

## CHAPITRE II

# CALCUL D'UN TRANSFORMATEUR D'ALIMENTATION

Tout technicien se heurte, un jour ou l'autre, à la nécessité de rebobiner ou de réaliser entièrement un transformateur d'alimentation. Il est donc utile d'avoir quelques notions sur la façon dont on peut déterminer les caractéristiques d'une telle pièce, caractéristiques approximatives si l'on considère la théorie rigoureuse, mais qui conduisent à des « engins » dont le fonctionnement est parfaitement satisfaisant dans la pratique.

Il ne faut pas oublier non plus que la connaissance de quelques relations fondamentales facilite grandement l'identification éventuelle d'un transformateur inconnu.

### Puissance d'un transformateur.

La figure 2-1 schématise la structure d'un transformateur d'alimentation classique, avec son primaire alimenté par la tension  $U_1$  et consommant l'intensité  $I_1$ . Les trois

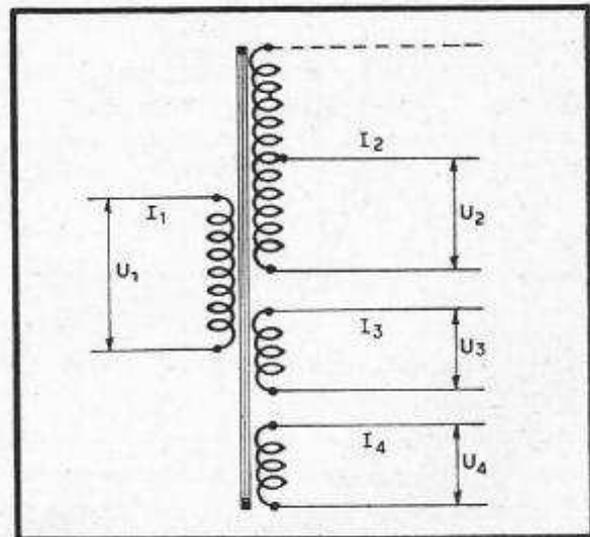


Fig. 2-1. — Structure classique d'un transformateur d'alimentation pour récepteurs ou amplificateurs.

secondaires sont également caractérisés par les tensions  $U_2$ ,  $U_3$  et  $U_4$  qu'ils délivrent et les intensités  $I_2$ ,  $I_3$  et  $I_4$  qu'ils fournissent. Dans ces conditions, la puissance primaire  $P_1$  absorbée par le transformateur sera déterminée à l'aide de la relation

$$P_1 = 1,2 (U_2 I_2 + U_3 I_3 + U_4 I_4). \quad (1)$$

La signification des différents facteurs de cette relation est la suivante :

$I_2$  — courant anodique global consommé par le récepteur ou l'amplificateur (en ampères);

$U_2$  — tension efficace du secondaire H.T. (en volts). Lorsqu'il s'agit d'un secondaire à prise médiane (redressement des deux alternances),  $U_2$  représente la tension de l'une des moitiés;

$I_3$  et  $I_4$  — courant alternatif (valeur efficace) absorbé par les circuits de chauffage des lampes (par exemple  $I_3$ ) et de la valve (par exemple  $I_4$ ). Ces courants sont évidemment exprimés en ampères;

$U_3$  et  $U_4$  — tension efficace (en volts) fournie par les deux secondaires de chauffage.

On voit donc que la puissance primaire représente la somme des puissances secondaires, multipliée par un certain coefficient 1,2, qui tient compte de la moyenne des pertes dans le fer (noyau) et dans le cuivre (enroulements).

### Section du noyau.

La section du noyau, déterminée par le produit  $Y_1 \cdot Y_2$  comme le montre la figure 2-2 peut être calculée, en  $\text{cm}^2$ , par la relation

$$S_n = 1,2 \sqrt{P_1} \quad (2)$$

Autrement dit, la connaissance de la section  $S_n$  nous permet de déterminer l'épaisseur  $Y_2$  du paquet de tôles en connaissant la largeur  $Y_1$  de la patte centrale de la tôle choisie.

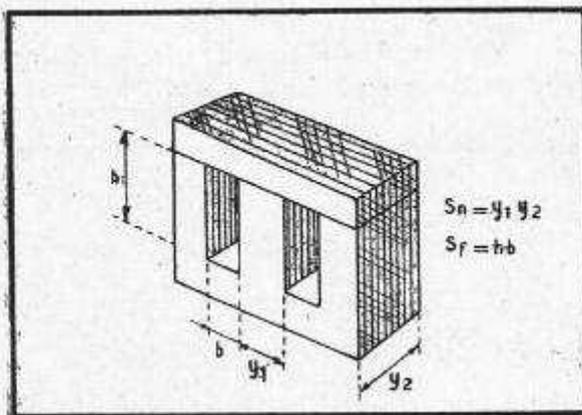


Fig. 2-2. — Dimensions dont il convient de tenir compte lors du calcul d'un circuit magnétique.

### Nombre de spires par volt.

Pour n'importe quel enroulement d'un transformateur le produit du nombre de spires  $n$ , correspondant à une tension de 1 V de cet enroulement, par la section  $S_n$  du noyau est une constante. Cette constante peut varier entre 40 et 60, suivant la qualité magnétique des tôles utilisées. Si nous adoptons une valeur moyenne, soit 50, le nombre de spires nécessaires pour 1 volt sera

$$n = \frac{50}{S_n} \quad (3)$$

où  $S_n$  doit être exprimé en  $\text{cm}^2$ .

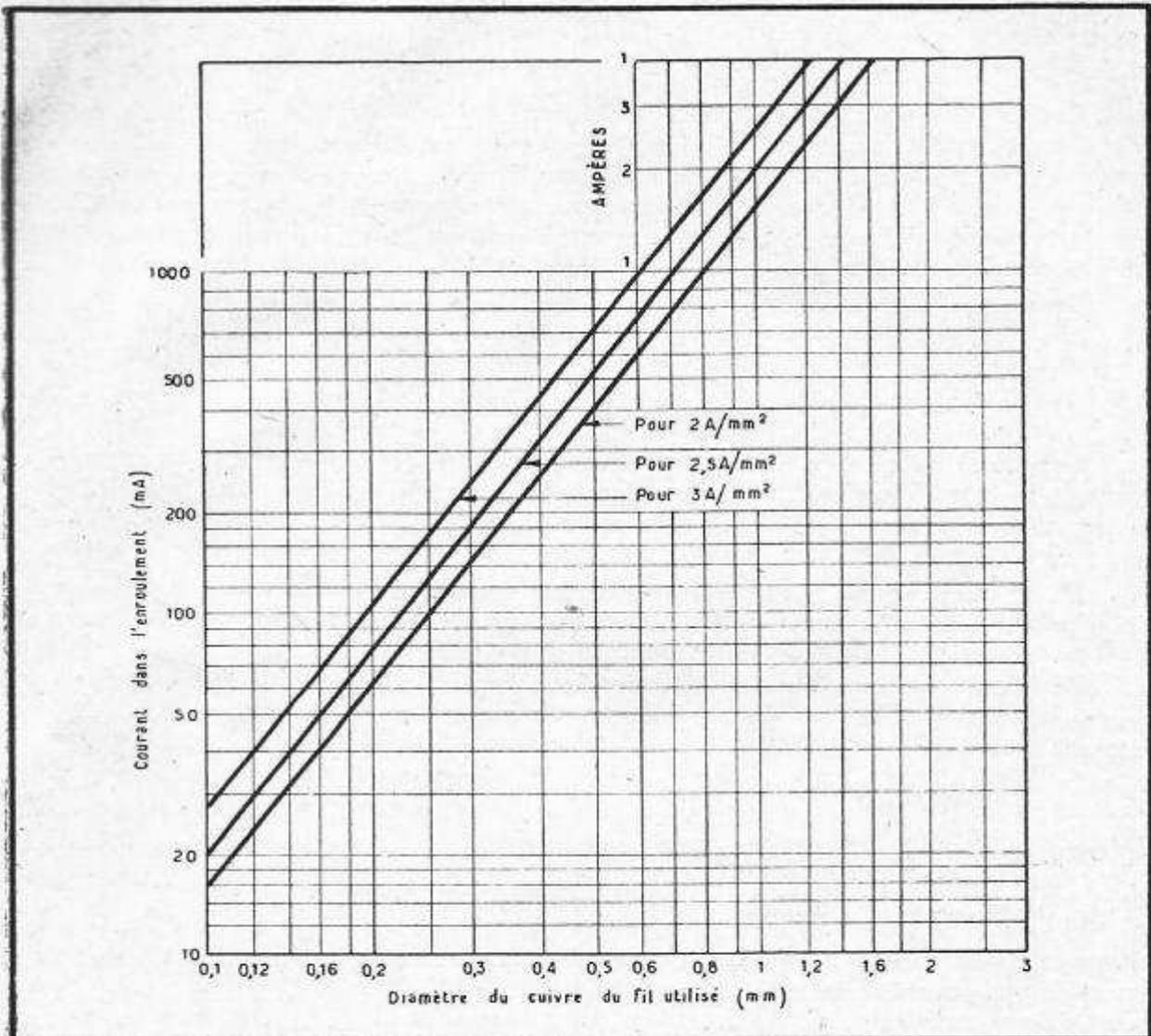


Fig. 2-3. — Abaque permettant de calculer le diamètre du fil à utiliser, en fonction de l'intensité prévue et de la densité de courant admise.

### Nombre de spires des différents enroulements.

A partir du nombre de spires par volt  $n$  nous trouvons celui de n'importe quel enroulement du transformateur, en multipliant par  $n$  la tension que doit recevoir (primaire) ou fournir (secondaire) cet enroulement. Autrement dit, le nombre de spires  $n_1$  du primaire pour  $U_1$  volts sera, par exemple,

$$n_1 = n \cdot U_1$$

et ainsi de suite. Pour un secondaire H.T. à prise médiane, le nombre total de spires sera, bien entendu,

$$n_2 = 2n \cdot U_2$$

Pour les secondaires de chauffage, parcourus par une intensité toujours assez élevée, il est indiqué d'augmenter de 5 à 10 % le nombre de spires ainsi calculé, afin de tenir compte de la chute de tension interne. On peut également, pour calculer le nombre de spires,  $n_3$  par exemple, de ces enroulements utiliser la relation

$$n_3 = 1,08 n \cdot U_3 \quad (4)$$

## Diamètre du fil.

Ce diamètre peut être déterminé à l'aide de l'abaque de la figure 2-3. La densité du courant que l'on adoptera dépend de la façon dont le transformateur calculé sera refroidi (montage tassé, proximité de tubes très chauds, etc.) et aussi de la façon dont il va être utilisé (service presque continu ou intermittent ; à la limite des possibilités ou avec une certaine marge de sécurité, etc.). Dans la plupart des transformateurs d'alimentation classiques, on peut adopter la densité de 3 A/mm<sup>2</sup>.

Le courant primaire du transformateur sera donné par la relation

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} \quad (5)$$

Si le primaire comporte des prises pour son adaptation à de différentes tensions du secteur, le calcul du diamètre du fil se fera en se basant sur la tension la plus basse et un même diamètre sera adopté pour toute la section du primaire se rapportant aux tensions du même ordre (par exemple 100 à 145 V).

En ce qui concerne un secondaire de chauffage, il est évident que l'intensité qu'il fournit est égale à la somme des intensités exigées par tous les filaments alimentés, chiffres que l'on trouve dans les recueils de caractéristiques.

Pour un secondaire H.T. prévu pour le redressement des deux alternances (avec prise médiane) le diamètre du fil doit être choisi en tenant compte de la moitié du courant prévu.

## Place occupée par les enroulements.

Lorsqu'on a calculé le nombre de spires de chaque enroulement et déterminé le diamètre du fil correspondant, il est nécessaire de s'assurer que l'ensemble de tous ces enroulements pourra se loger dans la « fenêtre » de la tôle choisie. Pour cela nous devons tout d'abord trouver la section totale du cuivre de chaque bobinage, et faire la somme de ces sections totales. Cette somme doit représenter à peu près le quart de la surface totale  $S_f$  de la fenêtre.

Le tableau 2-1 nous permet de passer instantanément du diamètre à la section. Par ailleurs, pour chaque enroulement, la section totale du cuivre est égale, bien entendu, à la section du fil utilisé multipliée par le nombre de spires.

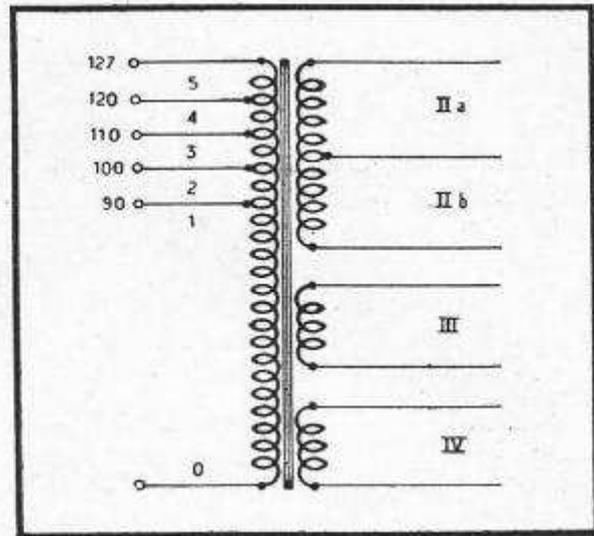
## Choix des tôles.

Il arrive souvent que l'on utilise, pour réaliser un transformateur, un circuit magnétique « de récupération » et dont il est impossible, pour telle ou telle raison, de modifier l'épaisseur, c'est-à-dire la section du noyau. Si cette section est un peu plus grande que celle dont nous avons besoin, il n'y a aucun inconvénient à l'adopter, après s'être assuré que les différents enroulements du transformateur pourront se loger dans la « fenêtre » dont on dispose.

Lorsqu'on a le choix, pour la section du noyau, entre deux circuits magnétiques, on préférera celui dont la « fenêtre » sera le mieux remplie.

Le tableau 2-2 nous indique les dimensions principales de quelques tôles courantes sur le marché français.

Fig. 2-4. — Schéma du transformateur dont le calcul est donné en exemple.



### Exemple de calcul.

Nous avons besoin de réaliser un transformateur pour alimenter un amplificateur B.F. équipé de tubes ECC 83 et EL 84. Le redressement est assuré par une valve biplaque GZ 32, et un voyant lumineux, utilisant une ampoule 6,3V-0,1 A est prévu.

Le primaire du transformateur doit être muni de prises permettant son adaptation aux tensions du secteur suivantes : 90, 100, 110, 120 et 127 V (fig. 2-4).

Le courant anodique total nécessaire est de 65 mA, soit 0,065 A. Le secondaire de chauffage des lampes devra fournir 1,05 A, et celui de chauffage de la valve 2,3 A sous 5 V.

Tableau 2-1. — CORRESPONDANCE ENTRE LE DIAMÈTRE D'UN FIL ET SA SECTION

Diamètre sans isolant (mm)	Section sans isolant (mm <sup>2</sup> )	Diamètre sans isolant (mm)	Section sans isolant (mm <sup>2</sup> )	Diamètre sans isolant (mm)	Section sans isolant (mm <sup>2</sup> )
0,10	0,0079	0,25	0,049	0,64	0,32
0,11	0,0095	0,27	0,057	0,69	0,37
0,12	0,011	0,29	0,061	0,74	0,43
0,13	0,013	0,31	0,076	0,80	0,50
0,14	0,015	0,33	0,086	0,86	0,58
0,15	0,018	0,35	0,096	0,90	0,64
0,16	0,020	0,38	0,11	0,96	0,72
0,17	0,023	0,41	0,13	1	0,79
0,18	0,026	0,44	0,15	1,1	0,94
0,19	0,028	0,47	0,17	1,2	1,1
0,20	0,031	0,51	0,20	1,3	1,3
0,21	0,035	0,55	0,24	1,4	1,5
0,23	0,042	0,59	0,27	1,5	1,8

### PUISSANCE PRIMAIRE

Nous avons  $U_2 = 250$  V et, par conséquent, en appliquant la relation (1), nous obtenons

$$P_1 = 1,2 (250 \cdot 0,065 + 6,3 \cdot 1,05 + 5 \cdot 2,3) = 1,2 \cdot 34,4 = 41,5 \text{ W environ.}$$

*SECTION DU NOYAU*

En utilisant la formule (2) nous trouvons

$$S_n = 1,2 \sqrt{41,5} = 1,2 \cdot 6,45 = 7,75 \text{ cm}^2.$$

*NOMBRE DE SPIRES PAR VOLT*

Par la relation (3) nous calculons

$$n = 50/7,75 = 6,45.$$

*NOMBRE DE SPIRES AU PRIMAIRE*

La section 0-1 du primaire (fig. 2-4) aura  $90 \cdot 6,45 = 580$  spires.

Les sections 1-2, 2-3 et 3-4 auront 64,5 spires chacune (10 volts par section), tandis que la section 4-5 aura  $7 \cdot 6,45 = 45$  spires. Au total, le primaire aura

$$580 + 3 \cdot 64,5 + 45 = 818,5 \text{ spires.}$$

*NOMBRE DE SPIRES AU SECONDAIRE H.T.*

Ce secondaire, à prise médiane, est constitué par les sections IIa et IIb de la figure 2-4. Chaque section doit donner 250 V et comportera par conséquent

$$250 \cdot 6,45 = 1610 \text{ spires,}$$

soit 3220 spires au total.

*NOMBRE DE SPIRES AU SECONDAIRE CHAUFFAGE LAMPES*

Ce secondaire doit donner 6,3 V. Par conséquent il aura

$$1,08 \cdot 6,3 \cdot 6,45 = 44 \text{ spires.}$$

en utilisant la formule (4).

*NOMBRE DE SPIRES AU SECONDAIRE CHAUFFAGE VALVE*

En utilisant la même formule que ci-dessus, nous obtenons

$$1,08 \cdot 5 \cdot 6,45 = 35 \text{ spires.}$$

*COURANT DANS LE PRIMAIRE*

La relation (5) nous donne  $I_1 = 41,5/90 = 0,46 \text{ A.}$

*DIAMETRE DU FIL*

En adoptant une densité de 3 A/mm<sup>2</sup> nous déterminons, d'après le graphique de la figure 2-3 :

Primaire .....	0,55 mm ;
Secondaire H.T. ....	0,15 mm ;
Chauffage lampes .....	0,86 mm ;
Chauffage valve .....	1,2 mm.

*SECTION TOTALE DU CUIVRE*

Le nombre de spires calculé pour les différents enroulements et le tableau de correspondance diamètre-section nous permettent de calculer :

Tableau 2-2. — CERTAINES CARACTERISTIQUES DE QUELQUES TOLES COURANTES SUR LE MARCHE FRANÇAIS

N°	Largeur $Y_1$ (mm)	Surface $S_f$ (mm <sup>2</sup> )	N°	Largeur $Y_1$ (mm)	Surface $S_f$ (mm <sup>2</sup> )
1	14	169	14	21	965
2	15	120	15	21,5	615
3	15	270	16	24	895
4	16	192	17	25	470
5	17,5	227	18	25	1 260
6	18,5	187	19	25	1 300
7	19	190	20	26	755
8	19	261	21	28	1 360
9	20	300	22	28	1 820
10	20	925	23	30	1 630
11	20	1 240	24	30	1 680
12	21	270	25	30	1 820
13	21	815	26	31	2 500

Pour le primaire. — Il faut 818,5 spires à 0,24 mm<sup>2</sup>, soit 197 mm<sup>2</sup> ;

Pour le secondaire H.T. — Il faut 3220 spires à 0,018 mm<sup>2</sup>, soit 58 mm<sup>2</sup> ;

Pour le secondaire chauffage lampes. — Il faut 44 spires à 0,58 mm<sup>2</sup>, soit 26 mm<sup>2</sup> ;

Pour le secondaire chauffage valve. — Il faut 35 spires à 1,1 mm<sup>2</sup>, soit 39 mm<sup>2</sup>.

Cela nous fait au total : 197 + 58 + 26 + 39 = 320 mm<sup>2</sup>.

#### CHOIX DU NOYAU

Etant donné la place occupée par le cuivre, nous avons besoin de tôles dont la « fenêtre » ait une surface  $S_f$  de  $320 \times 4 = 1280$  mm<sup>2</sup>. Nous voyons que les tôles n° 18 du tableau peuvent convenir à la rigueur. Comme la largeur  $Y_1$  est de 25 mm, nous devons constituer un paquet d'épaisseur  $Y_2$  telle que

$$Y_2 = S_n / Y_1 = 775 / 25 = 31 \text{ mm.}$$

#### Quelques remarques.

Nous pouvons facilement nous rendre compte que le fait d'utiliser une valve telle que GZ 32 alourdit d'une façon très sensible le transformateur nécessaire. En faisant appel à un redresseur « sec » nous pouvons réaliser une économie certaine à tous les points de vue.

C'est ainsi que la puissance  $P_1$  ne sera plus que de 27,5 W et la section  $S_n$  de 6,3 cm<sup>2</sup>. La surface totale du cuivre sera de l'ordre de 250 mm<sup>2</sup>, ce qui nous permettra de choisir une tôle dont la « fenêtre » est de quelque 1000 mm<sup>2</sup>. Bien qu'une telle tôle ne figure pas dans le tableau que nous avons dressé plus haut, il est évident qu'elle existe, car le tableau en question est loin d'être complet, bien entendu.

#### Réalisation.

Il est particulièrement commode d'effectuer le bobinage sur une carcasse en press-pahn ou en bakélite, que l'on peut trouver, par exemple, chez Isolectra, 9, rue du Colonel-Raynal, Montreuil (Seine).

Le bobinage lui-même se fera à spires rangées, chaque couche de fil étant séparée de la suivante à l'aide d'une feuille de papier isolant (craft pour le primaire et les secondaires de chauffage ; papier cristal pour le secondaire H.T.).

Le primaire doit être bobiné en premier lieu, et isolé par 4-5 couches de papier craft sur lequel on bobinera l'écran électrostatique, constitué par une couche de fil émaillé 0,3 à 0,4 mm, dont l'une des extrémités sera « sortie » et réunie à la masse.

Après 4-5 nouvelles couches de craft, on bobinera le secondaire H.T., sur lequel on remettra de nouveau 5 à 6 couches de craft. On terminera par les secondaires de chauffage.

### Echauffement excessif.

Un transformateur d'alimentation « chauffe » d'une façon excessive pour deux raisons. Tout d'abord, il peut avoir été mal calculé, et débiter un courant dépassant ses possibilités. Ensuite, il peut présenter un court-circuit interne entre spires, le plus souvent entre deux couches voisines d'un enroulement.

Dans tous les cas, la mesure de la résistance ohmique d'un enroulement à froid d'abord, à chaud ensuite, nous permettra de nous faire une idée sur ce qui se passe réellement, et en premier lieu nous indiquera la température interne du transformateur.

En effet, on sait que la résistance d'un fil de cuivre augmente avec la température. Par conséquent, si nous mesurons la résistance d'un enroulement d'abord à la température ambiante, c'est-à-dire à froid, et ensuite après un temps de fonctionnement suffisamment prolongé, c'est-à-dire à chaud, nous pouvons calculer très facilement l'accroissement de la température par rapport à celle du départ.

Si nous désignons par  $t$  cet accroissement, par  $t_0$  la température initiale, par  $r$  la résistance à froid de l'enroulement mesuré et par  $R$  la même résistance à chaud, le calcul se fera par la relation

$$t = (235 + t_0) \left( \frac{R}{r} - 1 \right).$$

Il est particulièrement commode d'opérer sur le secondaire H.T., car sa résistance ohmique se trouve dans les limites facilement mesurables (600 à 800 ohms pour la totalité de l'enroulement, le plus souvent).

Par exemple, si en mesurant d'abord à froid, à  $t_0 = 15^\circ \text{C}$  nous trouvons  $r = 660 \Omega$ , et qu'en répétant la même mesure après une heure de fonctionnement nous trouvons  $R = 860 \Omega$ , l'accroissement de la température sera

$$t = (235 + 15) \left( \frac{860}{660} - 1 \right) = 250 \cdot 0,3 = 75^\circ \text{C}$$

et la température à l'intérieur du transformateur sera donc de  $15 + 75 = 90^\circ \text{C}$ . Normalement, cette température peut être considérée admissible tant qu'elle ne dépasse pas  $65$  à  $75^\circ \text{C}$  ou, plus exactement, tant que son accroissement  $t$  reste inférieur à  $50$ - $55^\circ \text{C}$ , mais il n'est pas rare de voir, lorsqu'il s'agit de transformateurs de qualité « douteuse », des accroissements  $t$  de l'ordre de  $75$  à  $80^\circ \text{C}$ .

Si la résistance mesurée à chaud ne diffère que fort peu de celle mesurée à froid, mais qu'en même temps le transformateur chauffe beaucoup, cela pourrait signifier qu'il se produit un court-circuit interne en fonctionnement. Il peut être possible de le localiser, s'il s'agit du secondaire H.T., en mesurant séparément la résistance de chaque demi-secondaire. Mais il ne faut pas oublier qu'un court-circuit entre spires peut se produire également dans le primaire ou même dans l'un des secondaires de chauffage.