



CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE INDUSTRIEL

**LES ÉLÉMENTS
PROTÉGÉS
ET LEURS APPLICATIONS**

Par M. R. GAUTHERET

**ÉDITÉ PAR
LA SOCIÉTÉ POUR LE DÉVELOPPEMENT
DES APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ APEL**



ULTIMHEAT®
VIRTUAL MUSEUM

CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE INDUSTRIEL

Les éléments protégés et leurs applications

Par M. R. GAUTHERET

SOMMAIRE

Définition

Conditions à remplir. — Durée. — Forme

Description

Classification suivant la nature de l'isolant :

- A) Mica
- B) Produits céramiques en forme
- C) Ciments
- D) Produits silico-alumineux en poudre
- E) Magnésie
- F) Câbles et conducteurs chauffants

Avantages. — Températures d'emploi

Applications

Conclusion

Le développement de l'emploi des appareils électro-thermiques industriels a été et reste conditionné en particulier :

Par l'obtention d'isolants thermiques et électriques conve-
nables ;

Par la possibilité de se procurer des résistances chauffantes de longue durée et de prix peu élevé permettant d'atteindre les températures usuelles.

Dans la construction des fours électriques industriels, le problème de l'isolement et de la protection est généralement facile à résoudre : par exemple, les fils ou rubans de nickel-chrome sont — c'est le cas le plus fréquent — supportés par des briques de forme ; ils n'ont pas de contact direct avec la matière à chauffer, la transmission de chaleur se faisant essentiellement par rayonnement et aussi par convection ; ex. : fours habituels de trempe, de recuit, de revenu, etc. C'est également le cas, en général, des fours à basse température et des étuves où les fils sont placés dans le calorifuge.

Mais bien souvent — en particulier pour certaines étuves et pour les appareils divers dont l'usage se répand de plus en plus, tels que les éléments à immersion pour le chauffage des liquides — les résistances doivent être protégées pour des raisons :

D'ordre mécanique (résistance mécanique) ;

D'ordre chimique (résistance à l'oxydation ou aux agents atmosphériques ou chimiques) ;

D'ordre électrique (isolement) ;

D'ordre pratique (commodité d'emploi, facilité d'équipement, etc. ; sécurité).

Par mesure de sécurité (d'ordre électrique), on a songé à utiliser du courant alternatif à très basse tension (au-dessous de 27 V) ; cette solution est parfois intéressante, mais elle présente quelques inconvénients tels que : nécessité de disposer d'un transformateur abaissant la tension habituelle de service (de l'ordre de 100 à 250 V) à la valeur voulue, intensité élevée (inversement proportionnelle à la tension ; d'où fils chauffants de grosse section, connexions délicates à établir), pertes propres du transformateur.

Plus généralement, on a employé et on emploie de plus en

plus des éléments protégés de forme appropriée ; ces éléments sont nés d'ailleurs de la nécessité d'éviter la destruction rapide du fil chauffant par oxydation que l'on avait observée avec les premiers éléments chauffants qui, fonctionnant par rayonnement, devaient être portés à haute température pour que la transmission de chaleur fût appréciable.

* *

Définition

1^o Par « éléments protégés », nous désignerons (fig. 1) les éléments chauffants qui comportent au moins :



Fig. 1

- Une résistance électrique R (fil, ruban) ;
- Un isolant électrique D ;
- Une enveloppe E assurant la protection (mécanique, chimique, électrique) de l'élément.

Ces éléments, mis en vente sur le marché, sont plus ou moins standardisés comme forme, dimensions et puissance.

2^o Par « éléments blindés » (1), nous désignerons les éléments protégés étanches (tout au moins dans la partie en contact avec la substance à chauffer) et dont la résistance électrique fait corps avec l'isolant et l'enveloppe, c'est-à-dire ne peut être enlevée sans destruction de l'élément. Par construction, ces éléments sont ceux qui présentent la moindre différence de température entre la résistance et l'enveloppe. Ils tendent à prendre dans l'industrie une place primordiale.

(1) Nous avons déjà traité partiellement cette question dans un article intitulé « L'emploi des éléments chauffants blindés dans l'industrie », Electricité, mars 1935, et que nous reprenons en partie dans ce qui suit. Un certain nombre d'éléments chauffants nouveaux ont d'ailleurs apparu au cours des dernières années. Il importait donc de faire le point de la question. C'est à quoi veut répondre cette petite étude.



* * *

Conditions auxquelles les éléments protégés doivent satisfaire

Bien que ces éléments soient utilisés pour les applications les plus variées et dont le nombre est théoriquement illimité, il semble que l'on puisse analyser et résumer comme suit les idées principales qui ont prévalu à leur conception :

Du point de vue technique, augmenter le plus possible la longévité des éléments, assurer (pour le cas le plus fréquent de leur emploi) un contact aussi intime que possible entre l'élément et la matière à chauffer ;

Du point de vue économique, réaliser un prix de revient aussi réduit que possible, en particulier par le choix des matières premières, par la normalisation de certains types, par l'augmentation de la durée des éléments.

Durée des éléments

La longévité d'un élément protégé est essentiellement fonction :

1° De la qualité de sa fabrication :

Nature et propriétés physiques (électriques et thermiques en particulier) et chimiques des matières constitutives.

Disposition des diverses parties et forme de l'ensemble de l'élément (éviter les interférences de chaleur, l'accumulation des calories pouvant donner naissance à des points chauds entraînant la rupture de la résistance par fusion ; soigner les amenées de courant, etc.) ;

2° Des conditions chimiques de l'ambiance : oxydation, attaques chimiques par la substance (liquide, gaz, solide) constituant l'ambiance ;

3° De la charge ou puissance spécifique évaluée en calories ou en watts dissipés par cm^2 de la surface d'échange thermique (par exemple, surface immergée dans un liquide) ou par cm de longueur (pour un élément de section uniforme tel qu'un tube) ; si cette puissance est trop élevée, la température de la résistance peut devenir exagérée et les causes de destruction de l'élément (fusion, cristallisation, oxydation) peuvent être dangereusement augmentées.

Cette puissance est également fonction des autres conditions d'emploi : éléments surchargés par surtension (effet Joule proportionnel au carré de la tension), par disposition déficiente (partie chauffante d'un élément d'immersion se trouvant en dehors du bain par exemple), etc.

En somme, la durée d'un élément dépend :

Des conditions de fabrication, donc du constructeur ;

Des conditions d'emploi, donc surtout de l'utilisateur.

Forme des éléments

Pour assurer un contact aussi intime que possible entre l'élément et la matière à chauffer, on a été amené à réaliser des éléments de formes très diverses : cylindrique, plate, annulaire, etc. (fig. 1 et 3 à 9). Un des avantages primordiaux du chauffage électrique résulte précisément dans le fait que l'on peut répartir la chaleur comme on le veut à la fois dans l'espace et dans le temps. Les éléments protégés — et cela s'applique plus spécialement aux éléments à base de magnésie ou de poudre isolante appropriée — peuvent être construits ou façonnés très facilement suivant un dessin quelconque et, par suite, ils peuvent épouser les formes les plus diverses et assurer ainsi la transmission de chaleur optimum avec un rendement thermique souvent égal à l'unité.

Description

En principe, les éléments protégés comportent, par définition, les principales parties constitutives suivantes :

1° La résistance proprement dite, constituée le plus souvent par du fil ou du ruban de nickel-chrome (alliage binaire à 80 p. 100 de nickel et 20 p. 100 de chrome, alliage ternaire contenant du fer), exceptionnellement par du fil d'alliage fer-chrome-aluminium, traversé par le courant, lequel produit la chaleur par effet Joule, c'est-à-dire par transformation de l'énergie électrique en énergie calorifique (1) ;

(1) Loi de Joule : la puissance électrique P ainsi transformée a pour valeur :

$$P = \frac{U^2}{R}$$
 U étant la valeur de la tension appliquée à l'élément et R la valeur de la résistance électrique. P est exprimée en watts, si U est évaluée en volts et R en ohms.
 Un kWh équivaut à 862 grandes calories.

Se reporter à ce sujet à la notice éditée par la société APEL et intitulée « Chauffage électrique industriel. Les résistances métalliques ».



2° Le ou les supports, en matière appropriée assurant un isolement électrique satisfaisant à toutes les températures d'emploi (mica, porcelaine, stéatite, ciment spécial, produit silico-alumineux ou magnésien en poudre, etc.) ;

3° L'enveloppe, dont la nature (généralement métallique : tôle d'acier ou laiton par ex.) dépend de celle de l'ambiance et doit être choisie de façon à ne pas être attaquée chimiquement, voire électro-chimiquement, par l'ambiance et inversement à ne pas attaquer cette dernière. Parfois, l'enveloppe protectrice est remplacée simplement par un ciment ;

4° Les bornes d'amenée de courant qui doivent, dans certains cas, être particulièrement soignées et auxquelles sont parfois adjoints un coupe-circuit de protection et un dispositif thermostatique de régulation de la température.

* * *

Classification

Les éléments protégés peuvent être classés de différentes façons suivant le point de vue auquel on se place, par ex. :

1° Suivant leur forme originelle :

Éléments tubulaires cylindriques ;

Éléments plats rectangulaires ou carrés ;

Éléments plats circulaires ou annulaires ;

Câbles chauffants, etc.

2° Suivant leurs possibilités d'emploi : éléments blindés ou éléments simplement protégés ;

3° Suivant la température maximum d'emploi ;

4° Suivant l'usage auquel on les destine : chauffage des solides (transmission de la chaleur essentiellement par conduction ; ex. : plateaux de presses, plaques chauffantes, etc.) ; chauffage des liquides (généralement par éléments immergés ; ex. : corps de chauffe pour huiles, eau, bains d'électrolyse) ; chauffage des gaz (transmission de la chaleur surtout par convection ; ex. : étuves, aérothermes) ;

5° Suivant la nature de l'isolant électrique. Nous nous arrêterons d'abord à cette dernière classification.

La qualité de l'isolant est, en effet, primordiale et c'est elle qui, à vrai dire, conditionne tout le problème des éléments protégés. L'isolant doit satisfaire à un certain nombre de condi-

tions dont les deux principales sont souvent contradictoires :

Il doit avant tout assurer un excellent isolement électrique à toutes les températures d'emploi ;

Il doit également assurer correctement la transmission de la chaleur depuis la résistance (où l'effet Joule est produit) jusqu'à l'enveloppe, c'est-à-dire qu'il doit être un excellent conducteur thermique.

Or on sait que, en principe, les matières mauvaises conductrices de l'électricité sont également mauvaises conductrices de la chaleur. Toutefois la magnésie a la propriété très intéressante d'être relativement bonne conductrice de la chaleur tout en conservant aux basses et même aux moyennes températures des propriétés diélectriques suffisantes. Elle partage d'ailleurs cette remarquable propriété (1) avec quelques silicates d'alumine naturels ou synthétiques. En particulier, il existe 3 silicates naturels de même formule : $Al^2 O^3 \cdot SiO^2$, qui cristallisent dans des systèmes distincts et ont des propriétés physiques différentes, à savoir : la sillimanite, l'andalousite et le disthène, dont les poids spécifiques sont voisins (3,1 à 3,7) et qui, à haute température (valeurs respectives de l'ordre de 1 550, 1 400 et 1 380° C), se transforment également en mullite de formule : $3 Al^2 O^3 \cdot 2 SiO^2$ et en une masse vitreuse.

Les produits magnésiens ou silico-alumineux sont employés couramment, comme isolants électriques, sous forme pulvérulente, dans la fabrication des éléments blindés.

A cause de leur complexité, il est assez difficile de donner, des produits silico-alumineux et magnésiens, une classification indiscutable et cependant utile aux usagers. Aussi n'hésiterons-nous pas à donner une classification simple qui, si elle n'est peut-être pas absolument orthodoxe au point de vue chimique, aura du moins l'avantage de mieux correspondre au point de vue de l'utilisateur.

On peut considérer :

Les éléments à l'amianté ;

Les éléments au mica ;

Les éléments à base de produits réfractaires ;

Les éléments à la magnésie ;

Les câbles et conducteurs chauffants.

(1) Voir à ce sujet la conférence faite par M. BONNEMORT, conférence dont il est fait mention plus loin et dont un résumé doit paraître dans le numéro d'octobre 1938 du Bulletin de la Société Française des Electriciens.



Les éléments à l'amiante tendent à être utilisés de moins en moins et nous les laisserons de côté. Nous ne rappellerons de même que pour mémoire les éléments imaginés par des chercheurs dès la fin du siècle dernier : emploi de sable, de quartz ou de verre comme isolant électrique.

Éléments au mica

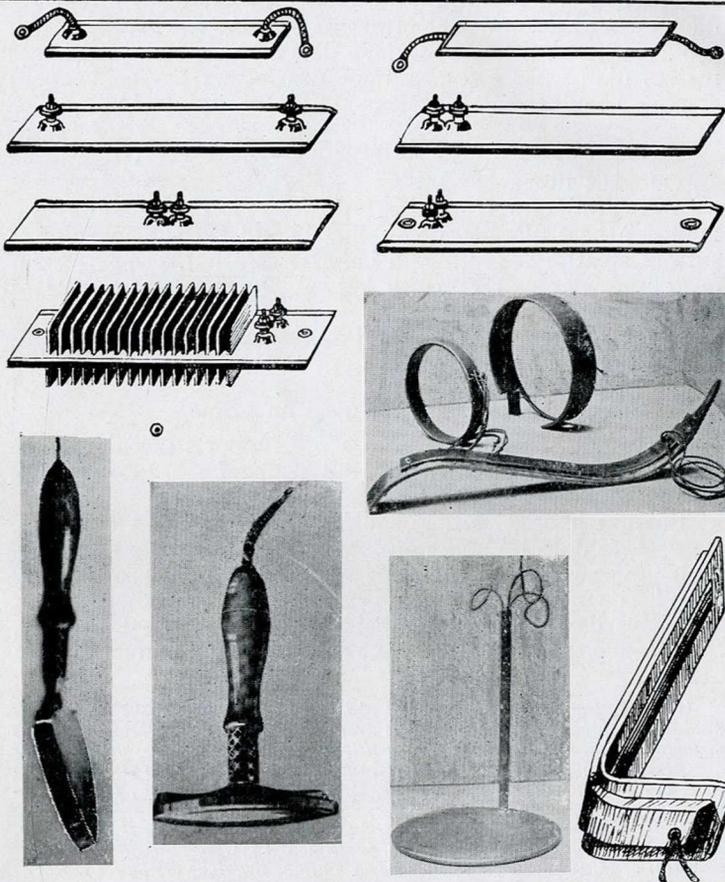
Le mica (nom donné à différents produits silico-alumineux de potasse, fer et magnésie) de bonne qualité a un pouvoir diélectrique satisfaisant (par ex., pour des épaisseurs inférieures à 25/100, la rigidité diélectrique est de 1 000 V/0,01 mm pour certains micas durs et transparents et de 850 V/0,01 mm pour certains micas tendres de couleur ambrée. Il perd ses propriétés isolantes à des températures inférieures à celles de l'utilisation maximum du nickel-chrome. La déshydratation du mica pur ou naturel, c'est-à-dire obtenu par découpage et clivage des blocs extraits de la mine, se produit à des températures relativement basses, par ex. : 700-1 000° C pour des micas durs (muscovites) et 1 000-1 200° C pour des micas tendres (phlogopites). Le mica supporte assez mal les variations de chaleur qui peuvent entraîner, dans certains cas et plus ou moins rapidement, la séparation des clivages et l'émiettement du mica. Pratiquement, on emploie surtout du mica reconstitué, obtenu par collage, au moyen d'agglomérants appropriés (gomme laque ou résine synthétique), de paillettes minces ou de clivures convenablement comprimées par passage à la presse et cuites.

La transmission de la chaleur se fait dans des conditions qui, évidemment, ne sont pas très favorables, puisque le mica est un isolant thermique.

Le mica est fréquemment employé pour la constitution d'éléments chauffants (fig. 2), en particulier pour des températures égales ou inférieures à 400-500° C et aussi pour des températures maxima de 700-800° C. On a pu fabriquer également (et seul le mica a pu permettre de telles réalisations) des éléments chauffants travaillant normalement à 1 500 V (et essayés à 15 000 V) et à 110-120° C (température extérieure de l'enveloppe) pour des radiateurs de voitures de chemins de fer.

A titre d'exemple d'application courante, un élément plat pour l'équipement de plateaux de presse pour matière plastique, peut être réalisé au moyen d'une résistance métallique, fil fin ou ruban, enroulée sur des feuilles de mica ou de micanite (mica aggloméré ou reconstitué), isolée par d'autres feuilles de mica

Quelques formes d'éléments isolés au mica



Le mica est fréquemment utilisé également pour l'équipement de petits appareils électrothermiques tels que fers à souder et à marquer, mailloches, etc...

Fig. 2



ou de micanite, l'ensemble étant comprimé dans une enveloppe en tôle d'acier pliée, agrafée ou soudée.

Il semble que le mica doive conserver une place privilégiée dans la fabrication des éléments de chauffage à haute tension [qui, peut-être, est le chauffage de l'avenir pour les grandes masses d'air ; par ex., chauffage des locaux par convection] et pour l'équipement des éléments de très faible épaisseur.

Éléments à base de produits réfractaires (1)

On peut distinguer :

1° Les produits réfractaires préparés en forme (produits céramiques à base d'argile, de kaolin, de feldspath ; porcelaine et surtout stéatite et produits à base de stéatite), usinés (coulés ou tournés par ex.) et cuits à une température variable et relativement élevée ;

2° Les produits réfractaires utilisés à l'état pulvérulent, cuits ou crus, formant ciment dans certains cas.

Produits réfractaires en forme

Les produits en forme servent de supports mécaniques et isolants aux résistances métalliques de chauffage. Leurs formes sont très diverses (fig. 3 et 4).

Suivant le cas, les fils chauffants, généralement boudinés, sont placés dans les auges ou les rainures des pièces de forme, ou bien ils sont bobinés sur ces pièces ou encore ils sont glissés dans les cannelures prévues à cet effet dans les pièces. Souvent les pièces de forme sont emboîtées les unes dans les autres, soit sur une tige rigide, soit sans cet axe, ce qui permet d'avoir

(1) La littérature technique est peu abondante en ce qui concerne les éléments protégés, la plupart des articles et notes ayant paru à ce sujet se reproduisant plus ou moins. Citons seulement, parmi les articles originaux et par ordre chronologique : Celui de M. CHERRY et FINLAYSON, intitulé « La construction et les applications des éléments chauffants calrod ». General Electric Review, août et septembre 1933 (texte anglais).

Celui de M. DEFLASSIEUX, intitulé « Un élément chauffant cuirassé : le calrod ». Revue d'Electricité et de Mécanique, juillet-août 1934.

Celui de M. BONNEMORT intitulé « Le chauffage électrique des huiles ». Revue du chauffage électrique, octobre 1936 et mars 1937.

Signalons également une conférence (texte anglais) sur les applications industrielles des éléments chromalox faite en Angleterre il y a quelques années par M. NURRISH.

Notons enfin la conférence toute récente, à la fois plus générale et plus complète, portant en particulier sur la fabrication des éléments blindés et sur les isolants utilisés dans cette fabrication, faite en juin dernier à la 2^e section de la Société française des Electriciens par M. BONNEMORT.

Quelques modèles de supports céramiques



Fig. 3



Les éléments relativement flexibles, faciles à monter et dont les dimensions peuvent varier à l'infini. De même, la puissance électrique (fonction de la résistance totale, donc en particulier de la longueur et de la section des fils) peut varier également, dans certaines limites tout au moins.

A titre d'ex., en employant des petites pièces de forme à 9 trous, on peut monter un élément avec une seule entrée et une seule sortie en utilisant autant de trous que l'on veut ; avec un nombre pair de trous, on pourra réaliser des couplages divers (série-parallèle par ex., qui donne des puissances variant dans le rapport de 1 à 4) ; avec un nombre de trous multiple de 3, on pourra recourir au couplage étoile-triangle (puissances variant dans le rapport de 1 à 3).

L'ensemble ainsi constitué peut être placé dans un tube, métallique par ex., de dimensions et de nature appropriées pour former un élément protégé, étanche si nécessaire.

Dans ce type d'éléments, l'isolement électrique est assuré à la fois par le support réfractaire et par l'air, la chaleur est généralement transmise de la résistance chauffante à l'enveloppe simultanément par conduction (par le support, d'ailleurs mauvais conducteur thermique), par convection (par l'air contenu dans l'enveloppe) et aussi par rayonnement (du support). La transmission de la chaleur n'est donc pas très favorable, ce qui limite sensiblement la température maximum d'emploi.

Un élément tubulaire, formant radiateur de chauffage direct pour étuve ou chambre-étuve, pourra être constitué par un support cylindrique en terre réfractaire dans les cannelures longitudinales duquel sera emprisonné du fil boudiné en nickel-chrome. L'ensemble sera placé et convenablement fixé dans un tube en fonte ou en acier garni d'ailettes. Le tableau ci-dessous

Nature du tube	Longueur totale de l'élément (tube unique avec ailettes)	Diamètre des ailettes	Puissance (1) pour une température au bord des ailettes de	
			180° C	120° C
	cm	cm	W	W
Fonte	51	13,1	1.000	500
Acier	125	9	1 500	800
—	185	9	2 200	1 200

(1) Répartie éventuellement en plusieurs circuits permettant d'obtenir plusieurs allures de chauffe.

donne, à titre d'ex., les caractéristiques, fournies par un constructeur, pour de tels éléments standards.

Un élément tubulaire à immersion pourra comporter un certain nombre de pièces en réfractaire empilées sur un axe en métal inoxydable ; le fil boudiné en nickel-chrome sera enfermé dans les cannelures, les extrémités du fil aboutiront à des bornes portées par une pièce isolante en porcelaine ; un capot de protection recouvrira la tête de l'élément. Le tableau suivant donne, à titre d'ex., les caractéristiques des éléments

Chauffage de l'eau		Chauffage de l'huile	
Longueur de l'élément (sans le capot)	Puissance	Longueur de l'élément (sans le capot)	Puissance
mm	W	mm	W
210	200-300-600	250	200-400-600
290	800-1 000	290	800
330	1 200	330	1 000
410	1 500	410	1 200
495	1 800	495	1 500
		575	1 800
370	2 000	370	2 000
420	2 500	540	2 500
460	3 000	650	3 000
640	4 000	770	4 000
780	5 000	900	5 000
920	6 000	1 100	6 000
1 250	8 000	1 400	8 000
1 500	10 000	1 720	10 000

de fabrication courante d'un constructeur, tant pour le chauffage d'eau (gaine de cuivre) que pour celui des huiles (gaine d'acier), les tensions nominales étant les suivantes : 110-115, 125, 200, 220/230 V.

Un élément d'immersion par bain d'électrolyse pourra être constitué par du fil de nickel-chrome boudiné et monté sur un support en porcelaine ou en stéatite, l'ensemble étant ensuite fixé dans une gaine en fer, en acier, en cuivre, en plomb, en métal inoxydable, en verre spécial.

Il ne s'agit, dans ce qui précède, que de données susceptibles de fournir à nos lecteurs des ordres de grandeur. Bien entendu, les éléments comportant des supports de forme sont très divers et les puissances peuvent être, pour certaines applications,



plus faibles ou plus élevées que ne l'indiquent les tableaux précédents.

Quelquefois, le fil monté sur le support réfractaire et isolant, placé ou non dans une gaine métallique, est recouvert d'un ciment approprié, ciment qui le protège mécaniquement et surtout chimiquement (contre l'oxydation) et le maintient contre le support. A titre d'ex., les éléments standard **Cléba**, (fig. 5) prévus pour les tensions usuelles de 110 et 220 V, comportent un tube en stéatite sur lequel est enroulé un fil en nickel-chrome recouvert d'un ciment silico-alumineux et d'un enduit vitrifié à 1 000° C environ par traitement dans un four électrique ; les connexions sont établies par colliers, bagues ou simplement par fils souples. Les dimensions courantes sont les suivantes : longueur totale (y compris les colliers) : 255-370 mm ; diamètre de la partie chauffante : 33-42 mm ; puissance max. absorbée (pour une température de 500° C environ à la surface, en atmosphère calme) : 450 à 700 W. La puissance varie évidemment suivant les caractéristiques du fil chauffant.

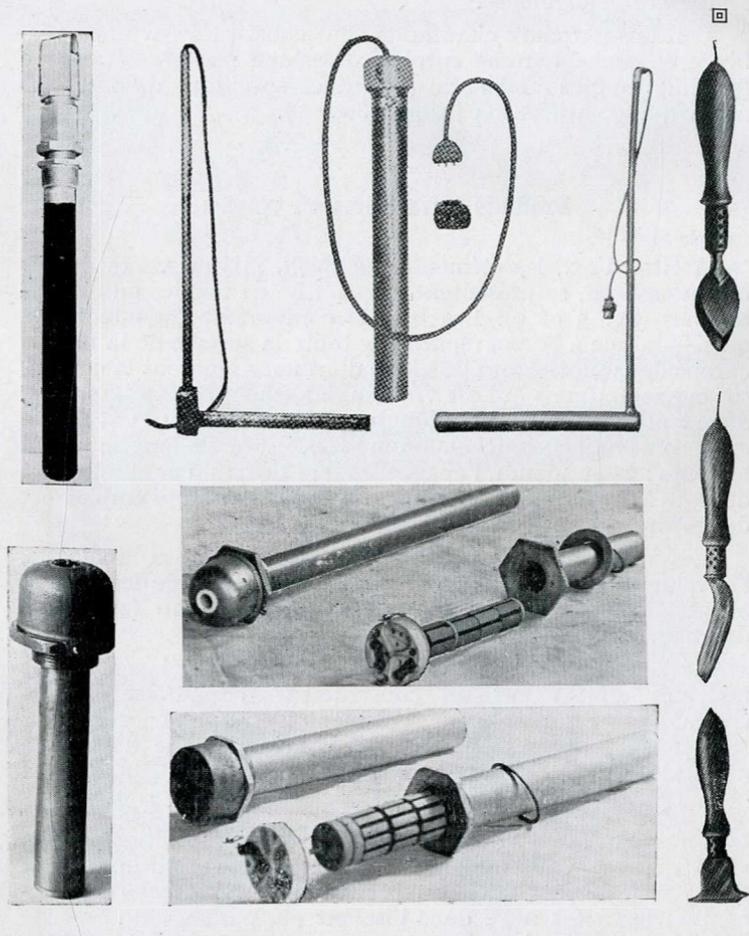
Les supports céramiques ont (en général, car ils sont parfois constitués de pièces de forme enfilées les unes au bout des autres, ce qui permet une certaine flexibilité) le défaut d'être rigides et de ne pouvoir se prêter aux applications qui nécessitent des formes complexes d'éléments. De plus, ils résistent mal aux variations de température, surtout lorsque cette dernière est élevée.

Ciments

Les produits céramiques (silico-alumineux, alumineux ou magnésiens) sont employés à l'état pulvérulent, soit sous forme de ciments, soit secs.

Les ciments sont obtenus en partant de produits silico-alumineux (donc à base d'alumine Al_2O_3 , de silice SiO_2 et d'eau H_2O), convenablement mélangés avec de la chaux et de l'eau (gâchage). Ils ne peuvent être utilisés que pour des températures relativement basses (350-450° C), sans quoi les qualités isolantes disparaissent vite (les variations de la conductibilité électrique proviennent de la transformation de la silice à partir de 575° C en trydimite et en cristoballite), en même temps que le ciment devient friable (d'où destruction des propriétés de résistance mécanique). Leur conductibilité thermique,

Quelques exemples d'éléments montés sur supports réfractaires



□ Certains petits appareils électrothermiques comportent également une résistance montée sur support réfractaire.

Fig. 4



en général, est faible et le coefficient de variation de cette conductibilité en fonction de la température est négatif, ce qui revient à dire que la conductibilité thermique diminue quand la température augmente.

Certains carreaux chauffants sont constitués par une résistance en nickel-chrome enrobée dans une matière céramique (produits mullitiques) cuite (puissance spécifique de 8 W:cm² par ex., avec utilisation jusqu'à 800° C).

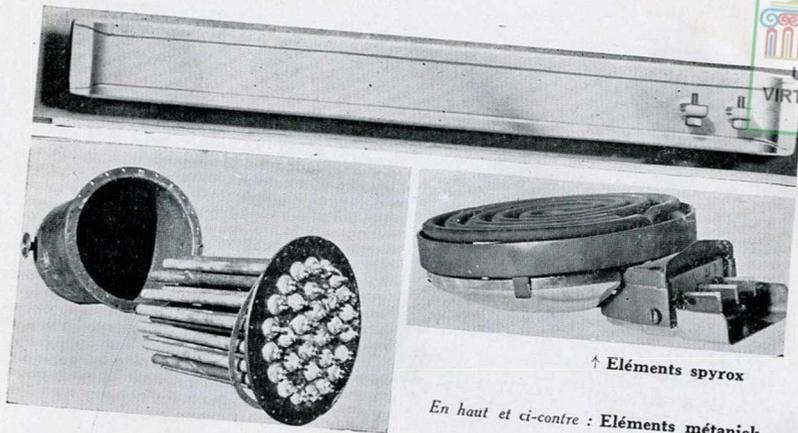
Produits réfractaires en poudre

A titre d'ex., les éléments **métanick**, mis en vente depuis un an environ, se présentent sous forme de bandes ou de cartouches (fig. 5 et 9). Les bandes comportent un boudin de nickel-chrome à 80/20, réparti sur toute la surface de la bande, enrobé dans un isolant électrique dont nous ignorons la composition exacte (mais qui est vraisemblablement de la sillimanite, donc bon conducteur thermique) et enfermé dans une enveloppe en inconel (alliage nickel-chrome-fer). Elles se font en deux largeurs : 25 et 40 mm, l'épaisseur étant de 9 mm et la longueur de 230 à 937 mm. La température maximum d'emploi est de l'ordre de 500° C.

Les cartouches sont constituées d'une façon analogue, l'enveloppe étant le plus souvent en acier (chauffage des huiles), éventuellement protégé par une gaine de plomb (chauffage des bains acides).

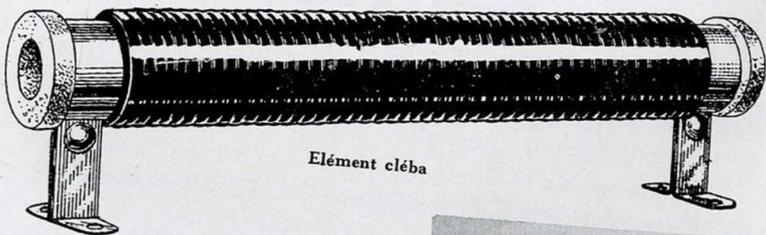
Les éléments **néocal** (fig. 5), qui sont employés depuis quelques années par un constructeur d'appareils électrothermiques et qui viennent seulement d'être mis en vente sur le marché, se présentent sous la forme originelle d'un tube auquel le fabricant peut donner la forme voulue. Ils comportent :

- un fil résistant, en principe en nickel-chrome à 80/20 ;
- un isolant spécial dont nous ignorons la composition exacte, mais qui est vraisemblablement un corps mullitique, bon conducteur de la chaleur mais mauvais conducteur de l'électricité ; le fil est noyé dans l'isolant où, par suite du procédé spécial de fabrication, il se trouve rigoureusement centré ;
- une première enveloppe métallique (tôle d'acier de 0,3 mm) fendue longitudinalement, formant gaine pour le fil résistant

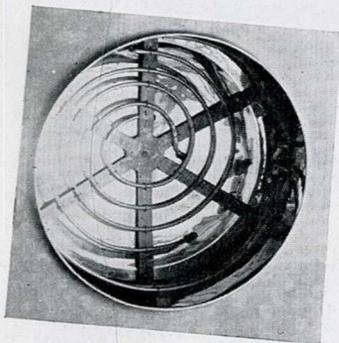


↑ Eléments spyrox

En haut et ci-contre : Eléments métanick



Elément cléba



← Eléments néocal →

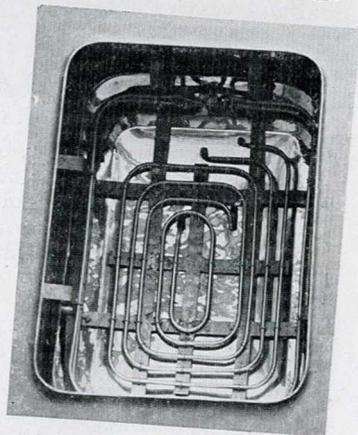


Fig. 5



l'isolant ; l'ensemble est passé au banc à étirer, puis séché à 800° C environ (l'eau peut être entièrement évaporée grâce à la fente indiquée ci-dessus) ;

une deuxième enveloppe métallique de forme tubulaire, d'une épaisseur minimum de 1 mm, de nature appropriée à l'emploi prévu (fer, acier inoxydable, cuivre rouge, etc.) formant enveloppe de protection extérieure.

Ces éléments pourraient travailler jusqu'à une température superficielle de 850° C à 900° C. Ils se font actuellement en un diamètre unique de 10,8 mm et avec une longueur maximum de 5 m. A titre indicatif, la puissance spécifique maximum pour chauffage d'eau est de 6 W:cm² de surface d'échange de la chaleur, soit environ 22 W:cm de longueur de tube ou 2,24 kW:m.

Éléments à la magnésie

On distingue actuellement 4 sortes d'éléments (blindés ou semi-blindés), qui portent les noms suivants (classement par ordre de présentation sur le marché) :

Calrod, backer, chromalox, spirox.

La magnésie a comme principal avantage celui de conserver un bon pouvoir diélectrique même à des températures relativement élevées (1).

Éléments calrod.

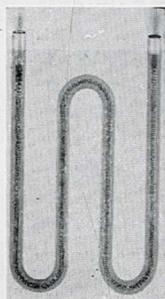
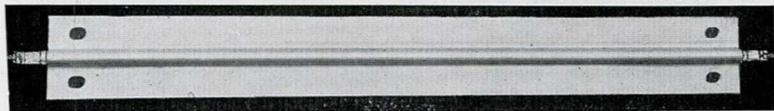
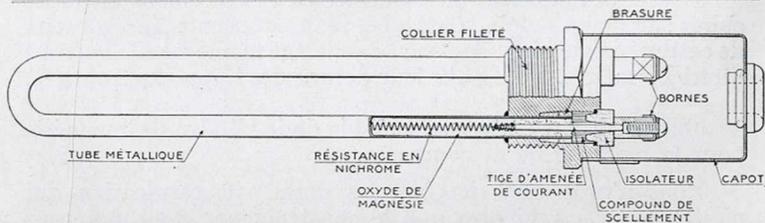
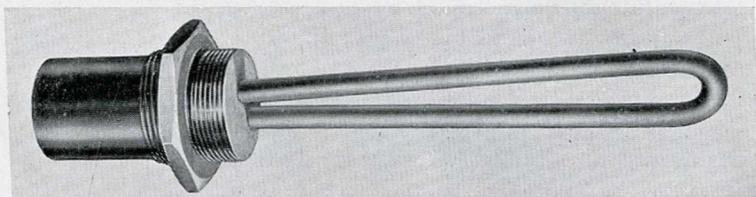
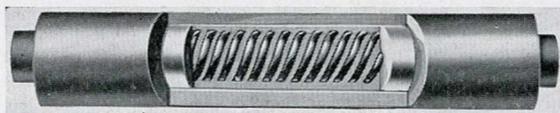
Ils ont été mis au point en Amérique vers 1919.

Un élément calrod (fig. 6) est constitué par un fil boudiné, en principe en nickel-chrome à 80/20, contenu tout entier dans un tube métallique approprié, rempli de magnésie en poudre.

Le fil résistant est enroulé en forme d'hélice très régulière et de diamètre sensiblement inférieur à celui du tube extérieur.

(1) Notons à ce sujet que la règle adoptée par l'U. S. E. pour les fils enrobés (ciment ou poudre) pour appareils électro-domestiques revient à ceci : le corps de chauffe est porté à sa température de régime ; on mesure alors le courant de fuite au moyen d'un milliampèremètre inséré entre la masse de l'appareil et l'un ou l'autre des conducteurs d'alimentation ; le courant de fuite adopté est le plus grand de ceux que l'on a mesurés ; il ne doit pas dépasser 1,5 mA par kW de puissance absorbée, l'essai se faisant sous la tension 1,05 U, U étant la tension nominale.

Quelques modèles d'éléments calrod



Eléments calrex →

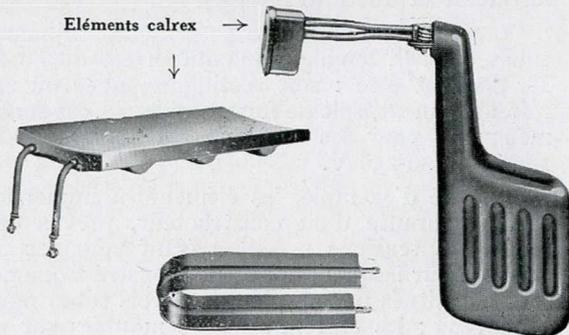


Fig. 6



Les extrémités sont fixées à une tige d'amenée de courant de faible résistance électrique (laiton, monel, nickel, suivant la température d'utilisation).

L'isolant est obtenu en partant de la magnésite ou carbonate de magnésium impur. La magnésie est fondue ($2\ 700^{\circ}\text{C}$) au four à arc et ultérieurement réduite en poudre fine et homogène dont on élimine le fer, introduit lors du broyage, au moyen de séparateurs magnétiques.

Pour obtenir une bonne qualité, on sélectionne la magnésie calcinée. La densité réelle en est de l'ordre de 3,6.

La fabrication des tubes calrod est évidemment délicate, mais elle est parfaitement au point (il en est de même de celle des autres tubes blindés). Il faut en particulier :

assurer et maintenir la régularité de l'espacement entre les spires successives de la résistance, réaliser le centrage rigoureux de cette résistance et conserver ce centrage même si les tubes sont ultérieurement cintrés pour leur donner des formes appropriées.

obtenir un tassement convenable de la poudre de magnésie pour la rendre dure et compacte.

Nous n'insisterons pas sur les détails de fabrication qui n'intéressent à vrai dire que le constructeur. Nous noterons seulement que le remplissage et le tassement de l'isolant dans le tube, dans lequel on a préalablement introduit le fil résistant, se font à l'aide de machines à vibrations et de machines spéciales à restreindre (passes successives avec recuit pour rendre au métal sa ductilité initiale).

Les éléments calrod se présentent toujours sous forme de tubes dont la longueur maximum est de l'ordre de 2,50 m. Ils peuvent être : soit rectilignes, avec ou sans ailettes de refroidissement, soit de formes diverses. Ils sont fabriqués normalement pour les tensions suivantes : 110-115, 120-125, 190-200, 220-230 V.

A titre d'exemple, les éléments à immersion de la fabrication courante d'un constructeur, prévus en général pour toutes les tensions précitées (sauf pour certaines puissances élevées pour lesquelles on ne les construit que pour 200-230 V), sont constitués par un, deux ou trois tubes repliés en épingles à cheveux ; les extrémités sont montées sur une même tige filetée ; l'enveloppe est soit en cuivre étamé (chauffage de

l'eau), soit en acier (chauffage de l'huile) ; les caractéristiques en sont données dans le tableau suivant :

Nombre de circuits	Chauffage de l'eau		Chauffage de l'huile	
	Longueur	Puissance	Longueur	Puissance
	mm	W	mm	W
1	375	400	375	400
1	265	600	305	600
1	265	800	375	800
1	305	1 000	470	1 000
2	375	800	375	800
2	320	1 000	340	1 000
2	265	1 200	305	1 200
2	265	1 500	360	1 500
2	305	2 000	470	2 000
2	330	2 400	560	2 400
2	390	3 000	505	3 000
2	420	4 000	550	4 000
2	450	5 000	580	5 000
3	275	3 000	365	3 000
3	365	4 000	475	4 000
3	390	5 000	505	5 000
3	420	6 000	550	6 000
3	560	8 000	730	8 000
3	580	10 000	755	10 000

Les éléments « calrex » sont obtenus en coulant, dans un moule de forme quelconque contenant un tube calrod, un métal tel que la fonte (l'enrobage se faisant alors vers 1 300° C). Ces éléments présentent les avantages suivants : résistance mécanique élevée, grande surface chauffante, distribution uniforme de la chaleur sur une grande surface. Ils sont cependant peu répandus en France, mais par contre le sont, semble-t-il, beaucoup en Amérique.

Les cartouches « calrod » sont constituées de la façon suivante : Le fil résistant est boudiné sur une tige ronde de substance réfractaire (lave) percée d'un trou longitudinal pour le fil de retour ; l'ensemble précédent est centré dans un tube métallique et l'isolement est assuré, ici encore, par de l'oxyde de magnésium en poudre ; ces cartouches sont toujours rectilignes. Les deux amenées de courant peuvent être voisines et réunies dans la même borne. On peut également prévoir des éléments à 2 circuits permettant de faire varier la puissance (un seul circuit ou deux circuits en série ou en parallèle).

Éléments backer.

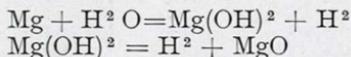
Ils ont apparu en 1921.

Un élément backer (fig. 7) comporte un fil boudiné en



nickel-chrome placé dans un tube métallique convenable rempli d'une masse de magnésie. Cette magnésie est obtenue en partant, non pas d'un minerai de magnésium, mais de magnésium chimiquement pur que l'on traite par oxydation en présence d'eau, à haute pression (supérieure à 70 hpz) et à une température de 250° C.

La transformation du métal en oxyde s'opère suivant les formules :



Au cours de ces réactions, il se produit théoriquement une augmentation importante de volume, mais qui se trouve limitée par l'espace dans lequel elle se produit, d'où une certaine compression du produit final.

Les éléments backer sont obtenus en tubes rectilignes avec les diamètres courants suivants : 6,5-8-9-10,75-16 mm (de 2,30 m de longueur au maximum pour un tube de 9 mm de diamètre) que l'on peut garnir d'ailettes (normalement pour les tubes de 9 et 16 mm) et auxquels on peut donner par pliage ou cintrage toutes formes désirées. Ils sont fabriqués pour les tensions usuelles de 100 à 380 V. Le tableau des longueurs et puissances donné pour les éléments à immersion calrod s'applique sensiblement aux éléments backer.

Bien entendu la fabrication est ici encore assez particulière et elle doit être l'objet de soins attentifs. Le magnésium est placé dans l'enveloppe sous forme d'un tube (pratiquement représenté souvent par 3 segments) ; à l'intérieur de ce tube de magnésium, on place le fil résistant boudiné et quelquefois, dans l'axe de celui-ci, on glisse un fil de magnésium ; ainsi se trouve réalisé le centrage de la spirale chauffante, centrage qui se maintiendra ensuite tant au cours des opérations chimiques précédemment indiquées qu'au cours des pliages ou cintrages ultérieurs.

Les éléments backer peuvent être enrobés dans un métal approprié pour former des éléments analogues aux « calrex ».

Éléments chromalox.

Ils ont apparu vers 1928.

Un élément chromalox (fig. 8) est constitué par un fil spiralé de nickel-chrome noyé dans une masse compacte et dense de magnésie, plus exactement d'un mélange à base de

Quelques modèles d'éléments backer



Fig. 7

magnésie ; l'ensemble est enfermé dans une gaine en acier chromé à 20 p. 100 ou en fer électrolytique suivant la température que l'on veut atteindre ; le fil résistant fait plusieurs fois la longueur de l'élément, ce qui permet d'obtenir une répartition convenable de la chaleur sur toute la surface.

Les points délicats de la fabrication sont les suivants : compacité de la magnésie (obtenue au moyen d'une pression élevée), imperméabilité de la magnésie à l'humidité (obtenue par cuisson), bobinage régulier du fil résistant, épaisseur convenable de l'isolant, fixation du fil aux bornes d'amenée de courant (par fortes pressions sans soudure).

Les éléments chromalox se présentent sous forme de lames ou d'anneaux.

Les lames ont une largeur normale de 38 mm (limites actuelles de 25 mm et de 75 mm) et une épaisseur de 7 à 9 mm. La longueur peut varier de 203 à 1 083 mm. Le tableau qui suit donne la valeur des puissances minima et maxima usuelles. Le montage du fil résistant permet de disposer à volonté les bornes d'amenée de courant (en acier chromé ou en monel) soit aux deux extrémités de la lame, soit à une seule extrémité, soit au centre, ou d'avoir trois bornes pour obtenir plusieurs allures de chauffe. Les tensions normales sont de 110 et 230 V (limites de fabrication : 75 et 500 V).

Caractéristiques	Longueur totale	Longueur utile (chauffée)	Puissance			
			110 V		230 V	
			Min.	Max.	Min.	Max.
	mm	mm	W	W	W	W
1 borne à chaque extrémité. { Min. .	203	102	50	225	175	200
{ Max..	1 083	981	10	2 300	50	2 300
2 bornes à une seule extrémité. { Min. .	203	102	35	225	150	200
{ Max..	1 083	981	10	1 800	50	2 300
3 bornes à une extrémité (3 allures de marche). { Min. .	267	168	100	300	—	—
{ Max..	603	505	75	900	275	800
Modèle spécial à 2 bornes à une seule extrémité. { Min. .	140	57	75	150	—	—
{ Max..	305	222	25	500	100	500

Les anneaux se présentent sous deux formes, suivant qu'ils sont complètement blindés (sur deux faces) ou semi-blindés (sur une seule face) ; leur diamètre extérieur varie de 89 à

Quelques modèles d'éléments chromalox

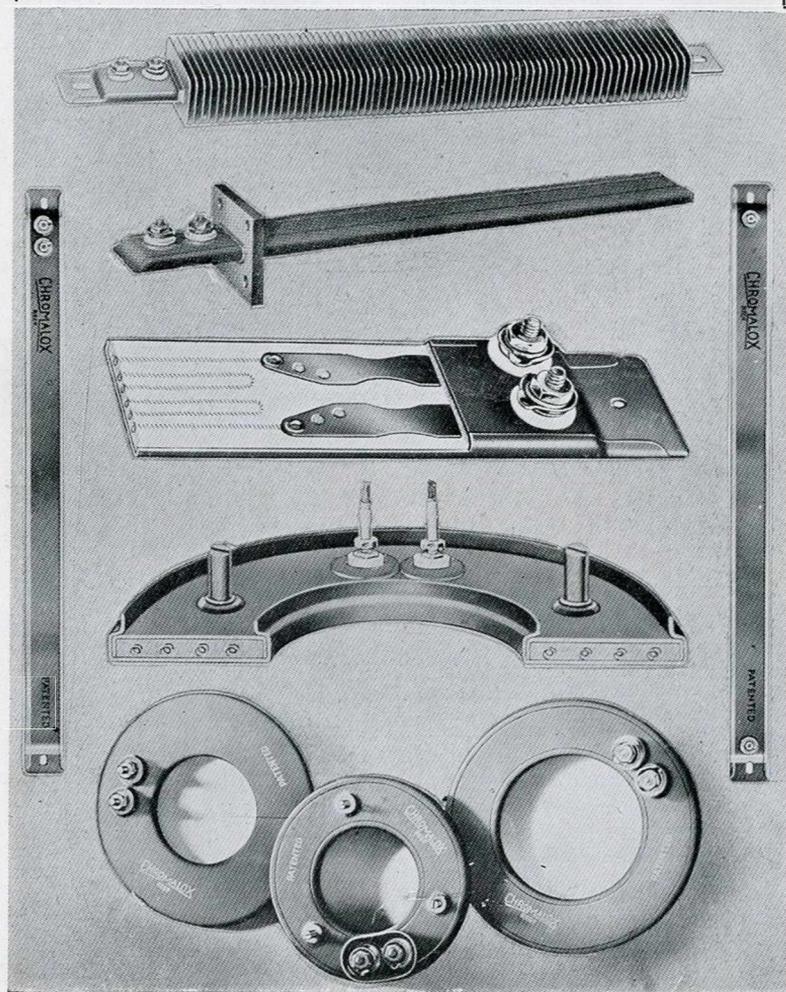


Fig. 8

de 19 mm et la puissance de 25 à 1 400 W. Le tableau suivant en donne les caractéristiques essentielles.

Caractéristiques	Diamètre intérieur	Diamètre extérieur	Puissance				
			110 V		230 V		
			Min.	Max.	Min.	Max.	
			W	W	W	W	
Anneau blindé, gaine en fer électrolytique ($e = 8$ mm).	Min. .	22	64	75	125	—	—
	Max. .	157	213	25	500	75	750
Anneau blindé, gaine en acier chromé ($e = 8$ mm).	Min. .	22	64	75	150	—	—
	Max. .	157	213	25	500	75	950
Anneau semi-blindé ($e = 5,5$ mm)	Min. .	27	89	25	350	125	350
	Max. .	152	219	25	1300	50	1 400

Les cartouches « chromalox » (fig. 9) comportent un noyau en matière réfractaire sur lequel est enroulé une résistance de nickel-chrome boudiné ; l'ensemble ainsi constitué est enrobé dans une matière réfractaire et le tout est introduit dans un tube en cuivre chromé.

N. B. — Les éléments **tubalox** (fig. 9), plus récents et fabriqués par la même firme, sont tubulaires et se font normalement en 2 diamètres (6,35 et 7,94 mm). Ils sont constitués par un fil boudiné enrobé dans l'isolant, l'ensemble se trouvant dans un tube de nature approprié.

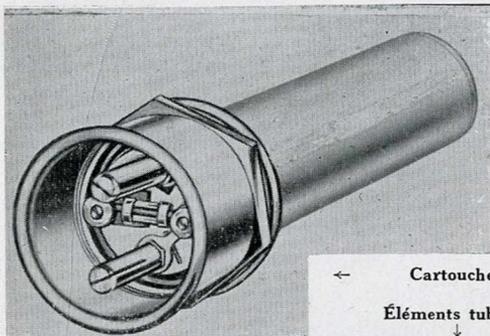
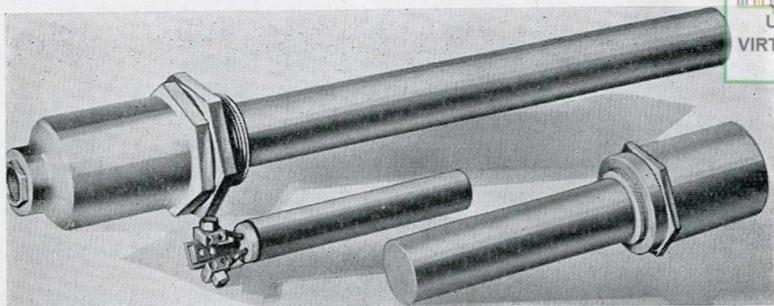
Éléments spyrox.

Ils ne datent que de quelques mois.

Un élément « spyrox » (fig. 5) est constitué par un fil boudiné en nickel-chrome placé dans une tôle courbée suivant la longueur (envirolage) et soudée par rapprochement. Le fil résistant est maintenu centré par de la poudre de magnésie calcinée tassée par des procédés mécaniques appropriés.

Les éléments spyrox se présentent actuellement sous forme de tubes d'un diamètre unique de 9 mm et d'une longueur maximum de 5 m ; la puissance spécifique maximum est de 13 W:cm, soit 1 300 W:m de longueur.

Ces éléments ont été jusqu'alors utilisés surtout pour l'équipement de plaques « feu vif » de cuisinières (780° C maximum avec marche intermittente).



← Cartouches →
↓ Éléments tubalox ↓

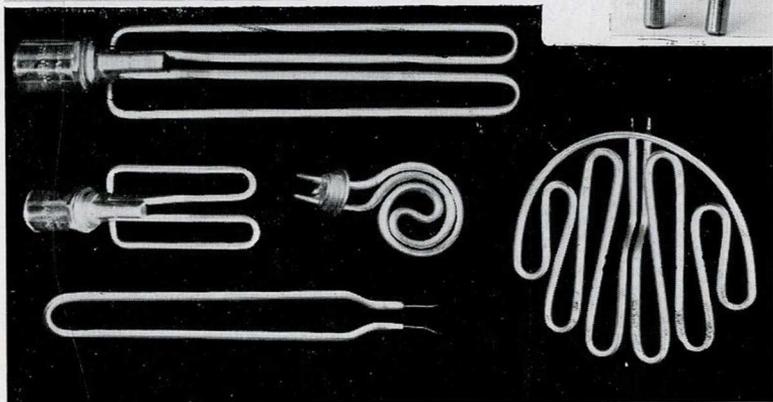
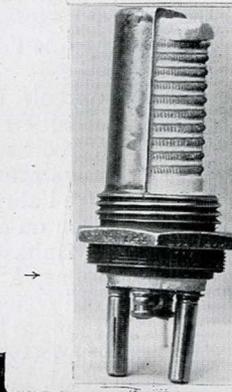


Fig. 9

Remarques sur les éléments blindés et en particulier sur les éléments tubulaires

a) Puissance.

La puissance que l'on peut réaliser par construction dans un tube, pour une tension donnée, dépend de la longueur utile (longueur chauffée) et du diamètre du tube.

La puissance minimum correspond à la résistance maximum du fil résistant ($P = \frac{U^2}{R}$ et $R = \rho \frac{l}{s}$, ρ = résistivité, l = longueur, s = section) ; on est donc limité par la plus faible section du fil résistant que l'on puisse admettre et par la longueur du fil, donc du tube.

Pour obtenir une faible puissance, on aura avantage à prendre un tube relativement long et une tension plus basse, de façon à avoir une section plus élevée du fil, qui présentera ainsi une plus grande résistance à l'usure (on a généralement le choix entre l'alimentation à 120 V environ et l'alimentation à 210 V environ ou entre la tension étoilée et la tension composée en courant triphasé, la tension simple et la tension double en courant diphasé à 4 ou 5 fils).

En ce qui concerne la tension, c'est par l'épaisseur de l'isolant et surtout par les conditions d'isolement aux bornes que l'on sera limité ; on a cependant fabriqué des éléments jusqu'à 650 V.

En général, la longueur normale usuelle des tubes de diamètre courant est de l'ordre de 2 m-2,50 m ; elle peut atteindre 5 m dans certains cas.

On peut grouper plusieurs tubes dans un appareil pour obtenir la puissance voulue, si cela est nécessaire.

A titre indicatif, la puissance maximum réalisée dans les tubes de fabrication courante est de l'ordre de 3 kW:m pour des tubes à la magnésie de 16,5 mm de diamètre et de 10 kW:m pour des cartouches de 65 mm de diamètre.

En pratique, la puissance acceptable dans de bonnes conditions de durée de l'élément dépend essentiellement des conditions d'utilisation de cet élément et en particulier de sa température d'emploi et des conditions de transmission de la chaleur.

b) Température.

La température réalisable dans un milieu chauffé avec des tubes dépend en particulier :

de la température de ramollissement du fil résistant. Pratiquement cette température étant de l'ordre de $1\ 100^{\circ}\text{C}$, n'est pas elle qui, en général, limite l'emploi des tubes, d'autant plus que la chute de température dans la magnésie (gradient de température entre le fil chauffant et l'enveloppe) est relativement faible (par ex., le gradient sera de 120°C pour une température de 750°C de la surface radiante de l'enveloppe) ;

de la température maximum que peut supporter l'enveloppe, compte tenu de l'ambiance dans laquelle elle plonge ; par ex., l'oxydation à l'air libre augmente rapidement avec la température lorsque cette dernière est élevée ;

du taux de transmission de la chaleur (lequel dépend de la différence de température entre l'élément et le milieu ambiant et des conditions de la transmission, celle-ci se faisant par conduction, par rayonnement ou par convection ; ex. : tube placé dans un gaz immobile ou en mouvement, ou dans un liquide agité ou non, ou encore dans un solide) fonction d'ailleurs :

de la forme du tube (tube rectiligne ou en épingle à cheveux ou de forme complexe, tube avec ou sans ailettes).

c) Charge ou puissance spécifique.

Pour une application donnée, on peut calculer facilement la puissance nécessaire pour le ou les éléments chauffants. Les dimensions de l'élément (lesquelles entrent essentiellement en ligne de compte pour la détermination du prix) dépendent du taux de la transmission de la chaleur que l'on pourra accepter. Ce taux (puissance spécifique par cm^2 de surface d'échange) sera limité :

par la température maximum à laquelle l'élément peut travailler, donc :

par la température maximum acceptable pour l'enveloppe (par ex. dans l'air, oxydation rapide à partir de certaines valeurs de la température, fonction d'ailleurs de la nature de l'enveloppe et des conditions du chauffage : température constante ou chauffage discontinu) ;

par la température de fusion du nickel-chrome (mais celle-ci étant élevée, ce facteur n'entre pratiquement pas en considération) ;

par la température à laquelle l'isolant perd ses qualités diélectriques.

Bien entendu, les conditions de l'ambiance sont capitales : nature (ex. : huile ou compound), mouvement (ex. : convection forcée d'un gaz ou agitation d'un liquide).



C'est l'expérience qui, généralement, a permis aux constructeurs, de fixer les taux de transmission à adopter dans les différents cas de la pratique courante.

d) Nature de l'enveloppe.

Les métaux usuels sont les suivants :

Métal	Température maximum usuelle (° C)	Principales applications
Cuivre (ordinaire, nickelé ou étamé), laiton	200	Chauffage des liquides en général et de l'eau en particulier.
Acier	400	Chauffage de l'air et de l'huile.
Acier protégé, bronze d'aluminium	600-680	Chauffage de l'air.
Nickel, alliages inoxydables, inconel	780-800	Chauffage de l'air. Cuisine.

*
* *

Câbles chauffants

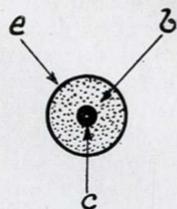
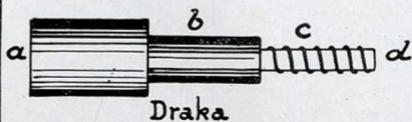
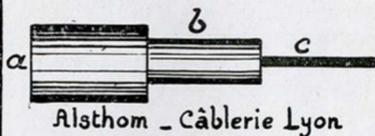
Les câbles chauffants constituent une solution très particulière du problème des éléments chauffants et qui a jusqu'ici été surtout adoptée dans le domaine agricole pour le chauffage des couches et de champignonnières. Ces câbles peuvent cependant rendre des services dans l'industrie pour des puissances superficielles assez faibles et des températures peu élevées (80° C au maximum à la surface du câble), en particulier, lorsque l'on veut obtenir une répartition aussi uniforme que possible de la chaleur.

Il existe actuellement 3 sortes de câbles chauffants (fig. 10) que nous indiquons ci-après par ordre alphabétique :

a) Le câble **alsthom** comporte, en partant du centre vers la périphérie, un fil résistant en nickel-chrome, deux guipages de coton imprégné, une triple tresse d'amiante, un guipage de papier imprégné, une enveloppe de plomb pur et en plus, dans certains cas, soit une gaine supplémentaire en zinc électrolytique strié (pour éviter les phénomènes d'électrolyse dus aux courants vagabonds), soit des feuillards. Le diamètre du câble sous plomb nu est de 6 mm environ et la résistivité peut varier de 0,5 à 2 $\Omega \cdot m$ (en général, elle est choisie égale à 1 $\Omega \cdot m$). La puissance spécifique maximum est de 30 W:m (soit environ 33 m de longueur par kW) ;

CABLES CHAUFFANTS

CONDUCTEURS CHAUFFANTS



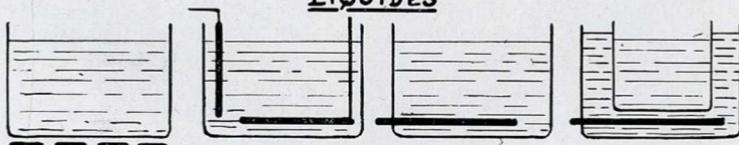
α = gaine plomb β = couche isolante c = fil résistant
 d = âme asbeste e = enveloppe

Principaux MODES DE CHAUFFAGE
(Schémas de principe)

SOLIDES



LIQUIDES



GAZ

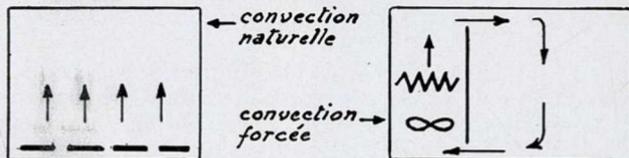


Fig. 10



b) Le câble **câblerie de Lyon** est constitué par un fil résistant isolé par des couches d'amiante et de papier goudronné et essoré, le tout étant enrobé dans une gaine de plomb protégé contre les corrosions chimiques par un traitement spécial (sulfuration) et recouvert de papier imprégné et d'une armure de feuillard mis à recouvrement ; la puissance spécifique varie de 25 à 40 W:m en général ;

c) Le câble **draka** comporte normalement un fil de nickel-chrome boudiné sur une âme en asbeste (produit à base d'amiante) et entouré d'un mélange dont nous ignorons la composition et qui forme isolant électrique et conducteur thermique ; l'ensemble est recouvert d'une couche de plomb pur. Dans certains cas, le câble est armé, l'enveloppe de plomb étant asphaltée, enveloppée dans du papier imprégné, armée ensuite de 2 couches de feuillard, asphaltée à nouveau et enveloppée enfin de papier imprégné. Le diamètre extérieur du câble sous plomb non armé est de 4,15 à 6,5 mm. La puissance spécifique est prévue en général à raison de 30 W:m.

Les câbles chauffants présentent en particulier 3 avantages intéressants :

facilité d'emploi ;

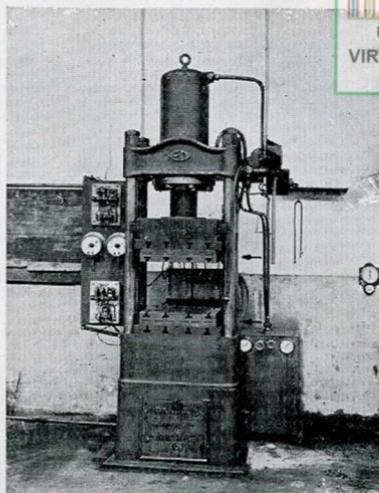
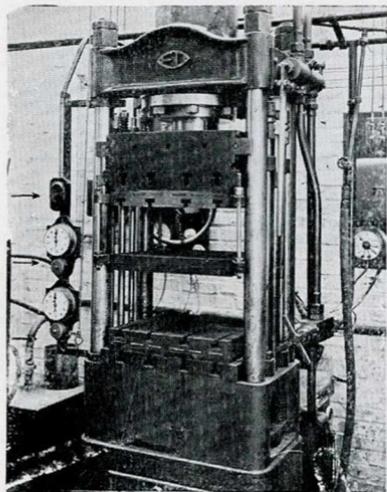
résistance à certains agents chimiques (gaine de plomb pur) ;

faible prix (par exemple un câble de 1 kW vaut actuellement environ la moitié du prix d'un tube blindé, à la magnésie, de même puissance).

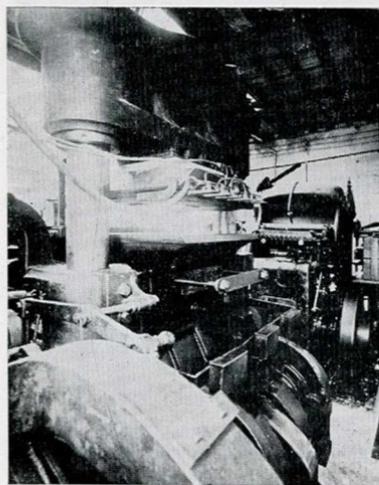
Quelques réalisations industrielles ont déjà été faites avec certains de ces câbles : étuves de séchage (pour fil vernissé), chauffage de canalisations d'eau en vue d'éviter le gel, de cuves de solutions photographiques, de cuves de paraffine. Ces câbles pourraient être utilisés par exemple avec intérêt pour le chauffage à faible température des liquides et de l'air (par ex. : étuves, chambre-étuves, parois et planchers chauffants).

Conducteurs chauffants

Pour l'équipement de parois chauffantes, on a eu quelquefois recours au conducteur « pyrotenax » constitué (fig. 10) par une âme en fil résistant (cuivre, nickel-chrome, etc.) enrobé dans de la magnésie en poudre ou dans un produit pulvérulent à base de magnésie, l'ensemble se trouvant enfermé dans un tube en cuivre. Au cours de la fabrication, ce conducteur subit des étirages et des recuits à 550° C environ. Le diamètre exté-



a, Plateaux de presse pour matières plastiques



b, Plateaux de presse pour dorure sur papier



c, Four de pâtisserie

Fig. 11



rieur des conducteurs chauffants fabriqués jusqu'à maintenant a varié de 5 à 10 mm ; la longueur peut atteindre 12 m, sans aucun raccord, avec du fil résistant en nickel-chrome à 80/20 ; elle pourrait atteindre 100 à 200 m avec un métal résistant tel que l'aluminium. Les puissances réalisées jusqu'à ce jour sont de 30 à 500 W:m avec des températures maxima d'emploi de 300 à 400° C. Théoriquement, il semble que l'on pourrait sans inconvénient utiliser ces conducteurs à des températures supérieures, sans que le courant de fuite soit exagéré et peut-être sous réserve d'augmenter (ce qui est facile à faire) l'épaisseur de l'isolant.

* *
* *

Avantages des éléments protégés

Les principaux avantages de ces éléments sont les suivants :
possibilité d'obtenir toutes les formes désirées, donc de répondre aux cas les plus complexes ;

facilité d'installation : peu de supports, en particulier ;

facilité du réglage et du contrôle de la température ;

isolement électrique satisfaisant, sous réserve que la température ne dépasse pas certaines limites, fonction de la nature de l'isolant ;

durée élevée sous réserve d'une bonne fabrication.

En particulier, pour les éléments blindés, la longévité peut être fortement augmentée — sous les réserves habituelles de fabrication correcte, de choix convenable et d'utilisation judicieuse — grâce à la triple qualité chimique, thermique et mécanique des éléments :

Chimique : choix convenable de l'enveloppe ; protection parfaite du fil résistant contre l'oxydation par la magnésie ou un produit similaire dans lequel le fil est enrobé ; étanchéité.

Thermique : faible chute de température interne entre le fil et l'enveloppe grâce à la bonne conductibilité de l'isolant et à sa faible épaisseur ; fil boudiné bien centré par construction.

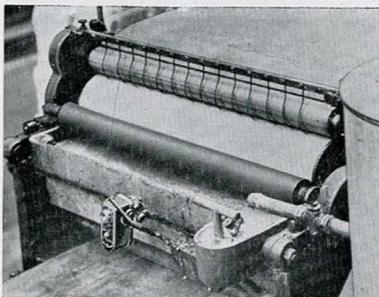
Mécanique : résistance mécanique élevée de l'enveloppe ; aucun ennui à craindre avec les vibrations, la masse étant compacte et le fil étant solidement maintenu.



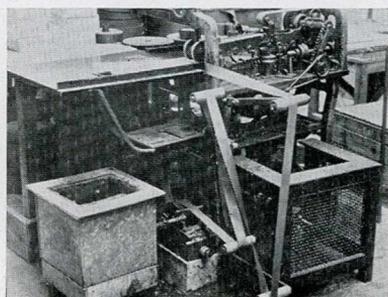
a, Table chauffante à bain d'huile



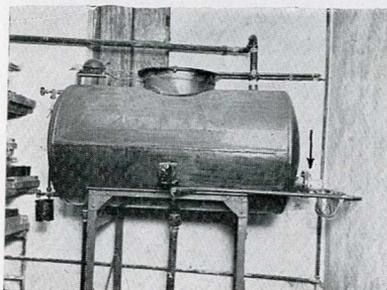
b, Chauffe-gamelles à bain-marie



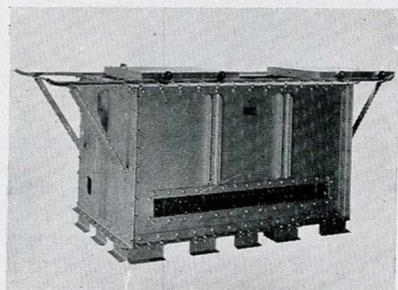
c, Chauffage de colle



d, Chauffage de colle



e, Réchauffage d'huile
pour alimentation de brûleurs



f, Four à bain d'huile
(revenu d'alliages légers)

Fig. 12



Températures d'emploi des éléments protégés

Le tableau suivant donne l'ordre de grandeur des températures usuelles d'emploi de ces éléments dans l'industrie. Il ne faut le considérer que comme un *document approximatif* car, nous l'avons vu, la température d'emploi dépend d'un assez grand nombre de facteurs ; ce n'est pas un invariant.

Dans des essais de laboratoire, on a pu réaliser, avec des éléments blindés à la magnésie, des températures de l'ordre de 1 000° C avec une durée relativement satisfaisante ; toutefois, pratiquement, on n'utilise ces éléments qu'au-dessous de 750-800° C.

Il est toujours préférable d'adopter, surtout aux hautes températures et chaque fois que cela est possible (question de volume ou de surface) une charge spécifique peu élevée, de façon à augmenter la durée des éléments.

Nature de l'isolant	Températures d'emploi de l'élément (1) (° C)	
	Usuelles	Maximum
Mica	jusqu'à 500	700-800
Produit réfractaire en forme (sueilicium, stéatite, etc.).....	jusqu'à 100	300
Ciment	jusqu'à 400	500
Produit silico-alumineux en poudre.....	jusqu'à 550	550
Magnésie en poudre.....	jusqu'à 500-800	750-800
Câbles chauffants.....	inférieures à 80	80
Conducteurs chauffants.....	jusqu'à 400	

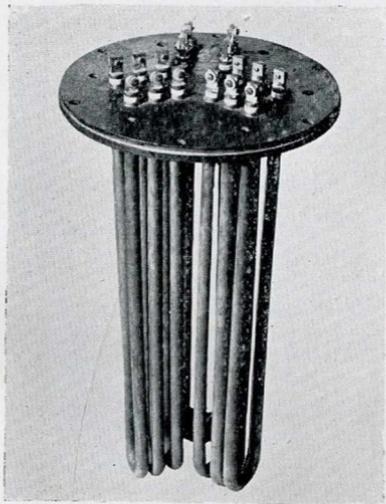
(1) Se reporter au texte ci-dessus.

* * *

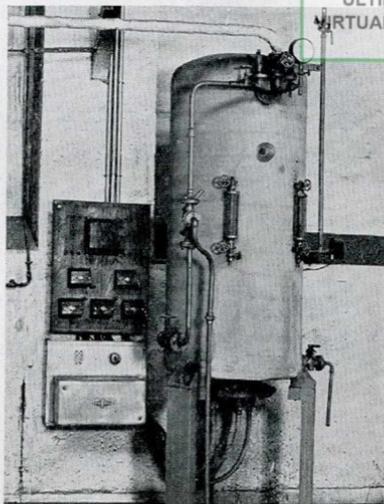
Applications

Les applications des éléments protégés et surtout des éléments blindés sont très variées et très importantes ; leur nombre s'accroît régulièrement. Aussi serait-il imprudent de vouloir actuellement en dresser une classification complète, voire même partielle, mais rationnelle.

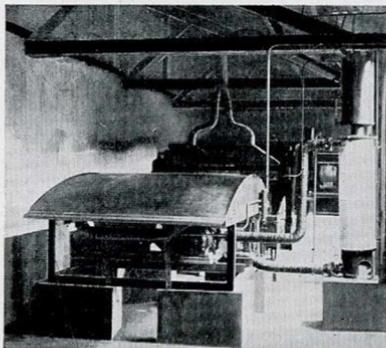
Nous nous contenterons donc d'envisager la classification suivante, en partant de l'état de la matière à chauffer et de la nature des traitements thermiques à lui faire subir :



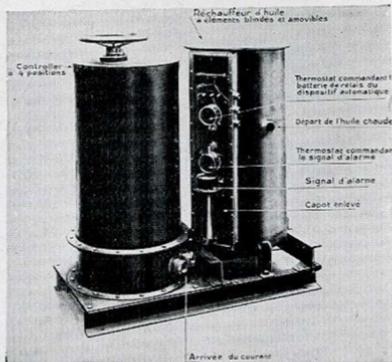
a, Élément d'immersion pour huile



b, Chaudière à éléments immergés



d, Chauffage d'huile pour transport de calories par circulation



c, Réchauffeur d'huile pour paquebot

Fig. 13

But	Opération thermique (1)
CHAUFFAGE DES SOLIDES	
1) Fondre le corps.	<i>Fusion des métaux et alliages métalliques à bas point de fusion.</i> <i>Fusions diverses de corps solides ou pâteux.</i> } Brai, chocolat, glace, etc.
2) Changer la forme du corps.	<i>Fabrication des boîtes en carton et des empreintes en imprimerie.</i>
3) Modifier les propriétés physiques ou chimiques du corps.	<i>Cuisson des produits alimentaires.....</i> } Biscuiterie ; Charcuterie ; Cuisine ; Grillage café. <i>Traitements chimiques</i> } Vulcanisation ; Bakélation ; Matières plastiques.
4) Transporter la chaleur.	<i>Chauffage d'objets divers...</i> } Tables, plateaux et plaques ; Calandres et cylindres ; Formes de bas, etc. <i>Bains de sable.</i>
CHAUFFAGE DES LIQUIDES	
1) Volatiliser le corps.	<i>Production de vapeur d'eau (chaudières).</i> <i>Vaporisation et distillation sous vide.</i>
	<i>Séchage..</i> { Flacons verre après lavage, boîtes métalliques, bois après collage, produits en poudre (farine, poudre de riz, produits pharmaceutiques), films et papiers photographiques, encre, fruits.
2) Augmenter la fluidité ou empêcher la solidification.	<i>Chauffage des huiles</i> { Huiles combustibles ; Epuration ; Défigeage.
	<i>Chauffage des corps pâteux ou visqueux</i> { Colle, compound, cire, poix, paraffine, gélatine, etc.
3) Elever ou maintenir la température.	<i>Chauffage de l'eau.</i> <i>Chauffage de divers liquides.</i> { Bains-marie, bains d'électrolyse, bains photographiques, canalisations d'eau en hiver.
4) Modifier les propriétés.	<i>Opérations chimiques</i> { Vernissage, laquage ; Accélération des actions (bains d'électrolyse). <i>Sterilisation (lait).</i>
5) Transporter la chaleur.	<i>Chauffage des bains-marie.</i> <i>Transport des calories par circulation d'un liquide (huile, eau).</i>

(1) Certaines applications participent à la fin du chauffage des solides et des liquides ou des gaz (ex. : séchage des noyaux de fonderie, etc.).

But	Opération thermique
CHAUFFAGE DES GAZ	
1) Elever ou maintenir la température.	<i>But physiologique</i> (chauffage des ateliers et des locaux, cultures microbiennes).
2) Transporter la chaleur.	<i>But industriel</i> ... { <ul style="list-style-type: none"> Etuves et chambres-étuves à convection naturelle ou forcée; Surchauffage de la vapeur.
	<i>Aérothermes.</i>

La matière à traiter peut se présenter sous un des états suivants :

- Solide ;
- Liquide ;
- Gazeux.

Les tableaux et schémas des pages 38, 39 et 31, complétés par les photographies des figures 11 à 14 et également des figures précédentes, donnent une idée incomplète, mais suffisamment suggestive, des applications réalisées jusqu'à ce jour. Nous avons laissé de côté, dans les illustrations, les applications domestiques, qui sont les plus connues (chauffe-eau, cuisinières).

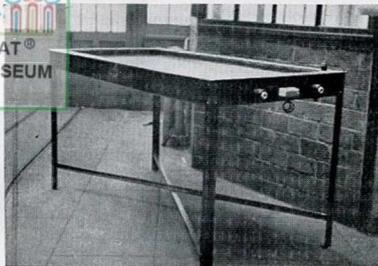
Il n'existe malheureusement aucune statistique permettant de connaître toutes les installations existantes et d'en déterminer l'importance. Quoi qu'il en soit, les 3 principales sont actuellement la cuisine, le chauffage de l'eau et celui des huiles.

Nous ne signalons que pour mémoire l'emploi des éléments protégés pour l'équipement des cuisinières et des réchauds, qu'il s'agisse d'appareils de cuisine domestiques, commerciaux ou industriels. Cette application à la cuisine est de beaucoup la plus importante pour les éléments blindés.

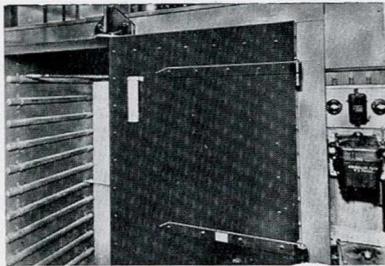
Le chauffage de l'eau prend la seconde place à cause des applications domestiques, les chauffe-eau et les chauffe-bains étant équipés au moyen d'une bougie ou cartouche chauffante constituée simplement par un élément protégé placé dans une gaine à l'intérieur du réservoir cylindrique contenant l'eau ; des applications intéressantes de chauffage d'eau ont été réalisées également dans l'industrie.

Le chauffage des huiles a pris au cours des dernières années une extension considérable qu'il s'agisse :

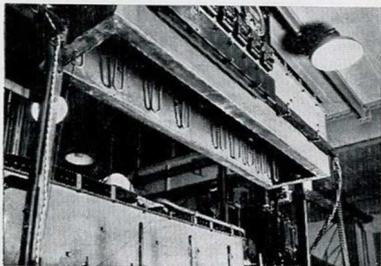
Du chauffage des huiles de combustion (en particulier des



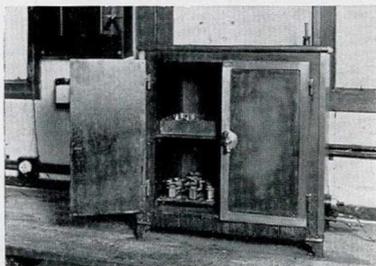
a, Table chauffante à bain de sable



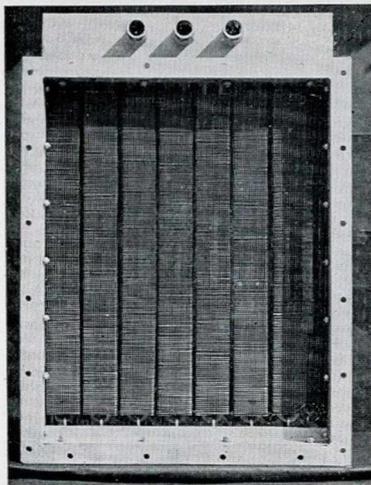
b, Étuve de laquage



c, Étuve à cloche (cloche levée)

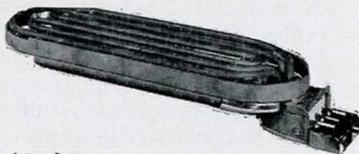


d, Étuve

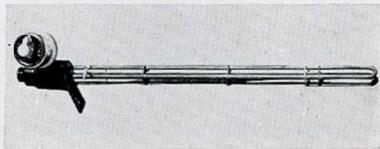


e, Aérotherme

f, Feu vif de poissonnière



g, Élément chauffant pour calandre à repasser les faux-cols.



fuel-oils) afin d'en augmenter la fluidité (adopter un taux peu élevé pour la puissance spécifique, surtout si l'huile est immobile, afin d'éviter la décomposition de l'huile et la destruction des éléments chauffants; généralement emploi d'éléments blindés isolés à la magnésie ou à l'aide d'un produit similaire avec enveloppe en acier);

Du chauffage des épurateurs d'huile;

Du chauffage des bains d'huile.

Il est juste de noter également la place prise par les éléments protégés pour le chauffage des plaques et plateaux chauffants (plateaux de presse par exemple) et également des étuves, chambre-étuves et aérothermes.

*
* *

Conclusion

L'industriel peut trouver facilement, sur le marché, des éléments protégés ou blindés permettant d'atteindre des températures maxima de l'ordre de 700-800° C et, plus généralement, sans difficulté, des températures de l'ordre de 400-500° C ou moindres, d'installation facile, de longue durée et donnant toute satisfaction. On ne saurait cependant trop recommander aux usagers éventuels de bien préciser, soit au fournisseur d'éléments, soit au constructeur d'appareils électrothermiques, les conditions du problème de chauffage qu'ils désirent résoudre. A ce compte, non seulement ils n'encourront pas de déboire, mais encore ils auront toute satisfaction au point de vue technique et économique, sous la seule réserve, bien entendu, de s'adresser à des constructeurs qualifiés.

Septembre 1938.



Imprimerie des Presses Universitaires de France. — Vendôme-Paris (France)



ULTIMHEAT®
VIRTUAL MUSEUM



XIV. 11. 38

La Société pour le Développement des Applications de l'Électricité APEL, créée avec le patronage du Groupement des Secteurs Français, a pour objet l'amélioration et la vulgarisation des appareils électriques d'applications diverses.

**Pour toute étude et renseignements techniques,
s'adresser : 33, rue de Naples — PARIS (8^e)**