

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).

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](#))
- 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 passible 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) Génie industriel -- 20e siècle
Note	La collection comporte des lacunes : n°24; n°58; n°63; n°67; n°76-n°77
Notice complète	https://www.sudoc.abes.fr/cbs//DB=2.1/SET=17/TTL=3/REL?PPN=261820893&RELTYPE=NT
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B_P1329-C
LISTE DES VOLUMES	
	N°25 (1936)
	N°26 (1937)
	N°27 (1937)
	N°28 (1937)
	N°29 (1938)
	N°30 (1939)
	N°31 (1936)
	N°32 (1938)
	N°33 (1938)
	N°34 (1938)
	N°35 (1938)
	N°36 (1938)
	N°37 (1938)
	N°38 (1938)
	N°39 (1938)
	N°40 (1939)
	N°41 (1939)
	N°42 (1939)
	N°43 (1939)
	N°44 (1939)
	N°45 (1938)
	N°46 (1940)
	N°47 (1940)
	N°48 (1940)
	N°49 (1940)
	N°50 (1940)
	N°51 (1941)
	N°52 (1941)
	N°53 (1941)
	N°54 (1941)
	N°55 (1942)
	N°56 (1942)
	N°57 (1942)
	N°59 (1942)

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

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

NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ	
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	N°93 (1945)
Adresse	Paris : Conservatoire national des arts et métiers, 1945
Collation	1 vol. (p. [145-153]) : ill. ; 27 cm
Nombre de vues	14
Cote	CNAM-BIB P 1329-C (14)
Sujet(s)	Conservatoire national des arts et métiers (France) Génie industriel -- 20e siècle
Thématique(s)	Histoire du Cnam
Typologie	Revue
Langue	Anglais Français
Date de mise en ligne	10/04/2025
Date de génération du PDF	07/02/2026
Recherche plein texte	Disponible
Notice complète	https://www.sudoc.fr/039014541
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-C.14

...

8° Rec. 107

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
LABORATOIRE D'ESSAIS



BULLETIN
DU
LABORATOIRE D'ESSAIS
1945 - N° 14

PUBLICATION N° 93

(Voir le sommaire au verso)

SOMMAIRE

L. HEYBERGER. — Mesure de transmission de la chaleur page 145



MESURES DE TRANSMISSION DE LA CHALEUR

Chapitre I

MODES DE TRANSMISSION DE LA CHALEUR

Entre deux corps à des températures différentes, il se produit inévitablement des échanges de chaleur.

Ces échanges s'effectuent suivant des lois que nous allons rappeler brièvement.

Examinons le cas simple de la transmission de chaleur, en régime constant, à travers une paroi à faces planes et parallèles interposée entre un milieu fluide chaud I (four, étuve, etc.) et l'air ambiant II.

A. Du milieu I à la paroi, la chaleur se propage :

1° PAR CONVECTION. — Les particules fluides les plus chaudes et, par conséquent, les plus légères, s'élèvent, emportant avec elles la chaleur qu'elles ont emmagasinée; elle sont aussitôt remplacées par des particules plus

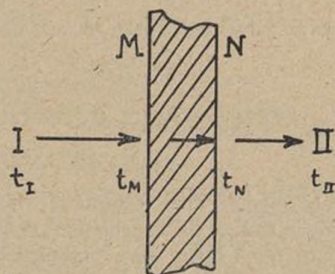


Fig. 1

froides qui, à leur tour, s'échauffent, se déplacent, et cèdent une partie de la chaleur emmagasinée à la face M de la paroi, et ainsi de suite. Ce déplacement peut d'ailleurs être activé mécaniquement.

Si on suppose que les températures t_I °C du milieu I et t_M °C de la face M sont uniformes et constantes, la quantité de chaleur q_1 en Cal/m²/h. transportée de I sur M est proportionnelle à la différence de températures $t_I - t_M$:

$$q_1 = A \cdot (t_I - t_M) \quad (1)$$

Le facteur de proportionnalité A est appelé *coefficient de convection*; il varie avec la nature et la rugosité de la face M, le poids spécifique et la vitesse de déplacement du fluide au contact de la face M.

2° PAR RAYONNEMENT. — A la surface du corps rayonnant, la chaleur se transforme en énergie rayonnante, traverse le milieu fluide I et atteint la face M de la paroi; là, une partie de l'énergie rayonnée est retransformée en chaleur et absorbée par la face M, tandis que l'autre est réfléchie.

Remarquons en passant que ce mode de propagation de la chaleur, ne nécessitant pas de support matériel, peut s'effectuer même dans le vide.

Supposons que les lois relatives au corps noir sont applicables.

L'énergie rayonnée par la source chaude, en Cal/m²/h, est, d'après la loi de STEPHAN et BOLTZMANN :

$$E_1 = C_1 \left(\frac{T_1}{100} \right)^4$$

C_1 étant la constante de rayonnement de la source chaude et

T_1 la température absolue du corps rayonnant.

$$(T_1 = t_1 + 273)$$

De même, l'énergie rayonnée par la face M de la paroi est :

$$E_2 = C_2 \left(\frac{T_M}{100} \right)^4$$

C_2 étant la constante de rayonnement de la paroi et T_M sa température absolue.

$$(T_M = t_M + 273)$$

Et la différence entre les quantités de chaleur rayonnées par la source chaude et par la face M, c'est-à-dire la quantité de chaleur transmise de la source chaude à la face M, est :

$$E = C \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_M}{100} \right)^4 \right] \quad (2)$$

C étant une constante qui est fonction de C_1 et de C_2 , de la distance et de la position mutuelle des deux corps.

Des formules approchées permettent de calculer C en fonction de C_1 , C_2 et de C_n (constante de rayonnement du corps noir) dans différents cas simples. C est toujours inférieur ou égal à la plus petite des constantes C_1 et C_2 .

Pour simplifier les calculs, on fait souvent apparaître un « facteur de température » a dont la valeur est :

$$a = \frac{\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_M}{100} \right)^4}{t_1 - t_M}$$

Des tables donnent la valeur de a en fonction de t_1 et de t_M .

La formule (2) devient :

$$E = C \cdot a \cdot (t_1 - t_M)$$

Et, si on pose $B = C \cdot a$, on obtient la formule :

$$E = B (t_1 - t_M) \quad (3)$$

de même forme que la formule (1) de convection.

Le facteur B est appelé *coefficient de transmission de chaleur par rayonnement* du milieu I à la paroi.

La quantité totale de chaleur transmise du milieu I à la face M, par convection et par rayonnement, est :

$$Q_1 = \alpha_1 (t_1 - t_M) \quad (3)$$

avec $\alpha_1 = A + B$. Le coefficient α_1 est appelé coefficient de transmission de chaleur du milieu I à la paroi. C'est la quantité de chaleur, transmise pendant l'unité de temps, à travers l'unité de surface de la paroi, pour une différence de température de 1° C entre le milieu I et la face M de la paroi.

D'après M. CAMMERER, ce coefficient peut varier depuis 3 Cal/m²/h/°C, pour les gaz se déplaçant très lentement, jusqu'à plus de 30.000 Cal/m²/h/°C, pour l'eau et la vapeur saturée dans les conditions les plus favorables.

B. A travers la paroi, de la face M à la face N, la chaleur se propage par conductibilité, de molécule à molécule.

On admet que le flux de chaleur transmis entre deux points voisins à des températures différentes, est proportionnel à la différence de température entre ces points, et inversement proportionnel à leur distance.

Cette hypothèse, émise par J.-B. BIOT, a presque toujours été vérifiée par l'expérience; elle a permis à FOURIER de poser son équation fondamentale de la conductibilité calorifique dans un corps solide, homogène et isotrope :

$$dQ = \lambda \cdot dS \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \cdot dZ.$$

dans laquelle

Q représente la quantité de chaleur transportée,

t la température d'un point déterminé,

x la distance des deux points considérés,

S une surface perpendiculaire à la direction des deux points,

Z le temps.

En étendant cette hypothèse à toute l'épaisseur e et à la surface S de la paroi, la quantité de chaleur transmise, d'une face à l'autre, est :

$$Q = \frac{\lambda \cdot S (t_M - t_N) \cdot Z}{e}.$$

Le facteur de proportionnalité λ est appelé coefficient de conductibilité calorifique.

Unités :

1° *Système dit pratique.*

Les quantités de chaleur sont exprimées en millithermies ou en calories-kilogrammes, les longueurs en mètres, les surfaces en m², les temps en heures, les températures en °C.

Dans ce système d'unités, le coefficient de conductibilité calorifique est la quantité de chaleur transmise, par heure et par mètre carré, à travers un mur de un mètre d'épaisseur, lorsque la différence de température des deux faces du mur est de 1° C.

2° *Système C.G.S.*

Les quantités de chaleur sont exprimées en microthermies ou calories-grammes, les longueurs en cm, les surfaces en cm², les temps en secondes et les températures en °C.

La valeur numérique du coefficient de conductibilité calorifique d'une matière déterminée est 360 fois plus grande dans le système d'unités pratiques que dans le système C.G.S.

Ainsi, l'argent a un coefficient de conductibilité calorifique voisin de 1 dans le système d'unités C.G.S. et de 360 dans le système d'unités pratiques.

Les coefficients de conductibilité calorifique des isolants

et des matériaux de construction sont presque toujours exprimés en unités pratiques; ils sont compris entre 0,035 pour les meilleurs lièges, la soie de verre et 3 pour certaines pierres naturelles compactes telles que le marbre, le granit.

Dans ce même système d'unités, les coefficients de conductibilité calorifique des métaux sont compris entre 9 (pour le mercure) et 360 (pour l'argent).

C. De la paroi au milieu II (air environnant), la chaleur se propage par convection et par rayonnement comme du milieu I à la paroi.

Nous retrouvons, comme dans le premier cas, un coefficient de transmission α_2 défini par la même formule :

$$Q = \alpha_2 \cdot (t_N - t_2)$$

t_N désignant la température de la face froide de la paroi, en °C,

t_2 la température supposée uniforme, de l'air environnant, en °C.

Le coefficient α_2 de transmission de la paroi à l'air environnant, a généralement une valeur différente de α_1 . Il est compris entre 3 Cal/m²/h/°C pour l'air calme et 100 Cal/m²/h/°C pour un vent de tempête.

En résumé, les quantités de chaleur transmises pendant l'unité de temps, à travers l'unité de surface, sont :

1° du milieu I à la paroi :

$$q_1 = \alpha_1 (t_1 - t_M)$$

2° à travers la paroi, de la face M à la face N :

$$q_2 = \lambda \frac{t_M - t_N}{e}$$

3° de la paroi à l'air environnant :

$$q_3 = \alpha_2 (t_N - t_2)$$

Nous avons supposé que l'équilibre thermique était établi; ces trois quantités de chaleur sont donc égales, sinon les températures ne seraient pas constantes.

$$q_1 = q_2 = q_3 = q$$

D'où :

$$\frac{q}{\alpha_1} = t_1 - t_M$$

$$q \cdot \lambda = t_M - t_N$$

$$\frac{q}{\alpha_2} = t_N - t_2$$

et

$$q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) = t_1 - t_2$$

Posons

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

On a :

$$q = k (t_1 - t_2)$$

Ce coefficient k est appelé coefficient de transmission globale de la chaleur : c'est la quantité de chaleur, en millithermies ou grandes calories qui, en une heure, est transmise à travers une surface de 1 m² de la paroi, lorsque la différence des températures de l'air au contact de ses faces est de 1°C. k est fréquemment appelé aussi coefficient de déperdition calorifique de la paroi, ou encore coefficient de passage.

Chapitre II

IMPORTANCE RELATIVE DES DIVERS COEFFICIENTS DE TRANSMISSION DE CHALEUR

M. CAMMERER a montré, dans l'exemple suivant, l'influence relative des coefficients α_1 , α_2 de l'épaisseur e de la paroi et du coefficient λ sur les quantités de chaleur transmises du milieu I à l'air environnant à travers la paroi.

La différence de température $t_1 - t_2$ du milieu I et de l'air environnant est supposée constante et égale à 300°C .

$$t_1 - t_2 = 300^\circ\text{C}.$$

1° Influence de α_1

Considérons une paroi de 5 cm d'épaisseur, de coefficient de conductibilité égal à 0,09, interposée entre le milieu I et l'air environnant (cloison en béton cellulaire, par exemple).

En faisant varier α_1 de 20 à $1000\text{ Cal/m}^2/\text{h}/^\circ\text{C}$, la quantité de chaleur transmise à travers la paroi augmente de 6% seulement.

2° Influence de α_2

Dans les mêmes conditions : $t_1 - t_2 = 300^\circ\text{C}$.

$$e = 5\text{ cm.}$$

$$\lambda = 0,09.$$

En faisant varier α_2 de $5\text{ Cal/m}^2/\text{h}/^\circ\text{C}$ (air calme) à $80\text{ Cal/m}^2/\text{h}/^\circ\text{C}$ (air très agité), la quantité de chaleur transmise par la paroi à l'air environnant augmente de 20% seulement.

Chapitre III

LE COEFFICIENT DE CONDUCTIBILITÉ CALORIFIQUE

1° GÉNÉRALITÉS

C'est la constante physique la plus importante en matière de transmission de chaleur à travers des matériaux d'épaisseur notable, aux températures peu élevées.

Les frais d'exploitation d'une installation calorifuge en dépendent essentiellement. D'après M. CAMMERER, l'ordre de grandeur de ce coefficient est le suivant :

— Matériaux isolants : de $0,035$ à $0,20\text{ Cal/m}^2/\text{h}/^\circ\text{C}$.

— Matériaux de construction : de $0,12$ à $3\text{ Cal/m}^2/\text{h}/^\circ\text{C}$.

— Métaux : de 9 à $360\text{ Cal/m}^2/\text{h}/^\circ\text{C}$.

Le coefficient de conductibilité calorifique des matériaux de construction et d'isolation thermique est influencé par la porosité, la température, la composition, l'humidité des matériaux et la nature des joints.

a) La porosité est le facteur le plus important; le coefficient de conductibilité d'un corps poreux est une moyenne entre celui de l'air enfermé dans les pores et celui des matières compactes, ce dernier, compris entre 2 et 3,5, étant environ 100 fois plus grand que le premier.

La partie compacte de la plupart des matériaux de construction (béton, briques, pierres calcaires, etc.) ayant sensiblement le même poids spécifique que les pierres naturelles (environ 2.600 kg/m^3), il en résulte que le coefficient de conductibilité calorifique de ces matériaux peut approximativement être déduit de leur densité apparente. Des courbes des coefficients de conductibilité calorifique en fonction de la densité apparente, assez concordantes, ont d'ailleurs été établies par plusieurs expérimentateurs.

Remarquons ici que, pour une même densité apparente, le coefficient de conductibilité augmente avec les dimensions des pores.

3° Influence de l'épaisseur e de la paroi.

Supposons toujours : $t_1 - t_2 = 300^\circ\text{C}$.

α_1 et α_2 constants,

et $\lambda = 0,09$ (cloison en béton cellulaire).

Faisons varier l'épaisseur de 2 à 12 cm; la quantité de chaleur transmise à travers la paroi diminue d'environ 80%.

4° Influence de λ

Supposons que le milieu I est séparé de l'air environnant par une paroi en liège de 5 cm d'épaisseur, de coefficient de conductibilité calorifique 0,04.

Remplaçons cette paroi en liège par une cloison en plâtre plein de même épaisseur, mais de coefficient de conductibilité calorifique 0,16.

La quantité de chaleur transmise à travers la paroi augmente de 235%, augmentation considérable.

Cet exemple montre nettement que les deux facteurs jouant un rôle capital dans la déperdition de chaleur à travers une paroi, aux températures peu élevées, sont l'épaisseur de l'isolant et le coefficient de conductibilité calorifique.

Dès lors, on comprend pourquoi les techniciens du froid et de la chaleur ont porté principalement leur attention sur le coefficient de conductibilité calorifique. Actuellement encore, les coefficients α_1 et α_2 sont mal connus.

b) La température. — En général, le coefficient de conductibilité calorifique croît avec la température. Cet accroissement est surtout sensible pour les matériaux poreux : dans les pores, la chaleur est principalement transmise par rayonnement, et la quantité de chaleur transmise est proportionnelle à la différence des 4^{es} puissances des températures des deux faces opposées des pores.

Ainsi, d'après TEN BOSCH, le coefficient de conductibilité calorifique des briques de silice est environ cinq fois plus élevé à 1500°C qu'à 0°C .

$$\lambda_0 = 0,32$$

$$\lambda_{100} = 0,40$$

$$\lambda_{1000} = 1,14$$

$$\lambda_{1500} = 1,50$$

c) La composition chimique, la constitution moléculaire des parties solides et leur structure cristalline ou amorphe ont une influence considérable sur le coefficient de conductibilité calorifique.

Les corps cristallisés sont en effet bien plus conducteurs de la chaleur que les mêmes corps amorphes. Ainsi, le coefficient de conductibilité calorifique du cristal de roche parallèle à l'axe est 11,7 à 0°C , tandis que celui du verre de quartz (amorphe), à 0°C , est 1,1 (d'après M. CAMMERER).

d) L'humidité exerce une influence très importante sur le coefficient de conductibilité calorifique des matériaux poreux.

L'eau, en effet, occupe dans les pores la place d'un égal volume d'air, et le coefficient de conductibilité calorifique de l'eau est d'environ 25 fois plus grand que celui de l'air.

2° FORMULES DE DÉFINITION

A. Cas d'une paroi plane homogène à faces parallèles.

Nous avons vu que le coefficient de conductibilité calorifique d'une paroi plane homogène à faces parallèles se déduit de la formule :

$$Q = \frac{\lambda (t_M - t_N) \cdot S \cdot Z}{e}$$

dans laquelle Q est la quantité de chaleur transmise pendant un temps Z à travers une surface S parallèle aux faces d'un mur d'épaisseur e , les températures superficielles du mur étant t_M et t_N .

Remarque : Cas des parois de faible épaisseur.

Cette formule est basée sur l'hypothèse de BIOR : la quantité de chaleur transmise est inversement proportionnelle à l'épaisseur de la paroi, les températures superficielles de la paroi restant les mêmes.

Cette hypothèse se trouve en défaut dans le cas de parois de faible épaisseur, comme nous l'avons signalé dans une note présentée au Congrès des Thermiciens à Paris en 1938.

La résistance offerte au passage du flux à travers une paroi, d'une face à l'autre, est égale à la somme des résistances offertes par les couches superficielles et par les couches internes de la paroi. Les nombreuses expériences que nous avons effectuées ont systématiquement montré que la résistance des couches superficielles est beaucoup plus élevée que la résistance des couches internes, ces résistances étant rapportées à l'unité d'épaisseur.

Il en résulte que la résistance des couches superficielles joue un rôle prépondérant dans une mince paroi tandis que son importance est beaucoup moindre dans une paroi épaisse.

Par suite, le coefficient de conductibilité calorifique apparent d'une paroi de faible épaisseur, calculé d'après la formule précédente, est plus faible que celui d'une paroi de même nature mais de plus grande épaisseur.

C'est pourquoi le Laboratoire d'Essais fait des réserves sur les coefficients de conductibilité calorifique déterminés sur des panneaux de moins de 3 cm d'épaisseur : il avertit que les coefficients obtenus sur ces échantillons ne peuvent pas être appliqués à des panneaux de plus grande épaisseur, bien que la composition soit la même.

Cette influence des couches superficielles a été signalée dès 1910 par M. BIQUARD, ancien Chef du Service des Essais Physiques du Laboratoire d'Essais du C.N.A.M. dans une étude présentée au 2° Congrès international du Froid de Vienne : « Chacune des surfaces d'une paroi fonctionne comme une couche isolante supplémentaire.

« ...Ceci explique qu'en doublant l'épaisseur d'un mur « en pierre de 0,30 m, on n'aura accru son efficacité isolante que de 30 % environ de sa valeur initiale, parce que l'effet isolant dû aux surfaces sera resté le même.

« Mais si on place un second mur de 0,30 m parallèlement au premier, et séparé de lui par un intervalle de quelques centimètres, on pourra admettre que l'efficacité isolante est réellement doublée, le nombre des surfaces étant aussi doublé. »

Remarquons que, dans ce dernier cas, l'action isolante résulte de la résistance offerte au passage de la chaleur, non seulement par les deux murs, mais aussi par la lame d'air qui sépare ceux-ci.

Plus récemment, MM. LEMOINE et BLANC, dans leur *Traité de physique générale et expérimentale*, 1^{er} volume, ont également signalé que « la chaleur éprouve une résistance particulière pour franchir la surface de séparation « de deux corps conducteurs ; il se produit le même phé-

« nomène que s'il existait une couche très mince ayant « un coefficient de conductibilité beaucoup plus petit. « Ainsi l'expérience montre qu'on vaporise la même quantité d'eau, dans le même temps, avec une chaudière « en tôle et avec une chaudière en cuivre, bien que « le cuivre soit meilleur conducteur. Ce qui intervient « surtout pour régler le débit de chaleur, ce sont les deux « couches superficielles du métal. »

En conclusion, il ne faudra pas être surpris de trouver que, par exemple, le coefficient de conductibilité calorifique d'un pavé de verre est plus élevé que celui d'une feuille de verre à vitre, pourtant de même composition. Et inversement, il serait imprudent de calculer les pertes de chaleur à travers une paroi épaisse en prenant comme base de calcul un coefficient de conductibilité calorifique obtenu sur une paroi de même composition, mais de faible épaisseur.

B. Paroi plane à faces parallèles, constituée par plusieurs couches superposées de matériaux différents.

Soit une paroi d'épaisseur totale E , formée de plusieurs couches de matériaux différents d'épaisseur e_1, e_2, e_3 et de coefficient de conductibilité calorifique $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$.

Désignons par t_1, t_2, t_3, t_4 les températures des faces successives des différentes couches.

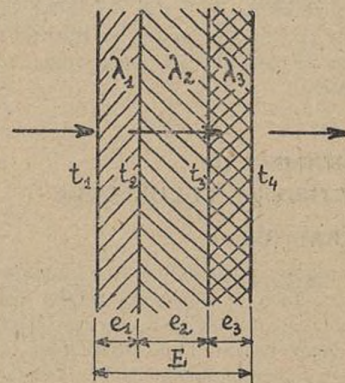


Fig. 2

En régime constant, les différentes couches sont traversées par le même flux de chaleur q par unité de surface et pendant l'unité de temps.

D'où :

$$q = \frac{\lambda_1 (t_1 - t_2)}{e_1} = \frac{\lambda_2 (t_2 - t_3)}{e_2} = \frac{\lambda_3 (t_3 - t_4)}{e_3}$$

Par suite :

$$q \cdot \frac{e_1}{\lambda_1} = t_1 - t_2$$

$$q \cdot \frac{e_2}{\lambda_2} = t_2 - t_3$$

$$q \cdot \frac{e_3}{\lambda_3} = t_3 - t_4$$

Additionnons membre à membre :

$$q \left(\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} \right) = t_1 - t_4$$

Le coefficient de conductibilité calorifique λ d'une paroi homogène, de même épaisseur E , équivalente

(c'est-à-dire offrant la même résistance au passage du flux thermique), serait donné par la relation :

$$q \cdot \frac{E}{\lambda} = t_1 - t_2$$

D'où :

$$\frac{E}{\lambda} = \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3}$$

ou :

$$\frac{E}{\lambda} = \sum \frac{e_n}{\lambda_n}$$

Cette formule montre que l'ordre de succession des différentes couches est sans influence sur le débit de chaleur à travers la paroi.

C. Tube cylindrique.

Les conduites de vapeur, d'eau chaude, etc., sont presque toujours protégées par une enveloppe calorifuge cylindrique.

Soit $D = 2R$ et $d = 2r$ les diamètres extérieur et intérieur de cette enveloppe, t_i et t_e les températures

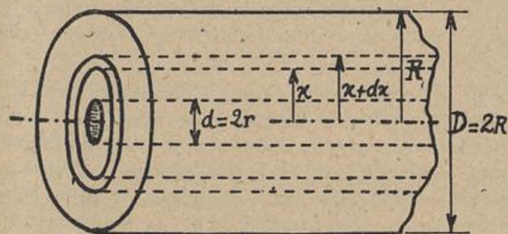


Fig. 3

des surfaces intérieure et extérieure lorsque l'équilibre thermique est établi.

Considérons un tube élémentaire de rayons x et $x + dx$; soit y et $y - dy$ les températures des surfaces intérieure et extérieure de ce tube.

L'épaisseur dx étant infiniment petite par rapport à la longueur de la circonférence de rayon x , le tube élémentaire peut être assimilé à une paroi plane à faces parallèles; par suite, la quantité de chaleur transmise à travers l'unité de surface de ce tube, pendant l'unité de temps, est, d'après la formule du mur :

$$q = -\frac{\lambda \cdot dy}{dx}$$

λ étant le coefficient de conductibilité calorifique de l'enveloppe.

Et, pour une longueur de tube égale à 1 m, c'est-à-dire à travers une surface

$$S = 2\pi x$$

la quantité de chaleur transmise est :

$$Q = -\frac{\lambda \cdot 2\pi x \cdot dy}{dx}$$

D'où :

$$Q \cdot \frac{dx}{x} = -2\pi \lambda \cdot dy$$

Puisque l'équilibre thermique est établi, la quantité de chaleur Q , transmise pendant l'unité de temps à travers tous les tubes élémentaires de longueur égale à 1 m et de diamètres compris entre d et D , est constante.

Intégrons entre les limites r et R pour x , et entre t_i et t_e pour y :

$$Q \int_r^R \frac{dx}{x} = -2\pi \lambda \cdot \int_{t_i}^{t_e} dy$$

$$Q \cdot \text{Log}_n \frac{R}{r} = 2\pi \lambda \cdot (t_i - t_e)$$

ou encore

$$Q \cdot \text{Log}_n \frac{D}{d} = 2\pi \lambda \cdot (t_i - t_e)$$

D'où :

$$\lambda = \frac{Q \cdot \text{Log}_n \frac{D}{d}}{2\pi \cdot (t_i - t_e)}$$

Cette formule est utilisée pour la détermination du coefficient de conductibilité calorifique d'un tube cylindrique.

D. Enveloppe cylindrique constituée par plusieurs couches concentriques de matériaux différents.

Soit $d_i, d_1, t, t_1, \lambda_1$

$d_1, d_2, t_1, t_2, \lambda_2$, etc...

les diamètres intérieur et extérieur, les températures des surfaces intérieure et extérieure et le coefficient de conductibilité calorifique de chaque couche.

En régime constant, la quantité de chaleur transmise à travers les différentes couches pendant l'unité de temps, par unité de longueur, est la même.

$$\begin{aligned} q &= \frac{t_i - t_1}{\frac{1}{2\pi \lambda_1} \cdot \text{Log}_n \frac{d_1}{d_i}} \\ &= \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{2\pi \lambda_2} \cdot \text{Log}_n \frac{d_2}{d_1}} \\ &= \frac{t_{n-1} - t_n}{\frac{1}{2\pi \lambda_n} \cdot \text{Log}_n \frac{d_n}{d_{n-1}}} \end{aligned}$$

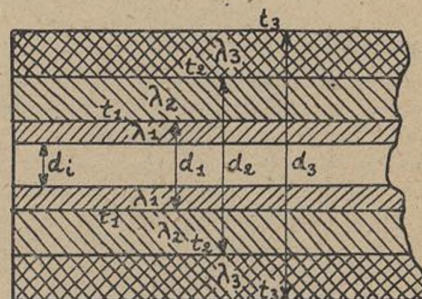


Fig. 4

D'où :

$$\begin{aligned} q \cdot \frac{1}{2\pi \lambda_1} \cdot \text{Log}_n \frac{d_1}{d_i} &= t_i - t_1 \\ q \cdot \frac{1}{2\pi \lambda_2} \cdot \text{Log}_n \frac{d_2}{d_1} &= t_1 - t_2 \\ q \cdot \frac{1}{2\pi \lambda_n} \cdot \text{Log}_n \frac{d_n}{d_{n-1}} &= t_{n-1} - t_n \\ q \sum \frac{1}{2\pi \lambda_n} \cdot \text{Log}_n \frac{d_n}{d_{n-1}} &= t_i - t_e \end{aligned}$$

Remarquons que l'ordre de succession des différentes couches influe sur le débit de chaleur, même si ces couches avaient la même épaisseur; dans ce cas, en effet,

le rapport des diamètres diminue au fur et à mesure que la couche considérée se rapproche de la surface externe. Il y a intérêt, pour diminuer les pertes de chaleur à travers l'enveloppe, à mettre les couches les plus isolantes vers l'intérieur.

3^o MESURES DE CONDUCTIBILITÉ CALORIFIQUE

A. Difficultés des mesures de conductibilité calorifique.

Les mesures de conductibilité calorifique sont beaucoup plus délicates que les mesures de conductibilité électrique.

a) *Fuites.* Il n'existe pas, en effet, d'isolant calorifique parfait; aussi doit-on tenir compte des pertes de chaleur par les faces latérales des panneaux ou par les extrémités des tubes. En électricité, par contre, on n'a pas à se préoccuper des fuites lorsqu'on a pris des mesures convenables d'isolement.

b) *Durée des mesures.* Le passage d'un courant électrique constant dans un conducteur crée, presque instantanément, des différences de potentiel constantes entre différents points de ce conducteur. Par contre, les différences de température créées dans un corps traversé par un flux thermique ne se stabilisent qu'au bout d'un temps assez long, de l'ordre de 24 heures pour une paroi isolante; les états d'équilibre thermique pourraient d'ailleurs être masqués si, avant leur établissement, les conditions d'essais variaient (variation de la température ambiante, de l'agitation de l'air par exemple). D'où la nécessité de poursuivre les mesures pendant plusieurs jours consécutifs, afin d'obtenir des résultats moyens, suffisamment certains.

c) *Imprécision des mesures.* Les différences de potentiel peuvent être mesurées, avec une précision bien plus grande que les différences de températures entre les faces d'une paroi ou entre les surfaces interne et externe d'un tube; cela tient notamment à l'incertitude des contacts des instruments de mesure avec les surfaces examinées. On ne peut guère obtenir une précision meilleure que $\pm 5 \%$, dans la pratique industrielle.

B. Appareils de mesure.

Les mesures de conductibilité calorifique comportent des mesures de quantité de chaleur et de températures.

a) MESURES DE QUANTITÉS DE CHALEUR.

L'échantillon de paroi ou de tube examiné est habituellement chauffé électriquement; la quantité de chaleur, en calories-kilogrammes, émise par la résistance chauffante en 1 heure et par m^2 , se déduit de la puissance électrique absorbée.

$$Q = \frac{3.600 \text{ E I}}{4.186} \\ = 0,86 \text{ E I}$$

E étant la différence de potentiel (en volts) créée aux bornes de la résistance chauffante par le passage du courant d'intensité I ampère.

Cette mesure, purement électrique, est susceptible d'une grande précision; mais, comme nous l'avons indiqué précédemment, les échantillons n'ayant pas des dimensions illimitées, et étant en contact avec des corps qui ne sont pas des isolants parfaites, il faut se préoccuper des pertes de chaleur par les parois latérales des panneaux ou par les extrémités des tubes.

b) MESURES DE TEMPÉRATURES.

a) *Coupes thermoélectriques.* Les températures superficielles des échantillons sont généralement mesurées au

moyen de couples thermoélectriques; la soudure chaude est appliquée sur la surface examinée, sur une longueur d'une dizaine de centimètres au moins et de façon à assurer un contact aussi bon que possible; la soudure froide est maintenue à une température constante, de préférence dans la glace fondante, à 0°C . Le tableau suivant indique la nature et la limite d'utilisation des couples usuels :

Nature des coupes	Température maximum d'utilisation	Force électromotrice en millivolts correspondant
		à une différence de températures de 100°C
Cuivre-Constantan	500	environ 4,0
Chromel-Alumel	1.300	environ 4,1
Nickel-Nickel Chrome.	1.100	environ 3,5
Platine-Platine rhodié.	1.500	environ 1,0

Dans une communication au Congrès de 1937 de l'Association Technique de l'Industrie du Gaz en France, M. GOUFFÉ a décrit un dispositif à couple thermoélectrique construit au Laboratoire des Recherches Physiques de la Société du Gaz de Paris, pour évaluer des températures de parois inférieures à 100°C , telles que la température des murs d'un local, d'un panneau chauffant, etc.

Les fils d'un couple en Cuivre Constantan, de 0,2 mm de diamètre, sont enroulés sur une longueur d'environ 10 cm, dans l'évidement d'une bobine plate de laiton de 14 mm de diamètre et de 2 mm seulement d'épaisseur; la soudure chaude est logée au centre de cette bobine, dans une cavité percée radialement; la bobine est fixée sur une tige en bois, reliée elle-même à une bouteille thermos dans laquelle est placée la soudure froide.

Grâce à la haute conductibilité calorifique du laiton, le couple thermoélectrique se met, en trois minutes environ, en équilibre de température avec la paroi contre laquelle est appliquée la bobine. D'après M. GOUFFÉ, les écarts entre la température d'équilibre du couple et la température de la paroi sont au plus de $1/10$ de $^\circ\text{C}$.

b) *Récepteurs de rayonnement.* Pour les mesures de température de surfaces rugueuses ou mauvaises conductrices, il est préférable d'employer des dispositifs à rayonnement. Le contact d'un couple thermoélectrique avec de telles surfaces serait en effet des plus incertains.

D'ailleurs, les corps à consistance caverneuse tels que briques, pierres meulières, etc., se comportent comme des corps noirs; le pouvoir émissif de leur surface est sensiblement égal à 1 et la température de radiation est très voisine de la température vraie.

M. GOUFFÉ recommande l'emploi de piles thermoélectriques à éléments multiples constantan-manganèse, montés en série et entourés d'une chemise d'eau à température constante T_0 . Un étalonnage préalable permet de tracer la courbe des forces électromotrices de la pile en fonction de la différence des 4^o puissances de la température absolue T de la paroi examinée et de la température absolue T_0 de l'enveloppe de la pile; cette courbe est linéaire jusqu'à des températures de paroi de l'ordre de 200°C (communication de M. GOUFFÉ au Congrès de 1937).

C. Procédés de mesures de conductibilité calorifique.

a) LA FORME SPHÉRIQUE.

C'est la forme idéale à donner aux échantillons: la chaleur produite au centre d'un corps sphérique s'écoule

intégralement et uniformément à travers ce corps sans que l'on ait à se préoccuper des pertes de chaleur.

NUSSELT plaçait la matière à essayer entre deux sphères concentriques; la source de chaleur était enfermée dans la sphère intérieure. Pour faciliter la mise en place de l'échantillon, la sphère extérieure, de 60 à 70 cm de diamètre, était constituée par deux hémisphères, réunis par des boulons suivant un cercle horizontal, et la demi-sphère supérieure présentait à la partie supérieure un petit couvercle amovible. La sphère intérieure, de 15 cm de diamètre, était en cuivre; elle était suspendue par des fils d'amiante; la source de chaleur était constituée par un ruban résistant supporté par une croix en mica.

Le coefficient de conductibilité calorifique se déduit de la formule :

$$\lambda = \frac{Q \cdot \left(\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_e} \right)}{2 \pi (t_i - t_e)}$$

dans laquelle Q est la quantité de chaleur émise par heure par la source de chaleur,

d_i et d_e les diamètres intérieur et extérieur de l'échantillon,

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

Mais cette méthode n'était réellement pratique que pour les matériaux pulvérulents.

Au surplus, les matériaux sont presque toujours utilisés sous forme de panneaux ou de coquilles cylindriques, et il est préférable de les essayer sous leur forme d'utilisation.

b) PANNEAUX.

Les premières mesures de conductibilité calorifique ont été entreprises par FOURIER, en 1828, puis par PECLER, en 1841; elles eurent le grand mérite de poser le problème de la conductibilité calorifique et de montrer les écueils à éviter.

Depuis, de nombreux procédés de mesure ont été utilisés, tant en France qu'à l'étranger; nous en avons brièvement décrit quelques-uns dans le bulletin n° 22 du *Laboratoire d'Essais du Conservatoire National des Arts et Métiers*.

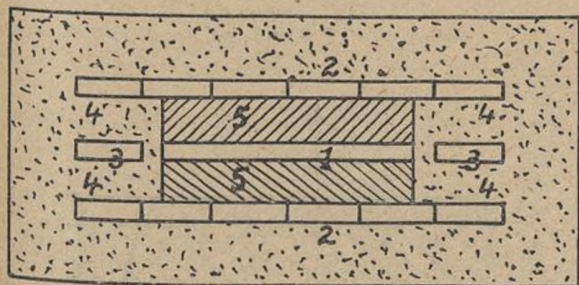


Fig. 5

Dans la plupart des procédés actuellement utilisés, la source de chaleur est électrique; par sa grande souplesse, ce mode de chauffage permet de réaliser les températures désirées entre des limites très étendues.

a) LE PROCÉDÉ DE POENGSEN était utilisé au « *Forschungssheim für Wärmeschutz E.V.* » de Munich.

Une plaque chauffante électrique, carrée (1), de 50 cm de côté, est disposée entre deux panneaux identiques, carrés, de 50 cm de côté (5).

Des cuves plates à circulation d'eau (2), sont appliquées contre les faces extérieures des deux panneaux, symétriquement par rapport à la plaque chauffante.

Un anneau chauffant (3) entoure la plaque chauffante; un isolant quelconque (4) est placé entre cet anneau et les cuves de refroidissement.

Le chauffage de l'anneau est réglé de telle façon que les températures superficielles de la plaque et de l'anneau soient les mêmes. Lorsque cette condition est remplie, la chaleur émise par la plaque chauffante est intégralement transmise aux deux panneaux, en quantités égales.

Ce dispositif permet, d'après l'auteur, de faire des mesures entre 5 et 100°C seulement. Pour obtenir des températures plus élevées, on remplace les cuves de refroidissement par des plaques de chauffage appropriées.

Le *National Physical Laboratory* utilise un procédé semblable, décrit dans le bulletin n° 22 du *Laboratoire d'Essais du Conservatoire National des Arts et Métiers*.

β) PROCÉDÉ DU LABORATOIRE D'ESSAIS DU C.A.M. Dans le procédé de POENGSEN, il est essentiel que, dans un plan quelconque, parallèle au plan de symétrie, la température du panneau soit la même que celle de l'anneau de garde.

Pour obtenir ce résultat, il faut procéder à un réglage délicat et parfois assez long du chauffage de l'anneau.

Ce réglage est évité dans les dispositifs suivants, employés au *Laboratoire d'Essais du Conservatoire National des Arts et Métiers*.

1. Entre -10° et 400°C. — Une résistance électrique plate, parcourue par un courant continu d'intensité constante, est placée en sandwich entre deux panneaux identiques.

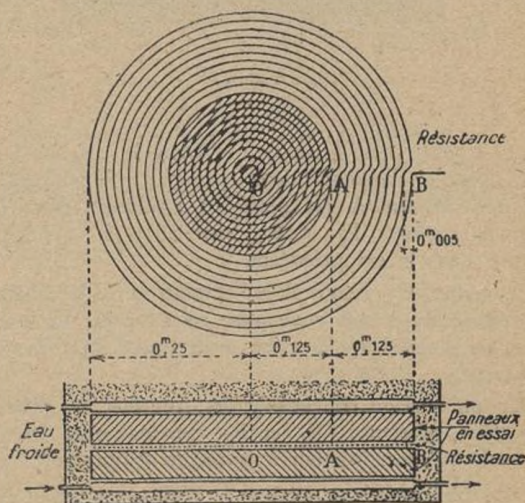


Fig. 6

Contre les faces externes de ces panneaux sont appliquées des cuves plates refroidies par un courant d'eau ou de saumure, dont le débit et la température moyenne sont constants.

La quantité de chaleur émise par la résistance chauffante est transmise par quantités égales aux deux panneaux, l'ensemble étant symétrique par rapport à cette résistance.

La résistance est constituée par un fil O B enroulé en spires sensiblement circulaires, régulièrement espacées.

Lorsque le régime d'équilibre thermique est établi, on vérifie que la région centrale O A est exempte des perturbations dues aux bords, la couronne périphérique A B jouant le rôle d'anneau de garde de transmission de chaleur.

La quantité de chaleur transmise par la région O A pendant l'unité de temps, est déduite de la mesure de l'intensité du courant électrique d'alimentation et de la différence de potentiel entre les points O et A.

Les températures des deux faces de chaque panneau sont mesurées au moyen de couples thermoélectriques.

Le coefficient de conductibilité calorifique λ des panneaux examinés est déduit de la formule :

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

dans laquelle :

Q est la quantité de chaleur en millithermies émise en 1 heure par la région centrale O A;

S la surface en m^2 (0,0491) de la région centrale O A;

e l'épaisseur moyenne en mètre des panneaux;

$t_1 - t_2$ la différence de températures en degrés centigrades des deux faces de chaque panneau.

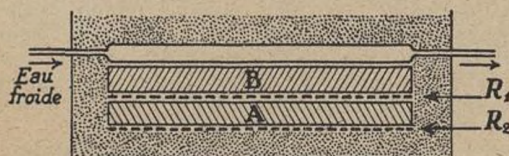


Fig. 7

2. *Cas d'un seul panneau.* — Dans le cas où il n'est pas possible d'obtenir deux panneaux identiques, un panneau témoin A est placé en sandwich entre deux résistances plates R_1 et R_2 , semblables à la résistance utilisée dans le cas précédent.

Le panneau présenté B est disposé entre la résistance supérieure R_1 et une cuve plate refroidie par un courant d'eau ou de saumure de débit et de température moyenne constante.

Par un réglage convenable des courants de chauffage des deux résistances R_1 et R_2 , on maintient les deux faces du panneau témoin à la même température.

Dans ces conditions, lorsque le régime est établi, aucun flux de chaleur ne traverse A, dont tous les points sont à la même température; la chaleur émise par la résistance supérieure R_1 traverse donc intégralement le panneau examiné B.

Le coefficient de conductibilité λ se déduit de la formule :

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

Q étant la quantité de chaleur émise en 1 heure par la résistance R_1 ;

S la surface en m^2 (0 m^2 0491) de la région centrale de R_1 ;

e l'épaisseur en mètre du panneau B;

$t_1 - t_2$ la différence de température en degrés centigrades entre les deux faces du panneau B.

3. *Entre 100 et 1.000°C.* — Le panneau est disposé entre une résistance électrique plate et un système de deux cuves cylindriques concentriques, remplies d'eau distillée.

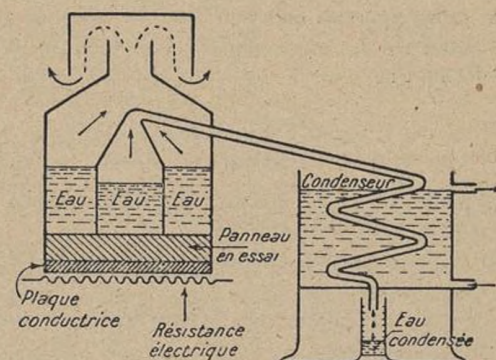


Fig. 8

L'eau contenue dans les cuves est portée à la température d'ébullition, sous la pression atmosphérique, par la chaleur transmise à travers le panneau.

Les parois latérale et supérieure de la cuve centrale sont entourées par l'eau en ébullition et la vapeur d'eau de la cuve extérieure qui constitue ainsi un anneau de garde de transmission de chaleur.

La quantité de chaleur transmise pendant l'unité de temps, en régime thermique, à travers la partie cylindrique du panneau recouverte par la cuve centrale est déduite de la quantité d'eau vaporisée dans cette cuve (cette eau vaporisée est recueillie par condensation dans un réfrigérant).

Le coefficient moyen de conductibilité calorifique λ est déduit de la formule :

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

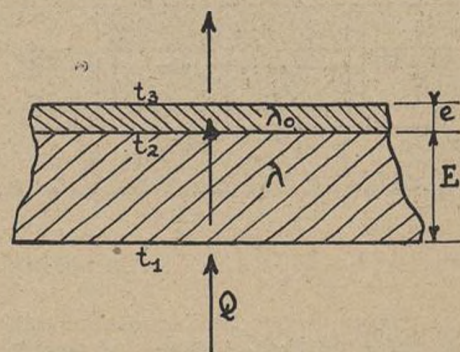


Fig. 9

537 étant la chaleur latente, en millithermies, de vaporisation de l'eau sous la pression atmosphérique;

Q la quantité d'eau en kilogrammes vaporisée en une heure dans la cuve centrale;

e l'épaisseur en mètre du panneau;

S la surface en m_2 du fond de la cuve centrale;

$t_1 - t_2$ la différence de température en degrés centigrades des deux faces du panneau, mesurée dans la région recouverte par la cuve centrale.

γ) PROCÉDÉ DE LA PAROI AUXILIAIRE. Contre une paroi P, traversée par un flux de chaleur constant, on applique une plaque auxiliaire p d'épaisseur e et de coefficient de conductibilité calorifique λ_0 connu.

La paroi et la plaque, supposées illimitées, sont ainsi traversées par le même flux de chaleur; lorsque l'équilibre thermique est établi, les différences de température $t_1 - t_2$ et $t_2 - t_3$ créées par le passage du flux dans la paroi et dans la plaque sont constantes.

Soit Q le flux de chaleur par heure et par m^2 ; λ le coefficient de conductibilité calorifique recherché de la paroi P, et E l'épaisseur de cette paroi :

$$Q = \frac{\lambda (t_1 - t_2)}{E}$$

et

$$Q = \frac{\lambda_0 (t_2 - t_3)}{e}$$

λ_0 étant sensiblement constant, le flux de chaleur Q est sensiblement proportionnel à la différence de températures $t_2 - t_3$.

La mesure de cette différence de températures se fait au moyen de couples thermoélectriques montés en série, dont les soudures sont alternativement disposées sur une face puis sur l'autre face de la plaque auxiliaire.

La force électromotrice mesurée, V , étant elle-même sensiblement proportionnelle à la différence de températures $t_2 - t_3$, on a donc en définitive :

$$Q = A \cdot V$$

et la formule (1) devient :

$$A \cdot V = \frac{\lambda (t_1 - t_2)}{E}$$

D'où :

$$\lambda = \frac{A \cdot V \cdot E}{t_1 - t_2}$$

A , la constante de proportionnalité entre le flux de chaleur par heure et par mètre carré, et la force électromotrice des couples supportés par la plaque auxiliaire est déterminée par un étalonnage préalable.

En pratique, la plaque calorimétrique est limitée; ses dimensions sont aussi réduites que possible, sans que toutefois la région centrale soit influencée par les variations de température existant entre les parties de la paroi recouvertes par la plaque et les parties non recouvertes.

Car il est bien évident que le flux de chaleur traversant la paroi se trouve modifié par l'application de la plaque calorimétrique; mais cette variation de flux est sans importance car elle entraîne une variation correspondante des températures dans la paroi; le coefficient de conductibilité calorifique de la paroi ne saurait en effet être influencé par une cause extérieure à celle-ci.

Pour que les résultats obtenus par ce procédé soient cohérents, il est essentiel que la température et la vitesse de l'air au contact de la face libre de la plaque calo-

rimétrique soient constants. La variation de l'une de ces conditions expérimentales modifierait la répartition des températures intérieures de la plaque et de la paroi; et le nouvel état d'équilibre ne serait peut-être pas encore atteint lorsque les conditions extérieures auraient pu varier de nouveau.

C'est pourquoi il est nécessaire d'isoler les faces de la plaque calorimétrique et de poursuivre les mesures pendant plusieurs jours consécutifs. Ce procédé est utilisé au *Laboratoire d'Essais du C.N.A.M.* pour la détermination du coefficient de conductibilité calorifique de panneaux aux températures supérieures à 400°C.

Le panneau à essayer, de 0,5 m de côté, est placé horizontalement sur une plaque chauffante électrique circulaire, de 0,5 m de diamètre, constituée par un fil résistant enroulé en spires sensiblement circulaires, régulièrement espacées, enrobé dans un disque en ciment réfractaire.

Sur ce panneau, on dispose une plaque isolante carrée de 0,5 m de côté, souple, inextensible, dont la partie centrale supporte des couples thermoélectriques montés en série; les soudures de ces couples sont alternativement situées sur les faces supérieure et inférieure de la plaque, dans un rayon de 0,1 mètre (20 soudures sur chaque face). Cette plaque est elle-même isolée entre deux feuilles d'amiante.

Lorsque le régime thermique est établi, on vérifie que la température de la région centrale de la résistance chauffante est sensiblement uniforme dans un rayon de 0,15 m environ.

Dès lors, on admet que :

1° La région centrale de la plaque chauffante est exempte des perturbations dues aux bords, les parties périphériques de cette plaque jouant le rôle d'anneau de garde de transmission de chaleur.

2° Les régions centrales du panneau et de la plaque calorimétrique sont traversées par le même flux de chaleur, normalement à leurs faces, comme si ce panneau et cette plaque étaient illimités.

Le coefficient de conductibilité calorifique du panneau se déduit de la formule indiquée précédemment :

$$\lambda = \frac{A \cdot V \cdot E}{t_1 - t_2}$$

A constante de la plaque calorimétrique;

V force électromotrice mesurée entre les conducteurs extrêmes des couples supportés par la plaque calorimétrique;

E épaisseur du panneau;

$t_1 - t_2$ écart des températures des deux faces du panneau.

La constante de la plaque calorimétrique utilisée, ou flux de chaleur par heure et par m^2 , créant une force électromotrice de 1 mV, est voisine de 9.

Cette constante est déterminée par un étalonnage préalable au moyen du dispositif utilisé pour la détermination des coefficients de conductibilité calorifique aux températures inférieures à 400°C, décrit précédemment.

Ce procédé est à la fois simple et précis; la sensibilité croît évidemment avec le nombre de couples supportés par la plaque calorimétrique.

Celle-ci permet également de mesurer les pertes de chaleur à travers les parois d'un four, d'une étuve, etc.

(à suivre.)



L. HEYBERGER.

