

LA TECHNIQUE
DU
CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE

SES APPLICATIONS DOMESTIQUES
ET INDUSTRIELLES

PAR

Charles FRÉROT

Ingenieur diplômé de l'Institut Électrotechnique de Grenoble
Sous-Directeur aux Usines et Fonderies Arthur Martin à Rovin (Ardennes)

TOME I : THÉORIES ET CALCULS

EN ANNEXE : *Une courte étude sur la transmission de la chaleur
et sur les systèmes d'unités*

PRÉFACE

de **H. PARODI**

Membre de l'Institut



PARIS

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-ÉDITEUR

LIBRAIRE DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Quai des Grands-Augustins, 55

1950

TROISIÈME PARTIE.

CHAPITRE I.

RÉSISTANCES MÉTALLIQUES.

Si l'on considère un conducteur chauffant de résistance R constitué par un fil résistant de section circulaire, tendu par exemple horizontalement dans l'air calme, et si l'on suppose ce conducteur parcouru par un courant électrique d'intensité I , la quantité de chaleur dégagée par le courant I , pendant le temps t , est, en régime établi, donnée par la loi de Joule et par la formule

$$Q = 0,24 RI^2 t \text{ microthermies ou cal.}$$

Nous avons vu qu'il était plus rationnel d'exprimer une quantité de chaleur avec la même unité que le travail ou l'énergie ⁽¹⁾ et que l'on pouvait écrire plus simplement

$$Q = RI^2 t \text{ joules.}$$

Dans ces expressions :

R est la résistance du conducteur, à la température considérée, en ohms;

I est l'intensité du courant qui le traverse, en ampères;

t est le temps que dure le passage du courant, en secondes.

En conservant la seconde pour unité de temps, le débit de chaleur ⁽²⁾ peut alors s'exprimer en joules par seconde, c'est-à-dire en watts.

Si \mathcal{E} désigne ce débit, on a

$$(1) \quad \mathcal{E} = RI^2 \text{ watts.}$$

⁽¹⁾ Une quantité de chaleur est, en effet, de même espèce qu'une énergie.

⁽²⁾ Quantité de chaleur dégagée dans l'unité de temps (voir ci-après p. 454).
Le débit de chaleur, ou flux de chaleur, est une quantité homogène à une puissance.

La résistance R dépend de la nature de l'alliage et des dimensions du fil.

Si l désigne la longueur de ce fil et s sa section, et si ρ est la résistivité du métal, R est, en effet, définie par la relation

$$R = \rho \frac{l}{s},$$

ou par la relation équivalente

$$R = \frac{l}{\gamma s},$$

en désignant par γ la conductivité électrique du métal.

La résistivité d'un alliage est généralement donnée en microhms centimètre par centimètre carré et il est par ailleurs commode, dans la pratique, de prendre pour unité de longueur le mètre et pour unité de section le millimètre carré. Dans ces conditions, la relation définissant la résistance devient

$$R = \rho \frac{l}{s} 10^{-2},$$

R est la résistance du fil, en ohms;

ρ la résistivité de l'alliage considéré, en microhms centimètre par centimètre carré;

l la longueur du fil, en mètres;

s sa section, en millimètres carrés.

Si ρ est exprimé en ohms par mètre et par millimètre carré, l'expression de la résistance devient

$$R = \rho \frac{l}{s},$$

dans laquelle

l est la longueur du fil, exprimée comme précédemment en mètres;

s sa section, en millimètres carrés.

Nous avons vu, d'autre part, que la résistivité d'un conducteur variait avec la température, suivant une loi qui pouvait généralement se réduire à la forme simple suivante :

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t),$$

dans laquelle :

ρ_0 désigne la résistivité de l'alliage considéré, à la température 0° ;

ρ_t la résistivité de l'alliage considéré, à la température t° ;

α un coefficient de température moyen, entre deux limites extrêmes de température.

Nous verrons, par la suite, que les fabricants de fils résistants fournissent des courbes donnant, d'une façon plus précise, la variation thermique de la résistivité de leurs alliages en fonction de la température.

Revenons donc au cas considéré d'un fil tendu dans l'air calme et cherchons à exprimer la relation qui lie l'intensité du courant qui le traverse à la température qu'il atteint en régime établi, c'est-à-dire lorsque l'équilibre de température est obtenu.

La chaleur dégagée par effet Joule, à partir du moment où le fil est mis sous tension, se traduit par une élévation de température du conducteur jusqu'à cette température d'équilibre, et par une émission d'un flux énergétique par rayonnement et par convection. Cette émission, qui, en régime permanent, est proportionnelle au temps et à la surface du fil, ne dépend que de la température et de la nature de cette surface, elle se fait aux dépens de l'énergie que le fil reçoit et cesse avec celle-ci. Si le courant par exemple est interrompu le fil se refroidit et sa température s'abaisse jusqu'à la température ambiante.

On exprime l'intensité de cette émission par un nombre de joules par seconde ou de watts, que l'on ramène plus généralement à l'unité de surface du conducteur, c'est-à-dire à un nombre de watts par centimètre carré : ce nombre exprime alors la densité de flux thermique (1).

La densité superficielle de rayonnement par unité de surface est donnée par la loi de Stéfán et par la formule (2)

$$Q = \sigma(\theta^4 - \theta_0^4) \text{ W : cm}^2,$$

dans laquelle :

σ est une constante d'émission qui dépend des unités choisies et de la nature de la surface considérée;

θ est la température absolue du fil;

θ_0 est la température absolue de l'ambiance.

Si S désigne alors la surface du fil, le débit de chaleur correspondant sera donc de la forme

$$(2) \quad Q' = \sigma(\theta^4 - \theta_0^4) S \text{ watts.}$$

L'expérience prouve cependant qu'il est pratiquement impossible

(1) Ou densité superficielle de flux.

(2) Voir ci-après p. 482.

de séparer la convection du rayonnement et, bien que nous ayons considéré un fil tendu en air calme, il existe toujours des courants de gravité, créés par la différence des températures du fil et de l'air ambiant, dont il faut tenir compte.

La puissance calorifique échangée par convection naturelle est donnée par la relation de Lorentz (1) :

$$\mathcal{E}^c = \Lambda (\theta - \theta_0)^{1,25},$$

dans laquelle θ_0 est la température de l'air en dehors des courants de gravité.

Cette relation est valable pour des températures jusqu'à 600 et 700° C. Pour des températures plus élevées, celles auxquelles peuvent notamment être portés des fils résistants, la variation de la puissance dissipée par convection, en fonction de la température, est plus rapide que celle donnée par la formule ci-dessus, l'exposant 1,25 doit être remplacé par un exposant supérieur. En désignant ce coefficient par $1 + m$, avec généralement $0,25 < m < 0,50$, on a

$$\mathcal{E}^c = \Lambda (\theta - \theta_0)^{1+m}.$$

Λ est un facteur qui dépend à la fois de la forme de la surface et de l'orientation du conducteur considéré; son calcul exact est à peu près impossible.

Supposons que l'on puisse mettre l'expression précédente sous la forme

$$(3) \quad \mathcal{E}^c = \varepsilon (\theta - \theta_0)^{1+m} S \text{ watts.}$$

En vertu du principe de l'addition des quantités de chaleur, les relations (1), (2) et (3) permettent d'écrire, à partir du moment où le régime est établi, c'est-à-dire à partir du moment où toute la chaleur développée dans le fil par effet Joule est dissipée par rayonnement et convection :

$$(4) \quad \mathcal{E} = \mathcal{E}^r + \mathcal{E}^c.$$

Soit

$$(5) \quad RI^2 = [\varepsilon (\theta^2 - \theta_0^2) + \varepsilon (\theta - \theta_0)^{1+m}] S,$$

avec les réserves ci-dessus.

$$\theta = \theta + 2,3,$$

$$\theta_0 = \theta_0 + 2,3.$$

(1) Voir ci-après p. 470.

Si l'on désigne alors par d le diamètre du fil et par s sa section, on a

$$S = \pi d^2$$

et

$$s = \frac{\pi d^2}{4},$$

la relation (5) devient, en posant

$$\sigma(\theta^+ - \theta_0^+) + \varepsilon(\theta - \theta_0)^{1+m} = \Phi(\theta),$$

$$RI^2 = \Phi(\theta) S$$

et en remarquant que

$$R = \rho \frac{l}{\frac{\pi d^2}{4}},$$

on a

$$I^2 = \frac{\pi^2 d^2}{4\rho} \Phi(\theta)$$

$$I = \frac{\pi}{2} d \sqrt{\frac{d}{\rho} \Phi(\theta)},$$

relation très complexe qui lie la température à l'intensité, mais qui ne présente que peu d'intérêt pratique à cause de l'indétermination des coefficients σ , A et ε .

Il n'est pas possible, en effet, de déterminer par le calcul, avec exactitude, les conditions de fonctionnement d'un fil. Les fabricants fournissent d'ailleurs, pour les différents alliages employés, des tables à double entrée, donnant en fonction du diamètre du fil et de la température atteinte en régime, l'intensité du courant correspondant. Ces tables sont le résultat de mesures expérimentales.

REMARQUE. — On voit ainsi, qu'à un régime établi correspond une température du fil bien déterminée.

Si une perturbation intervient, à partir du moment où ce régime est atteint, la température du fil est modifiée.

Un courant d'air, par exemple, est susceptible de refroidir le fil et d'en abaisser la température. Si le courant d'air est régulier et si la température de l'air est constante, un nouveau régime d'équilibre s'établit et la température du fil se fixe à une nouvelle valeur également bien déterminée, inférieure à la précédente.

La température d'équilibre est d'autant moins élevée que la vitesse du courant d'air est plus grande. La résistance correspondante du fil suit alors la température d'après la loi que nous avons indiquée par ailleurs.

La variation de la résistance peut donc déceler le sens de la perturbation et la mesurer dans bien des cas.

Il existe, d'ailleurs, des appareils basés sur ce principe dans lesquels le changement de la température et de la résistance électrique d'un fil de platine chauffé par effet Joule vers $1\ 000^{\circ}$ C, à partir d'un état d'équilibre, sert, par exemple, à déceler la présence de gaz contenus dans l'air et à en mesurer la teneur (1).

Ces appareils comportent généralement un fil témoin et un fil d'expérience identique, chauffés par le même courant électrique.

Lorsque le fil d'expérience est soumis à une perturbation quelconque, courant d'air ou air vicié par d'autres gaz, sa température varie : cette variation de température du fil produit une variation de résistance, qu'il est possible de mesurer au moyen d'un pont de Wheatstone, dont la branche adjacente au fil d'expérience est constituée par le fil témoin soustrait, lui, à toutes actions perturbatrices.

Lorsque l'action perturbatrice est due à un courant d'air, on peut ainsi en mesurer la vitesse, c'est le principe de l'anémomètre à fil chaud ; lorsque cette action est due à la présence d'autres gaz, on peut, sous certaines conditions, en déterminer la nature et, quelquefois même, en mesurer la teneur.

Ces gaz, au contact du fil chaud d'expérience, peuvent, en effet, donner lieu à des réactions différentes : réactions exothermiques, dans certains cas, capables d'augmenter la température du fil de platine d'expérience et, par voie de conséquence, sa résistance ; réactions endothermiques, dans d'autres cas, lorsque les gaz sont dissociés au contact du fil chaud dont la température de fonctionnement se trouve diminuée en même temps que sa résistance.

Parmi les premiers se placent CO , H_2S , H , NH_3 , etc. ; parmi les seconds : CO_2 , H_2O , CCl_4 , etc.

Recherche de la température de fonctionnement d'un conducteur chauffant protégé.

Ce problème, très important, se pose toutes les fois que le conducteur chauffant n'est pas accessible et qu'il n'est, par conséquent, pas possible d'en mesurer directement la température au moyen d'un thermo-couple ou d'un pyromètre optique. Il se pose en particulier, lorsque le fil de résistance est enrobé dans un ciment réfractaire,

(1) Il existe également sur le même principe des anémomètres à fils chauds.

comme c'est le cas, par exemple, pour les plaques de cuisson en fonte, les thermo-tubes, ou autres éléments similaires.

Pour pouvoir résoudre ce problème, il est nécessaire, comme nous allons le voir, de déterminer, au préalable, la variation de la résistivité de ce fil en fonction de la température.

On peut se reporter, pour cela, aux courbes caractéristiques fournies par les fabricants, mais on peut aussi, et sans doute avec plus de précision, déterminer cette variation à partir d'un conducteur chauffant de référence, utilisant le même fil que l'élément enrobé.

Ce conducteur de référence peut alors fonctionner à l'air libre, tendu, par exemple, horizontalement dans l'air calme ou, de préférence et pour se rapprocher davantage des conditions de fonctionnement du conducteur enrobé, se présenter sous la forme d'un boudin, de mêmes caractéristiques que celles de cet élément (même diamètre, même écartement de spires), logé sur un support réfractaire du genre de ceux décrits ci-après figure 14 b, p. 268.

Dans l'un et l'autre cas, le fil de résistance reste accessible et il devient possible d'en mesurer la température. On peut le faire assez commodément et avec une assez grande précision, au moyen d'un couple très fin et très léger, pour ne pas en altérer le régime de fonctionnement au point considéré.

Le corps de chauffe constitué, comme il vient d'être dit, à partir de ce conducteur de référence, peut être mis sous tension et porté à une température de régime bien déterminée, fixée à l'avance, et maintenue constante par le passage d'un courant électrique dont l'intensité peut être réglée à volonté par un dispositif approprié. Pour chaque valeur de la température de régime, on peut mesurer, d'une façon précise, la résistance correspondante R_0 du conducteur. Cette résistance connue, on en déduit la résistivité ρ_0 à la température considérée θ , au moyen de la formule

$$R_0 = \rho_0 \frac{l}{s} 10^{-2},$$

l et s peuvent être mesurées très exactement avant l'essai et, pour plus de précision, le fil peut être pesé.

On effectue les mêmes mesures pour différentes températures de régime; on en déduit les valeurs correspondantes de ρ et il est facile de tracer la courbe $\rho = f(\theta)$. La connaissance de cette courbe permet alors de déduire d'une simple mesure de résistance la température atteinte par le même fil à l'état enrobé.

Il suffit, en effet, de mesurer, dans les mêmes conditions que précédemment, la résistance R_e du conducteur enrobé, pour un régime

de fonctionnement bien déterminé du corps de chauffe considéré (1), et d'en déduire la valeur correspondante ρ_x de la résistivité, au moyen de la même formule que ci-dessus :

$$\rho_x = R_x \frac{s_1}{l_1} 10^2.$$

s_1 et l_1 peuvent être aussi mesurés très exactement avant enrobage de ce corps de chauffe.

L'abscisse θ_x correspondant à l'ordonnée ρ_x donne, sur la courbe précédemment obtenue $\rho = f(\theta)$, la valeur de la température θ_x que l'on cherche.

REMARQUE. — La méthode précédente peut être utilisée lorsque la variation de la résistivité est une fonction continue et croissante de la température, c'est-à-dire lorsque le coefficient de variation $\frac{d\rho}{d\theta}$ est positif.

Nous verrons qu'il n'en est pas toujours ainsi (voir, par exemple, l'allure de cette variation p. 220 pour le nickel-chrome) : à une même valeur de la résistivité correspond, souvent, plusieurs valeurs de la température, il peut donc y avoir indétermination.

Pour lever cette indétermination, il suffit de suivre la variation de la résistance du conducteur enrobé au fur et à mesure que sa température s'élève, en effectuant plusieurs mesures de façon à connaître, à chaque instant, à quel endroit de la courbe on se trouve, ou utiliser une qualité de fil dont la variation de la résistivité ne présente pas l'anomalie du nickel-chrome, par exemple, une qualité de remplacement riche en fer.

Échauffement d'un conducteur.

Nous venons d'étudier succinctement le régime permanent atteint par un conducteur traversé par un courant électrique, à partir du moment où il y a égalité entre la chaleur dissipée par convection et par rayonnement et la chaleur développée par effet Joule sous forme d'énergie calorifique.

Nous nous proposons maintenant d'étudier le régime variable correspondant à la période de démarrage, durant laquelle la chaleur fournie par le passage du courant sert à élever la température du conducteur. Nous admettrons que cette période est toujours de très courte durée,

(1) Pour une plaque chauffante, par exemple, lorsque la plaque fonctionne avec casserole d'eau, ou, au contraire, à vide, sans casserole d'eau.

de façon à pouvoir négliger les pertes de chaleur pendant l'intervalle de temps correspondant.

Considérons donc un conducteur de résistance R , traversé par un courant électrique dont la valeur instantanée de l'intensité est représentée, à un instant quelconque, par i ; la quantité de chaleur dégagée par ce courant, exprimée en joules, pendant un temps infiniment petit dt , est

$$(1) \quad R i^2 dt,$$

la quantité de chaleur dégagée pendant une période T est donc, dans le cas le plus général,

$$\int_0^T R i^2 dt$$

et pendant une seconde

$$(2) \quad \frac{1}{T} \int_0^T R i^2 dt.$$

Reprenons donc l'expression (1) ci-dessus, donnant la quantité de chaleur dégagée pendant le temps dt et désignons par :

$d\theta$, l'élévation de température correspondante du conducteur;

P , le poids de ce conducteur;

c , sa chaleur spécifique.

On a évidemment

$$R i^2 dt = P c d\theta$$

d'où

$$(3) \quad d\theta = \frac{1}{P c} R i^2 dt.$$

Mais la résistance varie avec la température; nous avons vu, en effet, que

$$R = R_0(1 + \alpha\theta)$$

et

$$R_0 = \rho_0 \frac{l}{s},$$

on a donc

$$R = \rho_0 \frac{l}{s} (1 + \alpha\theta),$$

en portant cette valeur dans (3), il vient

$$(4) \quad d\theta = \frac{1}{P c} \rho_0 \frac{l}{s} (1 + \alpha\theta) i^2 dt,$$

et, en définitive, en remarquant que

$$P = l s \varpi,$$

l désignant la longueur du conducteur,

s sa section,

ϖ la densité du métal,

on a

$$\frac{d\theta}{1 + \alpha\theta} = \frac{\rho_0}{c \varpi} \frac{1}{s^2} i^2 dt$$

et en posant

$$\frac{\rho_0}{c \varpi} = k,$$

il vient

$$\frac{d\theta}{1 + \alpha\theta} = \frac{k}{s^2} i^2 dt.$$

Soit

$$(5) \quad \frac{1}{\alpha} \text{Log}_e(1 + \alpha\theta) = \frac{k}{s^2} \int i^2 dt.$$

1° Cas du courant continu. — $i = \text{const}$:

$$(6) \quad \frac{1}{\alpha} \text{Log}_e(1 + \alpha\theta) = \frac{k}{s^2} i^2 t,$$

et en remarquant que $\frac{i}{s}$ représente la densité de courant qui traverse le conducteur

$$\frac{i}{s} = \delta,$$

la relation (6) ci-dessus devient

$$\frac{1}{\alpha} \text{Log}_e(1 + \alpha\theta) = k \delta^2 t,$$

d'où

$$(7) \quad \theta = \frac{e^{\alpha k \delta^2 t} - 1}{\alpha}.$$

2° Cas du courant alternatif. — Courant de la forme

$$i = I \cos(\omega t - \varphi),$$

la relation (5) donne

$$\frac{1}{\alpha} \text{Log}_e(1 + \alpha\theta) = \frac{k}{s^2} \int I^2 \cos^2(\omega t - \varphi) dt.$$

Pour intégrer cette fonction, nous allons reprendre l'expression de sa valeur moyenne, pendant une période ($T = \frac{2\pi}{\omega}$) que nous avons définie précédemment [expression (3) ci-dessus], on a alors

$$\frac{1}{2} \text{Log}_e(1 + \alpha^2) = \frac{k}{s^2} \frac{1}{T} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} I^2 \cos^2(\omega t - \varphi) dt,$$

mais

$$\cos^2(\omega t - \varphi) = \frac{1 + \cos 2(\omega t - \varphi)}{2},$$

on a donc

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} I^2 \cos^2(\omega t - \varphi) dt &= \frac{I^2}{T} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \frac{1 + \cos 2(\omega t - \varphi)}{2} dt \\ &= \frac{I^2}{T} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \frac{dt}{2} + \frac{I^2}{T} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \frac{\cos 2(\omega t - \varphi)}{2} dt \\ &= \frac{I^2}{2T} \left[t \right]_0^{\frac{2\pi}{\omega}} + \frac{I^2}{2T} \left[\frac{\sin 2(\omega t - \varphi)}{2\omega} \right]_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \\ &= \frac{I^2}{2} + \frac{I^2}{4\omega T} [\sin 2(2\pi - \varphi) - \sin 2(-\varphi)] = \frac{I^2}{2}. \end{aligned}$$

Cette quantité est, par définition, le carré de la valeur efficace I_{eff} de la fonction sinusoïdale. On a

$$I_{\text{eff}}^2 = \frac{I^2}{2}.$$

La valeur efficace d'un courant est donc définie par l'expression

$$I_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt,$$

elle représente l'intensité d'un courant continu qui, parcourant un conducteur de même résistance, dégagerait la même quantité de chaleur que le courant alternatif considéré.

Reprenant l'expression (5) ci-dessus, on a finalement

$$\frac{1}{\alpha} \text{Log}_e(1 + \alpha^2) = \frac{k}{s^2} I_{\text{eff}}^2 t$$

et comme précédemment

$$(8) \quad \theta = \frac{e \frac{\alpha I_{\text{eff}}^2 t}{s^2} - 1}{\alpha} = \frac{e \alpha I_{\text{eff}}^2 t - 1}{\alpha}.$$

REMARQUE I. — Les expressions (7) ou (8) ci-dessus permettent de suivre la variation $\theta = f(t)$ lorsqu'on fait varier δ .

Il est même commode, pour un alliage donné, de tracer le faisceau des courbes correspondantes.

REMARQUE II. — Si ρ est la résistivité d'un conducteur (en ohms par centimètre) et δ la densité du courant (en ampères par centimètre carré), la puissance calorifique dégagée par unité de volume est $\rho \delta^2$ (en watts par centimètre cube).

REMARQUE III. — Cette théorie n'est pas intéressante en pratique, tout au moins dans le domaine des applications du chauffage électrique : il est peu intéressant, en effet, de connaître le temps à partir duquel un élément atteint sa température de régime. Ce temps est généralement très court, quelques dizaines de secondes. Son calcul exact présenterait d'ailleurs de nombreuses difficultés, puisqu'il faudrait faire intervenir les pertes de chaleur émises par le conducteur pendant la période de démarrage considérée, pertes de chaleur qui varient avec la température. Il faudrait alors tenir compte des coefficients de rayonnement et de convection qui sont, nous l'avons dit, assez peu précis.

REMARQUE IV. — Si la théorie que nous venons d'exposer ne paraît pas devoir être retenue dans le domaine pur du chauffage électrique, elle présente, par contre, un très grand intérêt lorsqu'on cherche à déterminer, par exemple, les températures d'échauffement des fusibles, dues à des intensités de courts-circuits. Il suffit alors, dans la formule générale (5), de remplacer i par l'expression du courant de court-circuit de la forme

$$i = I(e^{-at} - \cos \omega t)$$

ou

$$i = [(I_t - I_p) e^{-bt} + I_p] \cos \omega t - I_t e^{-at},$$

la résolution des intégrales correspondantes ne présentant d'ailleurs pas de difficultés.

Étude analytique de la variation de la résistance d'un conducteur lorsqu'il est soumis à un effort mécanique ou à une variation de température.

Nous avons admis, dans tout ce qui précède, que la résistance d'un conducteur variait avec la température parce que, seule, sa résistivité était fonction de cette température.

Cette hypothèse simplificatrice est très suffisante dans toutes les applications du chauffage électrique.

En réalité, et en analysant plus à fond les phénomènes, il est bien évident que toute cause capable de modifier l'un des trois facteurs ρ , l ou s de la formule

$$(1) \quad R = \rho \frac{l}{s},$$

est aussi susceptible d'entraîner une variation de la résistance électrique R d'un conducteur.

Aux variations de ρ déjà examinées, doivent donc s'ajouter tout au moins théoriquement, les variations de l et de s .

Ces variations sont faibles, certes, et l'étude suivante a précisément pour but d'en apprécier l'ordre de grandeur et de déterminer dans quelles limites et dans quels cas particuliers, il y a lieu d'en tenir compte. Elles se produisent notamment et d'ailleurs souvent simultanément, lorsqu'un conducteur est soumis à un effort ou à des sautes de température, car sa longueur et sa section sont généralement modifiées par ces contraintes.

Il n'est pas question d'en tenir compte dans le domaine du chauffage électrique qui nous intéresse, mais ces variations ne doivent pas être négligées dans certains appareils de mesure de précision et nous avons pensé qu'il était intéressant d'en étudier ici le principe (1).

Nous allons examiner séparément l'influence de l'effort et l'influence de la température.

a. Influence de l'effort. — Si F est la force qui caractérise cet effort, la relation (1) ci-dessus permet d'écrire (2) :

$$(2) \quad \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_F = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta s}{s}.$$

Désignons alors par V le volume du fil, on a

$$V = sl$$

et

$$(3) \quad \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta s}{s} + \frac{\Delta l}{l}.$$

(1) Ce principe a été notamment mis à profit dans l'extensomètre à résistance électrique qui a fait ses preuves ces dernières années, à l'occasion des problèmes de constructions aéronautiques et navales posés par la guerre.

(2) En admettant que $\frac{\Delta \rho}{\rho} = 0$, c'est-à-dire que la résistivité du métal ne varie pas sous l'influence de l'effort.

En additionnant (2) et (3) il vient

$$(4) \quad \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_F + \left(\frac{\Delta V}{V}\right) = 2 \frac{\Delta l}{l}$$

Si, en particulier, les variations de dimensions du fil se font à volume constant, $\Delta V = 0$, et

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_F = 2 \frac{\Delta l}{l}$$

la variation relative de la résistance est alors deux fois plus grande que la variation correspondante de la longueur du fil.

Mais, en général, le volume varie évidemment d'une façon quelconque. Désignons alors par η le coefficient de contraction transversale (coefficient de Poisson), on sait que si d désigne le diamètre du fil

$$\frac{\Delta v}{v} = 2 \frac{\Delta d}{d} \quad \text{avec} \quad \frac{\Delta d}{d} = -\eta \frac{\Delta l}{l}$$

et d'après (3) :

$$(5) \quad \frac{\Delta V}{V} = (1 - 2\eta) \frac{\Delta l}{l}$$

Les relations (4) et (5) permettent d'écrire

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_F = \frac{\Delta l}{l} (1 + 2\eta),$$

c'est-à-dire

$$(6) \quad \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_F}{\frac{\Delta l}{l}} = 1 + 2\eta = \alpha.$$

Ce rapport est constant, il caractérise le coefficient de sensibilité du fil, il dépend du coefficient η du métal employé. Certains auteurs américains donnent :

$\alpha = -12,1$	pour le nickel,
1,9	» monel,
2,5	» cupronickel,
2,1	» nickel-chrome,
5,1	» platine iridié (5 %).

Dans le cas particulier du nickel, la résistance diminue quand le fil s'allonge.

A l'état recuit, le coefficient de sensibilité d'un métal est très faible.

Si l'on désigne par F la force qui agit sur le fil, la loi de Hookes permet d'écrire, dans les limites considérées (1) :

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_F = \alpha \frac{R_t}{E} = \alpha \frac{F}{sE},$$

E est le module d'élasticité du métal,
 R_t la contrainte à laquelle il est soumis.
 Soit en tenant compte de ce que

$$R = \rho \frac{l}{s} = \rho \frac{4l}{\pi d^2},$$

$$(7) \quad \Delta R = \frac{4\alpha}{\pi E} \rho \frac{l}{d^2} R_t.$$

b. Influence de la température. — Il convient, avant tout, de remarquer que la température n'agit pas simplement sur la valeur de la résistivité du métal, mais aussi, et d'une façon plus complexe, sur la longueur et la section du conducteur.

Désignons, en effet, par

— R_1, ρ_1, l_1, s_1 , la résistance, la résistivité, la longueur et la section d'un conducteur lorsque sa température est θ_1 ,

— R_2, ρ_2, l_2, s_2 , les mêmes caractéristiques du conducteur lorsque sa température est θ_2 .

On a, dans le premier cas,

$$(8) \quad R_1 = \rho_1 \frac{l_1}{s_1}$$

et dans le deuxième cas,

$$(9) \quad R_2 = \rho_2 \frac{l_2}{s_2}.$$

Soient donc :

$\Delta\theta$ la variation de température $\theta_2 - \theta_1$,

β le coefficient de dilatation linéaire du métal du fil,

α le coefficient de variation de la résistivité en fonction de la température.

On a

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{1 + \alpha\theta_2}{1 + \alpha\theta_1}$$

(1) Tant que la limite élastique du fil n'est pas dépassée.

et, d'une façon suffisamment approchée,

$$r_2 = r_1(1 + \alpha \Delta \theta).$$

On aurait de même

$$l_2 = l_1(1 + \beta \Delta \theta),$$

$$s_2 = s_1(1 + \beta \Delta \theta)^2.$$

La relation (9) devient alors

$$R_2 = r_1(1 + \alpha \Delta \theta) \frac{l_1(1 + \beta \Delta \theta)}{s_1(1 + \beta \Delta \theta)^2},$$

c'est-à-dire en tenant compte de (8),

$$R_2 = R_1 \frac{1 + \alpha \Delta \theta}{1 + \beta \Delta \theta}$$

et d'une façon encore très suffisamment approchée,

$$R_2 = R_1[1 + (\alpha - \beta) \Delta \theta].$$

Posons

$$\alpha - \beta = \gamma,$$

β est toujours faible devant α , $\alpha = \sim \gamma$ et

$$R_2 = R_1(1 + \gamma \Delta \theta).$$

L'action de la température se traduit, en définitive, de la façon suivante :

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\Delta \theta} = \gamma \Delta \theta.$$

Lorsqu'un fil est soumis à la fois à un effort F et à une variation de température $\Delta \theta$, la variation relative totale de sa résistance est donc

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_F + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\Delta \theta},$$

c'est-à-dire

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\alpha F}{sE} + \gamma \Delta \theta$$

Calcul d'un élément chauffant.

Le fil tendu horizontalement dans l'air calme qui nous a servi à étayer la théorie précédente, ne correspond évidemment à aucune réalisation pratique, mais ses conditions de fonctionnement sont faciles à réaliser et à reproduire toujours identiques; elles se prêtent

à des mesures simples et suffisamment précises auxquelles il est généralement commode de pouvoir se reporter.

C'est d'ailleurs à partir de ces conditions de fonctionnement que sont composées expérimentalement, par les fabricants de fils, les tables à double entrée dont nous avons parlé. Ces tables fournissent, ainsi, pour des fils à section circulaire, tendu horizontalement dans l'air calme, à partir de la température ordinaire, et pour chaque diamètre de fil, la valeur de l'intensité du courant à faire passer dans un fil, pour atteindre, en régime, dans les conditions indiquées, une température bien déterminée.

Les indications fournies par ces tables doivent donc être interprétées dans le cas général, lorsqu'on les rapporte aux caractéristiques d'un conducteur chauffant, dont les conditions de fonctionnement s'écartent, bien entendu, toujours de celles du fil tendu à l'air libre ci-dessus.

Nous verrons que ces conditions de fonctionnement sont souvent très complexes dans un appareil industriel, car elles dépendent généralement d'un grand nombre de facteurs, dont il est difficile de tenir toujours compte.

Nous examinerons donc d'abord de quelle façon on calcule une résistance dans le cas d'un conducteur chauffant, fil ou ruban, non soumis à une action extérieure, par exemple celui du fil tendu dans l'air calme envisagé précédemment.

Nous examinerons ensuite, dans le cadre de certains appareils, comment passer du cas théorique simple précédent au cas pratique complexe, par l'adoption de certains coefficients qui tiennent compte à la fois du profil du conducteur et des conditions dans lesquelles il fonctionne.

Nous déterminerons les caractéristiques de ce conducteur à partir de la puissance absorbée, de la tension d'alimentation, de la résistivité de l'alliage choisi et de la charge spécifique superficielle du conducteur (nombre de watts par centimètre carré), laquelle dépend, nous l'avons vu, de la température de fonctionnement du corps de chauffe.

a. Cas d'un fil rond. — La résistance électrique d'un fil de section s et de longueur l est donnée, en ohms, par la relation

$$(1) \quad R = \rho \frac{l}{s},$$

dans laquelle

ρ est la résistivité du métal, en $\Omega : m : mm^2$,

l la longueur du conducteur, en mètres,

s sa section, en millimètres carrés.

Si U est la différence de potentiel appliquée aux extrémités du fil, le courant qui le traverse est donné par la loi d'Ohm et par la formule

$$(2) \quad I = \frac{U}{R},$$

dans laquelle

U est exprimé en volts,

R » » en ohms,

I » » en ampères.

Si W désigne, alors, la puissance absorbée par le conducteur, en watts, on a

$$(3) \quad W = UI.$$

Des relations (2) et (3) on tire

$$(4) \quad W = \frac{U^2}{R}.$$

Si d est le diamètre du fil

$$s = \frac{\pi d^2}{4}$$

et

$$R = \rho \frac{l}{\frac{\pi d^2}{4}}$$

d'où

$$(5) \quad l = \frac{R \pi d^2}{\rho}.$$

Soit w le nombre de watts par centimètre carré de surface rayonnante de l'élément

$$w = \frac{W}{S},$$

S étant la surface extérieure du fil . . . centimètres carrés :

$$S = \pi dl \text{ 10,}$$

d est exprimé en millimètres,

l est exprimé en mètres.

On a donc

$$(6) \quad w = \frac{W}{\pi dl \text{ 10}} \quad \text{et} \quad l = \frac{W}{w} \frac{1}{\pi d} \text{ 10}^{-1}$$

et, en tenant compte des relations (5) et (6),

$$\frac{R}{\rho} \frac{\pi d^2}{4} = \frac{W}{w} \frac{l}{\pi d} 10^{-1}$$

d'où l'on tire

$$d^3 = \frac{4}{\pi^2} \frac{\rho}{R} \frac{W}{w} 10^{-1}$$

et, en tenant compte de la relation (4) : $R = \frac{U^2}{W}$,

$$d^3 = \frac{4}{\pi^2} \frac{\rho}{w} \left(\frac{W}{U}\right)^2 10^{-1}$$

et enfin

$$(7) \quad d = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi^2} \frac{\rho}{w} \left(\frac{W}{U}\right)^2 10^{-1}}$$

Formule dans laquelle :

- d est le diamètre du fil, en millimètres,
 ρ la résistivité ⁽¹⁾ de l'alliage considéré, en $\Omega \cdot m : mm^2$,
 w le nombre de watts par centimètre carré de surface,
 W la puissance absorbée par l'élément, en watts,
 U la tension aux bornes de l'élément, en volts.

Soit

$$(8) \quad d = 0,3435 \sqrt[3]{\frac{\rho}{w} \left(\frac{W}{U}\right)^2}$$

REMARQUE. — Les relations précédentes permettent de définir comment varient les caractéristiques d'un élément de puissance donnée lorsque, seule, on fait varier la tension.

Toutes autres choses égales par ailleurs, c'est-à-dire

même puissance.....	W
» qualité de fil.....	ρ
» charge superficielle.....	w (W : cm^2)

- la surface du fil reste la même, ce qui est évident;
- le courant de fuite (pour un élément enrobé), est proportionnel à la tension;
- la résistance est proportionnelle au carré de la tension;
- l'intensité est proportionnelle à l'inverse de la tension;
- le diamètre du fil est proportionnel à $\left(\frac{1}{U}\right)^{\frac{2}{3}}$;

(1) A la température d'utilisation.

- la longueur du fil est proportionnelle à $(U)^{\frac{2}{3}}$;
 — le poids du fil est lui-même proportionnel à $\left(\frac{l}{U}\right)^{\frac{2}{3}}$.

b. Cas d'un ruban. — Désignons (*fig. 2*) par :

- e_1 l'épaisseur du ruban;
 e_2 sa largeur;
 l sa longueur.

On a, comme précédemment,

$$(1') \quad R = \rho \frac{l}{s},$$

- R est la résistance du conducteur, en ohms;
 ρ la résistivité du métal, en $\Omega : m : mm^2$;
 l la longueur du conducteur, en mètres;
 s sa section, en millimètres carrés.

Si U désigne la différence de potentiel appliquée aux extrémités du ruban, le courant qui le traverse est donné par la loi d'Ohm :

$$(2') \quad I = \frac{U}{R},$$

dans laquelle :

- U est exprimée en volts,
 R » » en ohms;
 I » » en ampères.

Si W désigne encore la puissance absorbée par le conducteur en watts, on a

$$(3') \quad W = UI.$$

On a aussi, comme précédemment,

$$(4') \quad W = \frac{U^2}{R}.$$

Si e_1 et e_2 représentent alors respectivement l'épaisseur et la largeur du ruban (*fig. 2*), la section s a pour expression

$$s = e_1 e_2$$

et

$$R = \rho \frac{l}{e_1 e_2}$$

d'où

$$(5') \quad l = \frac{R}{\rho} e_1 e_2.$$

Désignons encore par w le nombre de watts par centimètre carré de surface rayonnante de l'élément

$$w = \frac{W}{S},$$

S est ici la surface extérieure du ruban en centimètres carrés, on a

$$S = 2(e_1 + e_2) l 10,$$

e_1 et e_2 sont exprimés en millimètres,

l est toujours exprimé en mètres.

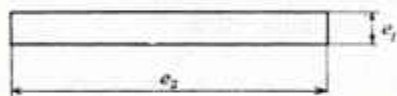


Fig. 2.

On a donc

$$(6') \quad w = \frac{W}{2(e_1 + e_2) l 10} \quad \text{et} \quad l = \frac{W}{w} \frac{1}{2(e_1 + e_2) 10}$$

et, en tenant compte des relations (5') et (6'),

$$\frac{R}{\rho} e_1 e_2 = \frac{W}{w} \frac{1}{2(e_1 + e_2)} 10^{-1}.$$

Si l'on pose

$$\frac{\text{largeur du ruban}}{\text{épaisseur du ruban}} = \frac{e_2}{e_1} = m,$$

la relation précédente s'écrit

$$\frac{R}{\rho} \frac{e_1^2}{m} = \frac{W}{w} \frac{1}{2e_2 \left(\frac{1}{m} + 1 \right)} 10^{-1},$$

soit

$$\frac{R}{\rho} \frac{e_1^2}{m} = \frac{W}{w} \frac{m}{2e_2(1+m)} 10^{-1}$$

et

$$e_1^2 = \frac{m^2}{2(1+m)} \frac{\rho}{R} \frac{W}{w} 10^{-1}$$

ou, en tenant compte de (4'),

$$e_1^2 = \frac{m^2}{2(1+m)} \frac{\rho}{w} \left(\frac{W}{U} \right)^2 10^{-1}$$

et enfin

$$(7'') \quad e_2 = \sqrt[3]{\frac{m^2}{2(1+m)} \frac{\rho}{w} \left(\frac{W}{U} \right)^2 10^{-1}}$$

On trouverait de même

$$(7') \quad e_1 = \sqrt[3]{\frac{1}{2m(1+m)} \frac{\rho}{w} \left(\frac{W}{U} \right)^2 10^{-1}}$$

avec les mêmes unités définies précédemment pour ρ , w , W et U et en prenant :

e_1 épaisseur du ruban, en millimètres;

e_2 largeur du ruban, en millimètres.

Si l'on pose

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{1}{20m(1+m)}}$$

et

$$\lambda' = \sqrt[3]{\frac{m^2}{20(1+m)}}$$

il vient

$$(8'') \quad e_1 = \lambda \sqrt[3]{\frac{\rho}{w} \left(\frac{W}{U} \right)^2}$$

$$(8') \quad e_2 = \lambda' \sqrt[3]{\frac{\rho}{w} \left(\frac{W}{U} \right)^2}$$

On trouve

pour $m =$	1.	2.	3.	4.	5.	6.
λ	0,292 4	0,202 7	0,160 9	0,135 7	0,118 5	0,105 9
λ'	0,292 4	0,408 6	0,482 7	0,542 9	0,592 8	0,635 9
pour $m =$	7.	8.	9.	10.	15.	20.
λ	0,096 3	0,088 6	0,082 2	0,076 9	0,059 3	0,042 5
λ'	0,674 0	0,708 4	0,739 9	0,768 9	0,889 2	1,063 0

Coefficient de profil.

A section égale, un ruban offre plus de surface de refroidissement qu'un fil rond.

En adoptant les mêmes désignations que précédemment et en appelant :

s_1 , la section du fil rond,

s_2 , la section du ruban,

S_1 , la surface extérieure du fil rond,

S_2 , la surface extérieure du ruban,

on a, en effet,

$$s_1 = \frac{\pi d^2}{4} \quad \text{et} \quad s_2 = e_1 e_2 = m e_1^2,$$

m étant le rapport de la largeur du ruban à son épaisseur, par définition toujours supérieur à l'unité.

A section égale, on a évidemment $s_1 = s_2$, ou

$$(1) \quad \frac{\pi d^2}{4} = m e_1^2.$$

On a de même, pour une même longueur de conducteur l ,

$$S_1 = \pi dl,$$

$$S_2 = 2(e_1 + e_2)l = 2e_1(1+m)l.$$

Considérons le rapport $\frac{S_2}{S_1}$ de ces surfaces, on a

$$(2) \quad \frac{S_2}{S_1} = \frac{2e_1(1+m)}{\pi d}.$$

La relation (1) donne

$$(3) \quad (\pi d)^2 = 4 m \pi e_1^2$$

et le rapport des surfaces [relation (2)] s'écrit

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{1+m}{\sqrt{\pi m}}$$

que l'on peut mettre sous la forme

$$(4) \quad \frac{S_2}{S_1} = \sqrt{\frac{(1+m)^2}{\pi m}},$$

rapport croissant avec m de $\sqrt{\frac{4}{\pi}}$ pour $m = 1$ à l'infini pour $m = \infty$ et, par conséquent, toujours bien supérieur à 1.

Le courant nécessaire pour porter un ruban tendu horizontalement dans l'air calme à une certaine température de régime est donc toujours supérieur au courant absorbé, dans les mêmes conditions,

par un fil rond de même nature, de même section et de même longueur, fonctionnant en régime à cette température.

Désignons par I_1 et I_2 les courants correspondants :

I_1 étant l'intensité du courant nécessaire pour porter le fil rond à sa température de régime;

I_2 l'intensité du courant nécessaire pour porter le ruban à la même température.

Posons

$$I_2(\text{ruban}) = p I_1(\text{fil}) \quad \text{avec } p > 1.$$

Il n'est pas possible de déterminer, par le calcul, ce coefficient p qui lie les deux intensités.

L'émission du flux énergétique par rayonnement et par convection est différent pour le fil et pour le ruban, bien que les deux conducteurs fonctionnent à la même température.

Les coefficients σ et A de la page 128 dépendent, en effet, non seulement de la nature des surfaces, mais aussi de leur forme.

Le coefficient p peut néanmoins se déterminer très facilement par l'expérience pour des conducteurs tendus horizontalement dans l'air calme.

Les Acieries d'Imphy indiquent le tableau de correspondance suivant :

<i>m.</i>	2.	3.	4.	5.	7.	10.	15.	25 et au-dessus.
<i>p</i>	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50

REMARQUE. — Ces chiffres se rapprochent cependant beaucoup de ceux que l'on obtient en supposant, en première approximation, que le fil et le ruban fonctionnent à la même température lorsque la densité superficielle de rayonnement (nombre de watts par centimètre carré) est la même pour les deux conducteurs.

On a, en effet, dans ce cas, en désignant par :

W_1 , la puissance absorbée par le fil rond;

W_2 , la puissance absorbée par le ruban.

$$\frac{W_1}{S_1} = \frac{W_2}{S_2} \quad \text{et} \quad \frac{W_1}{W_2} = \frac{S_1}{S_2}.$$

Or,

$$W_1 = R_1 I_1^2,$$

$$W_2 = R_2 I_2^2$$

et comme il s'agit, dans l'un et l'autre cas, de conducteurs de même nature, de même section et de même longueur ($R_1 = R_2$) :

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{l_1^2}{l_2^2} = \frac{1}{p^2},$$

mais nous avons vu que

$$\frac{S_2}{S_1} = \sqrt{\frac{(1+m)^2}{\pi m}}.$$

On a donc, en définitive,

$$p^2 = \sqrt{\frac{(1+m)^2}{\pi m}}$$

et

$$(7) \quad p = \sqrt[4]{\frac{(1+m)^2}{\pi m}}.$$

p est appelé coefficient de profil, il dépend de la largeur et de l'épaisseur du ruban considéré.

Le tableau ci-dessous donne, à partir de la relation (7), les valeurs de ce coefficient en fonction de m .

m .	p .	m .	p .
1.....	1,06	7.....	1,31
2.....	1,10	8.....	1,34
3.....	1,14	9.....	1,37
4.....	1,19	10.....	1,40
5.....	1,24	15.....	1,53
6.....	1,27	25.....	1,67

En comparant ces valeurs à celles données par Imphy, on voit que la relation (7) ci-dessus ne peut être considérée que comme très approximative.

Nous proposons la formule suivante beaucoup plus exacte :

$$(8) \quad p = \left(0,89 + \frac{\log m}{m} \right)^{\frac{1}{4}} \sqrt{\frac{(1+m)^2}{\pi m}}.$$

Coefficient de montage.

Nous avons dit que les indications fournies par les tables devaient être interprétées suivant les conditions de fonctionnement de l'élément chauffant considéré; le calcul exact de cet élément est, en effet, pratiquement impossible à partir de la théorie pure, car les phéno-

mènes thermiques sont, dans la plupart des cas, trop complexes pour se prêter à une analyse suffisamment précise et quantitative. Les constructeurs doivent ainsi faire appel à leur expérience propre et c'est toujours à la suite de très longues et très minutieuses mises au point, généralement très coûteuses, qu'ils arrivent à déterminer, d'une façon encore souvent incertaine, les caractéristiques de fonctionnement d'un corps de chauffe.

La résistance de chauffage proprement dite de ce corps de chauffe, dans laquelle l'énergie électrique est transformée en énergie calorifique, peut être constituée, nous l'avons vu, par un fil ou par un ruban.

Le fil peut être disposé en zigzag ou enroulé en hélices à spires plus ou moins étirées, le ruban peut être bobiné à plat ou ondulé suivant une sinusoïde lorsqu'il s'agit de puissances importantes.

Le conducteur chauffant ainsi défini est généralement monté sur un support isolant (amiante, micanite, mica, porcelaine, stéatite ou autre réfractaire); lorsqu'il s'agit d'un fil, il peut être enrobé dans un ciment spécial, ou, dans certains cas particuliers, être tissé avec des fils d'amiante et constituer la trame d'une toile chauffante (1).

Un élément qui comprend l'ensemble de la résistance, de son support et de ses accessoires, peut donc, en définitive, revêtir des formes très variées, d'ailleurs souvent complexes. On distingue ainsi différents types : toiles chauffantes, éléments de bouilloires, de fer à repasser, de réchauds, plaques de cuisson (enrobées, blindées), éléments de four, éléments tubulaires pour chauffe-eau ou chaudières; bougies et briques pour radiateurs, éléments blindés de toutes sortes pour appareils domestiques et industriels.

Dans les applications industrielles, en particulier, un élément chauffant peut fonctionner à l'air libre ou dans une enceinte plus ou moins calorifugée; son refroidissement peut être naturel ou accéléré par circulation d'air ou de liquides (eau, huile, etc.), ou, au contraire, être ralenti; il peut fonctionner seul ou être soumis au rayonnement ou à l'action d'autres éléments voisins, etc.

On se rend compte ainsi combien ces conditions de fonctionnement peuvent être complexes et combien il est difficile de déterminer, *a priori*, les caractéristiques d'un corps de chauffe.

Aussi emploie-t-on avec succès certains coefficients déterminés expérimentalement, qui tiennent compte précisément de la façon dont l'élément est refroidi.

(1) Les fils d'amiante forment la chaîne.

Nous en indiquons quelques-uns, ci-après, qui nous ont rendu personnellement service; mais nous nous empressons de dire qu'ils n'ont rien d'absolu et qu'ils doivent être contrôlés par l'expérience.

Classification des appareils (1).	Coefficient de montage <i>m</i> .
-----------------------------------	---

Appareils non calorifugés :

Faisceaux de résistances en boudins ou toile chauffante, nus et sans support, dans l'air calme.....	0,8
---	-----

Appareils faiblement calorifugés :

Élément de radiateur enroulé sur un support réfractaire, chauffant dans l'air calme.....	0,6 à 0,7
--	-----------

Appareils moyennement calorifugés :

Fils entre deux couches isolantes; éléments de fer à repasser, de bouilloires, de tables chaudes; cuves à bains de sel, etc.....	0,5
--	-----

Appareils fortement calorifugés :

Fours tubulaires ou mouffles avec enveloppe calorifuge d'épaisseur 3 à 5 fois égale à la dimension transversale moyenne de l'enceinte chauffée.....	0,3 à 0,4
---	-----------

Le coefficient de montage *m* de ce tableau est défini par le rapport

$$m = \frac{\theta'}{\theta},$$

dans lequel :

— θ désigne la température de régime supposée atteinte par un conducteur traversé par un certain courant, lorsque le corps de chauffe dont il fait partie fonctionne sous sa tension nominale;

— et θ' la température fictive qu'atteindrait ce même conducteur parcouru par le même courant, s'il était tendu à l'air libre.

REMARQUE. — Dans la pratique, on ne calcule pas les éléments comme nous venons de le faire; on détermine les caractéristiques dont on a besoin, soit directement à partir des tables d'intensités et de résistances fournies par les fabricants de fils, soit indirectement par

(1) Ce tableau est emprunté à la notice sur les « alliages RNC » pour résistances électriques des Acéries d'Imphy.

l'intermédiaire de diagrammes du genre de ceux que nous décrivons ci-après et qui sont tracés à partir des formules établies précédemment.

Utilisation des tables.

Les tables d'intensités indiquent donc, en fonction de la température, les valeurs de l'intensité du courant nécessaire pour obtenir une température donnée dans un fil, de diamètre donné, tendu à l'air libre.

Ces tables sont déterminées expérimentalement pour des fils à section circulaire tendus horizontalement dans l'air calme à partir de la température ordinaire. Elles sont généralement complétées ou accompagnées de certaines caractéristiques complémentaires concernant chaque diamètre de fil. On trouve ainsi les indications relatives à la section du fil, à son poids par mètre courant, à sa résistance par mètre à 0° . D'autres tables fournissent, en plus, les valeurs correspondantes des résistances de 1 m (ou de 100 m) de fil ou de plat, les poids en grammes par 100 m et les longueurs en mètres par 100 g de fil, etc.

Nous avons reproduit quelques-unes de ces indications pour les alliages RNC 3 et RCA 33 des Acieries d'Imphy (p. 250 et 254).

Certaines notices, plus détaillées encore, fournissent des renseignements plus complets sous forme de coefficients qui facilitent souvent les calculs et qu'il est très utile d'avoir à sa disposition dans la pratique courante.

On trouve notamment :

- les diamètres du conducteur, en millimètres ;
- la section du conducteur, fil ou ruban, en millimètres carrés ;
- la surface de 1 m de conducteur, en centimètres carrés ;
- les intensités de courant, en ampères, à admettre dans le conducteur tendu horizontalement dans l'air calme à partir de 20° C ;
- la résistivité à 20° C de l'alliage considéré, en ohms par mètre et millimètre carré ;
- le facteur de correction, en fonction de la température, par lequel il faut multiplier la résistivité précédente, à 20° C, pour obtenir la résistivité à la température d'utilisation ;
- la résistance, en ohms, par mètre de longueur de conducteur à la température de 20° C ;
- la résistance, en ohms, par kilo ;
- la longueur, en mètres, par ohm à 20° C ;

- la longueur, en mètres, par kilo;
- le poids, en grammes, par mètre;
- la surface du conducteur, en centimètres carrés, par ohm à 20° C.;
- la tension, en volts, qu'il faut appliquer à 1 m de conducteur, pour qu'il fonctionne dans les conditions considérées;
- la puissance, en watts, qui doit être fournie, dans ces conditions, à 1 m de conducteur;
- les intensités de courant à admettre dans des fils enroulés sur des mandrins de différents diamètres;
- etc.

Pour un fil boudiné tendu à l'air libre, la Société des Hauts Fourneaux et Forges d'Allevard (fil A.R.E.) indique qu'il y a lieu de multiplier les valeurs des tables d'intensités (1) par un coefficient k qui tient compte du boudinage et qui varie avec le rapport de la distance e des axes de deux spires voisines (pas du boudinage) au diamètre d du fil, de la façon suivante :

e/d .	1.	2.	3.	4.	5.
k	0,71	0,87	0,92	0,95	0,975

L'utilisation de ces tables est évidemment différente suivant les indications qui y sont portées et suivant les données du problème et, notamment suivant que l'on se fixe une température de fonctionnement ou, au contraire, une charge superficielle spécifique (watts par centimètre carré) du conducteur.

On ramène généralement l'élément considéré au cas simple du fil tendu horizontalement dans l'air calme, au moyen des coefficients de montage de la page 151, et, dans le cas d'un ruban, des coefficients de profil de la page 148.

Pour illustrer ce mécanisme, d'ailleurs très simple, nous allons examiner les trois cas suivants, qui résument les différents problèmes qui se posent pratiquement :

1. Cas d'un fil tendu horizontalement dans l'air calme à la température ambiante;
2. Cas d'un élément de radiateur à feu visible;
3. Cas d'un élément de fer à repasser en ruban.

1. *Cas d'un fil tendu horizontalement.* — Ce cas est théorique et ne correspond à aucune utilisation pratique : il suffit de lire purement et simplement les indications fournies par les tables.

(1) Valeurs établies pour des fils tendus horizontalement dans l'air calme.

Un fil RNC 3, par exemple, de 0,40 mm de diamètre, est porté à la température de 900° C, par un courant de 4,65 A (p. 251). A cette température, la résistance par mètre de fil est de 8,59 Ω .

2. *Cas d'un élément de radiateur à feu visible.* — Considérons, par exemple, un élément constitué par un boudin chauffant disposé dans les cannelures d'une brique réfractaire et supposons que la température de fonctionnement du fil soit, dans ces conditions, égale à 800° C en régime.

Pour fixer les idées, calculons les caractéristiques d'un élément semblable, de 750 W à 225 V. On a

$$I = \frac{W}{U} = \frac{750}{225} = 3,33 \text{ A.}$$

Le radiateur à feu visible est classé dans la catégorie des appareils faiblement calorifugés, pour lesquels le coefficient de montage (voir p. 151) est égal à 0,7.

D'après ce que nous avons vu, ce coefficient de montage revient à assimiler le boudin chauffant, fonctionnant sur son support à la température de 800° C, à un fil tendu horizontalement à l'air libre qui, parcouru par le même courant, serait porté à une température fictive de

$$800 \times 0,7 = 560^\circ \text{C.}$$

Ceci revient à dire que si l'on mesure la température θ du fil boudiné monté sur son support, lorsqu'il est traversé par un courant de 3,33 A, et la température θ' de ce même fil sorti de son support, étiré et tendu horizontalement en ligne droite et parcouru par le même courant :

- la température θ est égale à 800° C;
- la température θ' est égale à 560° C.

Le problème consiste alors à rechercher dans la table des intensités correspondant à l'alliage choisi, le diamètre du fil qui est porté en régime à 560° C par l'effet Joule d'un courant électrique de 3,33 A.

En parcourant la table des intensités de l'alliage RNC 3 (p. 251), on trouve, par exemple, qu'un fil de 0,45 mm de diamètre, tendu horizontalement dans l'air calme, est porté à 500° C par un courant de 3,15 A et à 700° C par un courant de 4,15 A : une différence de

$$4,15 - 3,15 = 1 \text{ A}$$

correspond donc à une différence de température de 200° C.

Si nous interpolons les intensités entre les températures 500 et 700° C,

en supposant que la variation de la température en fonction de l'intensité est linéaire, c'est-à-dire si nous admettons que $\frac{R}{I} = \text{const.}$, dans cet intervalle de température, une augmentation de

$$3,33 - 3,15 = 0,18 \text{ A,}$$

correspond à une augmentation de température de

$$\frac{200}{1} \times 0,18 = 36^{\circ} \text{C,}$$

à partir de 500°C.

Le fil RNC 3 de 0,45 mm de diamètre, parcouru par un courant de 3,33 A, fonctionne finalement à une température de 536°C lorsqu'il est tendu horizontalement dans l'air calme; bobiné en spirale et monté sur son support réfractaire, il fonctionne, d'après ce qui précède, à une température égale à

$$\frac{536}{0,7} = 766^{\circ} \text{C,}$$

c'est-à-dire aux environs de 800°C que nous nous étions fixés.

On poursuit le calcul de cet élément en déterminant successivement :

— la résistance R du conducteur, en ohms, à la température d'utilisation

$$R = \frac{U}{I},$$

— la résistance R_0 , en ohms, à 0°

$$R_0 = \frac{R}{1 + \alpha \theta},$$

α désignant le coefficient moyen de température entre 0° et la température d'utilisation θ ;

— la longueur l du conducteur, en mètres,

$$l = \frac{R_0}{r_0},$$

r_0 désignant la valeur de la résistance au mètre, à 0° ;

— le poids du fil, en grammes,

$$p = p_0 l,$$

p_0 étant le poids du fil par mètre, en grammes;

— la longueur moyenne d'une spire

$$l_1 = \pi(d + d_1),$$

d étant le diamètre du conducteur,

d_1 le diamètre du mandrin;

— le nombre de spires

$$n = \frac{l}{l_1};$$

— la longueur du boudin à spires jointives, qui est une caractéristique de fabrication,

$$l_2 = n d;$$

— la longueur du boudin une fois étiré l_3 , qui est une caractéristique du support;

— le pas des spires

$$w = \frac{l_3}{n};$$

— l'intervalle entre spires

$$i = w - d;$$

— le nombre de watts par centimètre carré de surface de fil

$$w = \frac{W}{\pi d l};$$

— le nombre de watts dissipés par spire, en fonction de l'intervalle, qui est une caractéristique essentielle de l'élément

3. *Cas d'une résistance de fer à repasser (ruban)* — Soit à déterminer, par exemple, les caractéristiques d'une résistance de 750 W, 225 V, en ruban RNC 3, bobiné sur secteurs mica, en supposant que la température de fonctionnement du ruban est encore égale à 800° C.

On a

$$I = \frac{750}{225} = 3,33 \text{ A.}$$

Le fer à repasser appartient à la catégorie des appareils moyennement calorifugés pour lesquels le coefficient de montage est égal à 0,5.

Pour pouvoir se servir des indications qui figurent dans la table des intensités, encore faut-il ramener les conditions de fonctionnement du ruban à celles d'un fil rond tendu horizontalement dans l'air calme.

Le coefficient de conversion ci-dessus, qui tient compte du montage

de la résistance, permet déjà de déterminer la température θ' qu'atteindrait le ruban s'il fonctionnait lui-même dans ces conditions.

On a, en effet,

$$\theta' = 800 \times 0,5 = 400^{\circ}\text{C}.$$

Le coefficient de profil de la page 148, qui tient compte alors de la plus grande surface de refroidissement du ruban permet ensuite de déterminer l'intensité qu'il faudrait faire passer dans un fil rond de même section, pour que ce fil fonctionne à la température θ' (400°C), dans les mêmes conditions, c'est-à-dire tendu, lui aussi, horizontalement dans l'air calme.

Si l'on choisit, par exemple, un ruban pour lequel le rapport

$$\frac{\text{largeur}}{\text{épaisseur}} = 4,$$

le coefficient de profil correspondant est égal à 1,25 (p. 148).

L'intensité du courant à admettre dans le fil rond équivalent ci-dessus, pour qu'il fonctionne à la même température que le ruban (400°C), dans les conditions énoncées, est donc

$$\frac{3,33}{1,25} = 2,65 \text{ A.}$$

En définitive, le ruban de l'élément chauffant du fer à repasser absorbe une intensité égale à 3,33 A sous la tension nominale (225 V) et sa température de fonctionnement est, dans ces conditions, égale à 800°C .

Il est assimilé à un fil rond de même section dont la température de régime atteint 400°C lorsque, tendu horizontalement dans l'air calme, il est parcouru par un courant de 2,65 A.

Ce fil rond se détermine comme précédemment, par l'utilisation de la table des intensités, correspondant à l'alliage RNC 3. On trouve (p. 251) pour

$$\begin{aligned} I &= 2,65 \text{ A,} \\ \theta &= 400^{\circ}\text{C,} \end{aligned}$$

un fil de 0,45 mm de diamètre, dont la section est égale à 0,159 04 mm².

Le ruban est ainsi défini par cette section et par le rapport de sa largeur à son épaisseur.

Les autres caractéristiques se déterminent comme nous l'avons indiqué, pour l'élément de radiateur à feu visible.

REMARQUE I. — Pour les appareils industriels, pour les fours en particulier, qui absorbent des puissances importantes, on se base généralement sur les charges spécifiques superficielles, déterminées

expérimentalement ou conseillées par les fabricants de rubans (voir ci-après p. 281). On se sert alors des formules (8') et (8'') de la page 146.

Supposons, par exemple, qu'il s'agisse de déterminer les caractéristiques d'un ruban en Kanthal A1, devant absorber une puissance de 10 kW sous 220 V et fonctionner à la température de 1 300° C.

La résistivité du Kanthal A1 à 20° C est égale à 1,45 Ω :m:mm² (p. 244), le facteur de correction indiqué dans le manuel Kanthal pour 1 300° C est égal à 1,083. La résistivité du Kanthal A1 à 1 300° C est donc

$$1,45 \times 1,083 = 1,57.$$

Admettons la puissance de 0,9 W:cm² de surface rayonnante, conseillée par le tableau de la page 281.

La formule (8') de la page 146 donne

$$e_1 = \lambda \sqrt[3]{\left(\frac{10\,000}{220}\right)^2 \frac{1,57}{0,9}},$$

$$e_1 = \lambda \sqrt[3]{3\,595} = \sim 15,32 \lambda$$

et la formule (8'')

$$e_2 = \lambda' \sqrt[3]{\left(\frac{10\,000}{220}\right)^2 \frac{1,57}{0,9}},$$

$$e_2 = \lambda' \sqrt[3]{3\,595} = \sim 15,32 \lambda',$$

si l'on prend par exemple

$$m = \frac{e_2}{e_1} = 8.$$

On trouve

$$e_2 = 0,7084 \times 15,32 = 10,83 \text{ mm},$$

$$e_1 = 0,0886 \times 15,32 = 1,35 \text{ mm},$$

qui ne correspondent pas exactement à des dimensions de ruban de fabrication courante.

Avec $m = 10$, on aurait trouvé

$$e_2 = 0,77 \times 15,32 = 11,78 \text{ mm},$$

$$e_1 = 0,077 \times 15,32 = 1,178 \text{ mm},$$

correspondant sensiblement aux dimensions courantes 12 \times 1,2 mm.

Notre conducteur chauffant sera donc constitué par une bande de Kanthal A1 de 12 \times 1,2 mm de section.

REMARQUE II. — Si :

W désigne comme précédemment la puissance absorbée par l'élément, en watts;

R la résistance du conducteur à la température d'utilisation, en ohms;
 w le nombre de watts dissipés par centimètre carré de surface;
 I l'intensité du courant;

on a la relation évidente

$$W = RI^2$$

avec

$$W = S w.$$

Soit, en tenant compte de ce que

$$\begin{aligned} R &= R_0(1 + \alpha\theta), \\ S w &= R_0(1 + \alpha\theta) I^2, \end{aligned}$$

d'où

$$\frac{S}{R_0} = \frac{1 + \alpha\theta}{w} I^2.$$

Si l'on pose

$$1 + \alpha\theta = k.$$

On a finalement la formule

$$\frac{S}{R_0} = \frac{k}{w} I^2,$$

qui exprime la surface d'un conducteur chauffant par ohm (à 0° C) en fonction de l'intensité du courant qui le parcourt, de la charge spécifique superficielle et d'un coefficient k qui tient compte de l'augmentation de la résistance de ce conducteur à partir de 0° C jusqu'à la température d'utilisation considérée.

Cette formule est souvent pratique, elle permet de déterminer rapidement les caractéristiques d'un conducteur lorsque la table des résistances indique, pour chaque diamètre de fil, la surface en centimètres carrés par ohm, comme cela a lieu par exemple dans le dernier manuel Kanthal.

Exemple de calcul d'un rhéostat.

On se propose de déterminer, par exemple, le diamètre et la longueur du fil d'un rhéostat en maillechort fonctionnant à l'air libre et capable d'absorber une intensité de 30 A sous 50 V. L'échauffement limite admis étant de 100° C.

On peut procéder comme nous venons de le faire pour un élément ordinaire ou, comme nous l'indiquons ci-après, en supposant connue la perte d'énergie par rayonnement.

Admettons donc les données suivantes :

Résistivité du maillechort : $\rho = 3,1 \mu\Omega : \text{cm} : \text{cm}^2$;

Chaleur dégagée par centimètre carré et par degré au-dessus de la température ambiante : 0,000 39 cal ;

Température ambiante : 0° C.

Nous supposerons en outre que, dans l'intervalle de température considérée (0 à 100° C), les pertes de chaleur par rayonnement et convection sont proportionnelles à l'excès de la température du fil sur la température ambiante.

Comme la température ambiante est égale à zéro, on a donc, au moment où l'équilibre est atteint,

$$0,24 RI^2 = kS\theta,$$

d'où

$$\theta = \frac{0,24 RI^2}{kS},$$

formule dans laquelle :

R est la résistance totale du rhéostat, en ohms;

S la surface du fil employé, en centimètres carrés;

k un coefficient de proportionnalité ($k = 0,000 39$).

On a, par ailleurs, en désignant par s la section du fil,

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad \text{avec} \quad s = \frac{\pi d^2}{4}$$

et

$$S = \pi d l \text{ 10 cm}^2,$$

on trouve

$$10 k \pi^2 \theta d^3 = 0,24 \times 4 \rho l^2$$

et

$$d = \sqrt[3]{\frac{0,24 \times 4 \rho l^2}{10 k \pi^2 \theta}},$$

soit, en remplaçant les lettres par leur valeur,

$$d = 4,11 \text{ mm.}$$

La résistance totale R est

$$R = \frac{50}{30} = 1,66 \Omega$$

et l'on a

$$1,66 = \rho \frac{l}{s} = 31 \cdot 10^{-2} \frac{l}{\frac{\pi d^2}{4}},$$

d'où

$$l \approx 71 \text{ m.}$$

REMARQUE. — En supposant un échauffement identique dans les deux cas, on peut déterminer la masse M' d'un rhéostat de résistance R' , capable de supporter l'intensité I' , lorsqu'on connaît la masse M d'un rhéostat de résistance R , capable de supporter l'intensité I .

On a, en effet, en désignant par δ la densité de l'alliage utilisé

$$\begin{aligned} M &= s l \delta, \\ M' &= s' l' \delta, \end{aligned}$$

d'où

$$\frac{M'}{M} = \frac{s' l'}{s l}.$$

Posons

$$\frac{l'}{l} = \alpha \quad \text{et} \quad \frac{s'}{s} = \beta.$$

On a

$$\frac{M'}{M} = \alpha \beta.$$

Mais

$$\begin{aligned} S &= \pi d^2 l, & \text{surface du fil dans le premier cas;} \\ S' &= \pi d'^2 l', & \text{" " " deuxième " ;} \\ s &= \pi \frac{d^2}{4}, & \text{section du fil dans le premier cas;} \\ s' &= \pi \frac{d'^2}{4}, & \text{" " " deuxième " ;} \end{aligned}$$

On a aussi

$$\frac{R' I'^2}{R I^2} = \frac{S'}{S} = \alpha \beta^{\frac{3}{2}},$$

que l'on peut écrire

$$(1) \quad \frac{R'}{R} \left(\frac{I'}{I} \right)^2 = \alpha \beta^{\frac{3}{2}},$$

or

$$\frac{R'}{R} = \frac{l}{l'} \frac{s}{s'}$$

(2)

$$\frac{R'}{R} = \frac{\alpha}{\beta}.$$

Les équations (1) et (2) ci-dessus permettent de calculer α et β .

On a, en effet,

$$\beta^{\frac{3}{2}} = \left(\frac{I'}{I} \right)^2,$$

d'où

$$\beta = \left(\frac{I'}{I}\right)^{\frac{1}{2}}$$

et

$$x = \left(\frac{I'}{I}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{R'}{R}.$$

Comme

$$\frac{M'}{M} = x\beta,$$

il vient finalement

$$M' = M \frac{R'}{R} \left(\frac{I'}{I}\right)^{\frac{3}{2}}.$$

Diagrammes de fonctionnement.

Pour éviter de refaire toujours les mêmes calculs, longs et quelquefois fastidieux, il est commode de se reporter à des diagrammes établis d'avance une fois pour toutes et de relever sur ceux-ci, par des lectures rapides, les différentes caractéristiques dont on a besoin.

Il existe plusieurs sortes de diagrammes plus ou moins complets. Nous allons en décrire deux, qui résument très simplement l'ensemble des opérations que l'on est amené à faire pour déterminer les caractéristiques en question. Ces diagrammes tiennent compte, en particulier, des conditions de fonctionnement du conducteur chauffant considéré, fil ou ruban, notamment de la température. Ils ont été tracés à partir des caractéristiques du fil RCA 33 des Acières d'Imphy.

DIAGRAMME N° 1 (1). — Considérons l'abaque ci-contre : les axes de coordonnées XX' , YY' , partagent le plan en quatre régions que nous avons numérotées I, II, III et IV.

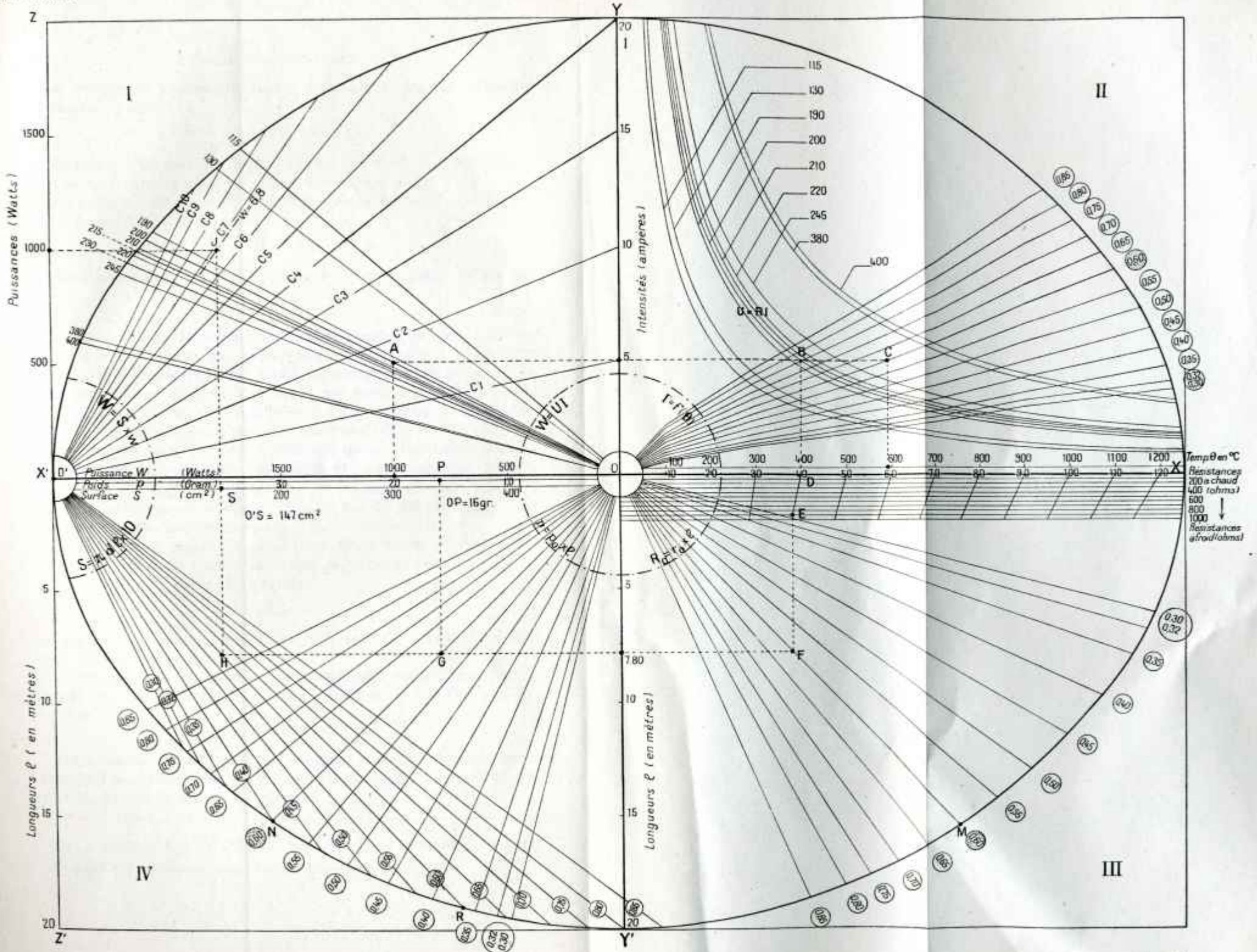
Dans la région I, nous avons tracé un faisceau de droites

$$(1) \quad W = UI,$$

donnant, sur l'axe OX' , choisi comme axe des ordonnées, la puissance W absorbée par un conducteur, en watts, en fonction de l'intensité I qui le traverse, en ampères (sur l'axe OY , choisi comme axe des abscisses), pour différentes valeurs de la tension U (ces valeurs, correspondent aux coefficients angulaires des droites considérées).

Nous avons choisi, pour ne pas surcharger inutilement la figure et

(1) Diagramme de l'auteur.



pour réduire le nombre de droites du faisceau, les tensions dites normales suivantes :

$$115, 200, 215, 230 \text{ et } 400 \text{ V.}$$

Il est d'ailleurs toujours facile d'ajouter une droite à ce diagramme si l'on se trouve en présence d'une tension spéciale.

La puissance de 1 000 W, pour une tension de 200 V, correspond ainsi (point A) à une intensité

$$I = 5 \text{ A.}$$

Dans la région II du plan, nous avons tracé de même les courbes

$$(2) \quad I = f(\theta),$$

donnant sur l'axe OY, choisi maintenant comme axe des ordonnées et à la même échelle que précédemment, l'intensité I à admettre dans un fil de diamètre donné, tendu horizontalement dans l'air calme à la température de 20°C pour qu'il soit porté à une température de régime θ , que l'on peut d'ailleurs se fixer à l'avance. (Les températures θ sont portées en abscisses sur l'axe OX).

Ces courbes sont tracées à partir des tables d'intensités fournies par les fabricants de fils : elles diffèrent peu, comme on le voit, de droites (1). Celles du diagramme de la page 162 correspondent aux caractéristiques de l'alliage RCA 33 des Acieries d'Imphy dont on trouvera les caractéristiques p. 175.

Dans la même région du plan, nous avons tracé, pour les différentes valeurs de la tension indiquées ci-dessus et sans que cela ne surcharge trop la figure, les courbes

$$RI = U,$$

en utilisant les axes de coordonnées : OY pour les intensités I et OX pour les résistances R.

L'intensité $I = 5 \text{ A}$ trouvée précédemment, conduit ainsi, sur la courbe $U = RI$, pour $U = 200 \text{ V}$, au point B d'abscisse OD, sur OX, tel que

$$OD = R = 40 \Omega.$$

Cette valeur correspond à la résistance à chaud du conducteur chauffant considéré lorsqu'il est en fonctionnement normal et que sa température de régime est atteinte.

(1) La fonction $I = \frac{\pi}{2} d^{\frac{3}{2}} \rho^{-\frac{1}{2}} \Phi(\theta)^{\frac{1}{2}}$ que nous avons définie précédemment p. 129, est, par conséquent, peu différente d'une fonction linéaire.

Nous supposons que cette température est de l'ordre de 900°C et que l'élément dont il est question est destiné à un appareil faiblement calorifugé pour lequel le coefficient de montage est égal à 0,7.

D'après ce que nous venons de voir, le problème revient donc à rechercher le diamètre du fil qui, tendu horizontalement dans l'air calme, est porté à une température de

$$900 \times 0,7 = 630^{\circ}\text{C},$$

lorsqu'il est parcouru par un courant de 5 A.

Il nous suffit alors de chercher sur le faisceau de courbes $I = f(\theta)$, pour l'ordonnée $I = 5$ A, le diamètre du fil qui se rapproche le plus de cette condition.

L'abaque montre que l'ordonnée $I = 5$ A coupe au voisinage de cette température, la courbe $I = f(\theta)$ correspondant au fil de 0,6 mm de diamètre (point C).

Le fil de 0,6 mm de diamètre, parcouru par un courant de 5 A, fonctionne, en effet, à une température voisine de 600°C lorsqu'il est tendu horizontalement dans l'air calme.

Entre les régions II et III, nous avons indiqué, comme transition, une série de courbes donnant la variation de la résistance en fonction de la température, en tenant compte de la variation thermique de la résistivité de l'alliage considéré.

Pour l'alliage RCA 33, les Acieries d'Imphy indiquent un coefficient de température moyen de la résistivité, entre 0 et $1\ 000^{\circ}\text{C}$ égal à

$$\frac{\rho_{\theta} - \rho_0}{\rho_0} \text{ par degré} = 0,05 \cdot 10^{-5},$$

c'est de ce coefficient moyen dont nous avons tenu compte.

Pour connaître la résistance à froid, il suffit, alors, à partir du point D correspondant à la valeur de la résistance à chaud trouvée précédemment

$$R = 40 \Omega,$$

de descendre l'échelle des températures, à droite de la figure, d'une quantité égale à la température de fonctionnement de l'élément chauffant considéré, c'est-à-dire dans l'exemple choisi, de 900°C . On aboutit ainsi au point E, d'abscisse

$$R_0 = 38,2 \Omega,$$

qui est la valeur de la résistance à froid cherchée.

Dans la région III du plan, nous avons tracé un nouveau faisceau de droites

$$R_0 = r_{\theta} I,$$

donnant, pour chaque diamètre de fils RCA 33 (sur l'axe OX), la résistance à froid R_0 à 0° en ohms, en fonction de la longueur l du conducteur en mètres (sur l'axe OY'), et de la résistance r_0 en ohms par mètre, à 0° .

Les valeurs de r_0 peuvent être calculées, mais elles sont généralement indiquées sur les tables d'intensités fournies par les fabricants de fils.

Ainsi, en partant de la résistance à froid

$$R_0 = 38,2 \Omega,$$

nous aboutissons, sur la droite OM correspondant au diamètre 0,6 mm, au point F, et, sur l'axe OY', à la longueur de 7,80 m

$$l = 7,80 \text{ m.}$$

Enfin, dans la région IV du plan, nous avons tracé le faisceau de droites

$$p = p_0 l,$$

donnant, également pour chaque diamètre de fil, (sur l'axe OX'), le poids p du conducteur en grammes, en fonction de la longueur l en mètres (sur l'axe OY'), et du poids p_0 par mètre, en grammes.

La longueur de 7,80 m ci-dessus correspond, sur la droite ON (fil de 0,6 mm pour lequel $p_0 = 1,42 \text{ g}$), au point G et au poids OP, sur OX', tel que

$$OP = p = 16 \text{ g.}$$

Pour ne pas mélanger un nouveau faisceau de droites avec le précédent, au risque de confusions, nous avons tracé, sur la partie gauche du diagramme, un nouvel axe ZZ', en reportant en O' l'origine des coordonnées et nous avons tracé, à partir de cette nouvelle origine et pour chaque diamètre de fil :

1° Dans la partie IV du plan, les droites d'équations

$$S = \pi dl \text{ 10 cm}^2,$$

donnant, sur l'axe O'O, la surface extérieure de refroidissement S du fil en centimètres carrés, en fonction de sa longueur l en mètres (reportée sur l'axe O'Z' et à la même échelle qu'en OY') et de son diamètre d en millimètres;

2° Dans la partie I du plan, les droites d'équations

$$W = S w$$

donnant, sur l'axe O'Z, la puissance W absorbée par un élément,

en watts, en fonction de la surface extérieure S définie ci-dessus et du nombre de watts par centimètre carré w .

Ainsi, partant de l'ordonnée des points F ou G , c'est-à-dire de la longueur de 7,80 m, on trouve sur la droite $O'R$ ($S = \pi dl 10$), correspondant au diamètre 0,6 mm, le point H qui correspond lui-même à une surface de 147 cm² :

$$O'S = 147 \text{ cm}^2,$$

et pour la puissance considérée de 1 000 W, sur l'axe $O'Z$, à un taux d'émission de 6,8 W : cm² environ

$$w = 6,8 \text{ W : cm}^2.$$

En résumé, le diagramme nous a permis de déterminer les caractéristiques d'un élément de 1 000 W, 200 V, constitué par du fil résistant RCA 33 (des Acieries d'Imphy), pour lequel nous avons admis une température de fonctionnement de 900° C. et un coefficient de montage égal à 0,7.

Ces caractéristiques sont :

Puissance absorbée	1 000	W
Tension	200	V
Intensité	5	A
Résistance à chaud	40,0	Ω
Résistance à froid	38,2	Ω
Température de fonctionnement en régime ..	900°	C
Coefficient de montage	0,7	
Température du fil tendu horizontalement dans l'air calme	580°	C
Diamètre du fil	0,60	mm
Longueur du fil	7,80	m
Poids du fil	16	g
Surface de refroidissement	147	cm ²
Taux d'émission	6,8	W : cm ²

REMARQUE. — La valeur de ce diagramme réside principalement dans le fait qu'il permet de déterminer avec précision, les caractéristiques d'un conducteur chauffant, pour une température bien définie.

Il est facile à construire et il a l'avantage d'être complet.

DIAGRAMME N° 2. — *Puissance absorbée.* — Reprenons la formule (7) de la page 143 :

$$d = \sqrt{\frac{4}{\pi^2} \cdot 10^{-3} \frac{\rho}{w} \left(\frac{W}{U} \right)^2}$$

sous la forme suivante :

$$d^3 = \frac{4}{\pi^2} \cdot 10^{-1} \frac{\rho}{w} \left(\frac{W}{U} \right)^2,$$

dans laquelle :

d est le diamètre du fil, en millimètres;

ρ la résistivité de l'alliage considéré, à la température d'utilisation, en ohms : m : mm²;

w le nombre de watts par centimètre carré;

W la puissance absorbée par l'élément, en watts;

U la tension aux bornes de l'élément, en volts.

Extrayons de cette formule $\left(\frac{W}{U} \right)^2$, on a

$$\left(\frac{W}{U} \right)^2 = \frac{\pi^2}{4} \cdot 10 \frac{w}{\rho} d^3$$

et

$$(1) \quad W = \frac{\pi}{2} U \sqrt{10 \frac{w}{\rho} d^3}.$$

On peut choisir, pour ρ , une valeur correspondant à une température moyenne, par exemple, $\theta = 700^\circ \text{C}$. Posons

$$\rho = \rho_{700},$$

on a, dans ces conditions,

$$\rho_{700} = \rho_0 (1 + \alpha \theta),$$

ρ_0 est la résistivité de l'alliage à 0° ;

α son coefficient de température.

Les Aciéries d'Imphy donnent, pour l'alliage RCA 33 que nous avons choisi,

$$\rho_{15} = 138 \pm 5,5 \mu\Omega : \text{cm} : \text{cm}^2,$$

soit

$$\rho_{15} = 1,38 \pm 5,5 \Omega : \text{m} : \text{mm}^2$$

et comme coefficient de température moyen de la résistivité entre 0 et 1000°C

$$\frac{\rho_{\theta} - \rho_0}{\rho_0} \text{ par degré} = 0,05 \cdot 10^{-3}.$$

On a donc, pour $\theta = 700^\circ \text{C}$,

$$\frac{\rho_{700} - \rho_0}{\rho_0} = 0,05 \cdot 10^{-3} \times 700,$$

d'où

$$\rho_{700} = 1,635 \rho_0.$$

Admettons, sans erreur sensible, que $\rho_0 = \rho_{15}$, on a

$$\begin{aligned} \rho_{700} &= 1,635 \times 1,38, \\ \rho_{700} &= 1,428 \Omega : \text{m} : \text{mm}^2. \end{aligned}$$

Si donc, dans la relation (1) ci-dessus, on remplace ρ par la valeur que nous venons de déterminer : $\rho = 1,428$, et si l'on pose, en outre,

$$U = 100 \text{ V},$$

on trouve, en définitive,

$$(2) \quad W_{100} = 415 \sqrt{wd^2},$$

expression qui permet de déterminer les valeurs de la puissance absorbée W , en watts, pour 100 V, en fonction du diamètre d du fil, exprimé en millimètres, et du nombre de watts par centimètre carré w , et de tracer la courbe

$$W_{100} = f(wd),$$

qui représente cette variation.

REMARQUE I. — Pour un alliage différent et, par conséquent, pour une valeur différente de la résistivité, on aurait toutes autres choses égales par ailleurs :

$$\frac{W}{W'} = \sqrt{\frac{\rho'}{\rho}},$$

ρ' désignant la nouvelle valeur de la résistivité;

W' la puissance absorbée correspondante.

REMARQUE II. — On aurait une relation semblable, si l'on considérait le même alliage à une température différente :

ρ' désignerait alors la nouvelle valeur de la résistivité à cette température.

REMARQUE III. — Le rapport $\sqrt{\frac{\rho'}{\rho}}$, que l'on peut appeler rapport de conversion, permet donc de se servir du même diagramme, pour différentes qualités de fils.

A noter que le diagramme de base pourrait être tracé pour simplifier les calculs en faisant $\rho = 1$, il suffirait, dans tous les cas, de multiplier les résultats obtenus par $\sqrt{\rho'}$:

ρ' serait alors la valeur de la résistivité de l'alliage considéré, à la température d'utilisation.

Longueur du conducteur. — Partant de la relation

$$R = \rho \frac{l}{s},$$

dans laquelle :

R est la résistance du conducteur, en ohms;

ρ la résistivité du métal, en ohms : m : mm²;

l la longueur du conducteur, en mètres;

s sa section, en millimètres carrés;

on sait que

$$s = \frac{\pi d^2}{4}$$

et que

$$(3) \quad R = \frac{U^2}{W},$$

d étant le diamètre du conducteur, en millimètres;

U la tension qui lui est appliquée, en volts;

W la puissance absorbée correspondante, en watts.

De ces trois relations on tire

$$(4) \quad l = \frac{U^2}{W} \frac{\pi d^2}{4} \frac{1}{\rho},$$

mais, si l'on tient compte de l'expression trouvée précédemment pour $\frac{W}{U}$, formule (1) de la page 167 :

$$\frac{W}{U} = \frac{\pi}{2} \sqrt{10 \frac{w}{\rho} d^3},$$

on trouve finalement que

$$(5) \quad l = \frac{U}{2} \sqrt{10^{-1} \frac{1}{\rho} \frac{d}{w}}.$$

Si l'on fait comme ci-dessus $U = 100$ V et $\rho = 1,428$, on a, en définitive,

$$(6) \quad l_{100} = 13,232 \sqrt{\frac{d}{w}},$$

expression qui permet de déterminer la longueur l d'un conducteur, en mètres, pour 100 V, en fonction de son diamètre d, en millimètres,

et du nombre de watts par centimètre carré de surface w , et de tracer la courbe

$$l_{100} = f(dw),$$

qui représente cette variation.

REMARQUE. — On aurait encore

$$\frac{l}{r} = \sqrt{\frac{2}{\rho}}.$$

Poids du conducteur. — La longueur l étant déterminée, il est facile d'en déduire le poids du conducteur.

On peut le faire à partir des indications données par les fabricants; il suffit, en effet, de multiplier la longueur l par le poids p_0 du mètre courant de fil, ou raisonner par le calcul de la façon suivante :

Si l'on désigne par :

p , le poids du conducteur;

ω , sa densité;

on peut écrire

$$p = \omega \frac{\pi d^2}{4} l,$$

p est exprimé en grammes, lorsque d est exprimé en millimètres et l en mètres.

Et, en tenant compte de la relation (5) ci-dessus :

$$p = \omega \frac{\pi d^2}{4} \frac{U}{2} \sqrt{10^{-1} \frac{1}{\rho} \frac{d}{w}} = \frac{\pi}{8} U \omega \sqrt{10^{-1} \frac{1}{\rho} \frac{d^3}{w}}.$$

Si l'on fait comme précédemment

$$\rho = 1,428, \quad U = 100 \text{ V},$$

et si l'on prend pour ω la densité de l'alliage RCA 33, soit $\omega = 7,2 \text{ g} : \text{cm}^3$, on obtient, en définitive,

$$p_{100} = 74,82 \sqrt{\frac{d^3}{w}},$$

relation qui permet de déterminer le poids de fil p d'un conducteur, en grammes, pour 100 V, en fonction de son diamètre d exprimé en millimètres, et du nombre de watts par centimètre carré w , et de tracer la courbe

$$p_{100} = f(dw),$$

qui représente cette variation.

REMARQUE. — Pour un alliage différent, en désignant respectivement par ρ' et σ' les valeurs de la résistivité et de la densité du nouvel alliage, on aurait toutes autres choses égales par ailleurs :

$$\frac{\rho'}{\rho} = \frac{\sigma}{\sigma'} \sqrt{\frac{\rho'}{\rho}}$$

Densité de courant. — On a, par définition,

$$\delta = \frac{I}{s},$$

δ est la densité de courant, en ampères par millimètre carré;
 I l'intensité du courant, en ampères;
 s la section du conducteur, en millimètres carrés.

Or

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{et} \quad R = \rho \frac{l}{s},$$

d'où

$$\delta = \frac{U}{\rho l},$$

mais

$$l = \frac{U}{\rho} \sqrt{10^{-1} \frac{1}{\rho} \frac{d}{w}},$$

on a donc finalement

$$\delta = \rho \sqrt{10 \frac{w}{\rho d}},$$

et si comme précédemment, on fait $\rho = 1,428$, on trouve

$$\delta = 5,2916 \sqrt{\frac{w}{d}},$$

relation qui permet de déterminer la densité de courant δ , en ampères par millimètres carrés, en fonction du diamètre d du conducteur exprimé en millimètres, et du nombre de watts par centimètre carré w , et de tracer la courbe

$$\delta = f(dw),$$

qui représente cette variation.

Résistance. — La valeur de la résistance, à la température d'utilisation, est donnée, en ohms, par la relation

$$R = \frac{U^2}{W},$$

dans laquelle :

U désigne la tension appliquée aux bornes du conducteur, en volts;
W la puissance qu'il absorbe, en watts.

La valeur de W est donnée par la relation (1), de la page 167

$$W = \frac{\pi}{2} U \sqrt{10 \frac{w}{\rho} d^2}.$$

On a donc

$$R = \frac{2}{\pi} U \sqrt{10^{-1} \frac{\rho}{w} \frac{1}{d^2}}.$$

Si l'on fait comme précédemment

$$U = 100 \text{ V}, \quad \rho = 1,428,$$

on trouve, en définitive,

$$R_{100} = \frac{2}{\pi} 100 \sqrt{\frac{1,428}{10} \frac{1}{w} \frac{1}{d^2}},$$

soit

$$R_{100} = 24,057 \sqrt{\frac{1}{w} \frac{1}{d^2}},$$

expression qui permet de déterminer la valeur de la résistance R d'un conducteur à la température d'utilisation, en ohms, pour 100 V, en fonction de son diamètre *d* exprimé en millimètres, et du nombre de watts par centimètre carré *w*, et de tracer la courbe

$$R_{100} = f(dw),$$

qui représente cette variation.

REMARQUE. — Pour un alliage différent, on aurait encore

$$\frac{R}{R'} = \sqrt{\frac{\rho}{\rho'}}.$$

Ces différentes fonctions sont représentées par les courbes des pages 173 et 174.

Comment déterminer à partir de ces courbes les caractéristiques d'un élément ?

Choisissons comme données initiales du problème :

la puissance.....	$W = 900$ watts
la tension.....	$U = 220$ volts
le nombre de watts par centimètre carré..	$w = 8$ W/cm ²

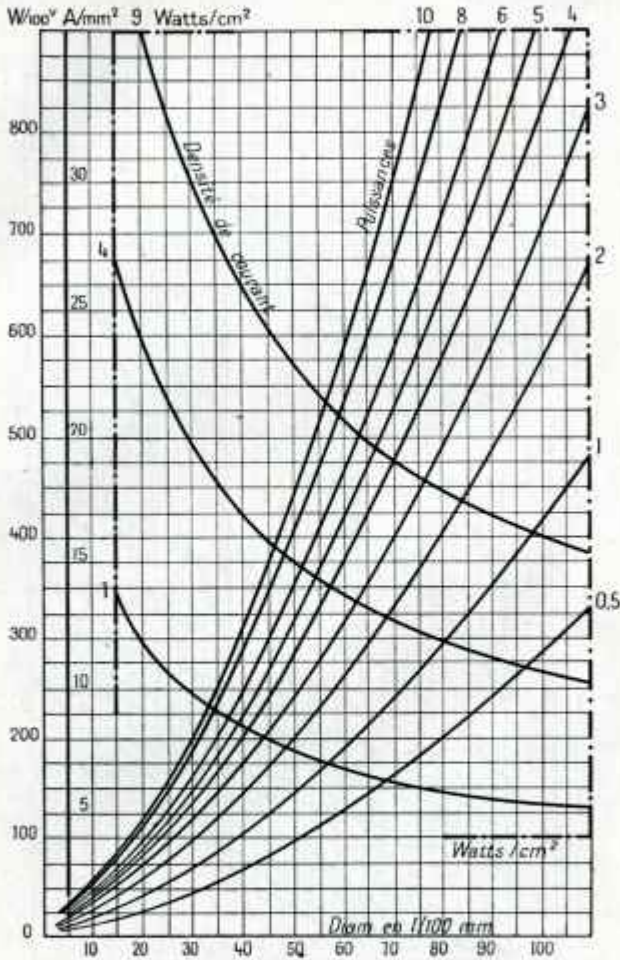


Diagramme 2 (a).

On a

$$W \text{ (pour 100 V)} = \frac{900 \times 100}{220} = 409 \text{ watts.}$$

On trouve (diagramme 2, ci-dessus) pour cette valeur de W et pour le taux d'émission de 8 W/cm², un fil de $0,50$ mm de diamètre.

Ce diamètre de fil correspond lui-même (diagr. 2 *b*), pour le taux d'émission ci-dessus, AUX caractéristiques suivantes :

longueur l	pour 100 V.....	3,24 m
poids p	" "	4,5 g
résistance R	" "	24 Ω

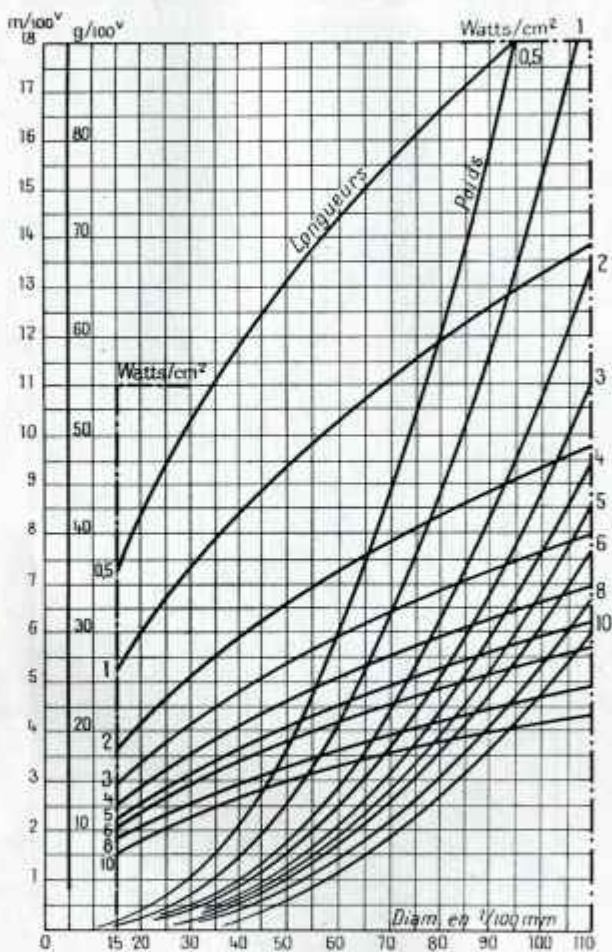


Diagramme 2 (*b*).

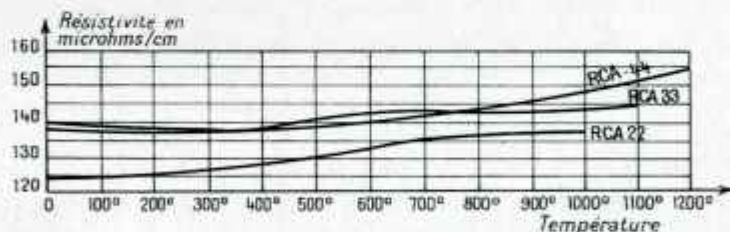
soit, pour 220 V,

longueur.....	7,10 m
poids.....	10 g
résistance.....	53 Ω

REMARQUE. — L'utilisation d'un diagramme permet donc de déterminer très rapidement et sans perdre de temps, les caractéristiques d'un conducteur chauffant. Sa lecture conduit naturellement à des résultats moins précis que ceux donnés par le calcul, mais si le diagramme est tracé à suffisamment grande échelle et avec un peu d'habitude, l'erreur correspondante est inférieure à 1 %, ce qui est généralement très suffisant dans la pratique.

*Caractéristiques de l'alliage RCA 33 des Acieries d'Imphy
qui a servi à déterminer les diagrammes précédents.*

Propriétés.	RCA 33.
Résistivité à 15° C en $\mu\Omega \cdot \text{cm} : \text{cm}^2$	138 \pm 5,5
Coefficient de température moyen de la résistivité entre 0° et 1 000° C, $\frac{\rho_{900} - \rho_0}{\rho_0}$ par degré.....	0,05 $\cdot 10^{-3}$
Température de disparition du magnétisme ou point de Curie.....	510° C
Densité, en g : cm ³	7,2
Coefficient de dilatation moyen entre 0° et 1 000° C, $\frac{l_0 - l_0}{l_0}$ par degré.....	15,37 $\cdot 10^{-6}$
Ténacité à l'état recuit, en kg : cm ²	80 à 85
Point de fusion.....	1 500° C
Chaleur spécifique, cal : g : degré.....	0,125
Conductibilité thermique à 20° C en unités C. G. S.....	0,014
Température limite d'emploi.....	1 100° C



*Variation thermique de la résistivité de l'alliage RCA 33
(résistivité en microhms : cm).*

θ (°C).	ρ_{θ}	θ (°C).	ρ_{θ}
15.....	138	600.....	142,14
100.....	138,14	700.....	142,83
200.....	138,28	800.....	143,52
300.....	138,83	900.....	144,21
400.....	139,10	1000.....	144,90
500.....	140,76		

REMARQUE I. — Les tables d'intensités des pages 254 et 256 fournissent des indications pour des fils ronds dont les diamètres sont compris entre 0,10 et 5 mm. Au delà de ce diamètre, la valeur de l'intensité I exprimée en ampères, en fonction du diamètre d (millimètres) et de la température θ (degrés centigrades), peut être calculée au moyen de la formule suivante indiquée par les Acéries d'Imphy :

$$\log I = A + B \log d,$$

dans laquelle A et B sont des coefficients qui varient avec la température comme l'indique le tableau ci-dessous :

θ (°C.)....	100.	200.	300.	400.	500.	600.
A.....	0,498	0,672	0,803	0,892	0,968 5	1,037 4
B.....	1,430	1,420	1,416	1,422	1,421	1,410
θ (°C.)....	700.	800.	900.	1000.	1100.	1200.
A.....	1,102	1,158 4	1,212	1,265	1,311 7	1,354
B.....	1,406	1,405	1,421	1,445	1,467	1,480

REMARQUE II. — Nous avons vu que les tables des intensités et des résistances étaient souvent complétées par des caractéristiques spécifiques, telles que la chute ohmique par mètre courant de fil, en volts, la puissance absorbée correspondante, en watts, la charge superficielle qui en découle, en watts par centimètre carré, etc.

Ces indications complémentaires sont très intéressantes à connaître, car elles permettent une utilisation plus judicieuse et plus rationnelle des tables et surtout parce qu'elles sont des guides précieux dans leur emploi.

La chute ohmique u pour 1 m de fil est déterminée par la formule suivante :

$$u = \frac{4\rho}{\pi} \frac{I}{d^2} \text{ volts,}$$

dans laquelle :

ρ est la résistivité du conducteur à la température considérée;

I l'intensité du courant, en ampères;

d le diamètre nominal du fil, en millimètres.

La puissance correspondante absorbée par 1 m de conducteur est alors

$$uI = \frac{4\rho}{\pi} \frac{I^2}{d^2} \text{ watts,}$$

et la charge superficielle

$$\frac{uI}{10\pi d} = \frac{\rho}{2,5\pi^2} \frac{I^2}{d^2} \text{ W:cm}^2.$$

En nous reportant aux indications fournies par les tables des résistances et des intensités de la page 256, nous y relevons, par exemple, qu'un courant de 85,19 A est nécessaire pour porter à la température de 500° C un fil RCA 33 de 5 mm de diamètre :

$$I = 85,19 \text{ A,}$$

et que la résistance au mètre de ce fil est, à cette température, égale à 0,0713 Ω

$$r_{500} = 0,0713 \Omega,$$

la chute ohmique correspondante u est donc égale à

$$u = r_{500} \times I = 0,0713 \times 85,19 = 6,07 \text{ V par mètre de fil,}$$

et la puissance absorbée uI est, par conséquent,

$$uI = 6,07 \times 85,19 = 517 \text{ W.}$$

La charge superficielle (pour 1 m de fil de 5 mm de diamètre et pour une surface de $10 \pi d = 157 \text{ cm}^2$) est donc

$$\frac{517}{157} = 3,29 \text{ W : cm}^2.$$

Étude du remplacement d'un alliage par un autre plus résistant (comparaison des caractéristiques obtenues).

Il est toujours intéressant de connaître dans quelles proportions varient les caractéristiques d'une résistance électrique (par exemple sa longueur et son poids) lorsqu'on change de qualité de fil.

La longueur d'un conducteur est, en effet, une caractéristique essentielle qui conditionne souvent l'encombrement d'un corps de chauffe. On est fréquemment gêné dans la pratique pour loger une puissance donnée dans une surface trop faible, et il est quelquefois nécessaire, pour se libérer de cette contrainte, de faire appel à un alliage plus résistant. Le problème est le même lorsqu'on veut *pousser* un élément et loger une puissance plus élevée dans un encombrement donné, déjà juste.

Le poids d'un conducteur chauffant est un élément du prix de revient qu'il est intéressant de pouvoir réduire.

Nous allons étudier ci-après, comparativement, les différents cas qui se présentent généralement dans la pratique.

L'apparition des alliages ferritiques, moins denses et de résistivité nettement supérieure aux alliages austénitiques, a notamment rendu

ce remplacement souvent possible, tout en conservant des sécurités de fonctionnement au moins aussi grandes. Ces nouveaux alliages permettent, en effet, des solutions plus souples et conduisent, dans bien des cas, à des économies importantes.

Deux cas sont donc à considérer suivant que le nouvel élément a une puissance égale ou une puissance supérieure à l'ancien.

Désignons par :

d, l, p, w et W , les caractéristiques d'un élément construit avec l'alliage dont la résistivité est ρ ;

et par

d', l', p', w' et W' les caractéristiques de l'élément de remplacement construit avec l'alliage plus résistant de résistivité ρ' .

1. ÉLÉMENTS DE MÊME PUISSANCE, A LA MÊME TENSION ($W = W'$, $U = U'$). — On peut alors conserver le même diamètre de fil, la même puissance spécifique (taux d'émission en watts par centimètre carré), ou la même longueur de fil.

a. Même diamètre de fils ($d = d'$). — Solution économique.

Nous allons comparer, dans ce cas, les puissances spécifiques w et w' (charges spécifiques superficielles), les longueurs de fils l et l' , et les poids p et p' .

Puissances spécifiques. — La formule (1) de la page 167 donne

$$\sqrt{\frac{w}{\rho}} = \sqrt{\frac{w'}{\rho'}},$$

soit

$$(1) \quad \frac{w'}{w} = \frac{\rho}{\rho'}$$

et

$$(2) \quad w' = \frac{\rho}{\rho'} w.$$

Longueurs. — La relation (5) de la page 169 indique que les longueurs des éléments sont entre elles dans le rapport

$$\frac{l}{l'} = \sqrt{\frac{\rho' w'}{\rho w}},$$

mais, d'après (1) ci-dessus,

$$(3) \quad \frac{l}{l'} = \frac{\rho'}{\rho}$$

et

$$(4) \quad l' = \frac{\rho}{\rho'} l.$$

Poids. — Les poids sont entre eux, dans le rapport (p. 170)

$$\frac{p}{p'} = \frac{m}{m'} \frac{l}{l'} \frac{d^2}{d'^2},$$

soit, d'après (3) ci-dessus et en tenant compte de ce que $d = d'$,

$$(5) \quad \frac{p}{p'} = \frac{m}{m'} \frac{\rho'}{\rho}$$

et

$$(6) \quad p' = \frac{m'}{m} \frac{\rho}{\rho'} p.$$

b. Même puissance spécifique ($w = w'$). — Solution de sécurité.

La comparaison s'étend dans ce cas, aux diamètres des fils, aux longueurs et aux poids.

Diamètres des fils. — La formule (1) de la page 167 permet d'écrire

$$\frac{d^3}{\rho} = \frac{d'^3}{\rho'},$$

soit

$$(7) \quad \frac{d}{d'} = \sqrt[3]{\frac{\rho}{\rho'}}$$

et

$$(8) \quad d' = \sqrt[3]{\frac{\rho'}{\rho}} d.$$

Longueurs. — La formule (5) de la page 169 permet d'écrire, dans ce cas,

$$\frac{l}{l'} = \sqrt{\frac{d}{d'} \frac{\rho'}{\rho}},$$

soit, d'après (7) ci-dessus,

$$(9) \quad \frac{l}{l'} = \left(\frac{\rho'}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}}$$

et

$$(10) \quad l' = \left(\frac{\rho}{\rho'} \right)^{\frac{1}{3}} l.$$

Poids. — On a comme précédemment

$$\frac{p}{p'} = \frac{m}{m'} \frac{l}{l'} \frac{d^2}{d'^2},$$

et, en tenant compte de (7) et (9) ci-dessus :

$$(11) \quad \frac{p}{p'} = \frac{m}{m'} \left(\frac{\rho'}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

et

$$(12) \quad p' = \frac{m'}{m} \left(\frac{\rho'}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} p.$$

c. Même longueur ($l = l'$). — C'est évidemment la solution offrant le maximum de sécurité.

Nous avons à comparer dans ce cas les puissances spécifiques, les diamètres et les poids.

Puissances spécifiques. — La formule (1) de la page 167 donne

$$\frac{w}{w'} = \frac{\rho}{\rho'} \frac{d'^2}{d^2}.$$

La formule (5) de la page 169 donne également, pour le cas considéré,

$$\frac{d}{d'} = \frac{\rho'}{\rho} \frac{w'}{w}.$$

On a finalement

$$(13) \quad \frac{w}{w'} = \sqrt{\frac{\rho'}{\rho}}$$

et

$$(14) \quad w' = \sqrt{\frac{\rho}{\rho'}} w.$$

Diamètres. — Les relations précédentes permettent aussi d'écrire

$$\frac{d}{d'} = \sqrt{\frac{\rho}{\rho'}}$$

et

$$(15) \quad d = \sqrt{\frac{\rho}{\rho'}} d'.$$

Poids. — On a toujours

$$\frac{p}{p'} = \frac{m}{m'} \frac{l}{l'} \frac{d^2}{d'^2},$$

mais en tenant compte de la relation (15) ci-dessus et de ce que $l = l'$

$$(16) \quad \frac{p}{p'} = \frac{m}{m'} \frac{\rho}{\rho'}$$

et

$$(17) \quad p' = \frac{m'}{m} \frac{\rho'}{\rho} p.$$

2. ÉLÉMENTS DE PUISSANCES DIFFÉRENTES, A LA MÊME TENSION, ($W \neq W'$, $U = U'$). — Le problème se pose alors de la façon suivante :

Les caractéristiques d'un conducteur chauffant étant connues, déterminer comparativement celles d'un conducteur chauffant de puissance supérieure, en utilisant un alliage plus résistant. Deux cas sont à considérer :

a. le conducteur chauffant de remplacement a la même longueur et fonctionne avec la même charge spécifique superficielle que le premier;

b. le conducteur chauffant de remplacement a le même poids au kilowatt de puissance absorbée que le premier.

La puissance de l'élément de remplacement étant plus grande, les conditions de fonctionnement sont changées : la température superficielle du nouveau conducteur est augmentée et l'on ne peut songer atteindre les charges spécifiques superficielles précédentes.

a. *Éléments de même longueur et de même puissance spécifique* ($l = l'$, $w = w'$). — Solution de sécurité.

Nous allons examiner successivement ce que deviennent la puissance, le diamètre du fil et son poids.

Diamètres. — Partant toujours de la formule (5) de la page 169, on trouve

$$(1) \quad \frac{d}{d'} = \frac{\rho}{\rho'}$$

et

$$(2) \quad d' = \frac{\rho'}{\rho} d.$$

Puissances. — La formule (1) de la page 167 donne

$$\frac{W^2}{W'^2} = \frac{d^3}{d'^3} \frac{\rho'}{\rho},$$

mais, en tenant compte de (1) ci-dessus,

$$(3) \quad \frac{W'}{W} = \frac{\rho'}{\rho}$$

et

$$(4) \quad W' = \frac{\rho'}{\rho} W.$$

Poids. — On a encore

$$\frac{p}{p'} = \frac{m}{m'} \frac{l}{l'} \frac{d^3}{d'^3},$$

mais

$$l = l' \quad \text{et} \quad \frac{d}{d'} = \frac{\rho}{\rho'}$$

On a donc finalement

$$(5) \quad \frac{p}{p'} = \frac{m}{m'} \frac{\rho^2}{\rho'^2}$$

et

$$(6) \quad p' = \frac{m'}{m} \frac{\rho'^2}{\rho^2} p$$

b. Éléments présentant le même poids au kilowatt $\left(\frac{p}{W} = \frac{p'}{W'}\right)$. — Solution économique offrant une sécurité au moins égale à celle de l'élément remplacé.

Nous allons comparer, dans ce cas, les longueurs de fils l et l' , les diamètres d et d' , et les puissances spécifiques w et w' .

Posons

$$(1) \quad \frac{W'}{W} = \frac{p'}{p} = a.$$

Longueurs. — Les formules (4) et (7) des pages 169 et 170 permettent d'écrire

$$(2) \quad \frac{l}{l'} = \frac{W'}{W} \frac{d^2}{d'^2} \frac{\rho'}{\rho}$$

et

$$(3) \quad \frac{p}{p'} = \frac{m}{m'} \frac{d^2}{d'^2} \frac{l}{l'}$$

d'où

$$\frac{l}{l'} = \sqrt{\frac{\rho' m'}{\rho m}}$$

et

$$(4) \quad l = \sqrt{\frac{\rho m}{\rho' m'}} l'$$

Diamètres. — La formule (2) ci-dessus donne

$$\frac{d^2}{d'^2} = \frac{l}{l'} \frac{W'}{W} \frac{\rho}{\rho'}$$

et, en tenant compte de (4),

$$\frac{d}{d'} = \sqrt[4]{\frac{1}{a^2} \frac{\rho}{\rho'} \frac{m}{m'}}$$

soit

$$(5) \quad d = \sqrt[4]{a^2 \frac{\rho'}{\rho} \frac{m}{m'}} d'$$

Puissances spécifiques. — Les formules (1) et (8) des pages 167 et 170 permettent enfin d'écrire :

$$\frac{W}{W'} = \sqrt{\frac{w}{w'} \frac{\rho'}{\rho} \frac{d^3}{d'^3}} \quad \text{et} \quad \frac{P}{P'} = \frac{m}{m'} \sqrt{\frac{\rho' w'}{\rho w} \frac{d^3}{d'^3}}$$

On a donc en vertu de (1) et (5) ci-dessus :

$$\frac{w}{w'} = \sqrt[4]{\frac{1}{d'^2} \frac{\rho}{\rho'} \left(\frac{m}{m'}\right)^2}$$

et

$$(6) \quad w' = \sqrt[4]{\alpha^2 \frac{\rho'}{\rho} \left(\frac{m}{m'}\right)^2} w.$$

Pour illustrer l'étude que nous venons de faire et pour chiffrer cette comparaison dans un cas concret, nous allons étudier comparativement les caractéristiques d'un conducteur chauffant en nickel-chrome, le RNC 3 des Acières d'Imphy par exemple, et celles d'un conducteur chauffant en fer-chrome-aluminium, le RCA 33 dont nous avons déjà eu l'occasion de parler.

Nous rappelons, ci-après, les caractéristiques de ces deux alliages

Propriétés.	Alliage	
	nickel-chrome RNC 3.	fer-chrome aluminium RCA 33.
Résistivité à 15° C. ($\mu\Omega$: cm : cm ²) . . .	102 ± 4	138 ± 5
Coefficient moyen de température entre 0° et 1 000° C. par degré . . .	0,05 à 0,08 . 10 ⁻²	0,05 . 10 ⁻²
Densité	8,45	7,2

Nous supposons que la température d'utilisation des fils est la même pour les deux éléments et qu'elle est égale à 1 000° C.

Les résistivités ρ et ρ' à cette température sont respectivement

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_{15} [1 + \alpha (1000 - 15)] && \text{pour le nickel-chrome,} \\ \rho' &= \rho'_{15} [1 + \alpha' (1000 - 15)] && \text{pour le fer-chrome-aluminium,} \end{aligned}$$

soit sensiblement

$$\begin{aligned} \rho &= 102 \times 1,05, \\ \rho' &= 138 \times 1,05, \end{aligned}$$

il se trouve que les coefficients moyens de température sont égaux et disparaissent dans les calculs.

On a finalement les coefficients suivants :

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{\rho'}{\rho}} \times 100 &= \sim 135 \% & \text{et} & \sqrt{\frac{\rho'}{\rho}} \times 100 = \sim 74 \% , \\ \sqrt{\frac{\rho'}{\rho}} \times 100 &= \sim 116 \% & \text{"} & \sqrt{\frac{\rho'}{\rho}} \times 100 = \sim 86 \% , \\ \sqrt{\frac{\rho'}{\rho}} \times 100 &= \sim 111 \% & \text{"} & \sqrt{\frac{\rho'}{\rho}} \times 100 = \sim 90,45 \% , \\ \frac{\sigma'}{\sigma} &= 0,852 & \text{"} & \frac{\sigma'}{\sigma} = \sim 1,17. \end{aligned}$$

Le tableau suivant résume alors cette comparaison :

ÉTUDE DU REMPLACEMENT
D'UN CONDUCTEUR CHAUFFANT EN NICKEL-CHROME RNC 3
PAR UN CONDUCTEUR CHAUFFANT FER-CHROME-ALUMINIUM RCA 33.
 (Comparaison de leurs caractéristiques.)

1. ÉLÉMENTS DE MÊME PUISSANCE,
A LA MÊME TENSION : $W = W'$, $U = U'$.

a. Même diamètre de fil : $d = d'$.

Puissances spécifiques superficielles.	$w' = \frac{\rho'}{\rho} w$	$w' = 135 \% w$
Longueurs.....	$l' = \frac{\rho}{\rho'} l$	$l' = 74 \% l$
Poids.....	$p' = \frac{\sigma'}{\sigma} \frac{\rho'}{\rho} p$	$p' = 63 \% p$

b. Même puissance spécifique : $w = w'$.

Diamètres des fils.....	$d' = \sqrt{\frac{\rho'}{\rho}} d$	$d' = 111 \% d$
Longueurs.....	$l' = \sqrt{\frac{\rho}{\rho'}} l$	$l' = 90,4 \% l$
Poids.....	$p' = \frac{\sigma'}{\sigma} \left(\frac{\rho'}{\rho} \right)^{\frac{3}{2}} p$	$p' = 94,6 \% p$

c. Même longueur : $l = l'$.

Puissances spécifiques.....	$w' = \sqrt{\frac{\rho'}{\rho}} w$	$w' = 86 \% w$
Diamètres.....	$d' = \sqrt{\frac{\rho'}{\rho}} d$	$d' = 116 \% d$
Poids.....	$p' = \frac{\sigma'}{\sigma} \frac{\rho'}{\rho} p$	$p' = 115 \% p$

2. ÉLÉMENTS DE PUISSANCES DIFFÉRENTES,
A LA MÊME TENSION : $W \neq W'$, $U = U'$.

a. Même longueur et même puissance spécifique : $l = l'$ et $w = w'$.

Diamètres	$d' = \frac{\rho'}{\rho} d$	$d' = 135 \% d$
Puissances	$W' = \frac{l'}{l} W$	$W' = 135 \% W$
Poids	$p' = \frac{m'}{m} \left(\frac{\rho'}{\rho}\right)^2 p$	$p' = 156 \% p$

b. Même poids au kilowatt : $\frac{p}{W} = \frac{p'}{W'}$, avec $\frac{W'}{W} = \frac{p'}{p} = a$.

Puissances spécifiques...	$w' = \sqrt[3]{a^2 \frac{\rho'}{m'} \left(\frac{m'}{m}\right)^3} w$	$w' = 95,6 \% \sqrt[3]{a} w$
Diamètres	$d' = \sqrt[3]{a^2 \frac{\rho'}{m'} \frac{m}{m'}} d$	$d' = 112,1 \% \sqrt[3]{a} d$
Longueurs	$l' = \sqrt[3]{\frac{\rho m}{\rho' m'}} l$	$l' = 93,0 \% l$
Puissances et poids	$W' = a W$	et $p' = 100 \% a p$

Étude du remplacement d'un conducteur chauffant à un seul circuit, par un conducteur chauffant de même puissance à plusieurs circuits.

Ce problème se pose assez fréquemment dans la pratique toutes les fois où l'on a intérêt à composer un élément chauffant au moyen de plusieurs conducteurs en parallèle, dans le but, par exemple, d'améliorer la répartition de la température et de faciliter le réglage de la puissance absorbée ou d'augmenter la sécurité du conducteur chauffant, etc.

Cela est intéressant notamment lorsque l'encombrement le permet et lorsque l'élément est appelé à absorber de fortes intensités.

Nous allons examiner ci-après, comparativement, les caractéristiques d'un élément à un seul circuit et celles d'un élément, de même puissance, composé de plusieurs circuits.

Considérons (*fig. 3*), un élément AB, de résistance R, alimenté sous la tension U et soit I l'intensité qui le parcourt.

La puissance absorbée W est donnée par la relation

$$W = UI = \frac{U^2}{R}.$$

Cet élément, à un seul circuit, est constitué par exemple par un fil de diamètre d_1 mm. Ses caractéristiques sont connues et ont été déterminées par les formules que nous avons étudiées précédemment.

Désignons donc par :

- l_1 , sa longueur, en mètres;
- p_1 , son poids, en grammes;
- w_1 , le nombre de watts dissipés par centimètre carré;
- ρ_1 , la résistivité de l'alliage considéré;
- ϖ_1 , le poids spécifique de cet alliage.

On sait notamment que

$$(1) \quad d_1^2 = \frac{4}{\pi^2} \frac{\rho_1}{R} \frac{W}{w_1} 10^{-4},$$

$$(2) \quad l_1 = \frac{U^2}{W} \frac{\pi d_1^2}{4} \frac{1}{\rho_1},$$

$$(3) \quad p_1 = \varpi_1 \frac{\pi d_1^2}{4} l_1.$$

Nous voulons étudier comparativement les caractéristiques d'un élément CD, de même puissance totale W , alimenté à la même tension U , mais constitué par n conducteurs couplés en parallèle.

La puissance absorbée est comme précédemment :

$$W = UI = \frac{U^2}{R},$$

R est alors la résistance apparente du nouvel élément, exprimée en ohms.

Si r_n désigne la résistance de chacun des conducteurs, on sait que

$$(4) \quad r_n = nR.$$

Désignons de même par

- d_n , le diamètre du fil utilisé;
- l_n , la longueur de chacune des résistances élémentaires;
- p_n , le poids de chacune des résistances élémentaires.

Soient, d'autre part,

- w_2 , le nombre correspondant de watts dissipés par centimètre carré;
- ρ_2 , la résistivité de l'alliage utilisé;
- ϖ_2 , le poids spécifique de cet alliage.

Supposons tout d'abord que les résistances AB et CD soient faites avec des fils de même qualité, c'est-à-dire que

$$\rho_1 = \rho_2 \quad \text{et} \quad w_1 = w_2.$$

Après avoir déterminé le diamètre d_n du fil de l'élément de remplacement, en fonction de d_1 , nous comparerons la longueur l_1 et le poids p_1 du conducteur unique AB, respectivement à la longueur totale et au poids total de l'ensemble des conducteurs élémentaires considérés.

Désignons à cet effet par :

L la longueur totale des fils de ces n conducteurs;

P le poids total des fils de ces n conducteurs.

On a évidemment

$$L = n l_n,$$

$$P = n p_n.$$

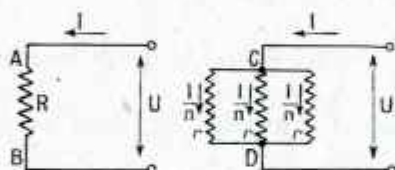


Fig. 3.

Il est intéressant, en effet, de déterminer les rapports $\frac{l_1}{L}$ et $\frac{p_1}{P}$.
Posons

$$\frac{l_1}{L} = \alpha \quad \text{et} \quad \frac{p_1}{P} = \beta.$$

Nous avons vu (4) que

$$(5) \quad \frac{r_n}{R} = \alpha.$$

On a aussi

$$(6) \quad \frac{W}{W_n} = \beta,$$

W_n étant la puissance absorbée par chaque dérivation.

Premier cas. $w_1 = w_2$. — Les éléments considérés fonctionnent avec la même charge superficielle : l'élément de remplacement offre, par conséquent, une sécurité au moins égale à celle de l'élément à circuit unique.

Diamètres. — Le rapport des diamètres est, d'après la relation (1) ci-dessus,

$$\left(\frac{d_1}{d_n}\right)^3 = \frac{r_n}{R} \frac{W}{W_n} = n^2,$$

d'où

$$(7) \quad \frac{d_1}{d_n} = \sqrt[3]{n^2}.$$

Longueurs. — Le rapport des longueurs est, de même, d'après la relation (2),

$$\frac{l_1}{l_n} = \frac{W_n}{W} \frac{d_1^3}{d_n^3},$$

soit en tenant compte de (6) et de (7),

$$(8) \quad \frac{l_1}{l_n} = \sqrt[3]{n}.$$

d'où

$$(9) \quad \alpha = \frac{l_1}{L} = \frac{l_1}{n l_n} = \sqrt[3]{\frac{1}{n^2}}.$$

Poids. — Le rapport des poids est, dans les mêmes conditions [relation (3)] :

$$\frac{p_1}{p_n} = \frac{d_1^3}{d_n^3} \frac{l_1}{l_n},$$

soit en tenant compte de (7) et de (8) :

$$(10) \quad \frac{p_1}{p_n} = \sqrt[3]{n^2}$$

et, par conséquent,

$$(11) \quad \beta = \frac{p_1}{P} = \frac{p_1}{n p_n} = \sqrt[3]{n^2}.$$

Deuxième cas. $w_1 \neq w_2$. — Si l'encombrement réservé à l'élément chauffant le permet et si l'on veut constituer cet élément au moyen de plusieurs conducteurs en parallèle fonctionnant avec une sécurité plus grande que celle obtenue avec l'élément à conducteur unique, il suffit de se fixer une nouvelle puissance spécifique inférieure à la précédente :

$$w_2 < w_1$$

Posons

$$\frac{w_2}{w_1} = k \quad \text{avec} \quad k < 1.$$

Diamètres. — On a

$$\left(\frac{d_1}{d_n}\right)^3 = \frac{r_n}{R} \frac{W}{W_n} \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

et

$$(12) \quad \frac{d_1}{d_n} = \sqrt[3]{kn^2}.$$

Longueurs. — On a de même

$$\frac{l_1}{l_n} = \frac{W_n}{W} \frac{d_1^3}{d_n^3}$$

et

$$(13) \quad \frac{l_1}{l_n} = \sqrt[3]{nk^2},$$

d'où

$$(14) \quad \alpha = \frac{l_1}{L} = \frac{l_1}{nl_n} = \sqrt[3]{\frac{k^2}{n^2}}.$$

Poids. — Le rapport des poids est toujours

$$\frac{p_1}{p_n} = \frac{d_1^3}{d_n^3} \frac{l_1}{l_n},$$

soit

$$(15) \quad \frac{p_1}{p_n} = \sqrt[3]{k^4 n^3}$$

et

$$(16) \quad \frac{p}{P} = \frac{p_1}{P} = \frac{p_1}{np_n} = \sqrt[3]{n^3 k^4}.$$

REMARQUE I. — On peut étudier de la même façon le cas où l'élément de remplacement est constitué par un alliage différent.

On a alors

$$\hat{r}_1 \neq \hat{r}_2 \quad \text{et} \quad m_1 \neq m_2.$$

Posons

$$\frac{\hat{r}_2}{\hat{r}_1} = m \quad \text{et} \quad \frac{m_2}{m_1} = \delta.$$

REMARQUE II. — On peut de même se proposer de remplacer, dans chacun des cas envisagés ci-dessus, un élément à circuit unique, par un élément à circuits multiples de puissance différente : $W_1 \neq W_2$.

Ces calculs n'offrent aucune difficulté.

Pour concrétiser les deux cas que nous venons d'examiner, suppo-

sons que l'élément AB soit un élément de four fonctionnant à 1 000° et qu'il absorbe 85 A sous 100 V, c'est-à-dire une puissance de

$$W = 85 \times 100 = 8,5 \text{ kW.}$$

Admettons que les conditions de fonctionnement de cet élément correspondent à un coefficient de montage égal à 0,5 ($\theta' = 500^\circ$) et qu'il soit réalisé avec du fil RCA 33.

En nous reportant à la table des intensités de la page 256, nous constatons que l'intensité de 85 A correspond, pour la température de 500° C., à un fil de 5 mm de diamètre :

$$d_1 = 5 \text{ mm.}$$

Les caractéristiques de ce fil permettent de trouver :

$$l_1 = 16 \text{ m,}$$

$$p_1 = 2 \text{ 270 g,}$$

$$w_1 = 3,4 \text{ W ; cm}^2.$$

Nous allons chercher comparativement le diamètre, la longueur et le poids du fil d'un élément de même puissance, composé de quatre conducteurs chauffants couplés en parallèle :

$$n = 4.$$

Nous supposons que ces conducteurs sont, eux aussi, exécutés avec du fil de même qualité (RCA 33). Nous examinerons successivement :

a. Le cas où les résistances fonctionnent avec la même charge spécifique superficielle ; $w_1 = w_2$:

b. Le cas où les résistances fonctionnent avec une charge superficielle moitié moindre, c'est-à-dire avec une sécurité très accrue :

$$w_2 = \frac{1}{2} w_1, \quad \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{2}.$$

Chaque résistance est parcourue par un courant égal à $\frac{85}{4} = 21,25 \text{ A}$, représentant une puissance (sous 100 V), de 2 125 W.

a. $w_1 = w_2 = 3,4 \text{ W ; cm}^2$. — *Diamètres.* — Le rapport des diamètres est donné par la relation (7) ci-dessus, soit, pour $n = 4$,

$$\frac{d_1}{d_2} = \sqrt[3]{16} = 2,5198 \text{ soit sensiblement } 2,52$$

d'où

$$d_n = \frac{1}{2,52} d_1 \approx 2 \text{ mm},$$

le fil correspondant est donc un fil de 20/10 de millimètre.

Longueurs. — Les relations (8) et (9) ci-dessus donnent, pour $n = 4$,

$$\frac{l_1}{l_n} = \sqrt[3]{4} = 1,5874 \text{ soit sensiblement } 1,59.$$

et

$$\frac{l_1}{L} = \sqrt{\frac{1}{16}},$$

soit

$$L = 2,52 \times 16 = 40,32 \text{ m.}$$

La longueur totale du fil des quatre conducteurs montés en parallèle, est donc égale à 40,32 m.

Poids. — Les relations (10) et (11) ci-dessus donnent, pour $n = 4$,

$$\frac{P_1}{P_n} = \sqrt[3]{1024}$$

et

$$\frac{P_1}{P} = \sqrt[3]{16} = 2,52$$

d'où

$$P = \frac{2270}{2,52} = 902 \text{ g.}$$

Ainsi donc, l'élément de remplacement est, en définitive, constitué par 40,32 m de fil de 20/10 de millimètre répartis également entre quatre conducteurs.

Le poids de cet élément, de 902 g seulement, est, par conséquent, très inférieur à celui du fil de 5 mm de diamètre qui constituait le conducteur unique du premier élément (2270 g).

On voit ainsi apparaître un intérêt de prix de revient non négligeable.

REMARQUE. — La formule

$$\frac{d_1}{d_n} = \sqrt[3]{n^2},$$

ne permet pas toujours, quel que soit n , de tomber sur un diamètre d_n

existant, comme cela a été le cas dans l'exemple que nous avons choisi ci-dessus. Mais les formules indiquées ont l'avantage de situer le problème et de déterminer un diamètre de fil, compris entre deux diamètres normalisés.

On choisit le diamètre existant le plus rapproché de d_n et l'on poursuit les calculs en se servant des tables, comme il a été indiqué par ailleurs.

b. $w_1 \neq w_2$, $w_1 = 2 w_2$, $k = \frac{1}{2}$. — *Diamètres.* — On trouve de même pour $n = 4$,

$$\frac{d_1}{d_n} = \sqrt[3]{8} = 2,$$

d'où

$$d_n = 2,5 \text{ mm.}$$

Longueurs. — Le rapport des longueurs est, dans ce cas,

$$\frac{l_1}{L} = \sqrt{\frac{1}{64}},$$

d'où

$$L = 4 \times 16 = 64 \text{ m.}$$

Poids. — Le rapport des poids est, dans ce cas particulier,

$$\frac{P_1}{P} = 1,$$

les éléments ont donc le même poids.

Ainsi, avec les valeurs choisies pour n et pour k , il se trouve que la condition

$$\sqrt[3]{n^2 k^3} = 1$$

ou que la condition équivalente

$$nk^2 = 1,$$

est satisfaite : c'est la condition nécessaire et suffisante pour que les poids des éléments soient les mêmes dans les deux cas envisagés; si donc, cette relation est remplie et si l'on se fixe n (nombre de conducteurs de l'élément de remplacement), le rapport de sécurité k s'en déduit automatiquement. Inversement, si l'on se fixe ce coefficient de sécurité, on en déduit de même le nombre de conducteurs nécessaires pour que l'élément de remplacement ait le même poids que l'élément à conducteur unique.

On peut résumer cet exposé par le tableau ci-après :

ÉTUDE DU REMPLACEMENT
D'UN CONDUCTEUR CHAUFFANT A UN SEUL CIRCUIT
PAR UN CONDUCTEUR CHAUFFANT A PLUSIEURS CIRCUITS.
 (Comparaison de leurs caractéristiques.)

1. MÊME PUISSANCE, MÊME TENSION, MÊME ALLIAGE :

$$(W_1 = W_2, U_1 = U_2, \hat{\rho}_1 = \hat{\rho}_2, \varpi_1 = \varpi_2).$$

a. Même charge spécifique superficielle ($w_1 = w_2$).

Diamètres des fils.	$d_n = d_1 n^{-\frac{2}{3}}$	
Longueurs.....	$l_n = l_1 n^{-\frac{1}{3}}$	$L = l_1 n^{\frac{2}{3}}$
Poids.....	$p_n = p_1 n^{-\frac{2}{3}}$	$P = p_1 n^{-\frac{2}{3}}$

b. Charge spécifique superficielle plus faible ($w_2 < w_1$), $\frac{w_2}{w_1} = k$.

Diamètres des fils.	$d_n = d_1 k^{-\frac{1}{3}} n^{-\frac{2}{3}}$	
Longueurs.....	$l_n = l_1 k^{-\frac{2}{3}} n^{-\frac{1}{3}}$	$L = l_1 k^{-\frac{2}{3}} n^{\frac{2}{3}}$
Poids.....	$p_n = p_1 k^{-\frac{1}{3}} n^{-\frac{2}{3}}$	$P = p_1 k^{-\frac{1}{3}} n^{-\frac{2}{3}}$

2. MÊME PUISSANCE, MÊME TENSION, ALLIAGES DIFFÉRENTS

$$(W_1 = W_2, U_1 = U_2, \hat{\rho}_1 \neq \hat{\rho}_2, \varpi_1 \neq \varpi_2).$$

$$\frac{\hat{\rho}_2}{\hat{\rho}_1} = m, \quad \frac{\varpi_2}{\varpi_1} = \delta.$$

a. Même charge spécifique superficielle ($w_1 = w_2$).

Diamètres des fils.	$d_n = d_1 m^{\frac{1}{3}} n^{-\frac{2}{3}}$	
Longueurs.....	$l_n = l_1 m^{-\frac{1}{3}} n^{-\frac{1}{3}}$	$L = l_1 m^{-\frac{1}{3}} n^{\frac{2}{3}}$
Poids.....	$p_n = p_1 \delta m^{\frac{1}{3}} n^{-\frac{2}{3}}$	$P = p_1 \delta m^{\frac{1}{3}} n^{-\frac{2}{3}}$

b. Charge spécifique superficielle plus faible ($w_2 < w_1$).

$$\frac{w_2}{w_1} = k \quad \text{avec } k < 1.$$

Diamètres des fils.	$d_n = d_1 k^{-\frac{1}{3}} m^{\frac{1}{3}} n^{-\frac{2}{3}}$	
Longueurs.....	$l_n = l_1 k^{-\frac{2}{3}} m^{-\frac{1}{3}} n^{-\frac{1}{3}}$	$L = l_1 k^{-\frac{2}{3}} m^{-\frac{1}{3}} n^{\frac{2}{3}}$
Poids.....	$p_n = p_1 k^{-\frac{1}{3}} \delta m^{\frac{1}{3}} n^{-\frac{2}{3}}$	$P = p_1 k^{-\frac{1}{3}} \delta m^{\frac{1}{3}} n^{-\frac{2}{3}}$

3. PUISSANCES DIFFÉRENTES $W_1 \neq W_2$ (pour mémoire).

CHAPITRE VII.

LES DIFFÉRENTS TYPES D'ÉLÉMENTS CHAUFFANTS.

Le domaine du chauffage électrique est si vaste qu'il serait superflu de vouloir décrire le très grand nombre d'éléments chauffants auxquels conduisent ses applications, encore faudrait-il les connaître tous et nous n'avons pas cette prétention.

Le champ de création de ces éléments est, en effet, extrêmement étendu et il ne nous est, de toute façon, pas possible de lui consacrer, dans le cadre de cette étude, la place importante qu'il comporte. Aussi nous contenterons-nous, pour fixer les idées, d'énumérer ici les principaux types de ces éléments, ceux du moins que l'on rencontre le plus couramment sur le marché, et d'en indiquer, très sommairement d'ailleurs, la technique de fabrication. Nous développerons cette technique pour certains d'entre eux, pour les plaques de cuisson enrobées notamment, dans la seconde partie de notre travail.

On a généralement l'habitude de classer les éléments chauffants en deux grandes familles, à savoir :

- les éléments lumineux, dits à feux visibles ou à feux vifs;
- les éléments obscurs;

suivant que leur température de surface est suffisante ou non pour les porter au rouge.

Les premiers chauffent principalement par rayonnement, les seconds fonctionnent à basse température et chauffent généralement par conduction ou par convection.

Il est opportun, croyons-nous, de faire remarquer que cette classification, quelque peu arbitraire, n'a rien d'absolu et que le terme *feu visible* est impropre et qu'il peut prêter à confusion, en ce sens que certains éléments obscurs ont leurs conducteurs chauffants visibles à l'œil nu, comme par exemple les éléments d'aérothermes refroidis par courant d'air, les toiles chauffantes, les éléments d'étuves, etc. Il est arbitraire aussi de vouloir différencier des éléments par leur température, car cette différenciation seule ne suffit pas à caractériser un type de corps de chauffe : un même type (Backer ou Calrod par exemple) peut, en effet, d'après cette classification, appartenir à

l'une ou à l'autre famille suivant que sa puissance absorbée et son taux d'émission (nombre de watts par centimètre carré), est suffisant ou non pour le porter au rouge dans des conditions normales de fonctionnement.

Cette classification est cependant généralement adoptée, elle a l'avantage d'être simple et nous la conserverons.

Éléments lumineux dits « à feux visibles ».

Certains sont à fils nus (1), d'autres sont protégés par une gaine métallique. Ces derniers constituent ce que l'on est convenu d'appeler les éléments blindés.

Les éléments à fils nus n'ont aucun caractère propre : ce sont les éléments de fours, les éléments de radiateurs, les plaques de cuisson à feu vif, etc. Ils sont constitués à partir de résistances en forme de boudins ou à partir de bandes : les boudins sont disposés à l'intérieur des cannelures d'un support réfractaire de forme appropriée, ou, lorsqu'il s'agit d'éléments de fours industriels, inclus et supportés par des briques réfractaires à parois pleines ou à alvéoles de rayonnement; les bandes sont, le plus souvent, ondulées suivant des sinusoides, elles peuvent se présenter de champ ou à plat, elles sont suspendues à l'intérieur des fours au moyen de crochets réfractaires de qualité spéciale et séparées par des entretoises de même nature et de même qualité; elles peuvent aussi être disposées sur des pièces en forme de peigne ou encore être posées simplement sur champ sur des supports plats, lorsqu'il s'agit d'éléments de sole.

Les éléments blindés possèdent, au contraire, une technique de fabrication particulière, généralement protégée par des brevets (2). Ils se prêtent, grâce à leurs qualités d'adaptation très grandes, à de multiples applications et sont employés avantageusement dans de nombreux appareils domestiques et industriels. Les plus connus sont les éléments Calrod, les éléments Backer, les éléments chromalox, les plaques tubulaires blindées « Calor », les foyers de cuisson « Rubanox », les plaques enrobées en fonte, ces dernières plus spécialement réservées aux appareils de cuisine domestique ou professionnelle.

Éléments Backer. — Le procédé Backer est protégé par de nombreux

(1) Ou rubans.

(2) On en trouve l'origine aux États-Unis. Le brevet allemand n° 85 090 du 15 décembre 1894, donne déjà la description d'un élément chauffant fabriqué par la Whittingham Electric Car Heating Company de Baltimore.

brevets anglais, il est exploité en France par la Métallurgie du Nickel dont les usines sont à Montfermeil (Seine-et-Oise).

L'élément Backer est essentiellement constitué par un fil résistant en nickel-chrome, boudiné en spirale et disposé suivant l'axe d'un tube métallique, duquel il est isolé par de la magnésie. Son diamètre extérieur est d'environ 9 mm.

La magnésie est formée sur place à l'intérieur même du tube, par l'action directe de la vapeur d'eau à haute température, sur du magnésium métallique. Pour ce faire, le boudin résistant entouré d'un tube de magnésium (1) est préalablement introduit à l'intérieur du tube enveloppe, et l'ensemble est soumis à une atmosphère saturée de vapeur d'eau dans un autoclave à haute pression. Le magnésium décompose l'eau : l'oxygène est absorbé en présence d'un excès de vapeur d'eau, pour former de l'hydrate de magnésie $Mg(OH)_2$, l'hydrogène est libéré. La magnésie hydratée ainsi formée est transformée, au cours d'un traitement thermique et chimique ultérieur, en oxyde de magnésium MgO chimiquement pur dépourvu notamment d'oxydes métalliques et d'impuretés alcalines :



Cette transformation s'accompagne d'un foisonnement considérable de la magnésie et l'augmentation de volume qui en résulte comprime très fortement la matière à l'intérieur de la gaine métallique. Cette matière pulvérulente acquiert ainsi une très grande dureté et forme un bloc isolant à la fois très homogène et très compact.

Lorsqu'un élément Backer est en fonctionnement, la transmission de la chaleur développée dans le fil, au tube extérieur, se fait ainsi, par conduction, dans d'excellentes conditions.

La technique de fabrication des éléments Backer a considérablement évolué depuis leur création. Ces éléments sont actuellement fabriqués à partir de gaines métalliques en inconel (2) pour résister aux températures élevées (700 à 750° C) qu'ils atteignent couramment en fonctionnement normal. Pour certaines applications cependant, les gaines sont quelquefois réalisées en cuivre, en bronze d'aluminium, en nickel, en acier ou en métal monel.

Pour les tubes de 9 mm de diamètre, les plus couramment employés, les puissances spécifiques sur les parois varient de 0,7 à 7 W/cm² : 1,8 W/cm² pour les éléments à immersion dans l'huile ou destinés à

(1) Ou de bandes de magnésium (voir ci-après p. 300).

(2) Alliage de nickel-chrome et de fer.

fonctionner à l'air libre à basse température, $5,3 \text{ W/cm}^2$ pour les éléments chauffants de cuisinières, 7 W/cm^2 pour les éléments à immersion dans l'eau.

Les bornes d'extrémité traversent des pièces en stéatite scellées au tube d'une façon rigoureusement étanche et sont ainsi capables de résister dans de bonnes conditions à une immersion prolongée dans l'eau. Les éléments sont donc à l'abri contre toute absorption d'humidité ultérieure, ils sont étanches non seulement à l'eau, mais aussi à la vapeur d'eau et aux gaz.

Signalons enfin que les tubes Backer peuvent être doublés extérieurement par une gaine protectrice en plomb, en acier inoxydable ou autre, ils sont ainsi aptes à être utilisés comme éléments à immersion pour le chauffage direct des bains les plus variés, voire même de liquides corrosifs. On les emploie aussi pour le chauffage des liquides ou de corps présentant, à l'état fondu, une certaine viscosité ou une conductivité thermique faible, tels que l'huile, la paraffine, la cire, etc., et pour la fusion de métaux blancs tels que le plomb.

Si l'on ajoute que les tubes fabriqués comme il vient d'être dit peuvent être conformés à la demande, en forme de spirale, d'épingle à cheveux, etc., ou être noyés dans la fonte, ou recevoir des ailettes de refroidissement, on conçoit aisément qu'ils soient susceptibles de très nombreuses applications.

C'est à l'ingénieur norvégien Christian Bergh Backer qu'est dû le procédé de fabrication que nous venons de décrire et auquel il a donné son nom.

Christian Backer a poursuivi la mise au point de ses inventions successivement en Norvège, aux États-Unis, au Canada et en Grande-Bretagne où il a fait des travaux remarquables. Son premier brevet, qui remonte à 1921, fut pris dans ce dernier pays. Depuis, plusieurs améliorations ont fait l'objet d'additifs assez nombreux entre 1923 et 1939.

Le brevet d'origine avait pour titre : « Procédé amélioré pour le traitement du magnésium et des alliages de magnésium ». Il est à remarquer que ce brevet ne se rapportait pas spécialement aux éléments de chauffage électrique (1).

C'est à partir de ce brevet général, qui semble d'ailleurs être tombé depuis dans le domaine public, que furent pris, par la suite, les autres brevets couvrant des dispositifs particuliers pour la fabrication des thermo-tubes.

(1) R. E. BLAKEY, *The production of mineral insulated electric resistance heaters* (Machinery Lloyd Continental, 2^e édition, A, 1947, p. 38).

Ces brevets, pris ensemble ou séparément, protègent ainsi les différentes transformations nécessitées par la fabrication de ces éléments chauffants :

— transformation chimique du magnésium chauffé à haute pression dans un tube en présence d'humidité jusqu'à ce que le métal soit transformé en un composé oxygéné de magnésium;

— traitements thermiques dans un four électrique entre 500 et 600° C pour recuire la gaine de l'élément et faire perdre de l'eau à l'hydroxyde précédemment formé et le transformer en oxyde; séchage du tube pendant 30 à 50 mn entre 330 et 350° C; etc.;

— traitements mécaniques pour retreindre et conformer le tube [mise en forme, aplatissement (1), etc.].

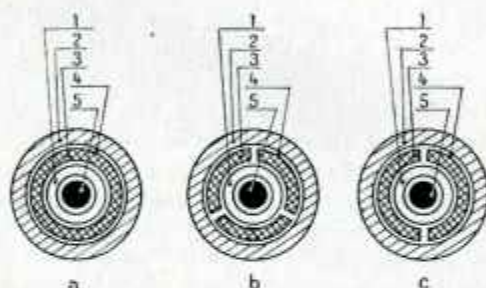


Fig. 17 bis.

1, conducteur chauffant; 2, tube enveloppe; 3, tube ou bandes de magnésium; 4, espace libre; 5, fil de magnésium.

Ces brevets protègent enfin la forme et la disposition du magnésium à l'intérieur du tube enveloppe :

C'est ainsi que le tube de magnésium initialement prévu a été successivement remplacé par une bande de magnésium meilleur marché enroulée en spirale autour du boudin résistant (*fig. 17 bis a*); puis par plusieurs bandes, au nombre de trois d'abord, formées en arcs de 120° et assemblées dans le tube enveloppe le long du conducteur chauffant (*fig. 17 bis b*), au nombre de deux ensuite, en forme de demi-cercles (*fig. 17 bis c*).

Un fil de magnésium disposé suivant l'axe du boudin résistant, comme l'indiquent ces figures, est également prévu pour être transformé en oxyde de magnésium de façon à garnir convenablement la partie centrale de l'élément chauffant.

(1) La réduction de volume peut atteindre 15 et 25 %.

Le foisonnement de la magnésie est tel que le volume de l'hydroxyde de magnésium formé correspond sensiblement au double du volume occupé par le magnésium métallique. Ce foisonnement a pour effet, nous l'avons vu, de comprimer très fortement la matière réfractaire à l'intérieur du tube enveloppe et d'en améliorer très sensiblement la conductivité thermique.

Malgré ce foisonnement important, l'idée de retreindre le tube n'était pas initialement exclue : après retreint, l'oxyde isolant devient alors extrêmement compact et n'occupe plus seulement que les deux tiers du volume qu'occupait initialement l'hydroxyde. Il est très dur et possède une résistance à l'isolement remarquable.

Au lieu d'être retreint, le tube peut être aplati en forme de lentille biconvexe et sa réduction de volume est encore considérable.

REMARQUE. — Le procédé Backer est exploité en Amérique par la Westinghouse (Corox Heaters); en France, par la Société Calor, à Lyon, et la Métallurgie du Nickel, à Montfermeil; en Allemagne, par Prometheus GmbH et Voigt et Häffner, à Francfort-sur-le-Mein; en Angleterre, par la Metropolitan Vickers et Hotpoint.

Éléments Calrod. — Le procédé de fabrication Calrod appartient à la General Electric and Co Limited d'Amérique (Hispeed Calrod); il est exploité en France par la Société Alsthom et construit dans ses usines de Lesquin-lès-Lille (Nord). Il est actuellement tombé dans le domaine public.

L'élément Calrod se présente exactement de la même façon que l'élément Backer que nous venons de décrire. Comme lui, il est constitué par un tube en acier spécial, à l'intérieur duquel est centré un fil résistant boudiné, convenablement isolé par de la magnésie. Le procédé de fabrication du Calrod est cependant tout à fait différent.

La magnésie préalablement traitée au four électrique à haute température et réduite en poudre très finement pulvérisée et très fluide est, en effet, tassée dans le tube et entre les spires du boudin au moyen d'un outillage perfectionné.

Suivant un procédé de fabrication (*fig. 17 ter*), la poudre de magnésie est introduite dans le tube enveloppe, vers le haut de celui-ci, elle y est tassée sous l'effet d'une puissante vibration mécanique. Le boudin résistant préalablement ancré à l'extrémité inférieure du tube, au moyen d'une borne telle que *a*, est tendu à l'intérieur de celui-ci à la longueur voulue par un dispositif approprié. Le centrage convenable de ce boudin, au cours du remplissage, est assuré par un petit

piston tubulaire qui se déplace vers le haut au fur et à mesure du tassement de la matière pulvérulente.

Le diamètre du tube est ensuite réduit de plusieurs millimètres au moyen d'une machine à rétreindre : la magnésie se trouve ainsi fortement comprimée et le fil résistant intimement enrobé dans une masse absolument compacte et très dure.

Le conducteur chauffant, enrobé dans une gaine métallique comme il vient d'être dit, est connecté à chacune de ses extrémités à une borne ou à une broche d'amenée de courant qui débouche à l'extérieur à travers un dispositif de fermeture de gaine. Ce dispositif, généralement réalisé par une matière de scellement appropriée, est étanche et conçu de façon à offrir à cet endroit de grandes lignes de fuite entre la broche et la gaine.

Suivant leur température de fonctionnement et leur utilisation, les gaines métalliques des éléments Calrod sont prévues en acier, en métal monel, en acier calorisé ou en acier inoxydable.

Les puissances spécifiques superficielles sur les parois varient de 1 à 4 W/cm² pour les éléments fonctionnant à l'air libre avec une température ambiante normale et de 2 à 6 ou 7 W/cm² pour les calrods munis d'ailettes. Les températures de surface correspondantes sont comprises entre 400 et 700° C dans le premier cas et entre 200 et 400° C dans le second cas.

Les éléments à immersion dans l'eau ont une densité de puissance comprise entre 6 et 8 W/cm².

Les éléments Calrod peuvent aussi être conformés d'une façon quelconque sans que le conducteur chauffant intérieur en soit aucunement altéré, sans que son centrage s'en trouve modifié et sans que se désagrège la magnésie comprimée; comme les backers, ils peuvent aussi être noyés dans la fonte.

C'est la British Thomson Houston Co Ltd à Rugby qui obtient, en 1914, le premier brevet concernant la fabrication du Calrod.

Ce brevet protégeait, en particulier, le procédé de remplissage du tube, les traitements thermiques qu'il devait subir à haute température et les opérations de retraits nécessaires pour que la matière réfractaire acquiert la compacité et la dureté voulues compatibles avec des isolements satisfaisants.

Un additif pris en 1920 (1) précisait une méthode originale de remplissage du tube vertical et un procédé de tassement de la matière pulvérulente par vibrations mécaniques.

(1) Brevet britannique n° 144 767 du 14 juin 1920.

Des brevets ultérieurs ⁽¹⁾, (1923 et 1931), ont eu pour objet de parfaire le centrage du boudin pendant le remplissage du tube. Il était prévu, à cet effet, des rondelles en mica, dites rondelles *araignées* en raison de leur forme, disposées de place en place le long du boudin, ou des pièces isolantes très légères qui étaient écrasées et réduites en poudre pendant l'opération de retrait.

Des centaines de milliers d'éléments ont été fabriqués suivant ces brevets, ils sont généralement connus sous le nom de *Calrod* en Amérique et de *Torribar* en Angleterre ⁽²⁾.

La British Thomson Houston ne s'est pas contentée de perfectionner le procédé de fabrication de ces éléments, mais elle a aussi

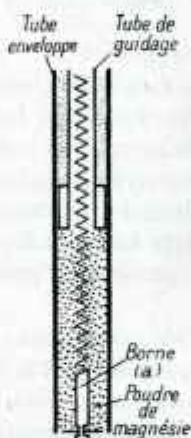


Fig. 17 ter.

mis au point pour cette fabrication un matériel très ingénieux à fonctionnement automatique.

REMARQUE I. — Il existe d'autres méthodes de remplissage des tubes que celles que nous venons de décrire. R. E. Blackey dans son étude déjà citée décrit notamment certains dispositifs mis au point par la General Electric Co d'Angleterre et par la Revo Electric Ltd, dans lesquels ce remplissage se fait horizontalement.

La Métallurgie du Nickel, d'après le même auteur, exploite par

⁽¹⁾ Toujours au nom de la British Thomson Houston Co (Brevets britanniques n^{os} 198 872 et 358 586).

⁽²⁾ D'après R. E. BLACKKEY.

exemple un brevet anglais (4) se rapportant à un procédé de fabrication de ce genre comportant le remplissage horizontal des tubes par de l'oxyde de magnésium en poudre très dense et fortement comprimé.

REMARQUE II. — Les backers comme les calods constituent donc des corps de chauffe cuirassés à faible inertie et à haute conductivité thermique; ils sont très robustes et ils possèdent des propriétés d'isolement électrique remarquables, une excellente rigidité diélectrique et un très faible courant de fuite à chaud.

Ces tubes chauffants se prêtent, comme nous l'avons annoncé, à de multiples applications domestiques et industrielles. Citons pour mémoire :

— les foyers de cuisson de cuisinières, constitués par des serpentins à *jeu vif* placés au-dessus d'un réflecteur inoxydable de forme appropriée. Ces foyers sont à faible inertie; ils rougissent dans un minimum de temps et donnent des démarrages rapides; leur température peut atteindre 700° C; ils fonctionnent exclusivement par rayonnement et par convection avec de très bons rendements à froid et à chaud; ils ont l'avantage de ne pas nécessiter l'emploi d'ustensiles de cuisine spéciaux;

— les éléments à immersion, avec gaine de protection en plomb, en acier inoxydable ou en monel, suivant la nature du liquide corrosif;

— les plaques de cuisson en fonte, dans lesquelles les tubes chauffants sont noyés dans la masse. Ces plaques constituent des corps de chauffe très robustes; il en existe de différentes dimensions et de différentes formes.

Les plaques rondes sont utilisées sur les cuisinières domestiques en lieu et place des autres types de foyers de cuisson de même diamètre, les plaques carrées ou rectangulaires à plus grandes surfaces et plus puissantes sont plus spécialement fabriquées pour l'équipement d'appareils de cuisine professionnelle.

La chaleur développée dans le tube chauffant par le passage du courant se transmet immédiatement par conduction à la masse métallique.

Suivant leurs puissances, ces plaques peuvent être obscures ou, au contraire, être portées au rouge et se comparer alors aux foyers des cuisinières à charbon.

(4) N° 494 804.

— certains grils spéciaux à barreaux chauffants, fabriqués suivant le même principe;

— les éléments à ailettes qui offrent la possibilité d'augmenter considérablement la puissance dissipée par unité de longueur des tubes chauffants, tout en conservant une température de surface très basse et qui permettent de résoudre les problèmes les plus délicats de chauffage, celui du chauffage des gaz par l'électricité en particulier;

— etc.

Les Fonderies Nestor Martin à Berchem Sainte-Agathe, en Belgique, fabriquent également des thermo-tubes cuirassés du même genre. L'enrobage-intérieur est obtenu au moyen de petites perles réfractaires non cuites, mais parfaitement séchées. Ces perles cylindriques sont enfilées sur le boudin à l'intérieur du tube et garnissent ainsi complètement l'espace libre entre la spirale chauffante et la paroi interne de ce tube. Celui-ci est ensuite passé à la machine à retreindre et réduit de diamètre, la matière réfractaire est alors fortement comprimée à l'intérieur : le fil résistant se trouve ainsi, en définitive, intimement enrobé dans l'isolant qui devient aussi dur que de la pierre.

Ces thermo-tubes ne se fabriquent actuellement que pour des éléments de fours de cuisinières électriques.

Plaque de cuisson tubulaire blindée Calor. — La température atteinte par cette plaque étant très élevée, de l'ordre de 700 à 750° C, permet de la classer parmi les éléments à feu visible : la densité de puissance atteint 6 W/cm².

Cette plaque est constituée par des tubes chauffants Backer annulaires, à section rectangulaire et à bords arrondis, à l'intérieur desquels le fil résistant est parfaitement centré et noyé dans de la magnésie comme il a été dit. Ces tubes, inoxydables à l'air, sont placés entre deux blindages métalliques, eux-mêmes inoxydables à chaud et inattaquables par les acides organiques provenant de la cuisson des aliments. Les blindages sont fortement pressés sur les tubes chauffants et soudés électriquement à eux par de très nombreux points de soudure, de façon à obtenir un contact intime permettant un écoulement satisfaisant de la chaleur par conductivité.

La transmission de chaleur du blindage supérieur aux ustensiles de cuisine se fait par rayonnement et par contact : cette plaque peut donc convenir à un type de casseroles quelconque.

Éléments obscurs.

La classification que nous avons annoncée permet donc assez mal de différencier la famille à laquelle appartient un élément chauffant et nous avons vu que, seule, sa température de surface pouvait décider de ce choix. Aussi nous a-t-il été donné, à plusieurs reprises, de décrire des éléments obscurs à propos d'éléments *jeu visible*, qui ne diffèrent des premiers que par leur puissance absorbée et un taux d'émission plus élevé.

Nous placerons cependant délibérément dans la catégorie des éléments obscurs, les plaques de cuisson en fonte qui, utilisées rationnellement avec ustensiles à fonds dressés, ne doivent, en aucun cas, être portées au rouge.

Plaques fonte enrobées. — Plus peut-être que tous les autres foyers de cuisson, la plaque fonte enrobée a considérablement évolué au cours des dernières années qui ont précédé la guerre.

Dans sa conception originale, la plaque fonte enrobée constituait, en effet, un corps de chauffe à grande inertie et à faible rendement qui a été peu apprécié par les usagers et qui a été peut-être, à l'époque, le principal obstacle au développement de la cuisine électrique. On avait trop tendance, en effet, à opposer alors la lenteur de cuisson de cette plaque lourde à la vitesse relative du brûleur à gaz. Actuellement d'ailleurs, malgré les progrès remarquables apportés dans la réalisation des plaques fonte qui sont devenues des plaques rapides, la course de vitesse entre l'électricité et le gaz n'est pas terminée, puisqu'il est question présentement de faire des brûleurs à gaz intensifs à 3 600 millithermies (1).

Bien que la plaque fonte ait été fabriquée au début de sa création avec des diamètres assez quelconques, les diamètres de 145, 180 et 220 mm ont vite été adoptés puisqu'ils faisaient déjà l'objet, à l'époque, d'une normalisation allemande (V. D. E.) (2) et suisse (A. S. E., S. N. V.) (3).

Du point de vue économique, il a été tenu compte ensuite, pour chacun de ces diamètres, des puissances optima correspondant aux meilleurs rendements. Mais le rendement a vite été sacrifié à la rapidité de chauffe : les puissances ont été augmentées jusqu'à des valeurs maxima compatibles avec une bonne tenue des plaques. Dans l'état

(1) De 3 400 à 3 600 millithermies.

(2) *Verband Deutscher Electrotechniker.*

(3) *Schweizerische Normen Vereinigung.*

actuel des choses et pour dépasser ces puissances limites, il y aurait lieu d'augmenter parallèlement le diamètre des plaques. Il en est actuellement question et les diamètres de 160, 200 et 240 mm semblent devoir être retenus.

En 1920, les caractéristiques des plaques de cuisson en fonte étaient les suivantes :

Diamètres en mm.	Puissances en W.	Puissances spécifiques W : cm ² .
110 à 120	250 à 400	2,3 à 3,5
160	550 à 600	2,7 à 3,0
200	900	2,9
220	1 000 à 1 500	2,6 à 4,0
280	1 800	2,9

Ces plaques étaient alors très lentes et peu appréciées, nous l'avons dit : on leur reprochait, avec juste raison, une inertie calorifique considérable.

Depuis cette époque, qui marquait un démarrage timide de la cuisine électrique en France, les constructeurs se sont rapidement appliqués (pour autant que la qualité de la matière le leur a permis), à combattre cette inertie très grande et la lenteur relative de montée en température qui en résultait.

Les perfectionnements ont porté principalement sur l'allègement du poids du corps en fonte, sur l'augmentation des puissances dissipées et sur l'amélioration des courants de fuite.

Les puissances sont ainsi passées assez vite aux valeurs ci-après :

700 à 800 W	pour une plaque de 145 mm	pesant 2,5 kg
1 100 à 1 300 »	»	» 180 »
1 600 à 1 800 »	»	» 220 »

Les progrès réalisés récemment dans l'élaboration des fontes spéciales réfractaires, résistant bien aux brusques variations de température, ont contribué, dans une large mesure, à améliorer la technique de fabrication de ces plaques. Il a ainsi été possible de réaliser un allègement plus important de la partie active en même temps qu'une augmentation beaucoup plus marquée de la puissance absorbée. L'allègement a porté principalement sur l'épaisseur même de la fonte, sur la réduction de la hauteur de la jupe et sur la diminution de l'épaisseur et de la hauteur des nervures. L'augmentation de la puissance a été rendue possible grâce aux progrès réalisés parallèlement dans la fabrication des alliages résistants et grâce également aux qualités des ciments d'enrobage qui ont pu, eux aussi, être sans cesse améliorés.

Dans l'état actuel de la question, les foyers de cuisson en fonte présentent les caractéristiques ci-après :

900 à 1 200 W	pour une plaque de 145 mm	pesant 1,3 kg
1 200 à 1 800 »	» » » » 180 »	» 1,7 »
1 800 à 2 400 »	» » » » 220 »	» 2,5 »

Comme on le voit, les poids ont à peu près diminué de moitié, alors que les puissances absorbées ont augmenté de plus de 50 %.

La rapidité de chauffe de ces plaques est maintenant très convenable et leur rendement est excellent : elles conduisent à des performances remarquables et à des résultats culinaires très appréciés. La chaleur développée, quelle que soit d'ailleurs l'allure est, en effet, uniformément répartie sur toute leur surface.

Constitution des plaques actuelles. — Une plaque de cuisson enrobée est essentiellement constituée par un corps en fonte brute (fonte de qualité spéciale), de forme ronde et à surface généralement pleine comportant venues de moulage :

— extérieurement et sur son pourtour : une jupe formant boîtier, qui donne de la rigidité à la plaque;

— intérieurement : des nervures, en forme de spirales, qui ajoutent à cette rigidité et qui constituent les logements destinés à recevoir les boudins chauffants.

Ceux-ci, habituellement au nombre de deux ⁽¹⁾, sont enrobés, à l'intérieur de ces logements, au moyen d'un ciment réfractaire, à la fois bon conducteur de la chaleur à chaud et bon isolant électrique.

Lorsque la plaque est mise sous tension, la chaleur développée dans le fil résistant se transmet, à la fonte par conduction, à travers le ciment réfractaire et le courant de fuite reste faible.

La face supérieure de la plaque, sur laquelle reposent les casseroles, est dressée au tour. Le contact entre les ustensiles de cuisson à fonds également dressés et la plaque, est donc toujours très intime et la continuité thermique assurée dans les meilleures conditions. La transmission de la chaleur aux aliments se fait alors avec un rendement excellent, quelle que soit d'ailleurs l'allure de la cuisson.

Les circuits chauffants sont développés dans les spirales de la plaque de telle façon que le nombre de calories dissipées par unité de longueur de spirale soit sensiblement le même sur toute la surface. Cette dispo-

(1) Certaines plaques en comportent trois.

sition correspond aux meilleures conditions de fonctionnement du fil, à la meilleure répartition de la température et contribue à augmenter, dans une large mesure, la vie de la plaque.

Le corps en fonte, enrobé comme il vient d'être dit, est fermé à sa partie inférieure par une contre-plaque légère, généralement en tôle, avec interposition ou non d'une feuille d'amiante à la surface du ciment. Celui-ci est donc isolé thermiquement du milieu extérieur et partiellement protégé contre une absorption possible d'humidité atmosphérique. Les fils de connexions sont emprisonnés à l'intérieur du boîtier ainsi formé et constituent la relation électrique nécessaire entre les boudins chauffants enrobés et les broches ou les bornes de prises de courant situées à l'extérieur. Celles-ci sont supportées par une pièce en stéatite généralement fixée au centre de la contre-plaque.

Sur certaines plaques cependant, les plaques en forme d'anneaux, en particulier, le dispositif de prises de courant est constitué par des couteaux et placé latéralement (1). Le centre de la plaque se trouve, de ce fait, dégagé et cette disposition présente un certain nombre d'avantages : la plaque annulaire est, en effet, plus légère qu'une plaque pleine, elle permet, grâce à son dégagement central, d'assurer un meilleur contact avec les fonds de casseroles lorsque ceux-ci sont légèrement bombés; plus fortement nervurés, elle résiste mieux aux déformations, elle est mieux refroidie à vide, parce que mieux ventilée; elle est, par conséquent, moins chaude qu'une plaque pleine et, partant, les courants de fuite sont plus faibles.

La plaque fonte constitue ainsi, en toutes circonstances, un corps de chauffe très robuste. Les inconvénients qui lui ont été reprochés au début n'existent plus et il est temps de revenir sur des préventions qui ont été malheureusement trop longtemps entretenues.

Nous analyserons plus en détail, dans la seconde partie de notre étude, les rendements et les caractéristiques comparées des différentes plaques de cuisson.

La combinaison électrique des circuits permet, nous l'avons vu, d'obtenir différentes allures de chauffe.

Parmi ces allures, nous avons vu aussi que la technique de fabrication des plaques fonte permettait des allures de mijotage nettement plus faibles que les allures correspondantes des foyers de cuisson à feux vifs. Cela tient au fait que les plaques fonte transmettent leur chaleur par conduction, c'est-à-dire dans des conditions optima de

(1) Dispositif faisant l'objet de deux brevets appartenant à la Société Alsthom.

rendement, tandis que les feux vifs chauffent par rayonnement : toutes choses égales, les consommations correspondantes sont donc notamment inférieures pour les plaques fonte.

Normalisation en cours. — Les plaques à broches centrales ont fait l'objet de normes étrangères déjà anciennes : A. S. E. suisses, V. D. E. allemandes, I. F. K. internationales, qui sont d'ailleurs très voisines et qui ne diffèrent les unes des autres que par de légers détails. En France, l'U. S. E. a actuellement en préparation un projet de normalisation des plaques à broches qui, tout en s'inspirant et en tenant compte des normes précédentes, prévoit cependant quelques dispositions particulières pour répondre à certaines prescriptions de sa brochure n° 60 concernant notamment l'inaccessibilité des pièces sous tension. Le projet français se rapproche d'ailleurs beaucoup des normes étrangères ci-dessus et les dispositions particulières qu'il prévoit n'exclut d'ailleurs pas l'interchangeabilité souhaitable des plaques de cuisson qu'il définit avec les plaques V. D. E. ou A. S. E. Ce projet tient compte, en particulier, des mêmes diamètres de plaques ⁽¹⁾. Il est possible cependant, comme nous l'avons annoncé, que ces diamètres soient augmentés dans un avenir assez proche pour permettre de pousser davantage les puissances absorbées.

Fabrication. — La fabrication des plaques fonte est assez délicate et nécessite beaucoup de soins. L'enrobage des boudins résistants dans le ciment réfractaire se fait de la façon suivante : le ciment est préparé à l'avance, à partir d'un mélange de produits bien définis, en proportions convenablement étudiées; il est ensuite légèrement humidifié et malaxé sous la forme d'une pâte assez consistante, mais suffisamment plastique cependant. On remplit, à la truelle, les spirales de la plaque fonte d'une certaine quantité de ce ciment que l'on comprime, à la main ou, de préférence, à la presse et que l'on arase à la hauteur des nervures. On imprime ensuite dans la pâte, encore très légèrement humide, des gorges continues, de profondeur et de largeur suffisantes pour recevoir les boudins chauffants. Ces gorges sont obtenues à la main, par troussage, en promenant un outil de forme correctement guidé le long des nervures de la plaque, ou mécaniquement, à la presse, au moyen d'une empreinte bien centrée. Les boudins résistants, préalablement étirés à la longueur voulue et

(1) Ce projet est actuellement réalisé et la normalisation des plaques de cuisson amovibles a fait l'objet de la norme U. S. E. n° 10 010 du 28 juin 1944. Cette norme traite à la fois des foyers de cuisson à broches et des foyers de cuisson à couteaux latéraux.

mis en place, sont ensuite remplis d'un coulis réfractaire formant liant et recouverts d'une seconde couche de ciment à peine humidifiée qui est, à son tour, fortement comprimée à la presse. Le ciment pénètre ainsi intimement à l'intérieur des spires de chaque boudin et les fils résistants se trouvent, en définitive, parfaitement enrobés et centrés entre les nervures en fonte de la plaque : ils forment, avec le ciment, un tout compact et homogène.

La plaque est ensuite étuvée et bien séchée et le ciment est cuit à haute température pour le rendre insensible à l'action de l'humidité de l'air et non hygroscopique.

La composition du ciment a une très grande importance, c'est de lui, en effet, que dépendent en grande partie la vie de la plaque et ses caractéristiques électriques : isolement et rigidité diélectrique en particulier.

Une bonne plaque de cuisson en fonte, dont la température de surface à vide reste inférieure à 600° C avec les puissances maxima que nous avons indiquées, présente les caractéristiques moyennes données par le tableau de la page 312.

Il existe une très grande variété de plaques fonte enrobées, de constructions d'ailleurs assez différentes : pleines ou à anneaux, à broches ou à couteaux.

Certaines plaques pleines comportent un creux central pour éviter le bombé des casseroles et pour diminuer l'influence qu'une déformation ultérieure possible pourrait avoir sur leur rendement. Ce creux vient de fonderie dans certains modèles, il est constitué dans d'autres modèles (Scholtès, E. G. O.) par une cuvette en tôle noyée dans la fonte; disposition heureuse qui résout à la fois le problème du défoncement central et celui de l'allègement de la plaque. Des plaques bi-annulaires sont également fabriquées suivant les mêmes brevets et comportent entre les anneaux une tôle entretoise et une collerette noyée dans la fonte; ces plaques sont évidemment plus légères que les plaques pleines, leur inertie thermique est plus faible, elles sont légèrement plus rapides.

Dans les plaques Drakodyne (brevet Siemens), le conducteur chauffant est constitué par un fil résistant bobiné suivant un plan, en forme de peigne, au moyen d'une machine spéciale. Ce conducteur est noyé verticalement dans le ciment entre les nervures en fonte qui peuvent alors être plus rapprochées et qui permettent, par conséquent, pour un même diamètre de plaque, un développement de circuit plus grand. La transmission de la chaleur du fil à la fonte se fait ainsi dans de meilleures conditions que dans le cas d'un boudin; il est possible de pousser davantage ces plaques (1400 W par exemple pour le diamètre de 145 mm).

Caractéristiques moyennes de bonnes plaques de cuisson en fonte.

Diamètre (en mm.)	Puissance (en W.)	Isolement		Rigidité diélectrique		Courant de fuite à vide (*) (en mA.)
		à froid (en MΩ.)	à chaud à vide (°) (en Ω.)	à froid (°) (en V.)	à chaud à vide (°) (en V.)	
220	2 400	≥ 20	200 000	≥ 1 500	≥ 1 200	1,0 à 1,5
	2 000	—	700 000	—	—	0,6 à 1,2
	1 800	—	1 500 000	—	—	0,5 à 1,0
180	1 800	—	400 000	—	—	0,5 à 1,2
	1 500	—	900 000	—	—	0,5 à 1,0
	1 200	—	2 000 000	—	—	0,4 à 0,8
145	1 200	—	300 000	—	—	0,4 à 0,9
	1 000	—	700 000	—	—	0,3 à 0,6
	800	—	1 200 000	—	—	0,3 à 0,4

(°) Isolement à chaud relevé à l'ohmmètre, la plaque fonctionnant à vide, au bout d'une heure de mise sous tension nominale.

(*) Rigidité diélectrique à froid, application instantanée d'une tension alternative, entre les parties sous tension réunies et la masse.

(°) Rigidité diélectrique à chaud, application progressive d'une tension alternative jusqu'à 1 200 V pendant une minute.

(*) Mesure du courant de fuite par la méthode REV à chaud, la plaque étant sous tension nominale (220 V) depuis une heure.

Le règlement APEL demande que le courant de fuite soit inférieur à 1,5 mA/kW de puissance absorbée, lorsque la plaque fonctionne, à vide, sous une tension égale à 1,05 fois la tension nominale.

A noter que la surpuissance qui en résulte double sensiblement les courants de fuite indiqués dans cette colonne.

Nous avons déjà parlé des plaques fonte Calrex avec Calrod noyé, nous n'y reviendrons pas.

Éléments Chromalox. — Ces éléments sont fabriqués par la firme Geo Bray and Co Limited, à Leeds (Angleterre).

Ils se présentent sous une forme méplate : anneaux ou lames. Les lames peuvent être ou non munies d'ailettes de refroidissement, elles peuvent, sous réserve d'être protégées par des gaines inoxydables (cuivre, métal monel ou autre), former les corps de chauffe d'éléments à immersion pour liquides corrosifs.

Les éléments Chromalox sont obtenus à partir de résistances en

nickel-chrome (80/20) enrobées dans une matière réfractaire de composition spéciale à l'intérieur d'une gaine d'acier au chrome (20 %).

La matière réfractaire, bonne conductrice de la chaleur, peut supporter sans rupture des tensions électriques élevées; l'armature extérieure résiste bien à l'oxydation, aux hautes températures. A cause de leur forme plate, le fil résistant de ces éléments n'est séparé de la gaine métallique que par une couche de matière réfractaire très mince, de sorte que la différence de température entre le fil et l'armature extérieure reste faible : le fil est ainsi bien refroidi et l'élément fonctionne toujours dans de bonnes conditions.

Après son enrobage, la matière réfractaire est cuite à haute température pour la rendre inaccessible à l'humidité.

Les bornes de prise de courant de ces éléments sont en acier chromé et, par conséquent, inoxydables.

Lorsque les lames sont munies d'ailettes de refroidissement, elles peuvent absorber une puissance plus élevée par unité de longueur, tout en fonctionnant à plus basse température.

Les éléments Chromalox sont ainsi susceptibles de très nombreuses applications : éléments à immersion pour le chauffage de liquides corrosifs, éléments à basse température pour le chauffage des gaz, plaques de cuisson, etc.

Les plaques de cuisson Chromalox, en particulier, comportent un ou deux anneaux, elles constituent des foyers de cuisson à faible inertie, à bons rendements; leur densité de puissance atteint $4,7 \text{ W/cm}^2$: elles chauffent par conduction.

La firme Geo Bray fabrique également, sur le même principe, des éléments en forme de tube dits *Tubalox*. La gaine extérieure peut être en cuivre, en acier inoxydable, en monel, en inconel; elle peut être conformée, après enrobage, suivant des formes complexes.

Éléments « Rubanox ». — L'élément *Rubanox* (breveté S. G. D. G.) est le dernier né des éléments blindés. Il a été mis au point pendant la guerre, par la Société anonyme des Appareils G. A. L., 80, boulevard Bourdon, à Neuilly-sur-Seine, et sera prochainement fabriqué en grande série par cette même Société (1).

L'élément *Rubanox* se compose essentiellement d'une gaine en métal inoxydable, de forme généralement plate à bords arrondis, étanche aux liquides et aux gaz, à l'intérieur de laquelle se trouve disposée, suivant son âme, une résistance plate convenablement centrée

(1) Il l'est actuellement (1947).

par un produit réfractaire, isolant électrique à chaud en même temps que bon conducteur de la chaleur.

La résistance plate est obtenue (fig. 18) par découpage en zigzag à la presse d'un ruban d'alliage résistant parfaitement laminé et calibré.

Le produit réfractaire est tassé à très forte pression, à l'intérieur

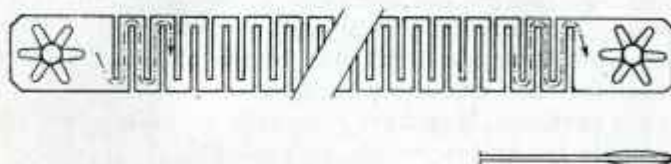


Fig. 18.

de la gaine, par un procédé mécanique, ce qui lui permet de devenir extrêmement compact.

L'élément *Rubanox* ainsi constitué (fig. 19) est comparable à une barre pleine qui peut être conformée à la demande, d'une façon quelconque et avec la même facilité, en forme de U, de J, de N, de M, etc. Il peut de même épouser une forme compliquée et être appliqué directement contre le corps à chauffer en offrant une surface de contact et d'échange maximum. Il permet ainsi de chauffer à peu près dans tous les cas par conduction, c'est-à-dire dans les meilleures conditions de fonctionnement et de refroidissement.

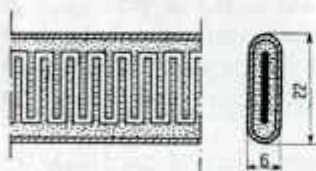


Fig. 19.

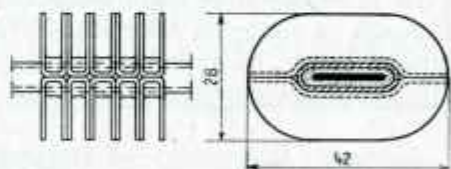


Fig. 20.

Comme les éléments blindés précédemment décrits, l'élément *Rubanox* peut être immergé dans un liquide; comme eux aussi il peut recevoir des ailettes de refroidissement (fig. 20) et constituer un élément à basse température pour le chauffage des gaz ou pour l'équipement d'aérothermes par exemple.

Le découpage de la résistance, comme il a été dit, en partant d'une bande plate, constitue l'originalité de l'élément *Rubanox* et la forme même de cette résistance lui confère l'ensemble de ses qualités.

Le principe de ce découpage évite, en particulier, les soudures ou les brasures d'extrémités, généralement nécessaires avec les autres types d'éléments pour raccorder les sorties à la partie chauffante proprement dite. La résistance *Rubanox* est, en effet, une résistance *monobloc*, dont les extrémités ont toujours une section très supérieure à celle de la partie chauffante découpée et restent, par conséquent, toujours froides.

L'élément *Rubanox* peut avoir une densité de courant et un taux de rayonnement suffisants pour constituer un élément *jeu visible*. Cette densité de courant est obtenue en pliant le ruban, en forme de gouttière sur toute sa longueur et en le plaçant à l'intérieur d'un tube de forme appropriée (fig. 21). Ce tube peut être conformé ensuite sous forme d'épingle à cheveux, de spirale, etc. Il peut, en parti-

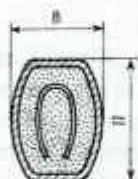


Fig. 21.

culier, servir à la confection de foyers de cuisson électriques du genre de ceux que nous avons étudiés précédemment.

REMARQUE I. — Nous venons de décrire, très sommairement d'ailleurs, quelques-uns des corps de chauffe que l'on rencontre le plus fréquemment dans l'industrie. En ce qui concerne plus spécialement les plaques fonte, nous nous sommes volontairement cantonnés dans des considérations très générales et sans prendre position pour l'une ou l'autre des techniques adoptées par les différents constructeurs. Nous nous réservons de discuter de ces techniques et des résultats auxquels elles conduisent dans la seconde partie de notre étude.

REMARQUE II. — Nous avons cependant souligné, en temps utile, la tendance toujours plus marquée qu'avaient les usagers à réclamer des plaques de cuisson plus puissantes et plus rapides, c'est-à-dire des plaques dont l'inertie calorifique était réduite au minimum.

Cette tendance s'est affirmée notamment d'une façon très nette dans la région parisienne qui représente, en France, la plus grande densité d'installations de cuisine domestique; dans cette région, en effet, la presque totalité des usagers, 96 %, accepte de payer un

supplément de location pour que leurs cuisinières comportent des plaques poussées (1).

Foyers de cuisson « basse tension ».

Signalons pour mémoire les foyers de cuisson *basse tension* (2) dont le circuit chauffant est en contact direct avec les ustensiles de cuisine. Ce circuit est obtenu à partir d'un disque en alliage résistant découpé en zigzag et monté sur un support calorifugé; il est isolé par une simple couche d'émail céramique.

L'inertie de cet élément est très faible, il rougit à vide et donne de bons rendements.

Ces foyers sont fabriqués en Suisse et en Angleterre.

Éléments Ni-Résist.

Également pour mémoire les grilles chauffantes en fonte Ni-Résist.

Le Ni-Résist est un alliage qui possède une résistance très grande à la corrosion et à la chaleur.

Sa composition chimique est la suivante :

Carbone total.....	2,9 % environ
Silicium.....	2 à 3 % »
Manganèse.....	1,5 à 2 %
Soufre et phosphore.....	très faibles
Nickel.....	14 % environ
Cuivre.....	6 % »
Chrome.....	2 % »

Il est amagnétique et sa résistivité électrique est voisine de $140 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm} : \text{cm}^2$ (60 % de plus que la fonte ordinaire).

Poids spécifique.....	7,6
Coefficient de dilatation.....	$18 \cdot 10^{-6}$
Dureté Brinell.....	120 à 150
Résistance au cisaillement.....	18 à 25 kg : mm ²

Les grilles chauffantes Ni-Résist constituent des éléments robustes d'un prix de revient peu élevé et résistant bien à la corrosion.

(1) R. G. E., 1^{er} avril 1939.

(2) Pour des tensions d'alimentation comprises entre 8 et 20 V.