

DU MÊME AUTEUR :

Les Phénomènes Radioactifs.....	3 francs
L'Arc voltaïque et ses applications....	1 fr. 50



LES

FOURS ÉLECTRIQUES

ET

LEURS APPLICATIONS INDUSTRIELLES

PAR

JEAN ESCARD

INGÉNIEUR,
DIPLOMÉ DU LABORATOIRE CENTRAL D'ÉLECTRICITÉ
DE LA SOCIÉTÉ INTERNATIONALE DES ÉLECTRICIENS

Préface de HENRI MOISSAN

MEMBRE DE L'INSTITUT
PROFESSEUR A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

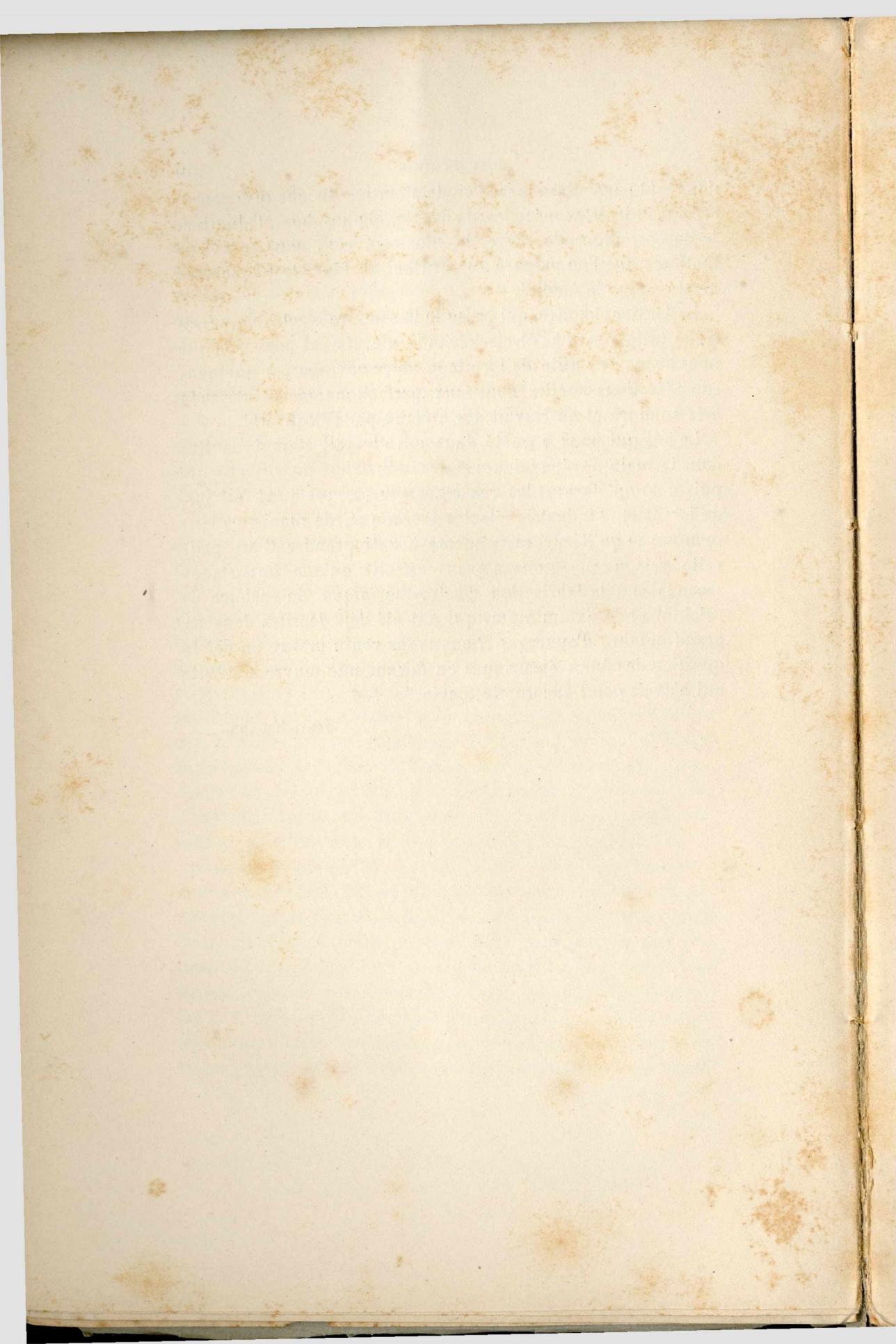
PARIS (VI^e)

V^{ve} CH. DUNOD, ÉDITEUR

49, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 49

—
1905

Tous droits réservés





LES

FOURS ÉLECTRIQUES

ET LEURS APPLICATIONS INDUSTRIELLES

CHAPITRE PREMIER

PHÉNOMÈNES ÉLECTROTHERMIQUES CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE. — FOURS ÉLECTRIQUES A LAME MÉTALLIQUE RÉSISTANTE

Transformation de l'énergie électrique en énergie thermique. — Chauffage électrique. — Fours électriques tubulaires à fil de platine pour laboratoire. — Recherches de M. Charpy. — Fours électriques à lame de platine. — Fours Heraeus. — Fours horizontaux. — Fours verticaux Holborn. — Avantages des fours électriques tubulaires. — Calcination et analyse des substances organiques à l'aide des fours tubulaires. — Mesure de la température des fours électriques.

Transformation de l'énergie électrique en énergie thermique. — L'étude de l'énergie et son introduction dans les différentes sciences a pour point de départ les travaux de Joule et Favre sur la transformation possible du travail en chaleur; ces physiciens établirent par des expériences le lien intime qui lie la chaleur et le travail, et ces principes furent étendus aux autres formes sous lesquelles l'énergie nous apparaît; Th. Young employa le premier ce mot *énergie* pour désigner les différentes forces. L'énergie nous apparaît sous quatre formes principales: l'énergie mécanique (ou travail), l'énergie thermique, l'énergie chimique et l'énergie électrique. Il y a vingt ans, ces forces n'étaient nullement considérées comme pouvant se remplacer l'une l'autre, elles étaient tout à fait distinctes: on sait aujourd'hui qu'elles se transforment avec la plus grande facilité et que, si l'une d'elles vient à dispa-

raître, ce n'est que pour faire place à une autre. Ce principe de *la conservation de l'énergie* est le guide des théories modernes.

Il nous est, du reste, très facile de nous rendre compte qu'elles sont équivalentes : en effet, *l'énergie thermique* se transforme avec la plus grande facilité en énergie mécanique dans les machines à vapeur, les moteurs à gaz ou à pétrole; en énergie chimique, en facilitant les différentes réactions que produisent les corps par leur combinaison ou leur décomposition. *L'énergie mécanique* se transforme en chaleur dans le choc des corps, les frottements. *L'énergie chimique* se transforme en énergie mécanique par l'intermédiaire de l'énergie calorifique; en énergie thermique dans la plupart des combinaisons chimiques. *L'énergie électrique*, nouvelle venue, est la plus précieuse de toutes, car elle se transforme avec la plus grande facilité en toutes les autres formes de l'énergie, et réciproquement toutes les autres formes de l'énergie peuvent facilement se transformer en énergie électrique.

Ainsi l'énergie vit pour ainsi dire toujours; elle ne peut pas disparaître, mais seulement se transformer, en donnant naissance à une quantité d'énergie équivalente à celle qui a été transformée : *l'énergie ne peut être ni détruite ni créée*. Au point de vue qui nous occupe, nous devons surtout remarquer l'intérêt qu'il y a à transformer l'énergie électrique en énergie thermique: tandis que chaque fois que l'on transforme une forme de l'énergie en une autre, il y a toujours une partie de la première qui se dépense en pure perte en énergie thermique, cela devient au contraire un avantage lorsqu'on a pour but de transformer l'énergie électrique en énergie thermique, car alors cette transformation s'effectue intégralement.

Force électromotrice d'un courant. — Intensité. — Résistance. — Puissance. — Nous savons que tout courant électrique traversant un fil métallique est caractérisé par deux facteurs principaux: la force électromotrice du courant (f. é. m.) et la résistance du fil; de ces deux valeurs dépend l'intensité du



courant. La *f. é. m.* ou *différence de potentiel* peut être comparée à la différence de niveau de deux réservoirs placés à des hauteurs différentes, et la *résistance* à l'opposition créée par le frottement de l'eau contre les parois d'une conduite joignant ces deux réservoirs ; il est clair que l'*intensité*, c'est-à-dire la quantité de liquide débitée dans un temps donné, sera d'autant plus élevée que la différence de niveau sera plus grande et le frottement plus petit. Le produit de l'intensité par la différence de hauteur des réservoirs sera la *puissance* de la chute. Ainsi une chute d'eau tombant d'une hauteur de 10 mètres et débitant 2 litres d'eau par seconde aura une puissance représentée par le nombre 20. Pareillement un courant ayant une *f. é. m.* représentée par le nombre 10 et une intensité représentée par le nombre 2 aura une puissance de 20 unités.

Unités électriques. — Pour désigner ces différentes valeurs, on a choisi des unités dont les noms proviennent généralement des grands savants qui ont le plus contribué aux découvertes de la science électrique : l'unité de *f. é. m.* est le *volt* ; l'unité d'intensité est l'*ampère*, et l'unité de puissance le *watt*. Quant à l'unité de résistance, qui caractérise uniquement le conducteur dans lequel circule le courant, elle a reçu le nom d'*ohm*. Pour donner une idée de cette grandeur, il nous suffit d'indiquer qu'un fil de cuivre recuit de 50 mètres de longueur et de 1 millimètre de diamètre, a une résistance de 1 ohm environ. La résistance d'un fil métallique croît proportionnellement à sa longueur et en raison inverse de sa section : elle est en outre proportionnelle à un certain coefficient que l'on appelle *résistivité* et qui représente la résistance d'un fil de 1 mètre de longueur et de 1 millimètre carré de section. Voici sa valeur pour quelques métaux et alliages :

Argent recuit.....	0,01492
Cuivre recuit.....	0,01584
Aluminium recuit.....	0,02889
Zinc comprimé.....	0,03380

Platine recuit.....	0,08981
Fer recuit.....	0,09636
Nickel recuit.....	0,12356
Maillechort.....	0,20760
Acier au manganèse.....	0,75000
Ferro-nickel.....	0,78300

La résistance d'un fil est donnée par la formule suivante :

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

dans laquelle l représente la longueur du fil, exprimée en mètres, s sa section en millimètres carrés, et ρ le coefficient de résistivité; R est la résistance du fil à calculer. Il convient d'ajouter que la résistance augmente avec la température; quand les limites de température ne sont pas très éloignées, cette variation peut se représenter par l'expression suivante :

$$R_\theta = R_0 (1 + a\theta),$$

dans laquelle R_θ représente la résistance du fil à θ° , R_0 sa résistance à 0° et a le coefficient de variation avec la température.

Chaleur dégagée par un courant traversant un fil métallique. — Température des conducteurs. — Lorsqu'un courant électrique traverse un fil métallique, ce fil s'échauffe, d'après la loi de Joule, et la quantité de chaleur dégagée pendant un temps donné croît proportionnellement à la résistance de ce fil et au carré de l'intensité :

$$q = \frac{R \times I^2 \times t}{9,81 \times 425} \text{ grandes calories,}$$

la grande calorie étant la quantité de chaleur nécessaire pour porter 1 kilogramme d'eau de 0° à 1° . Quant à la température des conducteurs, elle croît proportionnellement à l'intensité du courant, comme nous le verrons plus loin.



Principales unités mécaniques et thermiques. — Comme dans le cours de cet ouvrage nous aurons souvent à invoquer les unités mécaniques et thermiques, nous croyons utile de mettre sous les yeux du lecteur le tableau suivant¹, qui contient les principales unités de travail, de puissance et de chaleur :

Travail :

- 1° Kilogrammètre.
- 2° Joule = 0 kgm., 102 (1 kilogrammètre = 9 joules, 81).
- 3° Watt-seconde = 1 joule = 0 kgm., 102.
- 4° Watt-heure = 367 kilogrammètres.
- 5° Kilowatt-heure = 367.000 kilogrammètres.
- 6° Cheval-heure = 270.000 kilogrammètres.

Puissance :

- 1° $\frac{\text{Kilogrammètre}}{\text{seconde}}$.
- 2° Watt = $1 \frac{\text{joule}}{\text{seconde}} = 0 \frac{\text{kgm.}}{\text{seconde}}$, 102 = 0 chev. vap., 00136
- 3° Kilow. = 1.000 w. = $1.000 \frac{\text{joules}}{\text{secondes}} = 102 \frac{\text{kgm.}}{\text{seconde}} = 1 \text{ ch.-vap.}, 36.$
- 4° Cheval-vapeur = $75 \frac{\text{kgm.}}{\text{seconde}} = 736 \text{ watts} = 0 \text{ kw}, 736.$

Chaleur :

- 1° Calorie = 0 kgm., 496 = 4 joules, 18.
- 2° Joule = 0 cal., 24, *gr. degré.*

Ces quelques notions étant rappelées, passons maintenant en revue les principaux appareils qui ont été imaginés pour le chauffage électrique, appareils qui sont basés sur la transformation de l'énergie électrique en énergie calorifique, obtenue par le passage du courant dans des conducteurs de faible diamètre ou de haute résistivité.

Chauffage électrique. — Classification des appareils.

— En mettant à part les appareils qui utilisent l'arc électrique et que nous étudierons dans un chapitre spécial, on peut classer les appareils de chauffage de la façon suivante: 1° Appareils

1. Voir l'*Électricité Industrielle* par Paul Janet. — Gauthier-Villars, Paris, 1903.

utilisant des résistances métalliques; 2° appareils utilisant des résistances diverses; 3° appareils utilisant des lampes à incandescence. Les appareils qui utilisent des résistances métalliques comprennent ceux qui sont constitués soit par des fils métalliques nus, soit par des fils métalliques enrobés, soit enfin par des dépôts métalliques. Les appareils qui utilisent des résistances diverses comprennent ceux qui sont constitués soit par des résistances placées à l'air libre ou dans le vide, soit par des résistances liquides.



FIG. 1. — Montage des résistances dans les appareils de la Gold Car Heating Co.

Appareils utilisant des résistances métalliques en fils nus. — L'Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft fabrique des appareils qui sont destinés au chauffage des liquides et dans lesquels les résistances sont constituées par un fil nu enroulé, avec interposition de feuille d'amiante, sur la paroi interne d'un récipient à double enveloppe; les principaux appareils que fabrique cette Société sont : des bouilloires permettant de porter un litre d'eau à sa température d'ébullition en vingt minutes seulement; des filtres à café se composant de deux récipients : la bouilloire à eau et le filtre proprement dit; au moyen d'un agencement automatique, le courant est arrêté dès que toute l'eau est passée dans le filtre.

Afin d'éviter la condensation de la vapeur d'eau sur les glaces des devantures de magasins, la même Société construit des appareils de chauffage très simples, composés d'un rhéostat, qui produit l'évaporation de l'eau au fur et à mesure qu'elle tend à se con-

denser. De même, pour certains usages industriels, elle construit des chaudrons de différentes capacités, munis de deux séries de résistances et dont la première peut être mise facilement hors circuit; on peut obtenir de cette manière deux températures différentes. Elle fabrique également des radiateurs de tramways dont les résistances, maintenues toujours tendues par un dispositif très ingénieux, malgré les phénomènes de dilatation qui se produisent, sont enfermées dans une enveloppe protectrice en tôle perforée.

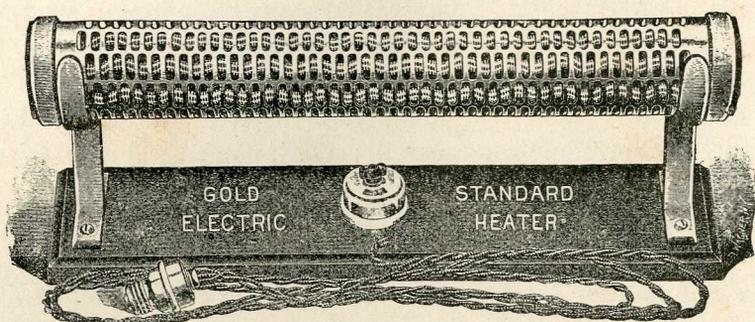


Fig. 2. — Appareil portable de chauffage de la Gold Car Heating Co, monté sur support avec son interrupteur et sa prise de courant.

La Gold Car Heating Co de New-York et Chicago construit des appareils de chauffage électrique dans lesquels la résistance est constituée par un alliage spécial dont la composition est tenue secrète, mais qui, bien entendu, a une haute résistivité; en outre cette résistance ne se modifie pas avec le temps; l'alliage est étiré en fils enroulés sous forme de boudins. Afin de favoriser les mouvements de convection, les boudins sont placés, comme l'indique la figure 1, sur des tiges d'acier rond de 5 à 6 millimètres de diamètre, recouvertes préalablement d'un émail isolant, déposé à la température de 200°. Les supports sont fixés par leurs deux extrémités à des blocs de porcelaine; les boudins sont reliés à ces blocs qui portent des parties métalliques servant également à grouper ensemble plusieurs ré-



sistances. On adopte pour unir les éléments des systèmes de montages qui varient avec les usages auxquels on destine ces appareils.

Dans les voitures de tramways, on emploie différents types de radiateurs : certains de ces appareils sont placés sur la partie du panneau de la voiture située sous les sièges ; les résistances sont placées dans une boîte en fonte dont le fond est garni d'amiante et dont la face antérieure est fermée par une plaque ajourée ; les côtés verticaux sont constitués par des pièces isolantes de porcelaine servant à soutenir les résistances. Dans une voiture de 7^m,50 de longueur, on a besoin de six de ces appareils pour la chauffer convenablement : le courant est amené par le trolley, et l'on peut régler son intensité de manière à obtenir des températures très différentes. La figure 2 représente un appareil portatif composé d'une résistance de même forme montée sur support et muni de son interrupteur et de sa prise de courant.

Fer à souder électrique. — M. Fouché, de Paris, construit des fers à souder électrothermiques qui présentent l'avantage de supprimer les dangers d'incendie provenant du chauffage au gaz et à l'essence de pétrole ; ce fer comprend trois parties : 1° une boîte à charnière avec son manche et sa prise de courant ; 2° un bloc électrothermique ; 3° une tige cylindro-conique constituant le fer à souder proprement dit et chauffée par le bloc électrothermique. C'est le bloc qui constitue l'organe essentiel : il est formé par un ensemble de résistances métalliques isolées par du mica et entourées d'amiante ; les résistances s'échauffent par le passage du courant et communiquent à la tige cylindro-conique la température nécessaire pour obtenir la fusion de la soudure.

L'emploi des fers à souder chauffés à l'aide du courant électrique commence à se répandre dans les ateliers, car ils ont l'avantage d'être prêts beaucoup plus rapidement que les fers ordinaires et de réduire notablement les dangers d'incendie ; la figure 3 représente le mode de construction d'un fer destiné

de la chaleur que possible : en résumé, il fallait pour obtenir de bons appareils, satisfaire aux exigences suivantes :

1° La plaque doit avec une grande conductibilité calorifique et adhérer d'une façon parfaite au verre isolant; le verre spécial constituant cet isolant doit être aussi élastique que possible, afin que les dilatations et les contractions répétées, occasionnées par le passage et la rupture du courant, soient impuissantes à occasionner des craquelures qui mettraient en contact le fil de la résistance et la plaque conductrice ;

2° Le point de fusion du verre isolant doit être aussi élevé que possible, afin que celui-ci ne puisse fondre sous l'action d'un courant d'intensité anormale amenant la résistance à la température du rouge ; de plus le verre doit être conducteur de la chaleur et constituer en même temps un parfait isolant électrique, afin de transmettre à la plaque de métal la presque totalité de la chaleur produite, et aussi pour que l'appareil de chauffage puisse supporter des tensions assez élevées ;

3° Le fil constituant la résistance doit être parfaitement noyé dans le verre et être aussi rapproché que possible de la plaque métallique, tout en étant suffisamment isolé. Le coefficient de dilatation du fil métallique doit être sensiblement le même que celui du verre employé ; enfin, il est absolument indispensable que la couche de verre ne contienne aucune bulle d'air capable de produire des craquelures dans l'isolant par la dilatation.

Les procédés qu'emploie cette Société répondent à ces exigences ; de plus quelques détails de construction rendent encore plus intéressants leurs appareils ; c'est ainsi que le côté extérieur de la plaque métallique est garni de nervures très minces, afin d'augmenter la surface radiante. La résistance de l'isolant est voisine de celle du verre ; comme celle-ci, elle diminue au fur et à mesure que la température s'élève, mais elle est toujours plus que suffisante pour assurer le bon isolement du fil avec des tensions électriques de 250 volts environ ; son point de fusion varie entre le rouge naissant et le rouge ce-

rise, c'est-à-dire entre 800° et 900° ; sa composition est telle que son élasticité se rapproche très près de celle de la fonte; il se prête de plus très bien aux mises en marche et arrêts répétés.

Les résistances sont des fils recourbés en forme de sinusoïde, afin de diminuer dans la plus grande mesure possible les effets de la dilatation linéaire; le métal employé peut être du fer-nickel, du platine ou du fer. Afin de ne pas atteindre une température trop élevée qui pourrait détériorer le verre, les résistances ont été calculées de façon que le passage du courant ne produise pas un échauffement supérieur à 300° ou 450° . Ainsi, dans les appareils où la plaque est maintenue à 250° , l'échauffement du fil ne dépasse pas 300° .

Parmi les nombreux appareils construits d'après ces données, nous pouvons mentionner : les chauffeuses-appliques, destinées au chauffage des petits locaux, qui se placent contre le mur, n'occupant ainsi qu'un emplacement très restreint; les calorifères portatifs (*fig. 4*) qui comportent généralement deux circuits, disposition qui permet de ne faire fonctionner qu'une moitié de l'appareil, lorsque celui-ci a atteint sa température normale; les appareils de cuisine, tels que chauffe-plats, grils, réchauds, cuisinières, etc.

L'Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft construit également des appareils de ce genre, dans lesquels les résistances sont

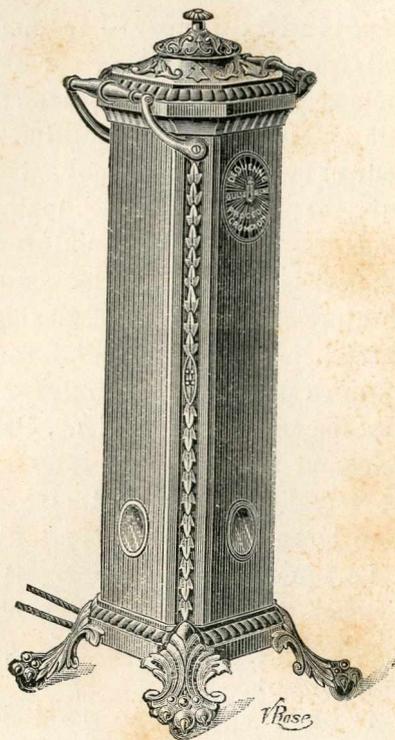


FIG. 4. — Calorifère électrique.

constituées par des fils métalliques enrobés dans un émail isolant qui les tient fixées sur une plaque métallique très bonne conductrice de la chaleur.

Appareils utilisant des résistances constituées par des dépôts métalliques. — Le mode de construction de ces appareils consiste à appliquer sur un support isolant des bandes de métaux précieux, principalement d'or et de platine, n'ayant que $1/500$ à $1/4000$ de millimètre ; cette couche, dont la largeur et la longueur varient suivant la tension du courant et la puissance à fournir, est appliquée sur l'isolant à l'aide de fondants comme les peintures d'or sur la porcelaine. Le support isolant peut varier comme composition selon la température demandée : c'est ainsi qu'il est constitué par un émail spécial, lorsque la température est au-dessous de 250° , et par du mica pour des températures voisines du rouge sombre. Il absorbe très peu de chaleur, étant donnée sa légèreté, et il la transmet rapidement et intégralement aux corps à chauffer. Le métal précieux peut être également déposé sous forme d'un large ruban conducteur fixé sur l'émail isolant.

Lorsqu'on désire chauffer des vases ayant une capacité supérieure à un litre, l'appareil comporte deux circuits disposés de manière à pouvoir opérer de quatre façons différentes. Ainsi on dispose :

1° Deux circuits en parallèle, lorsqu'on veut obtenir un chauffage intense ;

2° Un seul circuit au fond de l'appareil, lorsqu'on veut obtenir un chauffage moyen ;

3° Un seul circuit sur le côté, lorsqu'on veut obtenir un chauffage plus faible ;

4° Deux circuits en série, lorsqu'on veut obtenir un chauffage lent en veilleuse.

On peut très facilement arriver à ces résultats, grâce à un dispositif simple permettant de grouper les deux circuits comme nous venons de l'indiquer.

Nous devons ajouter que M. Heraeus a inventé une nou-

velle matière destinée à être employée comme résistance dans les appareils de chauffage par l'électricité. Son idée consiste à déposer un corps conducteur en couche mince sur une matière isolante ; mais, au lieu de faire ce dépôt sur les appareils eux-mêmes, on se sert comme supports de baguettes cylindriques pouvant avoir des dimensions quelconques ; on peut, en modifiant convenablement l'épaisseur de la couche conductrice et le diamètre du support, faire varier la résistance dans de grandes limites. M. Heraeus emploie des baguettes de porcelaine dont le diamètre est variable, et qu'il recouvre d'un émail spécial appelé par lui *émail conducteur en platine-silicium*. On peut monter ces baguettes entre des griffes reliées à un circuit, et cela avec d'autant plus de facilité que le contact se fait sur la surface extérieure, dont la conductibilité est celle d'un métal.

Appareils utilisant des résistances non métalliques placées à l'air libre. — Résistances métallo-céramiques. — La Société des Anciens Établissements Parvillée frères et C^{ie}, de Paris, construit des appareils de chauffage caractérisés par l'emploi de résistances amenées à l'incandescence à l'air libre et appelées par eux *résistances métallo-céramiques*. La fabrication de ces substances est basée sur ce principe qu'il est très facile de diminuer la conductibilité d'un métal en introduisant dans sa masse pulvérisée des corps spéciaux non conducteurs ; ces résistances sont d'ailleurs d'une très grande solidité, car, pendant leur fabrication, elles sont soumises à une pression et à une température très élevées qui leur permettent de se prêter très facilement à toutes sortes d'usages.

La résistivité de la matière fabriquée dépend évidemment de la nature du métal employé et de sa proportion dans le mélange ; pour montrer de quelle façon elle peut varier, il nous suffit de dire qu'une plaquette de $50^{\text{mm}} \times 10^{\text{mm}} \times 43$ millimètres de la substance métallo-céramique a une résistance totale de 100 ohms, soit une résistivité 1 million de fois plus grande que celle du métal employé. On peut l'utiliser sous



une forme quelconque, barres, crayons, cylindres, etc... et pour la construction de toutes sortes d'appareils de chauffage domestique, grâce à l'avantage qu'elle a de dégager un nombre considérable de calories sous un très petit volume.

Comme le montre la figure 5, représentant un fourneau électrique, les résistances R sont maintenues par des pinces en cuivre montées sur des lames flexibles permettant aux résistances de se dilater facilement sans occasionner d'accidents. Les extrémités des résistances sont, au cours de leur

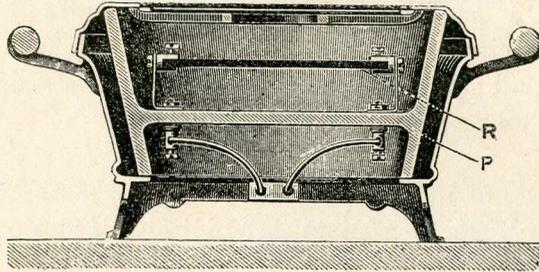


FIG. 5. — Fourneau électrique Pavillée
(Coupe verticale de l'appareil montrant la disposition des résistances de chauffage).

fabrication, rendues beaucoup plus conductrices que la résistance elle-même, afin d'éviter un grand dégagement de chaleur capable de faire rougir les pinces qui les supportent; les lames de cuivre sont montées sur la pièce P en porcelaine qui sert à la fois de support isolant et de réflecteur; dans certains autres modèles servant spécialement à produire l'ébullition des liquides, le récipient se trouve encastré dans le fourneau, et reçoit la chaleur non seulement par sa partie inférieure, mais aussi sur tout son pourtour. Dans ces appareils, on règle la température en intercalant, comme toujours, un nombre plus ou moins grand de résistances. On peut citer un grand nombre d'appareils construits sur ce principe : des grils à feu vif, des fers à repasser, des fers à souder (*fig. 6*).

M. Le Roy fabrique des plaques de chauffage en silicium

aggloméré qui ont la forme de parallépipèdes ayant les dimensions suivantes : 10 centimètres de longueur, 1 centimètre de largeur et 0^{cm},5 d'épaisseur ; elles sont métallisées à leurs extrémités et servent à la construction de radiateurs de différentes formes.

Appareils utilisant des résistances placées dans le vide.

— Outre ces appareils qui comportent des plaques de silicium aggloméré placées à l'air libre, M. Le Roy construit d'autres

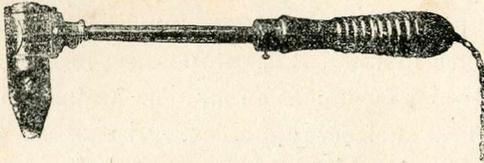


FIG. 6. — Fer à souder électrique Pavillée.

appareils de chauffage avec des résistances en silicium placées dans le vide.

En raison de la grande résistivité de ce métalloïde, il est possible de l'employer tout en augmentant considérablement sa section, c'est-à-dire sa résistance mécanique et en diminuant sa longueur, ce qui réduit énormément l'encombrement des appareils dans lesquels il est utilisé. Afin d'éviter l'oxydation, M. Le Roy a dû recourir à l'emploi du vide, et les appareils qu'il construit sont désignés sous le nom de « bûches électriques ».

Ces bûches ont en général 100 millimètres de longueur, 10 millimètres de largeur et 3 millimètres d'épaisseur ; ces petits parallépipèdes sont métallisés à leurs extrémités, de manière à former un bon contact électrique avec les pinces qui leur amènent le courant. On emploie couramment aujourd'hui ces bûches électriques, car elles possèdent la précieuse qualité d'être d'une grande solidité et d'une grande durée.

Appareils utilisant des résistances liquides. — MM. Adnet fils construisent des étuves à basse température, dans lesquelles le chauffage est obtenu par le passage du courant dans l'eau comprise entre deux électrodes placées à une certaine distance. Ces étuves se règlent pour toutes les températures comprises entre 20° et 95°, et l'appareil de chauffage est placé à la partie inférieure de l'étuve.

Chauffage électrique de l'eau. — M. Bainville a décrit dans *l'Électricien* un appareil de chauffage qui vient d'être breveté récemment aux États-Unis et qui présente une certaine originalité. Cet appareil se monte directement sur la canalisation d'eau et ne nécessite que quelques modifications peu importantes pour être installé. Il se compose essentiellement (*fig. 7*) de deux électrodes façonnées de manière à augmenter considérablement leurs surfaces opposées, qui sont en contact avec l'eau, et par suite à prolonger ce contact de façon à obtenir un échauffement suffisant et une bonne utilisation de la chaleur produite par le courant. Les deux électrodes sont logées dans une enveloppe étanche qui porte des raccords taraudés à l'aide desquels on assure les joints sur la canalisation. Ces électrodes sont disposées concentriquement : l'électrode extérieure se compose d'un cylindre en charbon moulé portant à sa partie interne un fort taraudage ; l'électrode intérieure porte à sa partie extérieure un filet de même pas obtenu par moulage comme le précédent.

Tandis que l'électrode supérieure est ouverte à ses deux extrémités, le cylindre intérieur est percé d'un trou central qui est fermé vers le haut. L'eau, arrivant par la canalisation, s'écoule par un tuyau logé dans le trou central de l'électrode interne et qui débouche au voisinage de la partie supérieure de ce trou : elle doit donc, pour arriver au robinet placé comme on le voit sur la figure 7, redescendre contre la paroi interne de l'électrode centrale, puis passer dans l'espace compris entre les filets et le taraudage des deux électrodes. Le courant est envoyé dans l'appareil en

manœuvrant la clef du robinet dans un sens, de telle sorte que, d'après le brevet, on peut avoir à volonté de l'eau chaude ou de l'eau froide. Par ce procédé, les matières étrangères seraient de plus précipitées dans le fond des filets par suite du mouvement de l'eau ou seraient retenues dans les cavités.

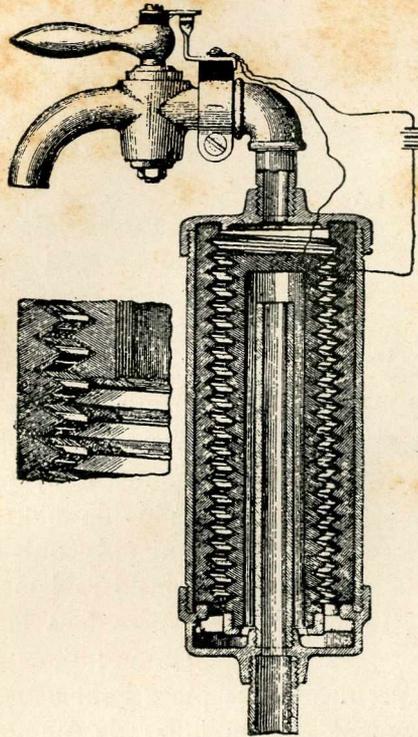


FIG. 7. — Chauffage électrique de l'eau.

Appareils utilisant des lampes à incandescence. — La Compagnie générale de chauffage par l'électricité fabrique des modèles d'appareils de chauffage qui utilisent comme source d'énergie calorifique des lampes à incandescence : les lampes couramment employées sont des ampoules cylindriques de 60 millimètres de diamètre et de 250 millimètres de longueur ; elles servent pour la construction de radiateurs : les lampes

sont disposées devant un réflecteur en cuivre rouge qui a pour but de renvoyer en avant la plus grande partie de la chaleur produite. M. Adnet applique ce genre de chauffage aux étuves à basse température pour fermentations et cultures; les lampes, qui sont du type ordinaire et à ampoules cylindriques, sont placées dans une sorte de tiroir A (fig. 8)

placé à la partie inférieure de l'étuve. En R est intercalé un régulateur de température qui permet de maintenir celle-ci entre des limites très voisines.

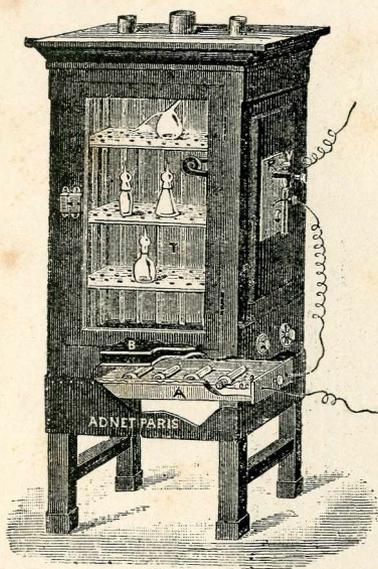


FIG. 8. — Étuve électrique système Adnet.

Fours électriques tubulaires à fil de platine pour laboratoire. — Recherches de M. Charpy. — La transformation de l'énergie électrique en chaleur, en nous permettant d'aborder les plus hautes températures, nous a dotés de nouvelles méthodes qui ont contribué à étendre considérablement nos connaissances dans le domaine de la chimie; dans le laboratoire,

ces méthodes prennent une place dont nous pouvons constater l'accroissement chaque jour; de nombreux appareils nous permettent en effet d'obtenir une température constante avec la plus grande facilité, que l'on peut faire croître ou diminuer d'ailleurs à volonté par la simple manœuvre d'un rhéostat. M. Charpy (1896) a imaginé un four électrique où la température peut varier entre 200° et 1.300° et qu'il a construit spécialement pour ses recherches sur la trempe de l'acier. « Le résultat à obtenir, dit-il, était d'élever à une température uniforme et pouvant être portée des points les plus bas aux plus élevés, un barreau métallique de 20 centimètres de lon-



gueur et de 2 centimètres de diamètre. L'appareil employé dans ce but se compose d'un tube réfractaire de 60 centimètres de longueur, du modèle de ceux qu'on emploie en chimie. Sur sa surface extérieure sont enroulés deux fils de platine de 0^{mm},5 de diamètre dont les spires sont distantes de 2 millimètres, et qui peuvent être reliés en parallèles à une source d'énergie électrique. Le tube de terre et ces fils sont entourés d'un manchon d'amiante et d'un cylindre métallique de 10 centimètres environ de diamètre, et l'espace compris entre ce dernier tube et le manchon est rempli d'une substance calorifuge.

« Le tube de terre est prolongé par des garnitures métalliques entourées d'un serpentín où circule de l'eau froide, de manière à éviter un échauffement exagéré des extrémités de l'appareil; celles-ci reposent par deux tourillons sur deux traverses métalliques fixées au tube-enveloppe, et une poulie, actionnée par un petit moteur électrique, permet de faire tourner le tube de terre autour de son axe.

« Les fils de platine aboutissent à deux bagues métalliques sur lesquelles frottent deux balais amenant le courant; un rhéostat, intercalé dans le circuit de la source, permet de faire varier l'intensité du courant, et par conséquent la température. Enfin le tube-enveloppe, qui, dans sa position ordinaire, est horizontal, peut tourner autour d'un axe transversal horizontal, de manière à pouvoir être rapidement amené dans une position verticale, et permettre ainsi de faire tomber le barreau métallique dans un récipient froid pour en opérer la trempe. »

Fours électriques à lame de platine. — Il est ainsi très facile d'obtenir dans des tubes des températures atteignant 1.500° environ, en faisant passer le courant électrique dans un fil de platine enroulé en spirale sur ces tubes. Mais les expériences exécutées jusqu'à ce jour, avec des fours électriques de ce genre, ont démontré que, pour des températures supérieures à 1.000°, la spirale de platine est de courte durée, si le

fil employé n'a pas un fort diamètre ; le remplacement du fil occasionne alors une grande dépense supplémentaire et nécessite un courant de plus faible voltage et d'intensité plus grande.

La raison de la mise hors d'usage très rapide des fils minces de platine s'explique par les causes suivantes : 1° Le contact de la spirale avec la surface du corps chauffé n'étant jamais parfait, la transmission de la chaleur est irrégulière et mauvaise et, par suite, la température de la spirale est considéra-

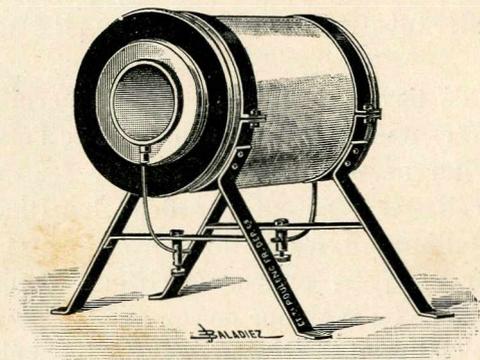


Fig. 9. — Four Heraeus à lame de platine pour laboratoire.

blement plus élevée que celle du corps chauffé : pour avoir une température définie dans le tube, il est nécessaire de transmettre au fil de platine beaucoup plus de chaleur que n'en reçoit le corps chauffé ; 2° si le fil a un mauvais contact en certains points, il se produit en ces points un échauffement qui peut le fondre. On remédie à ces défauts en utilisant, au lieu d'un fil de platine, une lame ou feuille très mince de même métal.

Fours Heraeus. — Plusieurs fours électriques à résistances pour les laboratoires ont été mis en usage récemment. Le professeur Joly, de l'Université de Dublin, et le professeur Howe, de Columbia, aux États-Unis, ont expérimenté des fours utilisant le chauffage par résistances de platine ; mais c'est le professeur Heraeus, de Hanau (Allemagne) qui a obtenu le meilleur



résultat. Les premiers modèles des fours qu'il a construits étaient constitués par des spirales de platine ou des fils de nickel, celui-ci n'ayant été employé que pour des températures ne dépassant pas 1.000° C. ; le cylindre sur lequel était enroulé le fil était protégé contre la perte de chaleur par rayonnement au moyen d'une couche d'asbeste, de quartz pulvérisé ou de toute autre matière non conductrice ; mais ces fours ayant pré-

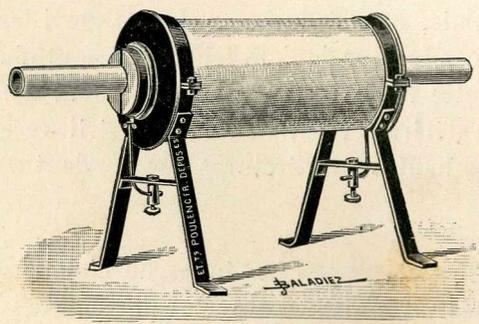


Fig. 10. — Four Heraeus à cylindre central prolongé extérieurement.

senté les inconvénients que nous venons d'énumérer, il a eu recours aux fours à lame métallique résistante. Dans ces fours, dont MM. Poulenc et C^{ie} sont dépositaires, à Paris, la feuille de métal est suffisamment épaisse pour s'adapter fortement contre la surface du corps à chauffer et assez résistante pour se laisser enrouler en spirale en longues bandes autour d'un tube de porcelaine. L'enroulement est fait de telle façon qu'il reste entre chaque spire un intervalle de quelques millimètres seulement ; la surface du corps à chauffer est ainsi presque complètement couverte. Par suite, toute la chaleur produite par le courant électrique est aussitôt transmise au tube, et l'on peut constater, en effet, que, même pour les plus hautes températures, la feuille n'est pas sensiblement plus chaude que l'intérieur du tube de porcelaine.

En laissant de côté le bénéfice acquis du fait que la feuille de platine ne pèse que la sixième partie du poids du fil, l'emploi de ces feuilles présente encore d'autres avantages sur

les systèmes employés jusqu'alors. Parmi ces avantages, M. Poulenc cite la répartition plus régulière de la chaleur sur toute la surface du tube, la possibilité d'atteindre de plus hautes températures et une mise en marche extrêmement rapide. C'est ainsi qu'un four avec tube de 25 millimètres de diamètre peut être chauffé à environ 1.400° en cinq minutes sans que le tube ne subisse aucune dégradation; et on peut passer de cette température à 1.700°, sans que la feuille de platine entre en fusion. Mais, en général, au-dessus de 1.500°, le tube devient bon conducteur de l'électricité : il se produit alors une électrolyse entre le tube et chaque spire de la feuille de platine qui peut détériorer celle-ci. Aussi est-il recommandé de n'aborder ces hautes températures que pendant un temps très court.

Fours horizontaux. — Les tubes de chauffe de ces fours sont fabriqués avec une pâte de porcelaine difficilement

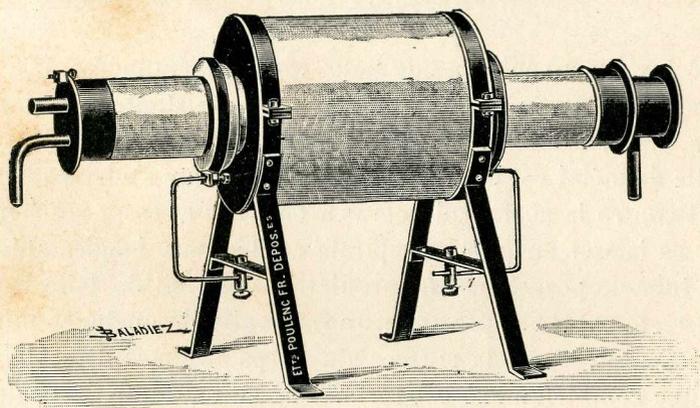


FIG. 11. — Four Heraeus à fermetures latérales.

fusible et généralement émaillée; les tubes non émaillés peuvent supporter des températures plus élevées, l'émail étant plus fusible que la porcelaine, mais ils ne sont pas étanches; on ne peut donc les employer dans les recherches où l'on a besoin d'opérer dans une atmosphère de gaz, que s'ils

sont séparés de cette atmosphère par un second tube émaillé. Il existe un grand nombre de modèles de ces fours qui conviennent au résultat que l'on désire obtenir. La figure 10 représente un four Heraeus dont le tube central se prolonge extérieurement, afin de pouvoir fournir dans le voisinage de ses extrémités une température plus basse que vers le milieu. La figure 9 représente un four du même genre, mais à cylindre central non prolongé extérieurement.

Un modèle particulièrement intéressant est le four avec fermetures latérales (*fig. 11*) ; ces fermetures portent des tubes destinés à l'arrivée et à la sortie du gaz (lorsqu'on doit opérer dans une atmosphère gazeuse), et à l'introduction de l'élément thermique d'un pyromètre ; les prises de courant sont disposées sous l'appareil, comme dans les autres types de four, et sont fixées à deux traverses dont elles sont isolées.

Le tableau suivant donne les différentes caractéristiques de quelques-uns de ces fours, ainsi que la température qu'ils peuvent fournir :

DIAMÈTRE intérieur DU TUBE DE CHAUFFE	LONGUEUR du TUBE DE CHAUFFE	PARTIE recouverte PAR LA SPIRALE DE PLATINE	PUISSANCE absorbée EN WATTS	TEMPÉRATURE OBTENUE
millimètres.	centimètres.	centimètres.	watts.	degrés.
20	60	45	2.200	1.500°
20	60	33	1.600	1.500°
20	44	20	1.200	1.500°
30	60	60	4.000	1.450°
30	40	40	2.800	1.450°
30	20	20	1.800	1.450°
40	60	60	4.200	1.400°
50	60	60	4.500	1.400°
50	30	30	2.300	1.400°
65	30	30	2.800	1.400°

Fours verticaux. — Ce qui vient d'être dit se rapporte spécialement aux fours dans lesquels la chambre de chauffe se compose d'un tube de porcelaine horizontal ; mais leur principe fondamental peut être appliqué à la construction d'autres fours, tels que ceux construits suivant les données du pro-

fesseur Holborn. Ces fours sont verticaux et conviennent particulièrement au chauffage des creusets; de plus, tous les fours sont construits de façon à rendre amovible le tube intérieur de chauffe (*fig. 13*), qui peut ainsi se remplacer facilement en cas d'accident; il est spécialement recommandé d'éviter de mettre les tubes incandescents en contact direct avec des

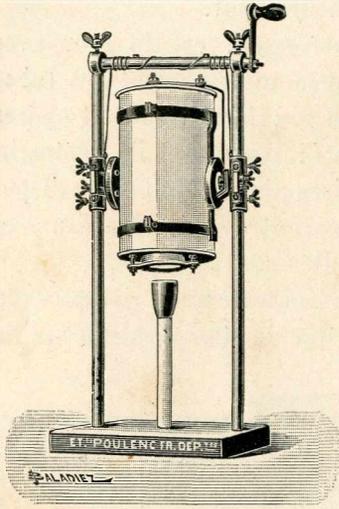


FIG. 12. — Four vertical pour laboratoire.

objets froids. Certains modèles de fours verticaux sont munis d'une armature métallique et glissent le long de deux tiges verticales (*fig. 12*); au moyen d'une manivelle, il est facile de les faire monter ou descendre, ce qui permet de découvrir le creuset qui, lui, est fixe, et de se rendre compte de la marche de l'opération; en outre, ils peuvent être rendus mobiles autour d'un axe horizontal et servir ainsi à la fois comme four vertical et comme four horizontal. Dans tous ces fours, le tube de chauffe est entouré de diverses

enveloppes très mauvaises conductrices de la chaleur, qui s'opposent au rayonnement de celle-ci et permettent de toucher l'extérieur du four avec la main, lorsque le tube est aux températures les plus élevées.

Avantages des fours électriques tubulaires. — En résumé, les avantages de ces fours sont les suivants :

1° Ils peuvent être employés sans réserve jusqu'à 1.500° et même jusqu'à 1.700°, en tenant compte des inconvénients que nous avons signalés précédemment. La température peut être déterminée d'une manière très simple et exacte à l'aide d'un pyromètre thermo-électrique, tel que celui de Le Chatelier;

2° Avec un rhéostat intercalé dans le circuit, il est possible d'obtenir la température que l'on désire ; le réglage se fait ainsi d'une façon simple et précise ;

3° Suivant la forme et les dimensions des fours, la chaleur est si uniformément répartie sur une portion plus ou moins grande du tube que les différences de température n'y sont jamais que de quelques degrés ;

4° On peut remplacer aisément l'air contenu dans ces fours par n'importe quel gaz ; ainsi, par exemple, faire des réactions dans un courant d'oxygène ou d'hydrogène ;

5° Si l'on ne désire pas déterminer exactement la température, il est toujours aisé de la calculer approximativement par le changement de résistance de la spirale de chauffe.

Comme il a été mentionné ci-dessus, la température de la spirale n'est guère différente de celle de l'intérieur du four.

Calcination et analyse des substances organiques à l'aide des fours tubulaires. — La calcination des sucres au moyen du four électrique présente un intérêt tout particulier, car elle nécessite une température bien inférieure à celle des mouffles employés jusqu'ici et dont le chauffage ne se fait que

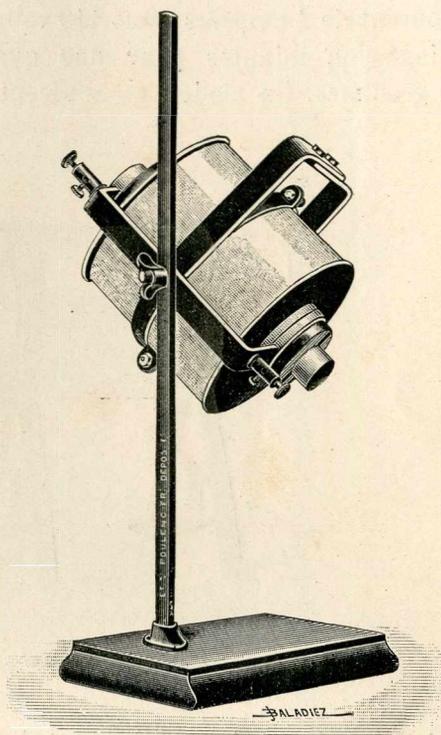


FIG. 13. — Four mobile pour laboratoire.