

*CH. BOILEAU*

---

*LE*

*CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE*

**DUNOD** EDITEUR  
PARIS



*A Monsieur Herriot.*

*gratuito et nuovo*



# LE CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE

PAR

**Ch BOILEAU**

INGÉNIEUR-CONSEIL

LAURÉAT DE L'INSTITUT

ANCIEN DIRECTEUR DE SOCIÉTÉS D'ÉLECTRICITÉ

**PRÉFACE**

de M. HERRIOT

Maire de Lyon - Député du Rhône

Ancien Ministre des Travaux Publics

PARIS

**DUNOD, EDITEUR**

Successesseur de H DUNOD et E PINAT

47 ET 49, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS (VI<sup>E</sup>)

1920

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés pour tous pays.

Copr. by Dunod 1920.



ULTIMHEAT®  
VIRTUAL MUSEUM

## PRÉFACE

---

Les idées que M. Boileau présente au public ne sont pas pour nous entièrement nouvelles. L'auteur en effet a bien voulu nous en réserver la primeur, et il en a exprimé l'essentiel au printemps dernier, dans un rapport présenté au deuxième congrès de l'habitation tenu à Lyon à l'occasion de la Foire.

L'étude que M. Boileau nous a alors communiquée avait pour titre « Une politique du chauffage électrique ». Ce titre résume bien l'idée générale du livre qui paraît aujourd'hui, et que les techniciens et les administrateurs liront, j'en suis certain, avec un vif intérêt.

Ce livre d'abord est une œuvre de science. L'auteur, dont l'attention s'est portée sur le grave problème du chauffage domestique et industriel, a estimé avec raison qu'il importait — avant de dégager l'aspect social de la question — d'en préciser les données techniques. Il a fait là un acte de saine méthode, car c'est par la science que se doivent résoudre les multiples difficultés qui surgissent aujourd'hui dans le domaine de l'urbanisme, comme dans tous les ordres de l'activité humaine. M. Boileau commence donc par rappeler les lois qui régissent la production et la transmission de la chaleur électrique, puis il étudie la théorie de l'accumulation et de la récupération pour servir de base à la thèse qu'il édifie par la suite.

L'auteur passe en revue, dans une deuxième partie de son étude, les appareils actuellement en usage pour le chauffage des habitations et le chauffage industriel. Cette description nous montre que la technique contemporaine a obtenu, dans ce domaine, les plus brillants résultats. Les constructeurs ont mis désormais au point



des appareils qui répondent absolument aux besoins de la clientèle, non seulement aux Etats-Unis et en Suisse, où le chauffage électrique est d'usage courant, mais aussi en France où il constitue encore une dépense somptuaire.

Si nous voulons que le chauffage électrique soit adopté en France et y jouisse de la faveur qu'il mérite, ce n'est point vers la recherche de dispositifs nouveaux que nos ingénieurs doivent orienter leurs efforts. Ils doivent travailler à l'instauration d'une « politique » du chauffage.

De cette politique, M. Boileau établit les principes et de ce point de vue son livre apparaît comme un acte méritoire d'initiative.

L'auteur rompt en effet avec des habitudes traditionnelles ; il dénonce un empirisme funeste et en des termes parfois sévères, mais toujours réfléchis, il fait le procès des méthodes actuelles de production et de distribution de l'énergie électrique.

En effet, les administrateurs de secteurs, devant la hausse effrénée des frais de production et d'exploitation, n'ont eu en général d'autre réaction que l'élévation des tarifs. Il ne se sont point représenté qu'ils pouvaient compenser l'augmentation des frais généraux par une utilisation plus rationnelle de leurs usines. Dans un secteur, la consommation d'énergie électrique est loin d'être constante, elle a ses heures de pointe et ses heures creuses, ces dernières dans la seconde partie de la nuit et entre 12 et 14 heures. Pendant ces heures creuses, dans les usines hydrauliques, l'eau se perd par les déversoirs, et, sur les grilles des usines thermiques, le charbon continue de brûler. Il en résulte une perte d'énergie qui réduit sensiblement le coefficient d'utilisation de l'usine génératrice. D'une façon générale, pendant les heures creuses, la moitié au moins du matériel d'une usine électrique reste inutilisée.

De cette observation, M. Boileau tire une conclusion simple et logique : au lieu de laisser leur matériel inactif, et de brûler du combustible sans profit, les secteurs doivent profiter des heures creuses pour produire du courant qu'ils livreront à prix réduit. La diminution du prix de vente du K.W.H. est la condition indispensable à l'utilisation du chauffage électrique. Si la ville de Buffalo, par exemple, emploie presque exclusivement ce mode de chauffage, c'est que le K.W.H. n'y est vendu que 8 centimes.

Le courant, fourni à prix réduit pendant certaines heures du jour et la seconde moitié de la nuit, servira donc à l'alimentation du chauffage. Pour cela, il sera accumulé par des appareils spéciaux d'un usage courant en Norvège, en Suisse ou aux Etats-Unis, et qui le restitueront au fur et à mesure des besoins.

Après avoir présenté sa solution du problème du chauffage, l'auteur expose les difficultés qui jusqu'à présent s'opposent à son adoption. C'est du reste le sort commun à tous les novateurs que de se heurter à l'inertie de la tradition ou à l'étroitesse des intérêts immédiats. M. Boileau démontre que si les administrateurs des sociétés de distribution restent indifférents à un projet dont la valeur sociale est indiscutable, c'est qu'ils n'ont pas intérêt à l'adopter.

Aussi fait-il appel aux pouvoirs publics et demande-t-il l'adoption du système de la régie municipale. A son avis l'Administration municipale pourra seule prendre conscience de l'intérêt supérieur de la communauté et rompre avec des habitudes d'exploitation qui ne répondent plus aux nécessités sociales.

Telle est la thèse que M. Boileau défend avec une ardeur qui ne lui fait cependant pas oublier la rigueur et la précision qu'exige une démonstration scientifique. Si nous ne pouvons nous associer à toutes les critiques formulées par l'auteur, nous tenons cependant à rendre hommage à l'effort qu'il a tenté pour éviter un gaspillage d'énergie, c'est-à-dire de richesse. A l'époque où la crise du combustible complique la vie économique de tous les pays, c'est faire œuvre utile que de chercher à y porter remède.

Quant à la conclusion formulée par M. Boileau : dénonciation du régime actuel de distribution électrique et adoption de la régie municipale, je ne doute pas qu'elle ne provoque des ironies faciles, car il est de tradition de dénier aux Pouvoirs publics la capacité d'administrer commercialement une entreprise. Cependant, les municipalités suisses ont, pour la plupart, adopté l'administration en régie de la distribution d'énergie électrique et le système fonctionne à la satisfaction du consommateur. Qu'il nous soit également permis de rappeler que, dans notre cité, l'administration en régie du service des Eaux a amené, avec une amélioration indiscutable

de l'état sanitaire, une augmentation sensible des recettes du budget municipal.

Au demeurant, le livre de M. Boileau comporte des enseignements féconds. Il ouvre la voie aux réalisations et témoigne d'une louable confiance en la vertu de l'Effort. Ce nous est un agréable devoir que de féliciter son auteur, et de le remercier d'être venu exposer ses idées dans notre ville, qui fut toujours amie des initiatives, et qui a parfois donné l'exemple de l'audace.

Edouard HERRIOT.

Maire de Lyon, Député du Rhône,

Octobre 1920.

# LE CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE

---

## PREMIÈRE PARTIE

### Théorie du Chauffage électrique

---

#### CHAPITRE PREMIER

#### Production et Transmission de la Chaleur

Nous rappellerons très brièvement les notions de Chaleur et d'Électricité indispensables pour l'étude du chauffage électrique.

**Unités de mesure.** — Le principe de l'équivalence de la chaleur et de l'énergie mécanique a été vérifié expérimentalement maintes fois ; et nous aurons constamment à passer de l'un à l'autre des systèmes d'unités de mesure.

Si d'une part on appelle Calorie la quantité de chaleur nécessaire pour élever de un degré centigrade un kilogramme d'eau distillée, soit de 15° à 16°, et de l'autre : Kilogrammètre, la quantité d'énergie ou de travail produite par une force de 1 kilogramme dont le point d'application se déplace de 1 mètre dans le sens de la direction de la force, on trouve que :

1 calorie équivaut à 425 kilogrammètres.

Le kilogrammètre est l'unité de travail employée dans le système métrique (kilogramme, mètre, seconde).

Il existe un autre système de mesures des forces, travaux et autres quantités qui en découlent. C'est le système C. G. S. où les trois grandeurs fondamentales sont : le centimètre, le gramme-masse, la seconde. Dans ce système, l'unité de force est la Dyne ; c'est celle qui, agissant sur une masse de 1 gramme, lui imprime une accélération de 1 centimètre *par seconde, par seconde*.

A Paris, 1 gramme force vaut 981 dynes.

Il s'ensuit que 1 calorie équivaut à :

$425 \times 1.000 \times 981 \times 100 = 4.170.10^7$  unités. C. G. S. de travail ou Ergs.



L'unité pratique C. G. S. de travail étant le Joule qui vaut  $10^7$  ergs, 1 calorie équivaut donc à 4.170 joules.

Les unités électriques, d'autre part, sont liées aux unités mécaniques ou physiques ci-dessus par la relation qui définit l'unité d'intensité de courant électrique en fonction d'une longueur, d'une masse et d'un temps : un courant d'intensité égale à 1 unité électromagnétique est celui qui, traversant un circuit de 1 centimètre de longueur, roulé en forme d'arc de cercle de 1 centimètre de rayon, exerce une force de 1 dyne sur un pôle magnétique de 1 unité placé en son centre.

Le pôle magnétique dont il est question est d'ailleurs défini lui-même par la relation fondamentale du magnétisme :

$$f = K \frac{m \cdot m'}{r^2}$$

dans laquelle  $K = 1$  en système C. G. S. ;  $f$  est la force qui repousse les 2 masses de même signe  $m$  et  $m'$ , évaluée en dynes ;  $m$  et  $m'$  sont les 2 masses et  $r$  la distance qui les sépare, évaluée en centimètres.

L'unité pratique d'intensité de courant, ou Ampère international, vaut 0,1 unité électromagnétique telle que définie plus haut. L'unité pratique de résistance ou Ohm est définie par la résistance qu'une certaine colonne de mercure oppose au passage du courant.

Et l'unité de force électromotrice ou de différence de potentiel, appelée Volt, est celle qui, appliquée aux bornes d'un circuit présentant une résistance de 1 ohm, y laisse passer un courant de 1 ampère.

Or, les dimensions de la colonne de mercure ci-dessus ont été prises telles que le travail produit en 1 seconde par le passage du courant de 1 ampère soit précisément égal à 1 joule. On voit comment s'enchaînent les trois sortes d'unités caloriques, mécaniques, électriques dont nous aurons à nous servir.

L'unité de puissance en découle de suite : Elle équivaut à 1 joule par seconde. On l'appelle le Watt. Ses multiples les plus usités sont l'Hectowatt et le Kilowatt qui valent respectivement 100 et 1.000 watts.

Réciproquement l'énergie ou travail produit au cours d'une Heure — pour considérer l'unité de temps habituellement usitée dans la pratique — par cette puissance de 1 watt, s'appellera 1 Watt-Heure.

De même une puissance constante de 1 kilowatt (1 K.W) donne lieu, au cours d'une heure, à la production de 1 kilowatt-heure (1 KWH.) ou  $3.600 \times 1.000 = 3.600.000$  joules.

$$1 \text{ K.W.H} \text{ vaut donc } \frac{3.600.000}{4170} = 863 \text{ calories}$$

$$\text{et 1 joule vaut : } \frac{863}{3.600.000} = 0,00024 \text{ calorie.}$$

**Production de la Chaleur.** — Quatre effets peuvent être utilisés :

1° L'effet Joule dont la loi se représente par la formule :

$$q = 0,00024 i^2 \cdot r \cdot t = 0,00024 \frac{v^2}{r} t$$

où  $q$  est la quantité de chaleur développée en  $t$  secondes par un courant de  $i$  ampères, parcourant une résistance de  $r$  ohms,  $v$  étant la différence de potentiel appliquée.

2° L'arc voltaïque, dont la haute température ne se prête aisément d'ailleurs qu'aux emplois industriels, à l'exclusion des emplois domestiques.

*Nota.* — Ces deux effets sont aussi bien utilisables sur courant alternatif que sur courant continu.

3° Les courants de Foucault, induits dans les masses magnétiques par la variation des flux qui les traversent. Leur formule est la suivante :

$$\frac{P}{V} = \frac{\pi^2}{T^2} \cdot B_{max}^2 \frac{a^2 b^2}{8 \cdot (a^2 + b^2)} \cdot \frac{1}{417 \cdot 10^7} \text{ calories par seconde et par cm}^3.$$

Dans cette relation,  $a \times b$  est la section supposée rectangulaire par laquelle pénètre le flux  $B \times a \times b$ , lequel varie avec une fréquence  $\frac{1}{T}$   $B_{max}$  étant l'induction maxima en gauss, et  $\rho$  la résistivité en unités C. G. S. Pratiquement, les courants de Foucault ne se répartissent pas dans toute la section, mais sont localisés à la périphérie de la masse, dès que l'épaisseur de celle-ci dépasse  $1 \frac{m}{m}$  environ.

4° L'Hystérésis dont la formule est :

$$\frac{P}{V} = \gamma \cdot B_{max}^{1,6} \frac{1}{417 \cdot 10^7} \text{ calories par cm}^3 \text{ et par cycle.}$$

$N$  étant le coefficient caractéristique de chaque métal (coefficient de Steinmetz).

Ces deux derniers ne sont naturellement utilisables que sur courant alternatif, ou tout au moins ondulé.

En réalité, pour les applications au chauffage électrique dont nous aurons à nous occuper, c'est le premier effet ou effet Joule, qui est généralement employé. Il présente l'avantage d'être produit aussi bien sous courant continu que sous courant alternatif, et de plus, utilise pour le mieux les machines génératrices et réseaux de transport et de distribution dont le facteur de puissance est alors sensiblement égal à 1. Tandis que l'emploi de ces deux derniers procédés donne lieu à un déphasage du courant par rapport à la tension, qui peut être très important. Nous n'en dirons donc que quelques mots par la suite, au sujet



de la production de la chaleur par induction et ne développerons que les procédés basés sur l'effet Joule et accessoirement l'arc électrique.

**Calcul de la résistance d'un circuit.** — En général la tension appliquée aux bornes des appareils est définie d'avance, c'est celle du Secteur de Distribution. La résistance  $R$  à donner au circuit résistif d'après la formule  $I = \frac{V}{R}$  est d'autre part égale à  $\frac{\rho l}{s}$ ,  $\rho$  étant la résistivité par unité de longueur,  $l$  la longueur et  $s$  la section.

Ci-dessous tableau des résistivités à 0° de quelques métaux et alliages particulièrement utilisés en chauffage électrique, en microhms-centimètres.

Fer .....	9	Manganine.....	46,7
Cu-Ni-Al.....	14,9	Rhéostatine A.....	48
Platine rhodié .....	21,14	Constantan .....	50
Acier au Ni (4,3 %).....	29,45	Acier au Mn. 12 %.....	67,1
Maillechort .....	29,98	Rhéostatine B.....	86
Platine iridié .....	30,89	Chrome-nickel.....	110
Platinoïde.....	41,7	Nikron .....	121
Carborundum.. Variable. Moyenne 10.000.			

En divisant par 100 les valeurs ci-dessus, on obtient la résistance de 1 mètre de fil, pour un millimètre carré de section.

Les résistivités aux autres températures s'obtiennent par la formule :

$$\rho_t = \rho_0 (1 + Kt + K't^2 + \dots)$$

( $K + K't + \dots$ ) étant un coefficient appelé coefficient de température du corps.

Ci-dessous valeurs moyennes de  $K$  pour les métaux et alliages considérés :

Fer .....	+ 0,0063	Manganine.....	+ 0
Cu-Ni-Al.....	+ 0,000645	Rhéostatine A .....	+ 0,000011
Pl-Rh.....	+ 0,00143	Constantan.....	+ 0
Acier Ni.....	+ 0,00209	Acier Mn .....	+ 0,00127
Maillechort .....	+ 0,000273	Rhéostatine B.....	+ 0,0007
Pl. Ir.....	+ 0,00082	Chrome-nickel.....	+ 0,00025
Platinoï de.....	+ 0,0003	Nikron.....	+ 0,000124
Carborundum + 0,00025			

Tous les coefficients de température ci-dessus sont positifs, la résistance de ces corps augmente donc avec la température.

Pour d'autres corps au contraire, il est négatif. C'est le cas par exemple pour les charbons et filaments de lampes, dont la résistivité

à 0° varie entre 4 et 8.000 microhms/cm., suivant leur composition chimique et dont le coefficient de température est égal à : — 0,0004 + 0,00000006 *t*, ainsi que pour les agglomérés de carborundum.

C'est le cas également pour l'eau et les solutions aqueuses. Nous y reviendrons en détail au chapitre II.

On voit que, pour la plupart des alliages examinés, le coefficient ne dépasse pas quelques dix-millièmes. Pour le nikron, une élévation de température même de 1.000° qui est souvent utilisée, fait passer sa résistivité de 121 à 137 à peu près. La différence est peu importante. Tandis que pour un fil de fer porté de 0° à 158°, la résistance croît du simple au double. En effet,  $2 = (1 + 158 \times 0,0063)$ . A 316° sa résistance est triple de ce qu'elle était à 0°, le courant de démarrage sera donc dans ce dernier cas le triple du courant normal.

Pour le constantan, le coefficient est pratiquement nul, c'est de là que vient son nom.

Avec les formules et tables données ci-dessus le calcul des résistances de chauffage est élémentaire. On peut avoir cependant à calculer des combinaisons permettant de graduer la chaleur développée par un même appareil. Par exemple une plaque de 1.000 watts sous 110 volts comportera un enroulement dont la résistance combinée minima vaudra  $\frac{110^2}{1.000} = 12,1 \ \Omega$ . On peut constituer l'enroulement de plusieurs tronçons disposés en série, soit en parallèle, soit en série parallèle.

Supposons 4 réglages, ce qui est pratiquement un maximum, à obtenir dans les rapports  $\frac{1}{1}$ ,  $\frac{2}{3}$ ,  $\frac{1}{3}$  et  $\frac{1}{4}$ .

On pourra n'utiliser que 2 éléments *a* et *b* dont l'extrémité commune sera amenée aux bornes. Avec *a* et *b* en parallèle on obtiendra le maximum, avec *a* seul on aura le réglage  $\frac{2}{3}$  et avec *b* seul  $\frac{1}{3}$ . Il est facile de vérifier que les résistances *a* et *b* valent respectivement 18,13 et 36,3  $\Omega$ , et que *a* et *b* en série ne donnent que 222 watts au lieu des 250 demandés.

Si l'on veut rigoureusement obtenir le réglage au  $\frac{1}{4}$ , 3 éléments même ne suffisent pas, bien qu'on puisse réaliser avec eux jusqu'à 14 combinaisons en amenant les 6 extrémités aux bornes.

Il faut de plus noter que dans ce cas la température du fil résistant ne sera pas la même dans chaque tronçon et pour tous les degrés de réglage. Cette combinaison est donc inapplicable pour des grils par exemple où la température du fil mis sous tension doit rester la même, quelle que soit la longueur de fil, c'est-à-dire la surface radiante exigée par les dimensions de la pièce à griller.

Dans ce cas, il faut constituer le réseau résistant d'éléments fonc-



tionnant chacun sous le voltage total et dont on pourra mettre le nombre voulu en parallèle.

Soit à calculer les résistances du même appareil que ci-dessus, soit 1.000 watts sous 110 volts au maximum, avec réglages à  $\frac{2}{3}$ , à  $\frac{1}{3}$  et à  $\frac{1}{4}$ .

En appelant  $g_1, g_2, g_3, g_4$ , la conductance de chacun des 4 éléments, on aura :

$$\begin{aligned}g_1 + g_2 + g_3 + g_4 &= m \\g_2 + g_3 + g_4 &= 0,666 m \\g_3 + g_4 &= 0,333 m \\g_4 &= 0,250 m.\end{aligned}$$

On en tire :

$$\begin{aligned}r_4 &= 4/m \\r_3 &= 12/m \\r_2 &= 3/m \\r_1 &= 3/m\end{aligned}$$

et comme

$$r_4 = \frac{110^2}{250} = 48,4 \omega$$

on en déduit :

$$\begin{aligned}r_3 &= 145,3 \omega \\r_2 &= 36,3 \omega \\r_1 &= 36,3 \omega\end{aligned}$$

La formule  $R = \frac{\rho l}{s}$  montre, d'autre part, que pour une résistance donnée et une substance de résistivité donnée, le rapport  $\frac{l}{s}$  reste constant ; le volume et par suite les poids et prix varient donc comme la puissance 4 du diamètre et le carré de la longueur.

La variable est alors la température. Le calcul des dimensions ou plus simplement de l'une d'elles, l'autre en découlant de suite, est donc basé sur la température que doit ou peut atteindre le conducteur en régime permanent, lorsque la quantité de chaleur  $0,00024 i^2 r$  produite par seconde est entièrement transmise à l'air et aux corps voisins. Il faut donc connaître les lois de la transmission de la chaleur.

**Transmission de la chaleur.** — Cette transmission s'opère par les 3 modes de : conduction, radiation et convection.

*Conduction.* — On entend par conduction, ou propagation de la chaleur à travers un corps, le phénomène que présente ce corps lorsqu'une partie de sa surface est à une température différente de l'autre. Il s'écoule alors de la surface chaude à la surface froide, une certaine quantité de chaleur par unité de temps.

Pour une lame d'épaisseur constante  $l$  dont les 2 faces sont en contact avec des milieux de températures  $t_1$  et  $t_2$ , la formule de Newton donne le nombre de calories  $Q$  qui s'écoule pendant le temps  $T$ , la section transversale étant  $S$

$$Q = K S \frac{t_1 - t_2}{l} T$$

$K$  est le coefficient caractéristique du corps.

Cette formule suppose que les surfaces de contact ont la même température que les milieux ambiants. Mais il en est rarement ainsi, surtout quand les milieux ambiants sont des fluides sans vitesse sensible. Par contre, lorsque la vitesse des fluides est très grande, la quantité de chaleur transmise par unité de temps à travers le même corps peut devenir beaucoup plus grande, puisque chaque molécule, dès qu'elle a cédé sa chaleur ou qu'elle en a absorbé, laisse la place à une autre. (Chauffage par circulation d'eau chaude ou de vapeur dans des tuyaux.)

En matière de chauffage électrique par résistances, la transmission de la chaleur par conduction se présente dans le cas où ces résistances sont contenues dans une enveloppe plongée dans la masse à échauffer, l'enveloppe étant un isolant électrique ou contenant un isolant électrique support de la résistance. Exemple : résistance métallique enrobée dans le quartz fondu ou la terre cuite, — cylindre métallique contenant une résistance montée sur isolant et plongé dans une masse sans mouvement, feuille de mica séparant une résistance d'une plaque.

La transmission se fait également par conduction à travers les supports isolateurs électriques des résistances, qui doivent donc être des isolants aussi parfaits que possible pour la chaleur, à moins qu'on ait intérêt, comme nous le verrons, à leur laisser absorber une certaine quantité de chaleur qu'ils restitueront ultérieurement.

Ci-dessous, tableau des coefficients pour les matériaux les plus usités en chauffage électrique :

Aluminium .....	130	Amiante.....	0,01
Bronze .....	95	Quartz fondu.....	0,2
Cuivre rouge .....	320	Sable sec.....	0,27
Fer .....	45 à 60	Marbre sec.....	2,8
Laiton .....	95	Terre cuite .....	0,6
Air .....	0,001	Ciment .....	0,6
Mica .....	1,6	Liège .....	0,14
Plâtre .....	0,33	Eau ordinaire .....	0,5
Verre .....	0,7	Cendres de bois .....	0,06
Carbone .....	4,9		



(d'après la Hütte, certaines des valeurs ci-dessus sont beaucoup trop fortes, car elles négligent la transmission par radiation et convection. C'est le cas surtout pour le cuivre rouge et le fer dont le coefficient de conduction proprement dit serait respectivement de 90 et de 28).

Pour un corps composé de plusieurs couches d'épaisseurs  $l'$ ,  $c''$ ,  $c'''$ ... et de coefficients  $K'$ ,  $K''$ ,  $K'''$ ... le coefficient de l'ensemble =

$$K = \frac{1}{\frac{l'}{K'} + \frac{c''}{K''} + \frac{c'''}{K'''}}$$

Constatons rapidement qu'un des meilleurs isolants est l'air immobile. Mais cet air, même immobile, n'empêche pas la chaleur de se transmettre de la surface chaude à l'écran entre lesquels il est interposé par le mode de transmission dit « radiation ».

*Radiation.* — Tout corps chaud émet des rayons caloriques dont la présence n'est révélée que par l'élévation de température d'un écran interposé. Cet écran absorbe ainsi une certaine quantité de chaleur irradiée par le corps, d'autant plus grande que le pouvoir absorbant de la matière de l'écran est plus grand.

Disons de suite que le pouvoir radiant d'un corps est précisément égal au pouvoir absorbant qu'il possède lorsqu'il fonctionne lui-même comme écran.

Les lois du rayonnement utiles à connaître sont les suivantes :

Loi du rayonnement du corps noir, de Stephan-Boltzmann

$$W = K S T^4$$

$W$  étant la puissance rayonnée en watts,  $S$  la surface radiante en  $\text{cm}^2$ ,  $T$  la température absolue du corps noir et  $K$  un coefficient dont la valeur est d'environ  $6.10^{-12}$ .

Le noir de fumée lui-même ne s'approche que très grossièrement du corps noir théorique radiateur intégral. Pour les corps gris, la puissance émise dans les mêmes conditions de surface et de température, est plus petite. L'exposant de  $T$  est supérieur à 4. Il est de 4,6 pour le platine, et de 6 pour le tungstène mais  $K$  ne vaut que  $3.10^{-14}$ .

Pour les corps colorés qui composent l'immense majorité des substances employées en chauffage par incandescence, le coefficient  $K$  et l'exposant de  $T$  varient eux-mêmes avec  $T$ .

L'énergie est irradiée sous les deux formes : calorique et lumineuse. A chaque température correspond une longueur d'onde pour laquelle l'énergie est maxima. C'est la somme de toutes les quantités d'énergie fournies par toutes les longueurs d'onde, depuis l'infra-rouge jusqu'à l'ultra-violet, à la température  $T$  du corps, qui est donnée par les lois

de Stefan et de Wien. Nous ne nous arrêterons pas sur les procédés par lesquels les physiciens peuvent mesurer séparément la quantité d'énergie fournie par chaque longueur d'onde, mais il est essentiel de se rappeler leurs conclusions, à savoir que : avec les températures maxima actuellement atteintes et pour les corps connus, ce sont les longueurs d'onde de l'infra-rouge du spectre qui fournissent la presque totalité de l'énergie irradiée.

L'énergie lumineuse dissipée par incandescence est donc une véritable quintessence d'énergie. Pour fixer les idées, nous donnerons ci-dessous les valeurs du rendement lumineux technique de quelques sources incandescentes, c'est-à-dire le rapport  $R$  de la puissance lumineuse rayonnée à la puissance totale consommée, ainsi que du pouvoir rayonnant  $r$ , c'est-à-dire rapport de l'énergie totale rayonnée à cette même énergie totale consommée.

	R en %	$r$ en %
Flamme de gaz.....	0,036	
Lampe à filament de charbon.....	0,42	62
Bec auer.....	0,19	
Lampe monowatt.....	1,30	72
Lampe $\frac{1}{2}$ watt.....	2,58	

L'énergie rayonnée totale représente donc environ les deux tiers de l'énergie consommée, sur lesquels 1 à 2 % au plus sont de l'énergie lumineuse. Tout le reste est dissipé sous forme de chaleur.

Ce résultat est important à retenir, car il nous montre que l'incandescence est un moyen presque parfait d'engendrer la chaleur, mais par contre, un véritable pis-aller en matière d'éclairage. Les perfectionnements en matière de chauffage ne pourront donc guère porter que sur des questions de détail, tandis qu'il reste à peu près tout à inventer en matière d'éclairage.

Commercialement, cette remarque a son importance, car de nombreux clients, frappés des formidables progrès relatifs des lampes électriques (700 % d'augmentation de rendement en passant de la lampe carbone à la lampe  $\frac{1}{2}$  watt) s'imaginent que les mêmes progrès sont à espérer en matière de chauffage et attendent l'invention nouvelle pour se décider. La pratique m'a prouvé que cette petite digression n'était pas inutile. Revenons maintenant aux lois du rayonnement.

Sous la forme ci-dessus, la loi du rayonnement n'est pas pratique, les exposants et coefficients qui y figurent n'étant pas suffisamment bien déterminés pour les corps usuels.



On emploie donc la loi de Dulong et Petit :

$$R = 124,72 \text{ S K } a^t (a^{6-t} - 1)$$

R étant la quantité de chaleur, émise par heure, S la surface du corps en m<sup>2</sup>, <sup>6</sup> sa température, t celle de l'enceinte, et a un coefficient égal à 1,0077. Quant à K c'est le coefficient de radiation spécial à chaque corps, dépendant de l'état de la surface, mais non de sa forme ni de son orientation.

Ci-dessous quelques-unes de ses valeurs :

Huile .....	7,24	Tôle polie.....	0,45
Eau .....	5,31	Laiton poli .....	0,24
Peinture à l'huile .....	3,71	Zinc .....	0,24
Fonte .....	3,36	Cuivre rouge .....	0,16
Tôle ordinaire .....	2,77	Argent poli.....	0,13

Les corps qui irradient ou absorbent le mieux la chaleur sont donc les corps noirs et non polis. Inversement les corps polis ou blanchis irradient mal la chaleur et l'absorbent également mal. Les rayons caloriques étant susceptibles de réflexion comme les rayons lumineux, les surfaces réfléchissantes devront donc être en métaux polis, cuivre rouge de préférence.

*Convection.* — La convection se produit toutes les fois que la surface du corps chaud est en contact avec un fluide, air, gaz, vapeur, liquide qui s'échauffe et par suite se déplace le long de cette paroi.

Comme cette surface irradie en même temps de la chaleur, on conçoit qu'il soit difficile de séparer exactement ce qui est dû à l'un et à l'autre mode de transmission.

Dulong et Petit en ont donné la formule suivante :

$$C = 0,552 \text{ S. K } (t-t')^{1,233}$$

C étant le nombre de calories par heure, S la surface en m<sup>2</sup> et t les températures du corps et du fluide, et K un coefficient qui dépend, non pas de la nature du corps, mais de sa forme et de son orientation.

Par exemple, pour un corps sphérique :  $K = 1,778 + \frac{0,13}{r}$

Pour un cylindre circulaire horizontal :  $K = 2,058 + \frac{0,0382}{r}$

Pour un cylindre circulaire vertical K : =

$$\left( 0,726 + \frac{0,0345}{\sqrt{r}} \right) \left( 2,43 + \frac{0,8758}{\sqrt{h}} \right)$$

Pour un plan vertical de largeur indéfinie :  $K = 1,764 + \frac{0,636}{\sqrt{h}}$

La convection est de plus proportionnelle à la racine carrée de la vitesse pour l'air et les liquides chauffés à basse température. Mais dans les générateurs de vapeur, l'influence de la circulation est plus grande et la convection est sensiblement proportionnelle à la vitesse du liquide.

Avec ces formules et les tables détaillées donnant les coefficients propres à chaque métal, ou en général à chaque matière utilisée pour la production et la transmission de la chaleur, on a tout ce qu'il faut pour calculer exactement la quantité de chaleur transmise par unité de temps de la résistance électrique à la matière à échauffer à travers un milieu complexe dont on connaît les dimensions. Les Traités de Physique industrielle donnent tous renseignements utiles à cet égard.

**Fils minces et rubans.** — D'après les unités adoptées pour l'application des formules de Pécelet, Dulong et Petit, on suppose bien qu'elles ne seront applicables qu'à des corps présentant une certaine étendue, comme enveloppes de radiateurs, supports ou enveloppes de fils résistants, etc... Pour les fils de faible diamètre généralement utilisés pour le chauffage électrique, ces formules donnent des résultats inexacts.

Ainsi, on sait par expérience qu'un fil de fer horizontal de 5 millimètres de diamètre, est porté à 195° centigrades dans une atmosphère à 15°, par le passage d'un courant de 120 ampères. Sa résistance par mètre est alors de 0,01045 ohms.

La puissance développée par mètre courant est égale à :

$120^2 \times 0,01045 = 151$  watts, ce qui donne un taux de 1 watt par centimètre carré.

Cette puissance correspond à  $0,00024 \times 151 = 0,0361$  calories par seconde et 130 calories par heure.

Si l'on applique les formules de Dulong et Petit, la chaleur dissipée par radiation serait égale à :

$$124,72 \times 0,01570 \times 3,3 \times [1,0077^{195} - 1,0077^{15}] = 21,5 \text{ calories}$$

Celle dissipée par convection serait :

$$0,552 \times 0,0157 \times 17,33 \times 180^{1,233} = 90 \text{ calories}$$

Total 111,5 calories au lieu de 130.

Il est donc préférable de se baser sur les constantes des fils de substances diverses publiées par certains laboratoires ou maisons de construction, qui donnent pour chaque section de fil placé dans telles conditions l'ampérage correspondant à une température donnée.

Il suffit d'ailleurs d'avoir un ou deux points de repère, si l'on n'a ni tables ni graphiques, pour pouvoir passer facilement d'un fil à l'autre au moyen de quelques formules approximatives dont ci-dessous les plus utiles :



1° 2 filaments de substance différente (résistivités  $\rho$  et  $\rho'$ ), destinés à supporter le même ampérage, avec la même température doivent avoir des diamètres  $d$  et  $d'$  tels que

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

En effet par unité de longueur on a :

$$\frac{4 \rho}{\pi d^2} i^2 = K \pi d \theta$$

et

$$\frac{4 \rho'}{\pi d'^2} i'^2 = K \pi d' \theta.$$

$\theta$  étant l'excès de température sur la température ambiante.

2° La densité de courant, correspondante à une température donnée pour un fil de substance donnée, étant connue, la valeur du diamètre d'un fil de même substance pour obtenir la même température avec un courant  $I$  se calcule comme suit :

La résistance par unité de longueur est proportionnelle à  $\frac{1}{d^2}$ . La chaleur dissipée par unité de longueur est proportionnelle à  $I^2 r$  et par suite à  $\frac{I^2}{d^2}$ . La surface de refroidissement est proportionnelle à  $d$ , donc :

$$I^2 = K_1 d^3$$

ou :

$$I = K_1 d^{3/2},$$

$K_1$  étant la valeur du courant pour un diamètre égal à 1, à cette température. En réalité, la surface de refroidissement doit être corrigée en tenant compte de la transmission de la chaleur du centre à la périphérie. L'exposant 3/2 est donc à diminuer légèrement, de 0 à 12 % suivant grosseur du fil, et en raison inverse de sa température.

3° D'autre part  $R$  étant la résistance totale du fil, on a :

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

$R$  est donc proportionnelle à  $\frac{l}{d^2}$ .

$$\text{Or, } V = I R \text{ et } I = K_1 d^{3/2}.$$

Donc :

$$\frac{l d^{3/2}}{d^2} = C^{\text{te}}$$

d'où :

$$l = K_2 d^{1/2}.$$

$K_2$  étant la longueur nécessaire de fil de la même substance, d'un diamètre égal à 1, dans les mêmes conditions de service.



*Exemple* : On sait qu'un fil de fer de diamètre égal à 1 mm, suspendu horizontalement dans l'air à température normale, laisse passer 10,2 ampères, sous une tension de 2,82 volts par mètre courant, la température du fil étant 195°. On a donc pour cette température :  $I = 10,2 d^{3/2}$ , et par volt appliqué :

$$l = \frac{1}{2,82} d^{1/2}.$$

La longueur pour un millimètre de diamètre est donc de 0 m. 355 par volt. Une puissance de 1 KW. sous 110 volts avec  $\theta = 195^\circ$  exige  $\frac{1000}{110} = 9,1$  ampères, d'où :

$$9,1 = 10,2 d^{3/2}, d = 0 \text{ mm. } 93^{\frac{1}{2}} \text{ et}$$

$$l = 110 \times 0,355 \times 0,93^{1/2} = 38 \text{ mètres.}$$

*Autre exemple* : Pour le chrome-nickel, les valeurs de  $K_1$  sont :

$t = 100^\circ$	$200^\circ$	$300^\circ$	$400^\circ$	$500^\circ$	$600^\circ$	$700^\circ$	$800^\circ$	$900^\circ$
$i = 3,1$	4,32	5,61	7,15	8,76	10,35	12,43	14,76	17,42

Donc pour un fil de 3 mm. à 900° le courant devra être :

$$3^{3/2} \times 17,42 = 90 \text{ ampères.}$$

En réalité, nous l'avons vu, l'exposant  $3/2$  est un peu trop fort, l'ampérage pratique est de 80 ampères au lieu de 90.

Ces formules, si l'on ne dispose pas des tables relatives au métal employé, permettent par exemple de calculer les éléments du circuit résistant de chacun des deux appareils de 1.000 watts dont nous avons commencé le calcul ci-dessus.

Particulièrement en ce qui concerne le second, à température constante, elles permettront de trouver la longueur et le diamètre de chacun des fils à employer. Si l'on adopte 600° environ, la valeur de  $K$  sera de 10 pour le chrome-nickel. On a alors :

$$I_1 = \frac{110}{36,3} = 3,03$$

$$I_2 = \frac{110}{36,3} = 3,03$$

$$I_3 = \frac{110}{145,3} = 0,754$$

$$I_4 = \frac{110}{48,4} = 2,281$$

Total ..... 9,09 ampères à pleine charge.

On a alors :

$$x_1^{3/2} \times 10 = 3,03$$

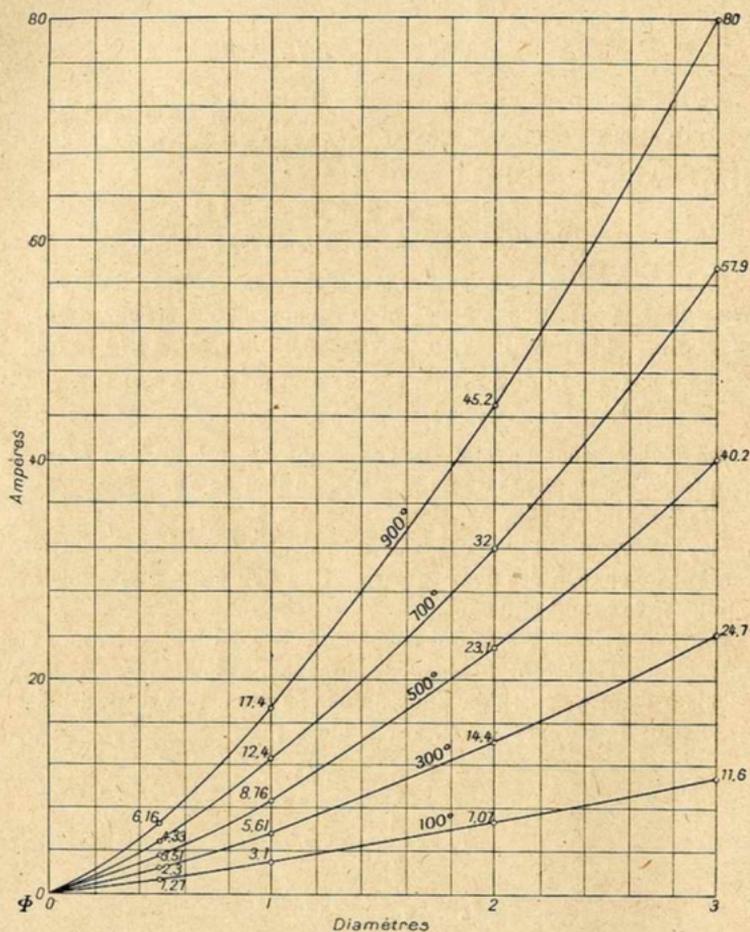
$$x_2^{3/2} \times 10 = 0,754$$

$$x_4^{3/2} \times 10 = 2,281.$$

THÉORIE DU CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE

Les diamètres et les longueurs des 4 tronçons de fil seront alors :

$$\begin{aligned} x_1 = x_2 = 0 \text{ mm, } 45 & & l_1 = l_2 = 4,44 \text{ m.} \\ x_3 = 0,18 & & l_3 = 2,82 \\ x_4 = 0,37 & & l_4 = 4,04. \end{aligned}$$





naire à ce moment, il est difficile et même ridicule de la demander à un gril à feu visible. On se contentera donc dans ce cas de 3 réglages : soit  $\frac{1}{11}$ ,  $\frac{2}{3}$ ,  $\frac{1}{3}$  obtenus au moyen de 3 éléments identiques de diamètre égal pratiquement à 0,5 millimètre et de longueur égale à 440 centimètres ; soit  $\frac{1}{11}$ ,  $\frac{2}{3}$ ,  $\frac{1}{4}$  obtenus avec les diamètres de 0,5-0,55 et 0,4 et les longueurs correspondantes : 4,4 ; 4,7 et 4 mètres.

Le chrome-nickel étant très employé dans la construction des résistances métalliques, nous résumons dans le graphique ci-dessous ses caractéristiques sous diverses températures (Fig. 1).

4° L'émission par convection est sensiblement proportionnelle à la puissance  $3/2$  de la température absolue du fil, tandis que l'émission par radiation est sensiblement proportionnelle à la puissance 4,7 de cette même température.

Prenons par exemple un fil de chrome-nickel de diamètre égal à 3 mm. disposé horizontalement. Une longueur de 1 m. de ce fil, d'après le graphique ci-dessus, développera par heure à 500°, 700°, 900° respectivement 273, 508, 990 calories.

	500°	700°	900°	
Qui se répartissent sensiblement ainsi :	Radiation.....	108	300	700
	Convection.....	165	208	290
	Total.....	273	508	990
	Watts par cm <sup>2</sup> ..	3,36	6,25	12,2

Le graphique ci-dessous (figure n° 2) indique pour les températures

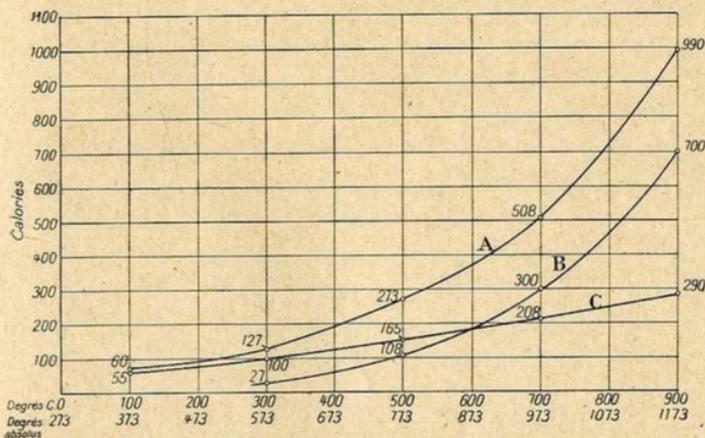


FIGURE 2. — Fil de chrome-nickel, diamètre 3 millimètres.

- |  |                                    |
|--|------------------------------------|
| A. Chaleur totale par mètre et par heure | } en fonction de<br>la température |
| B. Chaleur émise par rayonnement         |                                    |
| C. Chaleur émise par convection.         |                                    |

usuelles la répartition des deux émissions pour un fil de chrome-nickel de 3 mm. tendu horizontalement. On constate que c'est aux environs de 600° centigrades que l'effet de radiation commence à dominer. Les appareils exigeant une forte radiation comme fours, grils, etc... devront donc fonctionner au delà de cette température. On prendra par exemple 800° où la radiation représente sensiblement les 2/3 de la chaleur totale émise.

Pour le métal ci-dessus, on vérifie que la chaleur totale varie sensiblement comme la puissance 3,2 de la température absolue du fil. On peut, sans grande erreur, généraliser cette règle, pour une première approximation, dans l'intervalle de température et pour les métaux à faible coefficient usités en chauffage électrique.

Ces formules et graphiques remplacent pour les filaments les formules de Pécelet et autres citées plus haut, qui, par contre sont très utiles pour calculer les épaisseurs, formes, superficies des enveloppes, supports, etc... qui recouvrent ou environnent les résistances actives.

C'est en se basant sur eux et par comparaison avec les appareils existants, que l'on doit calculer les valeurs de ces résistances pour établir un appareil.

Certaines dispositions de fils favorisent la radiation au détriment de la convection. Ainsi un filament roulé en hélice de hauteur égale au dixième de la longueur totale du fil, n'émet plus par convection que la septième partie de ce qu'il émettrait s'il était étendu. Cette propriété a été utilisée non seulement dans les appareils de chauffage, mais dans les lampes à incandescence à gaz inerte, où l'on cherche précisément à avoir la plus grande radiation de puissance possible, et par contre le moins de convection qui constitue une perte sèche.

**Régime variable.** — De toutes façons, la température du fil soumis à une intensité croissante, augmente beaucoup plus lentement que la quantité de chaleur dissipée par convection et radiation. La limite correspond à la température de fusion. Pour que le fil utilisé soit d'un emploi avantageux, il faut qu'à la température de régime choisie, l'augmentation de chaleur par degré soit aussi grande que possible, de façon à assurer la meilleure auto-régulation du régime de marche et la conservation de l'appareil — tout en étant suffisamment éloignée de la température de fusion pour tenir compte des survoltages possibles.

L'effet calorifique dû à un survoltage permanent est proportionnel au carré du rapport du voltage réel au voltage normal pour un fil sans coefficient de température. Plus ce coefficient est grand, moins l'effet est sensible. Avec des filaments de charbon dont le coefficient est négatif, l'effet est au contraire renforcé.

En comptant sûr un survoltage possible de 10 %, il faut donc prévoir une marge de chaleur égale à 20 % au moins de la chaleur de régime. On prendra en général 50 %. Ainsi la chaleur totale à 1.400°, point de fusion du chrome-nickel, étant pour ce fil de 3 mm égale à 3.000 calories par mètre, on ne dépassera pas en régime 2.000 calories qui correspondent à 1.170°. En pratique, pour tenir compte de l'amollissement du fil, on ne dépasse pas 1.100° au grand maximum. Cette température exige d'ailleurs que les fils soient supportés en de nombreux points et que la convection soit aussi énergique que possible.

Comme pour les lampes électriques, on constate qu'un survoltage de 10 % peut être fatal à une résistance de chauffage électrique. Quant au sous-voltage, il a pour inconvénient de diminuer sensiblement la proportion de chaleur radiée par rapport à la chaleur émise par convection, et cela d'autant plus que la température normale est plus élevée. Cela n'a pas grande importance en matière de chauffage domestique, mais peut en avoir beaucoup dans les applications à la cuisine et industrielles.

**Période de démarrage.** — Il n'y a pas à considérer que la marche en régime permanent, où il y a égalité entre la chaleur développée et la chaleur émise. Il faut tenir compte de la période de démarrage où la chaleur créée par le passage du courant sert d'abord à élever la température du corps résistant lui-même.

Si l'on suppose un fil résistant de longueur  $l$ , section  $s$ , résistivité  $r$ , chaleur spécifique  $c$ , densité  $d$ , soumis à une intensité moyenne  $i$  pendant un temps  $t$  assez court pour n'avoir pas à tenir compte des pertes aux attaches et de l'émission de chaleur, on a :

$$0,00024 i^2 r t = s l d c \theta,$$

$\theta$  étant l'élévation de température. Et comme  $i = \frac{v s}{\rho l}$ , on en tire :

$$\frac{\theta}{t} = K \frac{v^2}{\rho^2 l^2 c d}$$

Le taux d'élévation de température, pendant les premiers instants sera proportionnel au carré du voltage appliqué. Un survoltage même assez faible sera donc dangereux pour un appareil calculé en vue d'un voltage donné et d'une température voisine de la limite supérieure.

Les métaux communs ont un coefficient de température élevé qui donne lieu à un pompage assez grand au démarrage.

Le taux initial d'élévation de température pour ces métaux est donc assez grand, les dilatations sont brusques et nuisent à la conservation des résistances, car ces métaux ont également une charge de

rupture assez faible. Mais comme le courant diminue rapidement avec l'élevation de température, il se produit une auto-compensation dès les secondes suivantes, ce qui étale la courbe de démarrage.

Les métaux à forte résistivité ont généralement un coefficient de température faible. A égalité d'ampérage et de température de régime, le taux initial d'élevation de température est alors plus faible et il reste plus constant que pour les métaux communs.

Il est d'autant plus faible pour un même métal que la température de régime est plus faible, en raison de la plus grande masse de métal à échauffer, et de l'importance des surfaces d'émission.

*Exemple* : Pour fixer les idées, considérons 2 appareils dont les résistances en fil de fer et en Nikron sont prévues pour supporter la température de 195° pour le fer et de 340° pour le Nikron, sous le même ampérage 9,1 ampères correspondant à 1 KW sous 110 volts.

Les caractéristiques des 2 enroulements seront les suivantes :

Fil de fer	Fil de Nikron
$r_{195} = 12,1 \text{ } \omega.$	$r_{340} = 12,1 \text{ } \omega.$
$r_0 = 5,7 \text{ } \omega.$	$r_0 = 11,2 \text{ } \omega.$
$l = 38 \text{ m.}$	$l = 13,6 \text{ m.}$
$\Phi = 0,93 \frac{\text{m}}{\text{m}}$	$\Phi = 1,3 \frac{\text{m}}{\text{m}}$
$\delta = 7,8$	$\delta = 8,3$
$c = 0,116 \text{ cal.}$	$c = 0,11 \text{ cal.}$
$p = 201 \text{ gr.}$	$p = 150 \text{ gr.}$

Les courants de démarrage seront respectivement :

$$9,1 \times \frac{12,1}{5,7} = 19,4 \text{ A} \qquad 9,1 \times \frac{12,1}{11,2} = 9,8 \text{ A}$$

Les puissances absorbées pour la 1<sup>re</sup> seconde seront en calories :

$$0,00024 \times 19,4^2 \times 5,7 = 0,503 \text{ c} \text{ et } 0,26 \text{ c}$$

Les taux d'élevation de température seront de :

$$\frac{0,503}{0,201 \times 0,116} = 21,05 \text{ p s}$$

et de :

$$\frac{0,26}{0,150 \times 0,11} = 16,0 \text{ p s.}$$

Il faudrait donc 9 secondes à peu près au fil de fer et 22° au fil de Nikron pour atteindre leurs températures de régime.

Pratiquement il leur en faudra à tous deux de 30 à 35.

Dans cet exemple le Nikron travaille à température assez faible. En prenant  $800^{\circ}$  comme température de régime, on aura  $r_{800} = 12,1$  ;  $r_0 = 10,7$  ;  $d = 0,7$  ;  $l = 3,73$  ;  $p = 0,0119$  ;  $i_0 = 10,1$ , d'où  $\theta = 198^{\circ}$  par seconde. La température de fusion du Nikron étant d'environ  $1300^{\circ}$ , on pourra craindre de s'en approcher trop vers la 7<sup>e</sup> seconde si l'émission par contact et convection n'a pas été suffisamment favorisée.

Les nombreux supports qu'exige le Nikron, métal extrêmement mou à haute température, les gaines de terre réfractaire sur lesquelles on enroule ce filament, les enduits réfractaires (silicates, toiles d'amiante, etc...) dans lesquels on l'enrobe, ont l'avantage d'absorber dans ce cas une grande partie de l'excès de chaleur possible. On peut donc sans crainte porter les filaments ainsi disposés à haute température.

NOTA : On peut vouloir donner à ces calculs une apparence plus rigoureuse en tenant compte à chaque instant de la chaleur émise par le fil, laquelle est fonction de la température à cet instant. On obtient ainsi une équation différentielle dont la résolution met bien *en évidence* le facteur d'amortissement, mais ne permet de le mettre *en chiffres* que si les coefficients de transmission de chaleur y figurant l'ont été préalablement eux-mêmes.

C'est là, nous l'avons dit, la véritable difficulté dans le cas des fils minces à hautes températures, et une source d'erreurs d'autant plus fortes que ces coefficients figurent en exposants dans la formule. Aussi est-il pratiquement suffisant de calculer le taux à l'origine et d'indiquer l'ordre de grandeur de l'effet d'amortissement dû au coefficient de température et à la chaleur émise.

---



## CHAPITRE II

### Accumulation et Récupération de la Chaleur

**Accumulateurs en général.** — Un certain nombre d'applications du chauffage électrique utilisent la chaleur développée par les résistances, l'arc voltaïque, immédiatement et définitivement. Ce sont par exemple : la cuisine, les appareils radiateurs portatifs de chauffage, les vaporisateurs, c'est-à-dire les appareils destinés à vaporiser l'eau au fur et à mesure de l'emploi direct de cette vapeur.

On peut cependant chercher à différer l'emploi de la chaleur produite: on l'emmagasine alors dans des accumulateurs de chaleur, soit solides, soit liquides, isolés aussi bien que possible au point de vue thermique

La chaleur accumulée dans un poids  $p$  de substance donnée pour une différence de température  $\theta$  entre l'instant initial et l'instant final de la charge, est égale à  $p c \theta$ ,  $c$  étant la chaleur spécifique du corps. Ci-dessous table des chaleurs spécifiques, et des poids spécifiques à 0° des substances présentant la meilleure capacité thermique :

	ch.s	p.s
Eau .....	1	0,999871
Pétrole rectifié .....	0,45-0,5	0,7
Huile d'olive .....	0,471	0,915
Porcelaine .....		2,3-2,5
Quartz fondu.....	0,305	2,65
Pierre olaire.....	0,28	2,7
Briques .....	0,22	1,55 à 2
Aluminium .....	0,22	2,7
Fer .....	0,116	7,8
Manganèse .....	0,212	7,4
Sable sec .....	0,18	1,42

On constate que l'eau est, à volumes et à températures égaux, l'un des meilleurs accumulateurs. Malheureusement au delà de 100°, sa tension de vapeur croît beaucoup plus vite que la température. De plus son coefficient de dilatation est assez grand, le poids spécifique décroît alors rapidement (il n'est que de 0,95 à 100°). La chaleur totale croît donc moins vite que la température, pour un même volume.

Ce désavantage est commun à la plupart des liquides, en particulier au pétrole. Pour celui-ci le coefficient de dilatation vers 300° est de

0,0007 environ. La chaleur croît donc sensiblement moins vite que la température. D'autre part au delà de 320°, la vaporisation commence et la tension de vapeur prend de suite une très grande valeur qui atteint 35 kilogs à 400° et dépasse 200 kilogs à 450°. En même temps la décomposition donne lieu à des gaz dont la pression subsiste au refroidissement. Ces gaz occasionnent des fuites qui ont déjà causé des explosions. Pour tous ces motifs, le pétrole est donc à rejeter dans les habitations, et en tous cas ne doit il jamais être porté à plus de 300°.

Les autres substances employées sont des matières inertes, telles que le sable, le grès, la terre cuite, etc... qui ont des coefficients de dilatation très faibles et présentent une assez forte capacité thermique par unité de volume, étant donnée leur densité généralement forte, soit de 2,5 à 3. Par exemple à 350° certains grès peuvent absorber 250.000 calories au m<sup>3</sup>, soit 292 wh/dm<sup>3</sup>.

Ces matières doivent avoir un contact intime avec les résistances qui produisent la chaleur par effet Joule ; elles doivent donc être au point de vue électrique très mauvaises conductrices, ou soigneusement isolées électriquement — à moins d'utiliser leur résistance propre en parallèle avec celle des résistances électriques métalliques. Cette considération restreint donc l'emploi de métaux trop bons conducteurs tels que le fer et l'aluminium qui présentent cependant de fortes capacités calorifiques par unité de volume : 0,90 pour le fer, 0,56 pour l'aluminium. Au point de vue de la facilité d'accumulation comme de restitution de chaleur, le coefficient de conduction thermique doit au contraire avoir une valeur suffisante pour que la charge soit facile dans le temps prévu, sans que d'autre part la décharge soit trop rapide.

**Calcul des pertes.** — Il est facile avec les coefficients ci-dessus, d'évaluer les dimensions de la matière active d'un accumulateur de chaleur la puissance, l'énergie en KWH, les dimensions du circuit résistant, etc. Mais il faut tenir compte des pertes et pendant l'accumulation et pendant la période de repos avant décharge.

Avant tout calcul, on doit se rappeler que plus la matière s'approchera de la forme d'un cube parfait, plus les pertes de chaleur seront faibles, dans les mêmes conditions de température. Lorsqu'on projette un appareil dont on est à peu près libre de fixer les dimensions, on devra donc toujours se rapprocher de cette forme autant que possible. Cette forme géométrique simple permet d'utiliser les coefficients de Pécelet, Dulong et Petit pour la prédétermination des pertes et, par suite, de la nature et de l'épaisseur du calorifuge à employer pour les réduire à telle valeur pratique.

Avec de grands écarts de température et des surfaces assez étendues la précision assez relative de ces coefficients peut cependant conduire à des erreurs sensibles. Il est donc bon d'avoir une idée de l'ordre de grandeur des pertes horaires par m<sup>2</sup> d'un corps en raison de son excès de température sur la température ambiante. Ci-dessous tableau concernant les surfaces métalliques telles que tôles de chaudière.

	Températures				
	120°	150°	180°	250°	300°
Surface nue .....	1.260	1.800	2.280	4.000	5.500
Avec enveloppe d'air de 3 cm .	765	1.060	1.370	2.250	3.100
Avec ciment d'amiante et air .	450	585	720		
Avec coquilles de liège .....	383	500	650		
Avec Kieselgühr .....	315	410	580		

Il est inutile de dépasser une épaisseur de quelques centimètres, car c'est la couche immédiatement au contact de la surface qui est la plus agissante.

On peut également se rappeler que pour les massifs de chaudière en briques et en moellons, les pertes par m<sup>2</sup> de surface extérieure par heure et par degré de différence de température entre les températures à l'intérieur et à l'extérieur de la paroi sont :

Epaisseur en cm.	Briques	Moellons
25	2,00	2,60
60	1,00	1,45
100	0,63	0,85

Dès que la température de la matière active de l'accumulateur dépasse 200°, la couche isolante immédiatement au contact est constituée par une lame d'air de 2 à quelques centimètres d'épaisseur. L'enveloppe extérieure est alors composée, suivant le cas, d'une tôle elle-même calorifugée, d'une murette de briques, d'une cloison en ciment, etc... Il serait bien hasardeux et même presque matériellement impossible d'appliquer à un tel complexe les formules de Pécelet et autres. Il faut alors procéder par comparaison avec les résultats expérimentaux obtenus sur des appareils en fonctionnement.

Ainsi pour un isolant composé d'une lame d'air de 2 cm. et d'une épaisseur d'éternite de 2 cm. environ, l'expérience prouve que la perte est d'environ 0,13 calorie par m<sup>2</sup>, et par degré de différence de température.

S'il s'agit d'évaluer les pertes d'un complexe tel qu'une chaudière

à bouilleurs, etc... destinée à être chauffée électriquement, plusieurs procédés sont applicables.

Si la chaudière est encore en service et restera chauffée au charbon jusqu'à la transformation (qui peut d'ailleurs se faire en vue d'une marche alternative au charbon et électrique) on pourra toujours disposer d'une nuit pour faire un essai de maintien de température dont la consommation en charbon sera encore le meilleur index de la perte horaire à compenser. Il faudra naturellement déduire les pertes par les gaz chauds à la cheminée.

Si la chaudière est à transformer définitivement comme bouilleur et accumulateur électriques et qu'on puisse faire un essai direct de chauffage électrique, le mieux est de porter directement l'eau à la température voulue, puis après avoir aveuglé toutes les conduites d'air frais et d'évacuation des gaz chauds, de régler la puissance électrique consommée et d'évaluer directement les pertes horaires en KW.H.

Les valeurs trouvées serviront non seulement pour ce cas particulier, mais pour comparaison dans d'autres cas où l'essai préalable direct n'est pas possible — ou pour l'établissement d'un avant-projet d'installation comparable. C'est un avantage de l'électricité de pouvoir faire facilement de tels essais réglables, c'est le moins d'en profiter.

Au lieu de rechercher directement combien de K.W.H il faut fournir pour compenser les pertes, on peut essayer d'évaluer directement la grandeur de ces pertes en calories. Les quantités de chaleur ne peuvent se mesurer directement, mais seulement par l'intermédiaire de la température, les deux autres grandeurs nécessaires, le poids et la chaleur spécifique étant supposées connues. On déplace ainsi le problème et les chances d'erreur ne peuvent provenir que d'une évaluation fautive des températures. C'est le principe de la méthode préconisée par M. Rutgers.

Il considère la chaudière, avec tous ses accessoires, massif de maçonnerie, etc... comme un calorimètre dont il évalue rigoureusement la somme des produits  $p_n \times c_n$ , ce qu'on appelle en calorimétrie : le poids réduit en eau. La quantité de chaleur contenue dans tout ce complexe pour une température de régime  $t$  de l'eau de la chaudière supposée normalement remplie  $= (\sum p_n c_n t_n) = P \times t$ . Supposons la chaudière à cet état de régime. On ne lui fournit plus de chaleur et on la laisse refroidir. Pendant le temps  $d$ , la perte de chaleur sera  $P \times d$ , et cette perte sera d'autre part proportionnelle à la surface totale extérieure (facilement mesurable), à un certain coefficient  $K$ , et à la différence entre la température de l'eau de la chaudière prise comme point de

comparaison, et celle de l'atmosphère, qui seules ont des valeurs facilement mesurables.

$$\text{On a donc : } P \times d t = - K S (t - t_a) d \theta.$$

En portant sur un graphique, heure par heure, la diminution de valeur de  $t$ , on en tire expérimentalement la valeur de  $K$ , qui représente la perte de chaleur par  $m^2$ , par heure et par degré de différence de température entre l'eau et l'atmosphère (cela en admettant que les pertes totales soient simplement proportionnelles à la simple différence de température). En portant cette valeur expérimentale de  $K$  dans l'équation ci-dessus, on en tire après l'avoir intégrée, la valeur de  $P \times t$  qui représente les pertes horaires, si l'on fait  $t = 1$  heure.

Au fond, cette méthode est une application de la méthode générale de mesure des dégradations d'énergie. (Frottements dans les machines rotatives à gros moment d'inertie, méthode de M. Routin. Frottements, courants de Foucault, hystérésis : méthode de Mordey. Résistance des véhicules sur rails : méthode de ralentissement.) Seulement, dans toutes ces dernières méthodes, toutes les quantités peuvent être rigoureusement évaluées en fonction de l'une d'elles que l'on mesure facilement et directement et dont on porte les valeurs successives en fonction du temps, ou du nombre de tours sur le graphique.

C'est le point faible de la méthode ci-dessus, qu'on doit évaluer au jugé les températures  $t_n$  de masses inaccessibles, en fonction de la température de l'eau. La méthode vaut surtout par l'expérience de celui qui l'emploie. Il faut noter d'ailleurs que seule la tangente à l'origine de la courbe  $t = f(\theta)$  est utile à connaître. Et comme on a bien le droit de supposer que, les premières heures, la courbe est sensiblement rectiligne, il est superflu d'en connaître plus de deux points.

Pour enfin avec cette question de l'accumulation de chaleur et des pertes inévitables, nous rappellerons que pour tout corps auquel on fournit par unité de temps une certaine quantité de chaleur, il arrivera toujours un moment correspondant à une certaine température où l'émission de chaleur compensera exactement la chaleur fournie. On dit qu'à ce moment l'appareil a atteint un état stationnaire. Et naturellement, il ne sera possible de dépasser cette température que si le calorifugeage peut être mieux fait qu'il ne l'est, ou le taux d'apport de chaleur augmenté.

Si deux appareils sont destinés à accumuler la même quantité de chaleur, l'un en 10 heures, l'autre en 20 heures, le premier sera deux fois plus puissant sensiblement que le second. S'ils restent accidentellement ou intentionnellement sous courant, une fois l'état stationnaire atteint, la puissance dissipée par le premier sera double de celle dissipée

par le second. Ce point est important à retenir dans la constitution des systèmes de chauffage à fonctionnement retardé.

**Restitution de la chaleur.** — Elle peut se faire de différentes façons suivant le but qu'on se propose.

Si la chaleur a été emmagasinée dans un solide, c'est en général un fluide qui sert d'agent de transport de la chaleur en s'échauffant au contact du bloc chaud. Par exemple, on fait circuler un liquide, bon conducteur de la chaleur et de grande chaleur spécifique dans un serpentín noyé dans la masse accumulante et qui va dissiper cette chaleur, soit dans un radiateur genre chauffage central s'il s'agit de chauffer un appartement, soit dans un autre serpentín noyé dans une seconde masse à échauffer, soit directement dans le liquide à échauffer par mélange.

Si l'on se sert d'eau, on se rappellera utilement que la chaleur absorbée par l'eau en mouvement est proportionnelle à la racine carrée de sa vitesse tant qu'on reste aux températures au dessous de l'ébullition, et proportionnelle à la vitesse elle-même, s'il y a formation de bulles de vapeur au contact de la surface. La formule de M. Ser dans le premier cas est  $Q = 4.700 \sqrt{V}$ . Celle de M. Izart, dans le second, est  $Q = 4.700 V$ . (par  $m^2$ , heure et degré)

Les formules et tableaux cités plus haut permettent de rechercher d'une façon suffisamment approchée les dimensions à donner à l'appareil récupérateur.

Soit par exemple un bloc susceptible d'emmagasiner en passant de  $100^\circ$  à  $450^\circ$  une quantité de calories égale à 915.000. La densité est égale à 2,7, la chaleur spécifique est égale à 0,22. Le cube nécessaire est donc de  $4,4 m^3$ . Ce massif sert à réchauffer de  $55^\circ$  à  $95^\circ$  l'eau qui circule dans un serpentín en fer noyé dans la masse, de telle sorte que la décharge dure 10 heures. Pendant ce temps d'autre part l'émission directe est de 90.000 calories.

Le bloc se refroidissant au maximum jusqu'à  $100^\circ$ , la chaleur totale à enlever sera de 825.000 calories, soit 82.500 par heure. Au début de la récupération la différence entre la température du bloc et celle moyenne de l'eau =  $450 - 70 = 380^\circ$ . A la fin, elle n'est plus que de  $100 - 60 = 40^\circ$  environ. La différence moyenne de température est donc de  $210^\circ$ .

Le massif est un prisme de  $1 m \times 1 m, 5 \times 2 m, 9$ . Après quelques tâtonnements on composera le serpentín de 6 tubes droits reliés en U aux extrémités, parallèles à la grande dimension et disposés en deux lits de trois, espacés de 50 cm. De cette façon chacun de ces 6 tubes se

trouve constituer l'axe d'un prisme de 50 cm.  $\times$  50 cm. et de 2 m. 90 de long, dont la chaleur doit s'écouler en 10 heures par cet axe. Le diamètre moyen de la section de chacun des 6 prismes est donc de 0 m. 27. La surface cylindrique moyenne traversée par le flux de chaleur est donc égale à  $6 \times \pi \times 0,27 \times 2,9 = 14,80 \text{ m}^2$ .

D'autre part le coefficient K à faire figurer dans l'équation de transmission de la chaleur est donné par la formule de la page 8 ou  $K' K'' K'''$  sont les coefficients propres à la matière du bloc, au fer, et à l'eau en mouvement. Pour la matière du bloc, la valeur de  $K'$  est trouvée égale à 2,99 et  $l'$  vaut 0,11.

Pour le fer, le coefficient est de 60, mais comme la surface de de transmission offerte par le fer sera environ le 1/10 de celle offerte en moyenne par la masse, on prendra  $K'' = 6$  et  $l' = 0,003$ .

Quant à l'eau, pour  $v = 1 \text{ m}^3/\text{''}$   $K''' = 4.700$  mais pour la même raison on prendra  $K''' = 470$ . On a donc pour l'ensemble :  $K = 3,17$  par mètre.

L'épaisseur moyenne à parcourir par le flux est égale à 0,12.

$$\text{On vérifie que l'on a : } 82.500 = 3,17 \times 14,8 \times \frac{210}{0,12}$$

L'eau s'échauffant de 55° à 95°, chaque  $\text{m}^3$  emporte 39.500 calories environ. Il faut donc un débit horaire de  $\frac{82.500}{39.500} = 2,1 \text{ m}^3$ .

La section pour une vitesse de  $1 \text{ m}^3/\text{''}$  sera  $\frac{2,1}{3.600} = 0 \text{ m}^2 000585$  correspondant à un diamètre intérieur de 2,7 centimètres.

La disposition intérieure des résistances chauffantes dans le bloc est commandée par la conductibilité spécifique de la matière, d'après le temps de charge prévu.

De même la disposition des canaux, tubes, etc. de récupération est commandée par ce même coefficient d'après le temps de décharge. Ainsi pour une décharge plus rapide,, les éléments du serpentin ci-dessus devraient être plus nombreux pour être moins distants.

Le calcul pour un récupérateur à air se ferait de même en tenant compte que la chaleur spécifique de l'air est de 0,273 par kilogram, donc de 0,307 par  $\text{m}^3$  à 0° et que le poids d'un  $\text{m}^3$  diminue de 0,0366 par degré d'élévation de température.

Si l'air échauffé doit en même temps servir au chauffage et à la ventilation des pièces, il ne faut pas que sa température à la sortie dépasse 60° à 70° au maximum pour éviter la carbonisation des poussières. Dans ces conditions, l'air absorbe environ 1 watt par 2,5 à 3  $\text{cm}^2$  de surface active. Il faut de plus qu'il soit humidifié à sa sortie de l'appareil.

La surface extérieure de l'enveloppe peut également être prévue pour transmettre à l'air ambiant une certaine quantité de chaleur. Pour éviter le même défaut de carbonisation des poussières, la température extérieure de la surface ne doit pas dépasser 120°.

On peut combiner l'effet de convection avec l'effet de radiation en ménageant dans l'enveloppe des regards qu'on ouvre ou ferme à volonté.

**Accumulation par l'eau.** — Cette application est la plus importante au point de vue industriel. Elle nécessite la connaissance des propriétés électriques et thermiques de l'eau, que nous exposerons d'abord très rapidement :

L'eau chimiquement pure a une résistance pratiquement infinie. Mais l'eau de source même est conductrice de l'électricité. La résistivité varie entre 3.000 et 6.000  $\omega$ ./cm./cm<sup>2</sup> (c'est-à-dire en ohms entre les faces opposées d'un cube de 1cm. de côté.)

La résistivité de l'eau de rivière est d'environ 2.000  $\omega$ ., celle de l'eau de marais peut tomber à moins de 500  $\omega$ .

Une particularité capitale de l'eau est que son coefficient de température est négatif. Pour une eau de source, M. Loppé, à l'ouvrage duquel nous empruntons ces coefficients, indique les résistivités suivantes :

A 30°	$\rho = 3.800 \omega$ .
50°	2.856 $\omega$ .
80°	2.000 $\omega$ .

Un rapport de l'Association Suisse des Ingénieurs-électriciens contient un graphique de la maison Brown-Boveri relatif à la variation de résistance de l'eau pure entre 40° et 200°. A 40°  $\rho = 4.500 \omega$ ., à 100°  $\rho = 2.000$  ; à 140°  $\rho$  passe par le minimum de 1.600  $\omega$  ; après quoi  $\rho$  remonte jusqu'à 2.200  $\omega$ . à 200°.

Le même rapport contient un autre graphique d'après lequel  $\rho_{20} = 3.000 \omega$ .,  $\rho_{98} = 1.000$  et 1.200  $\omega$ .

La résistivité des solutions aqueuses diminue également avec la température. Leur coefficient moyen de température est d'environ — 0,02 (sel ordinaire, soude, etc...). Ces solutions ont d'ailleurs des résistivités, à égalité de température, bien plus faibles que l'eau même impure, et cette résistivité décroît extrêmement vite avec le degré de concentration. Ainsi, pour l'eau salée  $\rho_0 = 15 \omega$ ./cm. à 5 % et ne vaut que 4,7  $\omega$ ./cm. à 25 %.

Il faut noter que si le courant continu peut servir, comme le courant alternatif, pour toute chaudière où l'eau n'est pas en contact direct

avec les résistances électriques, seul le courant alternatif, diphasé, triphasé, etc... peut être utilisé si l'eau est en contact avec les résistances ou sert elle-même de résistance, sans quoi il y aurait électrolyse de l'eau et des parties métalliques. On constate d'ailleurs que les chaudières basées sur la conduction électrique de l'eau présentent toujours une certaine capacité électrostatique qui améliore le facteur de puissance du réseau.

Les propriétés thermiques de l'eau et de sa vapeur sont également indispensables à bien connaître. Les tables de Regnault, Zeuner et autres, que donnent tous les Annuaires, contiennent tous renseignements utiles à cet égard.

La chaleur spécifique de l'eau varie aux environs de 1, décroissant de 0° à 40°, puis croissant au delà.

A 100°, la tension de vapeur égale 1 kilog cm<sup>2</sup>, elle monte ensuite très rapidement avec la température. A 200°, la tension vaut 16 kilogs. Mais avec la température l'eau elle-même augmente considérablement de volume spécifique. Ainsi à 4 kilogs, la température est de 142°,8 ; chaque kilog d'eau contient  $q = 144,1$  calories, mais, le coefficient de dilatation étant d'environ 0,0003, 1 kilog occupe 1,06 litre. Par exemple un ballon de 1.000 litres rempli d'eau à 4 kilogs, ne contient que 940 kil. d'eau valant 135.000 calories ou 157 KW.H. A 16 kilogs le même ballon ne peut contenir que 800 kilogs d'eau correspondant à 175.000 calories.

S'il existe un espace libre entre l'eau et l'enveloppe, permettant à la vapeur de se former et de se maintenir au contact du liquide, la vaporisation pour une pression donnée a lieu à température fixe et toute la chaleur fournie pendant cette vaporisation passe entièrement dans la vapeur. La chaleur contenue dans un kilog d'eau à  $t^0$  étant sensiblement égale à  $t$  calories, la chaleur contenue dans ce kilog vaporisé à  $t^0$ , au moment où tout le liquide vient d'être vaporisé, est de  $606,5 + 0,305 t$ . La chaleur de vaporisation est donc égale à  $606,5 - 0,695 t$ .

A partir de ce moment, si on fournit encore de la chaleur à la vapeur, en espace clos, celle-ci se surchauffe sans que sa pression change. La chaleur spécifique, pour chaque pression et chaque degré de surchauffe est donnée par les Tables. Elle diminue en général quand la température augmente (sauf aux basses pressions). Elle est par exemple de 0,75 pour la vapeur à 16 kilogs vers 200°, et de 0,56 seulement à 350°, tandis qu'à ces mêmes températures elle est respectivement de 0,462 et 0,467 pour la vapeur à 1 kilog. On voit donc de suite qu'on n'a aucun intérêt à accumuler de la chaleur dans la vapeur même surchauffée, car de plus son volume spécifique est très faible (1,7 m<sup>3</sup> par kilog pour 1 kilog de pression et 0,2 m<sup>3</sup> par kilog à 10 kilogs de pression).

Il y a donc tout intérêt à accumuler la chaleur non pas dans la vapeur, mais dans l'eau sous pression. Cette accumulation peut se faire, soit en chauffant directement l'eau contenue dans le réservoir sous pression, soit en utilisant la vapeur produite dans des chaudières électriques séparées, que l'on convertira ensuite en eau sous pression.

Le premier problème est immédiat. Dans le deuxième cas, on utilise la chaleur de vaporisation de la vapeur vive pour échauffer l'eau froide contenue dans le ballon.

On peut alors procéder par mélange, ou par surface.

Par mélange : nous donnerons un exemple de calcul :

1 kilog. de vapeur sèche à 10 kilogs de pression contient  $r = 479,82$  calories comme chaleur de vaporisation. Pour obtenir, en partant d'eau froide à  $22^\circ$ ,  $(x + 1)$  kilogs d'eau à 10 kilogs de pression pour laquelle la chaleur du liquide  $q = 181,24$ , il faudra prendre  $x$  kilogs d'eau tels que  $x(181,24 - 22) = 479,82$  d'où :  $x = 3$  kilogs.

Par surface : on fait passer la vapeur vive dans un serpentin noyé dans l'eau à réchauffer. Le calcul de la surface active du serpentin se traite par les formules habituelles de la transmission de la chaleur entre fluides.

**Autovaporisation de l'eau.** — La chaleur accumulée dans l'eau peut devoir être utilisée soit dans l'eau chaude, soit dans la vapeur. Le premier cas est simple, nous ne nous y arrêtons pas. Le second exige quelques explications.

Si un ballon est plein d'eau à  $N$  kilogs, par exemple celui ci-dessus d'un  $m^3$ , contenant 860 kilogs à 16 kilogs ou 175.000 calories et qu'on laisse s'écouler cette eau dans un espace clos suffisant, elle se vaporisera en partie et on obtiendra une pression telle que la quantité de chaleur totale reste la même, mais qu'une partie de la chaleur perdue par l'eau aura précisément servi à vaporiser la quantité de vapeur produite.

Ce problème est très important, car c'est la base de l'accumulation par l'eau de la chaleur produite électriquement.

Exemple :

Soit un réservoir de 1.000 litres à 16 kilogs plein d'eau à  $200^\circ$ , contenant 860 kilogs ou 175.000 calories. On veut la détendre pour obtenir la vapeur à 4 kilogs pour laquelle :

$$t = 142,82 \quad q = 144,1 \quad r = 505,96 \quad \lambda = 650 \quad u = 0,461.$$

A l'état final il restera  $x$  kilogs d'eau à  $142,8$  et  $(860 - x)$  kilogs seront vaporisés, contenant  $(860 - x) 650$  calories. On a donc :

$$144,1 x + 650 (860 - x) = 175.000 \text{ d'où } x = 760 \text{ kilogs.}$$

On n'aura donc que 100 kilogs de vapeur qui rempliront  $46,1 m^3$  et

contiendront 50.650 calories comme chaleur de vaporisation récupérables par condensation à cette même température.

Si on avait détendu à 2 kilogs seulement, on aurait :

$$120,37 x + 643 (860 - x) = 175.000 \text{ d'où } x = 720 \text{ kilogs.}$$

on aurait 140 kilogs de vapeur pouvant remplir  $88,6 \times 1,4 = 124 \text{ m}^3$  et contenant  $522,6 \times 140 = 73.000$  calories comme chaleur de vaporisation. Si la température la plus basse à laquelle tombe cette vapeur condensée au cours de son cycle de transformation est par exemple  $70^\circ$ , ces 140 kilogs abandonneront au total  $140 (643 - 70) = 80.000$  calories.

Il est essentiel de noter que les 95.000 calories, qui représentent la différence entre 175.000 et 80.000, c'est-à-dire la chaleur des 720 kilogs d'eau restants à  $120^\circ$ , ne sont pas une perte. C'est, on peut le dire, le fonds de roulement nécessaire à l'opération. Les frais les plus importants qu'il entraîne sont le coût et l'encombrement du réservoir nécessaire et de son enveloppe calorifuge. On conçoit qu'il y a dans chaque cas un volume de ballon et une tension d'accumulation qui réunis formeront l'ensemble de conditions le plus avantageux et qui ne peut se trouver que par tâtonnement d'après les propositions des fournisseurs. On trouve qu'en général, c'est aux environs de 9 à 11 kilogs de pression que l'ensemble est le plus économique. Comme nous l'avons vu par les 2 exemples ci-dessus, la quantité de chaleur disponible est d'autant plus grande que la tension après détente est plus faible.

Le même problème, vu sous un angle différent, peut se poser de la façon suivante : étant admis que la pression d'accumulation sera par exemple de 10 kilogs, pour une pression d'utilisation de 4 kilogs, chercher la relation entre la puissance installée nécessaire et le volume d'accumulateur, pour une consommation journalière donnée.

Ce problème, également fondamental, sera traité en détail dans le chapitre VI, car il fait intervenir les questions de coût du matériel et de tarification de l'énergie. Mais il exige la connaissance du mécanisme de fonctionnement calorifique d'une semblable installation.

Nous allons en donner rapidement un exemple :

Exemple : supposons une consommation horaire de 1.000 kilogs de vapeur à 4 kilogs, pendant dix heures consécutives par jour. L'eau d'alimentation est à  $20^\circ$ . Les valeurs  $q$  et  $r$ , relatives à 10 et à 4 kilogs de pression sont respectivement égales à : 181,24 — 479,82 — 144,1 — 506 calories.

Le nombre total de calories à fournir par jour de 24 heures sera donc égal à :

$$10 \times 1.000 \times (144,1 + 506 - 20) = 6.300.000.$$

L'autovaporisation due à la détente de l'eau de 10 à 4 kilogs donne, 73,6 grammes de vapeur par kilog. d'eau, puisque :

$$506 \times 0,0736 = 181,24 - 144,1.$$

Supposons par exemple un ballon de 30 tonnes d'eau à 4 kilogs. Il s'en autovaporisera :

$$73,6 \times 30 = 2.208 \text{ kilogs.}$$

Et il restera 27.792 kilogs d'eau ne contenant plus que 144,1 calories par kilog. Puisqu'il faut en tout, 10.000 kilogs de vapeur, il faut prendre 7.792 kilogs de cette eau et lui fournir 506 calories par kilog., soit 3.942.800 calories. Cette fourniture sera faite au cours des 10 heures de fonctionnement de jour.

Elle représente donc une puissance électrique théorique de :

$$\frac{394.280}{863} = 455 \text{ KW.}$$

Pendant la nuit, il faudra :

1° Faire remonter les 20.000 kilogs restants de 4 kilogs à 10 kilogs, soit : 20.000 (181,24 — 144,1) = 744.800 calories ;

2° Ajouter 10.000 kilogs, pris à 20° et les porter à 10 kilogs, soit : 10.000 (181,24 — 20) = 1.612.800 calories.

Le total des calories à fournir de nuit est donc égal à : 2.357.200, contre 3.942.800 de jour.

Le total fait bien, 6.300.000.

La puissance électrique théorique nécessaire, si on suppose 10 heures de charge de nuit est donc égale à :  $\frac{235.720}{863} = 273 \text{ KW.}$  pour la nuit.

En tenant compte des pertes, il faudra environ : 500 KW. le jour, 300 KW la nuit si on emploie ce ballon de 30 tonnes.

Si l'on emploie un ballon de contenance inférieure à la consommation

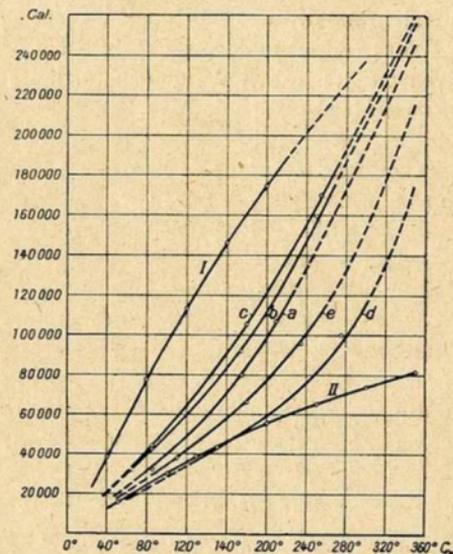


FIGURE 3.

Capacité calorifique de 1 m<sup>3</sup> de substances diverses en fonction de la température.

I. Eau ; II. Pétrole ; a, argile ; b, béton à 1/3 ; c, béton à 1/5 ; d, pierre à four pillée.

journalière, le calcul est légèrement différent. Ainsi pour un ballon de 5 tonnes :

L'autovaporisation donne 368 kilogs. Les 4.632 restants demandent 4.632 (650 — 144,1) = 2.343.792 calories. Et de plus, il faudra porter les 5.000 kilogs non accumulés de 20 à 650 calories par kilog, ce qui représente 3.150.000 calories. Total, 5.493.792 calories exigeant une puissance théorique de jour égale à 635 KW. ou pratiquement de 700 KW. Nous nous servirons de ces résultats au chapitre VI.

Ces explications permettront d'interpréter facilement le diagramme que nous donnons ci-contre d'après le Rapport de l'Association des Ingénieurs électriciens suisses, relatif aux capacités respectives d'accumulation des diverses substances les plus employées (fig. 3).

Nous verrons rapidement maintenant comment calculer approximativement les caractéristiques électriques principales des appareils basés sur le chauffage de l'eau.

**Chauffage électrique de l'eau.** — Le chauffage de l'eau et des solutions aqueuses peut se faire :

- 1° En utilisant leur résistance propre pour le passage du courant ;
- 2° En y plongeant directement le rhéostat qui dissipe ainsi sa chaleur par convection dans le liquide ;
- 3° En utilisant leur résistance propre, combinée avec celle d'un conducteur électrique ;
- 4° En les mettant au contact avec la paroi d'une enveloppe dont l'autre paroi est maintenue à température élevée par radiation ou convection de résistances électriques sous courant.

1° *Chaudières à électrodes.* — Ces chaudières fonctionnent comme des rhéostats liquides. Si l'on ne tient pas compte des effets d'induction et de capacité, on a  $W = V I = \frac{V^2}{R}$ . Par exemple, pour échauffer

1.000 litres d'eau à l'heure de 15° à 95°, il faut fournir 80.000 calories ou 92 K. W. H. Pour tenir compte des pertes, la puissance sera donc de 100 K. W. Avec une tension de 3.000 volts alternatifs, le courant sera de 33 A et la résistance du liquide devra être de 91  $\omega$ .

Le courant doit être amené au liquide par 2 électrodes conductrices si l'on est en alternatif, 3 si l'on est en triphasé. Comme la résistivité de l'eau décroît avec la température, il faudra, pour que l'intensité reste constante, que les électrodes soient relevées ou écartées au fur et à mesure de l'échauffement jusqu'à ce que le régime soit établi. Pour favoriser le mouvement ascensionnel de l'eau chaude, les électrodes doivent être placées vers le fond de la cuve. S'il s'agissait

de vaporiser l'eau, il serait préférable, au contraire, que les électrodes plongent partiellement dans le liquide.

La densité de courant à la surface des électrodes est très variable d'après le but qu'on se propose. On prend de  $10 \text{ cm}^2$ . à  $1 \text{ cm}^2$ . par ampère, suivant que l'eau est plus ou moins pure, et plus ou moins froide à l'arrivée (donc plus ou moins résistante) et que la tension appliquée est plus ou moins faible.

Il faut tenir compte du fait que toute l'eau de la chaudière sert plus ou moins de conducteur au courant et non pas seulement le volume strict compris entre électrodes. Même pour des électrodes planes, la surface arrière est active ; la surface figurant dans le calcul doit être majorée en conséquence au moyen de coefficients expérimentaux.

Si l'on interpose entre les électrodes des diaphragmes annulaires, tubulaires, non conducteurs, on canalise le courant et on peut calculer plus exactement les dimensions (surface et écartement) des électrodes. Ces diaphragmes peuvent être mobiles et servir au réglage de l'appareil en régime ; dans ce cas les électrodes peuvent alors être fixes. Une troisième solution consiste à avoir électrodes et diaphragmes fixes et faire varier automatiquement ou non le niveau de l'eau.

Dans tous les cas, il est préférable d'éviter que le courant ait tendance à emprunter les tôles de la chaudière.

Une chaudière répondant au problème posé ci-dessus, peut être constituée par exemple d'un réservoir cylindrique en tôle, de diamètre environ  $0,80$  à  $1 \text{ m}$ . La hauteur sera donc de  $2 \text{ m}$ . à  $1 \text{ m}$ .  $25$ . Les 2 électrodes supposées formées de plaques de tôle circulaires sont placées l'une au-dessus de l'autre. L'électrode supérieure est mobile. Les dimensions approximatives peuvent être évaluées comme suit :

Ampérage constant :  $33 \text{ A}$ . Résistance constante  $91 \omega$ . A  $95^\circ$  l'eau présente une résistivité de  $1.000 \omega/\text{cm}$ . En supposant qu'à cette température les électrodes soient à  $60 \text{ cm}$ . l'une de l'autre, la résistance par centimètre sera de  $1,5 \omega$ , ce qui exige une section de liquide égale à  $666 \text{ cm}^2$ . On pourra prendre des plaques de  $300 \text{ cm}^2$ . environ, ce qui donne  $9 \text{ cm}^2$ . par ampère.

Plus le voltage est élevé, plus, pour une même distance des électrodes la surface de celles-ci par ampère sera petite.

On ne peut descendre au-dessous d'un certain voltage pour lequel les électrodes auraient un trop grand développement et devraient être si rapprochées l'une de l'autre que la bonne circulation du liquide serait difficile (électrodes superposées), ou que le bouillonnement rendrait le régime instable.

Ainsi à  $500 \text{ v}$ ,  $200 \text{ A}$  et  $2,5 \omega$ , en admettant que les électrodes soient

à 20 cm. l'une de l'autre en régime, on aurait des électrodes de 5 à 6.000 cm<sup>2</sup>.; avec une distance de 30 cm., elles devraient avoir plus d'un mètre carré.

Il n'en est plus de même s'il s'agit de *vaporiser* l'eau, ce qui exige, pour la même quantité d'eau traitée, une puissance de 6 à 8 fois plus forte. L'intensité doit être alors beaucoup plus grande et d'autre part la distance entre électrodes et la tension appliquée peuvent être relativement beaucoup plus faibles. Ainsi, pour 100 KW. ou 130 Kgs de vapeur-heure environ, on pourra prendre 300 volts, d'où  $r = 0,9 \omega$ . Deux procédés sont alors applicables :

Si la résistivité de l'eau n'est pas améliorée artificiellement, elle sera de 1200 à 1300  $\omega$ /cm. Avec une distance d'électrodes de 6 cm. il faudra 8000 cm<sup>2</sup>. d'eau.

Si l'eau est rendue conductrice par adjonction de solution saline, ce qui oblige à bien dessécher la vapeur avant la prise,  $\rho$  peut tomber à 100-150  $\omega$ . Avec une distance de 10 cm. la section d'eau sera alors de 4 cm<sup>2</sup>. par ampère et la surface d'électrodes, de 1 à 1,5 cm<sup>2</sup>. suivant leurs formes et dispositions.

L'arrivée et la sortie de l'eau et de la vapeur doivent naturellement être réglées pour que le régime se maintienne exactement, sinon il faut agir soit sur le voltage, soit sur l'écartement des électrodes.

2° *Chaudières à résistances immergées.* — Pour une première approximation, on peut utiliser les formules des rhéostats immergés. Ces formules sont analogues à celles données plus haut pour les résistances placées en l'air, mais, en raison de la grande facilité avec laquelle la chaleur est transmise à l'eau, les coefficients  $K_1$ ,  $K_2$  sont notamment plus élevés.

Pour le fil de fer maintenu à 195°, on a :

$$I = 50 d^{3/2} \text{ et } l = 0,0825 V d^{1/2}$$

Par exemple, soit une chaudière à calculer pour élever 1.000 litres d'eau par heure de 15° à 95° sous 500 volts. On aura  $I = 200$  et  $R = 2,5 \omega$ . On en tire :

$$d = 4^{2/3} = 2,5 \text{ mm. et } l = 41 \times 1,58 = 65 \text{ mètres.}$$

La surface extérieure du fil = 4.950 cm<sup>2</sup>., pour dissiper 100.000 watts. On a donc à peu près à dissiper 20 watts par cm<sup>2</sup>. Il faudra ménager une circulation intense autour du fil, qu'on enroulera en boudin logé à l'intérieur d'un tube isolant assez incliné de façon à faciliter l'ascension de l'eau chaude.

Si l'on ne dispose pas des tables ou des graphiques relatifs aux constantes des fils, on peut employer les formules approchées citées plus

haut, pour passer d'une série de valeurs à d'autres correspondant à de plus basses ou plus hautes températures du fil.

Ainsi pour faire travailler le fil à 150° ou 423 absolus, on raisonnera comme suit en recherchant d'abord l'ampérage correspondant pour le fil de 2,5 à cette température de 150°.

On a :

$$\frac{200^2}{I^2} = \left(\frac{468}{423}\right)^2,$$

$$\text{d'où : } I = 160 \text{ A.}$$

(La constante  $K_1$  à 150° est donc donnée par :  $160 = x \cdot 2,5^{3/2}$  d'où  $x = 41$ ).

On a ensuite :

$$\frac{160}{200} = \left(\frac{2,5}{d}\right)^{3/2}$$

$$\text{d'où : } d = 2,9$$

La résistivité à 150° est égale à  $0,09 (1 + 150 \times 0,0063) = 0,18$ .

On a donc  $s = 6,6 \text{ mm}^2$ , donc  $l = 94 \text{ mètres}$ .

Le taux de transmission sera alors de  $\frac{100.000}{9.400 \times 0,9} = 11,5 \text{ watts par cm}^2$ .

3° *Chaudières à résistances combinées.* — Ce 3<sup>e</sup> type est très intéressant toutes les fois que le régime thermique de la chaudière ne peut être maintenu constant — soit que l'alimentation en eau froide, soit que la consommation d'eau chaude soient intermittentes — bien que la puissance électrique à absorber doive rester aussi constante que possible.

En effet nous avons vu que le fer et l'eau, en s'échauffant, ont des résistivités qui varient en sens inverse. En proportionnant convenablement les dimensions des deux circuits métallique et liquide, on peut arriver à maintenir sensiblement la constance du régime quelle que soit la température de l'eau.

Les diverses formules données plus haut peuvent encore servir pour fixer les valeurs approximatives des deux circuits.

Soit encore :  $P = 100 \text{ KW}$ , et soit  $V = 1.000 \text{ volts}$ ,  $I = 100 \text{ A}$ . Admettons que le fil métallique doive travailler à environ 200° lorsque l'eau est à 95°. Si  $F$  est la puissance du circuit métal à chaud et  $H$  celle du circuit eau, on a  $F + H = 100$ .

D'autre part, à 15°, la résistance métallique aura sensiblement la même différence de température avec l'eau c'est-à-dire 105°. Le fil travaillera donc à 120° environ, sa résistance aura varié dans le rapport de 1,756 à 2,26, la puissance  $F^1$  sera donc égale à 1,29  $F$ . Quant à  $H^1$ ,

il est égal à  $\frac{H}{3}$  à cette température. On a donc :  $1,29 F + \frac{H}{3} = 100$ .  
d'où :  $F = 69$      $H = 31$ .

La résistance du circuit métallique =  $\frac{69.000}{100^2} = 6,9 \ \omega$ . Comme :  
 $100 = 50 \ d^2/2$ , on a  $d = 1,6$ ;  $s = 2 \ r_{200} = 0,21 \ \omega/m/mm^2$ . d'où :  
 $l = 65$  mètres, soit deux tronçons de  $32^m,5$  chaque, roulés en boudin  
à l'intérieur d'une gaine isolante.

La résistance du circuit liquide à  $95^\circ = \frac{31.000}{10.000} = 3,1 \ \omega$ . Avec un  
entr'axe des électrodes égal à 70 cm., on aura  $\frac{70.000}{3,1} = 22.500 \text{ cm}^2$ .  
comme section d'eau.

On pourra réaliser ce circuit, si le ballon est assez vaste, avec 2 bou-  
dins de gros fil de fer enroulés sur un diamètre de 45 cm. et ayant une  
hauteur de 70 cm. La surface du fer d'une électrode, en prenant du fil  
de fer de 3 mm., long de 10 m., sera de  $1.000 \text{ cm}^2$ , c'est-à-dire  $10 \text{ cm}^2$ .  
par ampère. Pour réaliser le boudin demandé, il devra être enroulé en  
7 spires écartées de 10 cm. Si le volume du ballon ne permet pas d'at-  
teindre de si grandes dimensions pour les 2 boudins électrodes, on pourra  
très bien descendre jusqu'à 50 cm. d'entr'axe des boudins, d'où :

$$\frac{50.000}{3,1} = 16.200 \text{ cm}^2. \text{ de section d'eau.}$$

Les boudins auraient alors un diamètre de 40, une hauteur de 50.  
Avec 6 m. de fil de fer, on aura  $6 \text{ cm}^2$ . par ampère, ce qui est très suffisant.

Bien entendu, toutes ces valeurs ne sont qu'approchées; on ne peut  
définir exactement les dimensions réelles qu'après une mise au point  
expérimentale.

4° *Chaudières à bouilleurs.* — La chaleur est alors produite comme  
dans des chaudières ordinaires, à l'intérieur d'une enveloppe étanche  
noyée dans le liquide, par le passage du courant dans la résistance.  
Cette chaleur est transmise à l'enveloppe très bonne conductrice de la  
chaleur et soigneusement isolée électriquement de la résistance. Cette  
chaleur passe au liquide par convection. Les formules des résistances  
métalliques s'appliquent pour la transmission de la chaleur à l'enve-  
loppe et celles de Pécelet et autres à la transmission de l'enveloppe à  
l'eau, comme nous l'avons déjà vu.

## DEUXIÈME PARTIE

### Le Chauffage électrique actuel

---

#### CHAPITRE III

#### Les Réseaux de Distribution et le Chauffage électrique

Il est superflu d'insister sur ce que le coût élevé du K.W.H. est actuellement le plus grand obstacle au développement du chauffage électrique, quels que soient tous ses avantages incontestés : instantanéité, propreté, commodité, etc...

Le problème du chauffage électrique ne consiste donc pas à apporter quelques perfectionnements ? souvent très discutables aux appareils d'utilisation, comme la généralité des constructeurs s'y ingénie, mais bien à modifier les conditions actuelles d'exploitation des Distributions d'Énergie Électrique en vue d'abaisser jusqu'à l'extrême limite le prix de l'énergie destinée au chauffage. Quelques millièmes, quelques centièmes même de plus ou de moins pour des appareils dont le rendement est forcément supérieur à 90 % ne signifient rien, tant que le prix du courant rend ce chauffage de 8 à 10 fois plus onéreux que le chauffage au charbon.

Nous examinerons donc de suite : le rôle des distributeurs de courant, les conditions actuelles de fourniture par les Secteurs de Distribution et les imperfections de l'organisation actuelle. L'organisation que nous préconisons pour le développement intensif du chauffage fera l'objet d'une seconde partie.

**Le chauffage électrique devant les Secteurs.** — Une question se pose immédiatement :

Les Secteurs ont-ils intérêt à vendre du courant pour le chauffage électrique en grand ?

On peut radicalement poser en principe que les Secteurs, en France tout au moins, ne font rien pour développer le chauffage électrique, parce qu'ils n'y ont aucun intérêt.

Au point de vue commercial, les Secteurs sont partagés, en fait, en trois groupes très distincts : îlots, permissionnaires, concessionnaires.

Les deux premiers, en général, ont une importance trop faible pour envisager la fourniture de grosses quantités d'énergie, le tarif



put-il être même celui d'éclairage. Le but de ces entreprises est, en effet presque uniquement l'éclairage et comme appoint, la petite force motrice avec horaires strictement limités. De plus — et cette remarque s'applique également aux concessionnaires — un Secteur cherchera toujours à répartir la vente de la même quantité d'énergie entre le plus grand nombre de clients d'importance la plus minime possible.

Les raisons en sont très simples :

Le total des puissances souscrites peut être en effet très supérieur dans ce cas à la puissance réelle nécessaire à l'usine. Les clauses de minimum de consommation par kilowatt souscrit (1), ou l'application de la formule binôme forcent donc la recette garantie par kilowatt installé à l'usine.

D'autre part, chaque police, si faible soit elle, entraîne le paiement d'un certain nombre de redevances dont le montant est indépendant de la consommation (location, entretien de branchement, de compteur, etc...) mais dont le taux croît bien moins vite que la valeur de la puissance souscrite. Le Secteur a donc tout intérêt à avoir le plus possible de petits clients. D'ailleurs ces petits clients sont bien plus faciles à mener que les gros en cas de contestation. Cette diffusion de la puissance installée donne beaucoup de travail aux petits installateurs locaux ; l'on contente ainsi le plus de monde possible, etc...

Tout cela est surtout vrai pour les Secteurs concessionnaires d'éclairage avec monopole qui préfèrent réserver ainsi toute leur puissance pour satisfaire leurs clients obligés d'éclairage au prix fort. Les Secteurs auront donc toujours tendance à garder leurs réserves pour de nouveaux clients d'éclairage ou usagers payant pour tels, c'est-à-dire surtout les clients de chauffage par petits radiateurs portatifs. (En effet, si le Secteur consent pour le chauffage des tarifs plus faibles que le tarif lumière, ou y est tenu par son Cahier des Charges, le client devra payer un deuxième compteur avec ses location, entretien, garantie de minimum de consommation, avance sur consommation, etc... ce qui fait que la plupart des clients préfèrent encore payer au tarif fort sans deuxième compteur).

Cela est aussi vrai, que le Secteur produise lui-même son courant ou qu'il l'achète pour le revendre :

Dans le premier cas, il est tenu par la puissance maxima de ses installations. Dans le second cas, il jouit en général d'un contrat soit à forfait pour tant de kilowatts permanents de base, plus pénalité pour

---

(1) Pour toutes ces questions de tarifs, voir mon étude " *Production et vente de l'Énergie Électrique* ". DUNOD et C<sup>ie</sup> Éditeurs.

chaque K.W.H. de dépassement, soit à formule binôme d'après la pointe moyenne ou maxima enregistrée et le nombre de K.W.H. consommés. Or, il ne se soucie pas d'encourir des pénalités, et ne désespère jamais de placer un jour, au prix fort, ce qui lui reste de disponible à certaines heures de la journée sur le montant de son forfait, ou sur la pointe déjà enregistrée par l'indicateur de maximum.

Cependant il ne fera pas que la clientèle puisse avoir besoin de lumière de 7 heures du matin à 5 heures du soir et même de 2 heures à 5 heures du matin. Il s'adressera donc à la force motrice, mais cela sera rarement suffisant et de plus sera toujours gênant aux deux pointes du soir et du matin, tandis que le creux de midi à 14 heures constitue une véritable perte sèche.

C'est donc en général un calcul faux qu'il fait et son intérêt bien compris lui commanderait de favoriser les usages domestiques de l'électricité et en particulier le chauffage, aux moments où la demande de courant lumière ou force motrice est le plus faible, en faisant payer l'énergie à peine plus cher que son prix réel de production.

**Conditions actuelles de fourniture de courant-chauffage.** — Quelques Secteurs, concurrents de Compagnies de gaz, se sont déjà engagés dans cette voie. Naturellement les Compagnies mixtes de Gaz et d'Électricité les ont suivis avec beaucoup plus de répugnance, car pour elles la fabrication du gaz et de ses sous-produits passe avant tout et l'éclairage comme le chauffage à l'électricité sont un luxe qui doit payer largement.

Deux méthodes se présentent pour l'application : le Secteur peut consentir des tarifs différents suivant que l'heure où se produit la demande de consommation est plus ou moins favorable à la Centrale, de façon à remplir autant que possible les heures creuses du diagramme journalier. On peut arriver à distinguer jusqu'à quatre tarifs différents : tarif de jour, de pointe, de nuit, et de midi à 14 heures. Mais le client n'a généralement pas l'emploi de ses radiateurs, cuisine, etc..., pendant la nuit, et c'est justement la période la plus longue et durant laquelle le Secteur pourrait céder l'énergie au plus bas prix.

La seconde méthode consiste alors à vendre à prix très réduit le courant pendant les huit à neuf heures de faible charge de nuit, de façon à permettre aux clients d'accumuler cette chaleur dans des poêles spéciaux qui la restituent durant la journée, l'alimentation du courant étant coupée. Cette méthode est actuellement très en faveur en Suisse où le courant de nuit se paye de 2 à 3 centimes le K.W.H. L'appareillage comporte des poêles spéciaux commandés par controllers horaires



automatiques réglables à la volonté du Secteur (appareillages Sauter, Oerlikon et Ghilmetti).

L'application de la première méthode est assez compliquée. L'établissement des différents tarifs suivant les heures de la journée, et non d'après l'utilisation de la puissance installée ou l'emploi de l'énergie fournie, est d'abord, on le conçoit, des plus délicats. De plus, comme les horaires de chauffage, de cuisine, sont sensiblement les mêmes pour tout le monde à la fois, on peut très bien aboutir à des pointes exagérées nécessitant la mise en marche pour quelques instants d'unités supplémentaires à la Centrale, pour subvenir à cette consommation payée à prix réduit, ce qui est un véritable contre-sens.

Les heures où la clientèle aura besoin de se chauffer, peuvent d'ailleurs être très différentes de celles où les creux du diagramme permettront de fournir le courant de chauffage à bas prix. Il suffit de l'arrivée d'un nouveau client important pour fausser toute la combinaison, car on ne peut modifier continuellement tarifs et horaires correspondants.

Cette solution n'est donc praticable que dans certains cas particuliers.

La seconde méthode est certainement plus pratique, surtout pour le chauffage des appartements, des immeubles, des locaux industriels, salles de spectacle, hôtels ainsi que pour le chauffage de l'eau pour tous usages domestiques ou industriels, les fours de boulangers, pâtisseries, etc...

Les deux méthodes pourraient d'ailleurs être employées conjointement, le Secteur prenant comme directive de ne fournir le courant à prix réduit au client que si ce dernier s'engage à installer l'un ou l'autre genre d'appareillage conformément à ses indications et suivant qu'il se prête le mieux à la régularisation de la charge totale à l'usine ou au poste de livraison s'il s'agit d'une Société revendeuse.

Mais on conçoit que cette sujétion ne soit pas facilement admise de la clientèle, car les frais d'installation de même que les prix de l'énergie seront loin d'être les mêmes dans les deux cas.

D'ailleurs il faut noter que les tarifs spéciaux, qui seraient ainsi consentis en vue du chauffage électrique, n'étant pas homologués, les Secteurs se réservent toujours de les supprimer purement et simplement sur préavis très court et de revenir au Tarif maximum. Comment, dans de telles conditions un particulier oserait-il se lancer dans une installation importante et coûteuse ?

Seuls, des industriels ou gros propriétaires d'immeubles qui ont signé des contrats de longue durée peuvent s'y hasarder, mais encore faut-il qu'ils les aient signés en pleine connaissance de cause et qu'ils

se soient donné la peine d'étudier de pair dispositif général d'installations et conditions de fourniture de courant pour tirer le maximum d'avantages possible de la combinaison.

Par exemple, si un industriel obtient un forfait pour une certaine puissance permanente de base qu'il n'utilisera pas constamment, il peut avoir intérêt à accumuler la chaleur pendant ses propres heures creuses. Mais s'il paie le courant au compteur et, de par sa fabrication, est à peu près sûr de dépasser son minimum annuel garanti, il peut très bien, suivant les échelons de son barème dégressif, avoir intérêt ou non à faire cette accumulation.

**Où chercher causes et remèdes.** — D'après tout ce que nous venons de dire, on se rend compte que c'est avant tout le mode actuel de fourniture et de vente de l'énergie électrique par les Sociétés productrices aussi bien aux Compagnies revendeuses qu'aux usagers directs, qui en rend le prix souvent inabordable pour le chauffage électrique. Sous peine d'exiger un appareillage plus onéreux que l'économie à réaliser, ces contrats actuels, qu'ils soient à forfait ou au compteur, avec ou sans formule binôme, minimum garanti, barèmes dégressifs, tarifs multiples suivant l'heure, la saison, etc..., ne sont pas suffisamment souples ou sont trop compliqués pour favoriser le développement du chauffage à tarif réduit.

Les Producteurs, vendeurs directs à la clientèle seraient naturellement les mieux placés, mais ils cherchent avant tout à réduire au minimum leurs soucis d'exploitation en ne traitant qu'avec les très gros usagers directs et les Compagnies revendeuses.

Les responsables de cet état de choses sont nombreux car il ne s'agit pas d'incriminer les Secteurs seuls : le législateur de 1906, l'Administration et le public lui-même ne sont pas exempts de reproches :

Les frais d'établissement d'un réseau de distribution pour chauffage électrique sont de 6 à 10 fois plus élevés pour la même clientèle qu'un réseau éclairage. Par contre les prix de vente praticables sont, nous le verrons, de 6 à 10 fois plus faibles pour le chauffage que pour l'éclairage. Or, le législateur qui, en 1906, ne pensait guère à la crise du charbon et du gaz, pas plus qu'au développement de l'utilisation de la houille blanche, n'a pas cru pouvoir inciter par l'octroi d'un monopole ou de tout autre avantage ou garantie, les Compagnies de distribution à faire les frais des installations coûteuses que demande le chauffage électrique. Il est donc naturel que ces Compagnies se cantonnent dans le développement intensif de l'éclairage électrique et de la petite force motrice à tarif fort.



L'Administration n'a pas cherché non plus, en rédigeant ses Règlements d'application et Cahiers des charges types, à favoriser le développement du chauffage qu'elle fait rentrer dans l'ensemble des « usages autres que l'éclairage ». Rien, il est vrai, dans la loi de 1906 qu'elle était chargée de mettre en application, ne pouvait l'autoriser à faire une distinction en faveur du chauffage électrique et elle s'est bornée à stipuler que « [des tarifs maxima différents pourraient être fixés suivant les conditions de puissance, d'horaire, d'utilisation, de consommation, etc... ». C'est déjà beaucoup et l'autorité concédante qui voudrait et saurait se servir de cet alinéa pour opérer une pression sur le demandeur en concession ou concessionnaire actuel, arriverait certainement à en obtenir une amélioration des conditions de fourniture du courant en vue du chauffage électrique.

Ajoutons à cela que le client a toujours l'habitude de ne s'adresser à des Conseils compétents que lorsque le mal est fait, que le litige est soulevé. Il ne craint pas à ce moment de s'adresser à qui de droit pour le défendre, mais il ne lui serait pas venu à l'idée de le faire avant d'accepter la police, le contrat, le devis de fournitures, etc... Il peut difficilement apprécier par lui-même l'opportunité ou la valeur des offres qu'il reçoit directement de tout un monde de constructeurs, installateurs, revendeurs, placiés, etc..., mais il préférera toujours s'y adresser plutôt qu'à un Conseil indépendant et qualifié pour le guider en tenant compte de ses besoins et des conditions qu'il peut obtenir du Secteur. Une installation très bonne, en elle-même, peut donc être très mauvaise en réalité, du fait qu'elle ne correspond pas aux conditions de fourniture du courant que le client s'est laissé imposer par le Secteur.

Les conditions actuelles ne sont donc guère favorables au développement du chauffage électrique et, comme nous venons de le voir, elles ne pourront guère devenir meilleures qu'en rompant délibérément avec la politique actuelle des Distributions d'Énergie Électrique. Car, au fond, lorsque nous insistons sur le chauffage électrique, c'est non seulement parce que ce mode de chauffage constitue un progrès énorme au point de vue de l'hygiène, de la commodité, du bien-être en général, mais parce qu'il contribuera au rétablissement de notre prospérité économique en permettant d'utiliser les centaines de milliers de kilowatts encore disponibles dans nos chutes hydrauliques non captées et d'économiser des centaines de mille tonnes de charbon indispensables, elles, à nos usines métallurgiques. Mais alors, la force motrice électrique à bon marché est au moins aussi désirable, si ce n'est plus encore, et l'on ne concevrait pas que le développement de l'un se fasse au détri-

ment de l'autre, que le particulier puisse se chauffer commodément et à bon marché aux frais de l'usiner. Pourquoi oublier d'ailleurs l'éclairage électrique que l'on ne peut tout de même plus appeler un éclairage de luxe alors que, même aujourd'hui, il est plus économique que la chandelle ou le pétrole (1).

Le problème est donc de considérer toutes les utilisations possibles de l'énergie électrique et au lieu de les classer, comme on a tendance à le faire, par ordre de réalisations successives, faire à chacune sa part dès maintenant afin que chacune de ces applications puisse contribuer de suite à l'amélioration du prix de revient du K.W.H. par l'utilisation poussée à l'extrême des installations des Centrales et des réseaux.

C'est cette idée que nous développerons dans la 3<sup>e</sup> partie de cet ouvrage.

Nous allons d'abord passer en revue les diverses applications du chauffage électrique tel qu'on le conçoit actuellement.

---

(1) Une lampe à pétrole consomme 4 grammes par bougie-heure. Un kilog. de pétrole raffiné, valant 1 franc, donne donc 250 bougies-heure. Le kilog. de pétrole non raffiné, et coûtant au plus 50 centimes, utilisé dans un moteur commandant une génératrice électrique, permettra de fournir aux clients d'un réseau, 2,5 K.W.H ou 5.000 bougies-heure, en utilisant des lampes 12 watt, c'est-à-dire 20 fois plus, pour une dépense de moitié. Si l'on fait intervenir toutes les charges d'usine, de réseau, etc... le rendement en éclairage électrique n'en reste pas moins de 10 à 15 fois supérieur au rendement en éclairage au pétrole.



## CHAPITRE IV

### La Cuisine Électrique

**Principes d'établissement des appareils.** — Les principaux appareils auxquels peut s'appliquer le chauffage électrique sont : les petits fours de cuisine, les plaques chauffantes, les grils à feu nu, les bouilloires et appareils à chauffer l'eau, les gros fours de boulangers, etc...

*Fours* : La température que doit pouvoir atteindre l'intérieur d'un four est d'environ 300°. Le chauffage peut se faire, soit en logeant à demeure dans la paroi des résistances où circule le courant, cette paroi étant elle-même isolée de l'air ambiant par une couche calorifuge, soit en plaçant à l'intérieur du four un réseau résistant monté sur grille mobile ou fixe, qui chauffe les parois principalement par radiation.

Il est nécessaire de chauffer aussi rapidement que possible, d'abord pour réduire les pertes inévitables, puis, surtout dans les petits fours, pour que la restitution de chaleur soit elle-même rapide, sans quoi la cuisson tire en longueur, l'objet se dessèche au lieu d'être saisi, pour employer l'argot cuisinier. La paroi intérieure de ces petits fours doit donc accumuler et restituer assez vite toute la chaleur nécessaire, et aussi peu que possible de chaleur en plus. Il faut donc choisir des matières assez bonnes conductrices de la chaleur et douées d'un pouvoir absorbant ou radiant convenable.

A cette catégorie d'appareils se rattachent les enveloppes garde-chaleur dont le type est la marmite norvégienne. On en connaît le principe : La marmite métallique et son contenu sont préalablement chauffés sur un feu ordinaire ou réchaud à gaz ou électrique. Dès que l'ébullition est en train, on place le tout dans l'enceinte aussi bien calorifugée que possible, où la cuisson se continue, ce qui permet de retirer les aliments cuits à point et prêts à être servis, de nombreuses heures même après le commencement de la cuisson. Un perfectionnement à ces marmites telles que nous les connaissons généralement, en France tout au moins, consiste à entretenir sous le réceptacle métallique la chaleur nécessaire pour compenser les pertes, au moyen d'un petit radiateur électrique automatique ou non. Nous en verrons un exemple dans les appareils de la Société suisse Therma et de la Société norvégienne Westinghouse.

*Plaques chauffantes* : Les plaques chauffantes remplacent les couronnes à gaz, les plaques de poêles cuisinières au charbon.

La température de la surface active doit pouvoir atteindre 350° à 380°. Elles transmettent la chaleur à peu près uniquement par contact, la température étant trop peu élevée pour que la radiation puisse jouer un rôle important.

Il faut donc que le contact entre la casserole et la plaque soit aussi parfait que possible. C'est en général par là que pèche ce système, car il n'est de casserole ni de plaque qui à la fin ne se bombe ou ne se gondole. D'autre part, toute la chaleur dissipée par la surface annulaire qui dépasse l'encombrement de la casserole est à peu près dépensée en pure perte, au moins sur les appareils actuels où on peut bien régler la valeur du courant et même, dans certaines plaques (Calor en particulier), répartir la chaleur sur la plaque à volonté, mais où on ne peut empêcher les déperditions par la surface annulaire non recouverte. Les appareils à plaque nickelée et bien polie ont l'avantage de dissiper le moins possible de chaleur par cette surface annulaire, mais il semble qu'un perfectionnement intéressant pourrait être de construire les plaques par anneaux concentriques isolés thermiquement l'un de l'autre et chauffés individuellement par des résistances disposées sous eux en forme de cercle et qu'on pourrait mettre à volonté en série ou en parallèle.

On obtiendrait ainsi le véritable équivalent des bouches actuelles des poêles-cuisinières à charbon dont on augmente à volonté le diamètre en enlevant un ou plusieurs « cercles », en même temps qu'on peut régler l'allure du feu, par la quantité de charbon et le tirage. Les plaques en cercles concentriques de la maison « Calorique électrique » se contentent de copier la disposition des fourneaux de cuisine au charbon, mais comme elle ne sont pas isolées thermiquement, l'effet inutile de convection se produit comme si la plaque était d'un seul tenant. Leur avantage par contre est d'exposer la casserole à la radiation directe de la source de chaleur formée par des filaments enroulés sur des supports en terre réfractaire blanche, le tout porté à l'incandescence

En tous cas, les plaques, en raison de la masse de leur face active, des supports isolants, du bâti, demandent pour s'échauffer elles-mêmes une certaine quantité de chaleur qui est fatalement perdue en fin d'opération et qui exige un certain temps de mise en train.

*Appareils à feu nu.* — C'est pour obvier à ces inconvénients que certaines maisons américaines leur préfèrent les appareils à feu nu. Ceux-ci se composent d'un bâti très léger supportant les résistances

généralement en nikron — métal spécial américain — sous forme de boudins portés au rouge. Un grillage protecteur sert en même temps à supporter les marmites, casseroles, etc... La chaleur est donc transmise par radiation, car on s'arrange pour réduire au minimum indispensable la convection, comme nous l'avons déjà vu. L'avantage de ces appareils est qu'ils peuvent chauffer ou dessus ou dessous ou les deux à la fois. Ils combinent le gril et la plaque chauffante. Ils sont mis en train en quelques secondes et occasionnent aussi peu de pertes que possible.

*Bouilloires.* — Tout ce que nous avons dit au sujet du chauffage de l'eau peut leur être appliqué. Elles sont toujours en métal nickelé ou poli de façon à donner lieu au moins de pertes possible par radiation. En général la résistance est logée dans le double fond ou dans la double paroi sous forme de ruban ou filament enroulé sur une substance isolante : mica, amiante, etc... Dans les grosses bouilloires de cuisine contenant plus de 10 litres d'eau, le chauffage est souvent obtenu au moyen d'un corps de chauffe contenant les résistances et plongeant dans le liquide. On construit également des corps de chauffe mobiles que l'on peut plonger dans l'eau contenue dans un réservoir quelconque.

**Consommations et rendements.** — Les catalogues des constructeurs indiquent la puissance normale et éventuellement les puissances graduées que peut donner chacun de leurs appareils sous la tension normale.

On sait en effet que dans les appareils dépassant quelques hectowatts, le circuit est composé de plusieurs éléments qui peuvent être mis séparément ou conjointement sous tension de façon à réaliser une gamme convenable de puissances. Nous avons donné au chapitre I deux exemples de ce calcul.

La puissance inscrite sur l'appareil sera réellement absorbée si l'on a bien le voltage indiqué et quelle que soit la marque de l'appareil, si le constructeur est consciencieux : le tout est qu'elle soit utilisée au mieux pour le but qu'on se propose. C'est ce que l'acheteur a souvent peine à admettre et ce que malheureusement bien des revendeurs, qui vendent cet article comme ils vendraient du pain d'épice, ne sont pas toujours en mesure de lui faire comprendre.

Une partie de la chaleur fournie à l'appareil est dissipée en pure perte par convection, radiation, une autre sert à chauffer l'appareil proprement dit et le reste constitue la puissance réellement utilisée. Des essais exécutés en 1917 par l'Association des Ingénieurs Electriques suisses, à laquelle il faut bien recourir quand on veut avoir un

renseignement sérieux en matière de chauffage électrique, ont donné par exemple les résultats suivants en ce qui concerne les bouilloires et plaques chauffantes :

Tableau I

Jusqu'au moment où l'eau bout dans toute sa masse :	BOUILLIOIRE		PLAQUE chauffante
	à cuisson rapide	ordinaire	
Energie utile.....	87,0	77,7	63,5
Energie employée pour chauffer l'appareil .....	8	11,5	29,0
Energie perdue par rayonnement.	5	10,8	7,5
Puissance moyenne en watts ....	810	895	1047
Rendements pendant la cuisson en %.....	89,7	84,3	82,3

Les poêles à frire ont donné des rendements de 80 à 88%.

L'industrie de ces appareils ayant certainement fait des progrès depuis ce temps, il est probable qu'on dépasse 90 % de rendement avec les meilleurs appareils modernes.

Les consommations ont donc tendance à diminuer avec le perfectionnement des appareils, mais il ne s'agira jamais que de quelques centièmes de rendement à gagner. On peut donc dès maintenant avoir une idée assez exacte de ce que coûte la cuisine électrique d'après les divers mets à préparer.

Il n'est pas déplacé de faire figurer ici quelques renseignements pratiques à cet égard :

Un petit four à rôtir de cuisine consomme à peu près 500 watt-heures par kilog. de viande. La température doit être de 300° pour le bœuf, l'agneau, le mouton, le porc, le veau. au moment où la pièce est mise au four. Pour les fruits et les légumes au four, la température de 180° suffit. Le pain demande 280° et 1 heure à 1 h. 1/2 de cuisson suivant grosseur. Un beefteak sur le gril demande environ 5 minutes de cuisson en consommant 80 w. h. par personne. La puissance est donc de 800 à 1.000 watts ; la surface de radiation est de 3 à 6 dm<sup>2</sup>, donc de 4 à 7 dm<sup>2</sup> par K.W. sur les petits appareils de ménage. Un litre d'eau à bouillir demande environ 12 à 18 minutes et exige de 120 à 140 w.h, etc...



Tous ces appareils, de même que les lampes à incandescence, ne peuvent supporter qu'un nombre limité d'allumages et d'extinctions. L'Association suisse a entrepris des essais de résistance, à ce point de vue. Certaines bouilloires ont claqué au millième allumage, d'autres ont tenu plus de 7.000 sans qu'il apparaisse de défauts. Pour les plaques, les unes ont claqué au centième, d'autres au neuf centième allumage.

Un essai très important est celui qui consiste à tenir les appareils sous courant et vides d'eau ; la plupart des bouilloires essayées ont tenu ainsi plus de 2 semaines ! Les autres appareils, plaques en fonte ou grils à feu nu sont construits de façon à rester sous courant même à vide, leur chaleur se perdant naturellement par convection et radiation, de telle sorte que la température de la résistance ne dépasse pas une limite convenable.

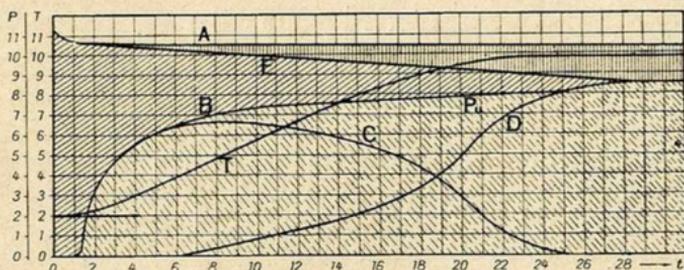


FIGURE 4.

Résultats d'essai d'une plaque chauffante (association des Ingénieurs électriciens suisses).

Le graphique (*fig. n° 4*), emprunté au Rapport ci-dessus, exprime les résultats des essais d'une plaque chauffante qui supportait une casserole ordinaire contenant 2 litres d'eau. La puissance de la plaque était de 1.000 watts. Les abscisses sont graduées en minutes.

La courbe A est celle de la puissance fournie à l'appareil : on voit que la résistance a un coefficient de température très faible, le pompage au démarrage est presque insignifiant. La courbe B est la courbe de la puissance absorbée réellement par l'eau.

La différence entre A et B donne donc les pertes à chaque instant. La courbe C est celle de la puissance nécessaire pour élever la température de l'eau. Au bout de 6 minutes, l'eau commence à bouillir, au bout de 28 elle bout dans toute la masse, la puissance C est nulle. La courbe D représente la puissance absorbée par la vaporisation seule. La somme  $C + D$  représente donc la puissance utile (courbe B). A partir de la 28<sup>e</sup> minute, cette puissance totale reste constante. La

différence entre la courbe A et la courbe B représente les pertes par rayonnement et convection. La portion de courbe E, qui joint l'origine de la courbe A en régime permanent au point de la courbe B correspondant à l'abscisse 28 minutes, sépare les pertes par rayonnement (entre A et E) des pertes par échauffement de la plaque elle-même (entre E et B).

Ce graphique permet de calculer les rendements en puissance et en énergie de l'appareil. Le premier rendement s'obtient immédiatement par comparaison des ordonnées B et A correspondant à chaque abscisse. Le second serait beaucoup plus apparent si l'on avait transformé le diagramme en traçant les courbes intégrales des surfaces délimitées par les différentes courbes A, B, C, D ci-dessus. C'est avec cette méthode qu'ont été établis les tableaux dont celui reproduit ci-dessus relatif à 3 appareils type, ainsi que le suivant relatif aux valeurs moyennes obtenues sur l'ensemble des appareils, comme pertes et rendements en %.

Tableau II

DÉSIGNATION des appareils	PERTES		RENDEMENT	
	par rayonnement	pour élever la température de l'appareil	jusqu'au bouillon- nement	pendant la cuisson
Bouilloires à cuisson rapide .....	3 à 7	8 à 12	78 à 87	85 à 90
Bouilloires à cuisson lente.....	6 à 11	10 à 25	70 à 81	80 à 89
Plaques chauffantes et casserole ordinaire	7 à 20	30 à 40	40 à 65	70 à 83

Comme illustration de ces aperçus théoriques nous allons donner une description rapide de quelques appareils type.

**Descriptions d'appareils.** — Dès l'Exposition de 1900, la Maison Parvillée Frères avait réalisé les premiers appareils vraiment pratiques de cuisine électrique.

Le gril électrique du Restaurant de la Féria, contenait un four à rôtir, un gril à feu vif, et un chauffe-assiettes superposés.

Le four de surface 70×50 et de 40 de hauteur, était à température réglable par variation de résistance du circuit pendant la cuisson. Il consommait au maximum 6 KW sous 110 volts. On pouvait y cuire un rôti de 45 kilogs en 3 heures ce qui correspond à 400 W.H. par kilog. de viande.

Le gril de 65×40 et de 30 de hauteur consommait 8 K.W.

Sa surface radiante était donc de 3,25 cm<sup>2</sup> par K.W.

Les fourneaux à plaques chauffantes servaient pour toutes les autres préparations de mets. Un repas consommait en moyenne 450 W.H.

Le gril représenté (Fig. 5) est de dimensions un peu moindres et convient pour grill-room, restaurant ou grande cuisine.

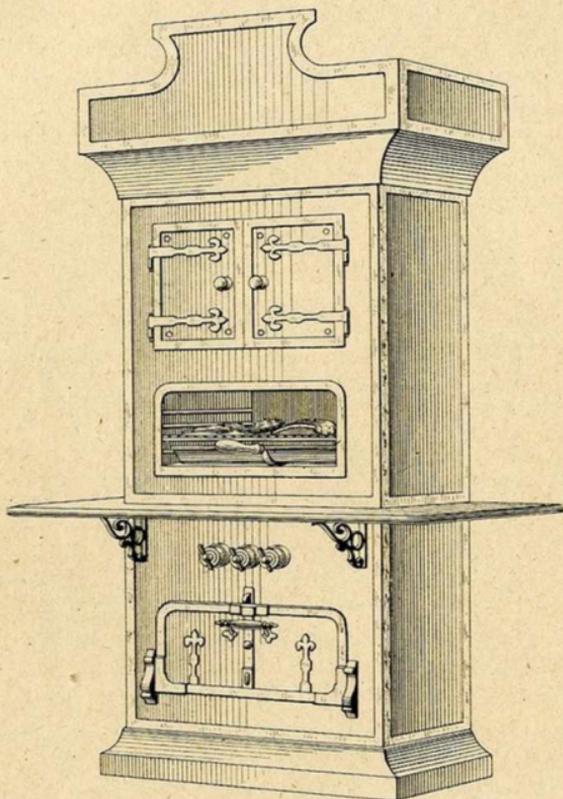


FIGURE 5.

Gril de la Maison Parvillée, pour restaurant.

Depuis ce temps, ce sont les pays de houille blanche comme la Suisse, la Norvège, l'Italie où le courant est relativement bon marché ou bien les pays de houille noire où le souci du confort et de la rapidité passe avant toute question d'économie comme l'Angleterre et l'Amérique, qui ont fourni les spécimens les plus intéressants d'appareils et doivent nous servir de modèles tout au moins pour l'instant.

Un constructeur français, exposant à la Foire de Lyon, auquel je demandais pourquoi il ne faisait pas un effort pour présenter un appareil au moins comparable aux bons modèles courants suisses ou américains, me répondait qu'étant surchargé de commandes d'appareils de pacotille, il n'avait pas la moindre envie de se lancer dans une autre fabrication ! Evidemment, si nous en sommes là.....

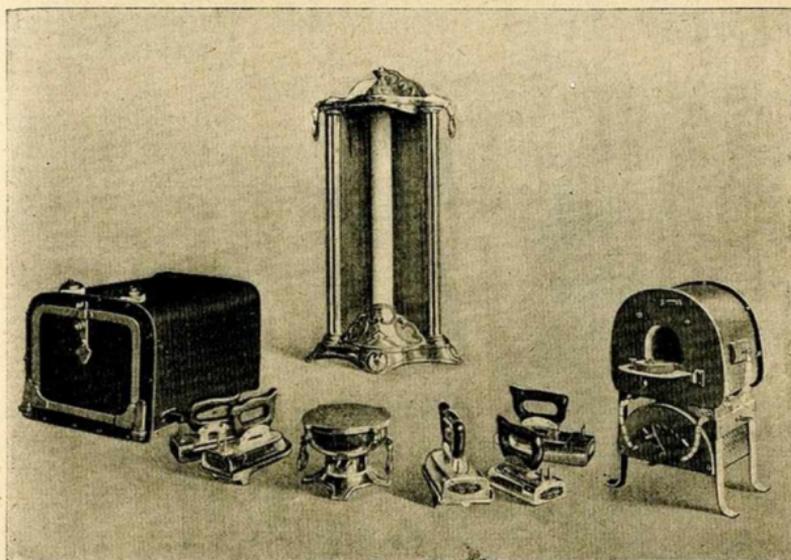


FIGURE 6.

Four de cuisine, fers, plaque chauffante, four de laboratoire, de la Société du quartz fondu.

A signaler cependant une nouvelle plaque chauffante de la Société du Quartz fondu à Largentière-la-Bessée, d'une conception très ingénieuse, représentée figure 6. Le filament est enroulé sur un champignon en quartz fondu placé au centre d'un bol métallique avec garniture réfractaire et surmonté de la plaque-chauffante, percée d'un certain nombre d'orifices. La radiation du champignon et du fil incandescents favorisée par les orifices dont nous venons de parler se combine avec la conduction de la plaque pour donner un chauffage rapide et violent. Un four de cuisine avec éléments chauffants montés également sur supports en quartz fondu, ainsi qu'un petit four de laboratoire permettant d'atteindre en quelques minutes  $1.400^{\circ}$  sont également exposés et représentent à peu près tout ce qu'il y a d'original et d'intéressant dans cette Section. Voir également figure 6.

Comme petits appareils à feu nu, nous citerons les appareils de la firme américaine Hotpoint et de la maison anglaise Belling.

La figure 7 représente un petit appareil fort bien conçu et très pratique de la première, absorbant 5,4 ampères sous 110 volts avec deux réglages supplémentaires l'un à moyenne, l'autre à basse température, avec le même bouchon prise de courant, ce qui est un avantage sur les appareils où les trois prises en porcelaine sont séparées et exigent une épaisseur sur un des cordons souples. Ces prises séparées ont aussi l'inconvénient, si les diamètres des poupées et des logements ne sont pas bien calibrés, ce qui est général, de forcer l'opérateur qui veut retirer les fiches, à les tourner violemment sur les poupées, ce qui occasionne des ruptures à la naissance des circuits résistants. La fiche double ou triple, employée par la maison Calor par exemple, ou mieux, le commutateur à 3 directions employé sur les gros appareils américains et suisses sont bien préférables.

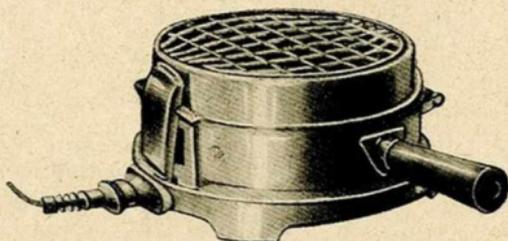


FIGURE 7.  
Appareil à feu nu Hotpoint.

Le circuit de cet appareil Hotpoint est en nikron et disposé en forme de boudins horizontaux à spires très serrées, tirés en lignes polygonales plus ou moins longues du point d'alimentation au point symétriquement opposé du châssis circulaire. Deux casseroles en acier nickelé pouvant s'ajuster également dessus et dessous la résistance permettent de préparer en même temps 2 plats. Naturellement le plat de dessous permet de préparer une grillade, et si elle est seule à préparer, ou qu'on veuille avoir une radiation plus ardente, on remplace la casserole supérieure par une plaque réflecteur qui s'ajuste exactement au châssis.

La Maison Belling fabrique des réchauds à feu visible pour chauffer par dessous, mais le genre de construction est sensiblement différent. Dans l'appareil Hotpoint le châssis est tout entier en tôle d'acier nickelée, très fine, emboutie et agrafée, avec des isolants d'épaisseur très réduite

aux points où reposent les boudins chauffés au rouge. L'appareil Belling au contraire a un châssis lourd en fonte et grosse tôle vernie et le fond de l'appareil est constitué par un support à cannelures en terre blanche réfractaire. Le tout est robuste et confortable (fig. 8.) L'inconvénient est qu'il n'a pas de réglage.

De nombreuses autres maisons fabriquent également des appareils bien conçus et très soignés pour les usages les plus divers.

Les figures 9 et 10 représentent une cuisinière Therma en coupe et vue, montrant la disposition des plaques de chauffe et de la marmite norvégienne à chaleur entretenue par un circuit dépensant seulement 70 watts.

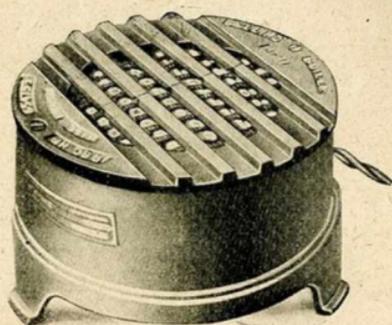


FIGURE 8.  
Bouilleur Belling à feu nu.

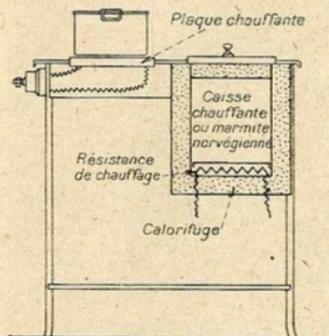


FIGURE 9.  
Coupe d'une cuisinière Therma.



FIGURE 10.  
Vue d'une cuisinière Therma.

La figure 11 représente le type d'appareil américain Globe, avec plaques chauffantes d'un modèle spécial représenté à part (fig. 12) et comportant un four à rôtir avec indicateur extérieur de température à cadran. L'allure générale de ces appareils se retrouve dans ceux de la

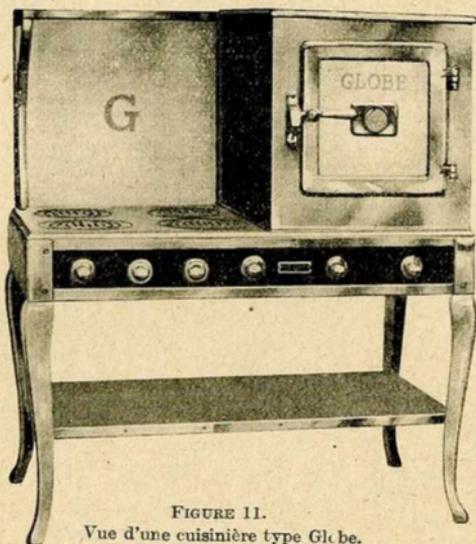


FIGURE 11.  
Vue d'une cuisinière type Gl. be.

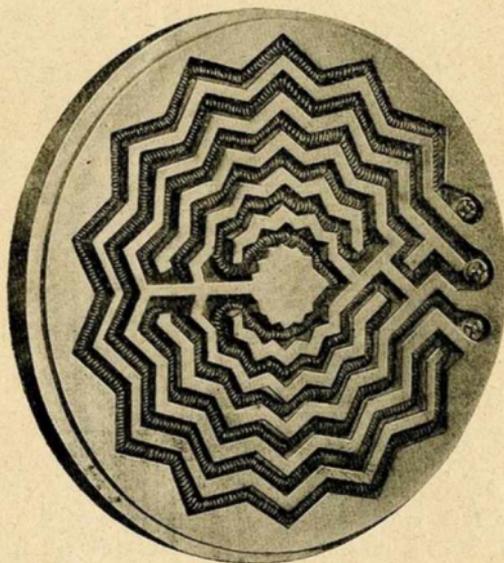


FIGURE 12.  
Plaque chauffante Globe. Vue des résistances dans leur support en porcelite.

Société norvégienne Westinghouse qui semble construire actuellement les appareils les plus variés.

La figure 13 représente un des types courants de cette maison, fermé. La figure 14 représente ce même appareil, portes du four et de marmite ouvertes, et muni de l'appareillage automatique qui constitue sa plus grande originalité.

L'appareil représenté comprend en plus 3 plaques chauffantes. Le four est chauffé au moyen de deux réseaux horizontaux maintenus assez près des parois supérieure et inférieure par leurs prises de courant à 3 broches et qui servent pour les grillades également. La marmite placée dessous n'a qu'un réseau identique à une plaque circulaire. Les plaques, comme le four et la marmite, ont toutes trois réglages de température obtenus par simple rotation d'un commutateur.

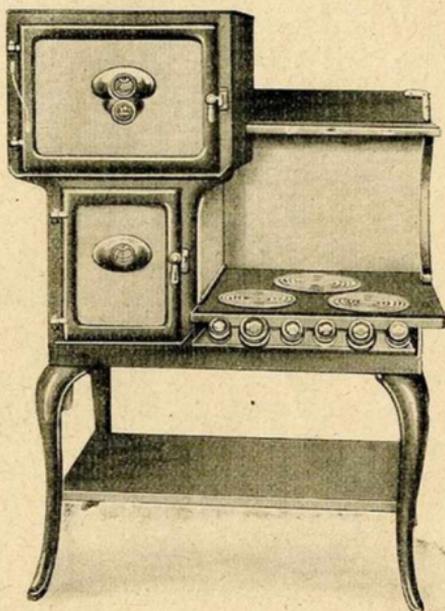


FIGURE 13.  
Cuisinière Westinghouse.

On voit les six commutateurs devant la table des plaques.

Les puissances nominales sont les suivantes en watts :

	I	II	III
Four, chaque réseau .....	1.000	500	250
Plaque de 250 .....	2.000	1.330	605
Plaque de 200, chaque .....	1.000	500	250
Marmite .....	1.000	500	250

La consommation maxima de l'appareil peut donc atteindre 7 K.W., mais il arrive rarement qu'on dépasse 2,5 à 3 K.W. comme puissance totale instantanée.

Les plaques supportées par une tablette qu'on peut relever pour y avoir accès par dessous, sont d'un modèle spécial représenté (fig. 15). La plaque supérieure est creusée de rigoles en forme d'arcs de cercle,

tandis que la plaque inférieure qui supporte la matière isolant les résistances est percée de trous correspondant aux extrémités de chacune des

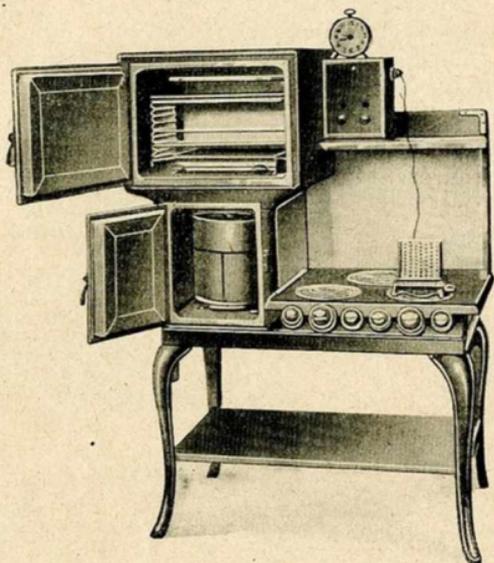


FIGURE 14.  
Cuisinière Westinghouse automatique.

rigoles de la plaque supérieure. Tout liquide tombant sur la plaque est rapidement évacué par le bas. On voit à gauche l'orifice du tuyau de

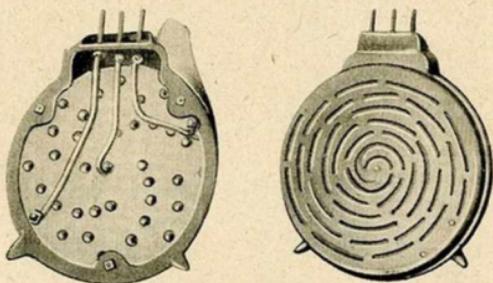


FIGURE 15.  
Cuisinière Westinghouse. Détails des plaques chauffantes.

vidange du récipient placé sous les plaques qui évacue également les vapeurs condensées du four et de la marmite.

Sur la porte de chacun de ces deux appareils, on voit le cadran gradué et les deux aiguilles du thermostat indicateur de la température intérieure, et qui sert automatiquement ou non à la maintenir.

Sur l'appareil automatique, une des aiguilles de cet indicateur de température est reliée à la commande de l'interrupteur automatique contenu dans le coffret support d'horloge. L'autre aiguille, manœuvrable à la main est amenée sur la division index de la température que l'on veut atteindre sans la dépasser. Si, dans ces conditions, on met le courant sur le four en enclenchant à la main l'automatique et le sectionneur spécial du four actionnés chacun par un des boutons que l'on voit sous l'horloge, la température commencera à monter dans le four et dès que l'aiguille reliée au thermomètre viendra coïncider avec l'autre, l'automatique déclenchera et une sonnerie retentira.

Bien mieux, connaissant le temps que le four met à monter à telle température et le temps que la pièce à rôtir doit rester au four (toutes ces indications sont fournies avec l'appareil), il n'y a qu'à mettre la petite aiguille du cadran spécial du réveil sur l'heure où on veut que le four commence à chauffer, pour que le courant soit mis automatiquement à cette heure même.

Si nous nous sommes étendu un peu sur ce type d'appareil, c'est pour montrer aux clients et aux trop nombreux constructeurs d'appareils dits de cuisine, comme on en voit trop aux vitrines de tous les bazars, que l'électricité permet d'obtenir une variété d'effets à laquelle ni le gaz ni le charbon ne peuvent prétendre et avec une facilité et une sécurité de conduite remarquables malgré l'apparente complication de l'appareillage.

**Autres appareils divers.** — Il existe un certain nombre d'appareils, touchant plus ou moins à la cuisine et à l'économie domestique, dont nous devons rapidement dire un mot.

Les fers à repasser électriques sont connus de tous. (Voir *fig. 16.*) Ils consistent généralement en une monture métallique contenant la résistance enroulée sur une feuille de mica, comprise entre deux feuilles d'amiante, le tout comprimé par serrage contre la semelle active du

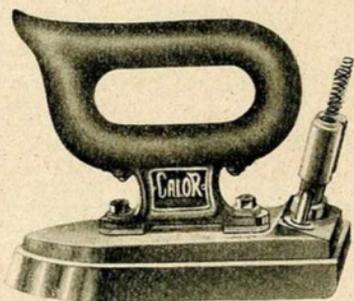


FIGURE 16.  
Fer à repasser.

LE CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE ACTUEL

fer. Ces appareils ont fait l'objet d'essais très attentifs de la part de l'Association suisse pour des températures de la plaque inférieure variant entre 120° et 215°.

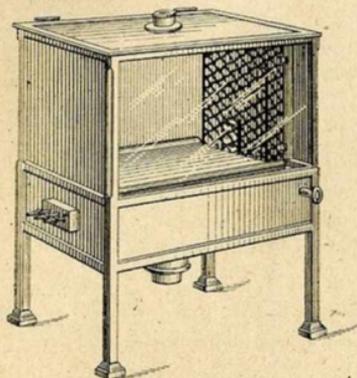


FIGURE 17.  
Étuve à air sec.

Le rendement de ces appareils est le rapport de la quantité de chaleur qui traverse la plaque inférieure à la quantité totale de chaleur produite. Les essais publiés ont porté sur 8 fers de puissances variant de 370 à 510 watts. Les rendements ont varié de 90 % à 73 %. Ils sont toujours plus élevés aux basses températures qu'aux hautes.

Citons également les fers à friser, thermoplastes, étuves, stérilisateurs à air chaud, les appareils à relaver automatiquement la vaisselle, les ré-

chauds au bain-marie. Voir fig. 17 et 18.

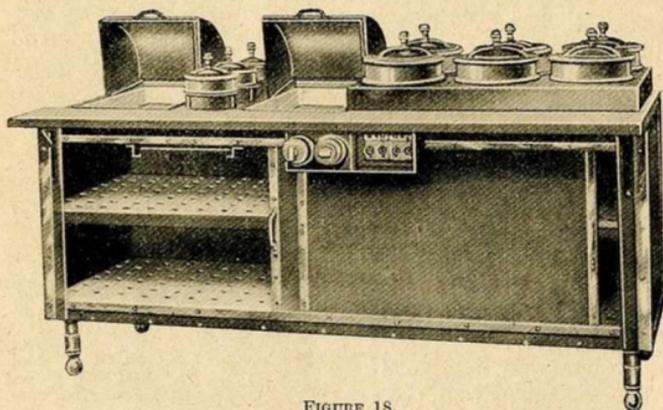


FIGURE 18.  
Réchauffe-plats type Hotpoint. Puissance: 4 K. W., 3 allures.

En élargissant un peu le sujet nous mentionnerons également quelques appareils électriques qui ont leur place toute marquée dans les ménages et hôtels :

L'aspirateur électrique de poussière, commandé par un petit moteur de 150 watts, et dont la gravure (*fig. 19*) nous dispense de toute autre explication.



FIGURE 19.  
Aspirateur électrique de poussière.

Les machines à peler les légumes, les petits pétrins mécaniques, les grilloirs à café, etc...

La lessiveuse repasseuse automatique, actionnée par un moteur électrique de 400 à 500 watts et dont ci-contre une gravure (*fig. 20*).

La glacière de ménage pouvant à volonté fournir la glace comestible, refroidir les mets et boissons, conserver les denrées alimentaires et même — avec les gros modèles — refroidir un local avec adjonction d'un ventilateur, tout en produisant une certaine quantité de glace

LE CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE ACTUEL

comestible. Ces appareils, fabriqués par la Maison Escher-Wyss comportent un petit moteur électrique dont la puissance varie de 0,25 HP pour les petits modèles à courant alternatif direct, à 1K.W. pour les

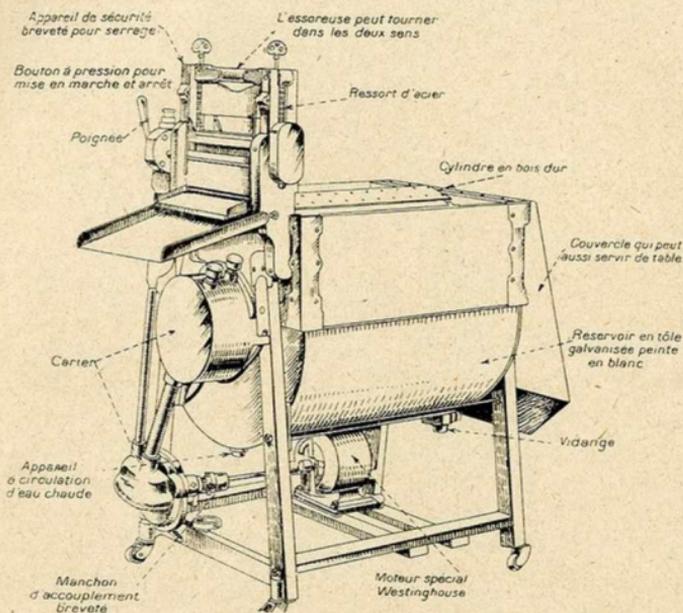


FIGURE 20.  
Lessiveuse repasseuse électrique Westinghouse.

gros modèles sur réseau à courant continu nécessitant une transformation du courant en alternatif pour le moteur.

Ces appareils, si utiles dans les pays chauds, sont très avantageux pour les Secteurs dont ils contribuent à relever le facteur d'utilisation en été, particulièrement les Secteurs chargés en chauffage électrique l'hiver. La figure 21 représente une armoire frigorifique, avec « Auto-Frigor » de la Maison Escher-Wyss vu séparément. La machine complète, dont on voit en haut le moteur en court-circuit, le compresseur et condenseur de chlorure de méthyle au milieu, et l'évaporateur à ailettes en bas, est tout simplement introduit dans l'ouverture « A » et raccordée par fil souple au circuit de l'appartement.

Nous terminerons en disant un mot des Fours de boulangerie qui peuvent constituer pour les Secteurs une très grosse clientèle. Un des

rapports publiés par l'Association suisse donne des précisions très intéressantes à ce sujet :

Un four de boulanger, chauffé au charbon nécessite de 35 à 50 kilogs de charbon par 100 kilogs de pain. Avec les fours à vapeur, 16 kilogs suffisent. Les fours électriques spéciaux, à étages, ont de 6 m<sup>2</sup> à 12 m<sup>2</sup> par étage, et peuvent cuire de 16 à 18 kilogs de pain par m<sup>2</sup>. La cuisson du pain exige de une heure à une heure et demie suivant grosseur du pain. La puissance moyenne est de 6 K.W. par m<sup>2</sup>. Avec cette puissance on peut chauffer

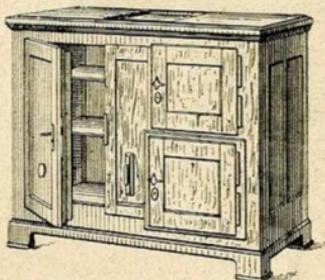


FIGURE 21.

Armoire réfrigérante avec auto-frigor Escher-Wyss.

un four de 12 m<sup>2</sup> complètement en une heure et demie, après quoi l'on réduit le courant de moitié pendant la cuisson.

Par exemple, un four de 12 m<sup>2</sup> exige une puissance maxima de 72 K.W. pendant les 90 premières minutes, après quoi on réduit la puissance à 36 K.W. On obtient ainsi le tableau suivant :

HEURES de FONCTIONNEMENT	KILOGS de PAIN	K W.	KW.H CONSOMMÉS	
			TOTAUX	PAR KILO DE PAIN
1,5	—	72	108	—
3,25	200	36	171	0,86
5	400	36	234	0,59
6,75	600	36	297	0,50
8,5	800	36	360	0,45
10,25	1.000	36	423	0,42
12	1.200	36	486	0,41

Les fours ont en général une capacité calorifique suffisante pour permettre de faire encore deux fournées sans remettre le courant. On arrive avec ces appareils à un rendement de 320 à 420 calories par kilo de pain tandis que les fours à charbon, briquettes de lignite, à vapeur... en consomment de 800 à 3.000.

On peut d'ailleurs transformer facilement un four ordinaire en four électrique par le procédé appliqué dans les petits fours de cuisine et que nous verrons employé pour entretenir électriquement chaudes les chaudières au charbon dont a on jeté les feux. Il suffit d'introduire

dans le four une résistance métallique semblable à un gros rhéostat de tramway porté au rouge sombre. De nombreuses maisons, en particulier suisses ont réalisé des solutions très pratiques du problème.

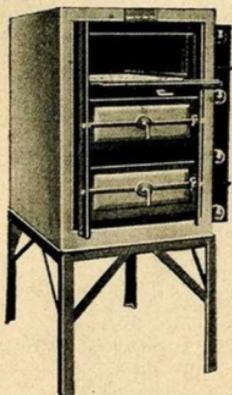


FIGURE 22.  
Four de boulanger, pâtissier, type  
Hotpoint, portatif.

La figure (22) ci-contre représente un four portatif de boulanger-pâtissier fabriqué par une grande firme américaine et présentant les caractéristiques suivantes :

- Encombrement :  $1,80 \times 0,85 \times 0,60$
- 3 compartiments :  $0,20 \times 0,70 \times 0,45$
- Surface utile totale :  $0 \text{ m}^2,93$
- Charge : 14 kilogs
- Puissance : 5 KW
- 3 réglages de température, avec thermomètres témoins.

Nous en avons fini avec les principales applications de l'électricité à la cuisson des aliments et besoins annexes. Nous parlerons du chauffage de l'eau pour bains, toilette, en étudiant les appareils de chauffage des appartements et immeubles, et nous étudierons également les appareillages spéciaux destinés à permettre l'application des tarifs multiples dont nous avons parlé.



## CHAPITRE V

### Chauffage des Immeubles

**Principes d'établissement.** — Quel que soit le procédé de chauffage employé : poêles au charbon ou au bois, chauffage électrique, chauffage par radiateurs à eau chaude ou à vapeur, la base du calcul consiste en l'évaluation des pertes de chaleur par les parois et orifices, qui doivent être compensées par l'apport de chaleur à fournir.

Bien que, par suite, les procédés d'évaluation sortent du cadre spécial de cet ouvrage, nous nous y arrêterons un instant, précisément pour insister sur ce fait qu'il n'y a pas de relation immédiate, comme semble le croire la généralité des clients, entre le loyer d'un appartement, par exemple et la puissance en kilowatts nécessaire à son chauffage par l'électricité.

Cette évaluation des pertes, pour un local et des conditions atmosphériques données, se fait en appliquant les formules de la transmission de la chaleur données au chapitre I<sup>er</sup>.

$$\text{On a : } Q = K S \frac{t - t^1}{e} \quad \text{et } K = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \dots}$$

Les coefficients K à appliquer aux différentes parties constitutives des bâtiments sont donnés dans tous les ouvrages traitant du chauffage en général. Par exemple :

pour les murs en briques d'épaisseur variant de 0,12 à 1,00  
le coefficient K varie de 2,56 à 0,59  
calories par m<sup>2</sup>, mètre, heure et degré, par air calme.

De même pour les murs en calcaire de 0,30 à 1,00  
K varie de 2,72 à 1,40

Pour les vitres simples, K = 2,45 avec air calme ; avec une vitesse de 4 m., K = 4,86, etc., etc...

Si l'on connaît la nature, et la superficie de chacun des éléments des parois, les températures moyennes à entretenir dans chacune des pièces du local pour une certaine température extérieure, il est facile de dresser un tableau des diverses pertes correspondantes. Il ne faut

pas oublier les pertes dues à la ventilation pour le calcul desquelles le volume des pièces est indispensable à connaître. Par exemple, pour une maison particulière isolée, on suppose qu'avec : — 25° extérieurement, on doit obtenir une température moyenne de 20° dans les chambres, 15° dans les offices, escaliers, vestibules, etc... Les valeurs obtenues seront majorées de 20 % pour exposition au Nord, 10 % pour exposition Est ou Ouest. Le tableau se présentera de la façon suivante :

Désignation des pièces	$t_1-t_2$	Ori-entation	Nature de la paroi	Superficie S	K ( $t_1-t_2$ )	KS ( $t_1-t_2$ )	Supplément pour exposition	Total en calories	Total en watts	Total par pièce
Salon	45°	Est	Mur en brique de 0,88 et 2 revêtements sapin	13,5	40	540	60	600	700	

On arrive ainsi au total de la puissance en watts nécessaire pour maintenir heure par heure la température demandée.

La puissance nécessaire n'est pas seulement fonction de la température, mais dépend tout autant des matériaux employés, de leur nature, qualité, épaisseur, du fini de la construction, etc... Par exemple une villa isolée à un étage construite en vue de froids rigoureux dans les pays du Nord, citée par une grosse firme de chauffage électrique, exige pour 670 m<sup>2</sup> et 230 m<sup>2</sup> couverts, une puissance totale maxima de 28 K.W. Cette puissance varie donc en pratique de 15 à 28 K.W. soit une moyenne de 20 K.W. Cela correspond à 30 watts par m<sup>2</sup> en moyenne et 42 au maximum. Les pièces n'étant pas très grandes, sauf le salon, on voit que chacune n'exige en moyenne que 1 à 1,3 K.W., soit de 20 à 30 K.W.H. par jour et par pièce.

Si on refait le calcul pour un immeuble moderne de nos pays, on retrouve une valeur sensiblement équivalente et pour des froids cependant bien moins vifs. C'est que les procédés de construction employés dans une région sont naturellement adaptés aux conditions climatiques. Aussi est-il possible de définir malgré tout une certaine puissance-type par pièce nécessaire pour le chauffage d'un immeuble normal et dans des conditions normales, mais dès qu'il s'agit d'une maison isolée, d'une villa, d'un hôtel, etc... il est absolument indispensable d'établir aussi exactement que possible le calcul des pertes horaires.

Pour la construction normale de nos pays, le graphique 23 ci-dessous, édité par la Maison Paz et Silva, est un de ceux qui se rapprochent le plus des conditions moyennes de la pratique.

Si le chauffage n'est pas continu, le calcul se fait pour le nombre d'heures de chauffage, et on majore le total de 25 à 30 %, pour tenir compte des pertes, pendant l'arrêt, à réparer à la reprise du chauffage. S'il est continu, il faut tenir compte de ce que pendant la nuit et souvent vers midi, la différence de température pourra être plus faible. Il appar-

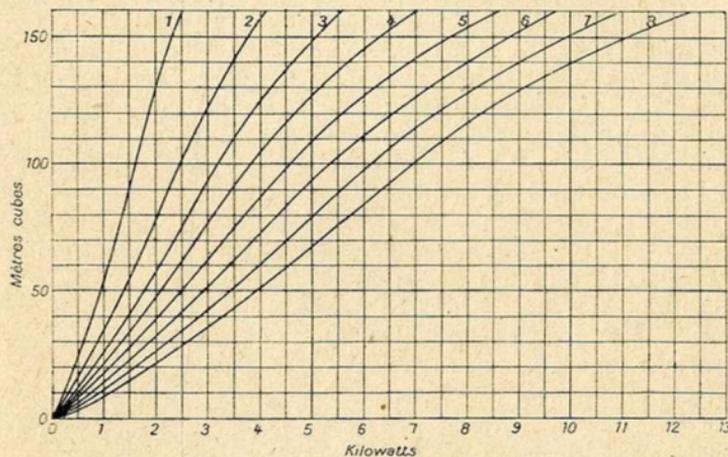


FIGURE 23.

Graphique donnant pour nos régions la relation entre le cube à chauffer, la température, et la puissance nécessaire (Paz et Silva).

MODE D'EMPLOI :

Locaux abrités :

Température extérieure 0°				— 20°		
Température intérieure :	12°	15°	20°	12°	15°	20°
Prendre la courbe n°	1	2	3	3-4	4	5

Locaux exposés :

Prendre la courbe n°	2	3	4	6	7	8
----------------------	---	---	---	---	---	---

tient au spécialiste qui étudie une installation, de bien s'inspirer des intentions réelles ou cachées du propriétaire et de les lui faire préciser pour établir son calcul de pertes, car la chaleur est une marchandise qui se compte et se mesure et rien ne sera plus facile, en cas de contestation, que de faire vérifier la concordance entre devis calorifique et résultats obtenus.

L'art de l'ingénieur, dans ce cas, n'est pas tant de calculer ces pertes, ce qui est à la portée du premier commis venu, que de répartir, calculer et enfin disposer les appareils de telle sorte que la température obtenue soit aussi uniforme que possible et que l'impression de chaleur et de bien-être soit maxima pour la dépense d'énergie minima.

L'élément psychologique est en effet très important dans cette question du chauffage ; et l'électricité, par la gamme si étendue des températures auxquelles elle permet de dissiper en chaleur la même quantité d'énergie, est l'agent le plus souple mais aussi le plus délicat à manier.

Le meilleur mode de transmission de la chaleur à employer est certainement la radiation, et autant que possible la radiation lumineuse. Ce mode offre en effet l'avantage de ne rien modifier à l'état hygrométrique de l'air, de permettre de réduire la ventilation au minimum, de donner au corps humain la plus forte sensation de chaleur, et de plus, d'emmagasiner la chaleur dans les murs, cloisons, ce qui permet à une pièce bien chauffée de ne se refroidir que très lentement après l'arrêt de l'appareil.

Les radiateurs actuels de chauffage central, à eau ou vapeur, peints à l'aluminium comme ils le sont généralement, n'irradient tout au plus que 50 % de la chaleur qu'ils abandonnent, tout le reste étant dissipé par convection. Avec les appareils électriques à feu nu, bien conçus, on arrive à faire radier jusqu'à 90 % de la chaleur totale. Il ne faut cependant pas tomber dans l'exagération comme le font certains appareils à réflecteur qui en arrivent à ne plus chauffer que sur un espace de quelques décimètres carrés, avec une intensité relativement trop forte.

La convection a le désavantage de dessécher l'air, qui de plus monte immédiatement au plafond où il constitue un matelas d'air chaud parfaitement inutile, car le coefficient de transmission d'air chaud à air froid est très faible et toute cette chaleur se perd peu à peu par la partie élevée des parois. Elle accélère, en général plus qu'il n'est nécessaire, la ventilation de la pièce.

Ce dernier effet est absolument exagéré avec le chauffage par air soufflé sur des résistances électriques. Ce système convient lorsque le cube d'air est très grand comme dans les lieux publics où, au bout de quelques moments, la chaleur dégagée par le public lui-même devient à peu près suffisante, mais qu'il faut puissamment aérer, de même que pour les ateliers d'où les fumées, mauvaises odeurs, doivent être évacuées rapidement. Dans ce cas la radiation n'est pas à recommander, car les personnes placées devant l'appareil forment écran et accaparent toute la chaleur.

Chacun des types d'appareil demande un emplacement particulier

pour en assurer la plus grande efficacité. Les appareils mobiles à radiation seront en général braqués sur les personnes même occupant la pièce. Les appareils fixes pourront avoir un emplacement défini par simple raison décorative (Voir *fig. 24*, une cheminée Goisot). Les appareils par convection qui créent une nappe ou une colonne verticale d'air chaud seront le mieux placés devant les points où les pertes de chaleur sont le plus fortes, c'est-à-dire devant les fenêtres, baies, etc. S'ils sont fixes, ils pourront être logés sous les appuis des fenêtres et dissi-

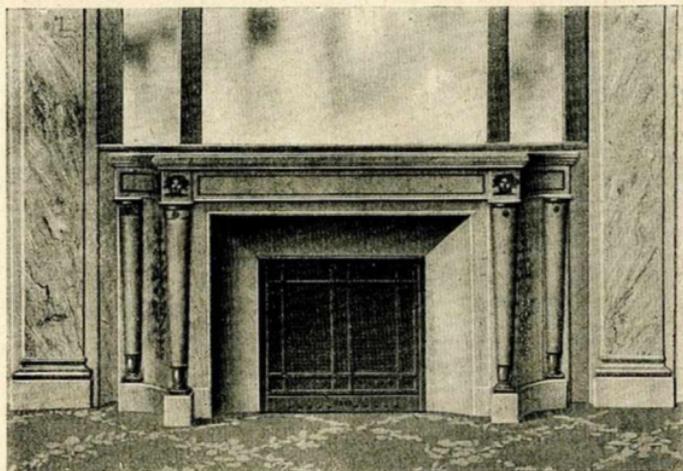


FIGURE 24.

Grand radiateur d'encastrement de la maison Goisot. 60 amp, 110 volts.

mulés derrière une tôle ajourée verticale, l'air frais arrivant en partie du dehors par une prise d'air à ouverture réglable. C'est le système dit du « ventilating radiator » appliqué en chauffage à eau chaude ou vapeur.

Un système qui n'est guère pratiqué que dans les grands locaux, bâtiments industriels réclamant un chauffage aussi uniforme que possible, est le « chauffage linéaire » imité du chauffage linéaire à eau chaude ou vapeur, où les tubes réchauffants courent le long des murs soit au ras du sol, soit à hauteur d'homme

Nous allons rapidement passer en revue les principaux types d'appareils que nous classerons en trois catégories : radiateurs immédiats, radiateurs à accumulation, radiateurs combinés avec chauffage central à vapeur, eau chaude, etc...

**Radiateurs immédiats.** — Les appareils les plus simples sont composés d'un rhéostat en fonte, tel qu'une résistance de tramway, monté sur châssis isolant et qui dissipe sa chaleur à peu près également par radiation et convection. Ils ne peuvent servir que dans des bureaux, ateliers, etc...

Les appareils généralement utilisés dans les pièces d'habitation sont exécutés en fils de haute résistivité enroulés en boudins ou disposés en zig-zags sur des supports en terre réfractaire blanche qui

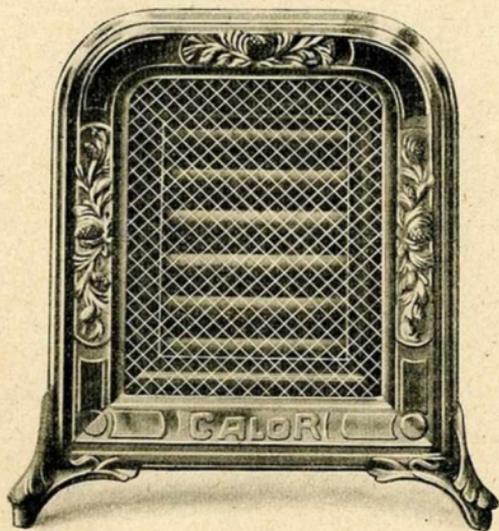


FIGURE 25.

Radiateurs Calor-Salon, de 1 à 5 K. W.

s'échauffe et ajoute sa réverbération à la radiation directe des fils. Pour dissiper en convection le moins possible de chaleur, ces fils et surfaces réfléchissantes doivent être aussi étroitement ajustés que possible ; la disposition générale doit être telle que les rayons caloriques soient dispersés aussi uniformément et sous un angle solide aussi grand que possible. Il faut de plus que l'air qui aurait tendance à s'échauffer par convection ne puisse filer directement au plafond, mais soit rejeté, en filets ou lames divergents, dans l'air ambiant pour s'y diluer.

Les radiateurs de cette catégorie sont très nombreux. La figure 25 en représente un type courant.

Les filaments résistants sont portés aux environs de  $900^{\circ}$  à  $1.000^{\circ}$ , aussi faut-il éviter tout appel d'air qui amènerait les poussières ou organismes en suspension dans l'air, en contact avec eux.

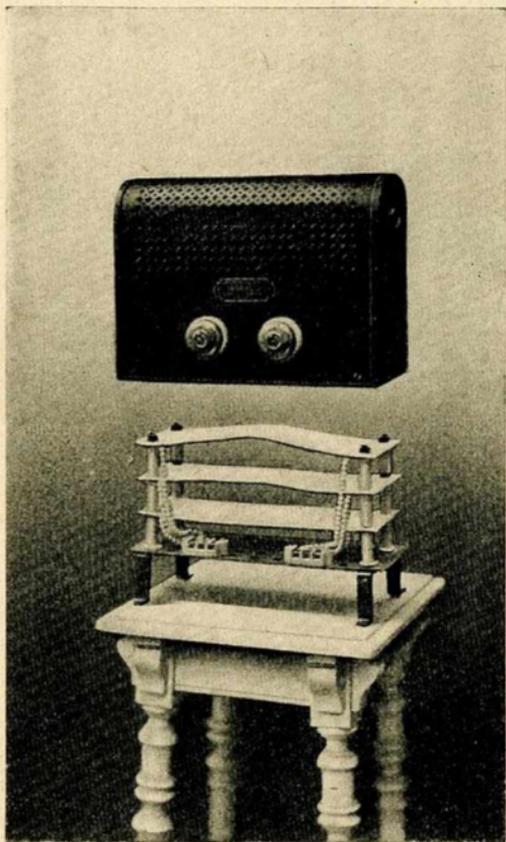


FIGURE 26.

Radiateur par convection, à toiles résistantes horizontales. V. Pietri.

Les radiateurs utilisant la convection dans une plus forte proportion sont fabriqués principalement avec des treillis résistants, obtenus en disposant sur un châssis isolant, généralement en amiante, un fil tiré en zig-zags très serrés.

Le tout est souvent enrobé dans une préparation qui lui donne plus de solidité. Ces réseaux sont disposés, soit horizontalement, soit

verticalement, à l'intérieur d'enveloppes en tôle ajourée. Dans le premier cas la chaleur est à peu près toute dissipée par convection qu'on

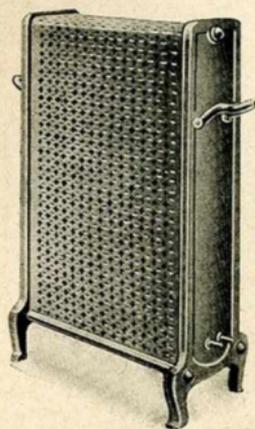


FIGURE 27.

Radiateur à toiles résistantes verticales. Goisot.

favorise en ménageant un violent appel d'air par le bas et en superposant 2 ou 3 réseaux. L'Electro-Métallurgique du Centre superpose même une dizaine de réseaux. Dans le deuxième cas, une certaine partie de la chaleur est irradiée horizontalement. La figure 26 représente un appareil Pietri du 1<sup>er</sup> type, la figure 27 représente un appareil Goisot du 2<sup>e</sup>.

Les lampes à filament de carbone peuvent être utilisées comme radiateurs électriques. Toute leur énergie est à peu près irradiée sous forme de chaleur lumineuse. Elles se prêtent bien à la réflexion et à la concentration de la chaleur dans une direction donnée et ne brûlent pas les poussières.

Voir (fig. 28) un modèle de la Maison Hotpoint. Elles ont l'inconvénient d'être sensibles aux sous-voltages puisque, nous l'avons vu, le carbone a un coefficient négatif de température. De plus elles coûtent relativement cher d'entretien et remplacement.

Citons encore les appareils à filament de tungstène ou d'acier au nickel simplement enrobé dans des cylindres en quartz fondu semblables à des bougies, tels que ceux de la Maison Maljournal et Bourron représentés (fig. 29). Ces appareils fournissent une chaleur lumineuse, bien répartie horizontalement, et permettent d'utiliser des métaux de peu de valeur et oxydables à l'air.

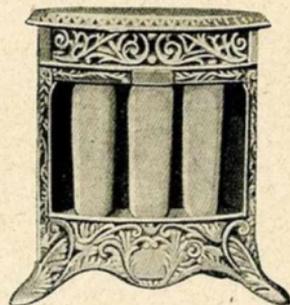


FIGURE 28.  
Radiateur à lampes.

La figure 30 représente le système de chauffage linéaire breveté par la firme suisse Oerlikon, qu'elle applique dans les ateliers, filatures, etc... Ce sont de simples tubes ou bandes d'acier de 0,5 à 1  $\frac{m}{m}$  d'épaisseur, et de 15 à 25  $\frac{m}{m}$  de développement, que l'on suspend ou

supporte par des isolants le long des murs, et qui sont portés à une température de 150° à 170° par le passage du courant. La puissance normale est de 500 watts par mètre courant. La température d'atelier de tissage, exigeant en général de 20 à 30 W.H. par m<sup>3</sup>, il est facile de calculer la longueur totale nécessaire par salle et de la répartir pour le mieux d'après les dimensions.

Les appareils au Kryptol, les appareils Cœuille, n'emploient pas exclusivement l'effet Joule pour la production de la chaleur. Le procédé consiste à faire passer le courant dans une certaine quantité de limailles de cuivre, de fer, grains de charbon ou de carborundum dont la résistance totale se compose avec celle des intervalles très faibles qui existent entre ces petits grains et où jaillissent de petits arcs voltaïques.

La chaleur produite par ces arcs et celle engendrée par le passage

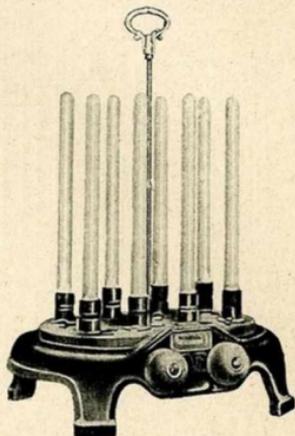


FIGURE 29.

Radiateur à résistances enrobées dans des bougies en quartz fondu.  
Maljournal-Bourron.

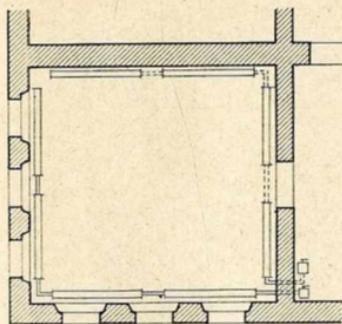


FIGURE 30.

Chauffage linéaire. Oerlikon.

du courant dans la matière hétérogène elle-même s'accumule peu à peu dans celle-ci et se dissipe par l'enveloppe.

Ces appareils sont donc des intermédiaires entre les radiateurs directs et les appareils accumulateurs dont nous allons nous occuper. Nous dirons un mot des appareils par induction à la fin du chapitre VI.

#### **Appareils accumulateurs. —**

Nous avons suffisamment expliqué dans la première partie

en quoi consiste le principe de ces appareils.

Les premiers spécimens ont été construits il y a plus de dix ans, ils étaient basés en général sur la forte capacité calorifique de l'huile.

Il en existe qui fonctionnent à Lyon depuis plus de treize ans, sans avoir jamais donné lieu à aucun mécompte grave. La quantité d'huile y est d'ailleurs assez faible, quelques litres au plus, et l'appareil fonctionne

surtout comme radiateur direct, le réservoir d'huile ne servant que de volant de chaleur à dissiper pendant le repos de midi et quelques heures du soir.

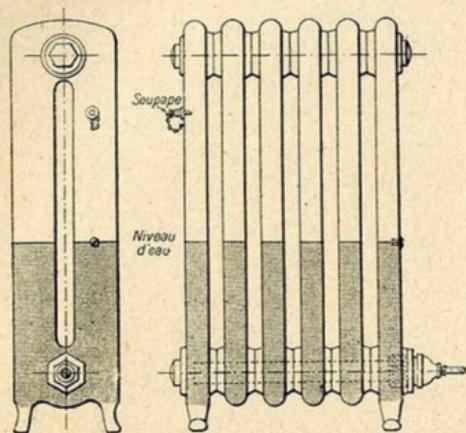


FIGURE 31.  
Radiateur type Quain.

Un appareil plus récent, construit par la firme anglaise Quain, utilise l'eau et sa vapeur en petites quantités, pour transmettre à l'air ambiant la chaleur développée par le passage du courant dans les résistances.

Extérieurement, l'appareil ressemble à s'y méprendre à un radiateur du chauffage central. La figure 31 en donne une vue de face et en coupe. La figure 32 donne une coupe du corps de chauffe. On voit que l'eau ne remplit l'intérieur

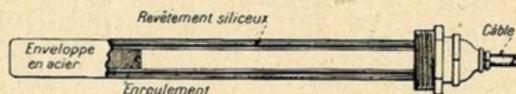


FIGURE 32.  
Appareil Quain. Coupe du corps de chauffe.

des éléments que jusqu'à mi-hauteur environ. Le corps de chauffe est d'une conception originale. Le filament de nikron est enroulé sur un mandrin en silice fondue, lui-même enfermé à l'intérieur d'une enveloppe également en silice fondue où on a fait le vide et qui est remplie d'hydrogène, de façon à empêcher toute oxydation du filament. Entre parenthèses, ceci est un peu exagéré car le nikron se protège lui-même au moyen de la pellicule d'oxyde qui se forme à la surface.

Cette enveloppe en silice est protégée par un fourreau en acier, terminé par un bout fileté, et introduite au bas de l'appareil comme indiqué sur la figure. Le fonctionnement est évident. Un appareil de

1.000 watts suffit pour un volume de 1.000 à 1.200 pieds cubes ; surface de radiation est de 20 pieds carrés.

Une trentaine de ces appareils sont installés dans un théâtre de Londres et sont mis en marche chaque jour pendant quelques heures, avant la représentation — c'est-à-dire au moment où, en général, la demande de courant est la plus forte sur le réseau !

L'appareil à accumulation n'a vraiment de raison d'être que s'il permet d'emmagasinier pendant les heures où le courant peut être acheté bon marché, la quantité de chaleur nécessaire pour assurer le chauffage pendant le reste de la journée. Le type actuel de ces appareils est celui dit de charge en 8 heures et de décharge en 16 heures.

Il a été surtout, et même uniquement peut-on dire, étudié et mis au point en Suisse, notamment par les Maisons Oerlikon et Sauter.

Le Bulletin d'octobre 1918 de l'Association suisse résume les caractéristiques de plusieurs appareils essayés par elle. Ils comportent tous un réseau résistant producteur de chaleur, soit en fil d'acier pour les appareils communs, soit en nikron, chromnickel, constantan, carborundum, pour les appareils plus soignés, noyé dans la matière accumulative inerte telle que faïence, pierre ollaire, béton, sable sec. Le cube actif est recouvert d'une enveloppe en éternit ou autre substance moyennement conductrice de la chaleur et très robuste, séparée du cube actif par une lame d'air.

Tableau

TYPE	A	B	C	K	X <sub>3</sub>
Dimensions					
Long. Larg. Haut ....	39 39 80	54 12 82	35 35 80	80 60 140	75 90 170
Puissance en K.W. ....	2,1	1,9	4	4,5	8
Energie absorbée par jour en K.W.H. ....	17	15,2	32	34	64
Energie accumulée en K.W.H. ....	7,6	3,2	15,1	22	43
Pouvoir accumulateur.	0,45	0,2	0,47	0,65	0,67
Volume en dm <sup>3</sup> . ....	87	31,5	80,7	448	1.000
Surface, dm <sup>2</sup> . ....	127	85	130	433	580
Watts/dm <sup>2</sup> . ....	17	22	31	10	14
W.H/dm <sup>3</sup> . ....	87	101	188	50	54
Température C° . ....	110°	153°	198°	62°	60°

Le tableau ci-dessus résume les principales caractéristiques de quelques appareils essayés. On peut constater que l'appareil B rentre encore



dans la catégorie des appareils où l'accumulation de la chaleur ne sert qu'à entretenir la température durant un court arrêt de l'appareil, deux heures environ. Tous les autres appareils ont un coefficient d'accumulation (c'est-à-dire un rapport entre l'énergie réellement accumulée au bout de huit heures de charge et l'énergie totale absorbée durant ces mêmes huit heures) sensiblement égal ou supérieur à 0,50. Chaque appareil répond en effet à un but précis et c'est une erreur de s'imaginer que n'importe quel appareil accumulateur, même très bien construit, peut être utilisé dans des conditions différentes d'emploi :

Pendant que l'appareil est en charge, soit pendant les huit heures de nuit, par exemple, où les Secteurs peuvent fournir actuellement des déchets d'énergie à bon compte, on peut lui demander soit d'emmagasiner autant que possible la totalité de la chaleur fournie, ou bien d'entretenir en même temps une certaine température dans le local, par l'émission d'une certaine quantité de chaleur à travers l'enveloppe.

Pour une même quantité de calories à libérer par vingt-quatre heures

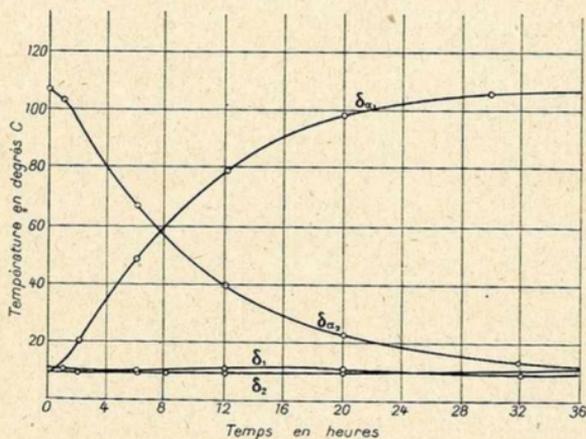


FIGURE 33.

Poêle à accumulation Sauter. Courbes de température lors de la charge jusqu'à l'état stationnaire puis décharge complète.

$\delta_{sa}$  = température moyenne de surface.  
 $\delta_s$  = température ambiante.

— ce qui est toujours la base du problème — les puissances de plusieurs appareils destinés au chauffage du même bâtiment seront d'autant plus faibles que la durée de charge sera plus longue. De même les capacités calorifiques seront d'autant plus grandes que l'émission pendant la période de charge supposée égale devra être plus faible. On pourra jouer soit

sur les produits  $P \times C$ , soit sur la température finale  $t$ . Quelle que soit la solution, le calorifugeage de l'enveloppe devra être d'autant meilleur dans ce cas que la capacité sera plus forte. La solution la meilleure dépendra de la plus ou moins grande capacité de la matière et des températures finales admissibles pour les résistances, et pour la surface extérieure de l'enveloppe.

Pour préciser ces idées, nous ne pouvons mieux faire que de reproduire ci-dessous le bulletin d'essai d'un appareil fabriqué par la Maison Sauter. Il s'agit d'un poêle de 3 K.W. environ, dont la masse active est en pierre ollaire, recouverte d'une enveloppe d'éter-

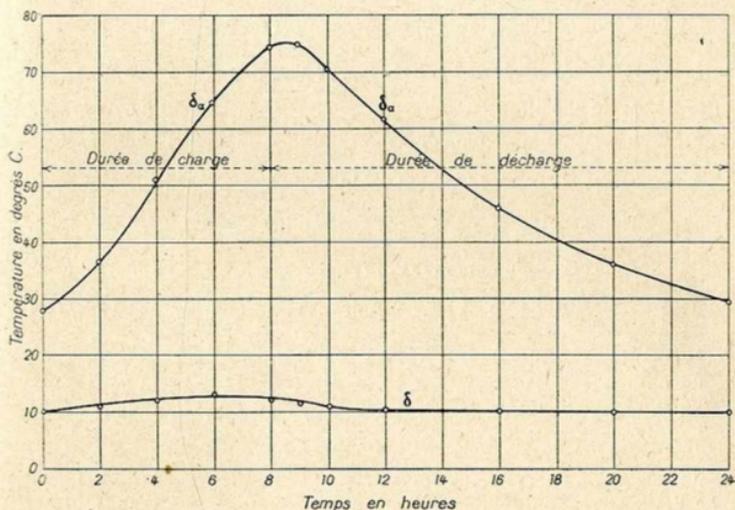


FIGURE 34.

Poêle à accumulation Sauter. Courbes de température en service périodique (charge pendant 8 heures, décharge pendant 16 heures).

nite séparée de la masse par une lame d'air de 2 centimètres et où la transmission de la chaleur pendant la décharge se fait au moyen de portes coulissées, par où entre l'air frais (ou seulement refroidi si l'on marche en circuit fermé) et sort l'air échauffé au contact de la masse. Le bulletin ci-dessous et les graphiques ci-joints (fig. 33 et 34) établis par le Bureau d'essais de l'Association suivent rendent évident le fonctionnement de l'appareil.

Capacité de charge moyenne.....  $P_1 = 3.125$  K.W.

Durée de charge effective .....  $T_1 = 8$  h.



Energie absorbée au total.....	Q	= 25.0 K.W.H.
Capacité permanente respective .....	P	= 1.041 K.W.
Energie accumulée réellement après 8 h. de charge .....	Qc	= 16.0 K.W.H.
Valeur d'accumulation $\tau = \frac{Qc}{Q}$ .....	$\tau$	= 0.64
Accumulation d'Energie maximale possible ..	Q	= 29.3 K.W.H.
Taux de saturation $\xi = \frac{Qc}{Qem}$ .....	$\xi$	= 0.546
Durée de décharge théorique $T = \frac{Qc}{P}$ .....	T	= 15.4 h.
Surface extérieure rendant la chaleur .....	O	= 240 dm <sup>2</sup>
Effet de sortie spécifique après 8 h. de charge.	p	= 8.5 W/dm <sup>2</sup>
à l'état stationnaire .....	Pm	= 13.0 W/dm <sup>2</sup>
Volume actif .....	V	= 100 dm <sup>3</sup>
Accumulation spécifique $qc = \frac{Qc}{V}$ après 8 h.		
de charge .....	qc	= 160 W.h/dm <sup>3</sup>
$qem = \frac{Qem}{V}$ dans l'état stationnaire .....	qem	= 293 W.h/dm <sup>3</sup>
Température moyenne de la surface après 8 h.		
de charge .....	$\vartheta_a$	= 74.5° C
à l'état stationnaire .....	$\vartheta_{am}$	= 105° C
Température maximale de la surface après 8 h.		
de charge .....		110.5° C
à l'état stationnaire .....		154° C
Température maximale du fil de chauffe après		
8 h. de charge .....		346° C
à l'état stationnaire .....		465° C

La Maison Oerlikon fabrique également des poêles basés sur le même principe. Elle construit trois types différents :

1° Poêles avec accumulation de chaleur et production de chaleur réglable sans limitation automatique de la température. Ces poêles fonctionnent en charge uniquement pendant la période journalière où le Secteur fournit le courant à bon marché. Il suffit pour cela de commander le circuit par un interrupteur horaire automatique, comme dans les appareils Sauter, analogue à un allumeur extincteur de lampe d'éclairage public. Ils sont assez largement dimensionnés pour pouvoir n'être

pas déchargés immédiatement après charge et subir à nouveau une 2<sup>e</sup> charge sans atteindre une température excessive.

2<sup>o</sup> Poêles avec accumulation de chaleur renforcée et interrupteur à limitation automatique de température, avec seulement un étage. Ces poêles sont réglés par un interrupteur horaire automatique, ainsi que par un clapet pour le réglage de la température qu'on peut adapter aux différentes températures extérieures.

3<sup>o</sup> Poêles comme sous le § 2, mais avec plusieurs étages, au maximum 4. Le dernier étage est, dans ce cas-là, beaucoup plus élevé qu'il n'est nécessaire pour l'accumulation, ce qui permet par exemple, de chauffer rapidement un local froid en ouvrant complètement les clapets de réglage.

**Appareillage pour appareils accumulateurs.** — L'emploi de ces appareils exige, on le voit, un appareillage électrique spécial que nous passerons rapidement en revue, à savoir : limiteurs de température, interrupteurs horaires automatiques, coupleurs à distance, compteurs à tarifs divers et toutes leurs combinaisons possibles.

Les limiteurs de température sont ceux dont nous avons déjà signalé l'emploi sur les petits fours de cuisine des appareils Globe, Westinghouse. Ces appareils sont destinés à se déformer avec le changement de température du corps sur lequel ils sont fixés, et à provoquer ainsi l'enclenchement ou le déclenchement d'un circuit électrique dès qu'une certaine température, pour laquelle ils ont été réglés, est atteinte. Ils peuvent ainsi couper et remettre le courant automatiquement, ou faire fonctionner un appareil avertisseur. Ils permettent donc de maintenir la température d'un corps à une valeur quelconque fixée d'avance. D'où leur nom de Thermostats.

En principe, ils sont construits d'une lame, formée de deux métaux à coefficient de dilatation inégal (acier et laiton par exemple), qui subit de ce fait une déformation lente au fur et à mesure que la température varie. L'essentiel est que la fermeture et l'ouverture du circuit puissent se faire pour une différence de température aussi faible que possible et secondement que ces fermeture et ouverture soient brusques de façon à éviter la formation d'étincelles ou d'arcs qui échauffent les contacts et faussent la température de la lame double métal.

Un perfectionnement consiste à doubler la sensibilité de l'appareil en remplaçant le point fixe sur lequel vient buter la lame déformable, par une pointe portée par une 2<sup>e</sup> lame déformable mais où les deux métaux sont inversés par rapport à la première, comme l'indique la