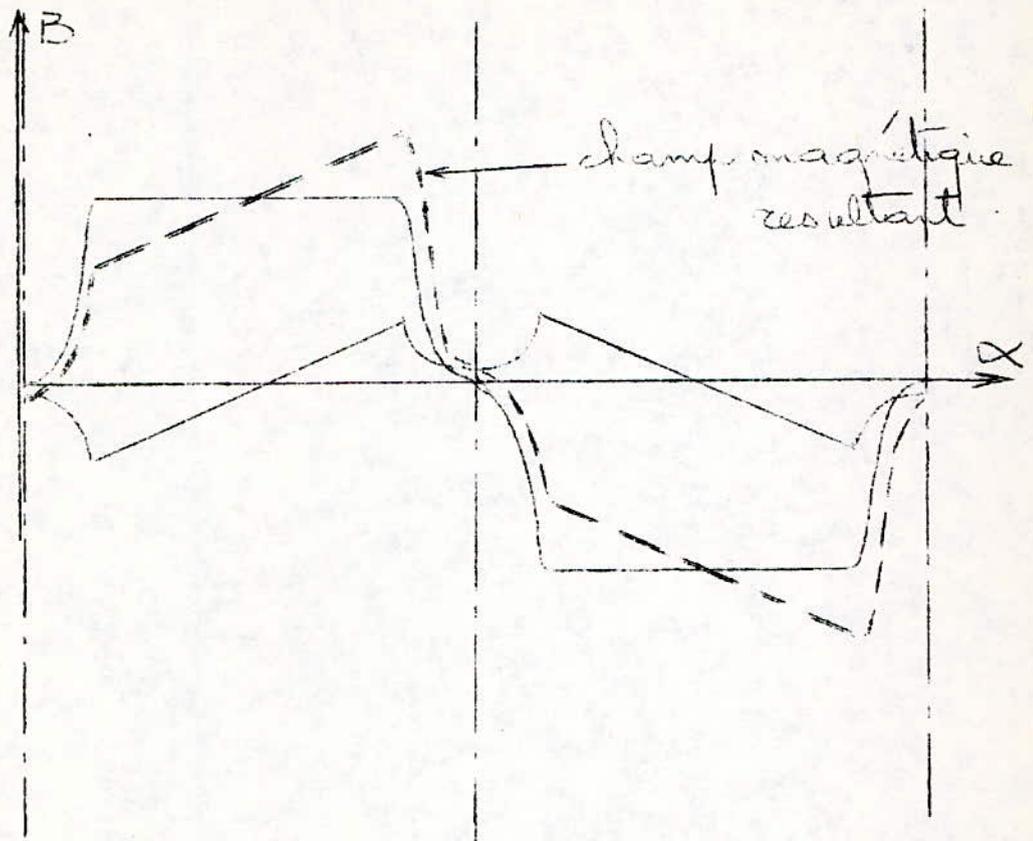
Le moteur d'entraînement tourne toujours à la même vitesse

$$N = 500 \text{ trs} / \text{mn}$$

C - 3 : Champ magnétique résultant :

Théoriquement et hors de la saturation, ce champ peut être
considéré comme étant la superposition des deux précédents
champs.

C - 3 - 1 : allure théorique :

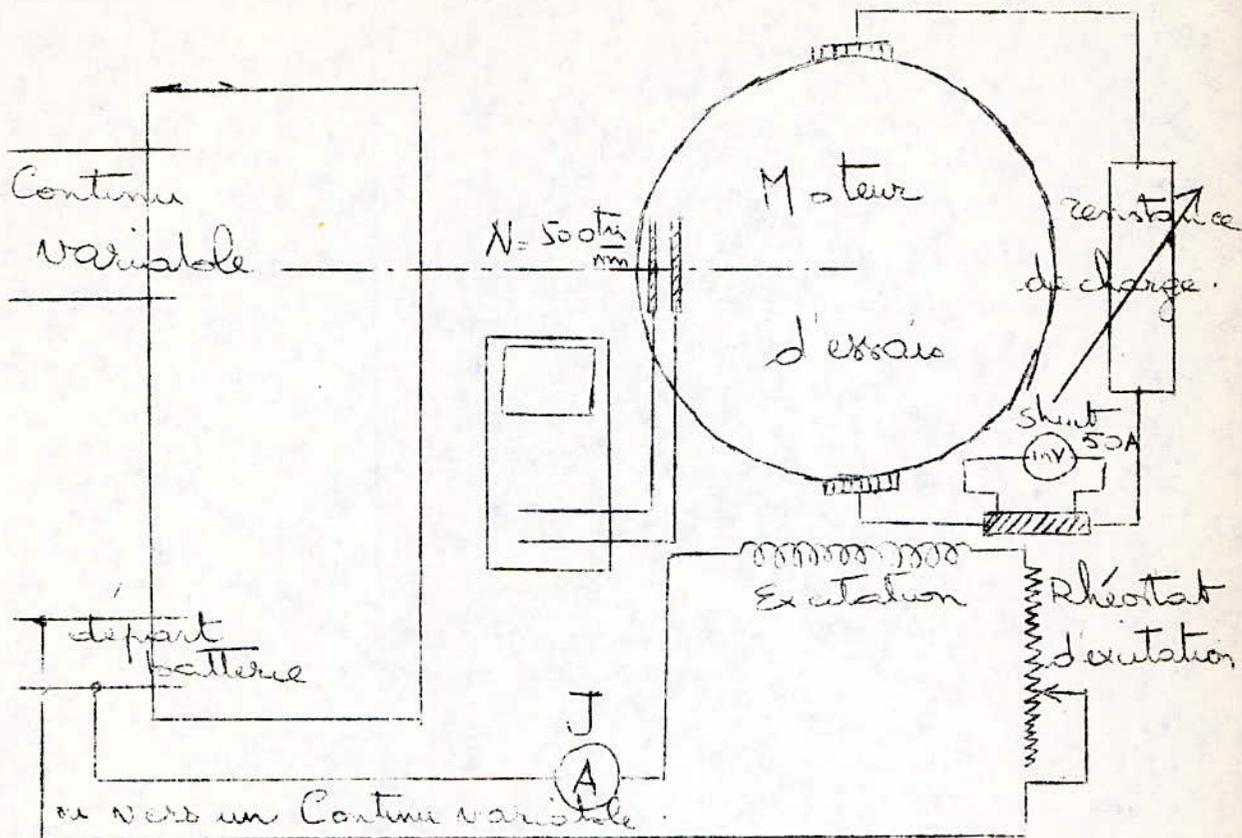


On remarque bien, sur cette courbe théorique la démagnétisation sous les cornes polaires d'entrée et la magnétisation sous les cornes polaires de sortie consécutives à l'apparition du champ transversal d'induit.

Noter en plus, la diminution de la qualité de la commutation du fait que l'induction n'est plus nulle (entraînant un flux non maximum) sur la ligne neutre théorique.

C - 3 - 2 : Schéma du montage :

Noter, en premier lieu que l'induit peut être alimenté par du continu variable ou en installant une résistance de charge variable permettant la circulation d'un courant dans l'induit de la machine.



C - 3 - 3 : travail à effectuer :

* * Ne pas faire circuler de courant dans l'induit avant le démarrage du moteur d'entraînement car de ce fait, le moteur d'essais sous l'effet de l'excitation remanente tend à tourner sans que l'excitation soit mise en service.

Aussi, opérer comme suit :

- exciter le moteur d'entraînement (donc aussi le moteur d'essais). La résistance de charge étant "Infinie" (interrupteurs ouverts)
- agir sur le rhéostat de démarrage pour démarrer le moteur d'entraînement, se fixer alors à la vitesse $N = 500 \frac{\text{trs}}{\text{mn}}$

* * Pendant tout cet essai, se fixer à $J = 1,25 \text{ A}$

42

C - 3 - 3/1 Champ résultant sans pôles auxiliaires :

- * augmenter graduellement la charge de façon à afficher sur l'ampèremètre du circuit d'induit :

$$I = 10 \text{ A}$$

$$I = 15 \text{ A}$$

Dessiner alors les formes des courbes visualisées séparément.

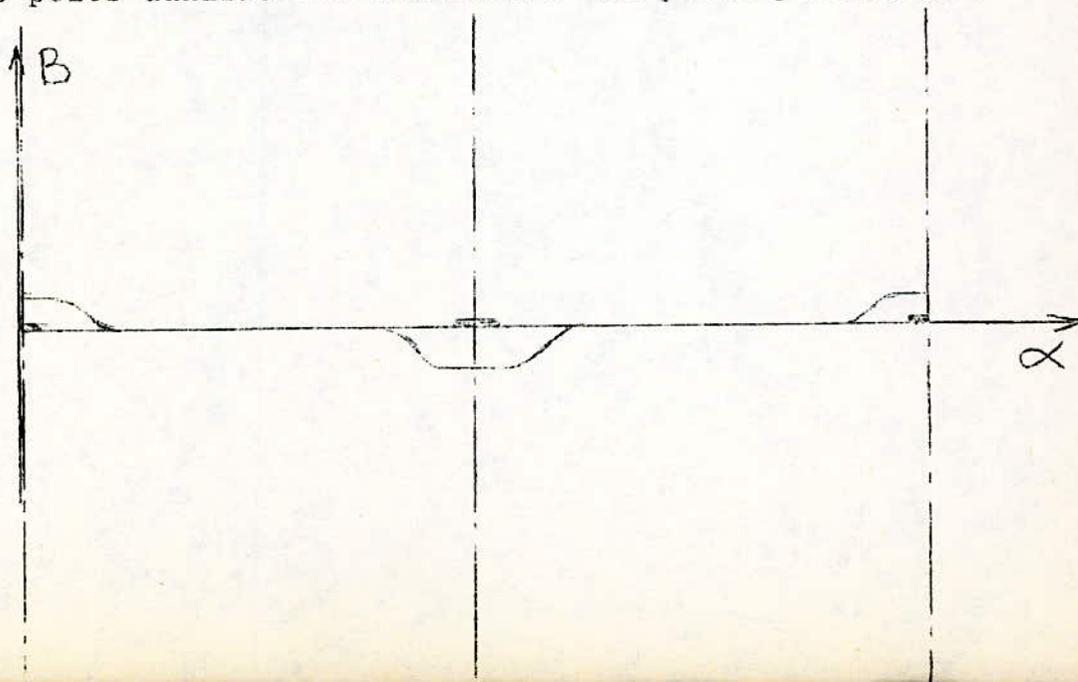
C - 3 - 3/2 Champ résultant avec pôles auxiliaires :

- * Brancher en série avec l'induit les enroulements inducteurs des deux pôles auxiliaires
- * refaire alors le même travail qu'auparavant
- * Comparer, enfin les différentes courbes visualisées entre elles : avec et sans pôles auxiliaires.

C - 4 - Champ des pôles auxiliaires de commutation :

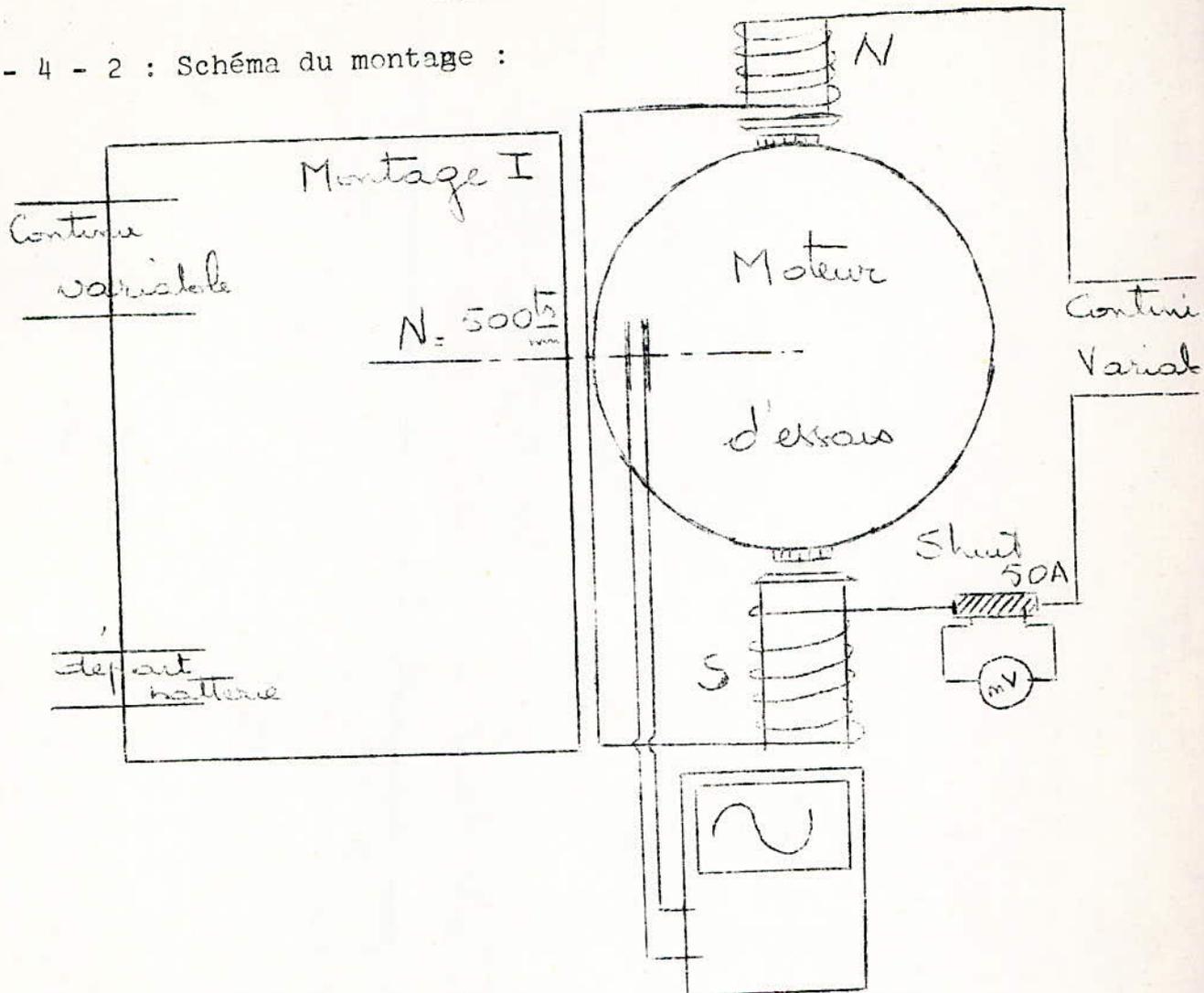
C - 4 - 1 : allure théorique :

Noter d'abord la grande analogie (forme) entre le champ des pôles auxiliaires avec celui des pôles principaux.



43

C - 4 - 2 : Schéma du montage :



C - 4 - 3 : travail à effectuer :

tout d'abord, démagnétiser totalement l'inducteur de la machine comme décrit lors de la visualisation du champ magnétique transversal d'induit .

* Après cela, agir sur la deuxième source de courant continu variable afin de donner au courant circulant dans les inducteurs des pôles auxiliaires les valeurs suivantes :

$$I = 10 \text{ A} \quad ; \quad I = 15 \text{ A} \quad ; \quad I = 20 \text{ A}$$

* Relever à chaque fois la courbe visualisée sur l'écran de l'oscilloscope représentant le champ magnétique des pôles auxiliaires le long de l'entrefer.

C - 5 : Comparaison des résultats :

* Prédéterminer, en premier lieu, la courbe du champ résultant sans pôles auxiliaires à l'aide de la courbe de magnétisation, du champ principal à $J = 1,25$ A, du champ transversal d'induit à $I = 15$ A.

* Comparer alors cette courbe prédéterminée avec celle relevée de l'écran de l'oscilloscope.

* Expliquer alors les différents changements lorsqu'on passe de la théorie à l'expérimentation.

G - CONCLUSION

La machine à courant continu, à part quelques détails de construction ou quelques changements de matériaux, stagne depuis près d'un siècle.

N'empêche que l'amalgame formé par cette machine et l'oscilloscope nous a permis de visualiser le plus important phénomène existant dans les machines électriques.

Mais, encore une fois, la théorie n'est pas la réalité pratique : ce sont les règles de la nature.

TABLE DE MATIERE

- A - Introduction générale
 - B - Rappel poussé sur l'induction magnétique
 - B - 1 : Champ magnétique principal d'induit
 - B - 2 : Champ magnétique transversal d'induit
 - B - 3 : Champ magnétique résultant
 - B - 4 : Moyens utilisés pour la compensation et l'amélioration de la commutation
 - B - 5 : Champ magnétique direct d'induit
 - B - 6 : Champ magnétique des pôles auxiliaires de commutation
 - C - Théorie et technologie de la visualisation
 - D - Expérimentation
 - D - I : Description de l'expérimentation
 - D - II : Résultats de l'expérimentation
 - E - Introduction à la manipulation
 - F - Texte de la manipulation
 - F - I : rappel théorique
 - F - II : Manipulation
 - G - Conclusion
-