

# Informations

## électroniques



N° 32

BULLETIN TECHNIQUE ÉDITÉ PAR LE DÉPARTEMENT DE DOCUMENTATION "ÉLECTRONIQUE" DE LA MANUFACTURE BELGE DE LAMPES ET DE MATÉRIEL ÉLECTRONIQUE S. A.

1959

Egen

## FERROXCUBE

**P**RIMITIVEMENT développés pour l'équipement téléphonique par courants porteurs, les pots fermés en ferroxcube sont actuellement utilisés dans toutes les applications exigeant une self-induction de qualité. Dans le but de faciliter l'emploi de ces pots, nous avons pensé qu'il était

utile de donner un complément d'information sur le choix du type de pot et sur la détermination du bobinage.

L'étude qui suit concerne uniquement la réalisation de self-inductions utilisées avec de faibles valeurs de champ.

### I. — INTRODUCTION

Si une bobine est enroulée sur un tore en matière magnétique, sa self-induction augmente dans le rapport  $\mu_t$ . Ce coefficient  $\mu_t$  est appelé perméabilité torique du matériau. Selon le matériau employé,  $\mu_t$  possède une valeur comprise entre 1 et 50000.

Dans le cas d'un pot fermé où le circuit magnétique n'est pas homogène, mais comprend des parties de sections et de qualités différentes (par exemple un entrefer), la self-induction de la bobine est donnée par la formule :

$$L = \frac{4 \pi n^2}{\sum \frac{1}{\mu_t S}} 10^{-7} \text{ H}$$

(la signification des symboles utilisés est donnée dans le tableau A).

Le facteur  $\sum \frac{1}{\mu_t S}$  est appelé réluctance du circuit. Il

peut s'écrire  $\frac{1}{\mu'} \sum \frac{1}{S}$ ,  $\mu'$  étant la perméabilité effective

du circuit, c'est-à-dire la perméabilité d'un matériau imaginaire qui, en tore homogène, posséderait la même réluctance. Pour un pot fermé Ferroxcube,  $\mu'$  n'est donc pas le rapport des self-inductions de la bobine respectivement placée dans le pot, puis dans l'air.

Si, dans un circuit fermé composé d'un anneau ferromagnétique on introduit un petit entrefer d'air, la réluctance de cet entrefer forme une partie importante de la réluctance totale parce que la valeur  $\mu_t$  de l'air est 1, tandis que celle du matériau magnétique est couramment supérieure à 500.

Il s'ensuit que la réluctance totale, et par conséquent la self-induction, dépend étroitement des dimensions de l'entrefer.

### II. — CHOIX DE LA PERMÉABILITÉ DU POT

En examinant la formule  $L = \frac{4 \pi n^2}{\sum \frac{1}{\mu_t S}} \mu' \cdot 10^{-7}$  (1) on

pourrait croire que, dans le but d'obtenir la plus grande perméabilité possible, il serait préférable d'employer un circuit sans entrefer. Avec une grande valeur de  $\sum \frac{1}{S}$

(petites dimensions), la self-induction désirée pourrait être obtenue avec un nombre de spires relativement petit. Cependant il faut tenir compte du fait que la valeur de  $\mu'$  est pratiquement limitée par les considérations suivantes :

- 1) coefficient de température de la perméabilité;
- 2) pertes dans le matériau;

3) variations de la perméabilité en fonction du temps ou de chocs magnétiques (désaccommodation).

En outre, quand les bobines sont utilisées avec des intensités de champ magnétique relativement importantes, il faut également veiller aux points suivants :

- 4) distorsion par les pertes d'hystérésis;
- 5) variations de la perméabilité d'amplitude.

Plus  $\mu'$  sera élevé et plus l'importance de ces facteurs sera grande. Nous étudierons d'ailleurs, par la suite, séparément chacun d'eux.

En conclusion, on peut dire que, dans chaque cas, il est nécessaire de trouver un compromis, c'est-à-dire :  $\mu'$  doit

être choisi de façon que les perturbations énumérées ci-dessus, soient maintenues inférieures à certaines limites. Pour pouvoir faire varier  $\mu'$  dans un rapport suffisamment grand, la manière la plus simple est la variation de la longueur d'un entrefer d'air bien défini.

Ceci est obtenu en établissant pour chaque type de pot toute une série d'entrefer standard correspondant à des perméabilités effectives bien déterminées (tableau D).

Nous allons maintenant examiner les relations existant entre  $\mu'$  et les différents facteurs qui le limitent. D'après les considérations qui en découleront, il sera possible de déterminer, dans chaque cas particulier, la valeur maximum de  $\mu'$  utilisable.

### III. — LE COEFFICIENT DE TEMPÉRATURE

Dans l'équation (1) en négligeant la variation correspondante de  $\Sigma \frac{l}{S}$ , on peut admettre que la seule grandeur dépendant de la température est  $\mu'$ . On a alors :

$$\frac{dL}{LdT} = \frac{d\mu'}{\mu'dT}$$

Pour un circuit magnétique de longueur  $l$  possédant un entrefer d'épaisseur  $\Delta$  la définition de la réluctance nous donne :

$$\frac{1}{\mu'} \frac{l + \Delta}{S} = \frac{1}{\mu_t} \left( \frac{l}{S} + \frac{\Delta}{S} \right) \quad (2)$$

Si la section droite  $S$  n'est pas constante le long de ce circuit, chaque partie homogène pourra être remplacée par une autre partie de section  $S$ , mais de longueur  $l'$  différente, de telle manière que la réluctance du circuit conserve la même valeur.

De l'équation (2) il vient :

$$\mu' = \frac{l + \Delta}{\frac{l}{\mu_t} + \Delta} = \frac{\frac{l}{\Delta} + 1}{\frac{l}{\Delta} + \mu_t} \mu_t$$

et, après dérivation par rapport à  $\mu_t$

$$\frac{d\mu'}{\mu_t} = \frac{\left( \frac{l}{\Delta} + 1 \right) \frac{1}{\Delta}}{\left( \frac{l}{\Delta} + \mu_t \right)^2} \mu_t \quad (3)$$

Pour un entrefer petit  $\left( \frac{l}{\Delta} \gg 1 \right)$ , (3) devient, en tenant compte de (2) :

$$\frac{d\mu'}{d\mu_t} = \frac{\left( \frac{l}{\Delta} + 1 \right)^2}{\left( \frac{l}{\Delta} + \mu_t \right)^2} = \left( \frac{\mu'}{\mu_t} \right)^2$$

### IV. — PERTES DANS LE NOYAU ET DANS LE BOBINAGE

Une bobine ne représente jamais une charge purement inductive, car de nombreux facteurs introduisent des pertes dans le bobinage et dans le noyau magnétique. Chacune de ces pertes peut être considérée comme étant causée par une résistance placée en série avec une bobine supposée sans pertes. La somme de ces résistances représente la résistance totale de pertes  $R_T$ .

Un coefficient de qualité fréquemment utilisé pour une

ou

$$\frac{d\mu'}{\mu'} = \frac{d\mu_t}{\mu_t^2} \mu'$$

et

$$\frac{d\mu'}{\mu_t^2 dT} = \frac{d\mu_t}{\mu_t^2 dT} \quad (4)$$

Si le champ appliqué reste faible, il est possible de confondre la perméabilité torique  $\mu_t$  avec la perméabilité initiale  $\mu_0$  (la perméabilité initiale  $\mu_0$  est le rapport de la variation d'induction  $\Delta B$  et de la variation de champ correspondante  $\Delta H$  mesurées dans un anneau fermé (désaimanté) pour une très faible amplitude de la composante alternative du champ  $H$ . C'est, à une température donnée, et pour une fréquence relativement basse, une constante caractéristique du matériau magnétique).

L'équation (5) devient :

$$\frac{d\mu'}{\mu_t^2 dT} = \frac{d\mu_0}{\mu_0^2 dT}$$

Le coefficient  $\frac{d\mu_0}{\mu_0^2 dT}$  est une constante indépendante de  $\mu'$  et de la forme du circuit : c'est le coefficient de température du matériau magnétique.

Rappelons qu'entre 20 et 50 °C,  $\frac{d\mu_0}{\mu_0^2}$  est inférieur à la valeur :

3.10 <sup>-6</sup> × 30	pour la variété	Fx	C 3 B
2.10 <sup>-6</sup> × 30	—	Fx	C 3 B 2/3 B 3
4.10 <sup>-6</sup> × 30	—	Fx	C 3 B 4
8.10 <sup>-6</sup> × 30	—	Fx	C 4 B

Le coefficient de température n'est pas linéaire entre ces deux limites de température (consulter la notice générale : « Ferroxcube »).

Le coefficient de température de la self-induction est :

$$\frac{dL}{LdT} = \frac{d\mu_0}{\mu_0^2 dT} \mu'$$

Ce coefficient de température est donc proportionnel à  $\mu'$ .

bobine, est l'expression  $Q = \frac{L \omega}{R_T}$ . Pour préciser l'influence de chaque type de perte sur la qualité de la bobine, il est plus aisé d'employer  $\frac{1}{Q} = \text{tg } \delta = \frac{R_T}{L \omega}$ , car cette expression se calcule par simple addition des coefficients  $\frac{R}{L \omega}$  correspondant aux différentes pertes. En pratique, on utilise aussi beaucoup le rapport  $\frac{R}{L}$ .

Les pertes peuvent être classées en deux groupes :

A) Les pertes extérieures au noyau magnétique, dans le bobinage et dans le milieu environnant. Ces pertes existent également dans les bobines à air :

- 1) pertes résistives dans le bobinage;
- 2) pertes par courants de Foucault dans le bobinage;
- 3) pertes dans la capacité parasite (capacité répartie du bobinage monté dans le pot).

B) Les pertes dans le noyau magnétique :

- 4) pertes par courants de Foucault;
- 5) pertes par hystérésis;
- 6) pertes résiduelles.

Une septième catégorie, celle des pertes dans le blindage, peut être négligée lorsqu'on utilise les pots fermés en Ferroxcube 3 B et 4 B car le champ de fuite à l'extérieur du pot reste négligeable par suite de la perméabilité élevée de ces matériaux.

Les formules nécessaires au calcul des coefficients correspondant à ces pertes sont brièvement indiquées ci-dessous. Par la suite, ces mêmes formules seront données avec les coefficients appropriés correspondant aux différents types de pots en Ferroxcube. Cependant, s'il ne désire effectuer que le calcul rapide d'un cas déterminé, le lecteur pourra sauter les paragraphes suivants pour se reporter directement au paragraphe VII : Réalisation pratique des bobinages utilisant des pots fermés Ferroxcube.

**IV-1 : Pertes résistives.**

On choisira le plus petit type de pot compatible avec l'application envisagée, de manière à utiliser tout l'espace disponible dans la carcasse. Le rayon moyen du bobinage est alors  $\frac{r_3 + r_2}{2}$  (voir fig. 1); la longueur totale du fil employé

est égale à  $(r_3 + r_2) \pi n$  de section  $\frac{(r_3 - r_2) A f_{cu}}{n}$ ,

$f_{cu}$  étant le coefficient de remplissage, définissant la partie de la surface réellement occupée par du cuivre. Le reste est rempli par les matières d'imprégnation et d'isolement, ou par de l'air.

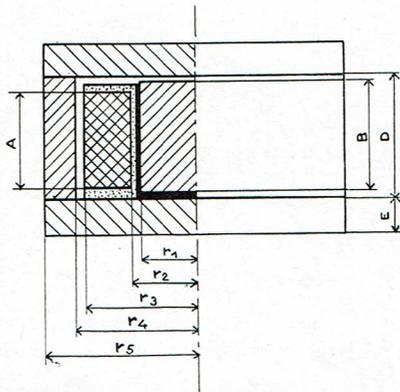


Fig. 1. — Coupe d'un pot Ferroxcube avec son bobinage.

Nous pouvons ainsi calculer la résistance totale en continu du bobinage en cuivre :

$$R_0 = \frac{r_3 + r_2}{r_3 - r_2} \frac{1}{A f_{cu}} n^2 \rho_{cu} \quad \Omega$$

D'après l'équation (1) le coefficient  $\frac{R}{L}$ , correspondant aux pertes dans la résistance du fil peut s'écrire :

$$\frac{R_0}{L} = \frac{1}{\mu'} \frac{r_3 + r_2}{(r_3 - r_2) A} \frac{\rho_{cu}}{4 f_{cu}} \sum \frac{l}{S} 10^7 \frac{\Omega}{H}$$

Si l'espace disponible n'est pas entièrement occupé, le facteur  $f_{cu}$  va diminuer proportionnellement. Si la différence est trop grande, on introduit une erreur assez importante, car le rayon de la spire moyenne ne possède plus la valeur

$$\frac{r_3 + r_2}{2}$$

**IV-2 : Pertes par courants de Foucault dans le bobinage.**

Le flux magnétique engendré par le courant alternatif, traversant également le bobinage en cuivre, y induit des courants de Foucault, donc des pertes d'énergie. Pour ce type de pertes, l'expression  $\frac{R}{L}$  est égale à :

$$\frac{R_{cu}}{L} = \frac{C_{wcu} B_{cu}^2}{l^2 L} f^2 v_{cu} d^2$$

$C_{wcu}$  est une constante, dépendant des dimensions de la bobine et du noyau ainsi que de la résistance spécifique du cuivre,  $d$  est le diamètre du fil,  $B_{cu}$  l'induction dans le volume de cuivre  $V_{cu}$ .

Comme  $B_{cu}$  est proportionnel à  $nI$  et que  $L$  est proportionnel à  $n^2 \mu'$ , on peut écrire :

$$\frac{R_{cu}}{L} = \frac{k}{\mu'} v_{cu} f^2 d^2 = \frac{1}{\mu'} (r_3^2 - r_2^2) \pi k A f_{cu} d^2 f^2 10^{10} \frac{\Omega}{H}$$

Le coefficient  $k$  peut être calculé par la mesure comparative des pertes de deux bobines montées successivement dans le même pot. Les deux bobines possèdent le même nombre de spires, mais l'une sera, par exemple, faite avec du fil divisé 36 brins 0,04, tandis que l'autre sera en 12 brins 0,07. Ainsi la section équivalente du cuivre sera la même pour les deux bobinages, mais avec un diamètre de fil différent. Dans une mesure effectuée à basse fréquence, les pertes par capacité seront négligeables alors que les pertes dans le noyau et dans la résistance du fil seront égales pour les deux bobines. La différence constatée sera uniquement due aux courants de Foucault dans le cuivre (valeurs différentes de  $d$ ). De cette différence on déduit le coefficient  $k$ .

Pour diminuer le champ de fuite de l'entrefer à travers le bobinage, il est intéressant de fractionner l'entrefer. C'est ainsi que pour les pots standard, types 25/12 - 16 - 17,5 et 36/22 les entrefers supérieurs à 0,4 mm sont divisés en deux parties symétriques par interposition d'une rondelle de bakélite HF entre le noyau et un plateau.

**IV-3 : Pertes dues à la capacité parasite.**

Nous ne considérons ici que le cas où la résistance ohmique de la bobine est petite par rapport à son impédance, c'est-à-dire  $R \ll L\omega$ . De plus, la fréquence d'utilisation est supposée être beaucoup plus basse que la fréquence de résonance ( $L C \omega^2 \ll 1$ ). En effet, si ces deux conditions n'étaient pas satisfaites, la bobine s'avérerait inutilisable du fait de pertes trop élevées. Cette bobine est équivalente à un circuit série composé d'une self-induction  $L$  et d'une résistance ohmique  $R$ , shuntés par une capacité sans pertes. L'impédance de l'ensemble est alors :

$$Z = j L \omega (1 + L C \omega^2) + R (1 + 2 L C \omega^2)$$

Le second terme représente la résistance ohmique apparente : la résistance en continu  $R$  s'est trouvée augmentée de la quantité :

$$2 R L C \omega^2 = \frac{2}{Q} L^2 C \omega^3$$

Par contre, si la capacité en parallèle n'est pas sans pertes, mais présente un angle de perte  $tg \delta_c$ , l'augmenta-

tion apparente  $j L^2 C \omega^3$  entraîne une nouvelle augmentation  $L^2 C \omega^3 \operatorname{tg} \delta_c$  de la résistance ohmique.

L'augmentation totale  $R_{\text{cap}}$  est alors :

$$R_{\text{cap}} = \left( \frac{2}{Q} + \operatorname{tg} \delta_c \right) L^2 \omega^3 C$$

d'où

$$\frac{R_{\text{cap}}}{L} = \left( \frac{2}{Q} + \operatorname{tg} \delta_c \right) L C \omega^3$$

#### IV-4 : Pertes par courants de Foucault dans le noyau magnétique.

Pour calculer les pertes par courants de Foucault dans une partie homogène de matériau magnétique de section uniforme, on utilise une formule analogue à celle des courants de Foucault dans le cuivre.

$$R_{\text{no}} = \frac{2 \pi^2 10^{-14}}{\rho} \frac{B^2}{I^2} f^2 S l \delta^2 C_c$$

dans laquelle :

$\delta$  est la plus petite dimension perpendiculaire à la direction du flux,

B l'induction,

I la valeur efficace du courant,

C une constante de configuration,

S la section droite,

l la longueur du noyau.

Puisque  $L = \frac{n B S}{I} 10^{-7}$

de plus  $\frac{R_{\text{no}}}{L} = \frac{10^{-7} B}{2 \rho n I} \omega^2 l \delta^2 C_c$

$$B \cdot S = \frac{4 \pi n I \mu'}{\Sigma \frac{l}{S}}$$

et  $\frac{R_{\text{no}}}{L} = \frac{2 \pi 10^{-7}}{\rho} \frac{\mu'}{\Sigma \frac{l}{S}} \frac{l}{S} \omega^2 \delta^2 C_c$  (6)

on calcule que pour un bâtonnet droit ou carré  $C_c = \frac{1}{16}$

et que pour un disque mince  $C_c = \frac{1}{6}$ .

Pour un pot constitué de différentes parties de Ferroxcube, l'équation (6) doit être écrite :

$$\frac{R_{\text{no}}}{L} = \frac{2 \pi \cdot 10^{-7}}{\rho} \frac{\Sigma C_c \frac{l \delta^2}{S}}{\Sigma \frac{l}{S}} \omega^2 \mu' \quad (7)$$

Pour le pot de la figure 1 on peut calculer :

$$\Sigma C_c \frac{l \delta^2}{S} = \frac{\beta}{\pi}$$

dans laquelle

$$\beta = \frac{B}{4} + 0,35 E + \frac{2}{3} E l n \frac{r_4}{r_1} + \left( 1 - \frac{r_4^2}{r_3^2} \right) \left[ \left( 0,245 - 0,076 \frac{r_4}{r_3} \right) D + \left( 0,908 - 0,66 \frac{r_4}{r_3} \right) E \right]$$

en opérant la substitution dans l'équation (7)

$$\frac{R_{\text{no}}}{L} = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{\rho} \frac{\beta}{\Sigma \frac{l}{S}} \omega^2 \mu'$$

#### IV-5 : Pertes par hystérésis.

Quand un matériau magnétique subit un cycle complet d'hystérésis, l'énergie d'aimantation nécessaire est plus grande que celle qui est restituée lors de la désaimantation,

la différence est dissipée sous forme de chaleur et doit donc être considérée comme une perte. Pour un cycle, l'énergie dissipée est égale à :

$$\frac{V}{4 \pi} \int H dB 10^{-7} \quad J$$

où :

V : volume du noyau ( $\text{cm}^3$ ),

H : intensité du champ magnétique (œrsted),

B : induction magnétique (gauss).

En une seconde, les pertes sont :

$$W_H = \frac{f}{4 \pi} V \int H dB 10^{-7} \quad W \quad (8)$$

Pour calculer cette valeur, la relation entre H et B, c'est-à-dire la courbe d'hystérésis, doit être mise sous forme mathématique. Cette forme analytique est connue pour les champs de très faible intensité (induction de l'ordre de 10 gauss). C'est la loi de Rayleigh :

$$B = (\mu_t + 2 b H_1) H + b (H_1^2 - H^2)$$

$H_1$  étant le maximum de l'intensité de champ à la fin du cycle d'hystérésis,  $\mu_t$  et b étant des constantes du matériau.

Le Ferroxcube ne répond pas exactement à l'équation de Rayleigh, mais pour des inductions inférieures à 60 gauss, la différence est très faible.

De cette équation il s'ensuit que la surface du cycle est :

$$\int H dB = \frac{8}{3} b H_1^3 \quad (9)$$

des équations (8) et (9)

$$W_H = \frac{2}{3 \pi} H_1^3 f V b 10^{-7}$$

Ceci s'applique à un circuit magnétique fermé et homogène ayant une perméabilité initiale  $\mu_0$  (que nous confondons en première approximation avec la perméabilité torique  $\mu_t$ ). Si l'on introduit un entrefer, pour retrouver la même induction, il faut augmenter le champ d'aimantation dans le rapport  $\frac{\mu_t}{\mu'}$ . La surface du cycle d'hystérésis reste alors la même et l'on a :

$$H_1 = \frac{\mu'}{\mu_t} \frac{4 \pi n I \max}{l} = \frac{4 \pi n I \sqrt{2}}{l} \frac{\mu'}{\mu_t}$$

d'où

$$W_H = \frac{256 \sqrt{2}}{3} \pi^2 \frac{n^3 I^3}{l^3} b f V \frac{\mu'^3}{\mu_t^3} 10^{-7} \quad W$$

Ces pertes peuvent être considérées comme dissipées dans une résistance série hypothétique  $R_H$ .

Si  $L = \frac{4 \pi n^2 S \mu'}{l} 10^{-7}$  (ce qui n'est exact que pour une valeur constante de la section droite) alors :

$$\frac{R_H}{L} = \frac{32 \sqrt{2 \pi}}{3} \frac{b}{\sqrt{V}} \frac{\mu' \sqrt{\mu'}}{\mu_t^3} 3162 f I \sqrt{L} \quad \frac{\Omega}{H}$$

dans cette équation le facteur

$$\frac{32 \sqrt{2 \pi}}{3} 3162 \frac{b}{\mu_t \sqrt{\mu_t}}$$

est appelé  $C_h$ , constante d'hystérésis. Dépendant de b et de  $\mu_t$ , c'est une caractéristique d'un matériau donné.

Pour des raisons pratiques (Technique des bobines de charge pour pupinisation) on emploie un autre facteur  $q^2$  défini par le C.C.I.F.

En téléphonie, il est courant d'effectuer les mesures à 800 Hz. Si le terme  $\frac{R_H}{L}$  est mesuré à cette fréquence, on peut, à une fréquence  $f$ , le supposer dans le rapport  $\frac{f}{800}$

On a alors :

$$\frac{R_H}{L} = q_2 I \sqrt{L} \frac{f}{800} \quad \frac{\Omega}{H}$$

$$\text{avec } q_2 = C_{11} \left( \frac{\mu'}{\mu_t} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{800}{\sqrt{V}}$$

Le facteur n'est pas une constante du matériau, car il dépend du volume et de la perméabilité effective du circuit. Il est inversement proportionnel à  $\sqrt{V}$  et proportionnel à  $\sqrt{\mu'^3}$ .

Pour s'affranchir de l'influence du volume on ramène  $q^2$  à un volume de 24 cm<sup>3</sup> (volume normal d'une ancienne bobine Pupin).

D'autre part, on ramène la perméabilité effective à une valeur de 100. On obtient ainsi pour  $q_2 (V; \mu')$ , c'est-à-dire correspondant à un certain volume  $V$  et une certaine perméabilité effective  $\mu'$  :

$$q_2 (24; 100) = q_2 (V; \mu') \left( \frac{100}{\mu'} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{V}{24}}$$

Quand la section n'est pas constante ce qui est le cas d'un pot fermé, on définit la notion de volume effectif  $V'$  : c'est le volume d'un anneau du même matériau, avec entrefer, de même perméabilité  $\mu'$  donnant les mêmes pertes par hystérésis que celles du pot.

$$V' = \frac{\sum \left( \frac{l}{S} \right)^3}{\sum \left( \frac{l}{S^2} \right)^2}$$

$l$  et  $S$  représentent respectivement la longueur, la section droite de chaque partie homogène du pot.

Connaissant le coefficient  $q^2 (24; 100)$  caractéristique du matériau correspondant à  $\mu' = 100$  et  $V' = 24$  cm<sup>3</sup>, on peut déterminer pour un pot fermé de perméabilité  $\mu'$

et de volume effectif  $V'$  le facteur  $q^2$  :

$$q_2 = q_2 (24; 100) \left( \frac{\mu'}{100} \right)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{24}{V'} \right)^{\frac{1}{2}} 10^{-3}$$

$V'$  étant exprimé en m<sup>3</sup>.

$q_2 (24, 100)$  est déduit de mesures faites sur tore en mesurant la variation de résistance  $\Delta R_H$  à une fréquence  $f$  provoquée par une variation de courant  $\Delta I$ . On calcule :

$$q_2 = \frac{1}{L \sqrt{L}} \frac{\Delta R_H}{\Delta I} \frac{800}{f} \quad \frac{\Omega}{H^{\frac{3}{2}}} \text{ mA.}$$

$L$  étant en H,  $\Delta R_H$  en  $\Omega$ ,  $\Delta I$  en mA et  $f$  en Hz. Le cycle d'hystérésis du Ferroxcube n'étant pas entièrement conforme à l'équation de Rayleigh, les valeurs indiquées pour le  $q^2 (24; 100)$  sont des maxima à n'utiliser que pour des inductions inférieures à 30 gauss. Jusqu'à 50 - 60 gauss, l'erreur restera faible. Pour les inductions élevées, il est nécessaire d'examiner les pertes totales dont la valeur est donnée en W/cm<sup>3</sup> sur des courbes spéciales en fonction de la fréquence et de l'induction.

Dans les bobines de filtre utilisées dans la technique des télécommunications, les pertes par hystérésis peuvent être habituellement négligées; à des inductions de 10 à 20 gauss elles sont inférieures à 5 % des pertes totales.

Ceci ressortira des exemples donnés par la suite. En principe, cependant, dans chaque cas, il y a lieu d'en faire la vérification.

#### IV-6 : Pertes résiduelles.

Les pertes par courants de Foucault sont très faibles dans le cas du Ferroxcube et les pertes par hystérésis peuvent être réduites si l'on diminue suffisamment l'amplitude du champ magnétique.

Malgré cela, on constate qu'il existe d'autre pertes, sensiblement constantes sur une large gamme de fréquences mais augmentant rapidement à partir d'une certaine fréquence. Ce sont les pertes résiduelles qui limitent en fréquence l'emploi du Ferroxcube. La nature de ces pertes, aux fréquences basses, n'a pas été encore clairement établie, mais leur augmentation aux fréquences élevées est en liaison avec les résonances mécaniques des moments magnétiques élémentaires. Par conséquent, ces pertes ne peuvent pas être calculées, elles sont seulement mesurées.

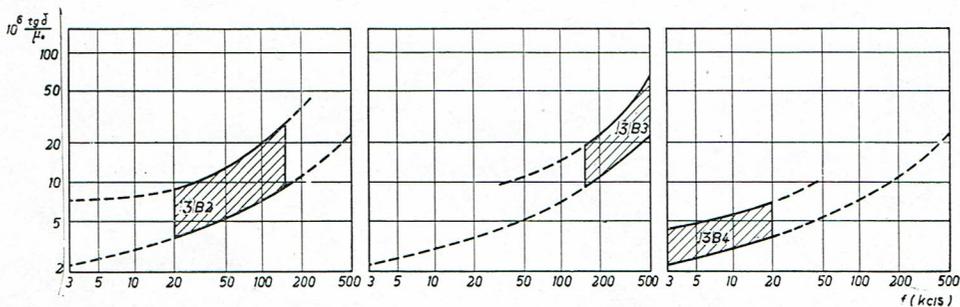
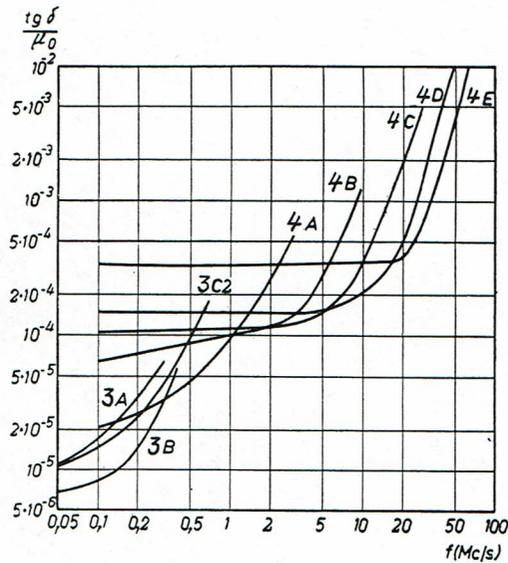


Fig. 2. — Variation des pertes résiduelles en fonction de la fréquence

Une mesure de  $\frac{R_T}{L}$  d'un bobinage sur un tore en Ferroxcube de section homogène, permet, effectuée à basse fréquence et faible induction de négliger  $R_{cu}$ ,  $R_{cap}$  et  $R_H$ .

Si les pertes en courant continu, facilement calculables, sont soustraites, le reste sera égal à  $\frac{R_{no} + R_r'}{L}$  dû aux courants de Foucault et aux pertes résiduelles dans le noyau.

Si on introduit dans ce circuit de section uniforme un petit entrefer d'air, pour un matériau donné à une fréquence définie, la valeur de :

$$\frac{R_{no} + R_r'}{\mu' \omega L} = \frac{t_g \delta'_{no} + t_g \delta'_r}{\mu'} = \frac{t_g \delta}{\mu_t} = \frac{t_g \delta}{\mu_o}$$

est indépendante de  $\mu'$ .

Pour les différentes qualités de Ferroxcube cette valeur  $\frac{t_g \delta}{\mu_o}$  est donnée figure 2 pour un anneau sans entrefer, en fonction de sa fréquence. Dans un circuit à section droite variable (par exemple un pot fermé) la relation

$$\frac{t_g \delta}{\mu_o} = \frac{t_g \delta'}{\mu'}$$

ne doit pas être tenue comme la somme des pertes par courants de Foucault et résiduelles, mais elle est encore vraie pour les pertes résiduelles seules.

Ainsi 
$$\frac{t_g \delta_R}{\mu_o} = \frac{t_g \delta'_R}{\mu'} \quad (10)$$

pour calculer  $\frac{t_g \delta'_R}{\mu'}$ ,  $\frac{t_g \delta_{no}}{\mu_o} = \frac{R_{no}}{\mu_o L \omega}$  est calculé pour un circuit homogène sans entrefer (avec la même fréquence) puis soustrait de  $\frac{t_g \delta_{tot}}{\mu_t}$ . On obtient ainsi  $\frac{t_g \delta_R}{\mu_t}$  qui est égal à  $\frac{t_g \delta'_R}{\mu'}$  (éq. 10). Une réalisation de circuit magnétique

sans entrefer et avec une section droite constante est constituée par l'anneau d'un pot fermé. Pour ce calcul, on peut le considérer comme un bâtonnet rectangulaire de dimensions  $a$  ( $a + b$ ) dans lequel  $a = r_3 - r_4$  et  $b = D - a$

(voir fig. 1). Le calcul des pertes par courants de Foucault donne :

$$\frac{t_g \delta_{no R}}{\mu_t} = \frac{4 \pi \cdot 10^{-7}}{\rho} \frac{4 \pi f}{a(a+b)} \left( \frac{a^4}{64} + \frac{a^3 b}{32} + \frac{a^2 b^2}{128} - \frac{a b^3}{128} + \frac{b^4}{256} \log_e \frac{2a+b}{b} \right)$$

Les pertes résiduelles dans l'anneau sont :

$$\frac{t_g \delta_R}{\mu_t} = \frac{t_g \delta}{\mu_t} - \frac{t_g \delta_{no R}}{\mu_t}$$

Si la fréquence n'est pas trop grande,  $\frac{t_g \delta_R}{\mu_t}$  est indépendant de la forme et du volume du circuit.

D'après ce que nous venons de dire  $\frac{t_g \delta_R}{\mu_t}$  conserve la même valeur pour le pot complet et peut s'écrire :

$$\frac{t_g \delta_R}{\mu_t} = \frac{t_g \delta'_R}{\mu'} = \frac{R_{R'}}{\mu' \omega L}$$

Par conséquent :

$$\frac{R_{R'}}{L} = \mu' \omega \frac{t_g \delta'_R}{\mu'} = \omega \mu' \left[ \frac{t_g \delta}{\mu_t} - \frac{4 \pi \cdot 10^{-7}}{\rho} \frac{4 \pi f}{a(a+b)} \left( \frac{a^4}{64} + \frac{a^3 b}{32} + \frac{a^2 b^2}{128} - \frac{a b^3}{128} + \frac{b^4}{256} \log_e \frac{2a+b}{b} \right) \right]$$

Les formules nécessaires au calcul de toutes ces pertes sont données dans le tableau C avec les coefficients correspondant aux différents types de pots. Ces équations ont été établies en donnant aux paramètres les valeurs mentionnées tableaux A et B. Cependant, la formule des pertes par hystérésis n'est valable que pour les Ferroxcube 3 B2 et 3 B3. Pour le Ferroxcube 3 B4, la valeur calculée doit être corrigée dans le rapport  $\frac{5,5}{12}$ . Dans tous les cas, il est nécessaire que l'induction d'utilisation reste inférieure à 50 - 60 gauss.

Le tableau D donne les caractéristiques électriques des pots standard Ferroxcube. Il est possible de déterminer celles de pots fermés à entrefer différent en utilisant le tableau F.

## V. — LES AUTRES FACTEURS QUI LIMITENT $\mu$ .

### 1) Désaccommodation.

C'est la diminution de la perméabilité en fonction du temps. Mesurée sur un anneau en Ferroxcube elle est toujours inférieure à 3 %. Dans les pots fermés, la désaccommodation est proportionnelle à  $\mu'$ . Comme cette dernière valeur ne dépasse pas 150, la stabilité dans le temps sera toujours supérieure à 0,05 % (et ceci pour une perméabilité initiale de 900).

### 2) Distorsion non linéaire.

Comme nous l'avons déjà indiqué, la résistance des pertes par hystérésis est la seule qui dépende du courant, auquel elle est directement proportionnelle. Ceci signifie que les pertes totales ne sont pas constantes durant un cycle et que la forme sinusoïdale du courant est modifiée par apparition d'harmoniques impairs.

La plus grande distorsion est due au troisième harmonique : elle atteint  $0,6 \frac{R_H}{L \omega}$  pour cent.

### 3) Perméabilité d'amplitude.

Comme la courbe d'hystérésis n'est pas linéaire, la valeur de  $\mu_t = \frac{B}{H}$  dépend de la valeur de  $H$ , c'est-à-dire du courant  $I$ . Par conséquent  $L$  ne change pas durant un cycle

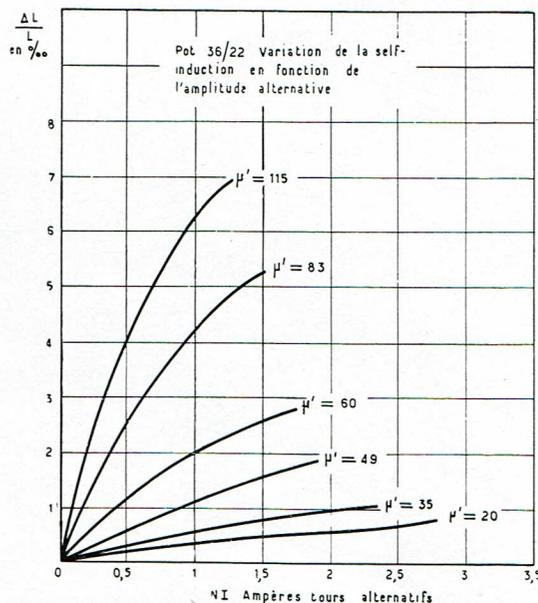


Fig. 3. — Variation de la self-induction en fonction de l'amplitude alternative (pot 36,22).

mais dépend aussi de la valeur efficace du courant. A titre d'exemple est donnée, figure 3 pour différentes valeurs de la perméabilité effective  $\mu'$ , l'augmentation de la self-induction en fonction du champ alternatif appliqué (exprimé en ampères-tours). Ces courbes ont été mesurées sur un pot du type 36/22 ( $L = 1 \text{ mH}$  -  $F = 1800 \text{ Hz}$ ).

La relation entre les variations de  $L$  et la résistance de pertes par hystérésis est

$$\frac{dL}{dI} = \frac{3}{8f} \frac{dR_{11}}{dI}$$

Les effets mentionnés précédemment en (2) et (3) sont en étroite relation avec la forme de la courbe d'hystérésis. Ils sont habituellement négligés dans la technique des télécommunications, car les inductions sont normalement très basses. Pour des inductions plus élevées, ou pour des spéci-

avec l'augmentation du champ continu. Dans certaines applications, circuits de tubes à vide et transistors par exemple, le bobinage est traversé par un courant continu associé au signal alter-natif. La polarisation magnétique résultante apporte une diminution de la self-induction. La présence d'un entrefer réduit cependant à une faible valeur cet effet sur la perméabilité effective du pot fermé. A titre d'exemple (fig. 4) est donnée, pour différentes valeurs de la perméabilité effective, la variation de la self-induction en fonction du champ continu appliqué (exprimé en ampères-tours). Ces courbes ont été mesurées sur un pot du type 36/32 ( $L = 1 \text{ mH}$  et  $F = 1800 \text{ Hz}$ ).

#### 5) Montage du pot.

Le soin apporté au montage du pot n'est pas sans influencer la stabilité de la self-induction; il est recommandé

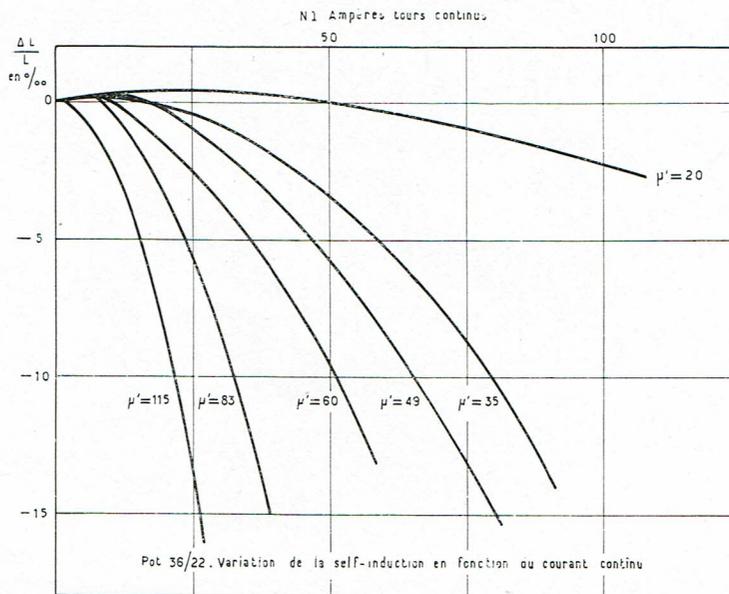


Fig. 4. — Variation de la self-induction en fonction du courant continu (pot 36 22).

fications spéciales (bobines de charge), ces effets peuvent cependant être pris en considération. Ils peuvent être diminués en prenant une valeur de  $\mu'$  plus basse ( $R_{11}$  est proportionnel à  $\mu'$ ) et en utilisant du Ferroxcube avec une basse valeur de  $q_2$ , par exemple Ferroxcube 3 B4.

#### 4) Perméabilité différentielle.

Par perméabilité différentielle (ou réversible), on entend la perméabilité définie de la même manière que la perméabilité initiale, mais avec un champ continu  $H_0$  superposé. Comme pour les autres matériaux magnétiques, la valeur de la perméabilité différentielle du Ferroxcube diminue

d'éviter des déplacements trop importants de la carcasse à l'intérieur du pot. De même, il y a lieu de veiller à l'assemblage des différentes parties du pot : les surfaces en contact seront parfaitement débarrassées de toute poussière de manière à diminuer l'influence de la pression exercée par les pièces d'assemblage.

L'imprégnation apporte une augmentation de la self-induction. En effectuant cette opération selon des spécifications bien déterminées l'augmentation de  $L$  reste constante. Dans le cas de l'ozokérite jaune, elle est de 1 % environ, mais augmente pour les valeurs élevées de  $\mu'$ .

## VI. — CONSTRUCTION DE POTS FERROXCUBE

Les pots fermés Ferroxcube sont construits selon l'un des deux principes suivants :

- Le pot se compose de deux plateaux, d'un anneau et d'un noyau (fig. 5 A). C'est le pot type ajustable.
- Le pot est formé de deux coupelles ou demi-pots. La perméabilité effective du pot est amenée à la valeur

voulue par création d'un entrefer d'air localisé au centre du pot (fig. 5 B). C'est le pot réglable.

Dans le premier cas, la longueur de l'entrefer du pot monté est fixée (fig. 5 A) par la hauteur du noyau. Ce noyau est collé à un plateau. Pour les entrefers supérieurs à 0,4 mm, une rondelle isolante, d'épaisseur égale à la moitié de l'en-

trefer, est interposée entre le noyau et le plateau; on obtient ainsi un entrefer symétrique qui limite l'influence du flux de fuite et celle de petits glissements éventuels de la carcasse. L'ajustement de la perméabilité effective est réalisé par variation mécanique de l'entrefer (usure du noyau ou bande de réglage).

Dans le cas du pot de la fig. 5 B, l'entrefer est central;

il est réalisé par meulage du noyau central. L'ajustement de la perméabilité effective est obtenu par un shunt magnétique : un bâtonnet en ferroxcube peut être déplacé le long du trou central. Les avantages de ce type de pot sont la réduction du nombre d'entrefers parasites résultant des surfaces en contact et la facilité accrue pour le montage.

## VII. — RÉALISATION PRATIQUE DES BOBINAGES UTILISANT DES POTS FERMÉS FERROXCUBE

En général, les spécifications du pot bobiné sont les suivantes :

- valeur de la self-induction  $L$  avec sa tolérance (généralement exprimée en %);
- maximum du coefficient de température;
- minimum du coefficient de qualité  $Q$ .

La fréquence d'utilisation est connue. Nous supposons tout d'abord que les bobines sont utilisées à basse induction et qu'aucune exigence particulière n'est formulée vis-à-vis de la distorsion et de la perméabilité d'amplitude.

Le calcul du pot consiste donc à répondre aux questions suivantes :

- Quelle qualité de ferroxcube utiliser?
- Quel type de pot utiliser?
- Quelle est la hauteur de l'entrefer (c'est-à-dire la valeur de la perméabilité apparente)?

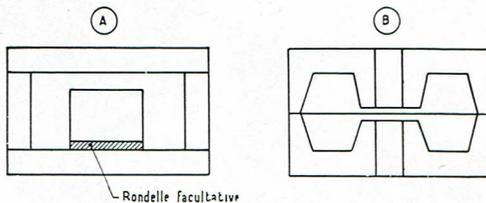


Fig. 5. = Types de pots Ferroxcube

- Quelle est la valeur du coefficient de température?
- Quelle est le nombre de spires et le diamètre du fil?
- Quelle est la valeur du coefficient de qualité  $Q$ ?

### 1) Choix de la qualité Ferroxcube.

- Au-dessous de 20 kHz : 3 B4 pour des pertes par hystérésis très faibles (mais attention au coefficient de température).
- Au-dessous de 150 kHz : 3 B2.
- Au-dessous de 1000 kHz : 3 B3.
- De 1 à 2 MHz : 4 B.
- Au-dessus de 2 MHz on peut utiliser la qualité 4 C mais souvent les pots sont remplacés par des noyaux droits.

Il est à remarquer que le choix entre 3 B2 et 3 B3 est parfois automatiquement résolu par celui de la perméabilité à cause de l'existence des pots standard.

### 2) Choix du type de pot.

Les indications données ci-dessous ne sont que des règles générales qui devront être très largement interprétées selon les spécifications du cas étudié.

Plus la fréquence est basse ( $L$  élevée) et le coefficient de température bas, plus le pot sera grand : une self-induction de valeur importante réclame un nombre de tours élevé, donc un grand volume, car le diamètre minimum du fil est imposé par la résistance électrique correspondante et par les limitations mécaniques de bobinage. Un coefficient de température faible entraîne une basse valeur de  $\alpha$ , c'est-à-dire un nombre de tours par millihenry élevé, ce qui nécessite un volume important.

En général, un coefficient de qualité  $Q$  élevé réclame une valeur de  $\mu'$  faible et un grand nombre de tours. Mais pour chaque bobine il existe un maximum de la valeur du  $Q$ , lequel est atteint en réalisant l'égalité entre les pertes dans le cuivre et les pertes dans le noyau (pertes fer) :

$$\frac{R_o}{L} + \frac{R_{cu}}{L} = \frac{R_{no}}{L} + \frac{R_H}{L} + \frac{R_R}{L} \quad (*)$$

Comme les pertes cuivre sont inversement proportionnelles à  $\mu'$  et les pertes fer directement proportionnelles à  $\mu'$  cette égalité peut être obtenue en faisant varier  $\mu'$  au moyen d'un entrefer.

Si les pertes fer sont plus importantes que les pertes cuivre, il faut diminuer la valeur de  $\mu'$ , c'est-à-dire augmenter l'entrefer. Ceci entraînera un nombre de tours plus élevé, c'est-à-dire un fil plus fin ou un pot plus grand.

Au contraire, si les pertes cuivre prédominent, on choisira un entrefer plus petit, ce qui amènera une diminution du nombre de spires; il sera même peut-être possible d'utiliser un pot plus petit. Quand la valeur de  $Q$  désirée ne peut pas être atteinte avec l'entrefer minimum, il faut choisir le pot de plus grandes dimensions possibles.

Il n'est pas toujours possible de réaliser cette égalité entre les pertes, en particulier à cause des limitations imposées par l'encombrement du pot et par le coefficient de température : en basse fréquence, par exemple, les self-inductions importantes présentent systématiquement une nette prédominance des pertes cuivre sur les pertes fer.

Si, avec le coefficient de température imposé, on obtient un  $Q$  trop grand, on peut choisir un pot plus petit.

En règle générale :

- fréquence et coefficient de température bas, surtension élevée : pot de grandes dimensions;
- fréquence élevée ou surtension basse : pot de petites dimensions.

(\*) On ne tient pas compte de  $\frac{R_{cup}}{L}$  indépendant de  $\mu'$ .

Les notices commerciales donnant des exemples de réalisations seront consultées avec profit pour donner une base de départ.

### 3) Choix du fil.

Le type de fil à utiliser est déterminé en fonction des pertes par courants de Foucault dans le cuivre. Ces pertes sont proportionnelles à  $d^2$  (diamètre du fil ou du brin) et à  $f^2$  (fréquence d'utilisation). Par conséquent :

- pot 14/8 : fil divisé au-dessus de 50 kHz;
- pots 25/12 - 16 - 17,5 - 36/22 :  
au-dessous de 5 kHz : fil plein émaillé : 5/10,  
de 5 à 20 kHz : fil plein émaillé : 28/100,  
de 20 à 100 kHz : fil divisé : brin 7/100,  
au-dessus de 100 kHz : fil divisé : brin 4/100;
- pot 45/39 :  
au-dessous de 3 kHz : fil plein émaillé 4/10,  
au-dessus de 3 kHz : fil divisé brin 7/100.

### 4) Calcul.

$L$  et  $\frac{dL}{LdT}$  sont connus.

On déduit  $\mu'$  de l'équation du coefficient de température.

$$\frac{dL}{LdT} = \frac{d\mu'}{\mu' dT} = \frac{d\mu_0}{\mu_0^2 dT} \mu'$$

Le pot étant choisi, on en déduit sur le tableau D la valeur correspondante de  $\alpha$  (nombre de tours pour 1 mH) et le nombre de spires du bobinage :

$$n = \alpha \sqrt{L}$$

$L$  étant exprimé en mH.

On choisit dans le tableau d'encombrement de la carcasse le type de fil permettant son remplissage complet. On obtient également le coefficient de remplissage  $f_{cu}$ . Aux fréquences élevées, pour réduire les pertes par capacité et par courants de Foucault dans l'enroulement, il est intéressant de fractionner le bobinage.

En évaluant le coefficient  $Q$ , il est maintenant possible de calculer les pertes (on corrige par la suite l'évaluation de  $Q$ ). On utilise les équations de pertes correspondant au pot choisi. La valeur de l'angle de perte  $\delta/\mu_0$  correspondant à la qualité de Ferroxcube utilisée est déterminée, en fonction de la fréquence, sur la figure 2. Puis on compare les pertes fer et cuivre : si l'égalité n'est pas obtenue on modifie les caractéristiques du pot selon les indications données lors du choix du type de pot.

$L$  et  $Q$  sont connus.

$\mu'$  ne peut être obtenu directement. En choisissant un type de pot et en évaluant le coefficient de remplissage  $f_{cu}$ , on peut calculer  $\mu'$  à partir des équations de pertes et de l'expression  $\frac{R_f}{L} = \frac{\omega}{Q}$ . On obtient une équation du second degré. Si le discriminant est négatif ou si  $\mu'$  est trop élevé par rapport au standard existant, il faut recommencer avec un pot plus important.

Quand  $\mu'$  est connu on poursuit les calculs comme dans le cas précédent.

$\frac{dL}{LdT}$  et  $Q$  sont connus

Seule est considérée la spécification réclamant le  $\mu'$  le plus faible.

## VIII. — RÉALISATION DU POT BOBINÉ

### 1) Bobinage.

D'une manière générale, le bobinage est effectué en spires rangées, par couches successives, sans interposition de bande isolante. Le fil d'une couche tombant dans les interstices de la couche précédente, on obtient ainsi le remplissage maximum de la carcasse. Les tableaux E 1 à E 6 indiquent, en fonction du fil utilisé, le nombre de spires maximum que l'on peut respectivement bobiner sur chaque type de carcasse. Dans les mêmes tableaux est indiqué le coefficient de remplissage  $f_{cu}$ . Lorsque la carcasse n'est pas complètement remplie, il suffit de corriger  $f_{cu}$  proportionnellement à l'espace occupé.

La capacité répartie d'un tel bobinage, mesurée avec une extrémité de l'enroulement mise à la masse, est sensiblement constante pour un type de pot donné, la carcasse étant complètement remplie. Cette valeur de la capacité est donnée tableau B. Etant donné la valeur élevée de l'angle de pertes de cette capacité répartie, les pertes capacitatives peuvent devenir prohibitives à haute fréquence, en particulier lorsque la self-induction fonctionne en résonance. Il est alors intéressant de diminuer cette capacité répartie par un bobinage fractionné ou en nid d'abeille; le coefficient de remplissage  $f_{cu}$  diminue, mais on parvient ainsi à réduire à la fois l'angle de pertes et la valeur de la capacité répartie : de 15-20 pF il est possible de descendre à 5 pF. Il est à noter

qu'il n'existe pas de relation linéaire entre la capacité répartie  $C$  et le coefficient de remplissage  $f_{cu}$ .

Lorsque l'entrefer du pot est important, le champ de fuite à travers le bobinage augmente, créant des pertes par courants de Foucault dont l'importance augmente avec la fréquence. C'est pour cette raison que, au-dessus de 200 kHz, il est intéressant de fractionner le bobinage de manière à diminuer le volume de cuivre soumis au champ de fuite.

### 2) Montage.

L'assemblage de montage est nécessaire pour maintenir et fixer le pot Ferroxcube. Pour retrouver le réglage effectué en usine, il convient, après nettoyage des surfaces de l'anneau et des plateaux entrant en contact (élimination des poussières), de faire coïncider les repères de couleur portés sur les différents éléments du pot. Chaque pot constituant un ensemble bien défini, il est déconseillé d'intervenir les éléments de plusieurs pots.

Les pots du type ajustables sont, selon le principe de la figure 6, serrés entre deux flasques au moyen de vis et d'entretoises. Le serrage des vis est effectué en diagonale de manière à obtenir une pression de l'ordre de 45 kg. Quand le bobinage est inférieur à 50 tours il faut veiller à ce que son entrée et sa sortie se fassent par la même encoche. On évite ainsi

de refermer le champ de fuite à travers le circuit magnétique sans entrefer constitué par l'anneau et les deux plateaux, ce qui apporterait une augmentation des pertes et du coefficient de température. Les fils de sortie sont soudés sur les cosses de la plaquette-support de cosses, insérée entre les flasques et le pot. Une plaquette de fixation, munie de deux crevés filetés, placée de la même manière, permet de fixer le pot sur un châssis.

Si l'on doit utiliser une bande de réglage, il faut veiller, lors du montage de la carcasse dans le pot, à l'alignement

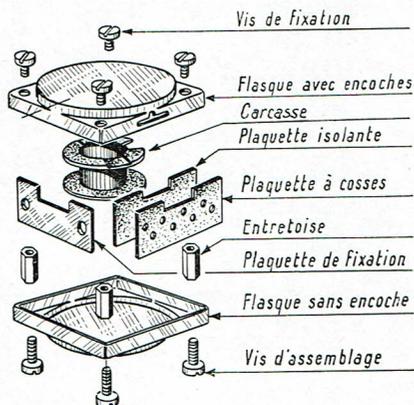


Fig. 6. — Montage d'un pot du type ajustable (pot 25 12-16-17,5)

des encoches placées d'une part sur la joue de la carcasse et d'autre part sur l'anneau du pot et, lors de la mise en place du pot dans son assemblage, à l'alignement des encoches du pot et du flasque. Les encoches pour le passage de la bande de réglage se reconnaissent au fait qu'elles sont toujours symétriques et diamétralement opposées. Le passage de la bande de réglage est constitué par l'entrefer, les encoches de la carcasse, de l'anneau du pot et des flasques de l'assemblage.

La bobine étant réglée avant imprégnation à la tolérance minimum, on introduit une barette métallique de  $65 \times 6,1 \times 0,4$  mm dans l'entrefer. On procède ensuite à l'imprégnation, puis on enlève la barette quand la bobine est encore chaude (sinon réchauffer à nouveau).

La bande est introduite par l'extrémité portant le repère de couleur, la couche de Ferroxcube (face mate) tournée vers le noyau.

Après réglage, on serre la bande dans les encoches du flasque par écrasement de celles-ci à la pince. Les extrémités de la bande sont ensuite repliées, puis coupées et collées sur le flasque.

Le montage des pots réglables est différent suivant le type employé : pour chaque modèle il convient de consulter la notice technique correspondante.

Dans le but de réduire l'encombrement ou le poids, il est possible d'utiliser les pots Ferroxcube sans l'assemblage de montage. Mais il est alors nécessaire d'assembler par collage les différents éléments constitués par le pot. La colle « Araldite » à chaud (1) (type 15 avec durcisseur ou type 1 nature) assure une bonne fixation aux points de vue mécanique et thermique, avec un entrefer minimum (environ 0,03 mm).

### 3) Étalonnage.

La valeur de la self-induction (réglage de la perméabilité effective) peut être ajustée par usure du noyau (diminution de L) ou de l'anneau (augmentation de L) sur une surface abrasive (émeri) parfaitement plane.

C'est ainsi que la totalité des pots du type standard, est étalonnée en fonction de la perméabilité effective  $\mu'$  conformément aux spécifications du tableau D. Cette opération est effectuée par rectification du noyau central. Il s'ensuit que la hauteur correspondante du noyau telle qu'elle est indiquée dans les notices commerciales n'est donnée qu'à titre approximatif. Il est possible de réaliser des tolérances plus serrées mais après définition d'un pot étalon, d'une bobine et d'une fréquence de mesure.

Le chiffre porté sur le pot indique la valeur de la perméabilité apparente, tandis que la couleur donne la variété de Ferroxcube (rouge = FxC 3 B2 - blanc = FxC 3 B3 - bleu = FxC 3 B4).

L'étalonnage est habituellement réalisé au pont de comparaison : un étalon défini à 0,01 % permet un étalonnage à  $\pm 0,5$  %. Mais l'étalonnage serré doit être en pratique limité à des tolérances plus importantes à cause de l'état mécanique des surfaces du pot entrant en contact (influence des poussières, de la pression d'assemblage), de la variation ultérieure apportée par l'imprégnation et du coefficient de température.

Une fois le pot monté et imprégné il est possible de faire le réglage de la self-induction. Selon le type de pot, on utilise, soit la bande de réglage (pot fermé du type ajustable : 25/12 - 25/16 - 25/17,5 - 36/22), soit le bâtonnet plongeur employé comme shunt magnétique (pot fermé du type réglable 14/8 - 18/12 et 25/16).

La bande de réglage est un ruban en plastique de faible épaisseur, sur une des faces duquel a été déposée une couche de Ferroxcube en épaisseur croissante. Cette bande est engagée dans l'entrefer du pot, parallèlement à ses faces. La variation progressive de l'épaisseur de la couche de Ferroxcube permet d'obtenir une précision de réglage de 0,03 %. La plage de réglage est environ de 10 %.

Il n'est possible d'employer la bande de réglage que si l'entrefer réel est supérieur à 0,35 mm. Sa valeur est égale à la différence de hauteur entre le noyau et l'anneau. Il faut en déduire celle de la rondelle d'épaisseur collée entre noyau et plateau pour rendre l'entrefer symétrique (et diminuer ainsi le champ de fuite).

Le bâtonnet de réglage est un guide fileté portant un bâtonnet de Ferroxcube. Cette pièce se déplace dans le trou central du pot, perpendiculairement aux faces de l'entrefer et agit comme shunt magnétique. La plage de réglage est comprise, selon la valeur de l'entrefer, entre 15 et 28 %.

### 4) Imprégnation.

L'imprégnation est nécessaire pour garantir une bonne stabilité dans le temps. On imprègne d'abord la carcasse bobinée, puis le pot complètement monté. Une bonne imprégnation est obtenue sous un vide poussé (par exemple 0,05 mm de mercure). Au préalable il est conseillé d'opérer un étuvage à 120 °C sous un vide primaire de quelques millimètres de mercure. On peut utiliser comme imprégnant l'ozokérite jaune (point de goutte 78 °C). L'imprégnation apportant une augmentation de la self-induction, il est recommandé de toujours effectuer cette opération selon des spécifications bien définies de manière à obtenir en série une variation sensiblement constante.

(1) Fournie en France par la Société Saint-Gobain.

## IX. — EXEMPLE DE CALCUL

On désire réaliser une self-induction de 2,5 mH dont le coefficient de température soit inférieur à  $90 \cdot 10^{-6}$  par degré centigrade. Le coefficient de qualité Q devra être supérieur à 300 pour une fréquence d'utilisation de 150 kHz.

Etant donné la valeur peu élevée de la self-induction, il convient de choisir un pot de dimensions moyennes : le pot 25/12. Sur le tableau C (caractéristiques des pots standard), la spécification du coefficient de température fixe le type 25/12 - 5,40 - 3 B2, c'est-à-dire les valeurs  $\mu' = 38$  et  $\alpha = 81$ .

Il est maintenant possible de déterminer les caractéristiques du bobinage. Le nombre de spires est

$$N = \alpha \sqrt{L} = 81 \sqrt{2,5} = 128$$

Un tel bobinage nous donnera une self-induction de 2,5 mH avec la tolérance standard sur  $\mu'$  : c'est-à-dire

Pour détermination de  $\frac{R_{cap}}{L}$ , la valeur de Q est évaluée à 300. Ceci sera corrigé par la suite si l'erreur introduite importante.

$$\begin{aligned} \frac{R_{cap}}{L} &= \left( \frac{2}{300} + 0,01 \right) (150 \cdot 10^3)^2 \\ &\times 2,5 \cdot 10^{-3} \times 47,1 \times 10^{-10} = 636 \quad \frac{\Omega}{H} \end{aligned}$$

Pour le calcul de  $\frac{R_{no}}{L}$ , la résistivité minimum  $\rho$  est prise égale à 0,6  $\Omega$  m.

$$L = \frac{1,25}{0,6} \times 10^{-10} \times 38 \times (150 \cdot 10^3)^2 = 178 \frac{\Omega}{H}$$

Pour  $\frac{RH}{L}$ , le courant d'utilisation I est pris égal à 1 mA

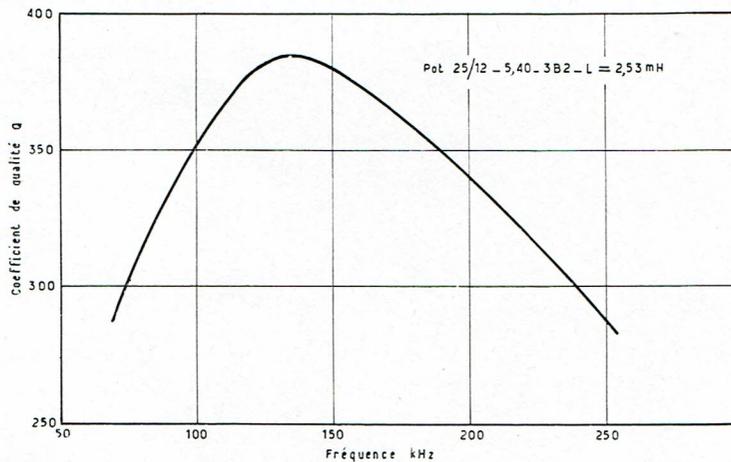


Fig. 7. — Exemple de réalisation : pot 25/12-5,40-3 B2.

$\pm 4\%$ . A 150 kHz, le bobinage sera effectué en fil divisé avec brins de 0,04 mm de diamètre.

C'est le 32 brins 0,04 qui assure le meilleur remplissage de la carcasse (le tableau d'encombrement de la carcasse 25/12 donne 132 comme nombre maximum de spires). Le coefficient de remplissage correspondant est obtenu par :

$$f_{cu} = \frac{0,294 \times 128}{132} = 0,285$$

Le calcul des différentes pertes est effectué à l'aide des équations relatives au pot 25/12.

$$\frac{R_o}{L} = \frac{1}{38} \times \frac{11.550}{0,285} = 1066 \quad \frac{\Omega}{H}$$

$$\frac{R_{cu}}{L} = \frac{1}{38} \times 411 \times 0,285 \times (0,04 \cdot 10^{-3})^2 \times (150 \cdot 10^3)^2 = 111 \frac{\Omega}{H}$$

$$\frac{R_H}{L} = 765 \times 38 \times \frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{128} \times 1 \cdot 10^{-3} \times 150 \cdot 10^3 = 85 \frac{\Omega}{H}$$

Dans l'évaluation des pertes résiduelles, on donne à  $\frac{t_g \delta}{\mu_o}$  la valeur moyenne de  $15 \cdot 10^{-6}$  à 150 kHz (fig. 5). Comme précédemment,  $\rho$  est égal à 0,6  $\Omega$  m.

$$\begin{aligned} \frac{R_r'}{L} &= 15 \cdot 10^{-6} - \left( \frac{0,34}{0,6} 10^{-11} \times 150 \cdot 10^3 \right) \\ &6,28 \times 38 \times 150 \cdot 10^3 = 507 \quad \frac{\Omega}{H} \end{aligned}$$

$$\text{d'où} \quad \frac{R_T}{L} = 2.583 \quad \frac{\Omega}{H}$$

$$\text{et} \quad Q = \frac{\omega}{\frac{R_T}{L}} = \frac{6,28 \times 150 \cdot 10^3}{2.583} = 365$$

Par correction de l'évaluation de  $Q$  dans le calcul de  $\frac{R_{cap}}{L}$ , on obtient :

$$\frac{R_{cap}}{L} = 616 \frac{\Omega}{H} \text{ et } Q = 368$$

Les pertes cuivre  $\left(1177 \frac{\Omega}{H}\right)$  sont plus importantes que les pertes fer  $\left(770 \frac{\Omega}{H}\right)$ . Il semblerait donc intéressant d'augmenter la valeur de  $\mu'$  pour rétablir l'égalité. Cette modification n'est pas possible à cause du coefficient de température imposé. Pour obtenir un coefficient de qualité

plus élevé il faudrait utiliser un pot de dimensions plus importantes, de manière à diminuer la résistance du fil et, par un bobinage approprié, la capacité parasite.

Les mesures effectuées sur un pot 25/12 - 5,40 - 3 B2 bobiné selon les spécifications calculées ci-dessus, ont donné les résultats suivants :

self-induction : 2,53 mH;

coefficient de température (entre 30 et 50 °C)  $\frac{dL}{L} = 19.10^{-6}$  par degré centigrade.

Le coefficient de qualité  $Q$  a été mesuré pour différentes fréquences. La courbe correspondante a été tracée fig. 7 ( $Q = 380$  à 150 kHz).

## X. — CONCLUSION

A cause des nombreuses approximations nécessaires (en particulier  $\frac{t_g \delta}{\mu_0}$ ,  $C$  et  $\rho$ ) cette méthode de calcul ne permet pas d'obtenir une parfaite exactitude des résultats. En général, la valeur du coefficient de qualité  $Q$  est obtenue avec une précision de 10 à 15 %. La tolérance sur la self-induction est celle de la perméabilité effective  $\mu'$ . Le coef-

ficient de température (entre 25 et 50 °C) sera toujours inférieur au maximum déterminé par le calcul.

L'intérêt de cette méthode est surtout de dégrossir le choix du type de pot et du bobinage. Ce sont, en fait, les essais pratiques qui fixent les caractéristiques finales du pot bobiné.



**TABLEAU A**  
**SYMBOLES UTILISÉS**

<p><math>\mu_t</math> : perméabilité torique.  <math>\mu_0</math> : perméabilité initiale.  <math>\mu'</math> : perméabilité effective.  <math>\Sigma \frac{l}{S}</math> : somme du rapport longueur/section des différentes parties du circuit magnétique de section constante (<math>m^{-1}</math>).  <math>r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, A, B, D, E</math> : dimensions du pot en mètres (fig. 1).  <math>\Delta</math> : hauteur de l'entrefer, en mètres.  <math>\rho_{cu}</math> : résistivité du fil du bobinage, en ohm-mètres (pour le cuivre <math>1,76 \cdot 10^{-8}</math>).  <math>\rho</math> : résistivité du matériau magnétique, en ohm-mètres (<math>3 B2 = 0,6 - 3 B3 = 0,8 - 3 B4 = 0,2 - 4B = 1000</math>).  <math>f_{cu}</math> : coefficient de remplissage du cuivre.  <math>d</math> : diamètre du fil du bobinage, en mètres (pour le fil divisé, diamètre d'un brin).  <math>n</math> : nombre de spires du bobinage.  <math>k</math> : coefficient de configuration pour les pertes par courants de Foucault dans le cuivre.  <math>f</math> : fréquence, en hertz.  <math>\omega</math> : pulsation, en radians/seconde.  <math>C</math> : capacité répartie de la bobine, en farad.  <math>L</math> : self-induction, en henry.  <math>R_T</math> : résistance équivalente des pertes totales, en ohm.</p>	<p><math>R_0</math> : résistance équivalente des pertes résistives dans le bobinage, en ohm.  <math>R_{cu}</math> : résistance équivalente des pertes par courants de Foucault dans le bobinage, en ohm.  <math>R_{cap}</math> : résistance équivalente des pertes dues à la capacité répartie, en ohm.  <math>R_{no}</math> : résistance équivalente des pertes par courants de Foucault dans le noyau, en ohm.  <math>R_{h1}</math> : résistance équivalente des pertes par hystérésis dans le noyau, en ohm.  <math>R_r'</math> : résistance équivalente des pertes résiduelles dans le noyau, en ohm.  <math>tg \delta_c</math> : angle des pertes diélectriques dans la capacité répartie (valeur comprise entre 0,005 et 0,01).  <math>tg \delta_R</math> : angle des pertes résiduelles sur un circuit fermé (fig. 2).  <math>Q_2 (24-100)</math> : facteur des pertes par hystérésis (<math>3 B2</math> et <math>3 B3 = 12 - 3 B4 = 5,5</math>).  <math>I</math> : intensité efficace du courant d'utilisation, en ampères.  <math>V'</math> : volume effectif du noyau magnétique, en mètre-cube.</p> <p style="text-align: center;">Pour les pots standard 45/39 - 36/22 - 25/17,5 - 25/16 - 25/12 - 18/12 et 14/8, les valeurs de ces coefficients sont données dans le tableau B.</p>
---	---

**TABLEAU B**  
**CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES POTS STANDARD FERROXCUBE**

Type de pot	45/39	36/22	25/17,5	25/16	25/12	18/12	14/8
$r_1$	0,0085	0,0064	0,0050	0,0044	0,0044	0,0032	0,0023
$r_2$	0,0094	0,0070	0,0058	0,0051	0,0051	0,0039	0,0028
$r_3$	0,0178	0,0135	0,0095	0,0094	0,0094	0,00735	0,0053
$r_4$	0,0185	0,0140	0,0100	0,0099	0,0099	0,0076	0,0057
$r_5$	0,0225	0,0180	0,0127	0,0127	0,0127	0,0092	0,0071
A	0,024	0,0076	0,0091	0,0081	0,0041	0,0068	0,0024
B	0,027 — $\Delta$	0,010 — $\Delta$	0,0115 — $\Delta$	0,010 — $\Delta$	0,006 — $\Delta$	0,008 — $\Delta$	0,0038 — $\Delta$
D	0,027	0,010	0,0115	0,010	0,006	0,008	0,0038
E	0,006	0,006	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002
C	36 pF	23 pF	21 pF	21 pF	19 pF	15 pF	13 pF
$\Sigma \frac{l}{S}$	267	214	380	405	319	722	674
k	$0,47 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$7,0 \times 10^{-2}$	$3,0 \times 10^{-2}$	$5,0 \times 10^{-2}$	$12 \times 10^{-2}$	$21 \times 10^{-2}$
$tg \delta_c$	0,005 — 0,01	0,005 — 0,01	0,005 — 0,01	0,005 — 0,01	0,005 — 0,01	0,005 — 0,01	0,005 — 0,01
$V'$	$24 \times 10^{-6} m^3$	$9,3 \times 10^{-6} m^3$	$4,03 \times 10^{-6} m^3$	$2,74 \times 10^{-6} m^3$	$2,35 \times 10^{-6} m^3$	$0,82 \times 10^{-6} m^3$	$0,47 \times 10^{-6} m^3$

TABLEAU C

PERTES CALCULÉES POUR LES DIFFÉRENTS POTS FERROXCUBE

Pot 14/8 (carcasse 88 470).

$$\frac{R_0}{L} = \frac{1}{\mu'} \times \frac{40000}{f_{cu}} \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_{cu}}{L} = \frac{1}{\mu'} \times 320 \times f_{cu} \times d^2 \times f^2 \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_{cap}}{L} = \left( \frac{2}{Q} + 0.01 \right) f^3 \times L \times 32.3 \times 10^{-10} \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_{no}}{L} = \frac{0.39}{\rho} \times 10^{-10} \mu' \times f^2 \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_h}{L} = 7950 \times \mu' \times \frac{L}{n} \times I \times f \quad \Omega/H$$

$$\frac{R'_R}{L} = \left( \frac{t_g \delta}{\mu_0} - \frac{0.63}{\rho} \times 10^{-11} f \right) \times 6.28 \mu' f \quad \Omega/H$$

Pot 18/12 (carcasse P4 055 70).

$$\frac{R_0}{L} = \frac{1}{\mu'} \times \frac{15250}{f_{cu}} \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_{cu}}{L} = \frac{1}{\mu'} \times 995 \times f_{cu} \times d^2 \times f^2 \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_{cap}}{L} = \left( \frac{2}{Q} + 0.01 \right) f^3 \times L \times 37.2 \times 10^{-10} \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_{no}}{L} = \frac{0.49}{\rho} \times 10^{-10} \mu' \times f^2 \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_h}{L} = 1940 \times \mu' \times \frac{L}{n} \times I \times f \quad \Omega/H$$

$$\frac{R'_R}{L} = \left( \frac{t_g \delta}{\mu_0} - \frac{0.17}{\rho} \times 10^{-11} f \right) \times 6.28 \mu' f \quad \Omega/H$$

Pot 25/12 (carcasse 88 489).

$$\frac{R_0}{L} = \frac{11550}{f_{cu}} \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_{cu}}{L} = \frac{1}{\mu'} \times 411 \times f_{cu} \times d^2 \times f^2 \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_{cap}}{L} = \left( \frac{2}{Q} + 0.01 \right) f^3 \times L \times 47.1 \times 10^{-10} \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_{no}}{L} = \frac{1.25}{\rho} \times 10^{-10} \mu' \times f^2 \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_h}{L} = 765 \times \mu' \times \frac{L}{n} \times I \times f \quad \Omega/H$$

$$\frac{R'_R}{L} = \left( \frac{t_g \delta}{\mu_0} - \frac{0.34}{\rho} \times 10^{-11} f \right) \times 6.28 \mu' \quad \Omega/H$$

Pot 26/16 (carcasse 88 488 ou FC 560 94)

$$\frac{R_0}{L} = \frac{1}{\mu'} \times \frac{7420}{f_{cu}} \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_{cu}}{L} = \frac{1}{\mu'} \times 476 \times f_{cu} \times d^2 \times f^2 \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_{cap}}{L} = \left( \frac{2}{Q} + 0.01 \right) f^3 \times L \times 52.1 \times 10^{-10} \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_{no}}{L} = \frac{1.24}{\rho} 10^{-10} \mu' \times f^2 \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_h}{L} = 799 \times \mu' \times \frac{L}{n} \times I \times f \quad \Omega/H$$

$$\frac{R'_R}{L} = \left( \frac{t_g \delta}{\mu_0} - \frac{0.40}{\rho} \times 10^{-11} f \right) \times 6.28 \mu' \times f \quad \Omega/H$$

Pot 25/17,5 (carcasse 88 482 ou FC 561 24).

$$\frac{R_0}{L} = \frac{1}{\mu'} \times \frac{7.600}{f_{cu}} \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_{cu}}{L} = \frac{1}{\mu'} \times 1132 \times f_{cu} \times d^2 \times f^2 \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_{cap}}{L} = \left( \frac{2}{Q} + 0.01 \right) f^3 \times L \times 52.1 \times 10^{-10} \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_{no}}{L} = 2.26 \times 10^{-10} \mu' \times f^2 \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_h}{L} = 638 \times \mu' \times \frac{L}{n} \times I \times f \quad \Omega/H$$

$$\frac{R'_R}{L} = \left( \frac{t_g \delta}{\mu_0} - 0.63 \times 10^{-11} f \right) 6.28 \mu' \times f \quad \Omega/H$$

Pot 36/22 (carcasse 88 481 ou FC 560 96).

$$\frac{R_0}{L} = \frac{1}{\mu'} \times \frac{3910}{f_{cu}} \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_{cu}}{L} = \frac{1}{\mu'} \times 508 \times f_{cu} \times d^2 \times f^2 \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_{cap}}{L} = \left( \frac{2}{Q} + 0.01 \right) f^3 \times L \times 59.5 \times 10^{-10} \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_{no}}{L} = 5.76 \times 10^{-10} \mu' \times f^2 \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_h}{L} = 315 \times \mu' \times \frac{L}{n} \times I \times f \quad \Omega/H$$

$$\frac{R'_R}{L} = \left( \frac{t_g \delta}{\mu_0} - 1.19 \times 10^{-11} f \right) \times 6.28 \mu' \times f \quad \Omega/H$$

Pot 45/39 (carcasse 884 85 ou FC 560 97).

$$\frac{R_0}{L} = \frac{1}{\mu'} \cdot \frac{1582}{f_{cu}} \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_{cu}}{L} = \frac{1}{\mu'} \cdot f_{cu} \cdot d^2 \cdot f^2 \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_{cap}}{L} = \left( \frac{2}{Q} + 0.01 \right) f^3 \times L \times 89 \times 10^{-10} \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_{no}}{L} = \frac{4.2}{\rho} \times 10^{-10} \times f^2 \times \mu' \quad \Omega/H$$

$$\frac{R_h}{L} = 281 \times \mu' \times \frac{L}{n} \times I \times f \quad \Omega/H$$

$$\frac{R'_R}{L} = \left( \frac{t_g \delta}{\mu_0} - \frac{0.91}{\rho} \times f \times 10^{-11} \right) \times 6.28 f \times \mu' \quad \Omega/H$$

**TABEAU D**  
**CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES DES POTS STANDARD FERROXCUBE**

Appellation commerciale	Perméabilité effective $\mu'$	Nombre de spires par mH	Maximum du coefficient de température de L en % par °C
Pot 14/8 3B entrefer 0,1 .....	74	85	0,026
— 0,2 .....	48	106	0,017
— 0,3 .....	36	122	0,013
— 0,4 .....	28	135	0,010
Pot 14/8 4B entrefer 0,1 .....	61	95	0,025
— 0,2 .....	40	116	0,016
— 0,3 .....	33	129	0,013
— 0,4 .....	27	142	0,011
Pot 18/12 3 B2 entrefer 0,3 .....	65	96	0,013
— 3 B3 entrefer 0,5 .....	46	113	0,009
— 3 B3 entrefer 1 .....	29	142	0,006
Pot 25/12 - 5,85 - 3 B2 .....	125 ± 15 %	51	0,025
— 5,65 - 3 B2 .....	60 ± 7 %	65	0,012
— 5,40 - 3 B2 .....	38 ± 4 %	81	0,008
— 4,75 - 3 B3 .....	21 ± 4 %	107	0,004
Pot 25/16 - 9,85 - 3 B2 .....	140 ± 20 %	51	0,028
— 9,75 - 3 B2 .....	100 ± 10 %	57	0,020
— 9,55 - 3 B2 .....	62 ± 7 %	72	0,013
— 9,15 - 3 B2 .....	36 ± 4 %	93	0,007
— 8,20 - 3 B3 .....	20 ± 4 %	122	0,004
Pot 25/17,5 - 11,3 - 3 B2 .....	130 ± 10 %	50	0,029
— 11 - 3 B2 .....	68 ± 7 %	65	0,015
— 10,5 - 3 B3 .....	40 ± 4 %	85	0,009
Pot 36/22 - 9,8 - 3 B2 .....	115 ± 10 %	36	0,026
— 9,65 - 3 B2 .....	83 ± 7 %	46	0,018
— 9,50 - 3 B2 .....	60 ± 7 %	53	0,013
— 9,35 - 3 B2 .....	49 ± 4 %	59	0,011
— 9 - 3 B2 .....	35 ± 4 %	70	0,008
— 8 - 3 B3 .....	20 ± 4 %	91	0,004
Pot 36/32 - 9,8 - 3 B2 .....	91 ± 7 %	51	0,020
— 9,65 - 3 B2 .....	65 ± 4 %	63	0,014
— 9,50 - 3 B2 .....	50 ± 4 %	71	0,011
— 9,35 - 3 B2 .....	41 ± 4 %	79	0,009
— 9 - 3 B2 .....	31 ± 4 %	94	0,008
Pot 45/39 - 13,35 - 3 B2 .....	150 ± 7 %	36	0,032
— 3 B4 .....			0,064
Pot 45/39 - 13,20 - 3 B2 .....	100 ± 4 %	45	0,021
— 3 B4 .....			0,042
Pot 45/39 - 13 - 3 B2 .....	70 ± 4 %	55	0,015
— 3 B4 .....			0,030

**TABLEAU E-1**

**Pot 14/8 - Nombre de spires maximum (N max) et coefficient de remplissage (fcu) en fonction du fil utilisé**

Emaillé			Emaillé 1 couche soie			Fil divisé					
Fil diam mm	N max	f <sub>cu</sub>	Fil diam mm	N max	f <sub>cu</sub>	Fil diam mm	N max	f <sub>cu</sub>	Fil diam mm	N max	f <sub>cu</sub>
0,10	442	0,565	0,10	240	0,309	3 × 0,04	275	0,167	5 × 0,07	65	0,205
0,12	306	0,565	0,11	207	0,322	5 × 0,04	190	0,195	8 × 0,07	50	0,250
0,14	220	0,545	0,12	187	0,345	8 × 0,04	143	0,232	10 × 0,07	39	0,255
0,16	163	0,535	0,14	136	0,341	10 × 0,04	139	0,286	12 × 0,07	36	0,274
0,18	125	0,510	0,16	117	0,381	12 × 0,04	120	0,295	16 × 0,07	29	0,290
0,20	109	0,557	0,18	82	0,339	16 × 0,04	92	0,301	20 × 0,07	25	0,318
0,22	95	0,590	0,20	78	0,400	20 × 0,04	68	0,280	24 × 0,07	19	0,282
0,25	73	0,525	0,22	68	0,421	24 × 0,04	58	0,283	28 × 0,07	18	0,310
0,28	63	0,626	0,25	54	0,435	28 × 0,04	48	0,273	32 × 0,07	16	0,287
0,30	53	0,608	0,28	48	0,480	32 × 0,04	45	0,294	36 × 0,07	15	0,338
0,35	37	0,586	0,30	37	0,432	36 × 0,04	36	0,268	40 × 0,07	11	0,280
0,40	27	0,558	0,35	28	0,442	40 × 0,04	35	0,287	45 × 0,07	10	0,286
0,45	21	0,550	0,40	25	0,515	45 × 0,04	32	0,297	50 × 0,07	10	0,309
0,50	17	0,555	0,45	18	0,458	50 × 0,04	27	0,279	56 × 0,07	8	0,287
			0,50	16	0,522	56 × 0,04	25	0,288	63 × 0,07	6	0,236
			0,55	11	0,421	63 × 0,04	23	0,303	70 × 0,07	5	0,229
			0,60	10	0,470	70 × 0,04	20	0,284	80 × 0,07	4	0,210
			0,65*	6	0,381	80 × 0,04	16	0,276			
						90 × 0,04	16	0,275			
						100 × 0,04	15	0,306			
						112 × 0,04	10	0,234			
						120 × 0,04	9	0,225			
						140 × 0,04	9	0,263			
						150 × 0,04	8	0,247			
						160 × 0,04	7	0,246			
						180 × 0,04	7	0,263			

(\*)émaillé 2 couches soie

TABLEAU E-2

Pots 25/12 - Nombre de spires maximum (N max) et coefficient de remplissage (f<sub>cu</sub>) en fonction du fil utilisé.

Emaillé			Emaillé 1 couché soie			Fil divisé			Fil divisé		
Diam du fil mm	N max	f <sub>cu</sub>	Diam du fil mm	N max	f <sub>cu</sub>	Diam du fil mm	N max	f <sub>cu</sub>	Diam du fil mm	N max	f <sub>cu</sub>
0,10	1300	0,565	0,10	620	0,270	3 × 0,04	810	0,167	5 × 0,07	192	0,205
0,12	900	0,565	0,11	610	0,322	5 × 0,04	560	0,195	8 × 0,07	146	0,250
0,14	590	0,505	0,12	550	0,345	8 × 0,04	415	0,230	10 × 0,07	107	0,229
0,16	480	0,535	0,14	400	0,341	10 × 0,04	410	0,286	12 × 0,07	107	0,274
0,18	360	0,510	0,16	380	0,423	12 × 0,04	352	0,295	16 × 0,07	85	0,290
0,20	320	0,557	0,18	240	0,339	16 × 0,04	270	0,301	20 × 0,07	75	0,320
0,22	280	0,590	0,20	230	0,400	20 × 0,04	188	0,261	24 × 0,07	55	0,282
0,25	215	0,525	0,22	200	0,421	24 × 0,04	180	0,304	28 × 0,07	52	0,310
0,28	184	0,626	0,25	160	0,435	28 × 0,04	140	0,273	32 × 0,07	46	0,287
0,30	155	0,608	0,28	140	0,476	32 × 0,04	132	0,294	36 × 0,07	44	0,338
0,35	110	0,586	0,30	110	0,432	36 × 0,04	107	0,268	40 × 0,07	33	0,282
0,40	80	0,558	0,35	83	0,442	40 × 0,04	103	0,287	45 × 0,07	30	0,288
0,45	75	0,660	0,40	74	0,515	45 × 0,04	100	0,314	50 × 0,07	29	0,309
0,50	51	0,555	0,45	52	0,458	50 × 0,04	80	0,279	56 × 0,07	24	0,287
			0,50	48	0,522	56 × 0,04	74	0,288	63 × 0,07	15	0,202
			0,55	32	0,421	63 × 0,04	70	0,306	70 × 0,07	14	0,209
			0,60	30	0,470	70 × 0,04	69	0,337	80 × 0,07	12	0,205
			0,65*	16	0,294	80 × 0,04	48	0,267	90 × 0,07	11	0,211
			0,70*	15	0,320	90 × 0,04	44	0,275	100 × 0,07	10	0,214
			0,75*	14	0,343	100 × 0,04	40	0,276	112 × 0,07	10	0,240
			0,80*	13	0,362	112 × 0,04	30	0,234	120 × 0,07	10	0,256
						120 × 0,04	27	0,225	133 × 0,07	5	0,142
						140 × 0,04	27	0,263	160 × 0,07	4	0,137
						150 × 0,04	22	0,234	180 × 0,07	4	0,154
						160 × 0,04	21	0,235			
						180 × 0,04	14	0,176			
						200 × 0,04	12	0,173			
						252 × 0,04	12	0,212			
						280 × 0,04	11	0,214			
						315 × 0,04	10	0,220			
						350 × 0,04	5	0,122			
						392 × 0,04	5	0,135			
						441 × 0,04	5	0,154			
						490 × 0,04	4	0,136			

\* émaillé 2 couches soie

TABLEAU E-3

Pots 25/16 - Nombre de spires maximum (N max) et coefficient de remplissage ( $f_{cu}$ ) en fonction du fil utilisé.

Emaillé			Emaillé 1 couché soie			Fil divisé			Fil divisé		
Diam du fil mm	N max	$f_{cu}$	Diam du fil mm	N max	$f_{cu}$	Diam du fil mm	N max	$f_{cu}$	Diam du fil mm	N max	$f_{cu}$
0,10	2500	0,550	0,10	1250	0,275	3×0,04	1700	0,180	5×0,07	400	0,216
0,12	1750	0,556	0,11	1230	0,328	5×0,04	1100	0,194	8×0,07	305	0,262
0,14	1200	0,518	0,12	1120	0,355	8×0,04	840	0,240	10×0,07	244	0,262
0,16	1040	0,586	0,14	815	0,352	10×0,04	800	0,282	12×0,07	239	0,309
0,18	770	0,550	0,16	770	0,434	12×0,04	725	0,308	16×0,07	173	0,299
0,20	680	0,598	0,18	506	0,361	16×0,04	520	0,294	20×0,07	158	0,341
0,22	603	0,639	0,20	476	0,419	20×0,04	404	0,286	24×0,07	109	0,295
0,25	435	0,538	0,22	420	0,447	24×0,04	370	0,313	28×0,07	108	0,326
0,28	382	0,659	0,25	330	0,460	28×0,04	293	0,290	32×0,07	96	0,384
0,30	315	0,625	0,28	285	0,491	32×0,04	263	0,297	36×0,07	92	0,357
0,35	225	0,606	0,30	244	0,484	36×0,04	216	0,274	45×0,07	66	0,285
0,40	169	0,595	0,35	174	0,469	40×0,04	207	0,292	50×0,07	60	0,291
0,45	150	0,568	0,40	159	0,556	45×0,04	204	0,323	7×8×0,07	59	0,318
0,50	108	0,594	0,45	109	0,459	5×10×0,04	154	0,271	7×9×0,07	51	0,295
			0,50	96	0,528	7×8×0,04	150	0,295	7×10×0,07	32	0,218
			0,55	67	0,444	7×9×0,04	140	0,311	7×10×0,07	30	0,227
			0,60	62	0,490	7×10×0,04	140	0,345	4×20×0,07	25	0,216
			0,65*	36	0,335	4×20×0,04	99	0,279	3×30×0,07	24	0,233
			0,70*	32	0,345	3×30×0,04	92	0,292	5×20×0,07	21	0,226
			0,75*	32	0,397	5×20×0,04	91	0,320	4×28×0,07	21	0,254
			0,80*	30	0,423	4×28×0,04	60	0,237	3×40×0,07	19	0,259
						4×30×0,04	57	0,241	7×19×0,07	10	0,146
						7×20×0,04	56	0,276	8×20×0,07	9	0,156
						5×30×0,04	50	0,265	9×20×0,07	8	0,155
						5×4×8×0,04	48	0,270			
						5×3×12×0,04	44	0,279			
						10×20×0,04	26	0,183			
						7×4×9×0,04	23	0,204			
						28×10×0,04	24	0,237			
						7×5×9×0,04	22	0,244			
						7×5×10×0,04	20	0,247			
						7×7×8×0,04	20	0,276			
						7×7×9×0,04	10	0,156			
						7×7×10×0,04	9	0,155			

\* émaillé 2 couches soie

TABLEAU E-4

Pots 25/17,5 - Nombre de spires maximum (N max) et coefficient de remplissage ( $f_{cu}$ ) en fonction du fil utilisé.

Emaillé			Emaillé 1 couché soie			Fil divisé			Fil divisé		
Diam du fil mm	N max	$f_{cu}$	Diam du fil mm	N max	$f_{cu}$	Diam du fil mm	N max	$f_{cu}$	Diam du fil mm	N max	$f_{cu}$
0,10	2475	0,550	0,10	1237	0,275	3 × 0,04	1683	0,180	5 × 0,07	396	0,216
0,12	1732	0,556	0,11	1218	0,328	5 × 0,04	1089	0,194	8 × 0,07	302	0,262
0,10	1188	0,518	0,12	1109	0,355	8 × 0,04	832	0,240	10 × 0,07	252	0,273
0,16	1030	0,586	0,14	807	0,352	10 × 0,04	792	0,282	12 × 0,07	237	0,309
0,18	763	0,550	0,16	762	0,434	12 × 0,04	718	0,308	16 × 0,07	171	0,299
0,20	673	0,598	0,18	501	0,361	16 × 0,04	515	0,294	20 × 0,07	156	0,341
0,22	594	0,639	0,20	471	0,419	20 × 0,04	404	0,289	24 × 0,07	108	0,295
0,25	431	0,538	0,22	416	0,447	24 × 0,04	366	0,313	28 × 0,07	107	0,326
0,28	378	0,659	0,25	327	0,460	28 × 0,04	290	0,290	32 × 0,07	95	0,381
0,30	312	0,625	0,28	282	0,491	32 × 0,04	260	0,297	36 × 0,07	91	0,357
0,35	223	0,606	0,30	242	0,484	36 × 0,04	214	0,274	40 × 0,07	65	0,285
0,40	167	0,595	0,35	172	0,469	40 × 0,04	205	0,292	45 × 0,07	59	0,291
0,45	148	0,568	0,40	156	0,556	45 × 0,04	202	0,323	50 × 0,07	58	0,318
0,50	107	0,594	0,45	107	0,459	50 × 0,04	152	0,271	56 × 0,07	50	0,295
			0,50	95	0,528	56 × 0,04	148	0,295	63 × 0,07	32	0,220
			0,55	66	0,444	63 × 0,04	139	0,311	70 × 0,07	30	0,229
			0,60	61	0,490	70 × 0,04	129	0,320	80 × 0,07	25	0,218
			0,65*	36	0,338	80 × 0,04	98	0,279	90 × 0,07	24	0,235
			0,70*	32	0,348	90 × 0,04	91	0,292	100 × 0,07	21	0,228
			0,75*	32	0,401	100 × 0,04	90	0,328	112 × 0,07	21	0,256
			0,80*	30	0,425	112 × 0,04	59	0,237	120 × 0,07	16	0,261
						120 × 0,04	56	0,241	133 × 0,07	10	0,146
						140 × 0,04	55	0,276	160 × 0,07	9	0,156
						150 × 0,04	50	0,269	180 × 0,07	8	0,155
						160 × 0,04	48	0,273			
						180 × 0,04	44	0,282			
						200 × 0,04	29	0,201			
						252 × 0,04	25	0,214			
						280 × 0,04	24	0,239			
						315 × 0,04	22	0,246			
						350 × 0,04	20	0,249			
						392 × 0,04	20	0,279			
						441 × 0,04	10	0,158			
						490 × 0,04	9	0,157			

\* émaillé 2 couches soie

**TABLEAU E-5**

**Pot 36/22** - Nombre de spires maximum (N max) et coefficient de remplissage ( $f_{cu}$ ) en fonction du fil utilisé.

Fil cuivre émaillé			Fil divisé			Fil divisé		
Diam mm	N max	$f_{cu}$	Diam mm	N max	$f_{cu}$	Diam mm	N max	$f_{cu}$
0,10	3500	0,556	3 × 0,04	2200	0,168	5 × 0,07	550	0,214
0,12	2500	0,570	5 × 0,04	1600	0,204	8 × 0,07	440	0,274
0,14	1600	0,498	8 × 0,04	1200	0,245	10 × 0,07	340	0,265
0,16	1400	0,57	10 × 0,04	1100	0,281	12 × 0,07	324	0,302
0,18	1040	0,54	12 × 0,04	1020	0,312	20 × 0,07	194	0,302
0,20	890	0,57	16 × 0,04	785	0,321	24 × 0,07	173	0,324
0,22	780	0,60	20 × 0,04	550	0,270	28 × 0,07	143	0,312
0,25	625	0,61	24 × 0,04	530	0,337	32 × 0,07	131	0,327
0,28	510	0,64	28 × 0,04	426	0,342	36 × 0,07	102	0,286
0,30	440	4,61	32 × 0,04	344	0,281	40 × 0,07	100	0,312
0,35	330	0,64	36 × 0,04	307	0,282	45 × 0,07	95	0,333
0,40	240	0,61	40 × 0,04	286	0,292	50 × 0,07	90	0,355
0,45	200	0,64	45 × 0,04	280	0,322	56 × 0,07	63	0,275
0,50	180	0,71	50 × 0,04	230	0,293	63 × 0,07	59	0,290
Emaillé 1 couche soie			56 × 0,04	226	0,323	70 × 0,07	56	0,306
			63 × 0,04	196	0,319	90 × 0,07	35	0,246
Emaillé 2 couches soie			70 × 0,04	180	0,315	100 × 0,07	31	0,242
			80 × 0,04	139	0,284	112 × 0,07	30	0,262
0,10	1900	0,302	90 × 0,04	132	0,303	120 × 0,07	28	0,261
0,11	1700	0,322	100 × 0,04	126	0,322	133 × 0,07	20	0,207
0,12	1600	0,360	112 × 0,04	95	0,272	160 × 0,07	15	0,212
0,14	1150	0,368	120 × 0,04	91	0,279	180 × 0,07	16	0,224
0,16	1050	0,427	140 × 0,04	85	0,303			
0,18	900	0,464	150 × 0,04	70	0,269			
0,20	650	0,413	160 × 0,04	61	0,249			
0,22	600	0,461	180 × 0,04	58	0,266			
0,25	500	0,497	200 × 0,04	39	0,199			
0,28	400	0,490	252 × 0,04	34	0,219			
0,30	322	0,461	280 × 0,04	33	0,236			
0,35	256	0,498	315 × 0,04	32	0,258			
0,40	198	0,505	350 × 0,04	31	0,276			
0,45	144	0,465	392 × 0,04	30	0,300			
0,50	137	0,545	441 × 0,04	19	0,214			
0,55	110	0,52	490 × 0,04	18	0,225			
0,60	100	0,57						
0,65	68	0,46						
0,70*	64	0,50						
0,75*	61	0,55						
0,80*	43	0,44						

\* émaillé 2 couches soie

TABLEAU E-6

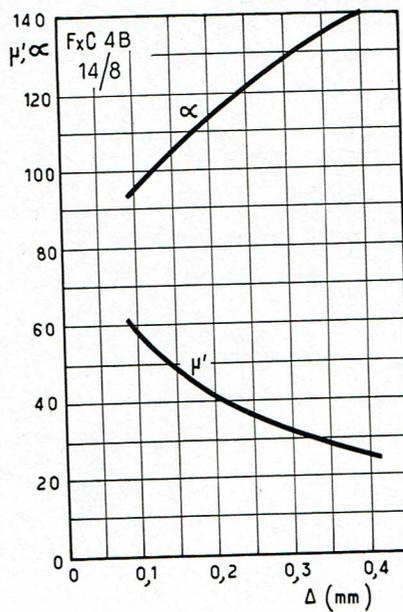
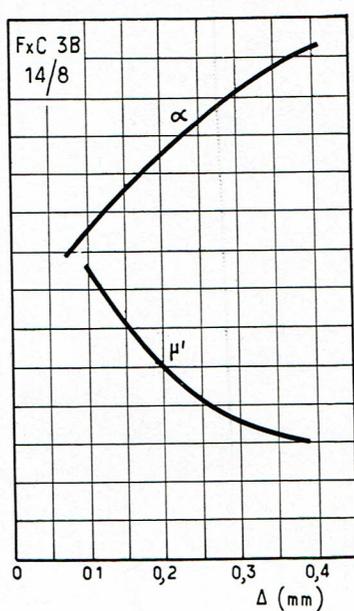
Pot 45/39 - Nombre de spires maximum (N max) et coefficient de remplissage ( $f_{cu}$ ) en fonction du fil utilisé.

Fil cuivre émaillé			Fil divisé			Fil divisé		
Diam mm	N max	$f_{cu}$	Diam mm	N max	$f_{cu}$	Diam mm	N max	$f_{cu}$
0,10	14270	0,556	3 × 0,04	8980	0,168	5 × 0,07	2240	0,214
0,12	10180	0,573	5 × 0,04	6530	0,204	8 × 0,07	1800	0,274
0,14	6530	0,498	8 × 0,04	5400	0,245	10 × 0,07	1390	0,265
0,16	5720	0,570	10 × 0,04	4490	0,281	12 × 0,07	1320	0,302
0,18	4250	0,540	12 × 0,04	4160	0,312	20 × 0,07	790	0,302
0,20	3640	0,570	16 × 0,04	3200	0,321	24 × 0,07	705	0,324
0,22	3180	0,60	20 × 0,04	2240	0,270	28 × 0,07	585	0,312
0,25	2560	0,61	24 × 0,04	2160	0,337	32 × 0,07	535	0,327
0,28	2080	0,64	28 × 0,04	1740	0,342	36 × 0,07	416	0,286
0,30	1800	0,61	32 × 0,04	1400	0,281	40 × 0,07	408	0,312
0,35	1350	0,64	36 × 0,04	1250	0,282	45 × 0,07	388	0,333
0,40	980	0,61	40 × 0,04	1170	0,292	50 × 0,07	367	0,355
0,45	815	0,64	45 × 0,04	1140	0,322	56 × 0,07	257	0,275
0,50	680	0,65	50 × 0,04	940	0,293	63 × 0,07	241	0,290
Fil cuivre émaillé (1 couche soie)			56 × 0,04	920	0,323	70 × 0,07	229	0,306
			70 × 0,04	735	0,315	90 × 0,07	135	0,232
Fil cuivre émaillé (1 couche soie)			80 × 0,04	567	0,284	100 × 0,07	125	0,242
			90 × 0,04	539	0,303	112 × 0,07	122	0,262
0,10	7750	0,302	100 × 0,04	514	0,322	120 × 0,07	114	0,261
0,11	6960	0,322	112 × 0,04	388	0,272	133 × 0,07	82	0,207
0,12	6550	0,360	120 × 0,04	372	0,279	160 × 0,07	69	0,212
0,14	5150	0,398	140 × 0,04	345	0,303	180 × 0,07	65	0,224
0,16	4300	0,427	160 × 0,04	286	0,269			
0,18	3680	0,464	180 × 0,04	249	0,249			
0,20	2890	0,470	200 × 0,04	159	0,199			
0,22	2450	0,461	280 × 0,04	135	0,236			
0,25	2040	0,497	315 × 0,04	130	0,258			
0,28	1640	0,490	350 × 0,04	126	0,276			
0,30	1300	0,461	392 × 0,04	122	0,300			
0,35	1040	0,498	441 × 0,04	77	0,214			
0,40	810	0,505	490 × 0,04	72	0,225			
0,45	590	0,465						
0,50	555	0,545						
0,55	450	0,52						
0,60	410	0,57						
0,65*	280	0,47						
0,70*	255	0,50						
0,75*	225	0,55						
0,80*	180	0,45						

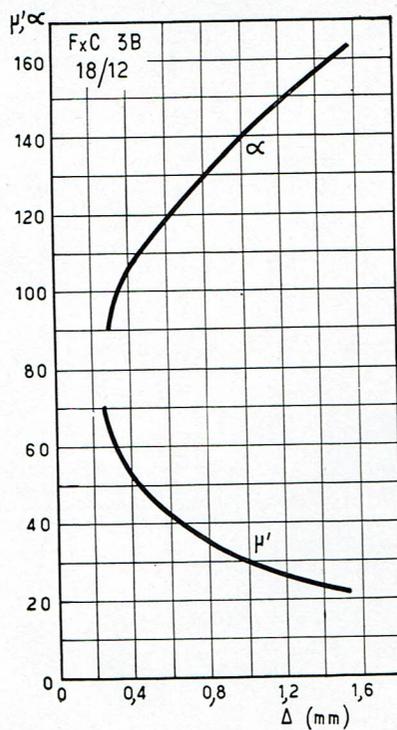
\* émaillé 2 couches soie

**TABLEAU F**  
**COURBES  $\alpha$  ET  $\mu'$  DES POTS STANDARDS FERROXCUBE**

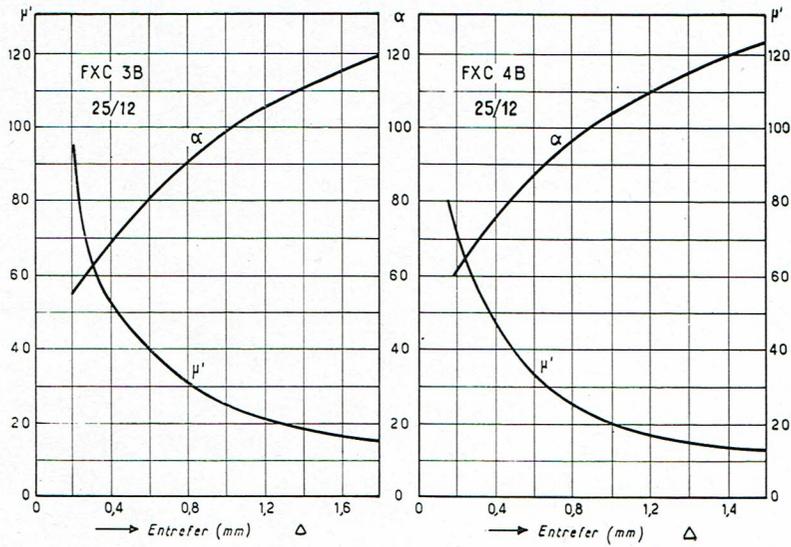
**Pots 14/8**



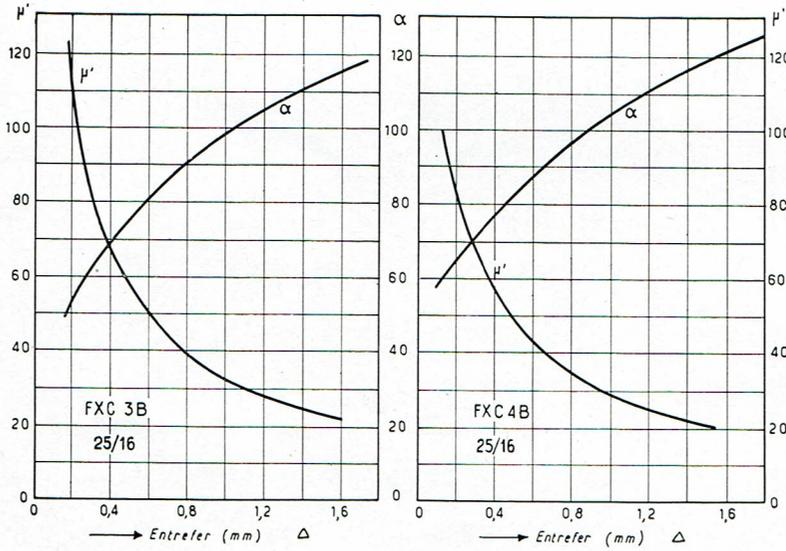
**Pots 18/12**



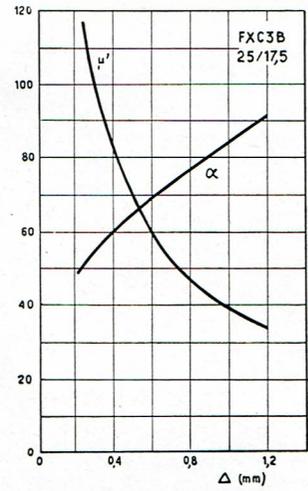
Pots 25/12



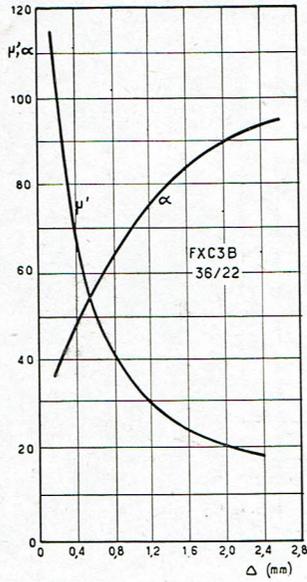
Pots 25/16



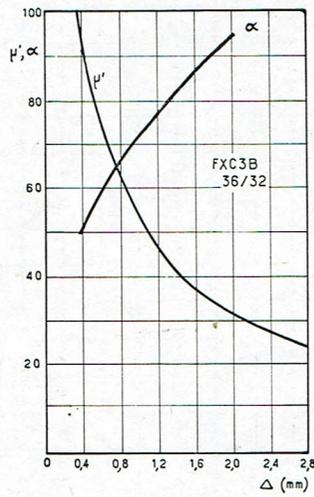
Pots 25/17,5



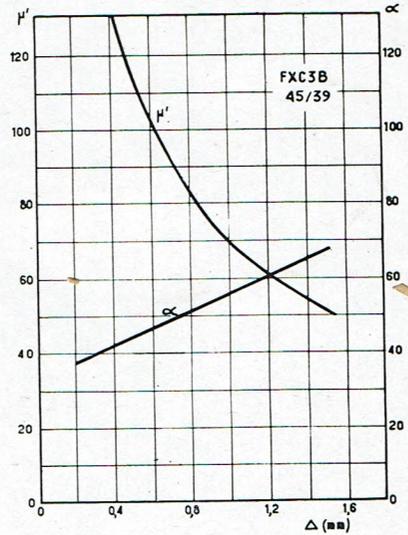
Pots 36 / 22



Pots 36 / 32



Pots 45 / 39



## " INFORMATIONS ÉLECTRONIQUES "

AFFILIÉ A L'ASSOCIATION DES JOURNALISTES PÉRIODIQUES BELGES ET ÉTRANGERS  
(Union professionnelle reconnue)

**M. B. L. E**

Division "ÉLECTRONIQUE"

80, RUE DES DEUX GARES, BRUXELLES. TÉL. : 21.82.00 (20 LIGNES)

Éditeur responsable : S. A. M. B. L. E. 80, rue des Deux-Gares, Bruxelles 7

Imprimé en France