

## Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1- Le Conservatoire numérique communément appelé le Cnum constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par Eclydre ([www.eclydre.fr](http://www.eclydre.fr)).

2- Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam.

Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978 :

- la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue ([Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - https://cnum.cnam.fr](https://cnum.cnam.fr))
- la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

3- Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :

- les reproductions de documents protégés par le droit d'auteur, uniquement consultables dans l'enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.

4- Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)

5- L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment possible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

6- Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

## NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

| NOTICE DE LA REVUE           |  |
|------------------------------|--|
| Auteur(s) ou collectivité(s) | Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers   |
| Auteur(s)                    | Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers   |
| Titre                        | Publication : Laboratoire d'essais   |
| Adresse                      | Paris : Conservatoire national des arts et métiers, 193.-195.  |
| Nombre de volumes            | 125  |
| Cote                         | CNAM-BIB P 1329-B et P 1329-C  |
| Sujet(s)                     | Conservatoire national des arts et métiers (France)<br>Génie industriel -- 20e siècle  |
| Note                         | La collection comporte des lacunes : n°24; n°58; n°63; n°67; n°76-n°77   |
| Notice complète              | <a href="https://www.sudoc.abes.fr/cbs//DB=2.1/SET=17/TTL=3/REL?PPN=261820893&amp;RELTYP=NT">https://www.sudoc.abes.fr/cbs//DB=2.1/SET=17/TTL=3/REL<br/>?PPN=261820893&amp;RELTYP=NT</a> |
| Permalien                    | <a href="https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B_P1329-C">https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B_P1329-C</a>  |
| <br>                         |  |
| LISTE DES VOLUMES            |  |
|                              | <a href="#">N°25 (1936)</a>  |
|                              | <a href="#">N°26 (1937)</a>  |
|                              | <a href="#">N°27 (1937)</a>  |
|                              | <a href="#">N°28 (1937)</a>  |
|                              | <a href="#">N°29 (1938)</a>  |
|                              | <a href="#">N°30 (1939)</a>  |
|                              | <a href="#">N°31 (1936)</a>  |
|                              | <a href="#">N°32 (1938)</a>  |
|                              | <a href="#">N°33 (1938)</a>  |
|                              | <a href="#">N°34 (1938)</a>  |
|                              | <a href="#">N°35 (1938)</a>  |
|                              | <a href="#">N°36 (1938)</a>  |
|                              | <a href="#">N°37 (1938)</a>  |
|                              | <a href="#">N°38 (1938)</a>  |
|                              | <a href="#">N°39 (1938)</a>  |
|                              | <a href="#">N°40 (1939)</a>  |
|                              | <a href="#">N°41 (1939)</a>  |
|                              | <a href="#">N°42 (1939)</a>  |
|                              | <a href="#">N°43 (1939)</a>  |
|                              | <a href="#">N°44 (1939)</a>  |
|                              | <a href="#">N°45 (1938)</a>  |
|                              | <a href="#">N°46 (1940)</a>  |
|                              | <a href="#">N°47 (1940)</a>  |
|                              | <a href="#">N°48 (1940)</a>  |
|                              | <a href="#">N°49 (1940)</a>  |
|                              | <a href="#">N°50 (1940)</a>  |
|                              | <a href="#">N°51 (1941)</a>  |
|                              | <a href="#">N°52 (1941)</a>  |
|                              | <a href="#">N°53 (1941)</a>  |
|                              | <a href="#">N°54 (1941)</a>  |
|                              | <a href="#">N°55 (1942)</a>  |
|                              | <a href="#">N°56 (1942)</a>  |
|                              | <a href="#">N°57 (1942)</a>  |
|                              | <a href="#">N°59 (1942)</a>  |

|                          |                                     |
|--------------------------|-------------------------------------|
|                          | <a href="#">N°60 (1941)</a>         |
|                          | <a href="#">N°61 (1942)</a>         |
|                          | <a href="#">N°62 (1943)</a>         |
|                          | <a href="#">N°64 (1943)</a>         |
|                          | <a href="#">N°65 (1943)</a>         |
|                          | <a href="#">N°66 (1943)</a>         |
|                          | <a href="#">N°68 (1943)</a>         |
|                          | <a href="#">N°69 (1943)</a>         |
|                          | <a href="#">N°70 (1943)</a>         |
|                          | <a href="#">N°71 (1943)</a>         |
|                          | <a href="#">N°72 (1944)</a>         |
|                          | <a href="#">N°73 (1943)</a>         |
|                          | <a href="#">N°74 (1944)</a>         |
|                          | <a href="#">N°75 (1944)</a>         |
|                          | <a href="#">N°78 (1944)</a>         |
|                          | <a href="#">N°79 (1944)</a>         |
|                          | <a href="#">N°80 (1944)</a>         |
|                          | <a href="#">N°81 (1944)</a>         |
|                          | <a href="#">N°82 (1944)</a>         |
|                          | <a href="#">N°83 (1944)</a>         |
|                          | <a href="#">N°84 (1944)</a>         |
|                          | <a href="#">N°85 (1944)</a>         |
|                          | <a href="#">N°86 (1945)</a>         |
|                          | <a href="#">N°87 (1945)</a>         |
|                          | <a href="#">N°88 (1945)</a>         |
|                          | <a href="#">N°89 (1945)</a>         |
|                          | <a href="#">N°90 (1945)</a>         |
|                          | <a href="#">N°91 (1945)</a>         |
|                          | <a href="#">N°92 (1945)</a>         |
|                          | <a href="#">N°93 (1945)</a>         |
|                          | <a href="#">N°94 (1945)</a>         |
| <b>VOLUME TÉLÉCHARGÉ</b> | <a href="#">N°95 (1946)</a>         |
|                          | <a href="#">N°96 (1946)</a>         |
|                          | <a href="#">N°97 (1946)</a>         |
|                          | <a href="#">N°98 (1944)</a>         |
|                          | <a href="#">N°99 (1945)</a>         |
|                          | <a href="#">N°100 (1945)</a>        |
|                          | <a href="#">N°101 (1946)</a>        |
|                          | <a href="#">N°102 (1946)</a>        |
|                          | <a href="#">N°103 (1946)</a>        |
|                          | <a href="#">N°104 (1946)</a>        |
|                          | <a href="#">N°105 (1946)</a>        |
|                          | <a href="#">N°106 (1946)</a>        |
|                          | <a href="#">N°107 (1947)</a>        |
|                          | <a href="#">N°108 (1947)</a>        |
|                          | <a href="#">N°109 (1947)</a>        |
|                          | <a href="#">N°110 et 111 (1947)</a> |
|                          | <a href="#">N° 112 (1947)</a>       |
|                          | <a href="#">N° 113 (1947)</a>       |
|                          | <a href="#">N° 114 (1947)</a>       |
|                          | <a href="#">N° 115 (1947)</a>       |
|                          | <a href="#">N° 116 (1947)</a>       |
|                          | <a href="#">N° 117 (1947)</a>       |
|                          | <a href="#">N° 118 (1948)</a>       |
|                          | <a href="#">N° 119 (1948)</a>       |
|                          | <a href="#">N° 120 (1948)</a>       |
|                          | <a href="#">N° 121 (1948)</a>       |
|                          | <a href="#">N° 122 (1947)</a>       |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
|  | <a href="#">N° 123 (1948)</a> |
|  | <a href="#">N° 124 (1948)</a> |
|  | <a href="#">N° 125 (1948)</a> |
|  | <a href="#">N° 126 (1948)</a> |
|  | <a href="#">N° 127 (1948)</a> |
|  | <a href="#">N° 128 (1948)</a> |
|  | <a href="#">N° 129 (1948)</a> |
|  | <a href="#">N° 130 (1949)</a> |
|  | <a href="#">N° 131 (1949)</a> |
|  | <a href="#">N° 132 (1949)</a> |
|  | <a href="#">N° 133 (1948)</a> |
|  | <a href="#">N° 134 (1949)</a> |
|  | <a href="#">N° 135 (1948)</a> |
|  | <a href="#">N° 136 (1949)</a> |
|  | <a href="#">N° 137 (1950)</a> |
|  | <a href="#">N° 138 (1950)</a> |
|  | <a href="#">N° 139 (1950)</a> |
|  | <a href="#">N° 140 (1950)</a> |
|  | <a href="#">N° 141 (1950)</a> |
|  | <a href="#">N° 142 (1948)</a> |
|  | <a href="#">N° 143 (1950)</a> |
|  | <a href="#">N° 144 (1950)</a> |
|  | <a href="#">N° 145 (1951)</a> |
|  | <a href="#">N° 146 (1951)</a> |
|  | <a href="#">N° 147 (1951)</a> |
|  | <a href="#">N° 148 (1951)</a> |
|  | <a href="#">N° 149 (1951)</a> |
|  | <a href="#">N° 150 (1951)</a> |
|  | <a href="#">N° 151 (1951)</a> |
|  | <a href="#">N° 152 (1951)</a> |
|  | <a href="#">N° 153 (1952)</a> |
|  | <a href="#">N° 154 (1952)</a> |
|  | <a href="#">N° 155 (1952)</a> |

| <b>NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ</b> |  |
|------------------------------------|--|
| Auteur(s) volume                   | Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers |
| Titre                              | Publication : Laboratoire d'essais   |
| Volume                             | <a href="#">N°95 (1946)</a>  |
| Adresse                            | Paris : Conservatoire national des arts et métiers, 1946   |
| Collation                          | 1 vol. (p. [155-161]) : ill. ; 27 cm   |
| Nombre de vues                     | 12   |
| Cote                               | CNAM-BIB P 1329-C (15)   |
| Sujet(s)                           | Conservatoire national des arts et métiers (France)<br>Génie industriel -- 20e siècle                            |
| Thématique(s)                      | Histoire du Cnam   |
| Typologie                          | Revue  |
| Langue                             | Anglais<br>Français  |
| Date de mise en ligne              | 10/04/2025   |
| Date de génération du PDF          | 07/02/2026   |
| Recherche plein texte              | Disponible   |
| Notice complète                    | <a href="https://www.sudoc.fr/039014541">https://www.sudoc.fr/039014541</a>                                      |
| Permalien                          | <a href="https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-C.15">https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-C.15</a>                        |

## **Note de présentation du ....**

---

...

8<sup>e</sup> Rue - 107

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
LABORATOIRE D'ESSAIS



BULLETIN  
DU  
LABORATOIRE D'ESSAIS  
1946 - N° 15

PUBLICATION N° 95

(Voir le sommaire au verso)

## SOMMAIRE

---

L. HEYBERGER. — Mesures de transmission de la chaleur  
chapitre III — (*suite*) . . . . .



# BULLETIN DU LABORATOIRE D'ESSAIS

DU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS & MÉTIERS

## MESURES DE TRANSMISSION DE LA CHALEUR<sup>(1)</sup>

A. 343

### Chapitre III (suite)

#### 3<sup>e</sup> MESURES DE CONDUCTIBILITÉ CALORIFIQUE

##### C. Procédés de mesures de conductibilité calorifique

###### c) FORME CYLINDRIQUE.

Les mesures de conductibilité sont effectuées sur une canalisation cylindrique, en fer, chauffée électriquement suivant son axe. La matière isolante dont on recherche le coefficient de conductibilité calorifique est appliquée autour de la canalisation, dans les conditions habituelles d'emploi.

Si le tube d'essai avait une longueur illimitée, le coefficient de conductibilité calorifique se déduirait simplement de la formule indiquée précédemment :

$$\lambda = \frac{q \cdot \log(D/d)}{2 \pi (t_e - t_i)} \quad (1)$$

dans laquelle  $q$  est la quantité de chaleur transmise par heure et par mètre de longueur;

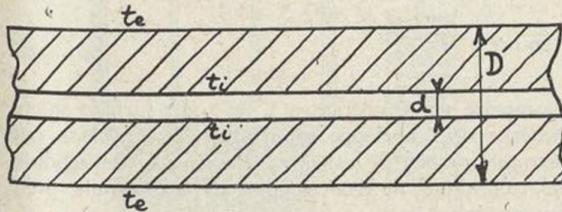


Fig. 10

$D$  et  $d$  les diamètres extérieur et intérieur de l'enveloppe calorifuge;

$t_i$  et  $t_e$  les températures des surfaces intérieure et extérieure de l'enveloppe.

Mais les tubes d'essais ont habituellement une longueur voisine de 2 m seulement. Il faut donc tenir compte des pertes de chaleur par les extrémités du tube; c'est le but recherché dans les méthodes d'essais suivantes :

a) PROCÉDÉ DE M. VAN RINSUM. L'auteur a indiqué la façon de calculer le terme correctif à apporter dans la formule précédente, pour tenir compte des pertes de chaleur par les extrémités du tube d'essais.

La matière étudiée est appliquée sur un tube de fer T, de 2 à 3 m de longueur, à l'intérieur duquel est placé un tube isolant t supportant une résistance électrique de chauffage.

Soit  $t_m$  la température de la surface interne de l'enveloppe calorifuge, mesurée au milieu du tube.

Si le tube était illimité, c'est-à-dire s'il n'y avait pas

de pertes de chaleur par les extrémités, la température de la surface interne de l'enveloppe calorifuge serait plus élevée que  $t_m$ . On aurait :

$$t = t_m + \Delta t_m$$

et le coefficient de conductibilité serait :

$$\lambda = \frac{Q \cdot \log(D/d)}{2 \pi (t_m + \Delta t_m - t_e)} \quad (2)$$

Le terme correctif  $\Delta t_m$  se calcule par la formule :

$$\Delta t_m = \frac{t_m - t_x}{\cos h x \cdot \sqrt{c}} \quad (3)$$

$t_x$  étant la température mesurée à la distance  $x$  du milieu du tube;

$\cos h x$ , le cosinus hyperbolique de  $x$ .

La constante  $c$  se calcule elle-même par la formule :

$$C = \frac{2 \pi \lambda}{\log D/d (S_1 \cdot \lambda_1 + S_2 \cdot \lambda_2)} \quad (4)$$

$\lambda$  étant le coefficient de conductibilité calorifique recherché de l'enveloppe calorifuge examinée;

$D$  et  $d$  les diamètres extérieur et intérieur de cette enveloppe.

$S_1$  la section du tube d'essais en fer T;

$S_2$  la section du tube chauffant intérieur t;

$\lambda_1$  et  $\lambda_2$  les coefficients de conductibilité calorifique respectifs du tube de fer T et du tube chauffant t.

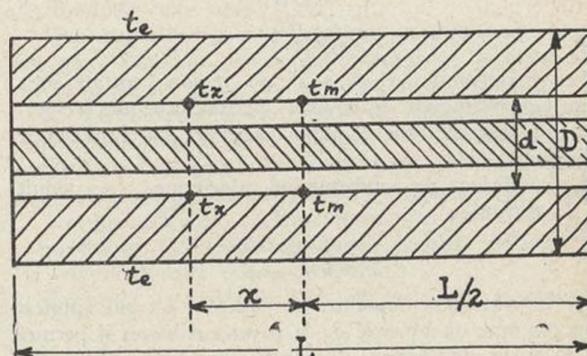


Fig. 11

Mais  $\lambda$  n'est pas connu puisque c'est précisément ce coefficient que l'on cherche à déterminer; on calcule une valeur de  $\lambda'$  approchée de  $\lambda$  par la formule (1) en prenant  $t_i = t_m$ .

(1) Voir « MESURES », n° 102 (nov. 1945).

$$\lambda' = \frac{q \cdot \log_n D/d}{2 \pi (t_i - t_e)}$$

Puis on calcule  $C$  en remplaçant dans la formule (4)  $\lambda$  par la valeur  $\lambda'$  et enfin on calcule  $\Delta t_m$  avec la valeur de  $C$  obtenue.

*β) PROCÉDÉ DU LABORATOIRE D'ESSAIS DU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS.* L'enveloppe calorifugée examinée est appliquée sur un tube d'acier de 2 m de longueur et de 0,15 m de diamètre.

Ce tube est chauffé suivant son axe par un tube de quartz sur lequel est enroulé un fil résistant parcouru par un courant continu d'intensité constante.

L'ensemble est enfermé dans une cabine calorifugée, dont la température est maintenue constante par un dispositif thermostatique à circulation d'eau froide.

Lorsque l'équilibre thermique est établi, les températures  $t_i$  et  $t_e$  des surfaces interne et externe de l'enveloppe sont sensiblement uniformes dans la région centrale de 1 m de longueur.

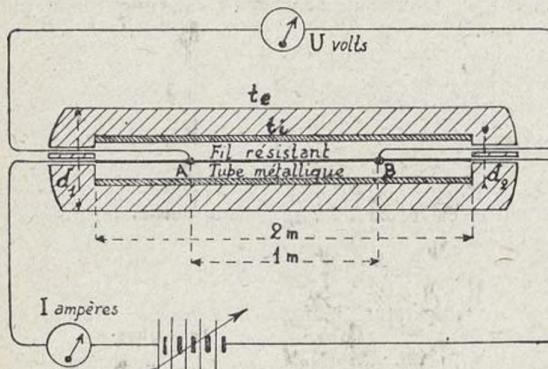


Fig. 12

On admet ainsi que cette région AB est exempte de perturbations dues aux extrémités et que la chaleur développée par effet Joule dans la portion centrale de même longueur du tube chauffant est intégralement transmise à l'enveloppe, normalement à l'axe du tube.

La quantité de chaleur  $q$ , en millithermies, émise par heure, dans la portion AB du tube chauffant, est déduite de la mesure de l'intensité  $I$  du courant de chauffage et de la différence de potentiel  $U$  entre les points A et B.

$$q = \frac{3600 U I}{4186} = 0,86 U I$$

Les températures  $t_i$  et  $t_e$  de la région centrale sont mesurées au moyen de couples thermoélectriques respectivement enroulés sur le tube d'acier et sur l'enveloppe calorifugée.

Le coefficient de conductibilité calorifique se déduit de la formule :

$$\lambda = \frac{q \cdot \log_n D/d}{2 \pi (t_i - t_e)}$$

*γ) CALORIMÈTRE SCHMIDT.* Ce dispositif est une application pratique du procédé de la paroi auxiliaire; il permet de mesurer directement les pertes de chaleur à travers une canalisation calorifugée en service.

Le calorimètre est constitué par une bande souple, rectangulaire A, en caoutchouc entoilé, mesurant environ 0,6 m de longueur, 0,06 m de largeur et 8 mm d'épaisseur; cette bande supporte environ 200 couples thermoélectriques, montés en série, dont les soudures sont successivement disposées sur une face et sur l'autre face.

Le calorimètre est enroulé autour de la canalisation

calorifugée examinée; deux autres bandes identiques, B, dépourvues de couples thermoélectriques, sont appliquées sur la canalisation, de part et d'autre de la bande A, formant ainsi un anneau de garde de transmission de chaleur.

La bande calorimétrique A est traversée par le même flux de chaleur que la portion de canalisation qu'elle recouvre.

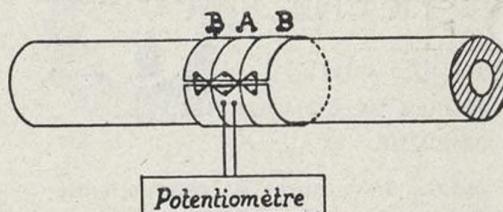


Fig. 13

Ce flux est sensiblement proportionnel à la différence de température  $\Delta t$  créée entre les deux faces de la bande A et, par suite, à la force électromotrice  $V$  mesurée entre les conducteurs extrêmes des couples supportés par cette bande.

$$Q' = a \cdot V.$$

Un étalonnage préalable permet de déterminer la constante  $a$ , c'est-à-dire le flux de chaleur par  $m^2$  et par heure, créant une force électromotrice de 1 millivolt (pour le calorimètre SCHMIDT utilisé au Laboratoire d'Essais du Conservatoire des Arts et Métiers,  $a = 19,7 \text{ Cal-kg/m}^2/\text{h/mv}$ ).

La quantité de chaleur perdue par mètre de longueur de tube, c'est-à-dire à travers une surface de  $\pi D^2$ , est :

$$Q' = Q \cdot V \cdot \pi D^2$$

ou encore :

$$Q' = a \cdot V \cdot \pi D$$

La mesure des températures  $t_i$  et  $t_e$  des surfaces interne et externe de l'enveloppe calorifugée, *sous la bande calorimétrique*, permet de calculer le coefficient de conductibilité calorifique de l'enveloppe par la formule précédemment indiquée :

$$\lambda = \frac{Q' \log_n D/d}{2 \pi (t_i - t_e)}$$

La force électromotrice  $V$  se mesure avec un potentiomètre. Si on utilise un millivoltmètre, il faut déduire la force électromotrice de la différence de potentiel  $U$  aux bornes du millivoltmètre :

$$V = \frac{R + r}{R} \cdot U$$

$R$ , résistance du millivoltmètre;

$r$ , résistance des couples supportés par la bande calorimétrique (environ 50 ohms pour le calorimètre utilisé au Laboratoire d'Essais du C.N.A.M.).

L'emploi du millivoltmètre permet de suivre l'établissement de l'équilibre thermique.

*δ) MÉTHODE DU LABORATOIRE D'ESSAIS DU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS POUR LES MESURES DE CONDUCTIBILITÉ CALORIFIQUE D'ÉPROUVETTES MÉTALLIQUES CYLINDRIQUES.* Cette méthode diffère nettement des précédentes. Les essais sont effectués sur des éprouvettes cylindriques de 22 mm de diamètre, 200 mm de longueur; 3 gorges annulaires d'environ 0,5 mm de diamètre, destinées à recevoir des couples thermoélectriques, sont ménagées sur la surface latérale de l'éprouvette, perpendiculairement à l'axe, l'une au milieu de l'éprouvette, les deux autres à 50 mm du milieu.

L'éprouvette est placée verticalement entre une source chaude et une source froide à températures constantes.

La source chaude est constituée par un bloc métallique, chauffé électriquement, dans lequel est encastrée l'extrémité inférieure de l'éprouvette.

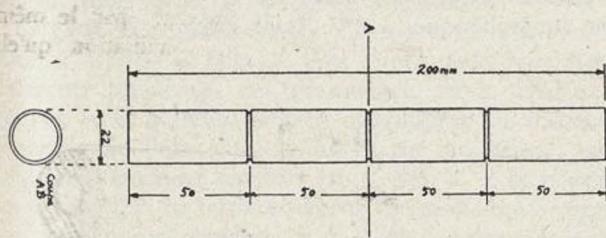


Fig. 14

Pour la source froide, deux cas sont à envisager :

1<sup>o</sup> *Essais aux températures supérieures à 100°C* (schéma fig. 15). La source froide est constituée par une cuve en cuivre, remplie d'eau; dans le fond de la cuve est encastrée l'extrémité supérieure de l'éprouvette.

Cette cuve est reliée à un condenseur à eau glacée; elle est protégée contre les perturbations extérieures par une deuxième cuve concentrique, également remplie d'eau et communiquant directement avec l'atmosphère.

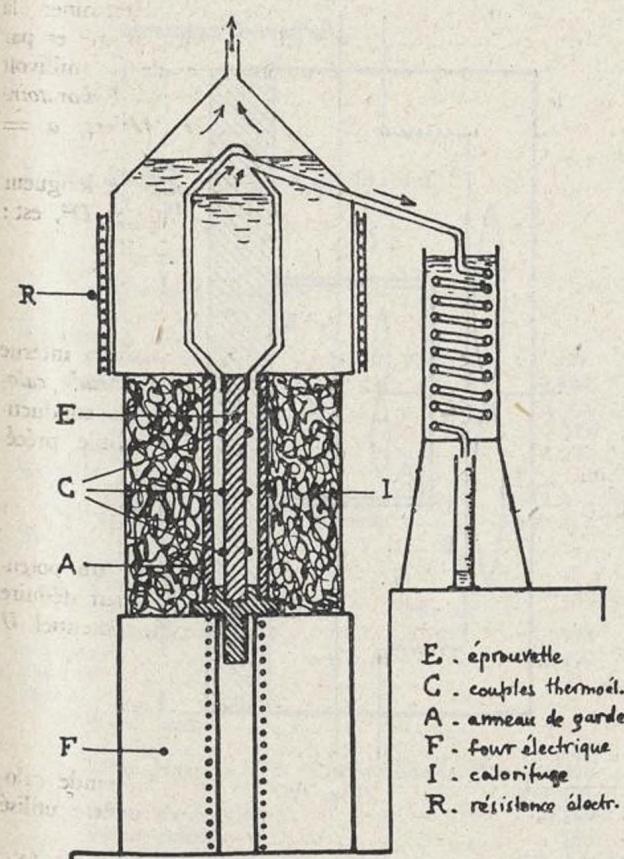


Fig. 15

Lorsque le régime thermique est établi, l'eau contenue dans les deux cuves est maintenue en ébullition sous la pression atmosphérique : dans la cuve intérieure, par la chaleur transmise par l'éprouvette; dans la cuve extérieure, par chauffage électrique au moyen d'une résistance enroulée extérieurement.

La quantité de chaleur transmise en une heure par l'éprouvette est déduite du poids de l'eau vaporisée dans la cuve intérieure pendant ce temps.

Soit  $Q$ , le poids d'eau condensée, en kg, recueillie par heure, à la sortie du condenseur relié à la cuve intérieure;  $S$ , la section droite de l'éprouvette, en  $m^2$ ;

$l$ , la distance, en m., de deux sections droites de l'éprouvette dont les températures sont respectivement  $t_1$  et  $t_2$  °C.

Le coefficient  $\lambda$  de conductibilité calorifique de l'éprouvette est calculé par la formule :

$$\lambda = \frac{537 \cdot Q \cdot 1}{S(t_1 - t_2)}$$

la chaleur latente de vaporisation de l'eau, sous la pression atmosphérique, à 100°C étant environ 537 calories.

2<sup>o</sup> *Essais aux températures inférieures à 100°* (schéma fig. 16). La source froide est constituée par une cuve remplie de glace fondante en *blocs transparents* (1) :

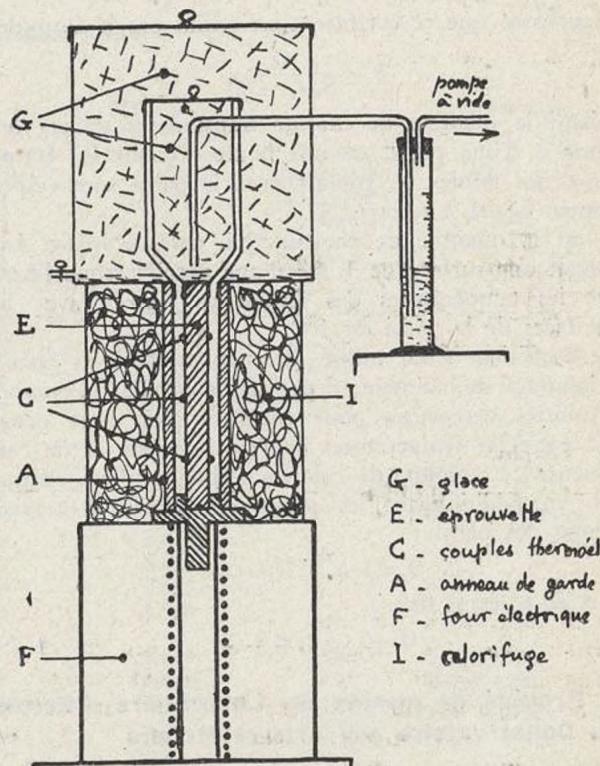


Fig. 16

l'extrémité supérieure de l'éprouvette est encastrée dans le fond de cette cuve.

Une deuxième cuve concentrique, également remplie de glace fondante, enveloppe la première, formant ainsi un anneau de garde de transmission de chaleur.

La glace contenue dans les deux cuves est maintenue en fusion : dans la cuve intérieure, par la chaleur transmise par l'éprouvette; dans la cuve extérieure, par la chaleur absorbée par les parois latérales.

La quantité de chaleur transmise par heure, par l'éprouvette, est déduite du poids de glace fondu dans la cuve intérieure pendant ce temps.

Soient  $Q$ , le poids de l'eau de fusion de glace prove-

(1) Il importe de ne remplir la cuve centrale qu'avec des blocs de glace transparente; M. BIQUARD, ancien chef du service des essais de Physique au Laboratoire d'Essais du C.A.M., a constaté, au cours de mesures de la chaleur latente de fusion de la glace, que la proportion d'eau adhérente aux blocs de glace transparente est inférieure à 0,3 %, alors qu'elle peut atteindre 7 % avec de la glace pulvérisée (Communication présentée au Deuxième Congrès International du Froid de Vienne 1910).

nant de la cuve intérieure, par heure (recueillie par aspiration au moyen d'une pompe à vide);

$S$ , la section droite de l'éprouvette, en  $m^2$ ;

$t_1$ , la distance, en m., de deux sections droites de l'éprouvette dont les températures sont respectivement  $t_1$  et  $t_2$  °C.

## Chapitre IV

### LE COEFFICIENT $k$ DE TRANSMISSION GLOBALE DE LA CHALEUR A TRAVERS UNE PAROI (ou coefficient de déperdition d'une paroi)

#### 1<sup>o</sup> Définition

Rappelons que ce coefficient est défini par la formule :

$$k = \frac{Q}{S(t_1 - t_2)}$$

$Q$  étant la quantité de chaleur transmise à travers une surface  $S$  d'une paroi, en une heure, lorsque les températures des fluides en contact avec la paroi sont respectivement égales à  $t_1$  et  $t_2$  °C.

$k$  est la quantité de chaleur qui, en une heure, traverserait une surface de 1  $m^2$  d'une paroi lorsque l'écart entre les températures des fluides en contact avec les deux faces de la paroi est 1°C.

Le coefficient  $k$  est utilisé directement dans les calculs de chauffage de bâtiment; il permet de calculer le nombre de calories nécessaires pour entretenir un écart déterminé entre les températures de l'air intérieur et de l'air extérieur; ce nombre de calories s'obtient, pour chaque local, en additionnant les pertes de chaleur à travers chacune des parois :

$$Q = \Sigma k \cdot S \cdot (t_1 - t_2)$$

ou,  $t_1$  et  $t_2$  étant fixes :

$$Q = t_1 - t_2 \Sigma k \cdot S.$$

#### 2<sup>o</sup> Procédé de mesure du Laboratoire d'Essais du Conservatoire des Arts et Métiers

Deux boîtes concentriques A et B présentent, dans un même plan vertical, une ouverture carrée de 1 et 2 m de côté, contre laquelle on applique un échantillon de 2 × 2 m de la paroi examinée.

Chaque boîte renferme des résistances chauffantes réparties aussi régulièrement que possible, et une hélice tournant à la vitesse d'environ 1 t/s. en vue d'uniformiser la température de l'air enfermé.

Des couples thermoélectriques sont répartis dans chaque boîte et au contact des deux faces de la région centrale de la paroi examinée.

L'appareil est placé dans une cabine soigneusement calorifugée, dont la température est maintenue constante à  $\pm 1/4$  °C près, par un dispositif thermostatique à circulation d'eau froide.

L'intensité du courant électrique de chauffage de la boîte externe est réglée de façon que la température de l'air enfermé dans les deux boîtes soit la même.

Dans ces conditions, la boîte externe joue le rôle d'anneau de garde de transmission de la chaleur, protégeant la boîte interne contre les perturbations extérieures.

La chaleur développée par effet JOULE dans la boîte interne est intégralement transmise à travers la paroi, normalement à ses faces.

La quantité de chaleur  $Q$ , en calories-kilogrammes,

Le coefficient  $\lambda$  de conductibilité calorifique de l'éprouvette est calculé par la formule :

$$\lambda = \frac{79 \cdot Q \cdot e}{S(t_1 - t_2)}$$

la chaleur latente de fusion de la glace, sous la pression atmosphérique, à 0°C, étant environ 79 calories.

transmise en une heure à travers la surface de 1  $m^2$  recouverte par la boîte interne est déduite de la puissance électrique  $U \cdot I$ . watts absorbée par la résistance chauffante enfermée dans cette boîte.

$$Q = \frac{3.600 U \cdot I}{4.186}$$

$$= 0,86 U \cdot I$$

Soient  $t_1$  et  $t_2$  les températures respectives de l'air à l'intérieur et à l'extérieur des boîtes;

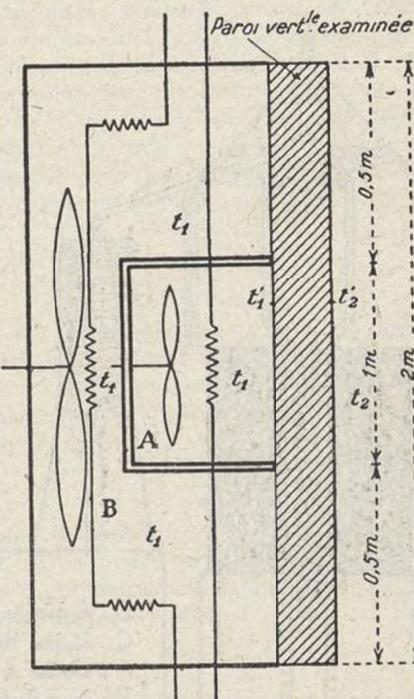


Fig. 17

$t'_1$  et  $t'_2$  les températures respectives des faces chaude et froide de la région centrale de la paroi.

Le coefficient  $k$  de transmission globale de la chaleur est :

$$k = \frac{Q}{t'_1 - t'_2}$$

Le même dispositif permet aussi de calculer le coefficient de conductibilité calorifique  $\lambda$  de la paroi par la formule :

$$\lambda = \frac{Q \cdot e}{t'_1 - t'_2}$$

$e$  étant l'épaisseur de la paroi.

## CONCLUSION

Les mesures de transmission de la chaleur sont certainement parmi les plus délicates; simples, en théorie, elles présentent de sérieuses difficultés qui ne peuvent être évitées qu'au prix de multiples précautions.

Le *Laboratoire d'Essais du Conservatoire National des Arts et Métiers* a fait un gros effort pour résoudre les différents problèmes de transmission de la chaleur. Il possède trois grandes cabines calorifugées au moyen de panneaux de liège d'au moins 10 cm d'épaisseur, mesurant intérieurement environ  $3,2 \times 2,6 \times 2$  m pourvues d'un dispositif de refroidissement thermostatique assurant une température constante à  $\pm 1/4^\circ\text{C}$  près; ces cabines abritent deux appareils de mesure de transmission globale

de la chaleur à travers une paroi et un appareil de mesure de déperdition calorifique de coquilles cylindriques.

Dans un laboratoire spécial fonctionnent sept appareils de mesure de coefficient de conductibilité calorifique, entre  $-10$  et  $1.000^\circ\text{C}$ .

Un appareil, précédemment décrit, a été mis au point pour les essais de conductibilité calorifique d'éprouvettes métalliques, entre 0 et  $1.000^\circ\text{C}$ .

Plusieurs milliers de coefficients de conductibilité calorifique des matériaux les plus variés ont été déterminés dans ces laboratoires.

L. HEYBERGER.

## ANNEXE

### Coefficients de conductibilité calorifique des matériaux usuels

(Unités : calories-kilogrammes, mètre, mètre carré, heure,  $^\circ\text{C}$ )

#### Désignation des matériaux

|  | Poids spécifique<br>kg/m <sup>3</sup> | Température moyenne<br>$^\circ\text{C}$ | Coeffic. de conductibilité calorifique<br>(Cal/kg/m/h/ $^\circ\text{C}$ ) | Chaleur spécifique<br>Cal/kg/ $^\circ\text{C}$ | Auteurs   |
|--|---------------------------------------|---|---|--|---|
| AIR .....  |                                       | 0                                       | 0,0204  |  |   |
|  |                                       | 20                                      | 0,0216  |  |   |
|  |                                       | 40                                      | 0,0227  |  |   |
|  |                                       | 60                                      | 0,0238  |  |   |
|  |                                       | 80                                      | 0,0249  |  |   |
|  |                                       | 100                                     | 0,0259  |  | J.S. CAMMERER.                                  |
|  |                                       | 200                                     | 0,0314  |  |   |
|  |                                       | 300                                     | 0,0361  |  |   |
|  |                                       | 400                                     | 0,0412  |  |   |
|  |                                       | 500                                     | 0,0453  |  |   |
| ALFOL. Mince feuilles d'aluminium.               |                                       | 50                                      | 0,036   |  |   |
| Unies .....                                      |                                       | 150                                     | 0,047   |  | J.S. CAMMERER.                                  |
|  |                                       | 250                                     | 0,058   |  |   |
| Légèrement ondulées .....                        |                                       | 50                                      | 0,052   |  |   |
|  |                                       | 150                                     | 0,067   |  |   |
|  |                                       | 250                                     | 0,079   |  |   |
| AMIANTE.   |                                       |   |   |  |   |
| Fibres .....                                     | 57                                    | 17,5                                    | 0,048   | 0,20   | L.E.C.A.M.                                      |
| Carton .....                                     | 1.000                                 | 36                                      | 0,091   |  | L.E.C.A.M.                                      |
| Feutre .....                                     | 420                                   | 30                                      | 0,08  |  | TEN BOSCH.                                      |
| Comprimé .....                                   | 116                                   | 105                                     | 0,04  | 0,195  |   |
| ARDOISE.   | 1.240                                 | 15                                      | 0,22  |  |   |
| Perpendiculairement au feuillement.              | 2.640 à 2.700                         |   | 0,3 à 1,7   |  |   |
| Parallèlement au feuillement.....                | 2.640 à 2.700                         |   | 2,0 à 2,9   |  | J.S. CAMMERER.                                  |
| ARGILE.  |                                       |   |   |  |   |
| Pilonnée .....                                   |                                       |   | 0,8   | 0,22   | REGELN.   |
| Mélangée de paille .....                         | 1.505                                 | 0                                       | 0,35  |  | HENCKY.   |
| Brique non cuite (10 % d'eau en volume) .....    | 1.775                                 | 25                                      | 0,8   |  | TEN BOSCH.                                      |
| ASPHALTE .....                                   | 2.100                                 | 20                                      | 0,60  | 0,22   | TEN BOSCH.                                      |
| BASALTE .....                                    |                                       | 0                                       | 1,14  |  | J.S. CAMMERER.                                  |
| BÉTON.   |                                       |   |   |  | J.S. CAMMERER.                                  |
| Béton armé .....                                 |                                       | 20                                      | 1,3   |  | Comité Français du Chauffage et de l'Eclairage. |
| Béton léger (5 à 8 % d'humidité) .....           | 800                                   |   | 0,30  |  |   |
|  | 1.000                                 |   | 0,40  |  |   |
|  | 1.200                                 |   | 0,50  |  |   |
| Béton de scories .....                           | 1.300                                 |   | 0,55  |  | L.E.C.A.M.                                      |
| Béton ponce .....                                | 760                                   | 30                                      | 0,25  |  | L.E.C.A.M.                                      |
| Béton cellulaire .....                           | 400 à 1.040                           | 30                                      | 0,115 à 0,425   |  | L.E.C.A.M.                                      |
| Béton multicellulaire .....                      | 300 à 600                             | 30                                      | 0,063 à 0,124   |  | J.S. CAMMERER.                                  |
| BITUME Bois.                                     | 1.050                                 | 20                                      | 0,144   |  |   |
| (Courant calorifique parallèle aux fibres) ..... | 600                                   | 20                                      | 0,32  | 0,57 à 0,65                                    |   |
| Sciures séchées à l'air.....                     | 800                                   |   | 0,36  |  | J.S. CAMMERER.                                  |
| Copeaux .....                                    | 190 à 215                             | 20                                      | 0,05 à 0,06   |  |   |
| Fibre  | 95 à 140                              | 20                                      | 0,050 à 0,055   |  |   |
| comprimée, sans enduit....                       | 290                                   | 35                                      | 0,076   |  |   |
| avec enduit, ciment sur chaque face .....        | 376                                   | 57                                      | 0,111   |  |   |
| agglomérée avec ciment Portland .....            | 370                                   | 33                                      | 0,070   |  | L.E.C.A.M.                                      |
| agglomérée avec ciment magnésien .....           | 280                                   | 33                                      | 0,081   |  |   |

## Désignation des matériaux

| Désignation des matériaux                                     | Poids spécifique kg/m³ | Température moyenne °C | Coeffic. de conductibilité calorifique γ (Cal/kg/m/h/°C) | Chaleur spécifique Cal/kg/°C | Auteurs           |
|---|------------------------|------------------------|--|------------------------------|-------------------|
| BRIQUES.  |                        |                        |  |                              |                   |
| Briques d'argile, après 4 mois de séchage .....               | 1.775                  | 20                     | 0,60   | 0,18 à 0,22                  | L.E.C.A.M.        |
| Briques rouges d'argile .....                                 | 600                    | 15                     | 0,97   |                              | Cté Fs du Chauff. |
| Briques creuses assemblées au plâtre, sans enduit.....        | 690                    | 34                     | 0,20   |                              | L.E.C.A.M.        |
| Briques creuses avec enduit de plâtre sur les deux faces..... | 980                    | 32                     | 0,29   |                              |                   |
| Briques blanches silico-calcaires..                           | 950                    | 31                     | 0,32   |                              |                   |
| Briques de silice d'infusoires.....                           | 600                    | 15                     | 0,89   |                              | L.E.C.A.M.        |
| Briques de silice d'infusoires.....                           | 295                    | 15                     | 0,086  |                              |                   |
| Briques silico-ardoises .....                                 | 600                    | 12                     | 0,79   |                              |                   |
|   |                        | 500                    | 0,27   |                              |                   |
|   |                        | 700                    | 0,34   |                              |                   |
|   |                        | 900                    | 0,40   |                              |                   |
|   |                        | 1100                   | 0,58   |                              |                   |
|   |                        | 500                    | 0,29   |                              |                   |
|   |                        | 700                    | 0,40   |                              |                   |
| Briques de silice.....  | 1.770                  | 900                    | 0,52   |                              | TEN BOSCH.        |
|   |                        | 1100                   | 0,72   |                              |                   |
|   |                        | 500                    | 0,25   |                              |                   |
|   |                        | 700                    | 0,36   |                              |                   |
|   |                        | 900                    | 0,49   |                              |                   |
|   |                        | 1100                   | 0,59   |                              |                   |
|   |                        | 500                    | 0,29   |                              |                   |
| Briques de chamotte.....                                      | 2.000                  | 1100                   | 0,90   |                              |                   |
|   |                        | 500                    | 0,63   |                              |                   |
| Briques de magnésie.....                                      | 2.630                  | 1100                   | 0,58   |                              |                   |
| CALORITE .....  | 240                    | 21                     | 0,053  |                              | L.E.C.A.M.        |
|   |                        | 237                    | 0,063  |                              |                   |
|   |                        | 290                    | 0,067  |                              |                   |
| CARBORANDUM .....   | 2.400                  | 490                    | 2,63   |                              | L.E.C.A.M.        |
|   | 4.000                  | 600                    | 3,35   | 0,28                         | TEN BOSCH.        |
| CAOUTCHOUC.   |                        |                        |  |                              |                   |
| de plantation, teneur en gomme 100 % .....                    |                        | 20                     | 0,115  |                              |                   |
| Vulcanisé (produit marchand).....                             |                        |                        |  |                              |                   |
| Teneur en gomme en %  |                        |                        |  |                              |                   |
| 38.....   |                        | 20                     | 0,25   |                              | J.S. CAMMERER.    |
| 44.....   |                        | 20                     | 0,22   |                              |                   |
| 50.....   |                        | 20                     | 0,19   |                              |                   |
| 67.....   |                        | 20                     | 0,15   |                              |                   |
| 92.....   |                        | 20                     | 0,14   |                              |                   |
| CARTON .....  | 1.000 à 1.200          | 20                     | 0,12 à 0,20  |                              | J.S. CAMMERER.    |
|   | 790                    | 20                     | 0,13   |                              |                   |
| CELLULOID.  |                        |                        |  |                              |                   |
| Blanc .....   | 1.400                  | 20                     | 0,18   |                              |                   |
| CHAMOTTE.   |                        |                        |  |                              |                   |
| Morceaux .....  | 2.200                  | 600                    | 0,68   |                              | TEN BOSCH.        |
|   | 1.850                  | 1000                   | 0,83   |                              |                   |
|   |                        | 200                    | 0,52   |                              |                   |
| Farine .....  | 1.240                  | 100                    | 0,38   | 0,28                         |                   |
| CHARBON DE BOIS.  |                        |                        |  |                              |                   |
| Sec .....   |                        | 0                      | 0,047  | 0,20                         | L.E.C.A.M.        |
| Charbon (poussier) .....                                      | 600 à 750              | 20                     | 0,1  |                              | J.S. CAMMERER.    |
| CHAUX.  |                        |                        |  |                              |                   |
| Dure .....  | 1.200                  |                        | 3,13   |                              |                   |
| Argileuse .....   |                        |                        | 2,81   |                              |                   |
| Très argileuse .....  |                        |                        | 2,41   |                              |                   |
| Pulvérulente .....  |                        |                        | 0,10   |                              |                   |
| CIMENT.   |                        |                        |  |                              |                   |
| Sciure de bois et ciment Portland                             | 715                    | 20                     | 0,12   | 0,2                          | TEN BOSCH.        |
| Mortier de ciment de Portland....                             | 1.715                  | 89                     | 0,29   | 0,27                         |                   |
| COKE.   |                        |                        |  |                              |                   |
| Débris .....  | 1.000                  | 20                     | 0,13   |                              | J.S. CAMMERER.    |
| CUIR .....  | 1.000                  | 20                     | 0,14 à 0,15  |                              | J.S. CAMMERER.    |
| DÉCHETS de filature.....                                      | 100                    | 50                     | 0,048  |                              | TEN BOSCH.        |
| DIATOMITE.  |                        |                        |  |                              |                   |
| En briques .....  | 450                    | 85                     | 0,088  |                              |                   |
|   |                        | 186                    | 0,101  |                              |                   |
|   |                        | 259                    | 0,111  |                              |                   |
|   |                        | 337                    | 0,125  |                              |                   |
|   |                        | 467                    | 0,135  |                              |                   |
|   |                        | 130                    | 0,126  |                              |                   |
|   |                        | 178                    | 0,128  |                              |                   |
| En briques .....  | 620                    | 264                    | 0,136  |                              | L.E.C.A.M.        |
|   |                        | 363                    | 0,146  |                              |                   |
|   |                        | 454                    | 0,159  |                              |                   |
|   |                        | 112                    | 0,200  |                              |                   |
|   |                        | 169                    | 0,206  |                              |                   |
|   |                        | 244                    | 0,208  |                              |                   |
|   |                        | 314                    | 0,218  |                              |                   |
|   |                        | 448                    | 0,224  |                              |                   |
| En briques de silice d'infusoires..                           | 295                    | 15                     | 0,086  |                              |                   |

| Désignation des matériaux                           | Poids spécifique kg/m <sup>3</sup> | Température moyenne °C              | Coeffic. de conductibilité calorifique (Cal/kg/m/h/°C) | Chaleur spécifique Cal/kg/°C | Auteurs                       |
|---|------------------------------------|-------------------------------------|--|------------------------------|-------------------------------|
| EAU   |                                    | 10<br>30<br>60<br>80<br>100         | 0,491<br>0,519<br>0,562<br>0,590<br>0,615              |                              | J.S. CAMMERER.                |
| EPONGES artificielles                               | 42                                 | 25                                  | 0,044  |                              |                               |
| GLACE à 0°C   | 880 à 920                          | 0                                   | 1,5 à 2,0  |                              |                               |
| GRANIT  | 2.500 à 3.050                      |                                     | 2,7 à 3,5  |                              |                               |
| GRAPHITE en poudre criblé                           | 700                                | 20                                  | 1,02   |                              |                               |
| GRÈS dur  | 2.200 à 2.500                      |                                     | 1,1 à 1,6  |                              | L.E.C.A.M.<br>J.S. CAMMERER.  |
| JUTE (bourrelets)                                   | 94                                 | 42                                  | 0,055  | 0,32                         |                               |
| KAPOK de Java                                       | 157                                | 24                                  | 0,047  |                              |                               |
| KIESELGUHR  | 270                                | 35                                  | 0,048  | 0,21                         |                               |
| LAINE de mouton                                     | 136                                | 0                                   | 0,033  | 0,41                         |                               |
| LAINE minérale                                      | 130                                | 41<br>94<br>202<br>90<br>201<br>267 | 0,039<br>0,041<br>0,052<br>0,049<br>0,069<br>0,079     |                              | L.E.C.A.M.                    |
| LIÈGES.   |                                    |                                     |  |                              |                               |
| Expansé pur   | 80                                 | 32                                  | 0,034  |                              |                               |
| Aggloméré au brai                                   | 200                                | 32                                  | 0,047  | 0,21 à 0,25                  |                               |
| Aggloméré à la caséine                              | 110                                | 31                                  | 0,035  |                              |                               |
| Aggloméré au ciment magnésien                       | 200                                | 31                                  | 0,050  |                              |                               |
| Aggloméré au ciment                                 | 120<br>360<br>250<br>870           | 30<br>25<br>35<br>35                | 0,044<br>0,084<br>0,085<br>0,180                       |                              | L.E.C.A.M.                    |
| LINOLÉUM.   | 1.183                              | 20                                  | 0,16   |                              |                               |
| Linoléum de liège, mou et élastique                 | 525                                | 20                                  | 0,070  |                              |                               |
| MAGNÉSIE.   |                                    |                                     |  |                              | J.S. CAMMERER.                |
| Calcinée  | 200                                | 20                                  | 0,053  |                              |                               |
| 85 % de carbonate de magnésie                       | 102                                | 120                                 | 0,060  |                              |                               |
| + 15 % d'amiante                                    |                                    | 170<br>250                          | 0,065<br>0,070   |                              |                               |
| MARBRE  | 2.500 à 2.850                      | 20                                  | 1,8 à 2,3  |                              |                               |
|   | 100                                | 0                                   | 0,04   |                              | J.S. CAMMERER.                |
|   | 200                                | 0                                   | 0,09   |                              |                               |
|   | 300                                | 0                                   | 0,20   |                              |                               |
| NEIGE à 0°C.  | 500                                | 0                                   | 0,55   |                              |                               |
|   | 900                                | 0                                   | 1,9  |                              |                               |
| (glace)   | 140                                | 20                                  | 0,043  |                              | L.E.C.A.M.                    |
| PAILLE  |                                    |                                     |  |                              |                               |
| PARAFFINE   | 870 à 920                          | 20                                  | 0,21 à 0,25  |                              |                               |
| PARQUETS SANS JOINTS                                | 1.160 à 1.700                      | 20                                  | 0,118 à 0,354  |                              |                               |
| PIERRES.  |                                    |                                     |  |                              |                               |
| Pierre calcaire                                     | 2.550                              | 100                                 | 1,70   |                              | Comité Français du Chauffage. |
| Pierre poreuse (grès calcaire, tendre ou siliceuse) |                                    |                                     | 1,5  |                              |                               |
| Pierres compactes (granit, marbre, etc.)            | 2.500 à 3.050                      |                                     | 1,8 à 3,5  | 0,18 à 0,22                  |                               |
| PLATRE  | 570 à 960                          | 30                                  | 0,13 à 0,33  | 0,20                         |                               |
| Carreau de plâtre                                   | 1.040                              | 22                                  | 0,27   |                              |                               |
| SABLE   | 1.500                              | 20                                  | 0,28   | 0,19 à 0,22                  | L.E.C.A.M.                    |
| SUCRE   | 1.600                              | 20                                  | 0,50   |                              |                               |
| TAÏC en poudre                                      | 1.080                              | 20                                  | 0,25   |                              |                               |
| TERRE, à l'état naturel                             |                                    | 20                                  | 0,45   |                              |                               |
| Terre donnée, humidité normale                      | 2.000                              | 20                                  | 2,0  |                              |                               |
| Terre d'infusoires                                  | 150                                | 22                                  | 0,047  |                              | L.E.C.A.M.                    |
| TOURBE fibreuse sèche                               | 73                                 | 20                                  | 0,037  | 0,45                         |                               |
| VERRE   | 2.400 à 3.200                      | 20                                  | 0,5 à 0,9  | 0,19 à 0,20                  |                               |
| Verre mousse  | 490                                | 42                                  | 0,107  |                              |                               |



