



HAL
open science

Les isolants thermiques aux basses températures

G. Antonini, J.P. Pain

► **To cite this version:**

G. Antonini, J.P. Pain. Les isolants thermiques aux basses températures. Revue de Physique Appliquée, 1988, 23 (11), pp.1755-1760. 10.1051/rphysap:0198800230110175500 . jpa-00246004

HAL Id: jpa-00246004

<https://hal.science/jpa-00246004>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

REVUE DE PHYSIQUE APPLIQUÉE

Revue Phys. Appl. **23** (1988) 1755-1760

NOVEMBRE 1988, PAGE 1755

Classification
Physics Abstracts
 07.20M — 44.00

Les isolants thermiques aux basses températures

G. Antonini et J. P. Pain

Division Génie des Transferts et Energétique, Université de Technologie de Compiègne, B.P. 233, 60206 Compiègne Cedex, France

(Reçu le 11 avril 1988, accepté le 13 juillet 1988)

Résumé. — On rappelle les différents modes de transfert thermique qui conditionnent la conductivité apparente des média utilisés en isolation aux basses températures. Une revue des principaux types d'isolants cryogéniques utilisés est donnée (mousse, poudres, fibres, multicouches, microsphères creuses métallisées).

Abstract. — Different forms of heat transfer which characterise the apparent conductivity of materials used for low temperature insulation are presented. A review of the main types of cryogenic insulants used is given (foams, powders, fibres, multi-layers, hollow metallic microspheres).

1. Introduction.

L'isolation thermique dans le domaine des basses températures est un élément essentiel du stockage et de la manutention des fluides cryogéniques et ce, du fait de leurs faibles chaleurs latentes de vaporisation, et des écarts importants de température avec l'ambiance.

Ainsi, de l'hélium liquide ($T_c = 4,2$ K, $L_v = 20,4$ J/g) containérisé dans un fût sphérique de diamètre $D = 1$ m en inox (18/10) $\bar{\lambda} \Big|_4^{300} = 0,1$ w/cm K et d'épaisseur $e = 5$ mm, recevrait un flux thermique d'une ambiance à 300 K de 18 600 W correspondant à un débit massique instantané d'évaporation de $\dot{m} = 0,91$ kg/s. Sachant que la densité de l'hélium liquide est de $\rho = 0,125$ g/cm³, la masse totale de l'hélium contenue initialement dans le réservoir était de $m = 65,4$ kg, d'où des temps d'assèchement de l'ordre de la minute !

On a reporté à titre d'illustration dans le tableau I les principales caractéristiques thermodynamiques des fluides cryogéniques les plus courants.

A titre de comparaison, on peut se rappeler que l'eau possède une chaleur latente de 2 257 J/g.

De même, on a reporté dans le tableau II, les coefficients de conductivité moyens $\bar{\lambda}$ de quelques matériaux peu conducteurs dans le domaine cryogénique avec :

$$\bar{\lambda}(T) = \frac{1}{T - T_c} \int_{T_c}^T \lambda(T') dT'$$

Tableau I. — *Caractéristiques thermodynamiques de quelques fluides cryogéniques.*

[Thermodynamic characteristics of some cryogenic fluids.]

Fluide	T_c (K)	L_v (J/g)	ρ (g/cm ³)
Hélium	4,2	20,4	0,125
Hydrogène	20,4	454	0,071
Azote	77,35	199	1,207
Oxygène	90,2	213	1,141

la température choisie pour référence étant celle de l'ébullition de l'hélium liquéfié.

On observe que la conductivité thermique des matériaux homogènes peu conducteurs de la chaleur décroît avec la température.

Ainsi, par exemple, la densité de flux transmise entre 300 et 4 K à travers une couche plane d'épaisseur 10 cm en nylon, vaudrait :

$$\frac{\Phi}{S} = 89,4 \text{ mW/cm}^2.$$

On sait depuis Dewar que l'utilisation d'une double enveloppe tirée jusqu'à un vide poussé permet, pour peu que celle-ci constituée de parois réfléchissantes, d'obtenir une excellente isolation.

Ainsi, dans le vide, et en supposant une couche plane à parois d'émissivités égales à ϵ_1 et ϵ_2 respecti-

Tableau II. — *Conductivité thermique de matériaux homogènes aux basses températures.*

[Thermal conductivity of homogeneous materials at low temperatures.]

T (K)	10	100	200	300
$\bar{\lambda}$ verre W/m K	0,113	0,304	0,525	0,672
$\bar{\lambda}$ téflon W/m K	0,073	0,195	0,225	0,237
$\bar{\lambda}$ nylon W/m K	0,024	0,212	0,278	0,302

vement, le transfert thermique est uniquement radiatif et ne dépend plus de l'épaisseur :

$$\frac{\Phi_{\text{rad}}}{S} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2} \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

où σ est la constante de Stefan-Bolzman.

Par exemple, si $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,02$ et $T_1 = 300$ K ; $T_2 = 4$ K, la densité de flux thermique échangée est :

$$\frac{\Phi_{\text{rad}}}{S} = 0,46 \text{ mW/cm}^2.$$

La même couche non tirée au vide mais remplie d'hélium gazeux par exemple ($\bar{\lambda} = 767 \mu\text{W/cm K}$) verrait, en plus de transfert radiatif, un transfert conductif à travers le gaz, supposé d'épaisseur $e = 10$ cm.

$$\frac{\Phi_{\text{cd}}}{S} = 22,7 \text{ mW/cm}^2$$

de sorte que dans ces conditions, le flux total transmis, en ne prenant pas en compte la convection serait :

$$\frac{\Phi}{S} = 23,16 \text{ mW/cm}^2.$$

Bien entendu, en présence de convection dans la phase gazeuse, il faudrait s'attendre à des valeurs encore supérieures. Dans la pratique, de telles couches sont soit de faibles épaisseurs, soit tirées au vide.

La diminution de pression dans l'espace libre fait passer du régime de conduction classique pour lequel la conductivité thermique des gaz ne dépend pas de la pression (théorie cinétique des gaz), au régime de Knudsen (conduction moléculaire) pour lequel la conductivité thermique décroît linéairement avec la pression (Fig. 1).

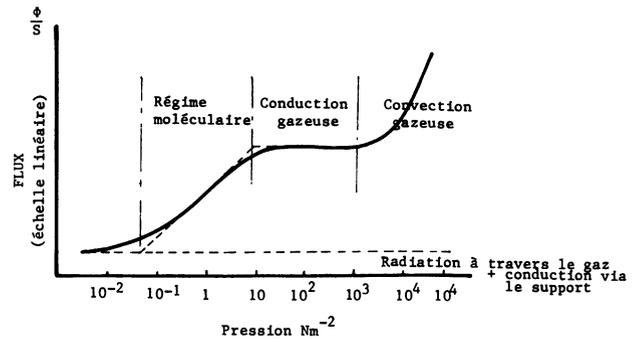


Fig. 1. — Modes de transfert dominants en fonction de la pression.

[Dominant forms of heat transfer versus pressure.]

Enfin, le flux thermique dans le vide peut être également réduit par l'introduction d'écrans radiatifs. Ainsi, dans l'exemple précédent si on introduit n écrans parallèles aux faces et d'émissivités identiques, on a pour le même écart de température :

$$\left(\frac{\Phi}{S}\right)_{\text{avec écrans}} = \frac{1}{n+1} \left(\frac{\Phi}{S}\right)_{\text{sans écran}}$$

Ainsi, dans l'exemple précédent et pour un nombre $n = 10$, on a :

$$\frac{\Phi}{S} = 0,042 \text{ mW/cm}^2.$$

On parle alors de super-isolation.

2. Principaux types d'isolants cryogéniques.

Comme on l'a vu précédemment, on distinguera les isolants non sous vide des isolants sous vide.

2.1 LES MOUSSES ISOLANTES. — Il s'agit de matériaux cellulaires constitués de mousses plastiques expansées à l'aide d'un gaz emprisonné en cellules fermées. La petite taille des cellules empêche le processus de convection intra-cellulaires qui diminueraient la résistance thermique du matériau.

On reporte dans le tableau III, les caractéristiques des principales mousses isolantes utilisées en cryogénie.

Ces isolants, bien qu'offrant une meilleure résistance thermique que la plupart des matériaux solides homogènes même peu conducteurs de la chaleur (cf. Tab. II), restent de médiocres isolants cryogéniques. Toutefois, leur faible coût, leur faible masse volumique et leur commodité d'emploi leur ouvrent un marché dans le transport et le stockage de gaz liquéfiés de grande capacité.

2.2 ISOLATION PAR POUDRES ET FIBRES. — Ces isolants peuvent être ou non tirés au vide améliorant ainsi leur résistance thermique.

Tableau III. — *Caractéristiques thermophysiques de mousses isolantes utilisées en cryogénie.*

[Thermophysical characteristics of insulant foams used in cryogenics.]

Mousses isolantes	ρ (kg/m ³)	λ μ W cm ⁻¹ K ⁻¹
Mousses polyvinyliques (Klegecell) (Agent gonflant : azote gazeux)	33	280
	100	300
Mousses de polyuréthane (Agent gonflant : azote, R 11)	30	210
	60	200
Mousses de verre	150	500
	200	600

2.2.1 *Isolants fibreux.* — L'exemple le plus typique est celui de la laine de verre. Une conductivité apparente d'un tel matériau dépend des conditions d'utilisation de l'isolant (température moyenne, humidité) mais aussi des paramètres de structure de ce matériau (masse volumique, porosité, indice de finesse des fibres, perméabilité aux gaz, facteur d'anisotropie, ...).

On reporte en figure 2 un exemple [1] de variation de la conductivité apparente d'une laine de verre en fonction de sa masse volumique ou de sa porosité, qui montre l'importance des contributions relatives de la conduction gazeuse interstitielle, du rayonnement interstitiel, et de la conduction solide.

$$\lambda(\rho) = A + B\rho + \frac{C}{\rho}$$

Le premier terme correspond au terme constant de conduction dans le gaz, le second à la conduction solide, le dernier représentant la contribution du rayonnement.

L'influence de la température est reportée en figure 3 [2] qui montre l'abaissement de la conductivité apparente du matériau avec la température.

2.2.2 *Isolants granulaires.* — La conductivité apparente de milieux granulaires peut être estimée à l'aide de modèles [3] qui prennent en compte le diamètre des particules, la porosité du milieu, la température, la pression d'utilisation, l'émissivité des surfaces solides, les surfaces de contact particule/particule, etc...

Les contributions relatives entre conduction gazeuse, solide et rayonnement sont du même type que décrit précédemment. On reporte néanmoins en figure 4 [4] un exemple de dépendance de la conductivité apparente à la pression des principaux solides utilisés en isolation basse température (perlite, alumine activée).

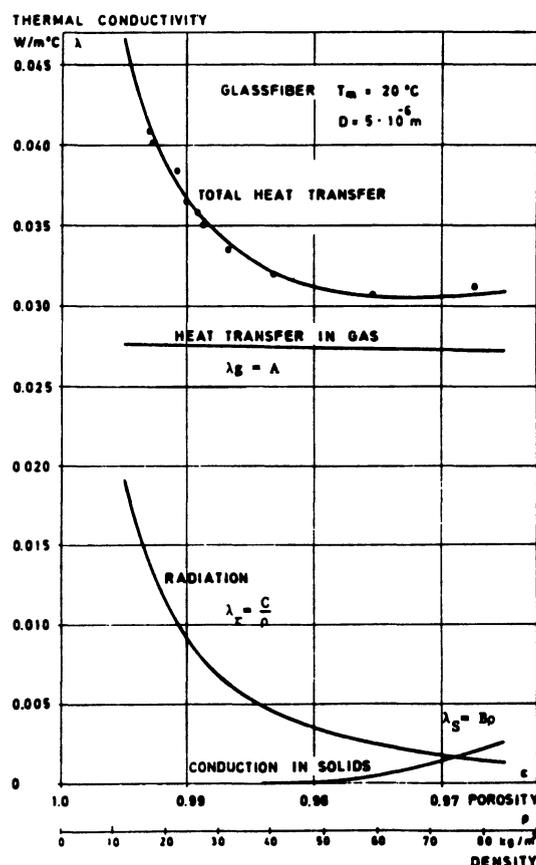


Fig. 2. — Conductivité apparente d'une laine de verre en fonction de la masse volumique d'après [1].

[Apparent conductivity of fibre glass versus density from reference [1].]

On remarquera que plus la taille moyenne des particules est faible, plus les courbes sigmoïdes se déplacent vers la droite. On peut alors, pour des pressions voisines de la pression normale, obtenir des conductivités très faibles en abaissant la granulo-

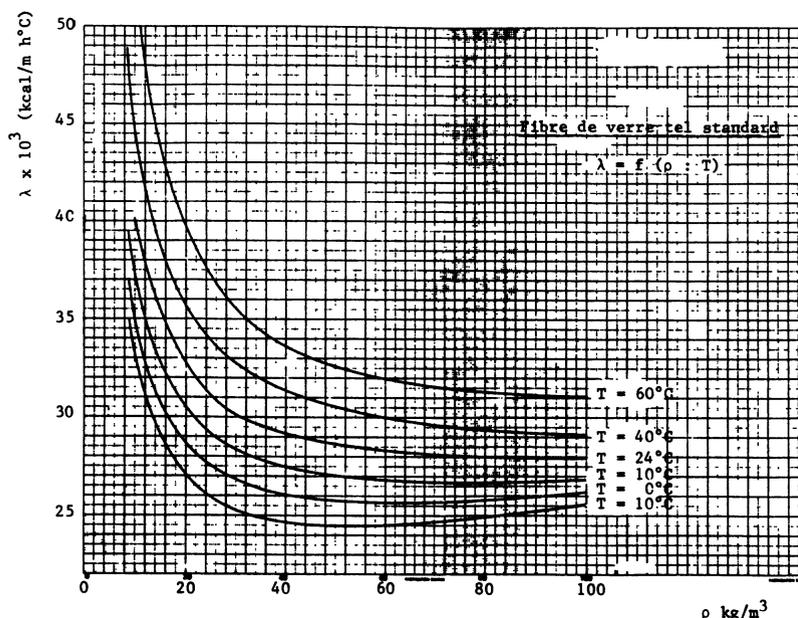


Fig. 3. — Conductivité apparente d'une laine de verre en fonction de la masse volumique et de la température d'après [2].

[Apparent conductivity of fibre glass *versus* density and temperature from reference [2].]

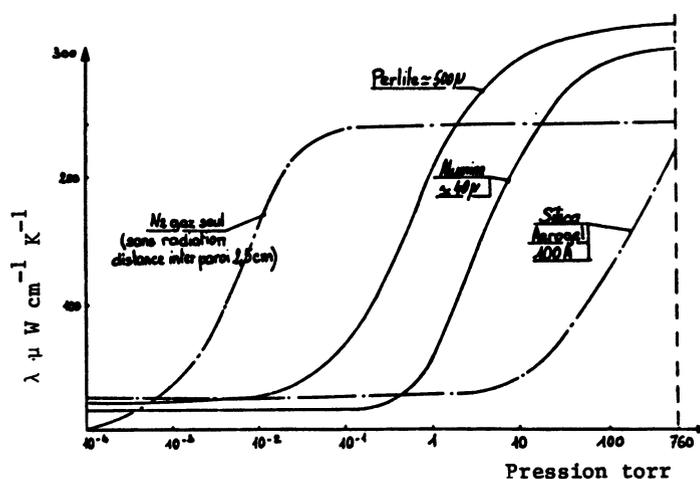


Fig. 4. — Conductivité apparente de quelques solides en fonction de la pression d'après [4].

[Apparent conductivity of some solids *versus* pressure from reference [4].]

métrie du solide. La part du transfert par rayonnement devient alors prépondérante. Il est donc possible d'introduire une poudre métallique dans le milieu afin de réduire les échanges par rayonnement (poudres opacifiées). Cependant, on observe avec le temps une ségrégation de la poudre métallique due principalement aux vibrations subies par l'isolant lors de certaines applications.

2.3 SUPER-ISOLANTS MULTICOUCHES. — Cette isolation multicouche consiste en un grand nombre de parois fortement réfléchissantes au rayonnement

infrarouge. Les contacts entre parois sont limités par des points de contact ou par l'intermédiaire d'un matériau fibreux.

La chaleur échangée par rayonnement est alors minimisée ainsi que les échanges par conduction. Ces isolants sont habituellement utilisés sous un vide relatif afin de rendre négligeable la conduction gazeuse.

Les écrans réflecteurs sont constitués d'un métal réfléchissant : or, argent, aluminium soit sous forme de feuille de faible épaisseur (mylar, kapton...) les intercalaires sont constitués de matériaux tels que

film plastique, fibre de verre, papier. Ils sont parfois supprimés (froissage du film réfléchissant).

La figure 5 indique la variation du flux de chaleur transmis en fonction du nombre de couches. L'optimum pour l'isolant dépend de la conductivité du matériau intercalaire (résistances de contacts, diamètre des fibres, conduction du matériau...) ainsi que de la conductivité équivalente de l'échange par rayonnement (émissivité des surfaces d'échange,

température absolue d'utilisation...). L'optimum se trouve habituellement entre 15 et 60 couches par centimètre d'épaisseur [5].

Pour une bonne qualité d'utilisation ainsi que pour une constance des caractéristiques thermophysiques le vide nécessaire doit être inférieur à 10^{-4} torr (oxydation des surfaces, tenue des plastiques aux rayonnements et aux températures cryogéniques...).

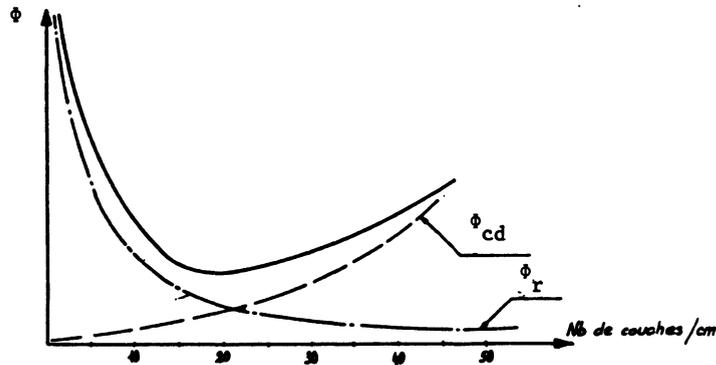


Fig. 5. — Influence du nombre de couches sur le flux transmis à travers un super-isolant d'après [5].

[Influence of multi-layers on the heat flux through a super insulant from [5].]

Tableau IV. — Caractéristiques de conductivité apparente de quelques super-isolants d'après [4].

[Features of the apparent conductivity of some super insulants from reference [4].]

Ecran	Intercalaire	Tassement couches/cm	$\bar{\lambda}$ $\mu\text{W cm}^{-1} \text{K}^{-1}$
Aluminium 9μ	Fibre de verre $\Phi = 0,7 \mu$ Epaisseur $0,2 \text{ mm}$	30	0,55
Mylar aluminisé simple face	Néant	25	0,9
Film polyester aluminisé sur une face et ondulé	Néant	25	0,3

Tableau V. — Performances thermique et mécanique comparées des isolations par microsphères creuses métallisées.

[Comparison of thermal and mechanical performance of hollow metallic microspheres.]

Isolant	ρ kg/m^3	λ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	σ (résistance à la compression) N m^{-2}
Microsphère	70-80	$2,2-4 \times 10^{-4}$	$> 3 \times 10^6$
Multicouche	50-60	$5-10 \times 10^{-5}$	nulle

On a reporté dans le tableau IV les caractéristiques de conductivité apparente de quelques super-isolants [4].

2.4 ISOLATION PAR MICROSPHÈRES CREUSES MÉTALLISÉES. — L'isolation par microsphères diffère de l'isolation classique à base de milieux granulaires (billes, poudres) en ce que ces isolants sont constitués de sphères creuses métallisées. Cette technique permet non seulement la réduction de

poids spécifique et de capacité calorifique, tout en limitant très efficacement le transfert thermique (diminution du transfert radiatif avec peu d'accroissement de la composante conductive), mais surtout permet l'obtention de résistances mécaniques importantes en comparaison avec les super-isolants multicouches. A titre d'exemple, on reporte en tableau V les performances thermique et mécanique comparées des isolants à microsphères creuses métallisées et des super-isolants multicouches [6].

Bibliographie

- [1] BANKWALL, C. G., National Swedish Building Res., Rapport D4 (1972).
[2] KLARSFELD, S., Comptes rendus GUT (1976).
[3] BAUER, A. et SCHLUNDER, E. U., International Chemical Engineering, 18 (1978) 189.
[4] PELLOUX GERVAIS, P., Cahiers de la Thermique (1978).
[5] GIANI, S. et GIANI, L., *Indian J. Cayog.* 2 (1977) 151.
[6] TIEN, C. L. et CUNNINGTON, G. R., *Cryogenics*, Décembre (1972) 419.
-