

## LE CALCUL DES TRANSFORMATEURS

Avant d'aborder la méthode de calcul des transformateurs, nous allons situer le problème en déterminant la puissance à prévoir pour chacun des secondaires.

1°) SECONDAIRES ALIMENTANT DES CIRCUITS PUREMENT RÉSISTANTS (ou susceptibles d'être considérés comme tels).

Les exemples les plus typiques sont ceux de l'alimentation de filaments de lampes, des transformateurs de sécurité destinés à divers outils électriques, à des jouets, etc.

Dans ces divers cas, on a simplement :

$$\text{Puissance au secondaire considéré (en VA)} = E_{\text{eff}} I_{\text{eff}}$$

Si le transformateur comporte plusieurs secondaires, il faut totaliser les puissances individuelles ainsi calculées.

2°) SECONDAIRES ALIMENTANT UN SYSTÈME REDRESSEUR DE COURANT.

Tout d'abord, nous savons qu'il nous faut obtenir, à la sortie du redresseur (et du système de filtrage lui faisant éventuellement suite), une intensité continue  $I_s$ , sous une tension  $E_s$ . La résistance équivalente au circuit d'utilisation est :

$$R_s = E_s / I_s$$

Pour un redresseur de tension anodique, si  $R$  est la résistance de l'inductance  $L_1$ , ou la somme de celles des inductances  $L_1$ , lorsque plusieurs cellules de filtrage sont prévues, nous aurons :

$$E_r = E_s + R I_s$$

Selon que notre choix se sera fixé sur un filtrage à condensateur ou à inductance d'entrée, nous nous reporterons à la colonne convenable

des courbes de redressement pour les valves usuelles, montrées par la figure 2 - 10. (Dans le cas de l'inductance d'entrée, il est tenu compte d'une faible résistance d'enroulement pour celle-ci.)

Nous saurons ainsi, pour les valeurs  $E_r$  et  $I_s$  prévues, quelle doit être la tension  $V_{\text{eff}}$  (c'est-à-dire celle du demi-secondaire H.T.).

Au passage, il sera bon de s'assurer que la tension inverse propre à la valve employée, n'est pas dépassée :

$$V_{\text{eff}} / 0,35 = E_{\text{max}} \text{ inverse}$$

Si l'on utilise des valves à mercure, on aura pour chaque demi-secondaire :

$$V_{\text{eff}} = 1,11 E_r + I_s R_e + 15$$

en appelant  $R_e$  la résistance présentée par l'inductance  $L_e$ .

a) *Redresseurs avec filtre à condensateur d'entrée.* En raison de l'existence d'un courant de pointe élevé par rapport au courant moyen, le nombre de voltampères instantanés peut se montrer assez grand, par rapport à la puissance délivrée au circuit de sortie. La prudence (et la pratique) conduisent à se baser ici sur :

$$\text{Puissance au secondaire H.T. (en VA)} = 2,2 V_{\text{eff}} I_s$$

b) *Redresseurs avec filtre à inductance d'entrée.* Dans ce cas, on prendra :

$$\text{Puissance au secondaire H.T. (en VA)} = 1,5 V_{\text{eff}} I_s$$

et l'on admettra comme valeur de l'intensité alternative délivrée par chaque demi-secondaire :  $I_{\text{eff}} = 0,7 I_s$ .

Avec les filtres à inductance d'entrée, il ne faudra pas oublier les vérifications accessoires (déjà mentionnées) concernant la résonance et l'intensité critique :

$$L_e C_1 \geq 20 \text{ (pour un secteur à 50 Hz)}$$

$$L_e \geq R_s / 600$$

où l'on exprime  $L_e$  en henrys,  $C_1$  en microfarads et  $R_s$  en ohms.

## LE CALCUL DES TRANSFORMATEURS

Il est entendu que les données contenues dans ce chapitre concernent des transformateurs destinés à travailler à la fréquence de 50 Hz.

### 1°) LA SECTION DU CIRCUIT MAGNÉTIQUE

Puisque toute la puissance transformée prend la forme d'un *flux magnétique* pour passer du primaire au secondaire du transformateur, il est évident que la section du circuit magnétique doit être proportionnée à la puissance transmise. Il faudra distinguer *la section réelle*  $S_r$ , de ce circuit, celle sur laquelle on fonde les calculs, et *la section apparente*  $S_a$ , c'est-à-dire celle que l'on détermine par le produit  $a \times \dot{\phi}$  des mesures prises sur la carcasse, selon la figure 3 - 1.

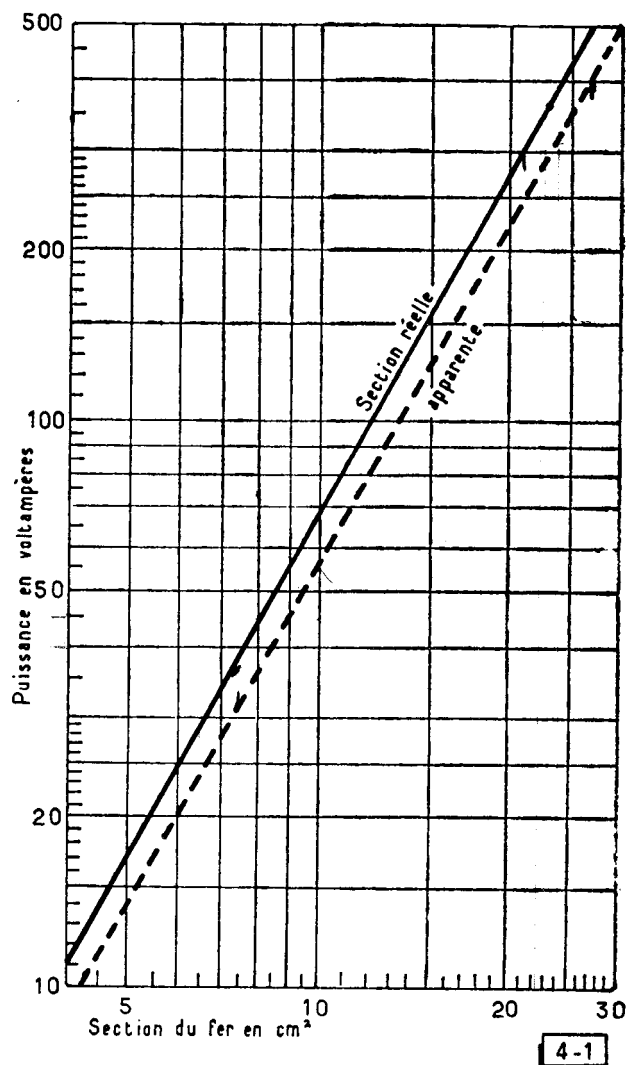


Fig. 4-1. — Abaque de la section du fer en fonction de la puissance. (Transformateurs d'alimentation).

Du fait de la présence d'une pellicule isolante entre les tôles, la section apparente est supérieure d'environ 10 % à la section réelle.

En exprimant la puissance  $P$  en watts, et la section  $S$  en centimètres carrés, on a :

$$S_r = 1,2 \sqrt{P}$$

$$S_a = 1,32 \sqrt{P}$$

L'abaque de la figure 4 - 1 évitera tout calcul pour les puissances inférieures à 500 VA.

D'un autre côté, il est également permis de calculer la carcasse magnétique d'un transformateur, à partir des caractéristiques des tôles données par les fabricants de celles-ci.

Pour les petites puissances, jusqu'à 500 VA, on admet un rendement de 90 %, c'est-à-dire 10 % de pertes que l'on égalise dans le fer et dans le cuivre, soit 5 % dans le fer et 5 % dans les enroulements (effet Joule), où l'on pourra prévoir 2,5 % dans le primaire et 2,5 % dans le ou les secondaires.

Entre 500 et 1000 VA, on garde les 5 % de pertes dans le fer, mais on peut se baser seulement sur 3 % de pertes dans le cuivre (réparties entre les divers enroulements).

Au-delà de 1000 VA, les calculs seront fondés sur 5 % de pertes dans le fer, et 2 % de pertes globales dans le cuivre.

La formule de Steinmetz permet alors de trouver le *volume du fer*  $V$  (en centimètres cubes) correspondant à une puissance de pertes connue,  $W_h$ , pour un courant à fréquence  $F$ , et en fonction de l'*induction*  $B$  acceptée par les tôles, ainsi que de leur *coefficient d'hystérésis*  $h$ . Ces deux valeurs dépendent de la nature et de la qualité des tôles ; elles sont données par le fabricant. Par exemple, on disposera de tôles de 0,5 mm d'épaisseur, présentant 2,6 watts de pertes au kilogramme pour  $B = 10\,000$  gauss, ce qui donnera pour le coefficient  $h$  :  $2,6/1000 = 0,0026$ , ou bien encore de tôles de 0,4 mm d'épaisseur, dont les pertes ne seront que de 1,6 W/kg (soit  $h = 0,0016$ ) pour  $B = 10\,000$  gauss, etc.

Il ne reste qu'à mettre la formule en application :

$$W_h = \frac{F h B^{1,6} V}{10^7}$$

ou :

$$V = \frac{10^7 W_h}{F h B^{1,6}}$$

Ainsi, on obtient le *volume net* du paquet de tôles nécessaire, *déduction faite des fenêtres* destinées au logement des enroulements.

En pratique, il sera commode, s'étant fixé un modèle de tôles, de calculer le volume net en centimètres cubes qu'il donne par centimètre d'épaisseur d'empilage.

## 2°) DÉTERMINATION DES ENROULEMENTS

a) *Nombre de spires par volt*. Celui-ci dépend de la valeur de l'*induction* admise dans le circuit magnétique. En effet, il est concevable que les lignes de force du flux magnétique peuvent être plus ou moins serrées les unes contre les autres, et l'on en vient ainsi à l'idée d'une *densité de flux magnétique*. Ce dernier étant défini par  $\Phi$ , l'induction par  $B$  et la surface totale que traverse le flux par  $S$ , on a :

$$\Phi = B S$$

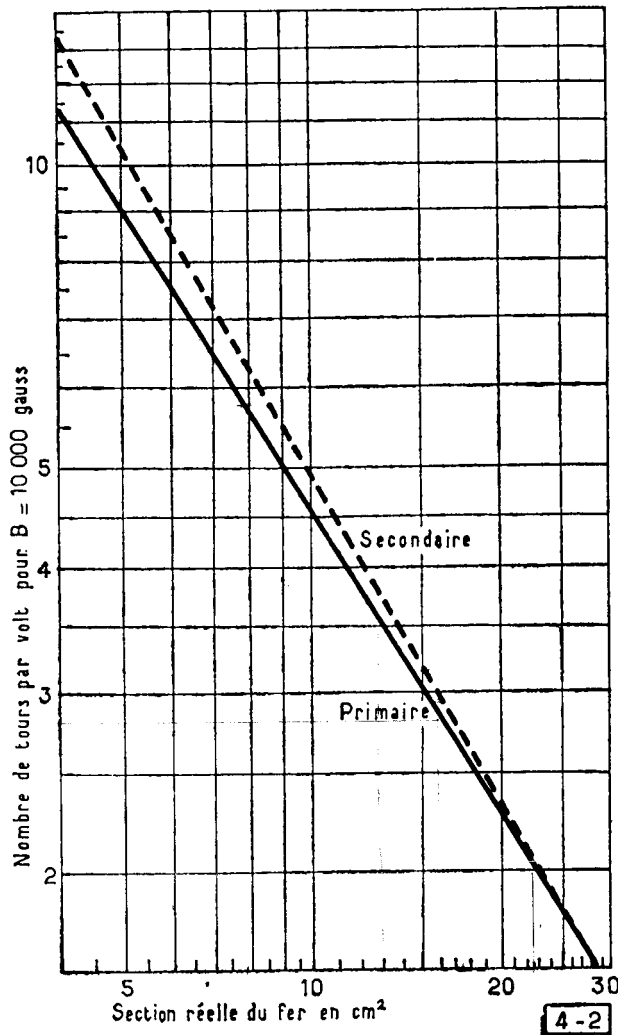


Fig. 4-2. — Abaque du nombre de tours par volt. (Transformateurs d'alimentation). Formule de base : Nombre de tours par volt au primaire =  $45/\text{section réelle, en cm}^2$ .

Il est donc permis de penser que plusieurs solutions pratiques seront admissibles pour un même transformateur, selon la valeur de cette *induction* (ou *densité de flux*) introduite dans les bases de calcul.

Pour une induction de 7500 à 9000 gauss, on obtiendra un transformateur ne consommant qu'un faible courant à vide. Mais si l'usage prévu est de caractère intermittent, il ne sera pas interdit d'aller jusqu'à 14 000 gauss. Pour des tôles de qualité courante, le « juste milieu » se tient vers 10 000 gauss, et c'est à partir de cette valeur que ces abaques ont été tracés. Celui de la figure 4 - 2 fournira *le nombre de spires par volt* au primaire et aux secondaires, en fonction de la surface réelle du fer.

Pour les secondaires, il y est tenu compte d'une valeur moyenne de pertes, ce qui conduit à un nombre de tours par volt un peu supérieur à celui sur lequel on se base au primaire, pour une même tension.

La formule générale de calcul des transformateurs est connue sous le nom de formule de Boucherot :

$$N = V \frac{10^8}{4,44 F B S}$$

avec  $N$  : nombre de tours de l'enroulement,

$V$  : tension en volts à ses bornes,

$F$  : fréquence en hertz,

$B$  : induction en gauss,

$S$  : section du fer en centimètres carrés

On énonce encore cette formule sous la forme suivante : Pour un courant alternatif à 50 Hz, et pour une induction de 10 000 gauss, la force électromotrice induite dans une spire enroulée sur un noyau de 100 cm<sup>2</sup> de section réelle, est de 2,22 volts.

Si, lors du calcul d'un transformateur, on désirait choisir une induction différente de 10 000 gauss, il suffirait de consulter les figures 4-3 *a* et *b* pour y noter les deux coefficients  $K$  et  $C$  (ce dernier intervenant pour la compensation de la chute de tension en charge au secondaire), à partir desquels on obtiendrait, pour la section réelle du fer,  $S_r$  :

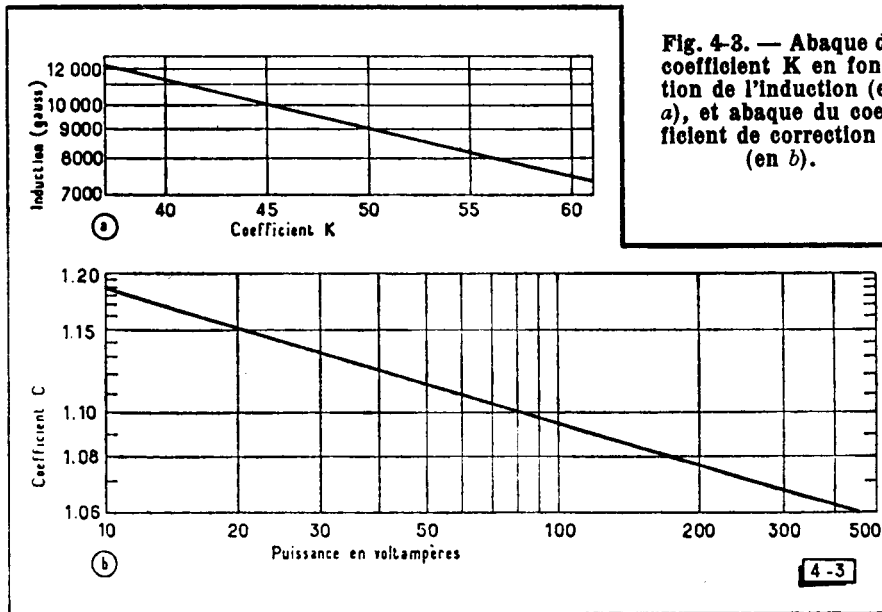
Nombre de tours par volt au primaire =  $K/S_r$

Nombre de tours par volt au secondaire =  $K C/S_r$

*b*) Section du fil. La densité de courant susceptible d'être admise, dépendra des conditions de travail du transformateur, selon qu'il assurera un service intermittent ou un service continu. La valeur convenable sera choisie d'après le tableau suivant :

TABLEAU II

DENSITÉ DE COURANT ADMISSIBLE		
Puissance	Densité de courant en ampères par mm <sup>2</sup>	
	Service continu	Service intermittent
Jusqu'à 50 VA	4	4
de 50 à 100 VA	3,5	4
de 100 à 200 VA	3	3,5
de 200 à 500 VA	2,5	3,5



L'abaque de la figure 4 - 4 offre l'indication du diamètre du fil à choisir, selon l'intensité prévue.

### 3°) LE LOGEMENT DU FIL

Afin de déterminer la surface nécessaire pour la fenêtre des tôles, il faudra chercher quelle place y sera prise par chacun des enroulements.

L'abaque de la figure 4 - 4 comprend, à cet effet, des courbes de logement de divers fils, indiquant le nombre de tours qu'il est possible de caser par centimètre carré de section de la carcasse, autrement dit de la fenêtre (fig. 4 - 5).

Toutefois, comme le bobinage ne sera pas fait en vrac, mais qu'il comportera un isolement entre couches, il sera nécessaire de multiplier la surface trouvée, par un coefficient de :

- 3 pour un bobinage professionnel bien rangé,
- 3,5 à 4 pour un bobinage exécuté avec des moyens ordinaires.

Ces coefficients doivent encore être augmentés pour les enroulements comportant un certain nombre de prises.

### LE CAS D'UNE FRÉQUENCE DIFFÉRANT DE 50 Hz

Il est permis de se demander comment on déterminerait un transformateur destiné à fonctionner sur un courant alternatif de fréquence industrielle différente de 50 Hz.

Tous les calculs seraient conduits comme s'il s'agissait d'un transformateur pour courant à 50 Hz ; en particulier, on adopterait bien le nombre de spires par volt choisi pour cette dernière fréquence. Mais en tout dernier lieu, les sections (apparente et réelle) du fer seraient multipliées par  $50/f$ , la fréquence  $f$  étant celle du courant alternatif.

### EXEMPLE DE CALCUL

Soit à calculer un transformateur destiné à l'alimentation d'un récepteur et devant fournir :

- a) 80 mA sous une tension de 250 volts, pour les anodes ;
- b) 2,5 A sous 6,3 V, pour le chauffage des lampes ;
- c) 2 A sous 5 V, pour le chauffage de la valve. Cette dernière est une 5Y3 GB, et la bobine d'excitation du haut-parleur électrodynamique (d'une résistance de 1500 ohms) doit être employée comme inductance de filtrage, précédée par un condensateur d'entrée.

1°) EVALUATION DE LA PUISSANCE. La chute de tension dans la bobine d'excitation sera égale à :  $1500 \times 0,080 = 120$  volts. Dans ces conditions, nous aurons aux bornes du premier condensateur de filtrage :  $E_r = 250 + 120 = 370$  volts. Il nous suffira de nous référer aux courbes de la figure 2 - 10, pour trouver la tension  $V_{\text{eff}}$  du demi-secondaire H.T., soit 350 volts.

Pour ce circuit, la puissance est égale à :

$$2,2 V_{\text{eff}} I_s = 2,2 \times 350 \times 0,080 = 61 \quad \text{VA}$$

Aux secondaires de chauffage, nous avons :

$$\begin{array}{r} 6,3 \times 2,5 = 15,75 \text{ VA} \\ \text{et : } \quad 5 \times 2 = 10 \quad \text{VA} \end{array}$$

Soit, au total ..... 86,75 VA

2°) SECTION DU FER. Pour 86 VA, la figure 4 - 1 nous indique : section réelle =  $11,2 \text{ cm}^2$  et section apparente =  $12,5 \text{ cm}^2$ .

3°) CALCUL DES ENROULEMENTS. L'abaque de la figure 4 - 2, pour  $S_r = 11,2 \text{ cm}^2$ , nous fixe un nombre de tours par volt de 4,1 au primaire et de 4,4 aux secondaires.

Pour 86 VA, la densité de courant sera de 3,5 A par  $\text{mm}^2$  de section, et l'abaque de la figure 4 - 4 nous permettra de définir les diamètres des fils à employer, ainsi que la place occupée par chaque enroulement dans la « fenêtre » des tôles.

Il ne nous restera plus qu'à déterminer l'intensité dans l'enroulement primaire, et nous le ferons pour la prise la plus faible, dans chaque gamme de tensions (soit pour 110 volts, pour les prises 110, 130 et pour 220 volts pour celles de 220 et 250 volts).



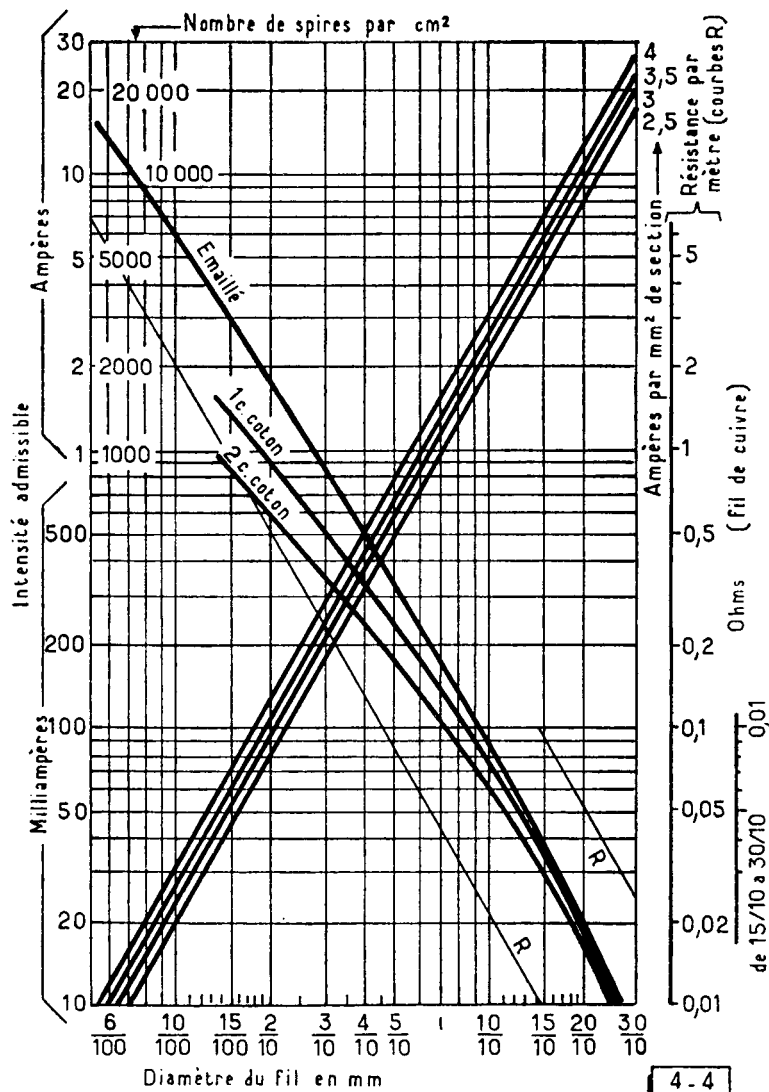


Fig. 4-4. — Abaque des fils de cuivre. Intensité admissible. Résistance par mètre. Nombre de tours au  $\text{cm}^2$ . (Transformateurs d'alimentation).

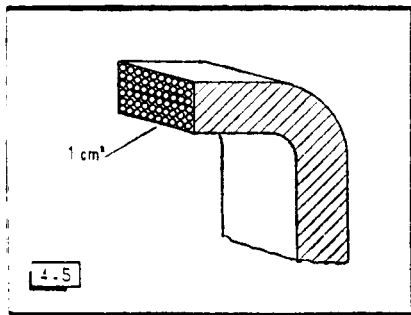


Fig. 4-5. — Les courbes de logement du fil de l'abaque de la figure 4-4 indiquent pour un fil donné, le nombre de tours qu'il est possible d'embobiner dans un espace dont la section mesure un centimètre carré.

Nous obtenons en premier lieu :  $86/110 = 0,78$  A, et en second lieu :  $86/220 = 0,39$  A.

Enfin, le tableau d'ensemble suivant peut être dressé :

Début du primaire, Prise 110 V, à $110 \times 4,1 = 451$ tours Prise 130 V, à $130 \times 4,1 = 533$ »	Fil 0,55 mm, émaillé (280 spires par $\text{cm}^2$ ) $533/280 = \dots\dots\dots 1,90 \text{ cm}^2$
Prise 220 V, à $220 \times 4,1 = 902$ » Prise 250 V, à $250 \times 4,1 = 1025$ »	Fil 0,4 mm, émaillé (500 spires par $\text{cm}^2$ ) $1025 - 533 = 492$ tours $492/500 = \dots\dots\dots 0,98 \text{ cm}^2$
Haute tension : (350 + 350 V, 80 mA) $350 \times 4,4 = 1540$ tours et pour la totalité : $2 \times 1540 = 3080$ tours	Fil 0,17 mm, émaillé (2500 spires par $\text{cm}^2$ ) $3080/2500 = \dots\dots\dots 1,23 \text{ cm}^2$
Chauffage valve : (5 V, 2 A) $5 \times 4,4 = 22$ tours	Fil 0,9 mm, émaillé (100 spires par $\text{cm}^2$ ) $22/100 = \dots\dots\dots 0,22 \text{ cm}^2$
Chauffage lampes : (6,3 V, 2,5 A) $6,3 \times 4,4 = 28$ tours	Fil 1 mm, émaillé (85 spires par $\text{cm}^2$ ) $28/85 = \dots\dots\dots 0,33 \text{ cm}^2$
	<b>4,66 <math>\text{cm}^2</math></b>

Si les enroulements doivent être réalisés sans l'aide d'une bobineuse à fils rangés, on fera intervenir, pour tenir compte de l'épaisseur des papiers isolant les couches de fil et les enroulements entre eux, un coefficient de 3,5 à 4. Une fenêtre de 16,5 à 18,5  $\text{cm}^2$  sera nécessaire dans les tôles utilisées.

## **LES TRANSFORMATEURS D'ALIMENTATION**

### **A RÉGIME VARIABLE. AUTRE EXEMPLE**

#### **DE CALCUL**

On les appelle parfois « transformateurs d'alimentation pour classe B », étant donné que le courant anodique consommé par un push-pull travaillant en régime B subit des variations très grandes au cours du fonctionnement.

Comme il s'agit d'obtenir une tension aussi peu soumise que possible aux chutes provoquées par les accroissements de débit, il est évident qu'il faudra chercher à réduire la résistance des enroulements du transformateur (et, bien entendu, celle des inductances de filtrage).

### FILS EMAILLÉS

Diamètre du fil nu en mm	Section en mm <sup>2</sup>	Diamètre du fil recouvert en mm	Nombre de spires par cm	Résistance en ohms pour 100 m	Poids pour 1.000 m en grammes	Longueur pour 1 Kilog en mètres	Intensité en ampères pour une densité de courant de		
							2 A/mm <sup>2</sup>	2,5 A/mm <sup>2</sup>	3 A/mm <sup>2</sup>
0,06	0,0028	0,10	72,5	615	46	21.700	0,010	0,013	0,015
0,08	0,0050	0,115	86	356	72,3	13.800	0,016	0,020	0,024
0,10	0,0078	0,138	72	228					
0,12	0,0113	0,168	61	158	103,5	9.660	0,022	0,028	0,034
0,15	0,0177	0,200	50	100,4	159	6.290	0,035	0,045	0,053
0,18	0,0254	0,236	42,3	70,2	231	4.330	0,051	0,063	0,076
0,20	0,0314	0,259	36,6	56,1	286	3.500	0,063	0,080	0,094
0,22	0,0380	0,282	35,4	46,8	346	2.915	0,076	0,095	0,114
0,25	0,0491	0,316	31,6	36,3	434	2.305	0,098	0,120	0,147
0,28	0,0616	0,350	28,5	28,9	560	1.796	0,123	0,154	0,184
0,30	0,0707	0,374	26,7	23,2	643	1.561	0,141	0,175	0,212
0,32	0,0884	0,396	25,2	21,9	732	1.371	0,161	0,201	0,241
0,35	0,0982	0,430	23,2	18,5	873	1.145	0,190	0,240	0,289
0,38	0,1134	0,460	21,7	15,7	1.028	972	0,227	0,283	0,340
0,40	0,1257	0,487	20,5	14,2	1.143	880	0,251	0,310	0,377
0,45	0,159	0,540	18,5	11,2	1.443	696	0,318	0,400	0,477
0,50	0,196	0,595	16,7	9,08	1.780	563	0,390	0,490	0,588
0,55	0,238	0,650	15,38	7,48	2.150	465	0,476	0,600	0,714
0,60	0,283	0,700	14,28	6,29	2.384	392	0,566	0,700	0,849
0,65	0,332	0,750	13,3	5,36	3.000	324	0,664	0,830	1
0,70	0,385	0,810	12,34	4,62	3.536	283	0,770	0,960	1,16
0,75	0,442	0,860	11,62	4,03	3.990	241,2	0,884	1,1	1,33
0,80	0,503	0,920	10,86	3,54	4.490	223	1,01	1,25	1,51
0,90	0,636	1,03	9,7	2,8	5.620	177,6	1,27	1,6	1,91
1	0,785	1,13	8,84	2,27	7.070	141,5	1,57	1,96	2,36
1,2	1,131	1,34	7,46	1,88	10.220	97,8	2,26	2,83	3,39
1,3	1,327	1,44	6,94	1,54	11.940	83,8	2,65	3,32	3,98