

le chauffage électrique par
émetteurs de rayonnement

INFRAROUGE COURT 

édité par

LA SOCIÉTÉ POUR LE DÉVELOPPEMENT DES APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ

106
4677

Le Chauffage Électrique par Émetteurs de Rayonnement **INFRAROUGE COURT**

(deuxième édition)

par R. GAUTHERET

avec la collaboration de

G. SEURIN, R. C. GESLIN, B. HAZNADAROFF, G. LE GUEN
et J. MAISONNEUVE

vice-président et membres
de la Commission " Chauffage par infrarouge "
du Comité Français d'Électrothermie



Édité par

LA SOCIÉTÉ POUR LE DÉVELOPPEMENT DES APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ

AVANT-PROPOS

PARMI les divers modes de chauffage électrique utilisés dans l'industrie, le chauffage par rayonnement infrarouge est un des plus récents.

Le domaine industriel de l'infrarouge comporte, suivant la classification du Comité Français d'Electrothermie :

- *L'infrarouge court (longueurs d'ondes inférieures à 2 microns),*
- *L'infrarouge moyen (longueurs d'ondes comprises entre 2 et 4 microns),*
- *L'infrarouge long (longueurs d'ondes supérieures à 4 microns).*

La présente brochure ne traite que de l'infrarouge court.

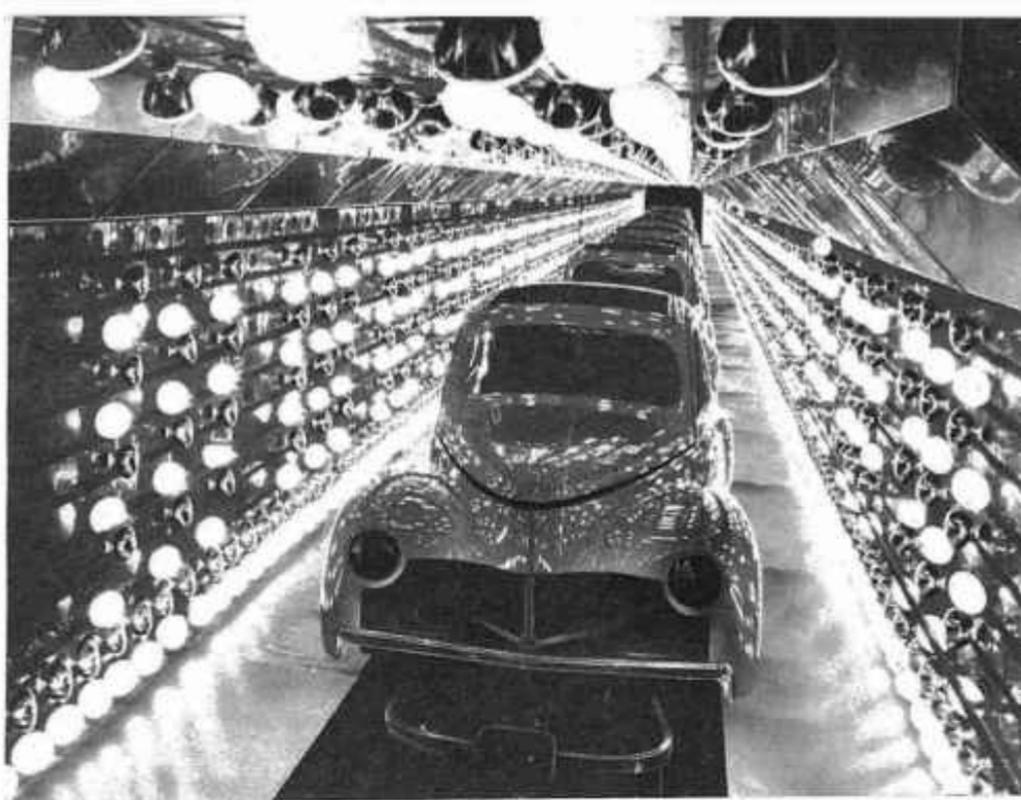
Le chauffage par « émetteurs de rayonnement infrarouge court » communément appelé « lampes infrarouges » a connu en France un développement relativement important depuis quelques années.

Cependant, bien des idées fausses sont encore répandues en ce qui concerne ce mode de chauffage ; bien des erreurs ont été commises dans son application.

C'est pourquoi il paraît utile de faire à nouveau le point des données scientifiques actuelles relatives au « chauffage infrarouge » et plus particulièrement au « chauffage infrarouge court ». Bien entendu, certains renseignements que nous donnons seront sujets à révision si des études scientifiques ultérieures en montrent la nécessité.

Nous nous limiterons à un exposé d'ensemble aussi court que possible, illustré de photographies — choisies entre d'autres — d'installations toutes réalisées en France, montrant la diversité des appareils, de leurs caractéristiques, de leurs applications.

La présente édition comporte, par rapport à la première, un renouvellement important des photographies présentées.



HISTORIQUE

C'EST en 1800, au cours d'une exploration du spectre magnétique étalé par un prisme, que le physicien Herschell découvre, au moyen d'un thermomètre, l'existence de rayons invisibles situés au-delà du rouge (1) et actuellement dénommés « infrarouges ».

En 1835, « avec une hardiesse vraiment géniale, Ampère proclame l'identité des rayons lumineux et des rayons calorifiques » (2).

Depuis 1800, de nombreux savants et chercheurs ont étudié et étudient encore les problèmes que posent la production et l'utilisation des rayons infrarouges dans les divers domaines d'application (biologiques, physiologiques, thérapeutiques, photographiques) et notamment dans l'industrie.

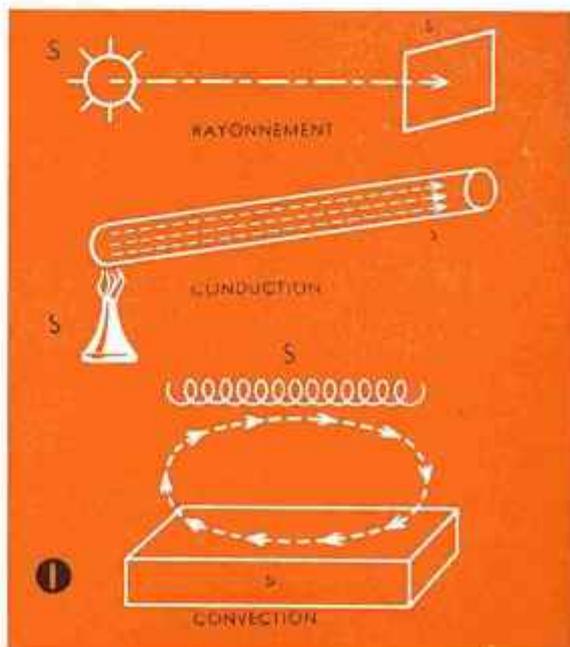
En 1934-1935, les Usines Ford, à Détroit, réalisent la première installation industrielle de séchage et cuisson de vernis et émaux sur carrosseries automobiles, au moyen de rayons infrarouges courts.

Depuis cette date, le procédé de chauffage électrique par rayonnement infrarouge s'est développé, notamment pour le séchage et la cuisson des vernis et peintures et, d'une manière plus générale, pour les traitements à basse température (jusque vers 200° C environ) tant en France qu'à l'étranger.

(1) Ces rayons ont été improprement appelés « calorifiques » par suite des circonstances de leur découverte. Les rayons lumineux et ultraviolets peuvent provoquer des manifestations de même nature dans les substances qui les absorbent; mais ce qui fait l'intérêt pratique des radiations infrarouges, c'est en particulier la facilité avec laquelle on peut les produire en grande quantité.

(2) Cf. *Le spectre infrarouge*, livre de J. LICOISSE, 1928 et 1948-1949.

● *Traitement de peinture sur carrosserie automobile.* (Doc. Peugeot.) ● *Traitement de peinture sur carrosserie automobile.* (Doc. Peugeot.)





ACTUALITÉ DU CHAUFFAGE PAR RAYONNEMENT

DANS les opérations thermiques à toutes températures, l'industrie cherche actuellement à :

- obtenir la plus grande efficacité (compte tenu du rendement thermique) ;
- réaliser des cycles complets de chauffage et de refroidissement aussi rapides que le permet la nature des corps traités ;
- assurer la précision et le contrôle de la température, si possible automatiquement, voire suivant une courbe de chauffage et de refroidissement préétablie ;
- améliorer les conditions du travail humain pour réduire « la peine de l'homme ».

Ce sont ces désirs ou ces soucis qui sont à la base du *renouveau* du chauffage par rayonnement.

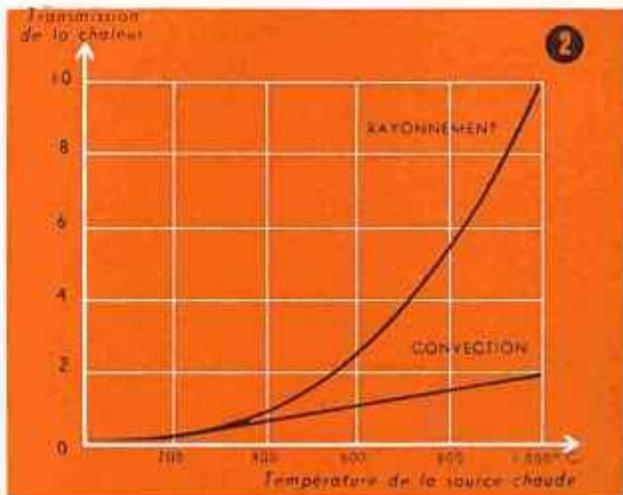
Dans les opérations à haute température, par exemple à 1 000° C (température du corps traité), la prédominance du transfert thermique par rayonnement à partir de la source chaude est un fait (1). Dans la recherche des très hautes températures, c'est *a fortiori* le rayonnement qui reste l'élément essentiel (2).

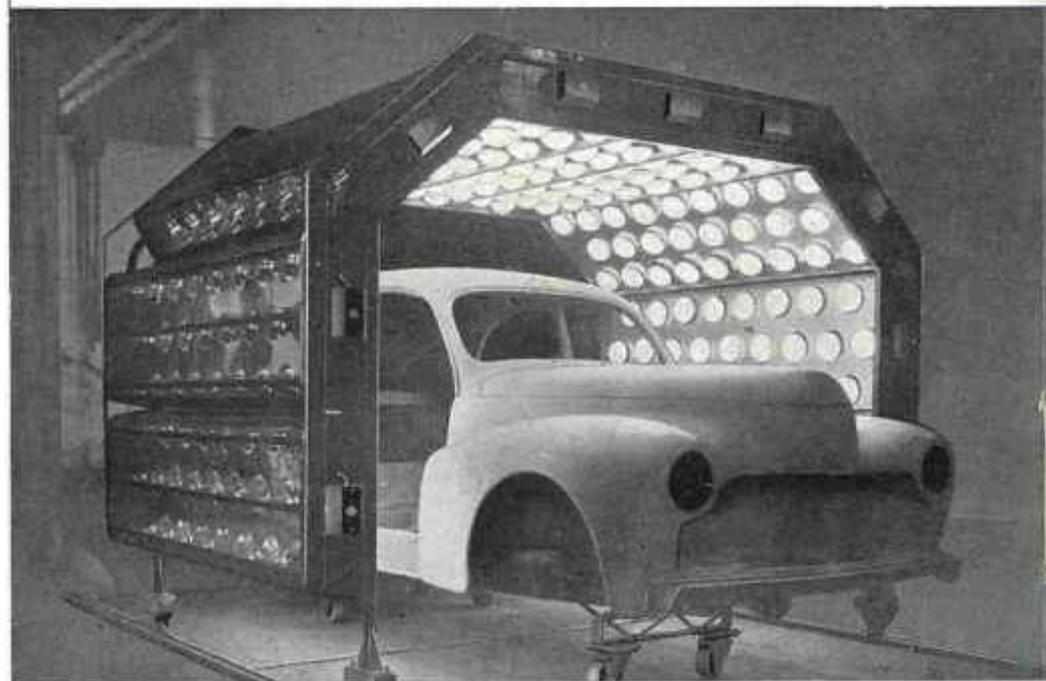
Dans les opérations à basse température (c'est-à-dire jusque vers 200° C), qui nous intéressent ici, convection naturelle et

(1) La figure 2 montre que la transmission de chaleur par convection est relativement peu importante aux températures élevées de la source chaude. Se reporter également à la brochure Apel intitulée : *Les fours électriques à résistances*, par R. GAUTHIER, figures 35, 36 et 37 ; pages 28, 29 et 30.

(2) Nous laissons de côté la transmission thermique par conduction (fig. 1).

- Traitement de peinture sur carrosserie automobile. (Doc. Simca.)
- Traitement de peinture sur carrosserie automobile. 600 E. (Doc. Philips.)

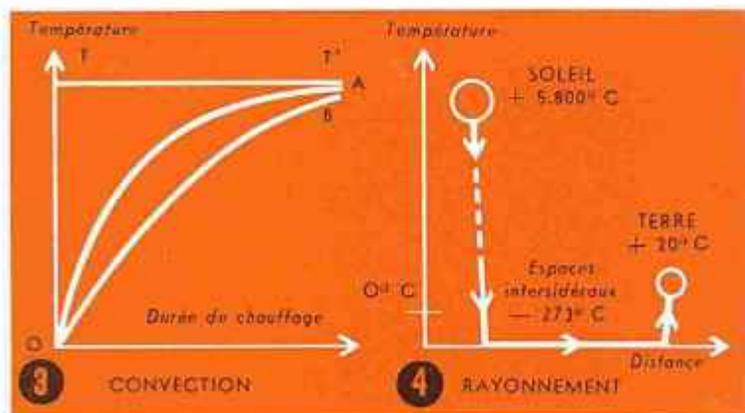




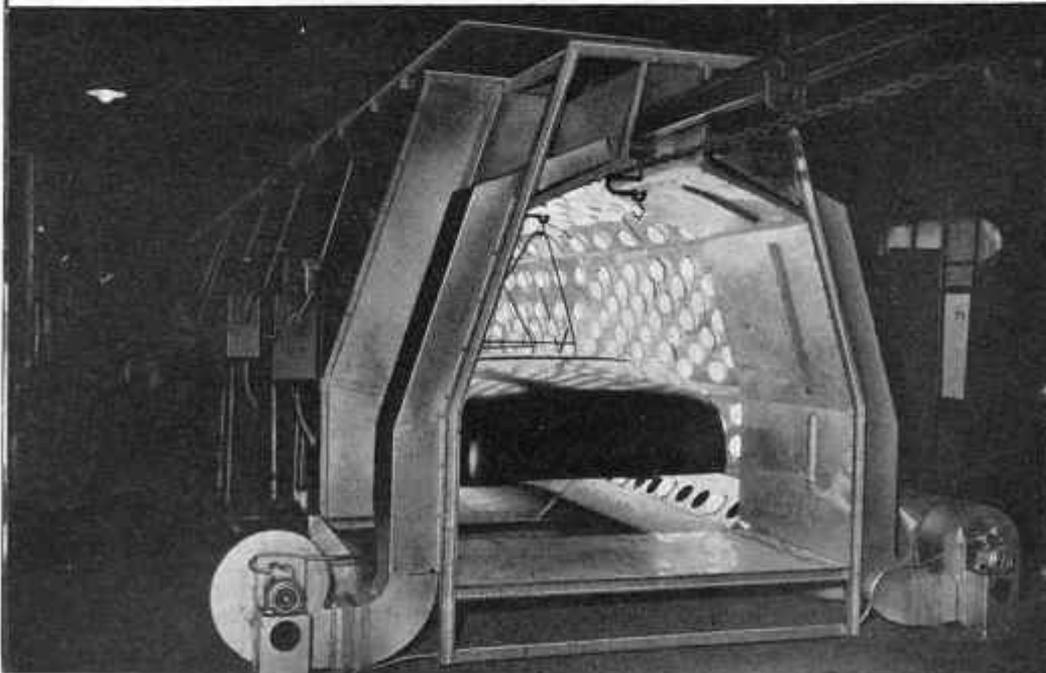
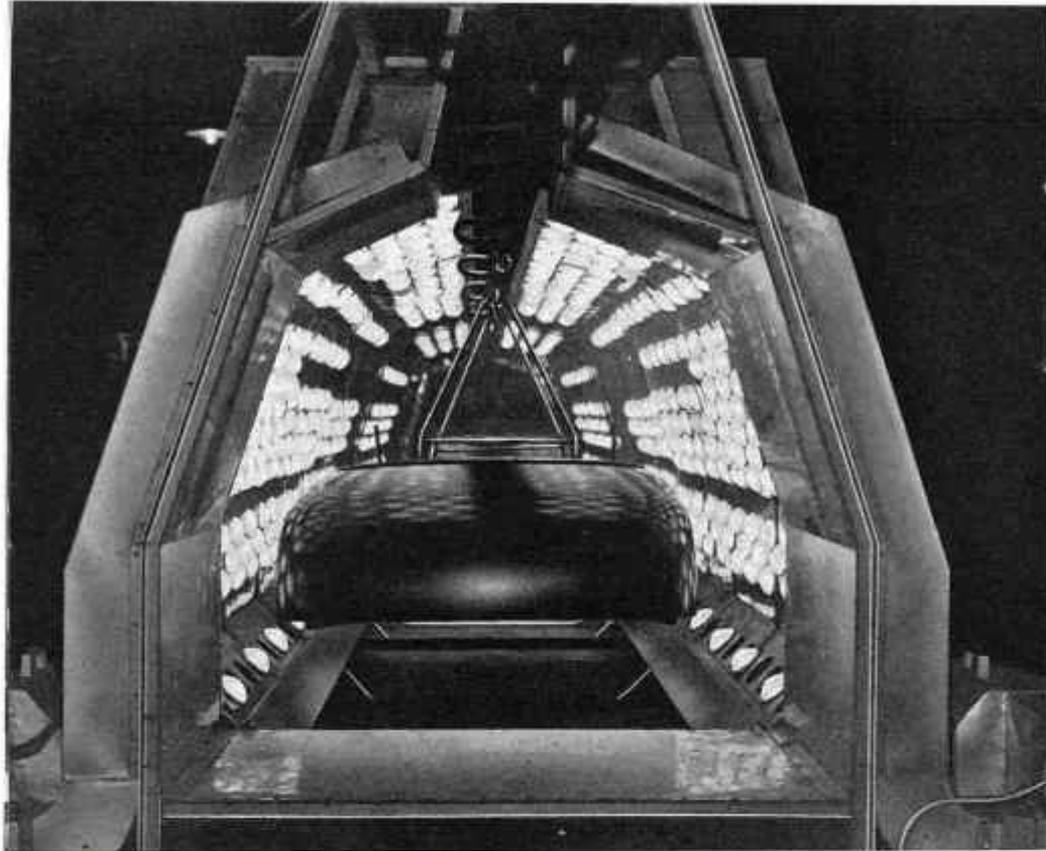
rayonnement sont d'importance comparable dans les procédés de chauffage classiques, pour lesquels la température de la source chaude est relativement peu supérieure à celle du corps traité; ces deux températures sont, en effet, du même ordre de grandeur; leur différence est faible (par exemple 100°C si la source chaude est à 200°C et le corps traité à 100°C).

Tous les efforts des chercheurs ont porté pendant longtemps sur l'amélioration de la convection (et notamment de la convection forcée); celle-ci nécessite un fluide intermédiaire (air en général) chargé du transport des calories de la source chaude vers le corps à chauffer.

Les résultats obtenus avec les premières « lampes à rayons infrarouges » à haute température ont convié les usagers à examiner de nouveau les conditions du transfert calorifique par rayonnement, lequel n'exige la présence d'aucun fluide intermédiaire et présente des avantages sur lesquels nous reviendrons. Dans ce cas, le filament (source chaude) de la lampe est à $\pm 200^{\circ}\text{C}$ environ et la différence de température est, par suite, très élevée (par exemple $\pm 200 - 100 = \pm 100^{\circ}\text{C}$; tandis que, dans le cas envisagé précédemment, elle n'était que de 100°C); le rayonnement l'emporte alors considérablement sur la convection naturelle.



● Etude à voûte déplaçable pour gabarits divers. Réfection de peinture, 225 F. (Doc. Philips-R.G.) ● Traitement de peinture sur carrosserie automobile, 225 F. (Doc. Philips.)



Dans une étuve à convection par exemple, la température de la charge ne peut *en aucun cas* dépasser celle du fluide qui la baigne (air). Dans le cas du rayonnement au contraire, la température de la charge a *toujours* une valeur au moins égale, pratiquement supérieure, à celle du fluide qui l'environne. Se reporter à la note suivante.

Nota. — Les figures 3 et 4 (page 9) donnent deux exemples de chauffage par convection et par rayonnement :

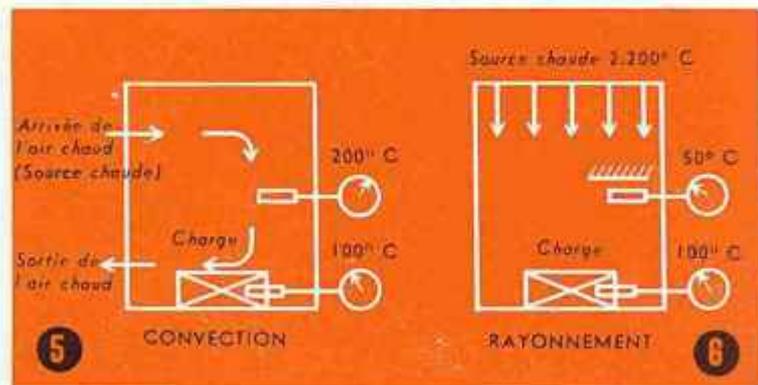
Convection. — Le diagramme donne deux courbes de montée en température de la charge : OA pour une charge de faible chaleur spécifique et de forte conductibilité thermique (métal par exemple) et OB pour une charge de faible conductibilité thermique et de forte chaleur spécifique (calorifuge par exemple), l'air transportant les calories étant à la température T_1 .

Rayonnement. — Le soleil à 5 800° C environ chauffe la terre par rayonnement. La température des espaces intersidéraux tombe à — 273° C (zéro absolu) et remonte, dans l'atmosphère terrestre, jusqu'à atteindre au sol une température de l'ordre de 20° C par exemple.

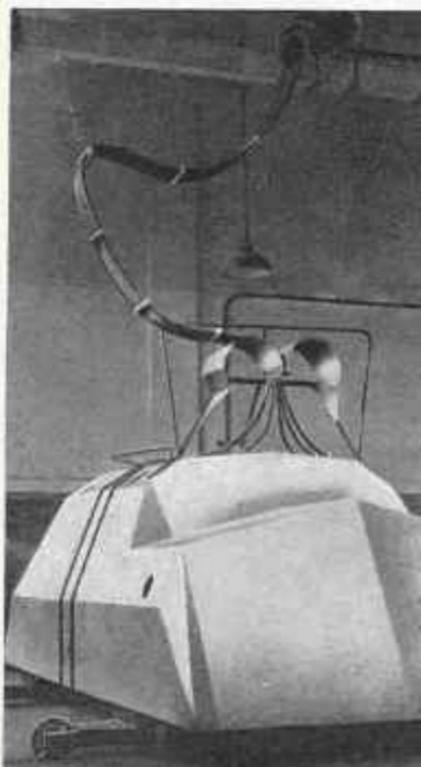
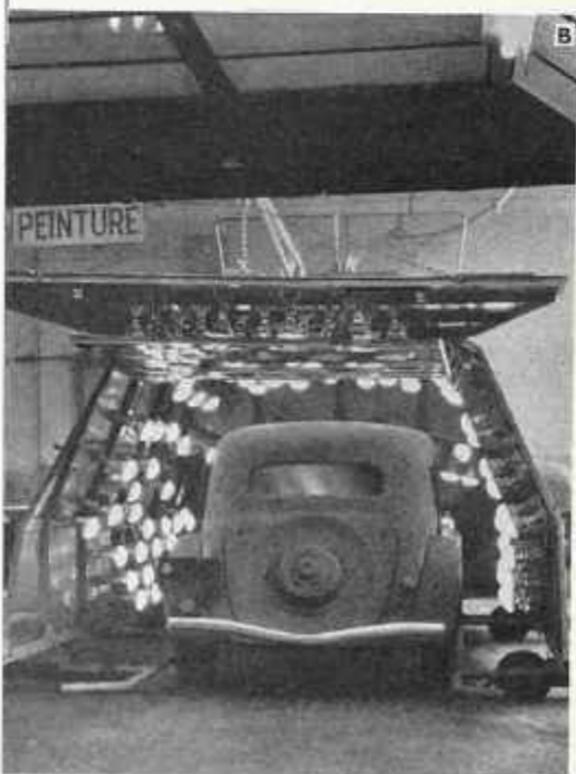
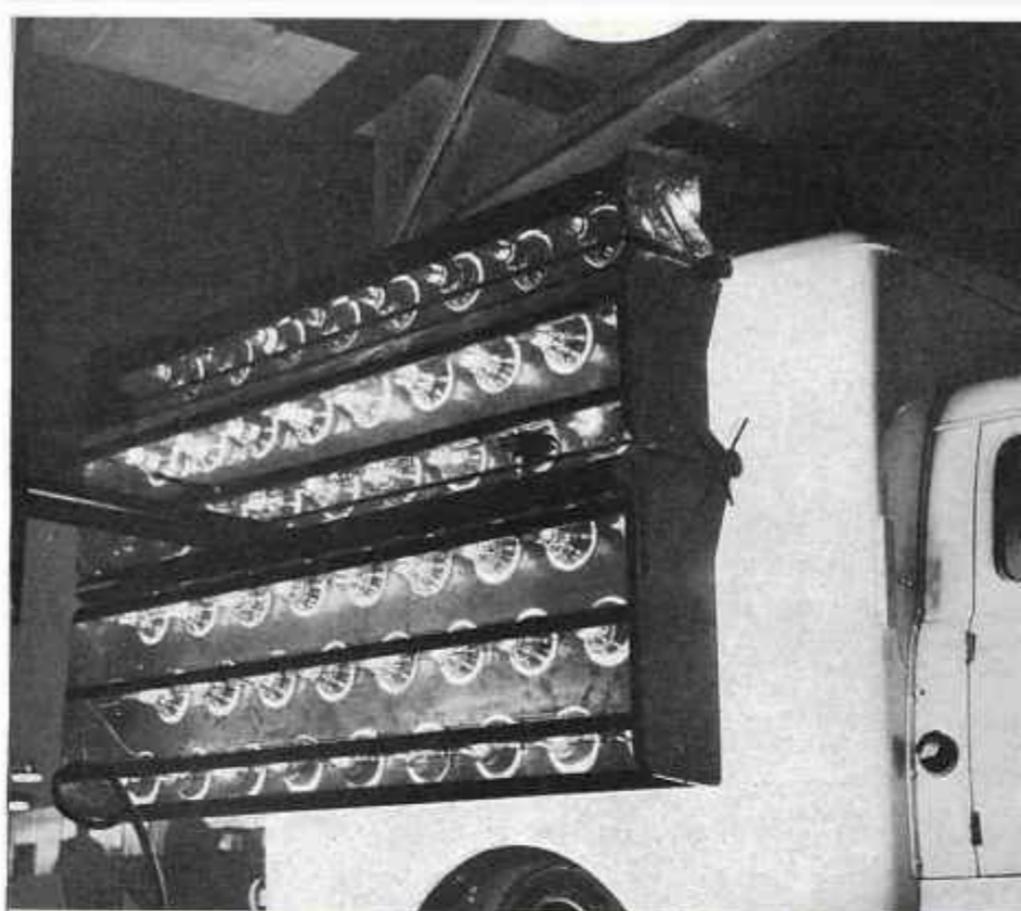
Ces figures 3 et 4 montrent une différence essentielle entre les deux modes de transport thermique. Pour la convection, le fluide est indispensable, puisqu'il est le véhicule de la chaleur. Dans le rayonnement, il ne joue théoriquement aucun rôle (et dans la plupart des cas, il en est bien ainsi), et peut même ne pas exister (chauffage dans le vide).

Les figures 5 et 6 mettent en évidence, sous une autre forme, la différence entre la convection et le rayonnement.

Dans le premier cas, la température d'entrée de l'air est forcément supérieure à celle de l'air à la sortie, la température de la charge étant de son côté inférieure à celle de l'air entrant. Dans le dernier cas, l'ambiance peut être à une température moindre que celle de la charge. Le thermomètre supérieur de la figure de droite (supposé protégé du rayonnement par un écran approprié) n'est placé qu'à titre indicatif, car, ainsi que nous le rappellerons plus loin, un tel appareil soumis à un rayonnement ne peut pas constituer un appareil de mesure de la température.



- Traitement de peinture sur carrosserie automobile. (Doc. Philips-Berthelot.)
- Autre vue de l'étuve. A.000 E. (Doc. Philips-Berthelot.)



NATURE DU CHAUFFAGE PAR RAYONNEMENT INFRAROUGE

LE chauffage par rayonnement infrarouge est un mode de chauffage dans lequel on utilise un rayonnement infrarouge (1).

Cette définition indique suffisamment les points caractéristiques et nous fournit le plan logique de cette courte étude, laquelle est toutefois limitée au rayonnement infrarouge court.

Il s'agit en effet :

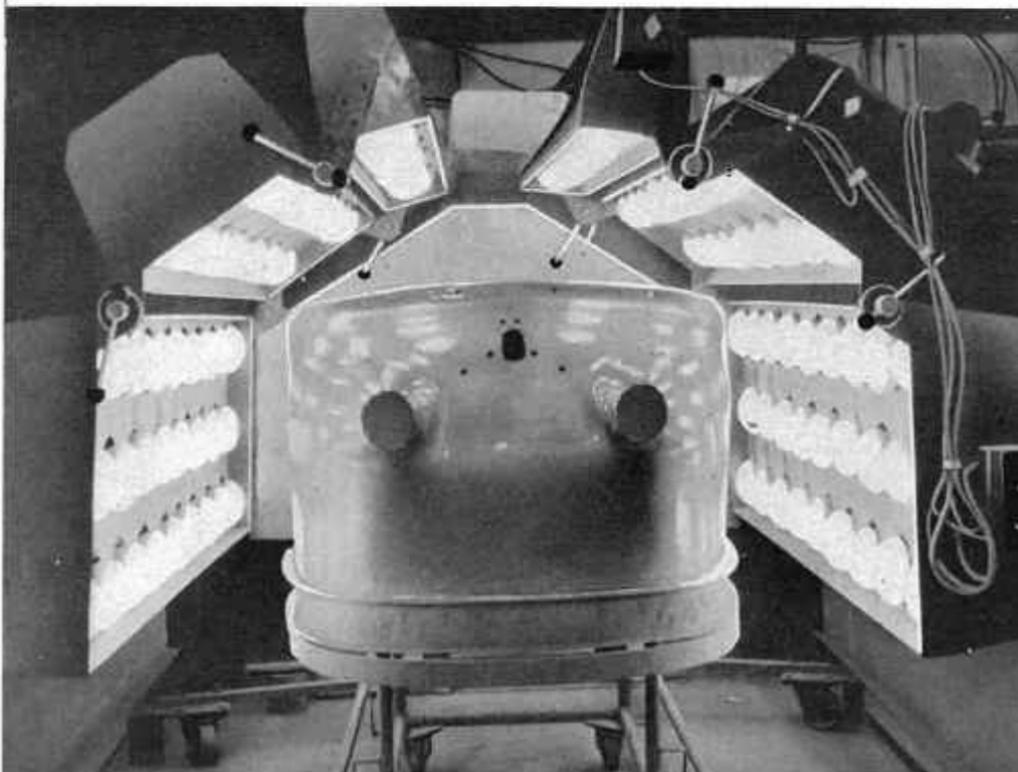
<i>Raisonnement :</i>	<i>Sommaire :</i>
d'un rayonnement	1 ^{re} Partie théorique :
constitué de radiations infrarouges,	Définition du rayonnement,
qui irradie	Domaine de l'infrarouge,
	Lois du rayonnement,
la surface d'une substance à traiter, } Réception des radia- } Réflexion,	
	tions par la sub- } Transmission,
	stance } Absorption,
aux fins de chauffage de celle-ci, } Transformation en chaleur de l'énergie reçue.	

étant entendu que ce mode de chauffage doit, comme tout autre, répondre à des conditions optima d'ordre technique et économique, ce qui conduit à :

sélectionner les radiations	Sélection des radiations infrarouges,
comparer le chauffage par rayonnement infrarouge aux autres modes, }	Comparaison du chauffage par rayonnement infrarouge et du chauffage par convection.

(1) Vocabulaire Électrothermique (établi par le Comité Français d'Électrothermie) et Vocabulaire Électrotechnique Français.

◀ ● A. - Traitement de peinture sur carrosserie automobile. 51 E par panneau. (Doc. Philips.) ● B. Étuve-cloche (position ouverte). Traitement de peinture sur carrosserie automobile. 160 E. (Doc. Mazda.) ● C. La même étuve (position fermée : l'étuve épouse la forme de la carrosserie). (Doc. Mazda.)



et, au point de vue pratique, à considérer les conditions de :

	2^e Partie pratique :
production des infrarouges.....	} Production des radiations infrarouges. Conditions d'emploi des émetteurs. Conditions d'utilisation des infrarouges. Avantages du chauffage par rayonnement infrarouge.
utilisation des infrarouges.....	

et à en déduire quelles sont les applications intéressantes,

Applications du chauffage par rayonnement infrarouge.

DÉFINITION DU RAYONNEMENT

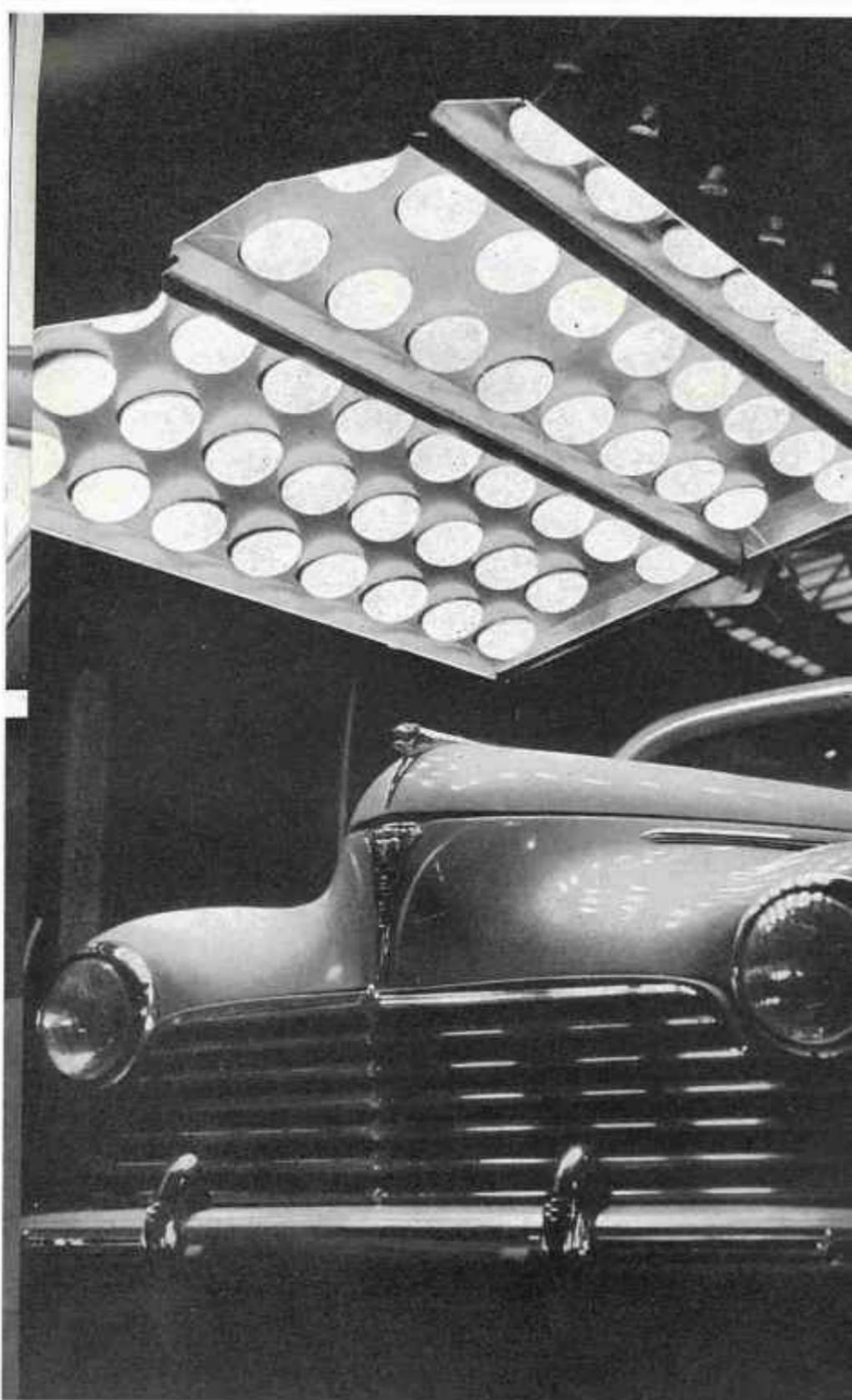
Un rayonnement est constitué par un ensemble de radiations.

DOMAINE DES RADIATIONS INFRAROUGES

Dans le champ immense des radiations électromagnétiques (fig. 7), le domaine de l'infrarouge commence immédiatement après la limite du visible et s'étend jusqu'aux ondes hertziennes qu'il chevauche partiellement.



● Traitement de raccords de peinture sur carrosserie automobile. 12 E. (Doc. Philips-Devis et Gandard.) ● Traitement de peinture sur auto-scooter. 96 E sur panneaux. (Doc. Philips-R.G.)



La frontière entre le rouge (visible) et l'infrarouge (invisible) dépend notamment de certains caractères physiologiques (œil) de l'individu et est, par suite, assez imprécise. On admet généralement qu'elle correspond à la longueur d'onde de 7 600 angströms (1).



Du point de vue pratique (*fig. 8*), qui seul nous intéresse, nous adopterons la classification suivante (2) :

Infrarouge court : longueurs d'ondes inférieures à 2 microns, soit 20 000 Å ;

Infrarouge moyen : longueurs d'ondes comprises entre 2 et 4 microns, soit 20 000 et 40 000 Å ;

Infrarouge long : longueurs d'ondes supérieures à 4 microns, soit 40 000 Å.

LOIS FONDAMENTALES DU RAYONNEMENT

Du point de vue thermique, les notions essentielles relatives au rayonnement énergétique sont les suivantes (3) :

● Nature des radiations. Spectre.

Tout corps qui se trouve à une température différente du « zéro absolu » (-273° C) émet, par sa surface, un rayonnement énergé-

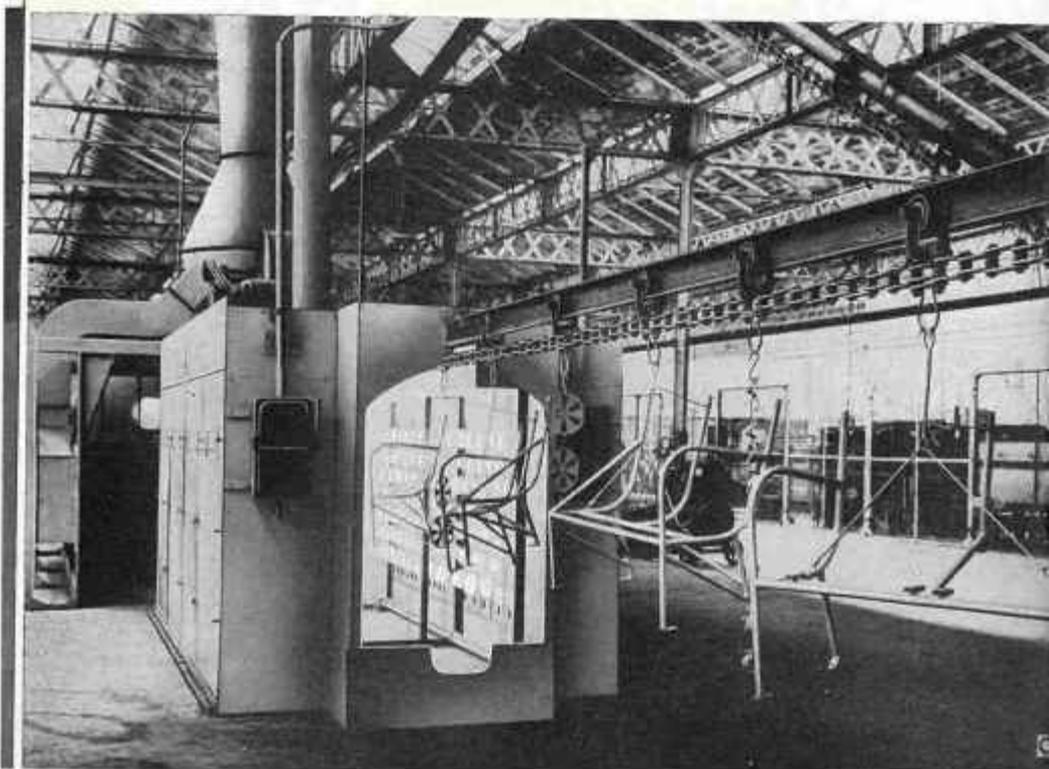
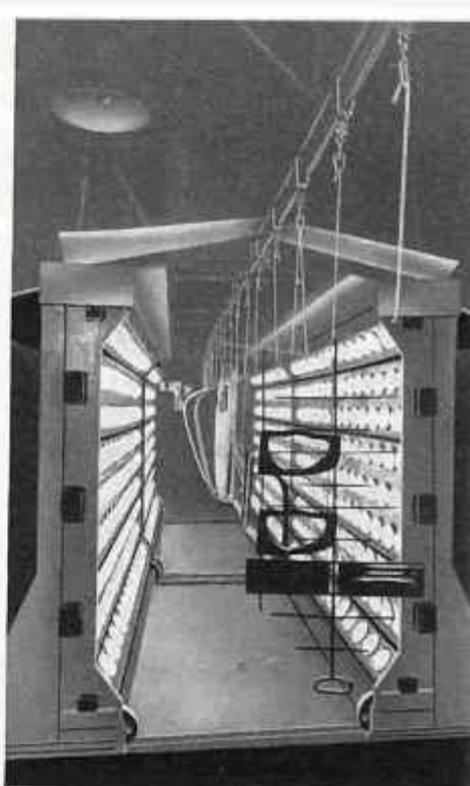
(1) 1 angström (Å) = 1 dix-millionième de millimètre = 1 dix-millième de micron (0,0001 μ).

1 micron (μ) = 1 millionième de mètre = 10 000 Å.

(2) Classification du Comité Français d'Electrothermie (1949).

(3) Cf. *La pyrométrie optique*, livre du professeur G. RIBAUD, 1930 ; Le rayonnement des corps non noirs, conférence du P^e G. RIBAUD au Conservatoire des Arts et Métiers, 1930 (voir aussi *Mémoires des Sciences Physiques*, n° 9, 1930).

● *Traitement de raccords de peinture sur carrosserie automobile.* 51 K. (Doc. Philips-R.G.)



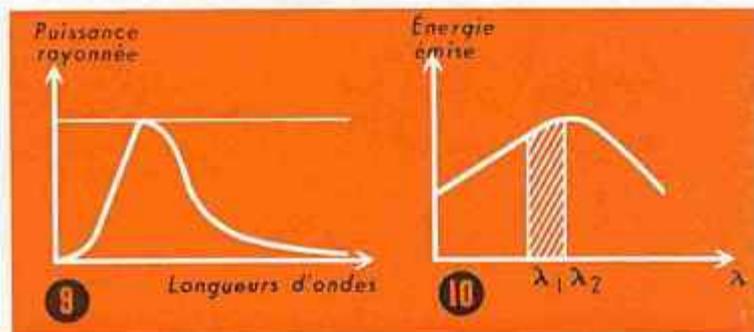
tique, c'est-à-dire un certain nombre de radiations à des longueurs d'onde déterminées. Le spectre de ce rayonnement (fig. 9) donne la valeur de l'énergie émise pour chaque longueur d'onde λ et la surface totale comprise entre la courbe spectrale et l'axe des abscisses représente la quantité totale d'énergie émise. La surface hachurée (fig. 10) représente la quantité d'énergie émise par les radiations dont les longueurs d'onde sont comprises entre λ_1 et λ_2 . Le spectre dépend de la valeur de la température et de la surface du corps. Il s'ensuit que deux corps identiques, portés à la même température dans une enceinte isotherme, rayonnent l'un sur l'autre la même quantité d'énergie; tout se passe alors comme s'il n'y avait aucun échange d'énergie entre eux : leur température ne varie pas.

Quand deux corps identiques, mais à des températures différentes, sont en présence dans une enceinte isotherme, ils rayonnent l'un sur l'autre; tout se passe comme si le corps le plus chaud envoyait seul de l'énergie sur le corps le plus froid, en vue de réaliser l'équilibre naturel de température.

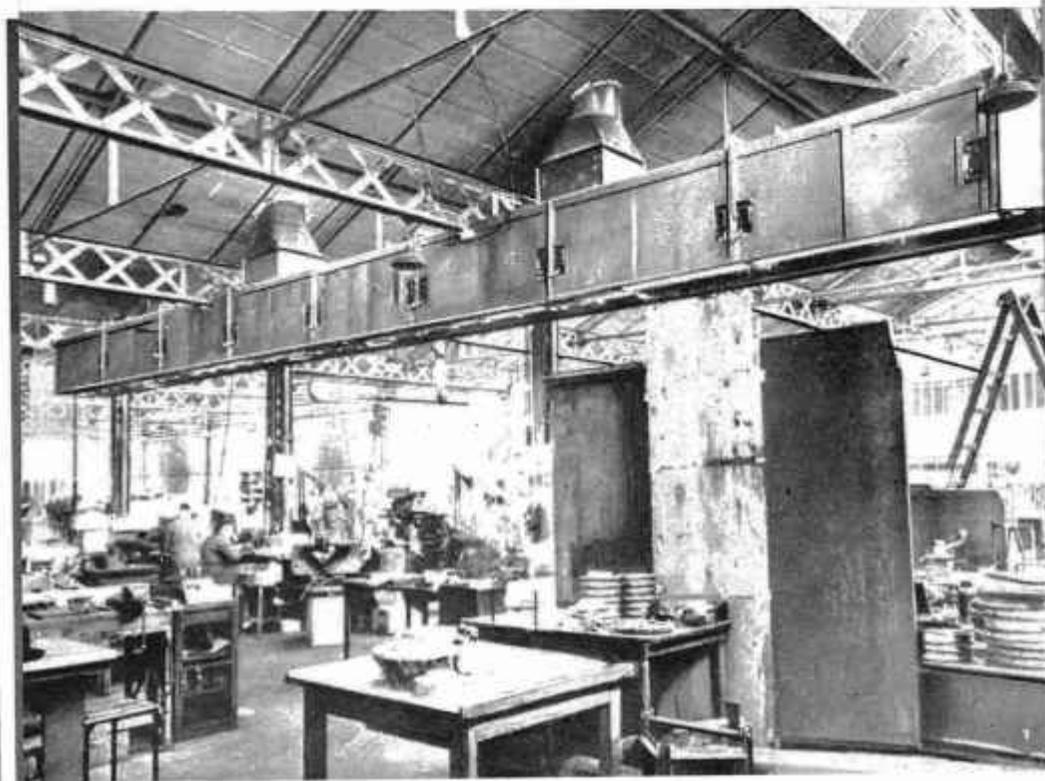
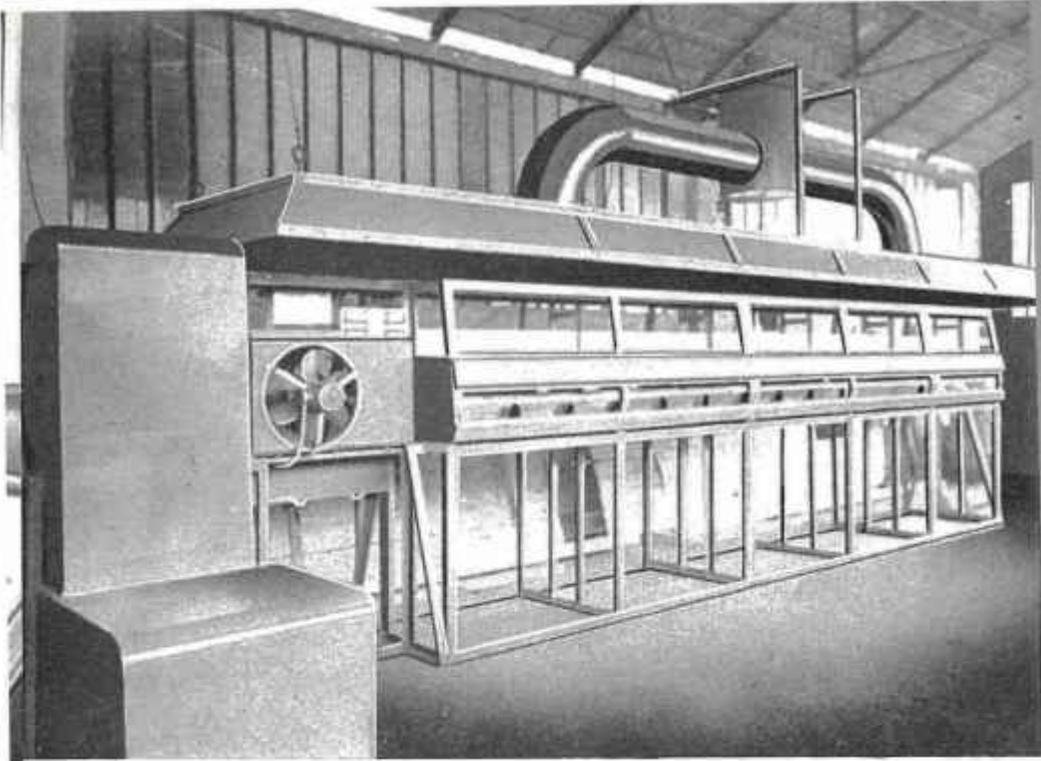
Le raisonnement est plus complexe si les corps ne sont pas identiques.

● Corps noir.

D'où la nécessité, si l'on veut déterminer d'une façon simple les conditions de l'émission en tenant compte des seules variations



- A - Traitement de peinture sur accessoires d'aviation. 600 E. (Doc. Philips-R.G.)
 ● B - Traitement d'accessoires d'automobiles. Panneaux extensibles. 600 E. (Doc. Philips.) ● C - Traitement de peinture sur accessoires d'automobiles. 280 E. (Doc. Mazda-Forges d'Aulincourt.)



de la température, de définir un corps hypothétique dit « corps noir » pour lequel la notion d'état de surface n'intervient plus. On peut ainsi rapporter tous les autres corps à ce corps-type.

Par définition, le corps noir absorbe intégralement la totalité d'un rayonnement quelconque (rôle de récepteur). D'autre part, à surface égale, il émet plus que n'importe quel autre corps porté à la même température (rôle d'émetteur).

● Loi de Kirchoff.

Pour une même température et une même longueur d'onde, le rapport du pouvoir émissif e_λ au pouvoir absorbant a_λ d'un corps donné est constant et égale au pouvoir émissif E_λ du corps noir pour la longueur d'onde considérée :

$$\frac{e_\lambda}{a_\lambda} = E_\lambda.$$

Il en résulte que : si le corps émet certaines radiations ($e_\lambda \neq 0$), il absorbe également ces mêmes radiations à la température considérée (car a_λ est alors $\neq 0$) ;

Si le corps est parfaitement réfléchissant ou parfaitement transparent ($a_\lambda = 0$, aucune radiation n'est absorbée), son pouvoir émissif est nul (car e_λ est alors $= 0$) ;

Si le corps absorbe certaines radiations ($a_\lambda \neq 0$), il peut, suivant la valeur de E_λ , les émettre (si E_λ est $\neq 0$) ou non (si E_λ est $= 0$).

Pour le corps noir $E_\lambda = 1$.

● Loi de Stephan-Boltzmann.

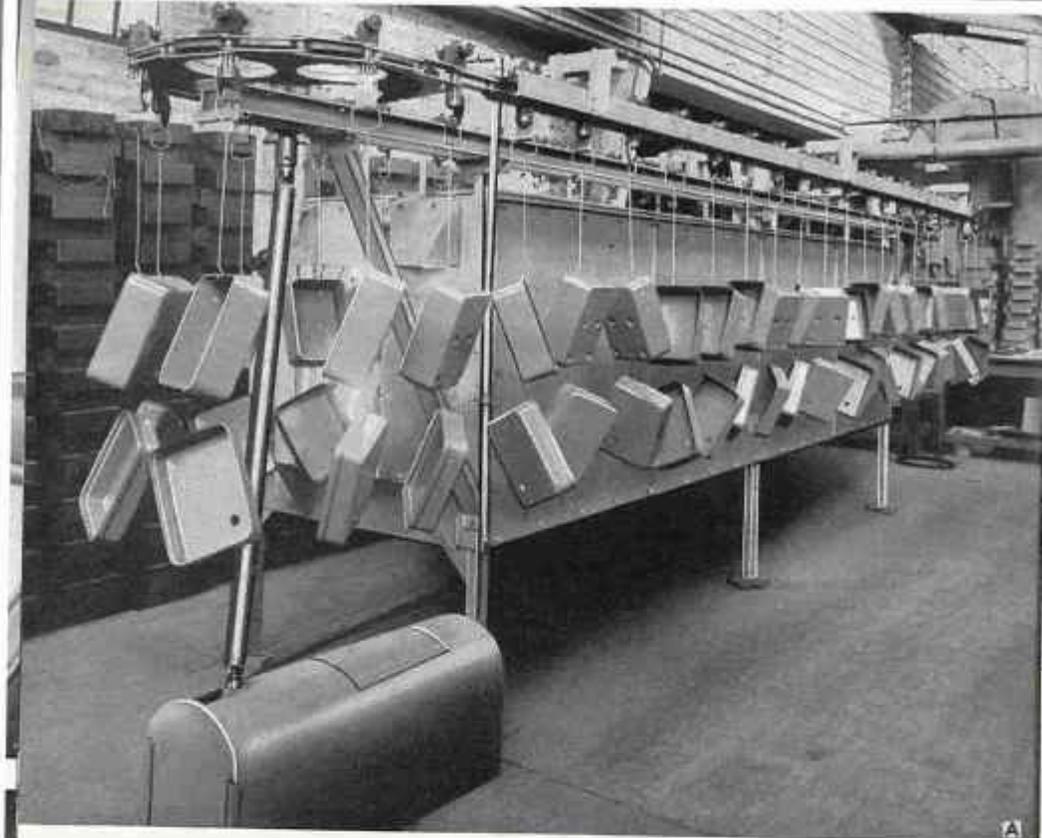
La quantité Q d'énergie rayonnée par seconde, c'est-à-dire la puissance rayonnée, par un corps noir de surface S à la température absolue T a pour valeur :

$$Q = KST^4$$

K étant une constante (voir note page 23).

Si Q est exprimé en watts, S en centimètres carrés et T en degrés Kelvin ($T = t + 273$, t étant la température en degrés centésimaux), on a : $K = 5,71 \times 10^{-12}$.

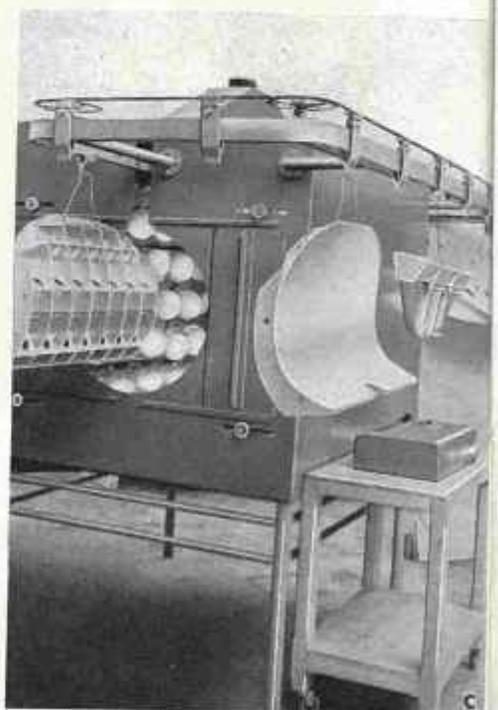
● Séchage de revêtement sur projectiles. GA E. (Doc. Berthelot.) ● Traitement de peinture sur accessoires d'automobiles. Etude accolée aux ferues du hall. 136 E. (Doc. Philips-R.G.)



A



B



C

Q est donc proportionnelle à la quatrième puissance de T et, par conséquent, la puissance rayonnée varie rapidement avec la température (1).

Ex. : Un corps noir de 1 cm² rayonne 5,71 W à 727° C (soit 1 000° K) et 91 W, soit environ seize fois plus, à 1 727° C (soit 2 000° K) (fig. 2).

Pour les corps autres que le corps noir, la constante K a une valeur plus faible.

(1) En pratique, la puissance émise suit les lois théoriques suivantes :

La puissance transmise par radiation par une source chaude à la température absolue T₁ à une source froide identique à la température absolue T₂ a pour valeur :

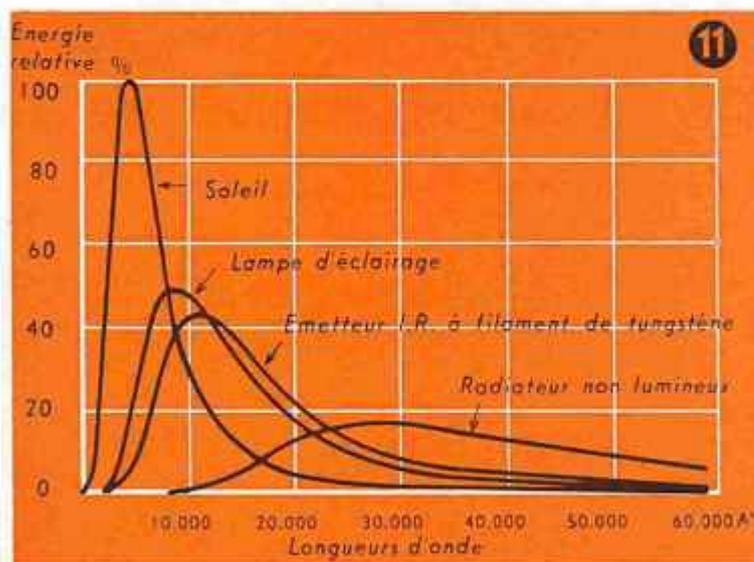
$$K'(T_1^4 - T_2^4)$$

K' étant une constante. Aux températures élevées de T₁ (cas des émetteurs de rayonnement infrarouge court), la valeur T₂⁴ est négligeable devant celle de T₁⁴.

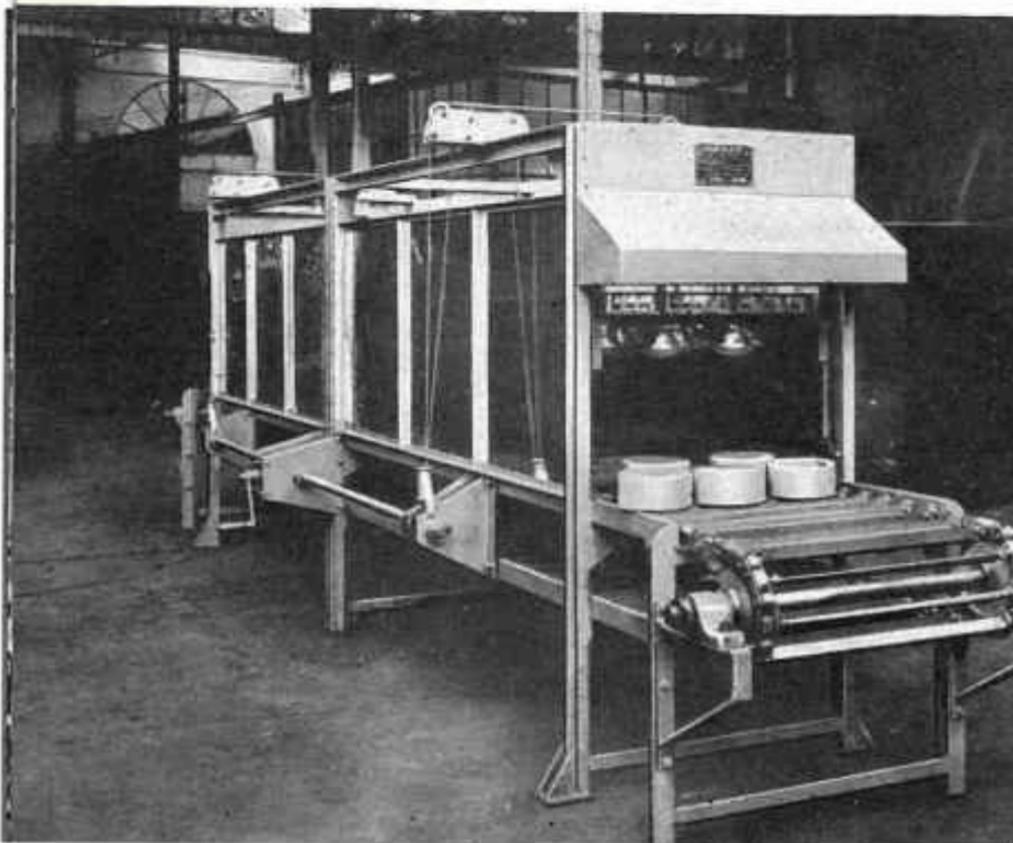
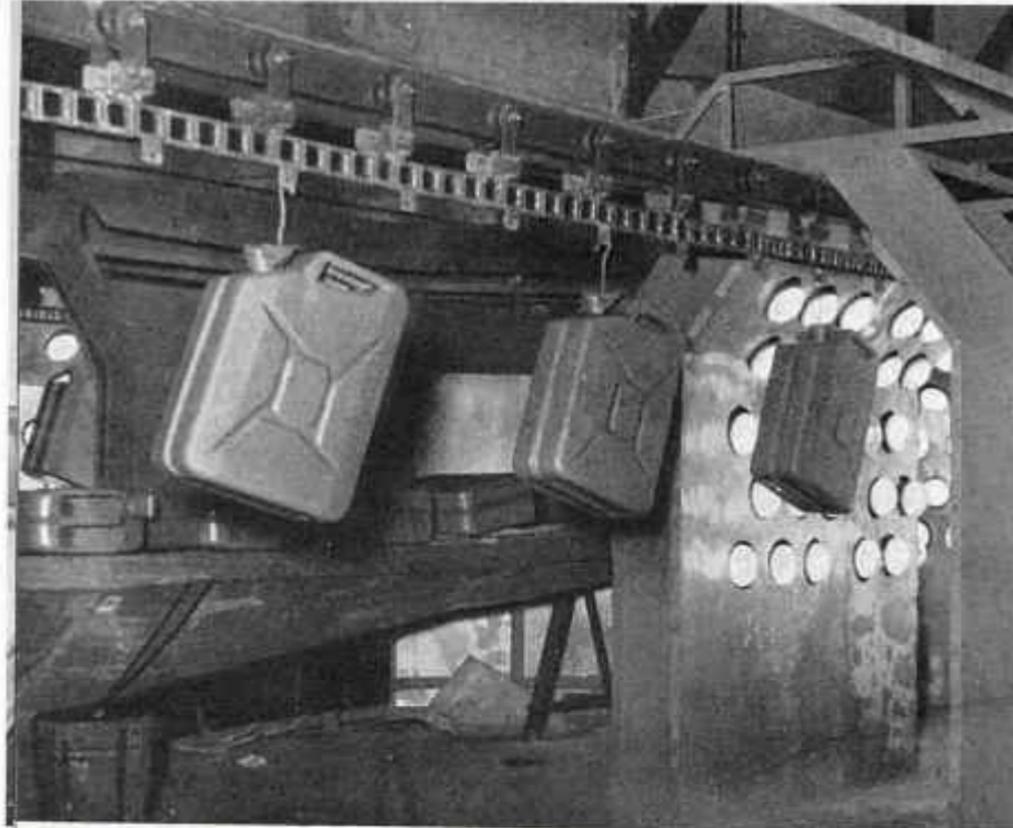
L'énergie thermique transmise par convection serait :

$$K''(T_1 - T_2)^{\frac{5}{4}}$$

K'' étant une constante dépendant des dimensions et de la configuration de la source froide ; lorsque T₂ se rapproche de T₁, le transfert par convection tend vers zéro.



- A - Traitement de peinture sur pièces métalliques. 60 E. (Doc. Mazda-S.E.P.S.)
- B - Séchage d'émulsion. 32 E. (Doc. Philips-Ferro.)
- C - Traitement de peinture sur pièces métalliques. 48 E. (Doc. Mazda.)



● Loi de Wien.

La *figure 11* montre que le point le plus élevé des spectres correspondant à diverses températures se déplace vers les courtes longueurs d'onde quand la température croît.

La position de ce maximum est déterminée par la loi de déplacement de Wien qui relie la température absolue T du corps noir à la longueur d'onde λ_m du maximum d'émission correspondant (1) :

$$\lambda_m T = 2\,886.$$

● Corps gris.

Pratiquement, pour les corps incandescents ordinaires (corps gris : métaux, carbone) qui nous intéressent, les maxima des courbes spectrales sont très inférieurs à ceux du corps noir. Mais les lois du rayonnement de ces corps se rattachent (avec des coefficients un peu différents) à celles du corps noir et cela nous suffit.

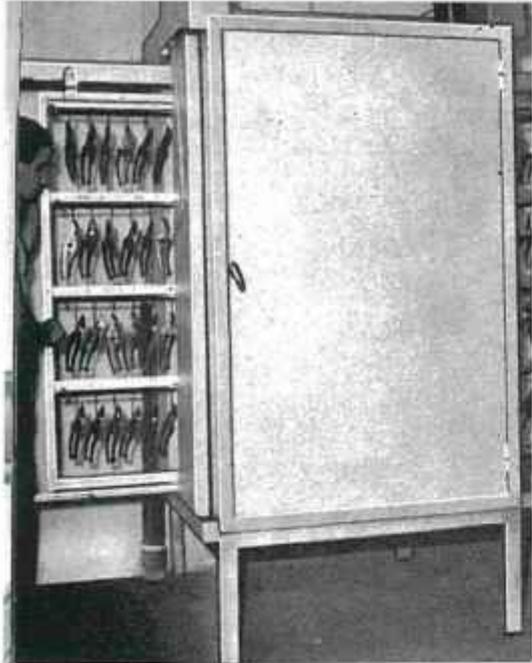
De ce qui précède, on peut déduire que :

● 1^o *Tout rayonnement, quel qu'il soit, composé de radiations quelconques, est susceptible de produire une élévation de la température d'un corps irradié si celui-ci absorbe tout ou partie des radiations qu'il reçoit.* Si le corps irradié n'absorbe pas de radiations, il n'y a pas d'échauffement (cas théorique de la réflexion ou de la transparence parfaites) ;

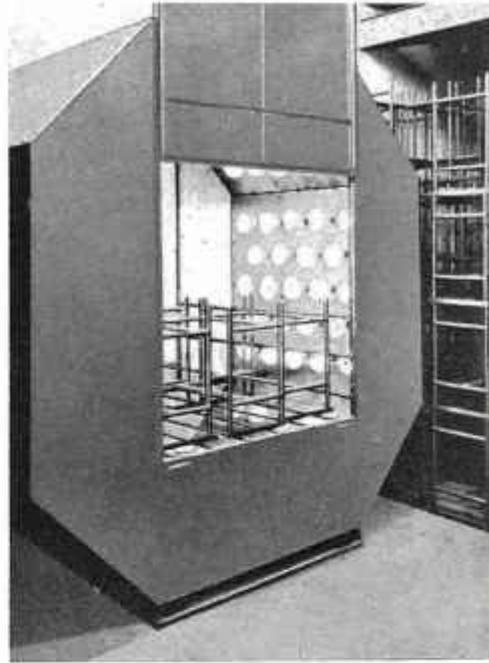
● 2^o *La puissance rayonnée, et par suite l'énergie transportée jusqu'aux corps irradiés, est proportionnelle à la surface totale de la source de rayonnement (émetteur) et à la quatrième puissance de sa température absolue.* Il s'ensuit que, à puissance rayonnée égale, les dimensions de la source de rayonnement sont d'autant plus faibles que sa température est plus élevée et donc que l'on pourra ainsi augmenter le taux de rayonnement par unité de surface du corps à irradier ;

(1) On peut, en passant, en déduire la température théorique du soleil (supposé rayonnant comme un corps noir) dont le pouvoir émissif maximum a lieu dans le vert : $\lambda_m = 4\,700$ angströms (= 0,47 micron) ; d'où $T = 2\,886 : 0,47 = 6\,100^\circ \text{K}$.

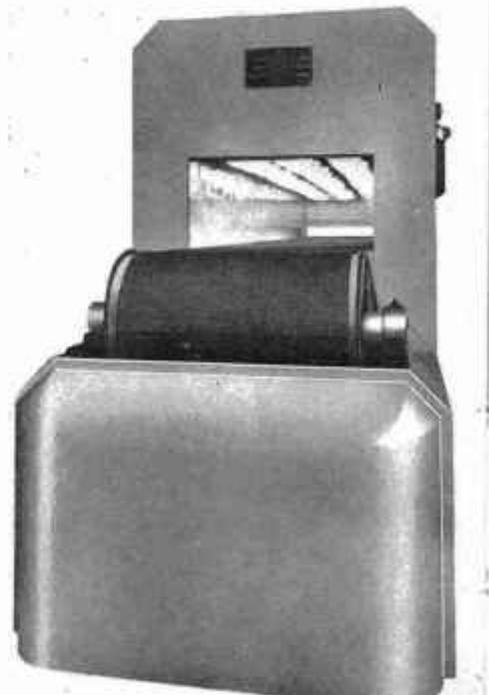
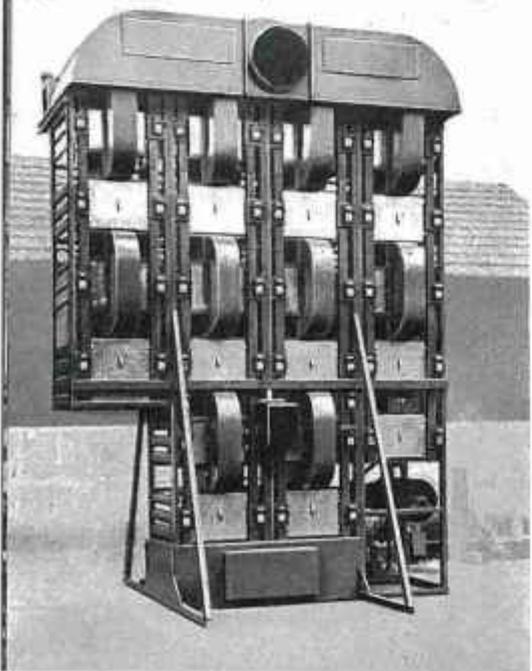
● *Traitement de peinture sur ferricams.* 160 E. [Doc. Philips.] ● *Séchage de casseroles métalliques.* 51 E. [Doc. Philips-Mabov.]



- *Traitement de peinture sur sécheurs, 60 E. (Doc. Mazda.)*
- *Séchage d'enduit sur tissu Ferodo, 320 E. (Doc. Mazda.)*



- *Séchage de mobilier métallique tubulaire, 80 E. (Doc. Philips.)*
- *Traitement de peinture sur visites métalliques, 36 E. (Doc. Mazda.)*



● 3° L'importance relative dans le spectre d'émission de l'énergie représentée par les radiations de *courtes longueurs d'onde* est d'autant plus grande que la température de l'émetteur est plus élevée. Cela est une des raisons de l'intérêt du chauffage par « lampes infrarouges ».

Pour fixer les idées, la longueur d'onde qui transporte le maximum de puissance, selon la température de l'émetteur (corps noir), est donnée dans le tableau suivant :

Longueur d'onde approximative Angströms	Température de l'émetteur	
	Degrés centésimaux	Degrés Kelvin
75 000	100	373
25 000	800	1 073
10 000	2 600	2 873

● 4° *Le pouvoir absorbant* d'un corps donné est variable suivant la longueur de la radiation reçue. Les longueurs d'onde des diverses radiations constituant le rayonnement de la source émettrice ne sont donc pas indifférentes.

Tels sont les points, importants pour notre objet, que la science et la technique actuelles permettent de préciser.

TRANSMISSION ET ABSORPTION DES RAYONS INFRAROUGES

Les rayons infrarouges se comportent, vis-à-vis des substances qu'ils rencontrent, comme les rayons lumineux :

si la substance leur est parfaitement perméable, ils la traversent tout simplement, sans qu'il y ait production de chaleur ;

si la substance est parfaitement réfléchissante, ils sont réfléchis purement et simplement et il n'y a pas production de chaleur dans la substance ;

si la substance les absorbe, totalement ou partiellement, l'énergie qu'ils transportent se dégrade en énergie calorifique et par suite la température de la substance augmente.

De nombreuses études et recherches ont été faites à ce sujet ; nous n'en retiendrons que quelques indications succinctes, utiles à la compréhension de notre sujet.



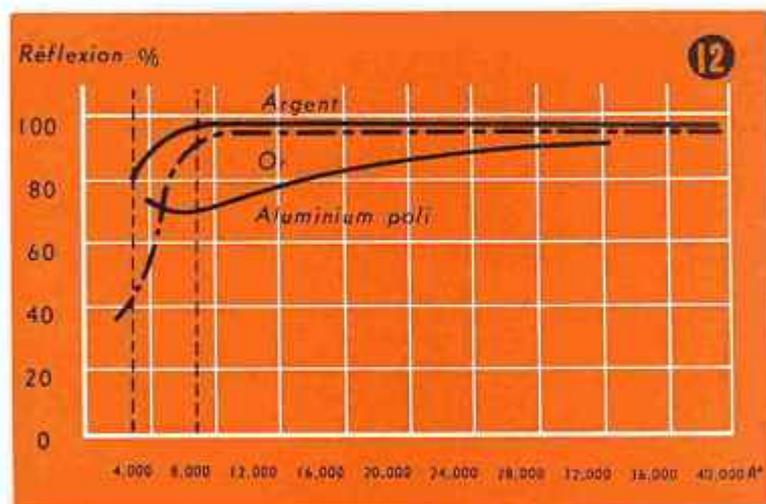
● Réflexion.

Le facteur de réflexion d'un corps est, en général, essentiellement fonction de sa nature, de son état de surface, de la longueur d'onde de la radiation reçue et de l'angle d'incidence des rayons reçus, de l'hygrométrie du corps et de sa température.

En général, le facteur le plus élevé dans l'infrarouge est obtenu avec les métaux polis : argent, or, cuivre et aluminium (fig. 12).

Les poussières recouvrant les surfaces en diminuent considérablement le pouvoir réfléchissant.

Les corps parfaitement réfléchissants n'existent pratiquement pas.

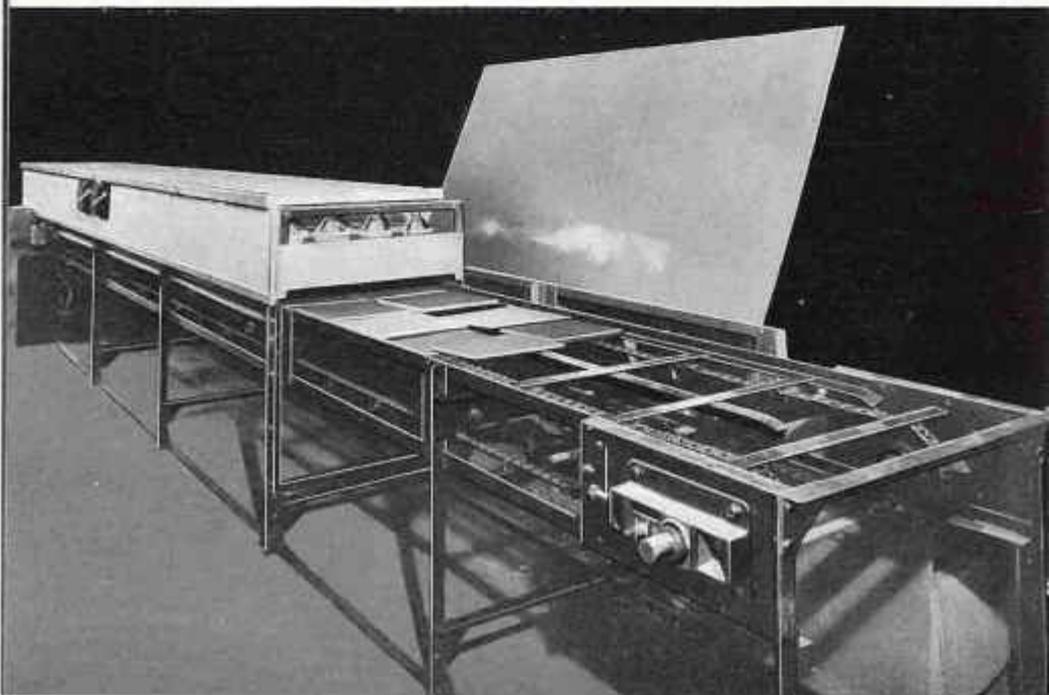
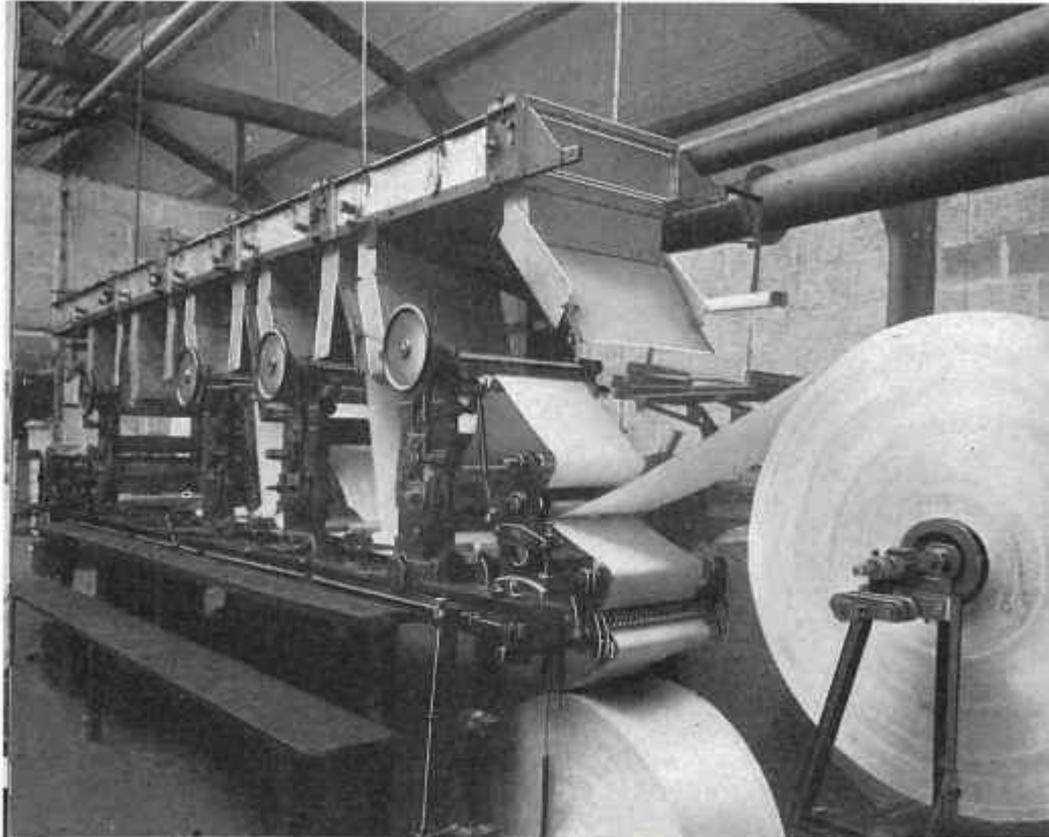


● Transmission et absorption (1).

La pénétration d'une radiation dans une substance donnée dépend d'un coefficient dit « d'absorption dans la masse » qui est fonction de la longueur d'onde de cette radiation.

(1) Nous avons adopté les termes de « transmission » et « absorption » qui sont les plus usités dans les traités de physique.

● *Séchage de carton en feuilles, 100 E. (Doc. Philips.)* ● *Séchage d'impression en timbrage-relief, 20 E. (Doc Mazda-S.E.P.S.)*



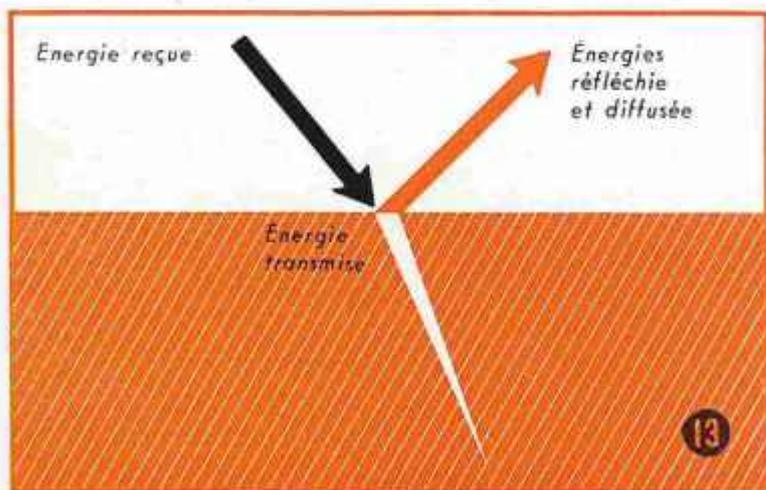
Cette pénétration est assez faible; elle dépend, notamment, de la nature du corps; par exemple, pour l'infrarouge court, elle est de l'ordre du micron dans les métaux et du centimètre dans la peau humaine.

Théoriquement, l'absorption peut être ou ne pas être totale, tout ou partie du rayonnement pouvant traverser le corps.

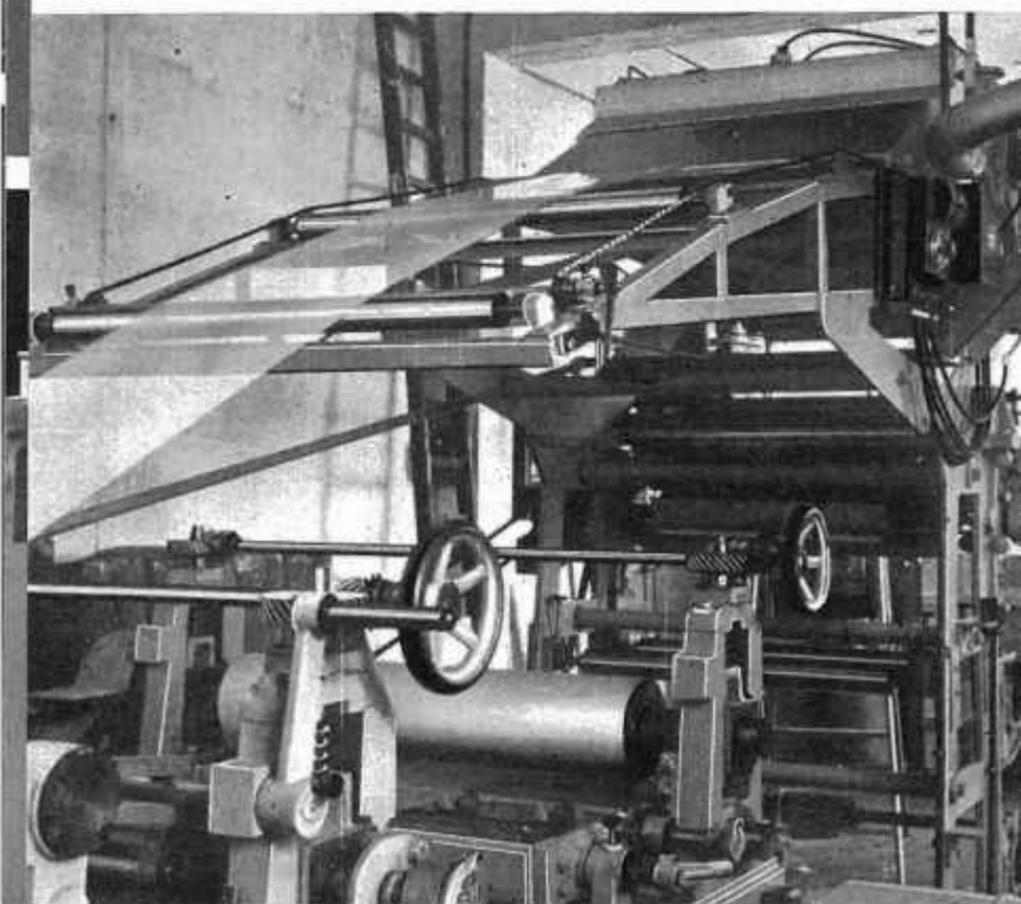
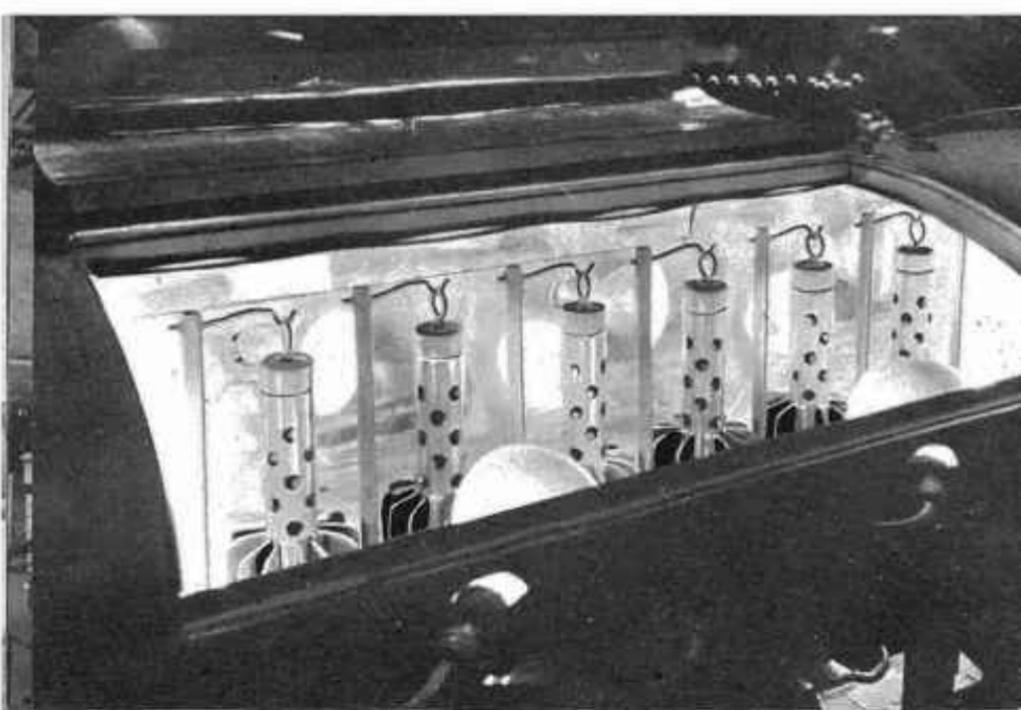
Dans le phénomène de l'absorption, la répartition de l'énergie dans la masse n'est pas régulière dans le sens de l'épaisseur et, par là même, les effets correspondants de température en profondeur ne le sont pas.

L'énergie transmise diminue au fur et à mesure de la pénétration dans la matière, c'est-à-dire au fur et à mesure de son absorption (fig. 13, relative à une substance non transparente).

Dans la grande majorité des applications, des succès importants ont été obtenus alors que l'épaisseur de la matière soumise aux radiations d'infrarouge court se trouvait être supérieure à la profondeur réelle de pénétration du rayonnement. C'est là qu'intervient la technique industrielle proprement dite, qui doit réaliser des compromis entre les phénomènes de pénétration pure et les phénomènes de conduction.



● Séchage d'impression héliographique, 15 E. (Doc. Mazda-S.E.P.S.) ● Traitement de peintures sur plaques Ferodo, 8A E. (Doc. Mazda.)

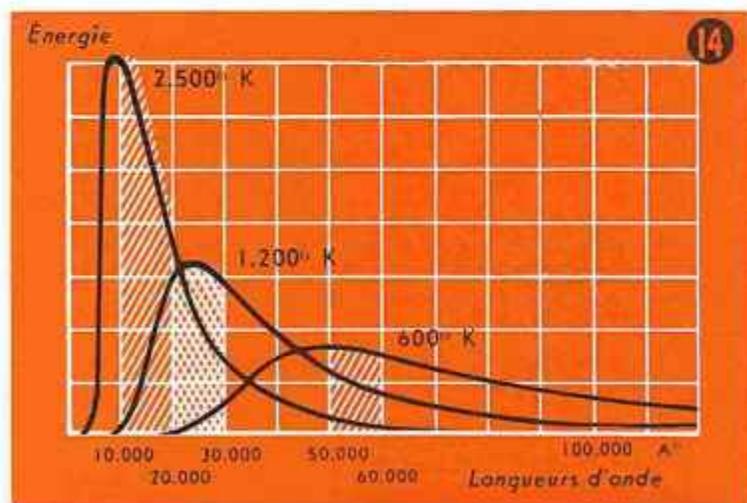


TRANSFORMATION EN CHALEUR DE L'ÉNERGIE TRANSPORTÉE

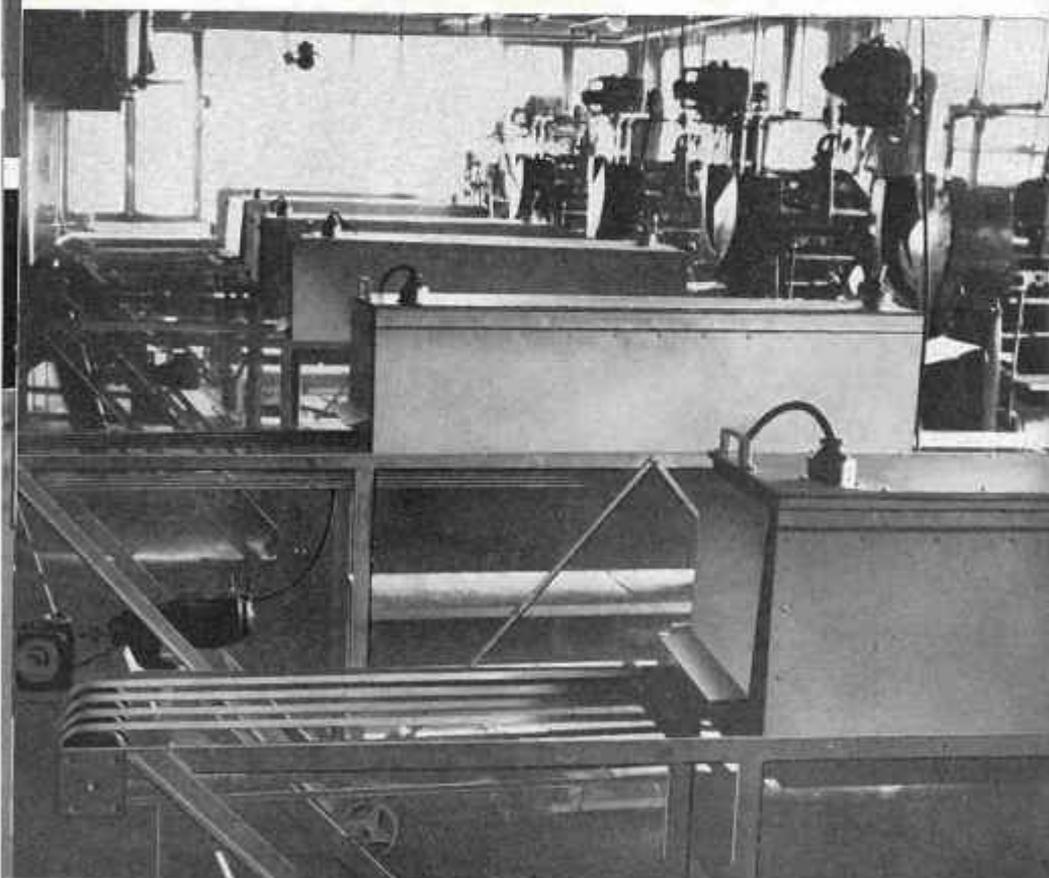
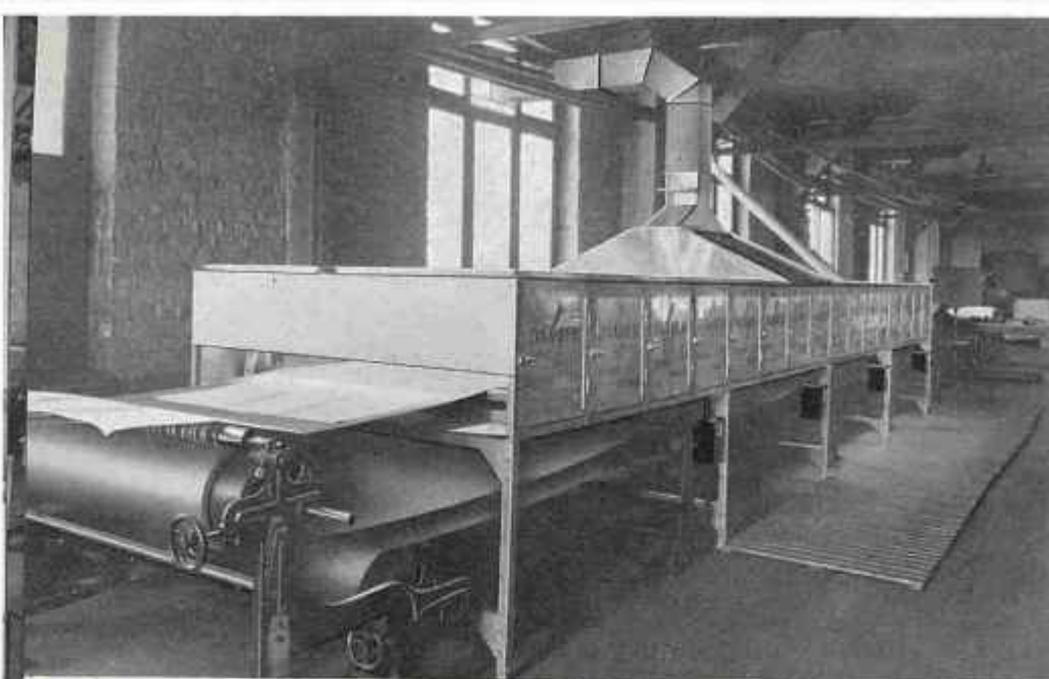
L'énergie transportée par les rayons infrarouges, dans la mesure où elle est absorbée par une substance, se transforme intégralement en chaleur. Telle est, du moins, la conception actuelle, qui repose sur le fait que les radiations considérées semblent n'exercer aucune action autre que celle d'origine thermique sur les substances qui les absorbent. C'est ce qui les différencie d'une façon sensible des autres radiations (lumineuses et ultraviolettes par exemple).

SÉLECTION DES RADIATIONS INFRAROUGES

Les raisons majeures qui ont conduit à sélectionner les radiations utilisées en chauffage électrique infrarouge sont les suivantes :



● Traitement de peinture sur munitions. 36 E. (Doc. Philips.) ● Séchage de papier vernis. 2A E. (Doc. Mazda-S.E.P.S.)



● 1^o A puissance rayonnée égale de la source émettrice des radiations infrarouges, l'énergie émise dans un intervalle de longueurs d'ondes donné est d'autant plus élevée que les longueurs d'ondes sont plus courtes, c'est-à-dire que la température de l'émetteur est plus élevée. La *figure 14* illustre ce fait : la surface hachurée représente, pour chacune des sources d'émission considérées, l'énergie maximum émise dans une zone de 10 000 Å ; évaluée en pour-cent de l'énergie totale émise par la source, cette énergie maximum hachurée a pour valeur approximative 54,2 pour la source à la température la plus élevée, 27,3 pour la source à température intermédiaire et 15 pour la source à la température la plus basse.

D'autre part, pour rayonner une puissance donnée, il faut une surface beaucoup plus faible dans le cas d'un émetteur à haute température que dans le cas d'un émetteur à basse température (loi de Stephan-Boltzmann).

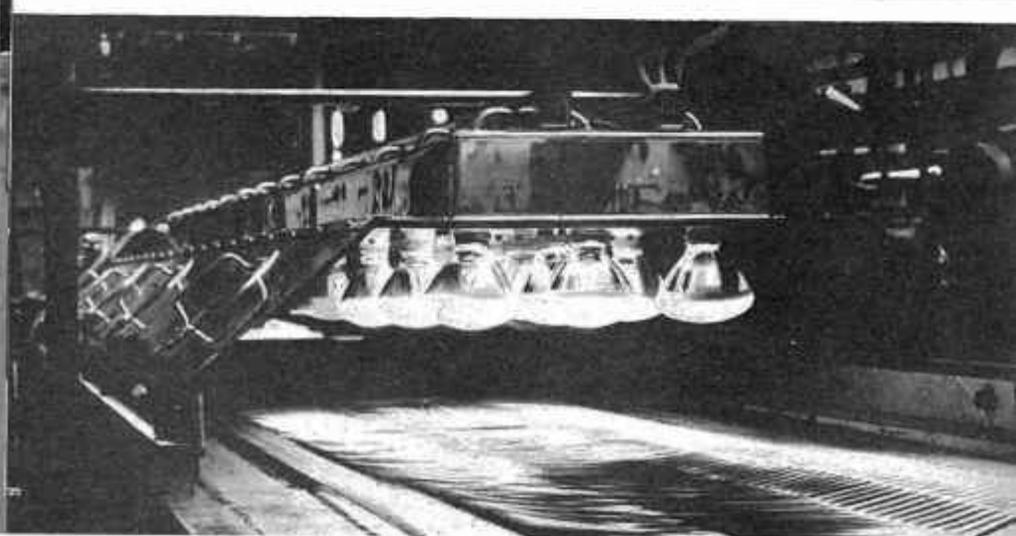
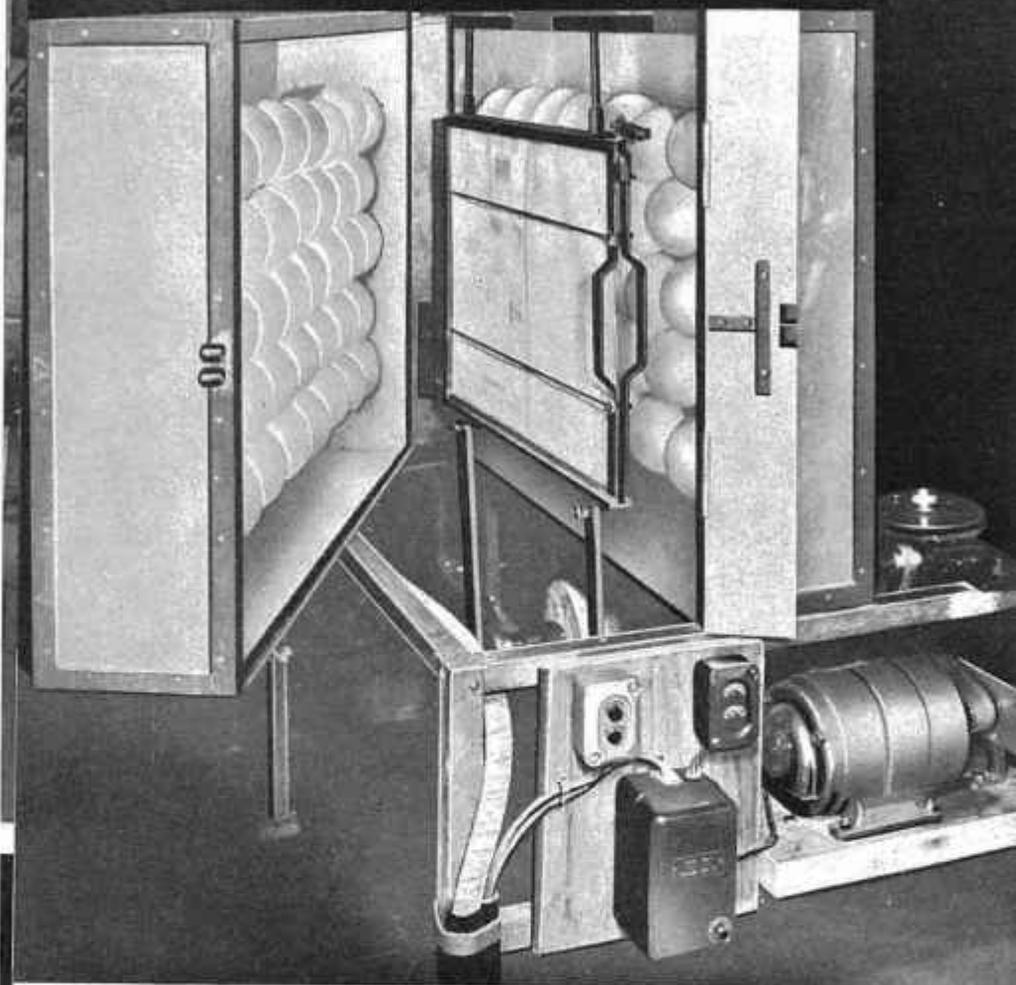
● 2^o Dans le cas de grandes longueurs d'ondes, une proportion plus grande de convection s'ajoute au rayonnement (1).

Il s'ensuit que, si l'émetteur est à haute température, le rayonnement sera relativement plus important que s'il est à basse température.

● 3^o Les conditions d'absorption des substances dépendent de la longueur d'onde des radiations reçues (2).

(1) Il est peut-être exagéré de dire qu'on a affaire à un chauffage par rayonnement infrarouge lorsque la convection l'emporte sur le rayonnement, il s'est créé à ce sujet une confusion tout à fait regrettable et qui peut être très préjudiciable au développement d'un mode de chauffage intéressant auquel on peut être ainsi amené à imputer des résultats défavorables qui ne le concernent pas.

(2) Cf. à ce sujet les études et traités spéciaux.



COMPARAISON ENTRE LE CHAUFFAGE PAR RAYONNEMENT INFRAROUGE ET LE CHAUFFAGE PAR CONVECTION

Simple rappel succinct des principaux facteurs à considérer :

● Principe du transfert thermique.

Convection : le fluide transportant la chaleur a un faible coefficient de transmission ; il lèche la surface du corps à chauffer et la transmission se fait ensuite à partir de l'extérieur vers l'intérieur, en principe par conduction.

Rayonnement : chauffage direct du corps avec pénétration plus ou moins grande ; chauffage plus profond sous la surface et par suite, en partie, chauffage de l'intérieur vers l'extérieur.

● Augmentation de la transmission thermique.

Convection : deux moyens, soit que l'on augmente la température du fluide (on est vite limité dans cette voie), soit que l'on augmente sa vitesse de contact et au besoin que l'on dirige les filets du fluide (parfois difficile et coûteux à réaliser ; mais très intéressant dans certains cas).

Rayonnement : augmenter la puissance nominale des émetteurs et leur nombre et les disposer convenablement ; diriger ces radiations pour éviter les pertes thermiques.

● Ambiance.

Convection : fluide nécessaire.

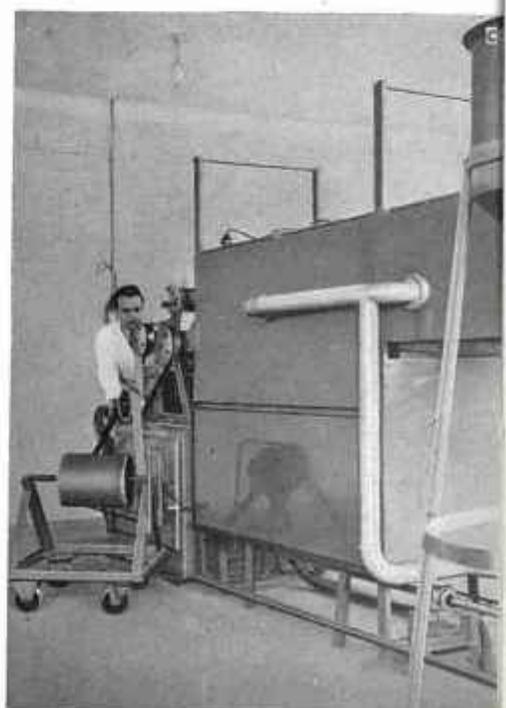
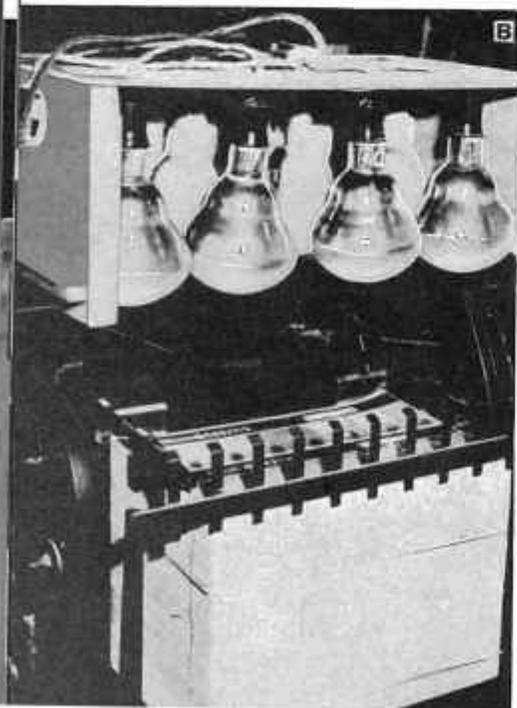
Rayonnement : fluide non nécessaire. Possibilité de chauffer dans le vide.

● Enceinte.

Convection : enceinte obligatoire.

Rayonnement : enceinte non obligatoire dans certains cas.

● Séchage de fans de clicherie, 66 E. (Doc. Mazda.) ● Séchage de pattes gommées d'enveloppes, 51 E. (Doc. Philips.)



● Calorifugeage.

Convection : nécessaire en principe.

Rayonnement : inutile ou utile, suivant le cas.

● Pertes thermiques.

Dans le cas du chauffage par rayonnement, la température de l'enceinte étant moins élevée que dans le cas du chauffage par convection, les pertes thermiques (fonction de la différence de température avec l'ambiance) sont donc moindres.

SOURCES ELECTRIQUES DE RAYONNEMENT INFRAROUGE

Il y en a plusieurs sortes : plaques (métal) à résistances chauffantes intérieures (300-400° C en général), tubes en métal ou en quartz contenant des résistances chauffantes et disposés dans des réflecteurs métalliques (700-1 100° C) par exemple, « lampes infrarouges » (2 200° C environ) ; ces divers types d'émetteurs émettent des radiations essentiellement contenues dans la zone de l'infrarouge long, dans celle de l'infrarouge moyen ou dans celle de l'infrarouge court, suivant la température de l'émetteur.

L'objet de la présente étude est réservé aux *seuls* émetteurs de rayonnement infrarouge court, donc aux sources à haute température.

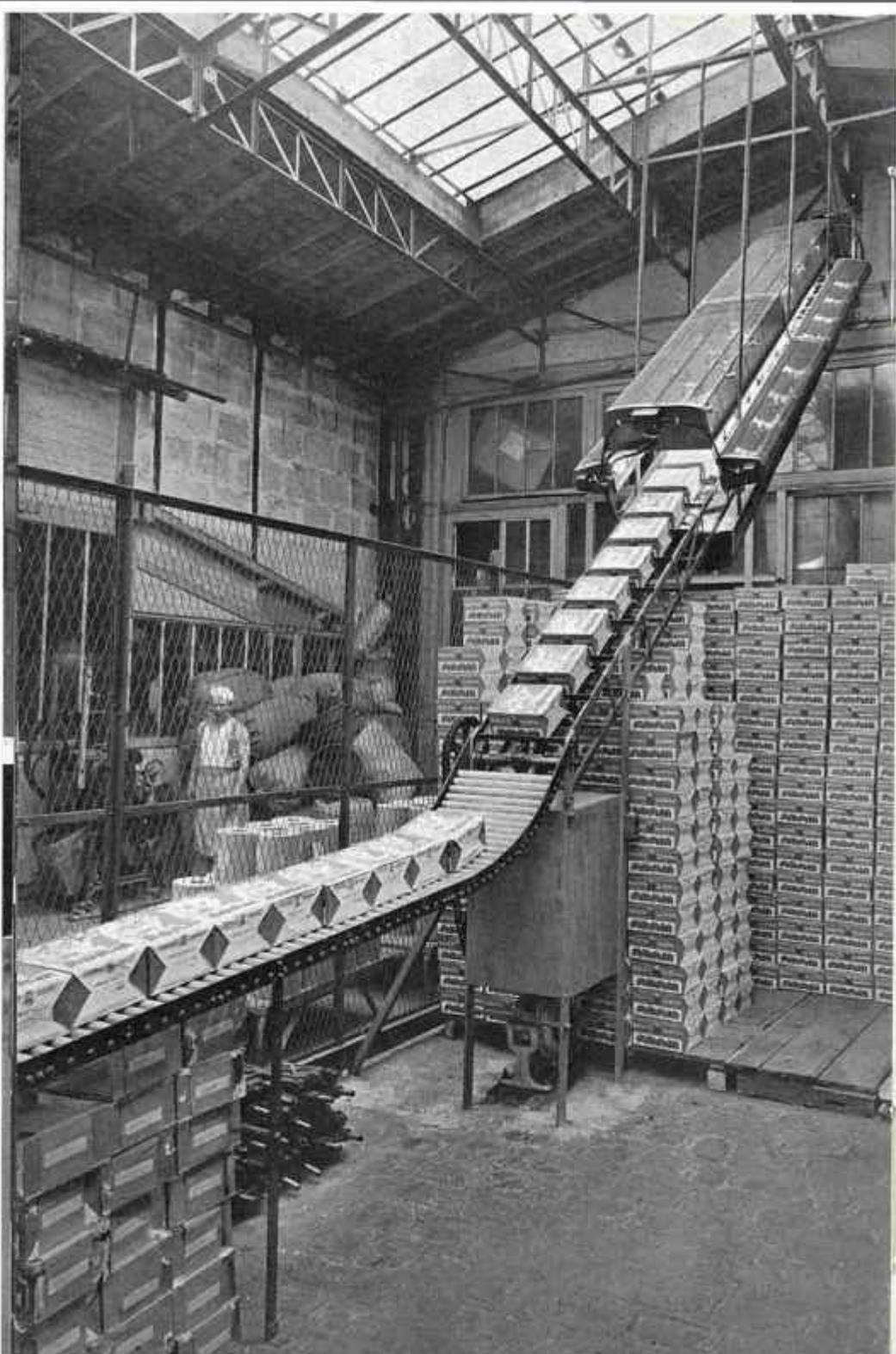
ÉMETTEURS D'INFRAROUGE COURT

● Conditions optima à réaliser.

Elles sont nombreuses. Citons les principales, au double point de vue technique et économique :

- obtention d'une intensité de rayonnement très élevée, c'est-à-dire de radiations capables de transporter le maximum d'énergie ;

● A - Séchage de papier couché. (Doc. Mazda.) ● B - Antimaculage sur papier couché. 8 E. (Doc. Philips.) ● C - Séchage d'induction sur bandes de films magnétiques. 16 E. (Doc. Mazda-S.E.P.S.)



- possibilité de diriger convenablement le rayonnement sur le plan du travail ;
- obtention d'un rendement énergétique aussi élevé que possible ;
- obtention d'une inertie thermique aussi faible que possible des émetteurs, afin de réaliser une grande souplesse d'utilisation (mise en route et arrêt instantanés, régulation rapide et facile de la température) ;
- durée des émetteurs aussi longue que possible ;
- réalisation facile, avec un prix de revient aussi faible que possible.

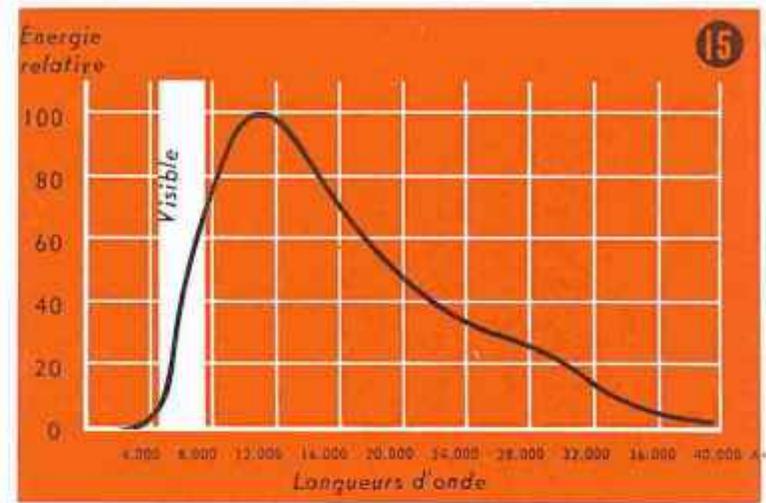
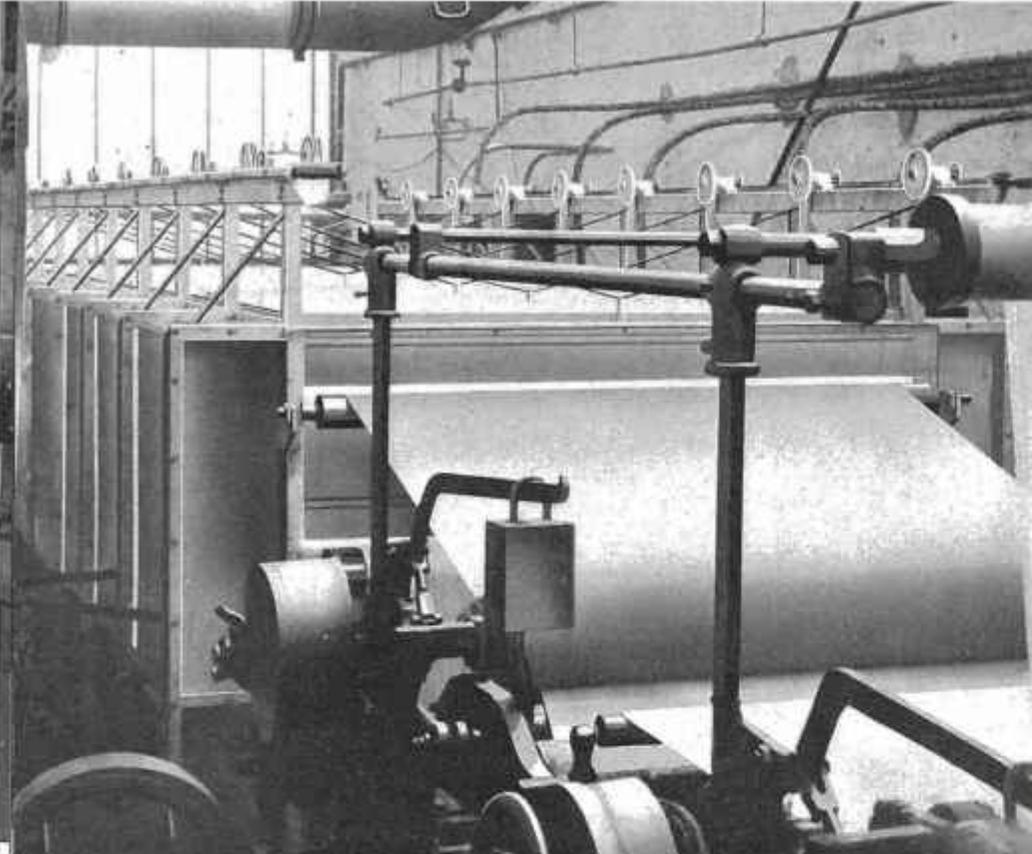
● Réalisation pratique.

De ce que nous avons dit précédemment (page 24), il résulte que l'émetteur infrarouge doit être porté à haute température ; pour éviter sa destruction, il faut alors le protéger en le disposant dans une enceinte qui l'isole de l'air (pour éviter sa destruction par combustion rapide) et qui soit perméable aux infrarouges courts.

● Description des émetteurs usuels.

1^o *Filament* : Les émetteurs actuels sont généralement constitués par un filament de tungstène porté à l'incandescence, à la température de 2 450° K, par le passage du courant électrique, et monté à l'intérieur d'une ampoule de verre. Par leur forme extérieure, ils s'apparentent ainsi aux lampes d'éclairage ; mais ils s'en distinguent complètement par plusieurs points : leur filament est à plus faible température (d'où durée moyenne trois à quatre fois plus longue) ; leur culot n'est pas fixé par du ciment, car il doit pouvoir éventuellement résister à une température assez élevée (200° C maximum) ; l'ampoule doit également résister à la même température ; leur courbe spectrale est différente (*fig. 15*, voir note page 43).

● *Séchage d'habillages sur boîtes de biscuits.* 40 E. (Doc. Philips-R.G.)

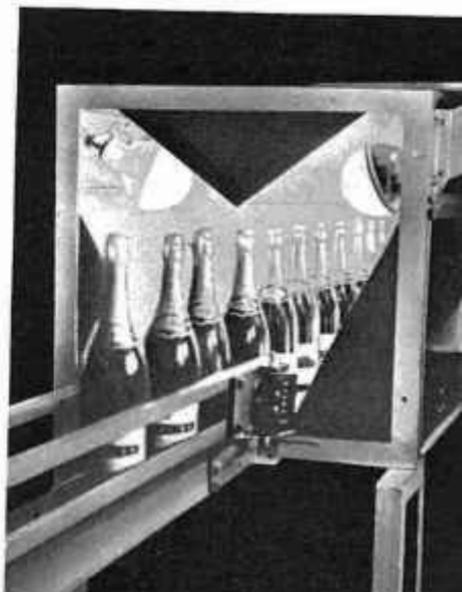


Nota. — A titre indicatif, une lampe d'éclairage ordinaire de 100 W, filament de tungstène à 2 865° K, émet des radiations réparties comme indiqué ci-après :

Longueurs d'ondes en Å.	< 3 800	de 3 800 à 5 000	de 5 000 à 6 000	de 6 000 à 7 600	de 7 600 à 14 000	> 14 000
Nature des radiations...	Ultra-violet	Lumière			Infrarouge	
Pourcentage de la puissance consommée..	0,07	0,89	2,20	6,50	36	29

La puissance rayonnée est de 74 W, dont 9,6 W seulement servent à l'éclairage (faible rendement lumineux) et 65 W sont relatifs à l'infrarouge (83 % de la puissance rayonnée). Dans une « lampe infrarouge », le pourcentage des radiations infrarouges est évidemment beaucoup plus élevé, de l'ordre de 96-97.

◀ ● Encolleuse, 520 E. (Doc. Mazda-S.E.P.S.) ● Séchage de cartes postales après développement et rinçage, 56 E. (Doc. Philips.)

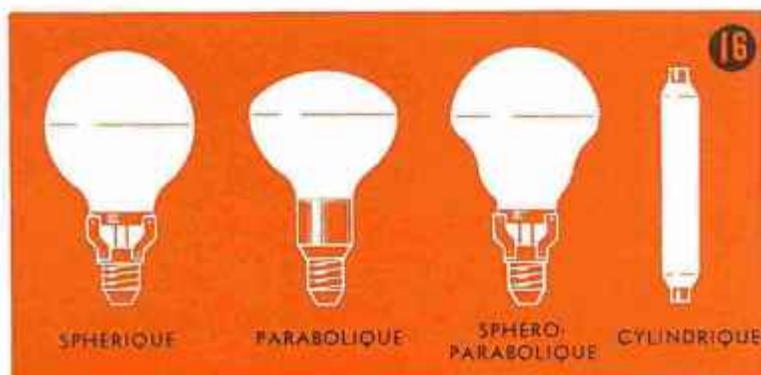


Au début, on utilisait des filaments en *carbone*. Principal avantage : moindre brillance (à considérer lorsque les ampoules sont dans le champ de vision). Principal inconvénient : noircissement de l'ampoule par usure du filament.

Actuellement, on a recours au tungstène : vie plus longue, tenue plus uniforme dans le temps, énergie irradiée plus élevée.

2^e Ampoule : Le verre de l'ampoule est soit *clair* soit *légèrement dépoli* (afin d'assurer une certaine diffusion du flux émis).

Différentes *formes* d'ampoules sont actuellement en usage : sphérique, parabolique, sphéro-parabolique, cylindrique (fig. 16).



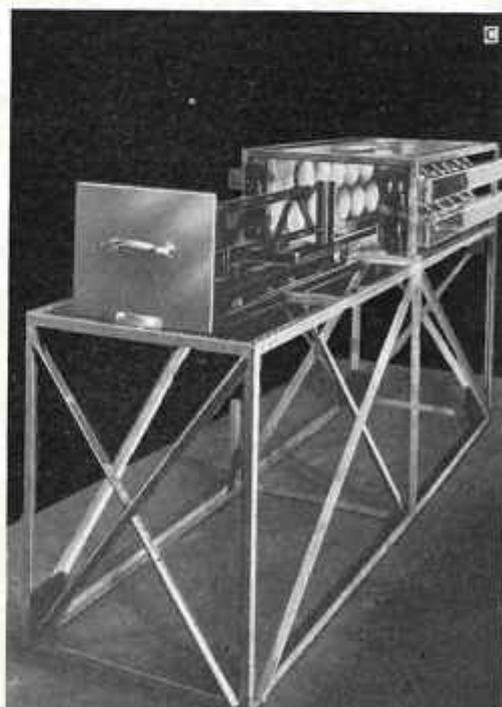
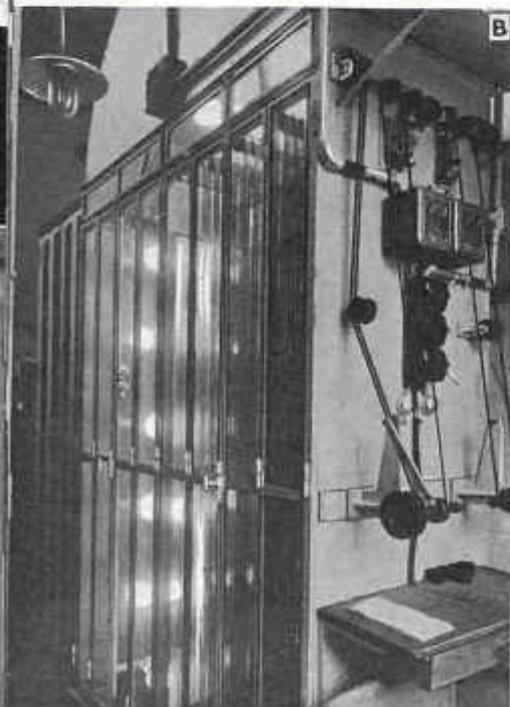
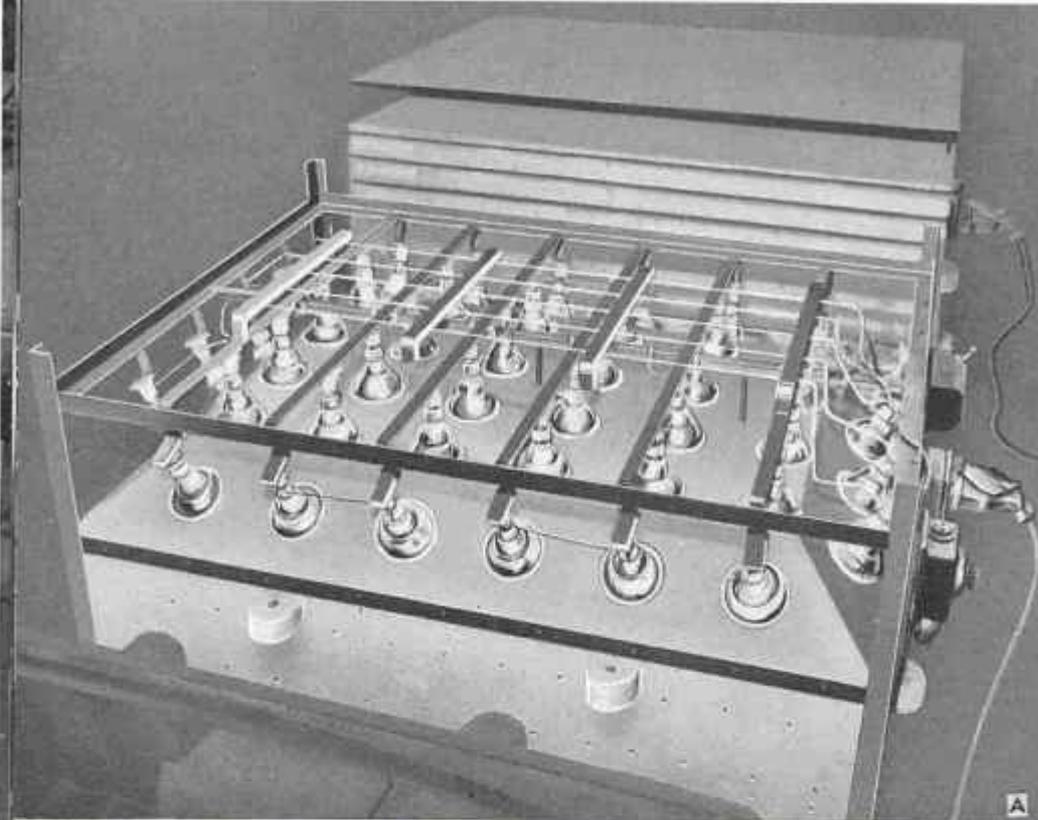
Suivant le cas (puissance en particulier), on fait le *vide* dans l'ampoule ou on y introduit un *gaz inerte*.

3^e Culot : Les culots des lampes non cylindriques sont en laiton et à vis Edison. Les lampes cylindriques sont terminées par des pièces métalliques en laiton.

● Caractéristiques des émetteurs usuels.

Les émetteurs de rayonnements infrarouges courts pour applications thermiques ont fait l'objet d'un projet de normalisation

● A - Séchage d'étiquettes sur bouteilles, 120 E. (Doc. Philips.) ● B - Séchage de l'habillage et de l'étiquetage de bouteilles, 45 E. (Doc. Philips.) ● C - Séchage d'étiquettes sur bouteilles, 40 E. (Doc. Philips.)



établi par le Comité Français d'Électrothermie et actuellement en cours d'examen à l'Union Technique de l'Électricité.

Ils sont groupés en deux catégories :

- I. Émetteurs à atmosphère gazeuse de forme sphérique, parabolique ou sphéro-parabolique à un seul culot.
- II. Émetteurs à vide, de forme cylindrique, à deux pièces d'extrémité.

Les tensions normales sont les suivantes : 115/125 V, 190/210 V, 210/230 V.

Les puissances normales sont les suivantes :

Catégorie I : 250 W, 375 W ;

Catégorie II : 40 W, 100 W.

Les projets de norme fixent les tolérances sur la puissance, ainsi que les types et les dimensions des culots, et enfin la valeur maximum du désaxage (écart angulaire entre l'axe de l'ampoule de l'émetteur et l'axe de la douille, pour les émetteurs de la catégorie I).

Les cotes maxima d'encombrement des émetteurs, culots compris, sont les suivantes :

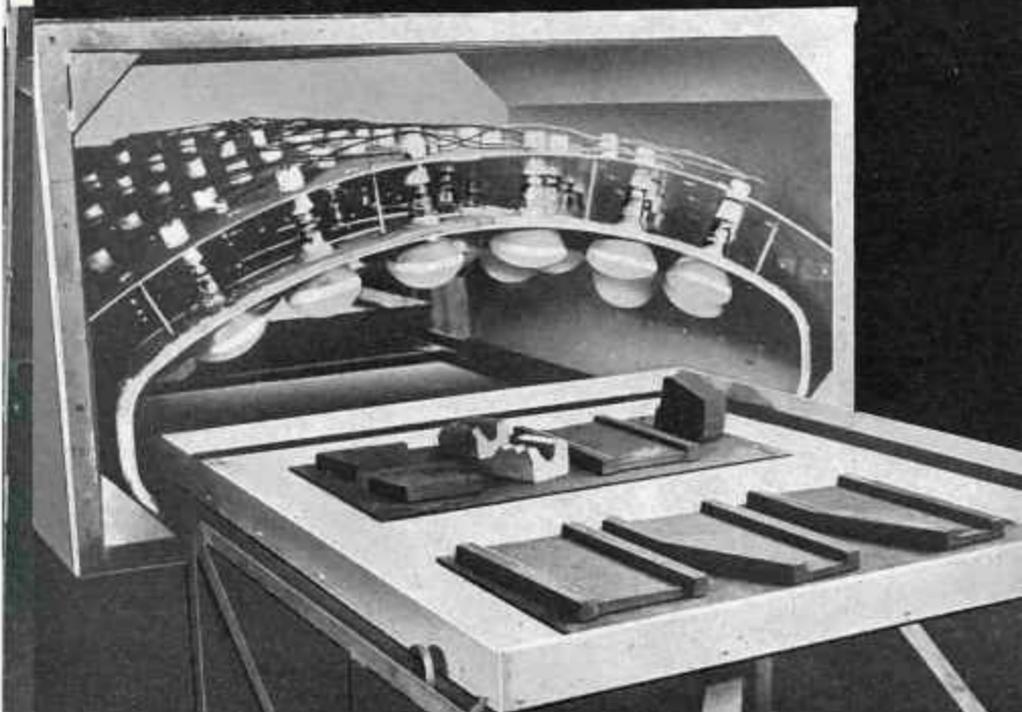
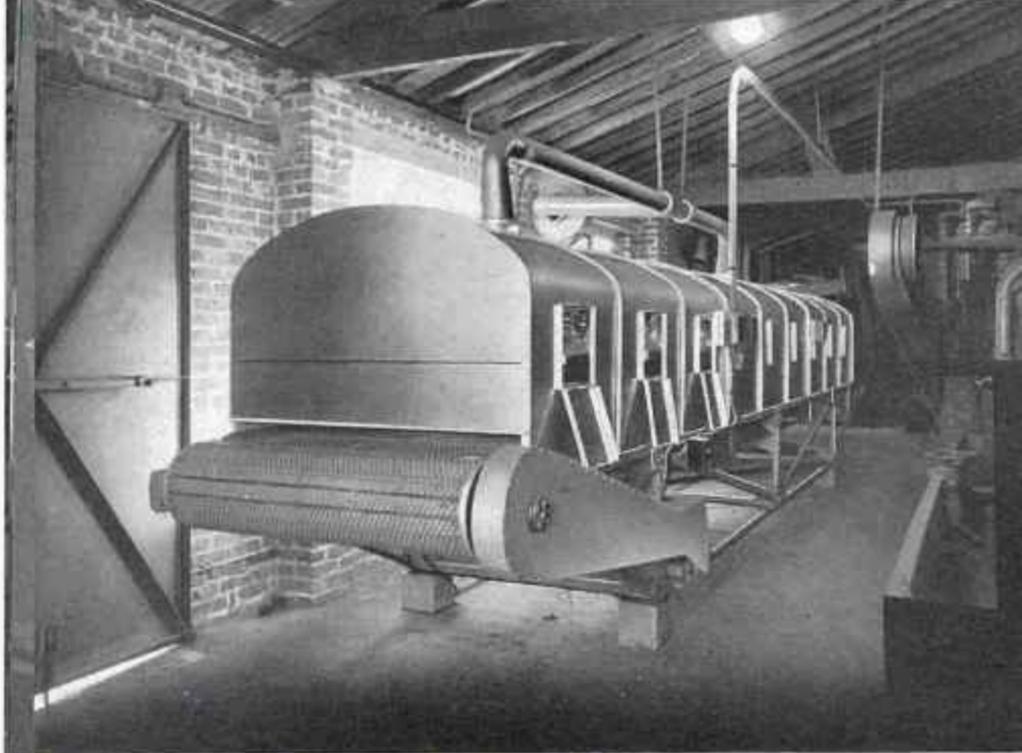
Catégorie I : diamètre 127 mm, longueur 200 mm ;

Catégorie II : diamètre 48 mm, longueur 312 mm.

● Courbe spectrale.

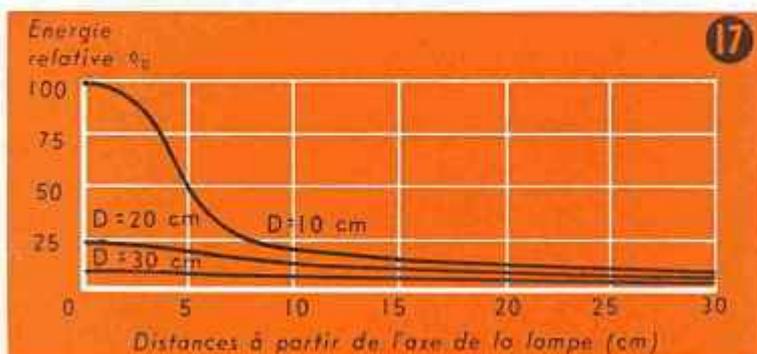
La *figure 15* donne la répartition de l'énergie émise, c'est-à-dire de la puissance rayonnée pour chaque longueur d'onde, par un certain émetteur normal de 250 W. La majeure partie du rayonnement infrarouge s'étend entre 8 000 et 20 000 Å, avec maximum d'intensité pour les longueurs d'ondes voisines de 11 000 Å. Le rayonnement obscur infrarouge est accompagné obligatoirement d'un rayonnement lumineux de faible puissance (3 à 4 % environ du flux total) qui a, d'ailleurs, l'avantage d'éclairer les objets irradiés, ce qui, dans certains cas, facilite le travail. Le spectre est pauvre en radiations de longueurs d'onde supérieures à 20 000 Å.

● A - Séchage de moules de fonderie. 44 E. (Doc. Philips.) ● B - Séchage de pellicules cinématographiques. 10 E. (Doc. Philips.) ● C - Traitement de bobines électriques (position ouverte de l'étuve). 28 E. (Doc. Mazda.)



● Répartition de l'énergie sur le plan de travail.

La figure 17 montre comment se répartit l'énergie émise sur le plan de travail suivant la distance de l'émetteur à ce plan.



● Durée des émetteurs.

Elle dépend : ● dans une certaine mesure, du fabricant des émetteurs (type « lampes infrarouges ») et du constructeur de l'appareil qu'ils équipent ; ● essentiellement de l'utilisateur.

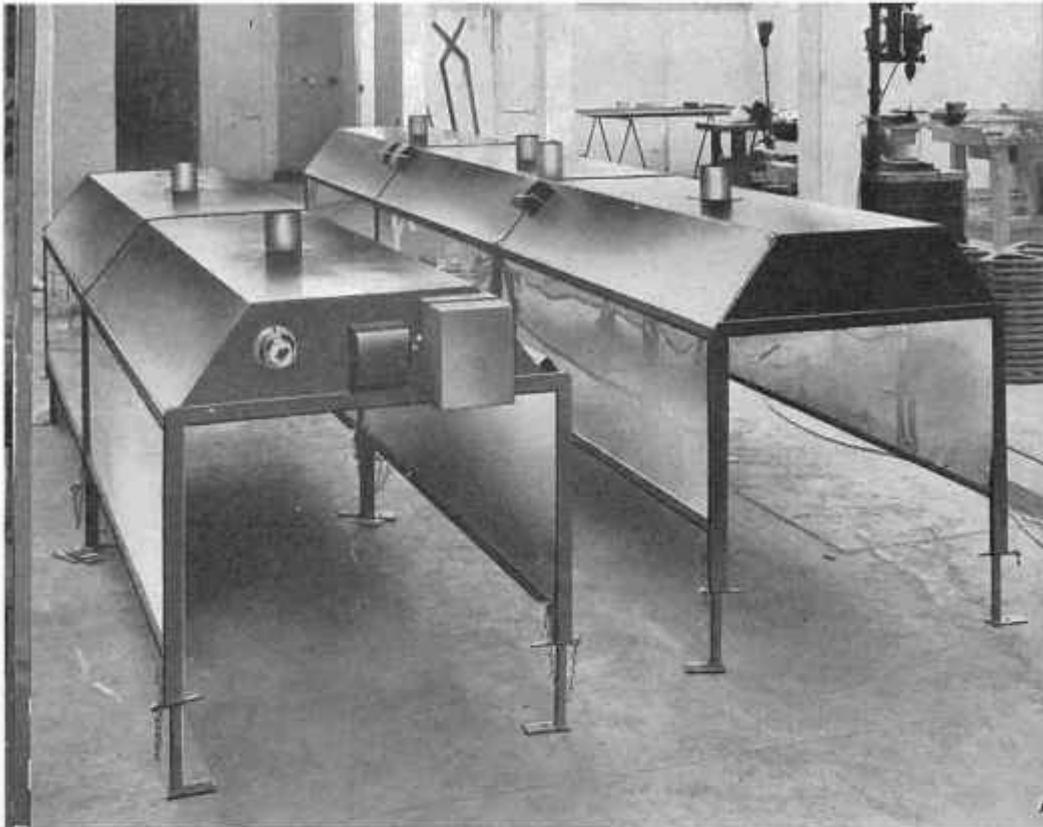
Il faut, bien entendu, éviter la casse par chocs, par vibrations ou par projections de liquides sur le verre. Avec une construction correcte de l'appareil utilisateur, la formation de points chauds sur le verre n'est pas à craindre.

Dans la pratique, la *vie moyenne* d'un lot d'émetteurs utilisé dans des conditions *normales* est actuellement de l'ordre de 4 000 heures.

● Influence de la tension d'alimentation.

Il est recommandé de choisir des émetteurs dont la tension nominale (tension pour laquelle l'émetteur a été construit) soit aussi

● Séchage de fils de chanvre, 200 E. (Doc. Philips.) ● Séchage de noix de fondrie, 65 E. (Doc. Mazda.)



voisine que possible de la tension d'alimentation. Il importe, toutefois, de remarquer que l'influence de la tension est assez différente de celle que l'on observe avec les lampes à incandescence ordinaires (lampes d'éclairage), la latitude étant beaucoup plus large pour les émetteurs infrarouges du type « lampes ».

Si les émetteurs sont survoltés, ils émettent un rayonnement plus intense, mais au détriment de leur durée (beaucoup plus longue que pour les lampes d'éclairage pour lesquelles le rendement lumineux, c'est-à-dire le nombre de lumens par watt, est la caractéristique essentielle). Pratiquement, ce facteur ne joue pas.

S'ils sont sousvoltés, la puissance rayonnée est moindre, la durée allongée, mais le spectre est déformé (conséquence négligeable si l'écart entre la tension d'alimentation et la tension nominale ne dépasse pas 10 %).

La variation de la puissance rayonnée en fonction de la tension est plus faible que pour les lampes d'éclairage ou les résistances (effet Joule).

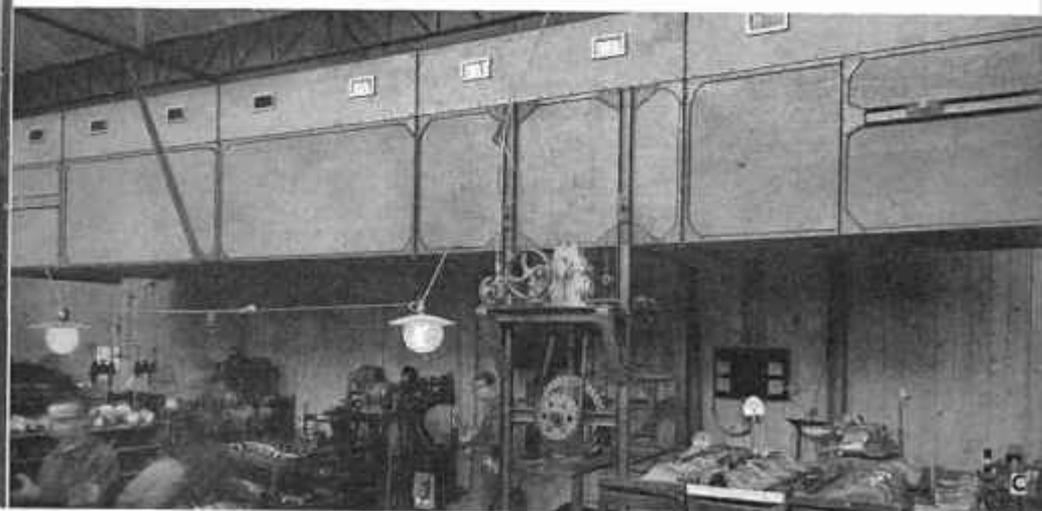
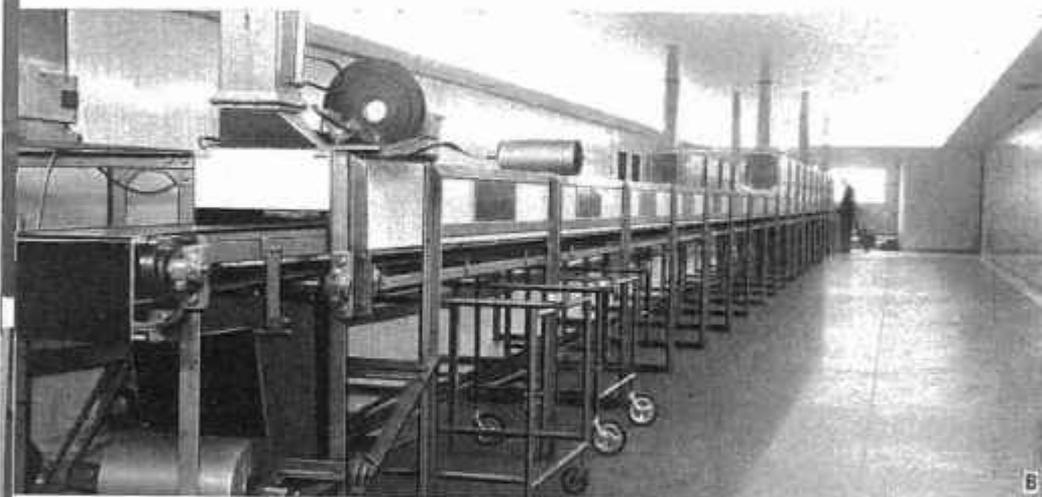
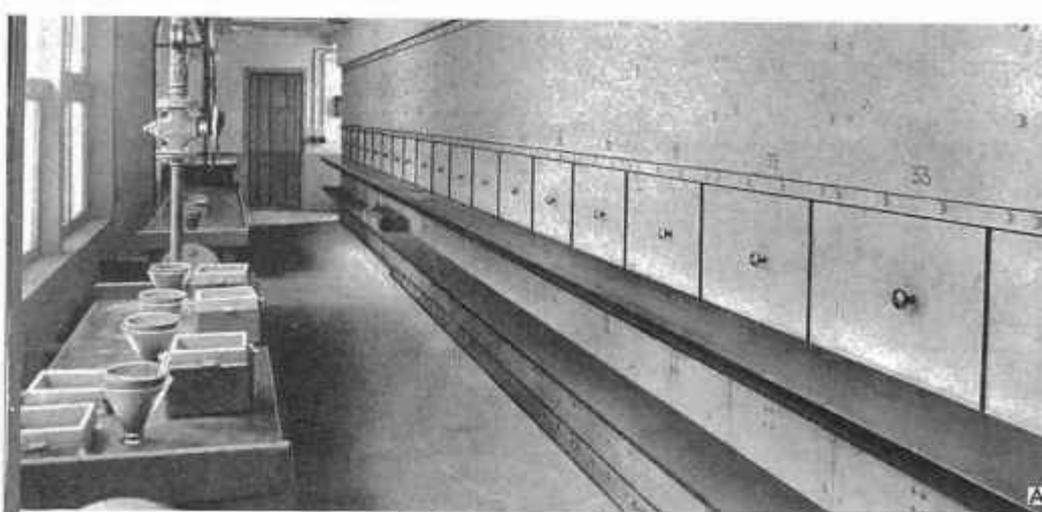
● Réflecteurs.

Pour concentrer et diriger le flux radiant, on a recours à un réflecteur. Deux cas :

1° *Réflecteur extérieur* : Généralement en alliage spécial d'aluminium (surface correctement traitée ; facile à travailler ; longue vie) avec une surface éventuellement préparée en vue de résister à des atmosphères particulières (corrosives par exemple). Avantage principal : facilité de diriger le flux. Inconvénients : influence de la poussière, prix.

2° *Réflecteur intérieur* : Les émetteurs de fabrication française comportent un réflecteur intérieur réalisé au moyen de l'argentage (autrefois cuivrage) du côté culot (partie sphérique ou parabolique) ; ce dépôt métallique a l'avantage d'être inaltérable.

● A - Sèche de moules de fonderie. 32 et 48 E. (Doc. Philips-R.G.) ● B - Sèche de colle. Machine à coller les bouchons. 14 E. (Doc. Mazda-Le Sèche Automatique Industriel.) ● C - Sèche de granulés en matière plastique. 8 E. (Doc. Mazda.)



INSTALLATION DES ÉMETTEURS

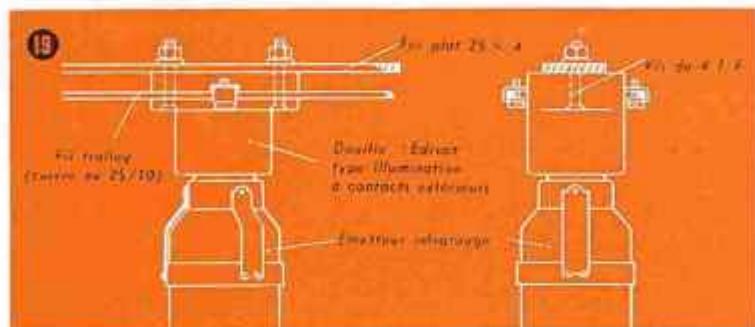
Parmi les facteurs que le constructeur d'appareils considère, retenons seulement les suivants :

● Disposition des émetteurs.

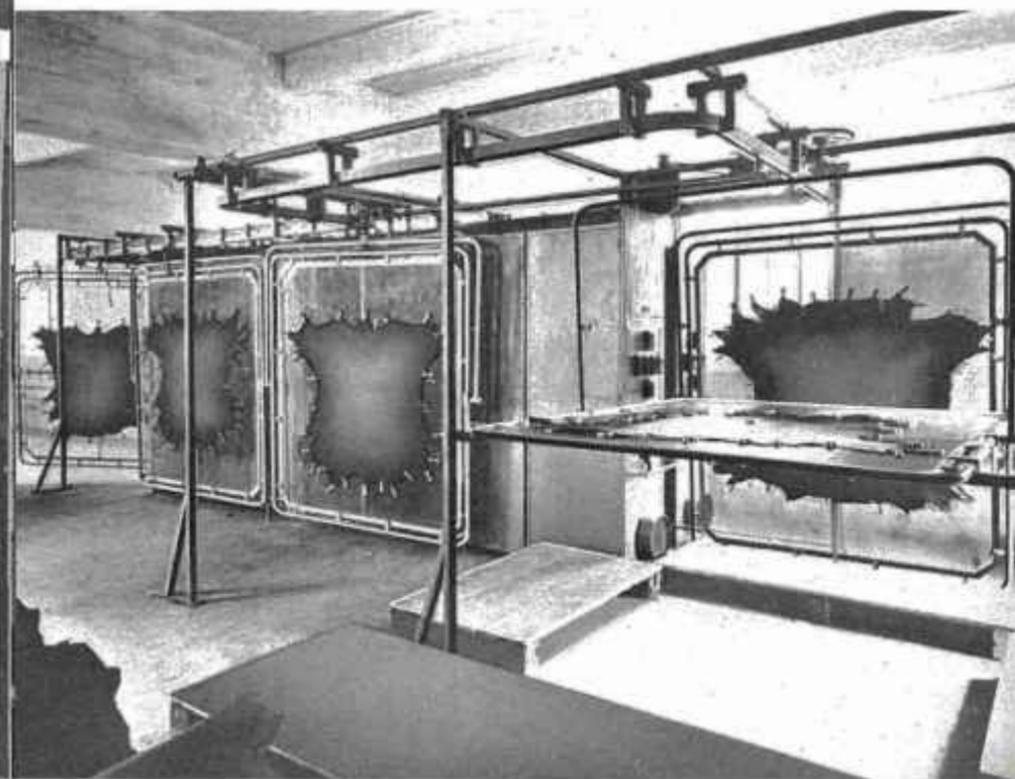
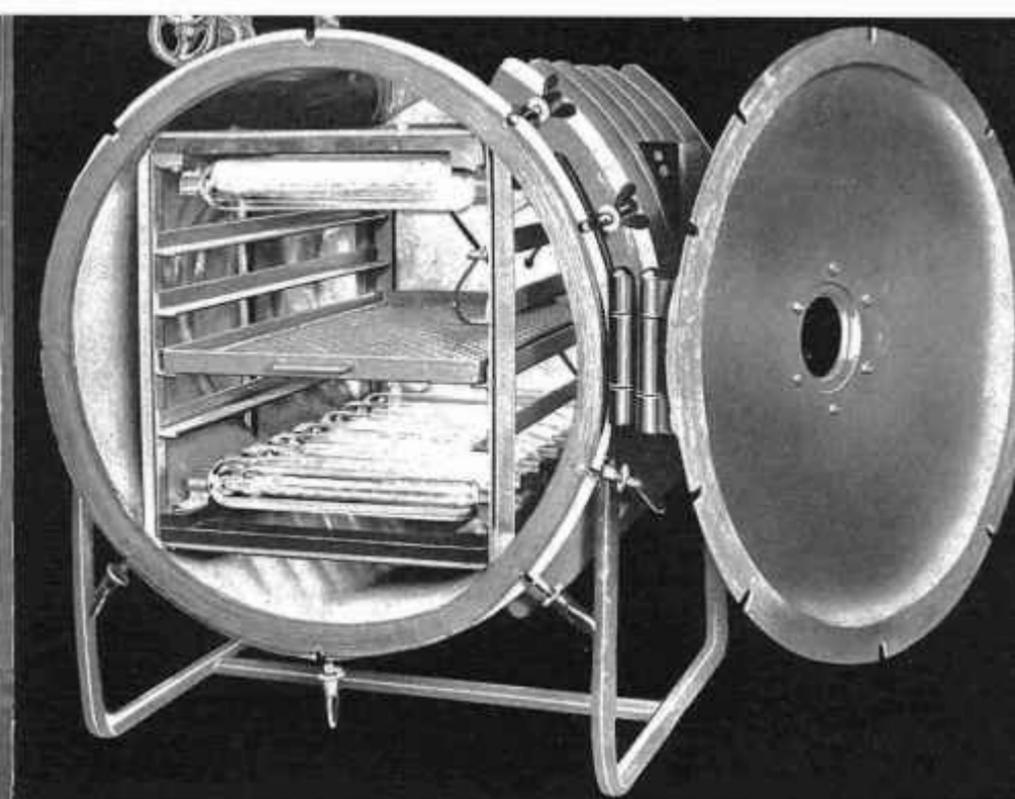
Le montage des émetteurs se fait toujours en quinconce (*fig. 18*), ce qui permet d'obtenir une plus grande uniformité du chauffage et une plus grande concentration d'énergie sur le plan de travail.



La *figure 19* se rapporte au montage d'un émetteur unique.



● A - Séchage de farine, 20 E. (Doc. Philips.) ● B - Chauffage de disques en matière plastique, 50 E. (Doc. Mazda.) ● C - Séchage de bottes durs de chaussures de foot-ball, 80 E. (Doc. Mazda-Guégou.)



Dans certains cas, il est nécessaire de prendre des dispositions pour que la température des culots (voire également des ampoules elles-mêmes) ne dépasse pas accidentellement la valeur indiquée par le fabricant : entre autres moyens, culots placés à l'extérieur des parois d'une étuve ou à l'intérieur d'une double paroi dans laquelle circule — ou non — un courant d'air.

Des dispositions peuvent être prises, si besoin est, pour éviter l'action des trépidations.

● Nature des parois.

Le plus souvent, l'intérieur de l'appareil est revêtu d'une tôle métallique ayant un bon facteur de réflexion pour les rayons infrarouges courts ; ces derniers subissent, en effet, de nombreuses réflexions sur les parois. On utilise généralement soit de l'aluminium poli (facteur de réflexion de l'ordre de 70 %), soit de l'aluminium ayant subi un brillantage électrolytique (80 %).

● Calorifugeage.

Pratiquement, il est parfois intéressant de calorifuger les étuves (double paroi avec intervalle d'air ou laine de verre), afin d'augmenter le rendement thermique.

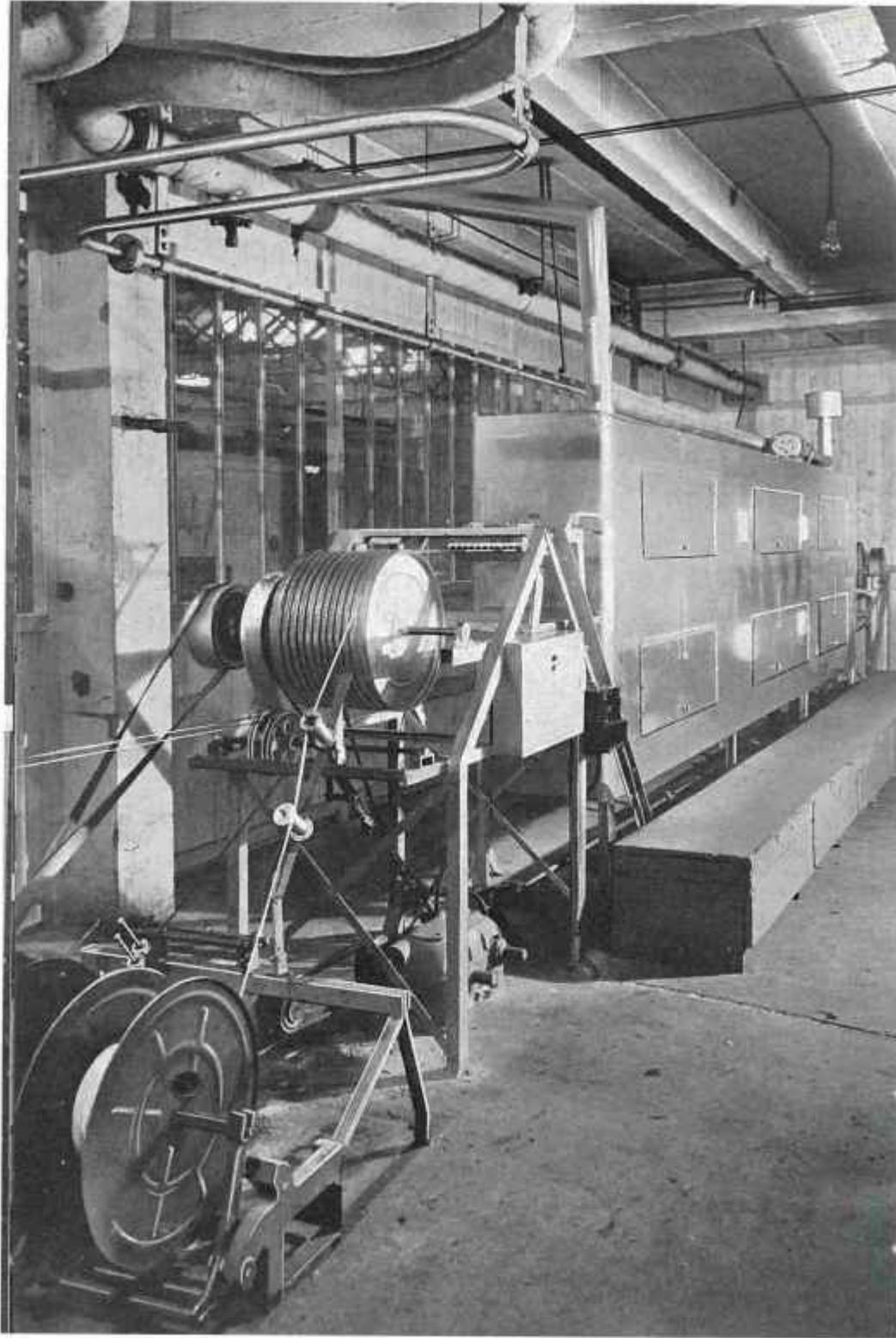
● Ventilation.

Elle peut s'imposer (cas de certaines déshydratations) ou tout au moins être utile : éviter la formation d'un brouillard de vapeur d'eau ou de solvants volatils susceptibles d'absorber le rayonnement en proportion notable, assurer un conditionnement de l'air nécessaire pour certains traitements, permettre l'évacuation des vapeurs si besoin est, éventuellement réaliser une récupération thermique permettant d'améliorer le rendement. Bien entendu, cette ventilation doit être limitée aux conditions fixées pour le but à atteindre.

● Différents types d'appareils.

Nombre presque illimité. Essentiellement : rampes ou panneaux mobiles montés sur supports articulés permettant d'en modifier

● *Etuve sous vide*, 16 E. (Doc. Mazda.) ● *Séchage de cuirs et peaux sur cadres*, 144 E. (Doc. Philips-Chavro.)



l'orientation, ou juxtaposés pour former des parois fixes : voûtes, soles ou piédroits d'une étuve. Les étuves sont très diverses : types armoire, cloche, tunnel. Dans les étuves continues, les pièces peuvent être portées ou suspendues, les convoyeurs étant d'un type classique : tapis transporteur, chaîne sans fin, monorail.

● **Commande et régulation.**

Elles peuvent être soit manuelles, soit automatiques et concerner les circuits de chauffage (émetteurs), les circuits de ventilation (conditionnement de l'air par exemple) ou le mécanisme d'avancement des objets et régler la production horaire en fonction du traitement désiré.

● **Exemples.**

Les photos qui illustrent cette brochure permettent de se rendre compte de la diversité des appareils tant dans leur nature que par la puissance globale des émetteurs qui les équipent.

AVANTAGES DU CHAUFFAGE PAR RAYONNEMENT INFRAROUGE COURT

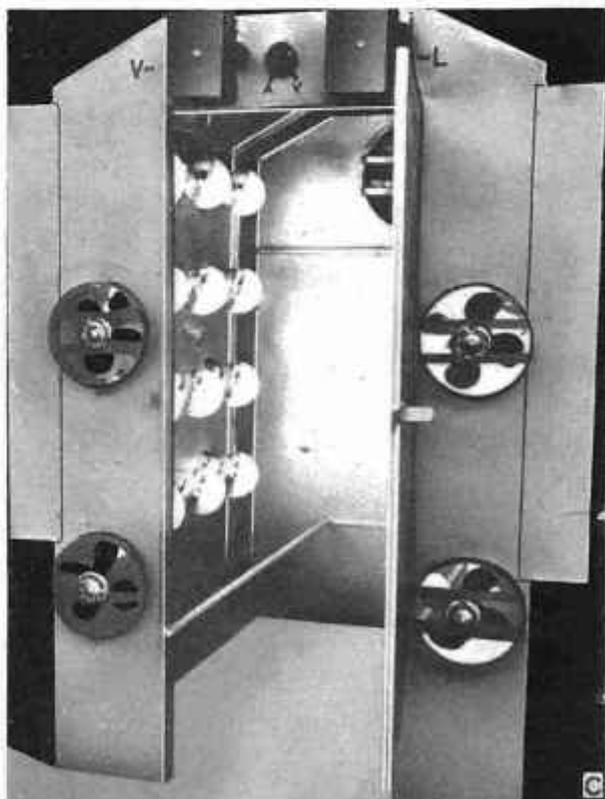
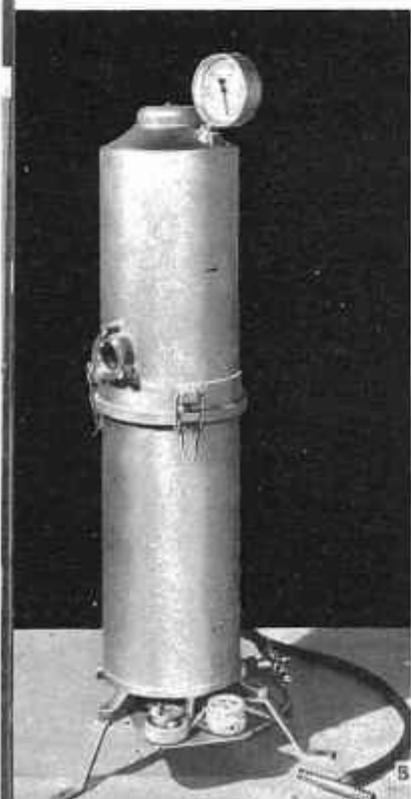
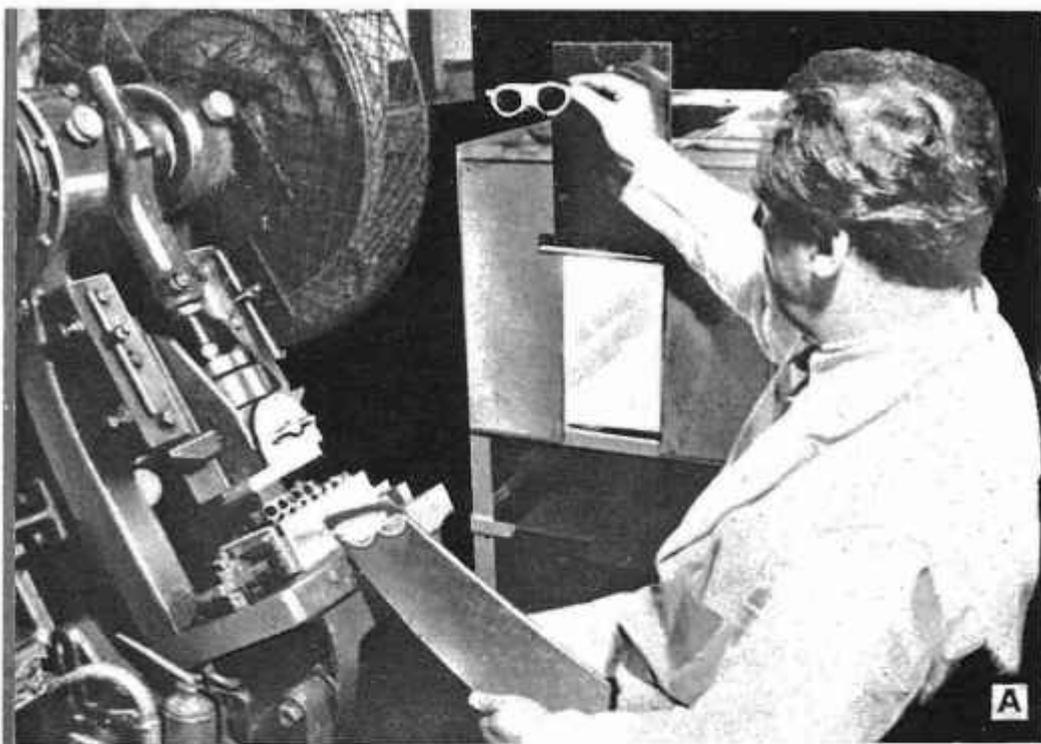
Les principaux avantages reconnus à ce mode de chauffage sont les suivants :

● **Du point de vue technique.**

Vitesse d'opération. — Vitesse de traitement augmentée, souvent dans des proportions considérables, par exemple pour le séchage ou la cuisson de certains vernis et peintures en couches minces sur tôles métalliques. Raisons : taux élevé du rayonnement, pénétration intéressante des rayons infrarouges, indépendance relative des conditions ambiantes.

Souplesse. — Réglage facile de l'énergie reçue par la charge : variation du nombre d'émetteurs sous tension, variation de la distance des émetteurs au plan de travail, variation de la vitesse de circulation de la charge. Possibilité de réaliser facilement un cycle de chauffage en fonction du temps. Inertie négligeable pour les moyens de réglage. Possibilité d'obtenir un réglage très précis de la température du corps traité.

● *Séchage de fil électrique sous tresse coton vernie. 32 K. (Doc. Mazda.)*



Uniformité du chauffage. — Grâce à la disposition des émetteurs et à la possibilité d'assurer un réglage manuel ou automatique de l'énergie émise.

Qualité du traitement. — Conséquence des deux avantages précédents. Suppression ou réduction corrélative des rebuts.

Mise en route et arrêt faciles et de courte durée. — Conséquences : gains d'énergie, de main-d'œuvre, de matière (pas de déchets de commencement ou de fin d'opération).

Simplicité de la construction et de la conduite. — Incidence sur la dépense d'installation et sur les prix de revient.

Encombrement. — Faible encombrement, notamment à cause de l'augmentation de la vitesse du travail (production accrue). Possibilité d'envisager au besoin un appareil du type vertical ou suspendu au plafond de l'atelier.

Visibilité des objets en cours de traitement. — Souvent intéressant dans la pratique.

Portabilité, déplacement. — Montage et démontage faciles : cas de déplacements de l'appareil.

Sécurité. — Moindres risques d'incendie, d'incidents et d'accidents.

● **Du point de vue économique.**

Concourent à réduire les prix de revient (amortissement de la dépense d'installation, frais normaux relatifs au traitement des objets) tous les avantages techniques ci-dessus indiqués et notamment : ● l'accroissement de la production ; ● la réduction (corrélative ou non) des frais de main-d'œuvre ; ● la qualité des produits traités et la réduction ou la suppression des rebuts ; ● la faible valeur relative de la dépense d'installation ; ● la valeur élevée du rendement énergétique ; ● le faible encombrement relatif (location ou utilisation du terrain) ; ● l'amélioration du facteur de puissance de l'installation électrique ($\cos. \varphi = 1$ pour les émetteurs considérés).

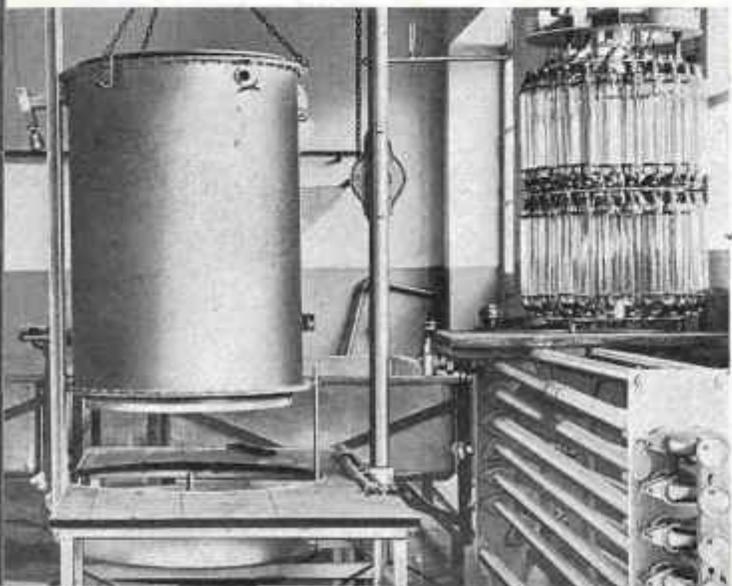
● **Du point de vue social.**

Essentiellement : ● conditions favorables de travail ; ● sécurité.

-
- A - *Bavillonnement de plastiques (montures de lunettes)*, 10 E. (Doc. Philips.)
● B - *Etuve de laboratoire pour traitement sous vide*, 2 E. (Doc. Mazda-S.K.P.S.)
● C - *Traitement de chaussures*, 24 E. (Doc. Philips-Charon)



● Séchage de tubes en verre pour produits pharmaceutiques, 240 E. (Doc. Philips.)



● Pasteurisation du lait, AS E. (Doc. Mazda-S.K.P.S.)

**Caractères essentiels du chauffage
par émetteur de rayonnement
infrarouge court (« lampes infrarouges »).**



Le chauffage infrarouge est un chauffage par rayonnement.

Le rayonnement peut et doit être dirigé.

La puissance rayonnée est proportionnelle à la puissance quatre de la température absolue de l'émetteur et à sa surface.

Les radiations infrarouges émises à haute température sont essentiellement de courte longueur d'onde.

Les émetteurs du type « lampes infrarouges » sont des émetteurs à haute température, donc ils produisent essentiellement des rayons infrarouges de courte longueur d'onde et de forte concentration énergétique.

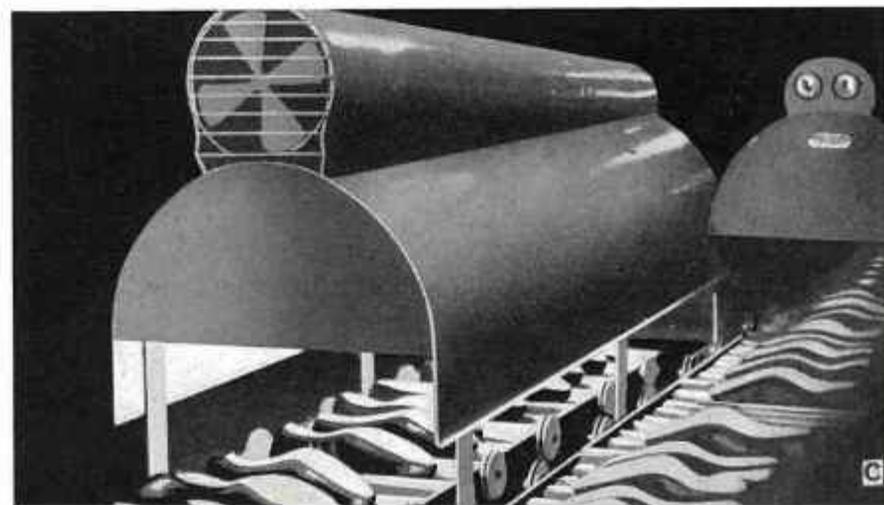
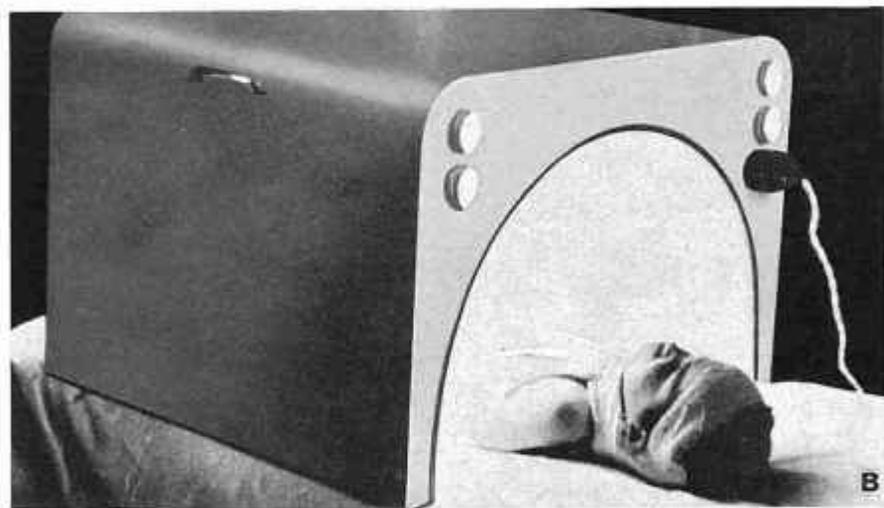
Les radiations infrarouges sont fortement absorbées par la plupart des substances solides et liquides.

La fraction de l'énergie qui est absorbée par les substances est intégralement transformée en chaleur.

Le chauffage infrarouge par émetteur de rayonnement infrarouge court permet donc de diriger, sur une surface donnée, un rayonnement d'intensité élevée et intégralement transformé en chaleur, donc d'augmenter considérablement la vitesse de chauffage.

Il permet aussi de chauffer dans le vide.





APPLICATIONS INDUSTRIELLES

Elles sont nombreuses et un certain nombre d'entre elles sont mises en évidence par les photographies qui illustrent cette brochure.

● Quelques remarques.

A ce sujet, il ne faut pas perdre de vue les considérations suivantes :

- la température du traitement ne doit pas dépasser 200° C environ ;
- le chauffage considéré est avant tout un chauffage de surface, car la pénétration des infrarouges est relativement faible. D'où difficulté ou impossibilité de chauffer à cœur les corps mauvais conducteurs de la chaleur s'ils ont une grande épaisseur ;
- les radiations sont émises en ligne droite, ce qui rend plus difficile le chauffage des objets de forme complexe, surtout s'ils sont mauvais conducteurs de la chaleur. On peut y parvenir toutefois par des dispositions spéciales ;
- le chauffage des objets métalliques est considérablement facilité par la conduction ;
- on peut avoir intérêt à associer, dans certains cas particuliers, le chauffage par infrarouge à un autre mode de chauffage (convection par exemple) aux fins d'accélérer certains traitements ;
- le chauffage « infrarouge » semble de réalisation facile. Il n'en est rien. Conséquence : il faut s'adresser à un constructeur sérieux et expérimenté ;
- dans l'étude d'un problème industriel de « chauffage infrarouge », il faut se méfier des extrapolations exagérées. Un essai sérieux de laboratoire peut donner d'utiles indications surtout qualitatives, mais il ne suffit généralement pas. Il est encore nécessaire de bien connaître certaines lois physiques et notamment celles du rayonnement ainsi que les règles de la construction et de les appliquer judicieusement. *C'est à cela qu'il faut attribuer essentiellement les déboires de ceux qui ont voulu innover en la matière, sans avoir des connaissances de base suffisantes ;*

● A - Séchage de produits pulvérulents (sel marin). 270 E. (Doc. Philips.)
● B - Séchage de plâtre orthopédique. A E. (Doc. Philips.) ● C - Traitement de chaussures. 9 E. (Doc. Philips.)

- en principe, il n'est pas économique de s'adresser au chauffage infrarouge pour réaliser le séchage de produits de peu de valeur très chargés en eau.

- un thermomètre placé dans un rayonnement ne donne pas la température qu'atteindrait un corps placé au même endroit ; il donne seulement la température qu'aurait une masse de mercure de même forme et de mêmes dimensions que celle que contient le thermomètre. Pour repérer (mesurer) la température dans une enceinte, il faut soustraire le thermomètre à l'action des radiations. D'ailleurs, ce qui importe dans toute opération thermique et particulièrement en chauffage par rayonnement, ce n'est pas la température de l'ambiance, mais bel et bien celle du corps soumis au chauffage ;

- dans un chauffage par rayonnement, la nature de la substance à chauffer et son état de surface sont des facteurs importants à considérer.

Comme exemple intéressant de « chauffage infrarouge », signalons le séchage des peintures en couche mince, sur tôles métalliques. Les radiations traversent en grande partie le film de peinture et chauffent le métal sous-jacent. On réalise ainsi le séchage idéal de la peinture par chauffage du support, celui-ci chauffant à son tour la couche de peinture vers l'extérieur (1).

● Classification des applications.

Le chauffage infrarouge se développe chaque jour en surface et en profondeur. La place nous manque pour préciser, pour chacune des installations dont nous donnons une photographie, les résultats obtenus.

Les renseignements ne peuvent, en effet, être utiles au lecteur que s'ils sont *complets*, c'est-à-dire s'ils précisent les conditions exactes de travail, la nature des produits traités, la qualité des produits finis, le prix de revient du procédé, les avantages (chiffrables et non chiffrables) reconnus. Nous nous limitons donc à l'indication de la nature du traitement effectué et du nombre d'émetteurs des appareils représentés (il s'agit en général d'émetteurs de 250 W).

(1) Cf. Le séchage par rayonnement infrarouge des couches de vernis et des surfaces humides, par B. HAZNADAROFF (*Revue Générale d'Electricité*, octobre 1945).

La plupart des photographies se rapportent à des *appareils installés en France* au cours des dernières années.

Les principales applications actuellement réalisées sont relatives :

- au séchage et à la cuisson des peintures et vernis (oxydation, polymérisation, etc.) sur métaux ou sur autres substances ;
- à des déshydratations et séchages divers (métaux, textiles, céramiques, plastiques, etc.) ;
- à des traitements divers (plastiques par exemple) ;
- à de simples chauffages (préchauffage, dilatation, etc.) ;
- à des traitements dans le vide.

Elles intéressent les industries des métaux (automobiles, cycles, mécanique, tôlerie, etc.), des plastiques, des textiles, du cuir, du papier, du bois, de l'alimentation, du bâtiment, de la chapellerie, de la fonderie, etc.

L'installation actuellement la plus importante de France comporte environ 28 000 émetteurs équipant plusieurs étuves et représentant une puissance totale de plus de 7 000 kW.

D'autres installations importantes ont été réalisées ou sont en cours d'équipement. Le nombre des petites installations (de une à quelques dizaines ou centaines de lampes) augmente rapidement.

La vente annuelle en France est actuellement de l'ordre de 140 000 émetteurs (plus de 35 000 kW). Aux U.S.A., d'après les derniers renseignements connus, elle dépasserait 4 millions d'émetteurs, tant pour les applications industrielles que pour les autres applications (agricoles et domestiques).

CONCLUSION

Le chauffage par émetteurs de rayonnement infrarouge court est en plein développement. La technique industrielle s'en affirme chaque jour. Sous réserve qu'il soit *judicieusement adapté et correctement utilisé*, il doit permettre de trouver une solution avantageuse à un très grand nombre des problèmes à basse température que l'industrie cherche à résoudre.

Décembre 1953.

BIBLIOGRAPHIE

De nombreux articles ont paru, depuis 1943, dans la plupart des revues françaises. Un grand nombre de ces articles se répètent forcément, tout au moins dans leurs considérations générales. D'autre part, des progrès importants ont été réalisés, au cours des deux ou trois dernières années, dans la technique industrielle du chauffage par rayonnement infrarouge et notamment du chauffage par rayonnement infrarouge court. C'est pourquoi nous ne retiendrons, dans une bibliographie très sommaire relative à ce dernier mode de chauffage électrique, que les livres généraux d'ordre scientifique et d'ordre pratique et les articles essentiels parus dans la presse, ainsi que quelques descriptions précises ou suffisamment complètes d'installations plus ou moins récentes.

LIVRES

(Les ouvrages ci-dessous sont classés par ordre chronologique de publication de leur première édition.)

Le spectre infrarouge, par J. LECOMTE, dernière édition (tome I : 1948 ; tome II : 1949).

Le rayonnement des corps incandescents, par G. RIBAUD, 1930.

Les applications pratiques des rayons infrarouges, par M. DERIBERE, 3^e édition en cours d'impression, 1953.

Industrial Applications of Infrared, par J. D. HALL (texte anglais), 1947.

Infrared Heating, par A. E. WILLIAMS (texte anglais), 1947.

Infra-rood Stralers, par J. J. A. MANDERS (texte hollandais), 1948.

Chauffage et séchage par lampes à rayonnement infrarouge, par J. A. TOISON, 2^e édition, 1953.

ARTICLES

(Ordre alphabétique)

- M. DERIBERE : Nombreux articles dont la liste est donnée dans le livre ci-dessus indiqué.
- R. GAUTHERET : Plusieurs descriptions d'installations, parues dans la revue *Electricité*, entre 1946 et 1950.
- R. C. GESLIN : Étude sur les températures dans une étuve à rayonnement infrarouge (revue *Energie* : juin 1948).
- P. GRAUWIN : Une application du rayonnement infrarouge (Lille 1951).
- G. LE GUEN : L'installation rationnelle des radiations infrarouges de séchage (revue *Electricité*, janvier 1944). La détermination de l'isoradiance (revue *Peintures, Pigments et Vernis* : mai 1944). Études à rayons infrarouges sous vide (revue *Le Vide* : mars 1950). Les infrarouges dans le bâtiment (revue *Bâti* : juillet 1952).
- B. HAZNADAROFF : Le séchage par rayonnement infrarouge des couches de vernis et des surfaces humides (Revue *Générale d'Electricité* : octobre 1945).
- J. MAISONNEUVE : Le séchage et la cuisson des sardines opérés simultanément par lampes à rayonnement infrarouge (Revue de la *Conservation* : octobre 1945).
- B. HAZNADAROFF et J. MAISONNEUVE : De l'éclairage à l'électrothermie (revue *Lux* : n° 1-1949). Le chauffage électrique à rayonnement infrarouge (revue *B.I.P.* : décembre-janvier 1953).

CONFÉRENCES

(Ordre chronologique.)

De l'utilisation du rayonnement infrarouge aux problèmes de séchage dans l'industrie textile, exposé fait par G. SEURIN, à l'Institut Textile de France (revue *L'Industrie Textile*, septembre 1949).

Application du rayonnement infrarouge court au séchage d'encollage sur fil de chaîne, conférence de G. SEURIN, à l'Institut Technique Roubaisien (1950).

Le séchage infrarouge dans l'industrie, conférence de G. LE GUEN, à l'Association des Ingénieurs de l'Institut Électrotechnique de Grenoble (1950).

Les applications thermiques des lampes à incandescence, exposé de LA TOISON, à la Société française des Électriciens (1952).

Les applications du rayonnement infrarouge court pour le séchage et pour certains traitements thermiques dans l'industrie du papier, conférence de G. SEURIN, à l'Association technique des Industries papetières (septembre 1953).

COMMUNICATIONS

(Ordre chronologique.)

Premier Congrès International de l'Industrie des Peintures (octobre 1947) :

Production et utilisation des radiations infrarouges de séchage, communication de G. LE GUEN.

Application des rayons infrarouges à l'industrie des peintures et vernis, communication de M. DERIBERE.

Journées Françaises d'Électrothermie (septembre 1949) :

Four spécialement conçu pour le séchage par rayons infrarouges courts, communication de G. SEURIN.

Séchage de poudres explosives par rayonnement infrarouge, communication de J. JOURDAN.

Etuve double pour séchage de la couche d'impression de carrosseries automobiles, communication de R. AUBERT et N. DUCLOS.

Troisième Congrès International d'Électrothermie (1953) :

Evolution en France du séchage et du chauffage par rayonnement infrarouge, communication de R. C. GESLIN.

La cuisson du pain par haute fréquence et infrarouges, communication de E. VOGT.

Publication
éditée par la Société pour
le Développement des
Applications de l'Électricité

Rédacteur en Chef :
HENRY CLAIR