

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	Bulletin du Laboratoire d'essais mécaniques, physiques, chimiques et de machines du Conservatoire National des Arts et Métiers
Adresse	Paris : Librairie Polytechnique Ch. Béranger, éditeur, 1903-1931
Nombre de volumes	23
Cote	CNAM-BIB P 1329-A
Sujet(s)	Conservatoire national des arts et métiers (France) Génie industriel -- 20e siècle
Notice complète	https://www.sudoc.fr/039047083
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-A
LISTE DES VOLUMES	
	N° 1 - Tome I (1903-1904)
	N° 2 - Tome I (1903-1904)
	N° 3 - Tome I (1903-1904)
	N° 4 - Tome I (1903-1904)
	N° 5 - Tome I (1903-1904)
	N° 6 - Tome I (1905-1906)
	N° 7 - Tome I (1905-1906)
	N° 8 (1906)
	N° 9 (1906)
	N° 10 (1907)
	N° 11 (1907)
	N° 12 (1907)
	N°13 (1908)
	N°14 (1908)
	N°15 (1908)
	N°16 (1911)
	N°17 (1917)
	N°18 (1919)
	N°19 (1919)
	N° 20 (1922)
	N° 21 (1924)
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	N°22 (1927)
	N°23 (1931)

NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ	
Auteur(s) volume	Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Titre	Bulletin du Laboratoire d'essais mécaniques, physiques, chimiques et de machines du Conservatoire National des Arts et Métiers
Volume	<u>N°22 (1927)</u>
Adresse	Paris ; Liège : Librairie Polytechnique Ch. Béranger, éditeur 1927
Collation	1 vol. (22 p.) : fig ; 24 cm
Nombre de vues	28
Cote	CNAM-BIB P 1329-A (22)
Sujet(s)	Conservatoire national des arts et métiers (France) Génie industriel -- 20e siècle
Thématique(s)	Histoire du Cnam
Typologie	Revue
Langue	Français
Date de mise en ligne	10/04/2025
Date de génération du PDF	10/04/2025
Notice complète	https://www.sudoc.fr/039047083
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-A.22

P1329-A

8° Ku 107 (117)

C₄

BULLETIN
DU
LABORATOIRE D'ESSAIS
MÉCANIQUES, PHYSIQUES, CHIMIQUES ET DE MACHINES
DU
CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS

N° 22

SUR LES PROCÉDÉS DE MESURE
DU COEFFICIENT
DE CONDUCTIBILITÉ CALORIFIQUE
DES MATÉRIAUX PEU CONDUCTEURS
DE LA CHALEUR

PAR

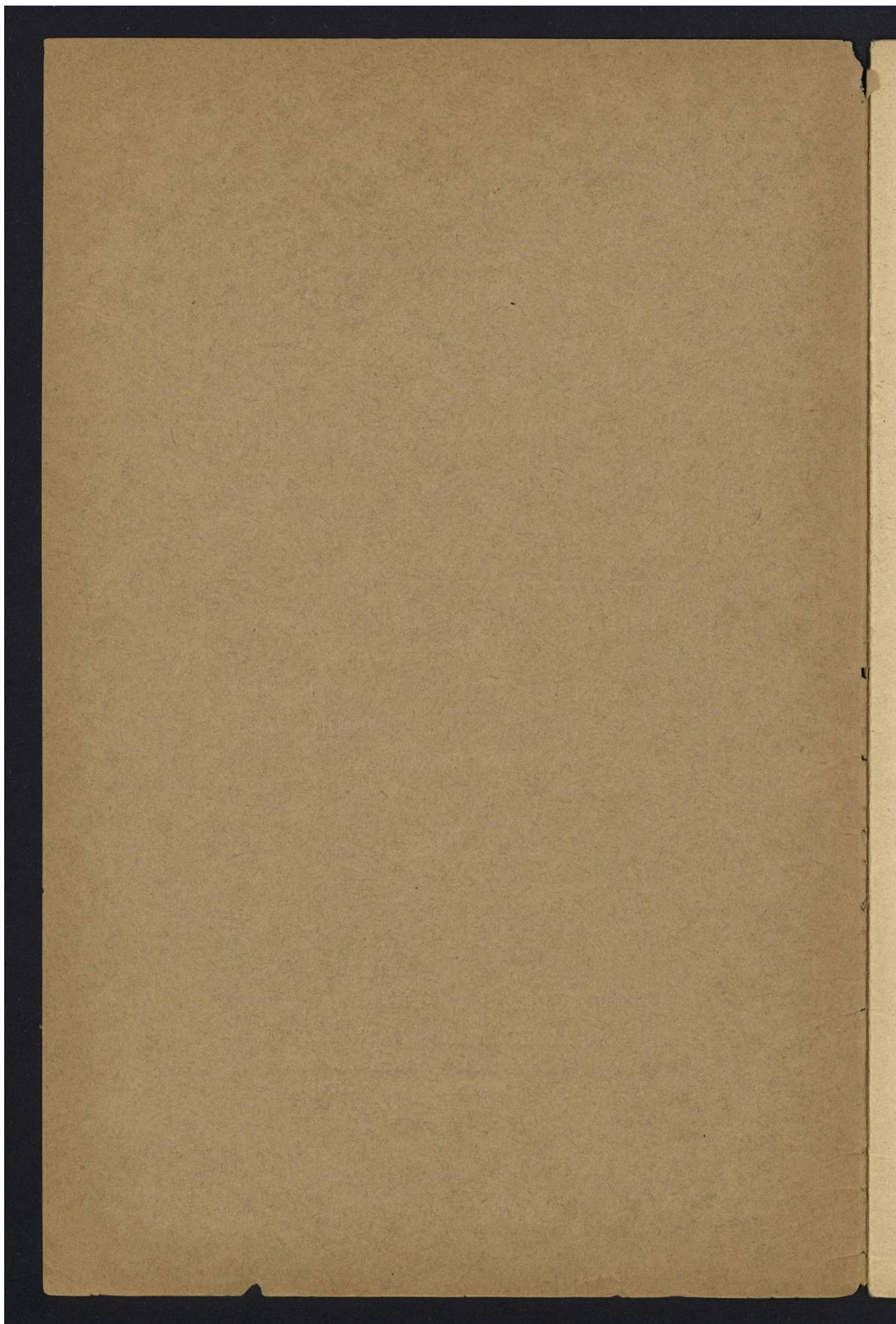
M. HEYBERGER

Assistant au Laboratoire d'Essais

PARIS ET LIÈGE
LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE CH. BÉRANGER
PARIS, 15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15
LIÈGE, 1, QUAI DE LA GRANDE-BRETAGNE, 1

1927

Tous droits réservés



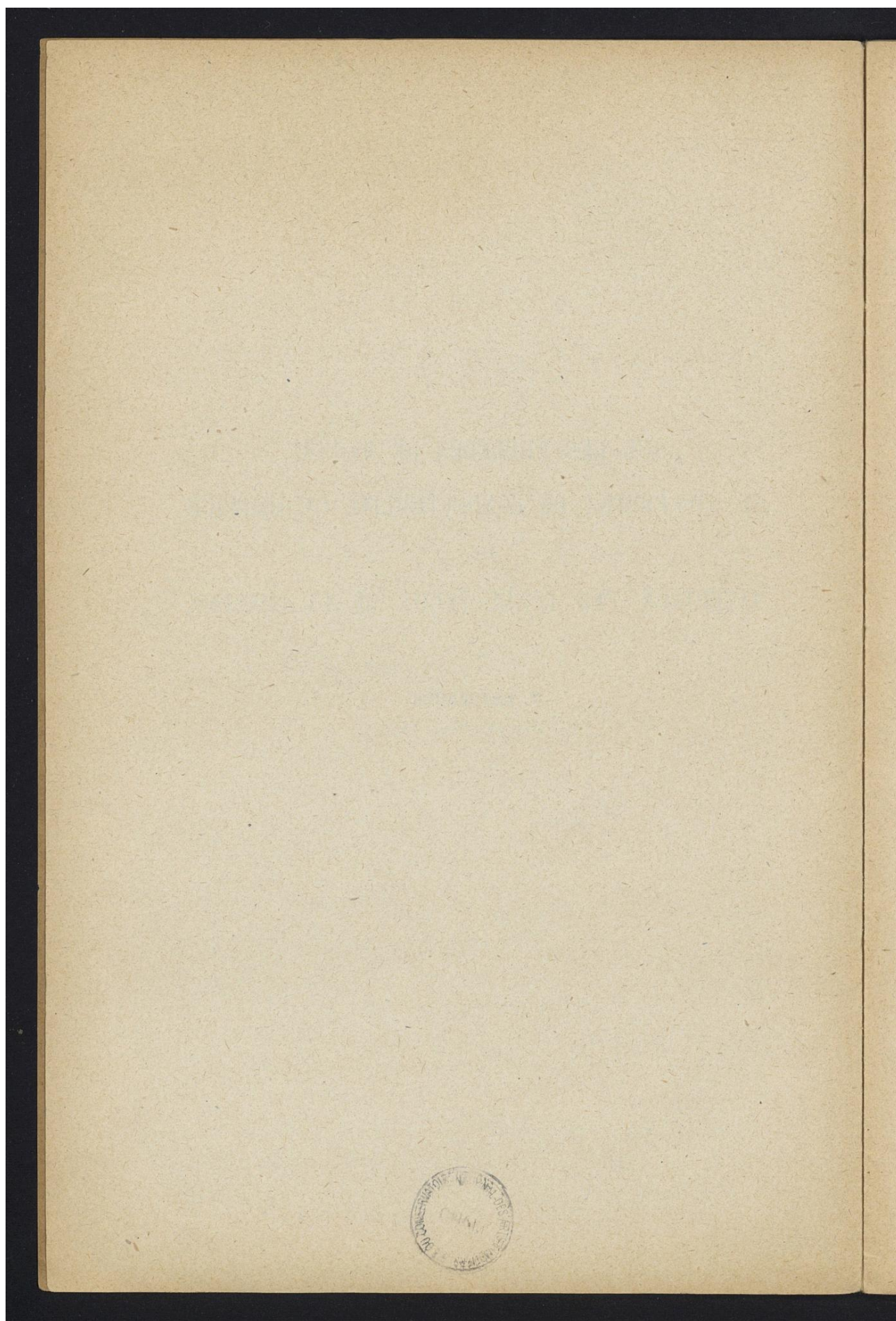
80 Ku 107 (117)

SUR LES PROCÉDÉS DE MESURE
DU COEFFICIENT DE CONDUCTIBILITÉ CALORIFIQUE
DES
MATÉRIAUX PEU CONDUCTEURS DE LA CHALEUR

PAR

M. HEYBERGER

Assistant au Laboratoire d'Essais



SUR LES PROCÉDÉS DE MESURE
DU COEFFICIENT DE CONDUCTIBILITÉ CALORIFIQUE
DES
MATÉRIAUX PEU CONDUCTEURS DE LA CHALEUR

PAR

M. HEYBERGER

Assistant au Laboratoire d'Essais

La connaissance du coefficient de conductibilité calorifique des matériaux présente un intérêt considérable pour les constructeurs et usagers d'appareils utilisés aux températures élevées (conduites de vapeur, fours, cornues, etc.) et aux basses températures (chambres froides principalement), puisqu'elle leur permet de calculer les pertes de calories ou de frigories à travers les parois de ces appareils. Aussi de nombreuses expériences ont-elles été effectuées en vue de déterminer ce coefficient.

Nous allons examiner quelques procédés de mesure du coefficient de conductibilité calorifique des matériaux isolants et peu conducteurs ayant la forme d'un mur.

Auparavant, définissons ce coefficient.

I. — DÉFINITION DU COEFFICIENT DE CONDUCTIBILITÉ CALORIFIQUE

Considérons (fig. 1) un mur homogène, solide, d'épaisseur e , dont les faces AB, CD sont parallèles, indéfinies et maintenues à des températures constantes, l'une T_1 , l'autre T_2 ($T_1 > T_2$).

Le Laboratoire d'Essais ne prend pas la responsabilité des opinions scientifiques ou techniques soutenues par ses collaborateurs.

Menons un plan MN parallèle aux faces AB et CD.

On peut admettre comme évident que tous les points de ce plan sont à une même température T , car rien ne les distingue les uns des autres.

A un moment donné, le mur atteindra un état d'équilibre thermique : la température des différents points sera stationnaire. A ce moment la quantité de

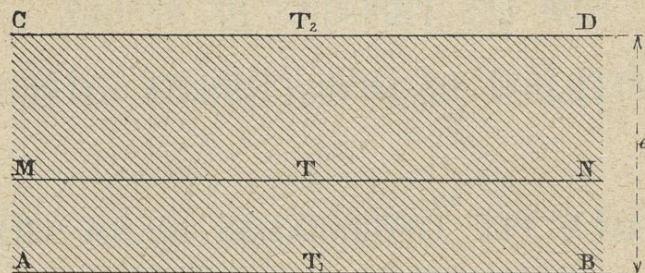


Fig. 1.

chaleur qui traversera pendant l'unité de temps l'unité de surface d'un plan quelconque MN sera indépendante de la distance de MN à AB; car, s'il n'en était pas ainsi, en décomposant le mur en tranches parallèles, l'une d'elles recevrait plus de chaleur de la tranche précédente qu'elle n'en cède à la suivante et alors elle s'échaufferait, ou bien encore elle céderait plus de chaleur à la tranche suivante qu'elle n'en a reçu de la précédente et alors elle se refroidirait. Ainsi, la

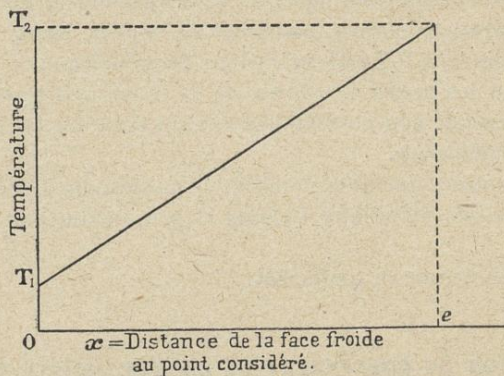


Fig. 2. — Courbe des températures à l'intérieur du mur.

quantité de chaleur q qui, pendant l'unité de temps, traversera l'unité de surface d'un plan quelconque MN sera constante.

On démontre facilement que, pour qu'il en soit ainsi, il faut :

1° Que les températures des plans MN décroissent de AB à CD suivant une

progression arithmétique dont la raison est $\frac{T_1 - T_2}{e}$, autrement dit que la répartition des températures dans le mur puisse être représentée par une ligne droite réunissant les 2 températures des 2 faces (fig. 2) ;

2° Que q soit proportionnelle à la différence des températures des 2 faces du mur $T_1 - T_2$, et inversement proportionnelle à l'épaisseur e du mur :

$$q = k \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{e}.$$

Dans le cas particulier où $T_1 - T_2$ serait égal à 1° C., et e à l'unité de longueur, on aurait

$$q = k.$$

Ce coefficient k est appelé *coefficient de conductibilité calorifique intérieur* de la substance considérée : c'est la quantité de chaleur qui, pendant l'unité de temps, traverserait un mur d'épaisseur égale à l'unité de longueur, de surface égale à l'unité de surface, pour une différence de températures des 2 faces égale à 1° C.

La quantité de chaleur Q transmise à travers une surface S , parallèle aux faces maintenues à des températures T_1 et T_2 , pendant 1 temps, τ serait :

$$Q = \frac{k \cdot S \cdot (T_1 - T_2) \tau}{e}.$$

D'où la formule générale :

$$k = \frac{Qe}{S \cdot \tau \cdot (T_1 - T_2)}.$$

Il est donc nécessaire, pour déterminer k , de mesurer les éléments suivants : Q , e , S , τ , T_1 et T_2 .

Systèmes d'unités adoptés.

2 systèmes d'unités ont été adoptés : le système C. G. S. et un système d'unités pratiques qui pourrait être appelé système des ingénieurs.

1° *Système C. G. S.*

Dans ce système, Q est exprimé en calories-grammes,

e en centimètres,

S en centimètres carrés,

τ en secondes,

T_1 et T_2 en degrés centigrades.

k est donc la quantité de chaleur en calories-grammes qui, pendant 1 seconde, traverse une surface de 1 centimètre carré, à l'intérieur d'un mur de 1 centimètre d'épaisseur dont les 2 faces sont maintenues à des températures différant de 1° C.

2^o *Système des ingénieurs.*

Dans ce système, Q s'exprime en calories-kilogrammes,

e en mètres,

S en mètres carrés,

τ en heures,

T_1 et T_2 en degrés centigrades.

k est donc la quantité de chaleur en calories-kilogrammes, qui, pendant 1 heure, traverse un mur de 1 mètre carré de section, de 1 mètre d'épaisseur, pour une différence de températures des 2 faces de 1° C.

Les résultats obtenus dans ce deuxième système sont plus simples que dans le premier. Aussi emploierons-nous ce deuxième système dans la suite de cet exposé.

Le nombre qui exprime la mesure du coefficient de conductibilité calorifique d'une substance déterminée, dans le système des ingénieurs, est 360 fois plus grand que dans le système C. G. S.

II. — PROCÉDÉS DE MESURE DU COEFFICIENT DE CONDUCTIBILITÉ CALORIFIQUE DES MATÉRIAUX PEU ET MAUVAIS CONDUCTEURS DE LA CHALEUR, AFFECTANT LA FORME D'UN MUR

A) PÉCLET a exposé dans les *Annales de chimie et de physique*, en 1841, un procédé de mesure du coefficient de conductibilité calorifique d'une plaque homogène.

Il se servait d'un tube cylindrique dont les parois latérales, peu conductrices, étaient calorifugées avec du coton cardé et dont le fond était constitué par un disque de la substance à étudier. Ce récipient contenait un poids P d'eau à la température t .

Sur le fond de ce calorimètre il faisait arriver de la vapeur d'eau à T^0 .

Le disque ayant ses 2 faces en contact d'une part avec la vapeur d'eau à T^0 et d'autre part avec de l'eau à t^0 , était traversé par un flux de chaleur qui échauffait l'eau du calorimètre de t à t' pendant un temps τ .

La quantité de chaleur transmise à travers le disque était donc :

$$Q = P (t' - t). \quad (1)$$

Si t' diffère peu de t , on peut admettre que l'eau du tube conserve pendant toute la durée de l'expérience une température moyenne $\frac{t + t'}{2}$ et que, par conséquent, pendant cette expérience, les 2 faces du disque sont maintenues aux températures constantes T et $\frac{t + t'}{2}$.

La quantité de chaleur transmise à travers le disque est donc :

$$Q = \frac{k \left(T - \frac{t + t'}{2} \right) \cdot S \cdot \tau}{e} \quad (2)$$

En égalant les expressions (1) et (2) on obtient une équation qui détermine k . En théorie c'est parfait. Mais en fait, les résultats furent entachés d'erreurs considérables par la couche d'eau condensée qui couvrait le fond du disque.

Pour éviter cet inconvénient, Péclet plongea le disque qui fermait le cylindre dans de l'eau à T^0 ; l'expérience montra que les variations de la température de l'eau du tube étaient sensiblement indépendantes de l'épaisseur du disque et de sa nature, ce qui prouve que la formule (2) n'était pas applicable. Cela tient à ce que les couches d'eau en contact avec les 2 faces du disque prennent une température intermédiaire entre celles de l'enceinte et de la face du disque. Tout se passe comme si on avait un système mixte composé d'un disque solide compris entre 2 couches d'eau. La conductibilité des substances essayées par Péclet étant beaucoup plus grandes que celle de l'eau, la conductibilité de l'ensemble restait à peu près invariable quelles que soient l'épaisseur et la nature du disque essayé.

Ayant reconnu cette grave cause d'erreur, Péclet chercha à y remédier en renouvelant l'eau en contact avec les faces du disque au moyen d'un agitateur. Alors les quantités de chaleur transmises parurent varier sensiblement en raison inverse des épaisseurs des disques.

Néanmoins l'influence perturbatrice des couches d'eau en contact avec les faces du disque ne fut probablement pas complètement éliminée car les résultats indiqués par Péclet sont beaucoup plus faibles que les résultats fournis par des expériences plus récentes et plus précises.

Voici quelques-uns des résultats indiqués par Péclet :

Briques réfractaires.	$k = 0,6$ (système des Ingénieurs).
Porcelaine.	$k = 0,86$
Terre cuite.	$k = 0,83$

B) On peut rapprocher de ces expériences celles qu'avait publiées FOURIER en 1828 dans les *Annales de chimie et de physique*.

Fourier se servait d'un entonnoir rempli de mercure, fermé à sa base par une peau de chamois (fig. 3). Il plaçait cet appareil sur une caisse remplie de vapeur d'eau à T^0 ; la température du mercure devenait stationnaire, lorsque la chaleur transmise à travers la peau de chamois était égale à celle perdue par rayonnement.

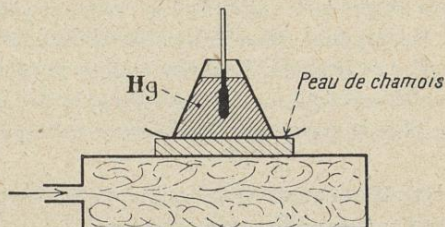


Fig. 3.

Il interposait ensuite entre cet appareil et la caisse une lame de la substance qu'il voulait étudier; le thermomètre se fixait à une température t' inférieure à la précédente t .

Admettant que la température du mercure est uniforme lorsque le thermomètre est stationnaire, il obtenait 2 équations d'où il tirait le coefficient de conductibilité calorifique de la lame expérimentée.

Mais il est évident que la couche de mercure en contact avec la peau de chamois n'étant pas incessamment renouvelée la méthode de Fourier est entachée des mêmes erreurs que celle de Péclet.

Sans doute, les expériences de Fourier et de Péclet ne présentent plus qu'un intérêt historique, mais elles eurent le mérite de poser de façon précise le problème de la conductibilité calorifique et de montrer les écueils à éviter.

C) MÉTHODE DE EUCHÈNE. — Les matières étudiées par Péclet ont été portées à des températures ne dépassant guère 35° . Les lois de variation du coefficient

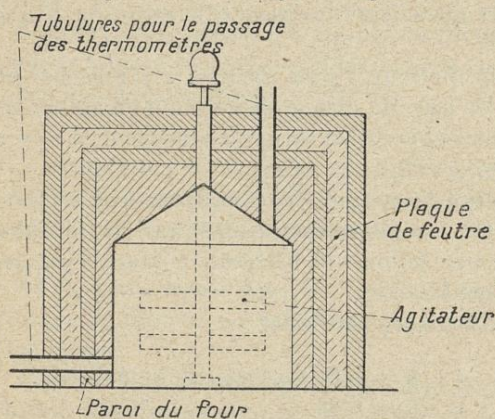


Fig. 4. — Calorimètre de Eugène.

de conductibilité en fonction de la température n'étant pas nettement établies, il était donc essentiel de reprendre ces expériences dans les conditions d'utilisation des substances.

C'est ce que fit Eugène au cours de ses recherches sur la détermination des pertes de chaleur à travers les maçonneries des fours à gaz (Communication de M. Eugène au Congrès international de l'industrie du gaz en 1900).

Il appliquait (fig. 4) sur la

paroi d'un four un calorimètre muni d'un agitateur et calorifugé au moyen de plaques de feutre.

L'eau du calorimètre, continuellement agitée, s'échauffait régulièrement, ce qui permettait d'admettre la constance du passage de la chaleur.

Il était donc possible de calculer le coefficient de conductibilité de la paroi.

Par ce procédé, Eugène trouva pour une paroi en briques réfractaires un coefficient égal à 1,43 et à 1,39 pour des différences de températures de 700° et de 865° environ entre les faces de cette paroi.

D) MÉTHODE DE WOLOGDINE. — M. Wologdine a perfectionné la méthode de Eugène en utilisant un calorimètre à circulation d'eau.

Il a présenté à la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale (*Bulletin*, mai 1909) les résultats de ses expériences de détermination de conductibilité calorifique de matériaux réfractaires.

Dispositif expérimental (fig. 5).

a) La plaque étudiée, placée sur un four à gaz, était directement soumise à l'action de la flamme. 3 couples thermoélectriques en platine-platine rhodié

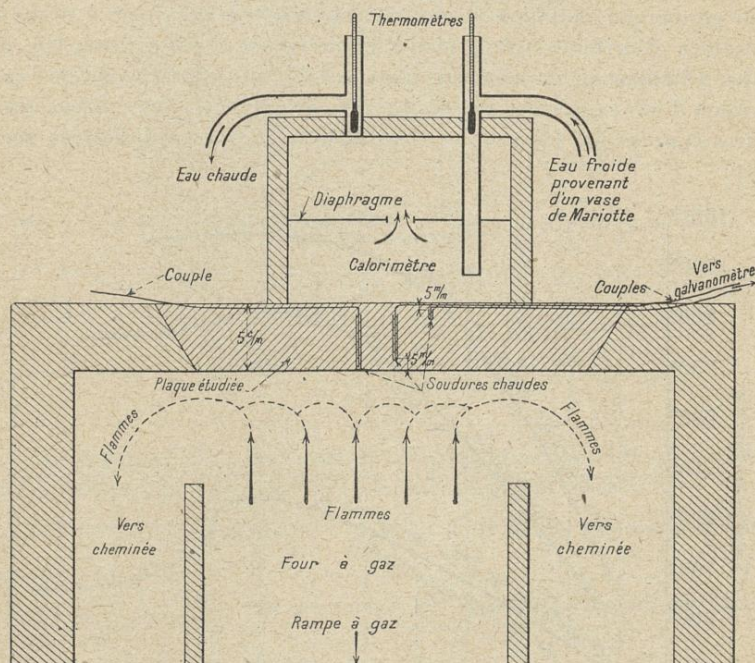


Fig. 5. — Dispositif de M. Wologdine.

étaient disposés dans 3 rainures verticales équidistantes du centre de la plaque : les soudures chaudes des deux premiers couples étaient à l'intérieur de la plaque, l'une à 5 millimètres de la face inférieure, l'autre à 5 millimètres de la face supérieure; le troisième couple donnait la température à l'intérieur du four, immédiatement sous la plaque.

b) Le calorimètre à circulation d'eau, placé sur la face supérieure de la plaque étudiée, était alimenté par un vase de Mariotte; la vitesse d'écoulement de l'eau était donc constante; un diaphragme, percé en son centre d'une ouverture, permettait de réaliser un mélange intime des courants d'eau.

Dans les orifices d'entrée et de sortie de l'eau étaient disposés des thermomètres à mercure.

Marche d'une expérience.

Le four était allumé sans que le calorimètre soit placé sur la plaque.

Lorsque les températures t_1 , t_2 , t_3 indiquées par les couples 1, 2, 3 étaient stationnaires, l'équilibre était établi entre la chaleur fournie par le four et la chaleur perdue par radiation et par contact avec l'air extérieur; à ce moment, on plaçait le calorimètre sur la plaque et on faisait circuler l'eau. Un nouvel équilibre s'établissait; on mesurait alors le débit et l'échauffement de l'eau.

Au cours d'une expérience sur des briques de magnésie, les courbes des températures données par les couples thermoélectriques, avaient l'allure suivante (fig. 6) :

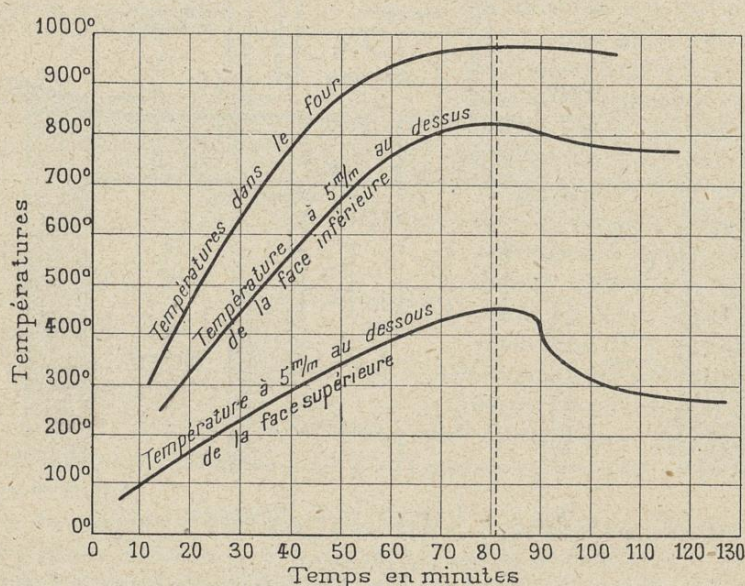


Fig. 6.

Calcul du coefficient de conductibilité.

L'auteur admettait que la courbe des températures, à l'intérieur de la plaque étudiée, en fonction des distances verticales de la face inférieure est une ligne droite. Il prolongeait donc la ligne droite qui réunit les températures à 5 millimètres de chaque face pour obtenir les températures de chaque face (fig. 7).

Ainsi, dans une expérience sur des briques de magnésie, la température, à 5 millimètres de la face inférieure d'une brique de magnésie était 807°C et, à 5 millimètres de la face supérieure, 265°C .

La construction donne les températures suivantes : face inférieure t_1 840° C ; face supérieure t_2 200° C.

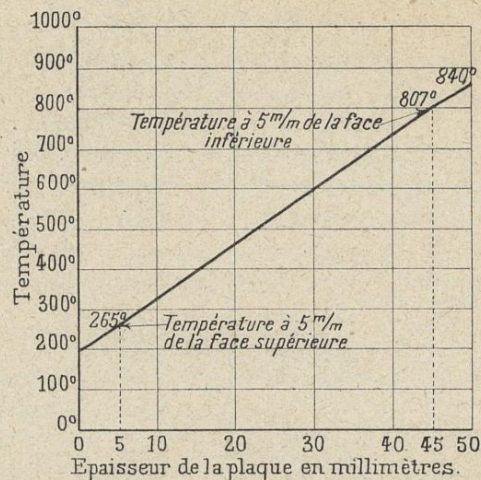


Fig. 7.

1,020 kilogramme d'eau traversait le calorimètre en 1 minute et s'échauffait de 6°4 C (température à l'entrée 14°9 ; température à la sortie 21°3).

Remplaçant dans la formule $k = \frac{Q \cdot e}{S(t_1 - t_2)}$ les lettres par leurs valeurs, on obtient :

$$Q = 1,020 \times 60 \times 6,4 \text{ (en une heure)} = 391,68 \text{ calories-kilogrammes.}$$

$$e = 0 \text{ m. } 05.$$

$$S = 0 \text{ m}^2 \text{ } 012568 \text{ (surface du fond du calorimètre).}$$

$$t_1 - t_2 = 840^\circ - 200^\circ = 640^\circ.$$

D'où :

$$k = \frac{391,68 \times 0,05}{0,012568 \times 640} = 2,43$$

$$k = 2,43$$

E) MM. DOUGILL, HODSMAN et COLB ont étudié, dans ces derniers temps la conductibilité de briques en terre réfractaire, en silice et en magnésie avec un appareil assez semblable à celui de Wologdine.

Mais la chaleur transmise à travers le panneau était utilisée à vaporiser l'eau contenue dans un calorimètre de 6 centimètres de long, de 5 centimètres de large et de 6 centimètres de haut.

La vapeur d'eau provenant du calorimètre traversait un condenseur et l'eau condensée était recueillie dans une éprouvette jaugée.

La vitesse normale d'évaporation était d'environ 3 centimètres cubes par minute.

Résultats obtenus par M. Wologdine.

Matériaux étudiés	Intervalle de chauffage (Température de la face inférieure)	Coefficient moyen de conductibilité k (Unités : heure, mètre, calorie, kilogramme et degr. centigr.)	Observations
Briques en terre réfractaire, cuites à 1050°	1095°-1220°	1,260	Le coefficient k augmente avec la température de cuisson.
Briques en terre réfractaire (les mêmes mais cuites à 1300°)	620°-1085°	1,512	
Pâte à carreaux	563°-1005°	1,224	L'augmentation de k avec la température de cuisson n'a pu être nettement vérifiée. La conductibilité de briques cuites à 1300° est 1,5 fois plus grande que celle des briques cuites à 1050°.
Pâte à cornues	685°-1120°	1,368	
Briques en bauxite	1120°-1140°	1,116	
Briques en silice	735°-1015°	1,116	Briques non cuites.
Briques en magnésie blanche pure	530°- 915°	2,34	
Briques en magnésie moins pure que les précédentes.	675°- 970°	2,556	Cuites à 1200°.
Briques en magnésie et terre rouge de Vallauris	485°-905°	1,278	
Briques en pâte à creuset de verrerie	565°	0,900	Cuisson prolongée à 1600°.
Briques en pâte à creuset de verrerie	640°-1035°	0,882	
Briques en pâte à creuset de verrerie	615°- 990°	1,620	CONCLUSION : la cuisson à haute températ. augmente la conductibilité.
Briques en carborundum	555°-1000°	5,04	
Briques en plombagine	485°- 705°	9,00	L'auteur a constaté que k augmente avec la teneur en carborundum et avec la température de cuisson. Chauffées à la flamme réductrice.
Briques en fer chromé agglomérées par quantités considérables de matières argileuses	805°-1180°	1,224	
Briques en fer chromé contenant peu de matières étrangères et peu compactes	675°-1125°	0,08	L'auteur a constaté que k est constant pour toutes températures pour fer chromé pur.
Kieselguhr	630°- 910°	0,648	

De la quantité d'eau condensée q en litres en 1 heure, lorsque le régime est établi, on déduit facilement la quantité Q de chaleur correspondante en grandes calories.

$$Q = 537 \cdot q.$$

(en admettant que la chaleur de vaporisation de l'eau est 537).

Les auteurs reconnurent l'utilité d'entourer le calorimètre d'une enveloppe isolante, feuille de caoutchouc par exemple.

Voici quelques résultats obtenus avec cet appareil :

	Températures	k
<i>Briques en terre réfractaire cuites à 1330° C.</i>		
(66 0/0 SiO ₂ ; 31 0/0 Al ₂ O ₃ ; 1 0/0 Fe ₂ O ₃ ; 1 0/0 Alk)	600° 1000°	1,40 1,46
<i>Briques siliceuses</i>		
(95 0/0 SiO ₂ ; 2 0/0 Al ₂ O ₃ ; 1,1 0/0 Fe ₂ O ₃ ; 1,5 0/0 CaO)	de 400° à 1.200°	1,29
<i>Briques de magnésie</i>		
92 0/0 MgO ; 5 0/0 SiO ₂ ; 1,6 0/0 Fe ₂ O ₃ ; 1,7 0/0 CaO)	320°- 560° 700°-1400°	5,44 3,28

L'examen de ce tableau nous montre que la conductibilité calorifique des briques de magnésie diminue nettement lorsque la température s'élève.

Remarques. — La formule de définition du coefficient de conductibilité, établie au début, ne peut être appliquée qu'à un mur indéfini, dont les 2 faces sont maintenues à des températures constantes : dans ce cas les surfaces isothermiques sont planes, parallèles, et les lignes d'émission de la chaleur sont perpendiculaires aux faces.

Or, dans les méthodes précédentes, la face froide du panneau présente 2 régions à des températures différentes : a) la région recouverte par le calorimètre et la région périphérique calorifugée. Au voisinage des bords du calorimètre, les lignes d'émission de la chaleur ne sont plus perpendiculaires aux faces et la formule générale ne peut être appliquée rigoureusement.

Pour éviter les perturbations dues aux bords, il est nécessaire d'isoler la région centrale au moyen d'un anneau de garde.

Ce principe a été adopté dans les méthodes suivantes :

F) MÉTHODE DE M. Biquard. — M. Biquard, ancien Chef de la Section de Physique du Laboratoire d'Essais du Conservatoire national des Arts et Métiers, dans une note en date du 31 janvier 1910 (*C. R. des séances de l'Académie des Sciences*, 44,829) expose une méthode de détermination de la

chaleur transmise à travers des plaques de matières peu conductrices. Cette méthode est en usage au Laboratoire d'Essais.

a) *Dispositif expérimental* (fig. 8). — Le corps étudié est placé sur une étuve métallique plate A, B, C, D, dans laquelle circule un courant d'eau maintenue à température constante d'une part, et, d'autre part, un système de 2 cuves carrées concentriques remplies de glace. Les fonds de ces 2 cuves et le plafond de l'étuve sont en cuivre rouge épais.

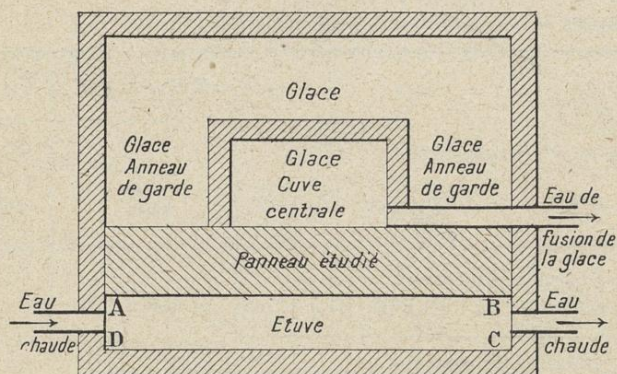


Fig. 8. — Dispositif de M. Biquard.

Des couples cuivre-constantan sont disposés horizontalement contre la face inférieure du panneau.

Tout l'appareil est protégé contre la fusion de la glace extérieure au contact de l'air ambiant par d'épais matelas de liège.

L'auteur admet que, lorsque le régime est établi, c'est-à-dire lorsque l'écoulement de l'eau de fusion de la glace est constant, la transmission de la chaleur, dans la région correspondant à la base de la surface centrale, est exempte des perturbations dues aux bords et se fait au travers des surfaces isothermiques planes et parallèles; la connaissance de la quantité d'eau de fusion de la glace provenant de la cuve centrale pendant l'unité de temps, de la surface du fond de cette cuve, de l'épaisseur du panneau et de l'intervalle de température $t_1 - t_2$ des 2 faces, permet de calculer le coefficient de conductibilité calorifique par la formule :

$$k = \frac{79,3 Qe}{S(t_1 - t_2)}$$

(chaleur latente de fusion de la glace : 79,3 calories par kilogramme).

Dans cette même note, M. Biquard indique que, pour déterminer des coefficients de conductibilité dans des intervalles dépassant 100°. Il est nécessaire de remplacer l'étuve à eau par une plaque chauffée électriquement, surmontée d'une plaque épaisse de cuivre destinée à uniformiser la température.

b) *Résultats*. — Les résultats suivants ont été obtenus avec cet appareil.

Désignation des matières	Intervalle de température t_1-t_2 en degrés centigrades	Coefficient de conductibilité moyen (m ² , heure, grande calorie, degré C)
Liège aggloméré	49°33	0,038
Panneau de silice (kieselguhr)	48°	0,055
Panneau caoutchouc	59°	0,036
Panneau de briques isolantes	41°	0,215
Plaques de tôles métalliques enduites de ma- tières isolantes.	35°	0,270
Panneau d'ondulium aggloméré au brai	36°	0,117
Panneau de solomite	30°	0,067
Panneau à face inférieure et supérieure en fibro-ciment	42°	0,335
Panneau de carreaux de porcelaine sur mor- tier ciment	25°	0,687
Panneau en briques rouges repressées join- toyées par un mortier composé de sable de Seine et de chaux hydraulique	26°3	0,725
Panneau en briques jaunes	23°	0,882
Panneau en briques blanches silico-calcaires, jointoyées	24°1	0,895
Diatomées pulvérulentes	38°5	0,075
Briques silico-ardoises	23°6	0,795
Briques rouges d'argile	28°5	0,966
Panneau constitué d'un mélange de poudre d'ardoise et de chaux hydraulique	25°	0,614
Panneau bois	40°	0,060
Panneau en ébonite mousse	40°	0,100
Un autre panneau en ébonite mousse	46°	0,042
Terre floconneuse	39°	0,055
Briques légères perforées	34°	0,166
Ebonite	48°5	0,031
Amiante blanche en fibres (57 kgs par m ³)	—	0,054
Amiante ondulée (carton) (Ondulium 260 kgs par m ³)	—	0,072
Amiante comprimée (1.240 kgs par m ³)	—	0,220
Kapok de Java (15,7 kgs par m ³)	—	0,034
Air sec, en repos :		
Pour très petites épaisseurs	—	0,02
Pour épaisseurs de 20 mm.	—	0,04
Pour épaisseurs de 40 à 140 mm.	—	0,07
Air en mouvement	—	0,115

G) RANDOLPH a étudié en 1912, la conductibilité des matériaux isolants tels que l'amiante, la laine minérale, la terre d'infusoires, le coton en utilisant un calorimètre à circulation d'eau entouré d'un anneau de garde.

Le panneau à essayer, dont l'épaisseur variait de 1 à 5 centimètres, était placé entre une plaque métallique, chauffée aussi régulièrement que possible au moyen de résistances électriques et, d'autre part, le calorimètre.

La quantité de chaleur transmise à travers le panneau pendant un temps déterminé se déduisait de la quantité d'eau ayant traversé le calorimètre pendant ce temps et de l'échauffement de l'eau.

La température de l'eau du calorimètre différait peu de la température ambiante; celle de la plaque chaude était comprise entre 100° et 600° C.



L'auteur signale que l'écart de température dans le calorimètre et dans l'anneau de garde était inférieur à $1/10$ de degré C.

Remarque. — L'emploi d'un calorimètre à circulation d'eau ne convient pas pour l'étude des mauvais conducteurs de la chaleur, car l'élévation de température de l'eau est très faible. C'est pour cette raison que les valeurs trouvées par Randolph sont en général faibles : c'est ainsi qu'il indique pour coefficient de conductibilité calorifique de la laine de densité 0,192 un coefficient sensiblement égal à celui de l'air sec non agité en petite épaisseur : $k = 0,02$ environ.

Voici quelques autres résultats indiqués par Randolph :

Substances	Températures en degrés C.	K unités pratiques	Dates
<i>Amiante</i>	500°	de 0,059 à 0,076	1912
<i>Edredon</i>	100°	0,0396	1912
<i>Kieselguhr</i>	100°	0,089	1912
<i>Bois</i> (sans spécification).			
— a) densité 0,02	100°	0,0396	1912
— b) densité 0,2	100°	0,019	

H) BOYD-DUDLEY a employé en 1915, le même procédé pour mesurer les quantités de chaleur transmises à travers des parois planes en briques de silice, de magnésie et d'argile.

Il appliquait un calorimètre à circulation d'eau pourvu d'un anneau de garde sur la paroi d'un four chauffé au coke.

La répartition des températures était mesurée au moyen de couples thermo-électriques disposés à différentes profondeurs dans des trous percés à cet effet.

Une période de 8 à 9 heures après l'allumage était admise pour l'établissement du régime.

Avec ce dispositif Boyd-Dudley trouva que la conductibilité des briques de magnésie est à peu près constante entre 435° et 830° C, ce qui est contraire aux résultats de Dougill, Hodsman et Cobb.

Voici quelques autres résultats indiqués par l'auteur.

Briques en terre réfractaire	Température	k	Dates
53 0/0 SiO ₂ ; 43 0/0 Al ₂ O ₃ ; 2 0/0 Fe ₂ O ₃ ; 4,5 Alk.	100° 1000°	0,61 1,22	1915
<i>Briques siliceuses</i>			
96 0/0 SiO ₂ ; 0,9 0/0 Al ₂ O ₃	100°	0,79	1915
0,8 0/0 Fe ₂ O ₃ ; 4,8 0/0 CaO	1000°	0,45	
<i>Briques magnésie</i>			
86,5 0/0 MgO; 2,5 0/0 SiO ₂	450°	4,86	1915
7 0/0 Fe ₂ O ₃ ; 2,7 0/0 CaO	830°		

Observation. — La disposition des couples présente un inconvénient : les fils étant perpendiculaires aux surfaces isothermiques peuvent refroidir les soudures chaudes par conduction et vicier les lectures (le procédé de Wologdine présente le même inconvénient, les couples étant disposés de la même façon).

I) MÉTHODE DE GRIFFITHS. — L'application des méthodes précédentes présente des difficultés lorsque les parois des panneaux expérimentés ne sont pas planes

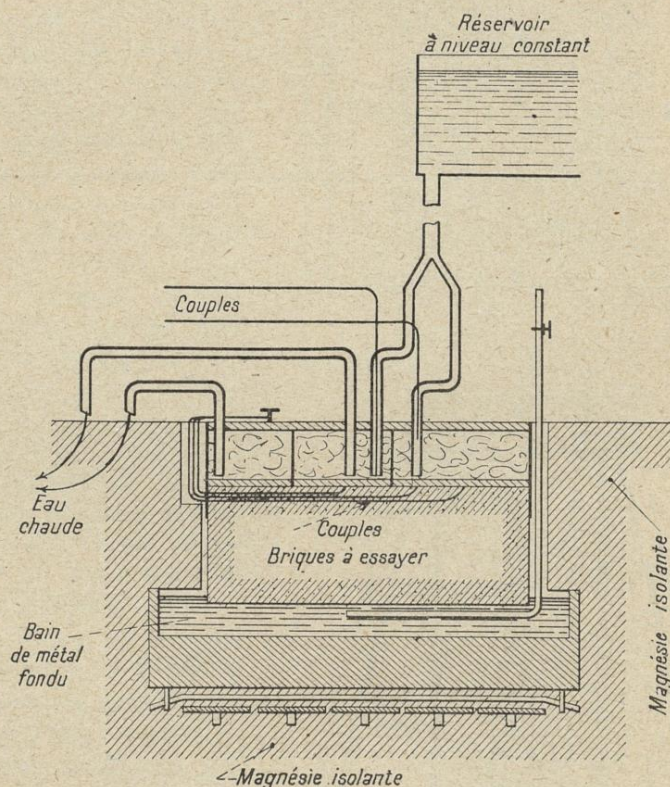


Fig. 9. — Dispositif de M. Griffiths.

ou régulières; la présence de couches d'air entre ces parois et les plaques chaudes et froides peut entacher les résultats d'erreurs grossières.

Pour surmonter ces difficultés, M. Griffiths a imaginé le dispositif suivant (fig. 9) : une face du panneau expérimenté est immergée dans un bain de métal fondu (étain par exemple); la chaleur qui traverse le panneau est transmise à un calorimètre à circulation d'eau, pourvu d'un anneau de garde, cimenté sur l'autre face. L'anneau de garde et le calorimètre sont séparés par un intervalle rempli de feuilles de mica; ils sont alimentés par un réservoir à niveau constant afin que le débit soit lui-même constant.

J) MÉTHODE DU NATIONAL-PHYSICAL-LABORATORY (fig. 10 et 11). — Dans toutes les méthodes précédentes, on mesure la quantité de chaleur sortant de la face

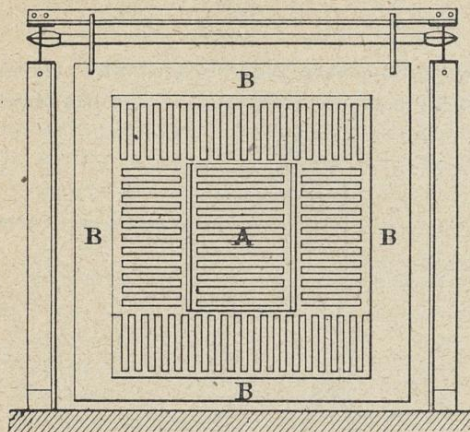


Fig. 10

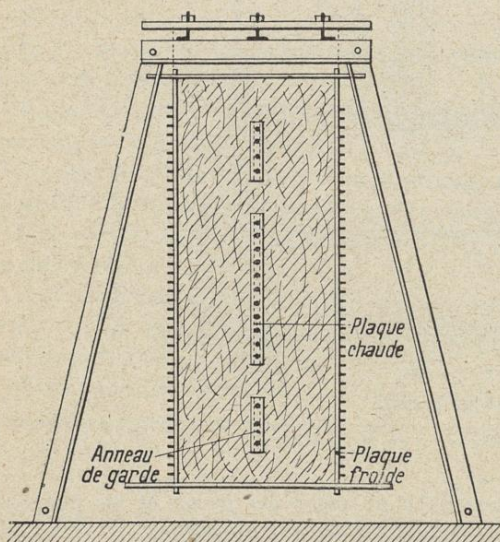


Fig. 11.

Fig. 10 et 11. — Dispositif du Laboratoire National de Physique.

centrale de la plaque chaude et on calcule l'énergie calorifique équivalente. Cette énergie traverse les 2 murs en quantités sensiblement égales.

froide du mur ; le National-Physical-Laboratory a mesuré la quantité de chaleur qui pénètre dans le mur.

Une plaque chauffée électriquement est disposée « en sandwich » entre 2 murs rigoureusement identiques constitués par la substance étudiée. Elle est formée de fils conducteurs isolés et placés entre deux plaques métalliques (aluminium ou cuivre) ; elle comporte 2 régions : une région centrale, carrée de 1 mètre de côté environ et une région périphérique de 33 centimètres de largeur, constituant un anneau de garde. Ces 2 régions sont séparées par un joint d'air et sont chauffées séparément, de telle façon que leur température soit la même (à 1/100 de degré C près dit l'auteur).

La face extérieure de chaque mur est en contact avec une plaque de fer maintenue à une température constante comprise entre $+15^{\circ}\text{C}$ et -25°C par circulation d'eau ou de saumure.

Les températures sont mesurées au moyen de couples thermoélectriques disposés dans des rainures sur la plaque chaude et sur la plaque froide.

On mesure l'énergie électrique fournie à la région

Avec cet appareil, on a pu essayer des panneaux de matières calorifuges dans des conditions correspondant exactement aux conditions d'utilisation dans les chambres froides.

Voici quelques résultats indiqués par ce laboratoire.

Substances	Températures	K (Unités pratiques)	Dates
Charbon de bois (sec)	0	0,047	1920
Liège (fin granulé)	0	0,037	id.
Liège en plaque	0	0,04	id.
— aggloméré au brai	0	0,07	id.
Terre d'infusoires	0	0,037	id.
Briques en diatomites	106°		

K) MÉTHODE ACTUELLE DU LABORATOIRE D'ESSAIS POUR L'ÉTUDE DE LA CONDUCTIBILITÉ DES CORPS PEU CONDUCTEURS, AUX TEMPÉRATURES ÉLEVÉES. — Le dispositif (fig. 12) permet de mesurer avec certitude la quantité de chaleur transmise à travers un corps de forme plane. Comme dans le procédé de Dougill, Hodsman et Cobb, la chaleur sortant de la face froide est utilisée à vaporiser l'eau contenue dans un calorimètre.

Dispositif expérimental.

a) Le calorimètre est constitué par deux cuves cylindriques concentriques, remplies d'eau distillée, portant à leur partie supérieure une tubulure pour le remplissage et le dégagement de la vapeur.

La cuve extérieure est semblable à l'appareil utilisé pour déterminer la position du point 100 du thermomètre centigrade ; elle se compose : 1° d'une chaudière cylindrique de 24 centimètres de diamètre et de même hauteur, calorifugée avec de l'amiante en fibres ;

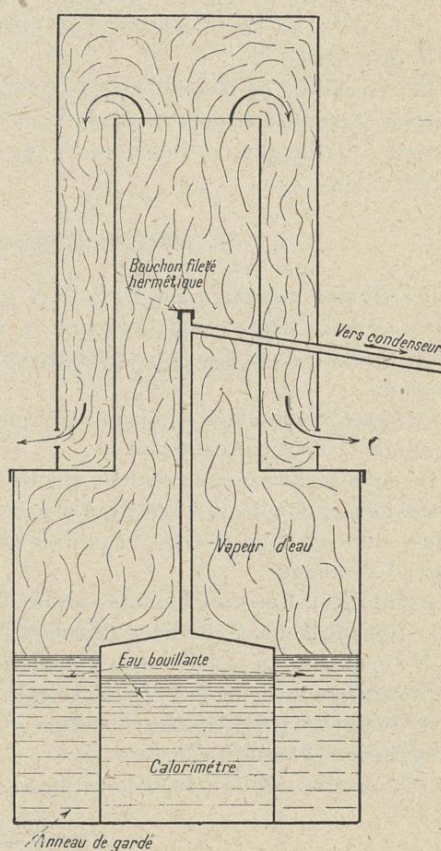


Fig. 12.

2° D'une sorte de cheminée constituée par un tube ouvert à ses 2 extrémités, fixé sur la partie supérieure de la chaudière;

3° D'un manchon concentrique, fermé à sa partie supérieure, fixé sur la cuve et entourant le tube; ce manchon présente à sa partie inférieure des ouvertures pour le dégagement de la vapeur.

La cuve intérieure, également en cuivre rouge, est surmontée d'un tube cylindrique à la partie supérieure duquel est fixé un tube incliné conduisant la vapeur à un condenseur.

Dans ces conditions la cuve intérieure et le tube qui la surmonte sont protégés contre tous réchauffements ou refroidissements parasites par l'eau bouillante de l'anneau de garde et par la vapeur qui s'élève dans la cheminée.

b) la *plaque chauffante* est constituée par une plaque de fer ou d'acier épaisse disposée à la partie supérieure d'un four cylindrique à gaz dont les flammes sont régulièrement réparties au moyen d'une rampe circulaire.

c) Le panneau, de 10 centimètres d'épaisseur est disposé entre le calorimètre et la plaque chaude.

La répartition de la température dans ce panneau est mesurée au moyen de couples thermoélectriques disposés dans des rainures pratiquées sur chaque face (Couples platine-platine rhodié sur la face chaude, couple fer constantan sur la face froide).

Marche d'une expérience.

On allume le four, la température de l'eau du calorimètre et de l'anneau de garde s'élève progressivement jusqu'à la température d'ébullition.

On recueille dans une éprouvette graduée l'eau condensée provenant du calorimètre.

On règle le chauffage de façon que la température de la face chaude soit stationnaire (1.000° par exemple).

Lorsque la quantité de chaleur qui traverse le panneau pendant l'unité de temps est constante la quantité d'eau condensée pendant le même temps est elle-même constante. Cet état d'équilibre est habituellement obtenu 4 ou 5 heures après l'allumage.

Ayant déterminé les éléments suivants :

Q : quantité d'eau condensée pendant l'unité de temps;

e : épaisseur du panneau expérimenté;

S : surface du fond de la cuve centrale;

t_1 : température de la face chaude;

t_2 : température de la face froide.

on calcule k en appliquant la formule de définition :

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

en admettant pour chaleur de vaporisation de l'eau 537.

Observation. — Cette méthode présente les avantages suivants :

- 1° La température de la face supérieure est maintenue à une température rigoureusement constante, voisine de 100° C.
- 2° La présence de l'anneau de garde et de la cheminée qui le surmonte préserve le calorimètre et son tube de dégagement de toute cause extérieure de refroidissement.
- 3° La disposition des couples dans des rainures parallèles aux faces, suivant des surfaces isothermiques, évite le refroidissement des soudures chaudes par conduction.

RÉSULTATS

Un certain nombre d'expériences ont été effectuées avec ce dispositif sur les matières suivantes : cyanamide, briques de diatomite, terre d'infusoires.

Voici, à titre d'exemple, la marche d'une expérience effectuée sur un panneau de cyanamide pulvérisée de densité apparente égale à 0,93 et d'épaisseur égale à 0 m. 10.

Surface de la région A. B. C. D.	0 m² 0581
Allumage du four à	7 heures

A 10 h. 30, température de la face inférieure $t_1 = 1.000^{\circ}$ C.

A 12 h. 30, commencement de l'ébullition t_2 voisin de 100° C.

A partir de 14 h. on recueille l'eau condensée pendant chaque heure; la quantité d'eau recueillie varie de 0 l. 030 à 0 l. 031 par heure.

Cinq expériences semblables, effectuées à différentes dates sur cette matière, ont confirmé ce résultat.

Le coefficient de conductibilité, déduit de ce résultat, est 0,15 (approximation : 1 0/0).

Voici les résultats obtenus *dans les mêmes conditions* sur les autres panneaux expérimentés :

Briques de diatomite, de densité 0,39	$k = 0,142$
Terre d'infusoire tassée sous une densité de 0,200	$k = 0,06$

Remarques. — Le coefficient de conductibilité calorifique des briques de diatomite avait été trouvé égal à 0,137 pour un intervalle de température compris entre 0° et 40° C. Celui de la terre d'infusoires, dans les mêmes conditions, avait été trouvé égal à 0,052.

CONCLUSION

La multiplicité des méthodes exposées, les divergences entre les résultats indiqués par différents expérimentateurs, divergences s'élevant fréquemment à 20 o/o, montrent nettement que la détermination du coefficient de conductibilité calorifique présente de grandes difficultés.

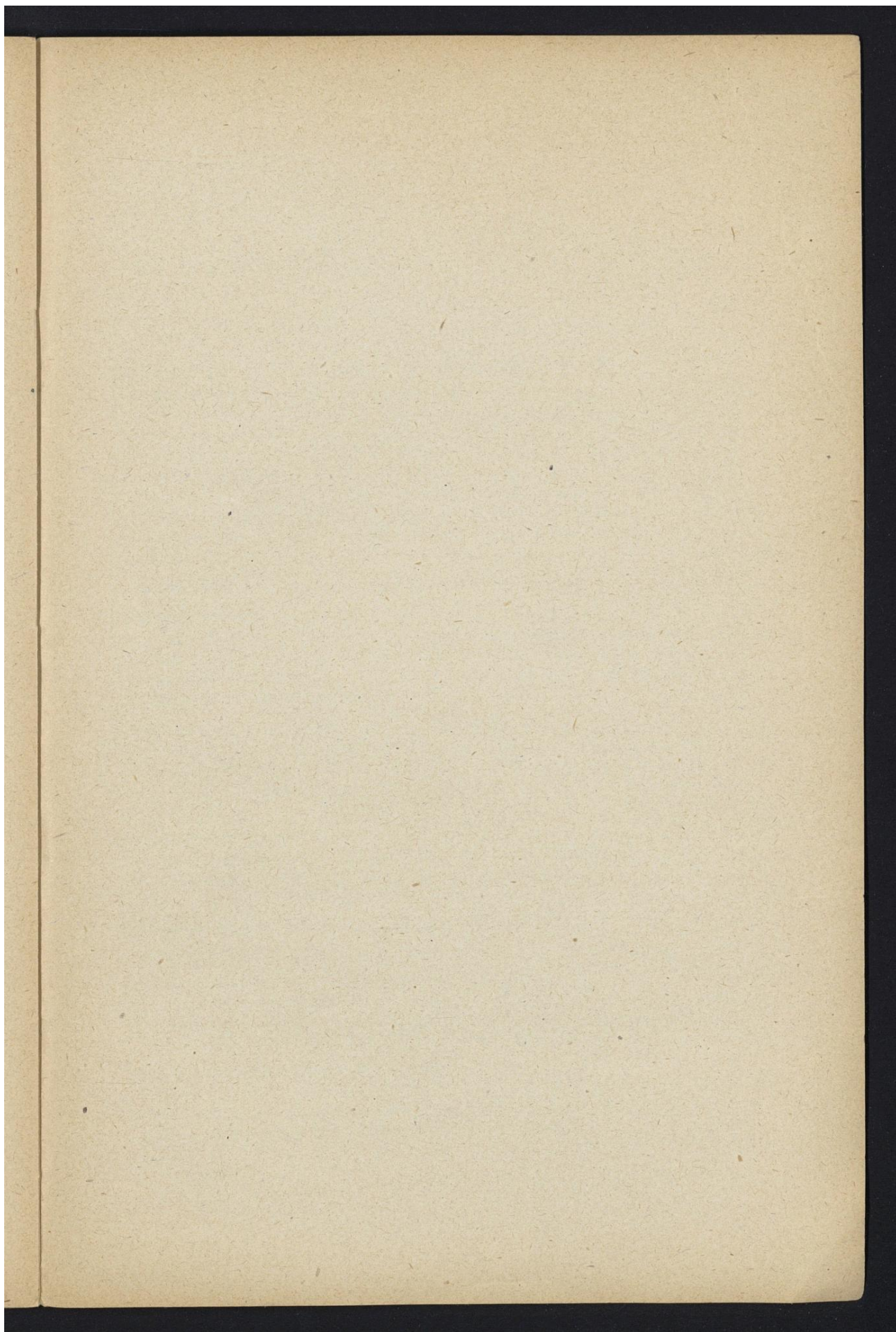
Il convient toutefois de noter que les divergences observées tiennent surtout à ce que toutes les précautions convenables n'ont pas toujours été prises soit pour la mesure des températures, soit pour la mesure des quantités de chaleur soit enfin pour éviter toute cause extérieure de refroidissement ou d'échauffement du calorimètre.

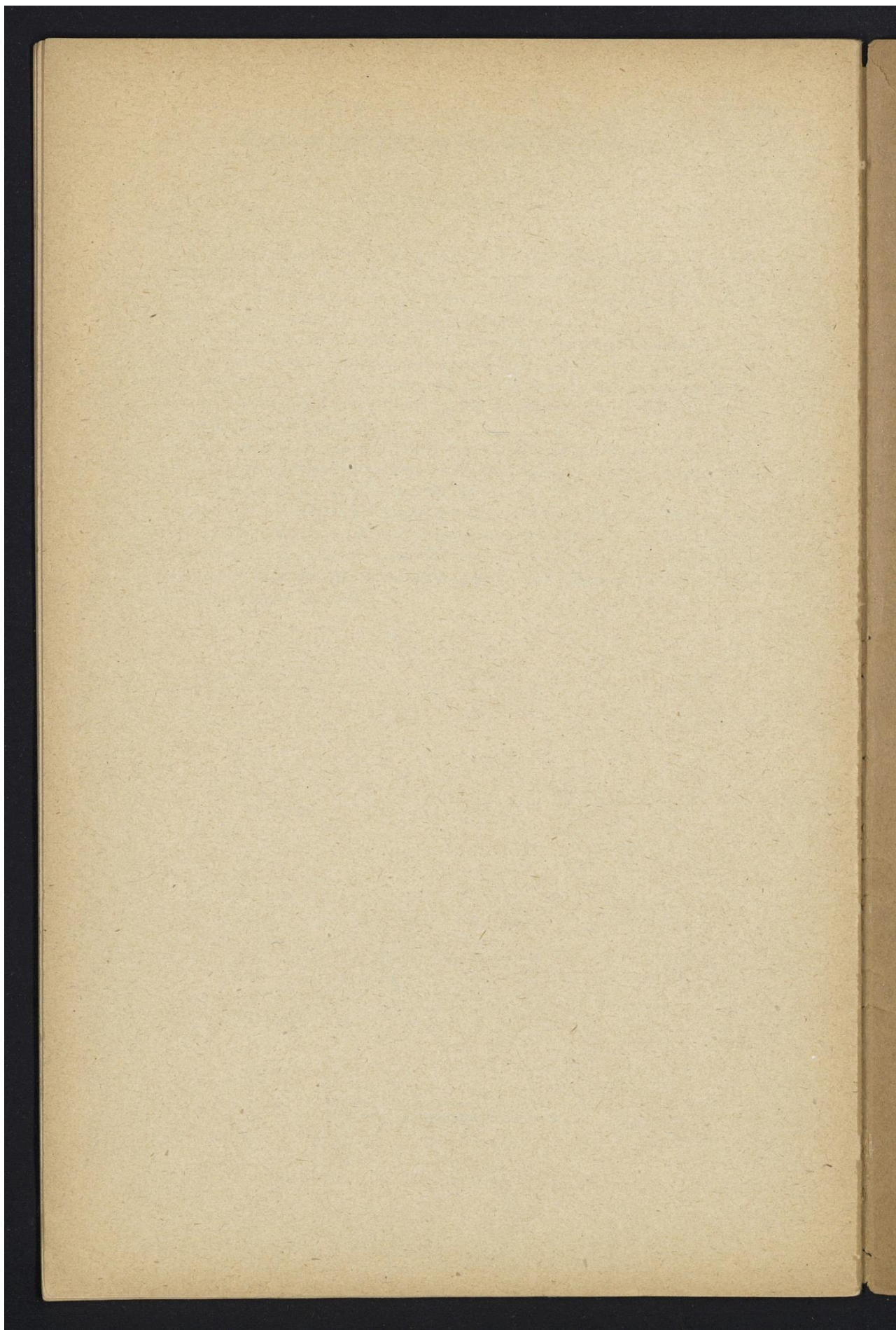
D'autre part les lois de la variation du coefficient de conductibilité calorifique n'ont pu être nettement établies; les résultats indiqués à ce sujet par divers expérimentateurs sont parfois contradictoires.

On peut donc conclure que le coefficient de conductibilité calorifique est une des constantes physiques dont la détermination nécessite de multiples précautions que n'ont pas toujours prises les expérimentateurs, et, qu'à ce sujet, une révision des résultats antérieurement obtenus, doit s'imposer pour leur utilisation aux études des parois.

LAVAL. — IMPRIMERIE BARNÉOUD.







LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE CH. BÉRANGER
PARIS, RUE DES SAINTS-PÈRES, 45. — LIÈGE, 1, QUAI DE LA GRANDE-BRETAGNE, 1

BULLETIN DU LABORATOIRE D'ESSAIS
MÉCANIQUES, PHYSIQUES, CHIMIQUES ET DE MACHINES

DU
CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS

Le Bulletin n'est pas périodique, il paraît par fascicules détachés

Organisation et outillage du laboratoire d'essais (N° 1. Épuisé).

Rapport du Congrès de Berlin, juin 1903.

N° 2. Extrait du rapport de mission donnée au chef de la section des matériaux de construction au Congrès de chimie de Berlin (juin 1903). — I. Laboratoires d'essais. — II. Fabrication du ciment par fours rotatifs. Description de deux usines. — III. Filtre Beeth. — IV. Essais de ciment de fours rotatifs. — V. Sur un procédé simple et rapide permettant de différencier une chaux grasse d'une chaux hydraulique, par E. LEDUC, chef de la section des matériaux de construction au laboratoire d'essais. Une brochure in-8°, contenant des figures dans le texte et 4 planches hors texte. 16 fr.

Action de l'eau de mer sur les mortiers (N° 3. Épuisé).

Métaux ferreux.

N° 4. Contribution à l'étude des relations qui existent entre les effets des sollicitations lentes et ceux des sollicitations vives dans le cas des métaux ferreux (barreaux lisses et barreaux entaillés), par P. BREUIL, chef de la section des métaux du laboratoire d'essais. 1 brochure in-8° 48 fr.

Nouveau système de longueurs d'ondes étalons.

N° 5. Rapport sur la nécessité d'établir un nouveau système de longueurs d'ondes étalons, présenté au nom de la Société française de Physique au Congrès international de physique de l'Exposition de Saint-Louis, par A. PÉROT et FABRY. 1 brochure in-8° 3 fr.

Essais des huiles de pétrole.

N° 6. Essais mécaniques des huiles de pétrole ou autres, effectués au laboratoire d'essais du Conservatoire national des Arts et Métiers, par P. BREUIL. Une brochure in-8° avec figures et tableaux d'essais (*deuxième tirage*). 11 fr.

Perte de chaleur des enveloppes calorifuges (N° 7. Épuisé).

Essais des compteurs d'eau (N° 8. Épuisé).

Valeurs comparatives des trois étalons lumineux.

N° 9. Rapport sur les valeurs comparatives des trois étalons à flammes : Carcel, Hefner, Vernon-Harcourt, par A. PÉROT, directeur du Laboratoire d'essais et P. JANET, directeur du Laboratoire central d'Electricité. Une brochure in-8° 3 fr.

Sur la constitution intime des calcaires.

N° 10. Sur la constitution intime des calcaires, par E. LEDUC, chef de la section des matériaux de construction au Laboratoire d'essais du Conservatoire national des Arts et Métiers, 1 vol. in-8°, avec 4 planches et 38 tableaux. 80 fr.

Essais sur le plâtre.

N° 11. Essais sur le plâtre, par E. LEBUC, chef de la section des matériaux de construction au Laboratoire d'essais du Conservatoire national des Arts et Métiers, et Maurice PELLET, ingénieur-agronome. Une brochure in-8°. 6 fr.

Mesure de la puissance utile des voitures automobiles.

N° 12. Examen critique de quelques méthodes de mesure de la puissance utile des voitures automobiles, par J. AUCLAIR, assistant au Laboratoire d'essais . . . 6 fr.

Essais sur le silico-calcaire.

N° 13. Essais sur le silico-calcaire, par E. LEBUC, chef de la Section des matériaux de construction au Laboratoire d'essais du Conservatoire national des Arts et Métiers et Ch. de la Roche, ingénieur civil. 1 vol. in-8°, avec 48 fig. et 11 pl. . . 52 fr.

Essais de torsion.

N° 14. Essais de torsion, par Pierre BREUIL, chef de la Section des métaux du Laboratoire d'essais. Une brochure in-8°, avec une planche. 7 fr.

Jaugeages des gros débits.

N° 15. Jaugeages des gros débits, par MM. BOYER-GUILLON, chef de la Section des machines, AUCLAIR et LAEDLEIN, assistants. 1 vol. in-8°, avec 7 pl. . . . 21 fr.

Essais d'huiles usagées.

N° 16. Essais d'huiles usagées, par MM. P. SABATIÉ, chef de la Section des métaux, et PELLET, assistant de la Section de chimie du Laboratoire d'essais du Conservatoire national des Arts et Métiers, avec 6 planches 9 fr.

Essais chimiques des verres.

N° 17. Etude sur les essais chimiques des verres, par Ch. GRIFFITHS, ex-préparateur du Cours de Métallurgie et Travail des Métaux, chef de la Section de Chimie au Laboratoire d'essais du Conservatoire National des Arts et Métiers . . . 9 fr.

Essais de dureté des corps.

N° 18. Essais de dureté des corps et des métaux en particulier, au moyen du scléromètre, par J. SERVAIS, assistant au Laboratoire d'essais 12 fr.

Dispositif dynamométrique et fragilité des tôles d'acier doux.

N° 19. Note sur un dispositif dynamométrique fondé sur les déformations élastiques. Note sur la fragilité des tôles d'acier doux provoquée par le meulage transversal des champs, par SABATIÉ, chef du Service des essais de métaux du Laboratoire d'essais 6 fr.

Variations de la hauteur de rebondissement d'un mouton.

N° 20. Note sur les variations de la hauteur de rebondissement d'un mouton en fonction du nombre de chocs, par C. DROUILLARD, Assistant au Service des Essais des Métaux. 3 fr.

Fonctionnement des courroies de transmission.

N° 21. Recherches techniques et expérimentales sur le fonctionnement des courroies de transmission, par AUCLAIR, président du Comité de mécanique de la Direction des Recherches scientifiques et industrielles et des inventions, BOYER-GUILLON, ingénieur civil des Mines, et COULMEAU, assistant du Service des essais des machines au Laboratoire d'essais. 1 vol. in-8°, avec figures et planches . . . 66 fr.