



Les matériaux de type aérogels :
Des super-isolants thermiques nanostructurés

Arnaud RIGACCI

Ecole des Mines de Paris
Centre Energétique et Procédés (CEP)
Equipe « Energétique, Matériaux et Procédés »
(Etablissement de Sophia Antipolis)

1. Introduction.

Matériaux nanostructurés et aérogels

2. Quelques rappels.

Principaux modes de transferts thermiques mis en jeu

3. Illustration.

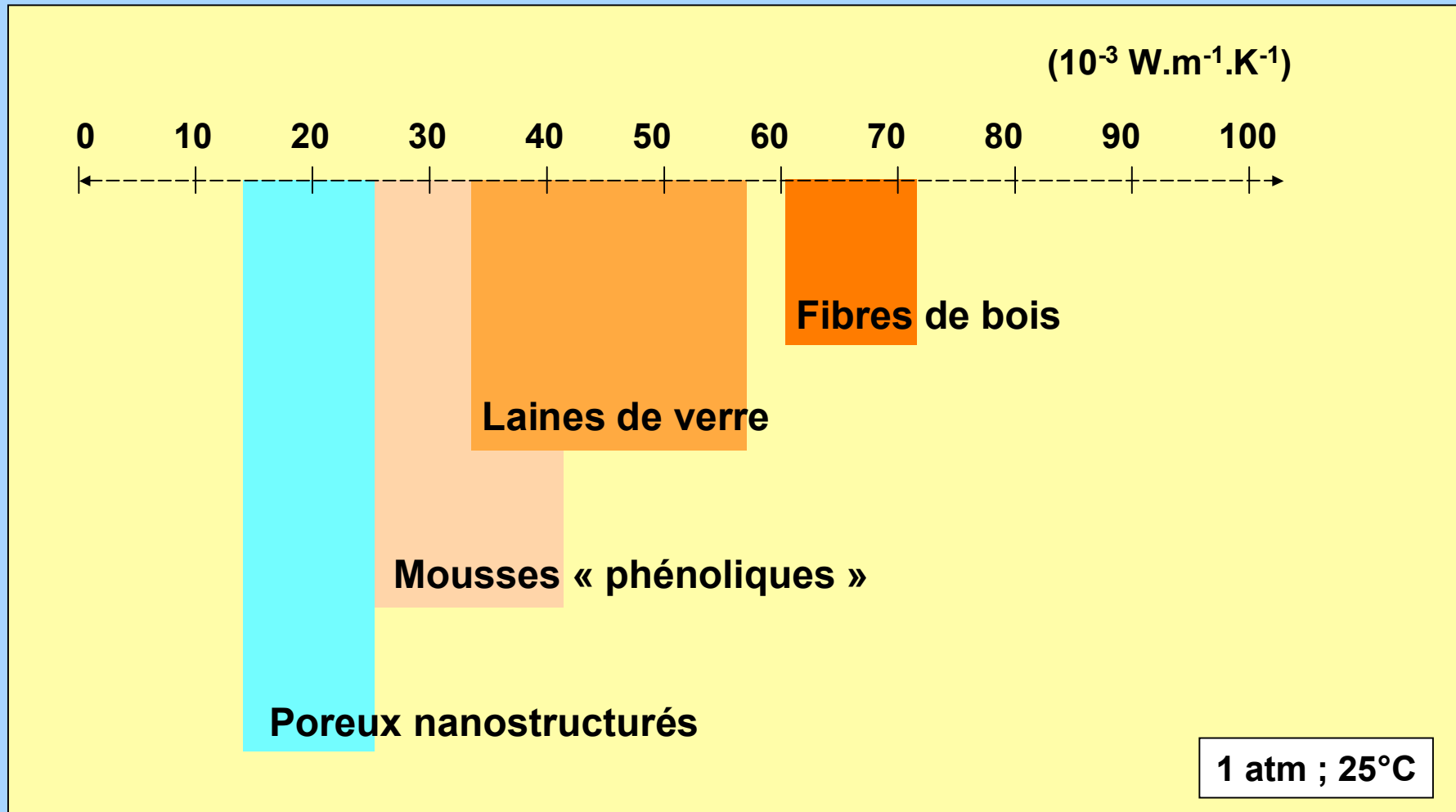
Famille des aérogels de silice



Introduction

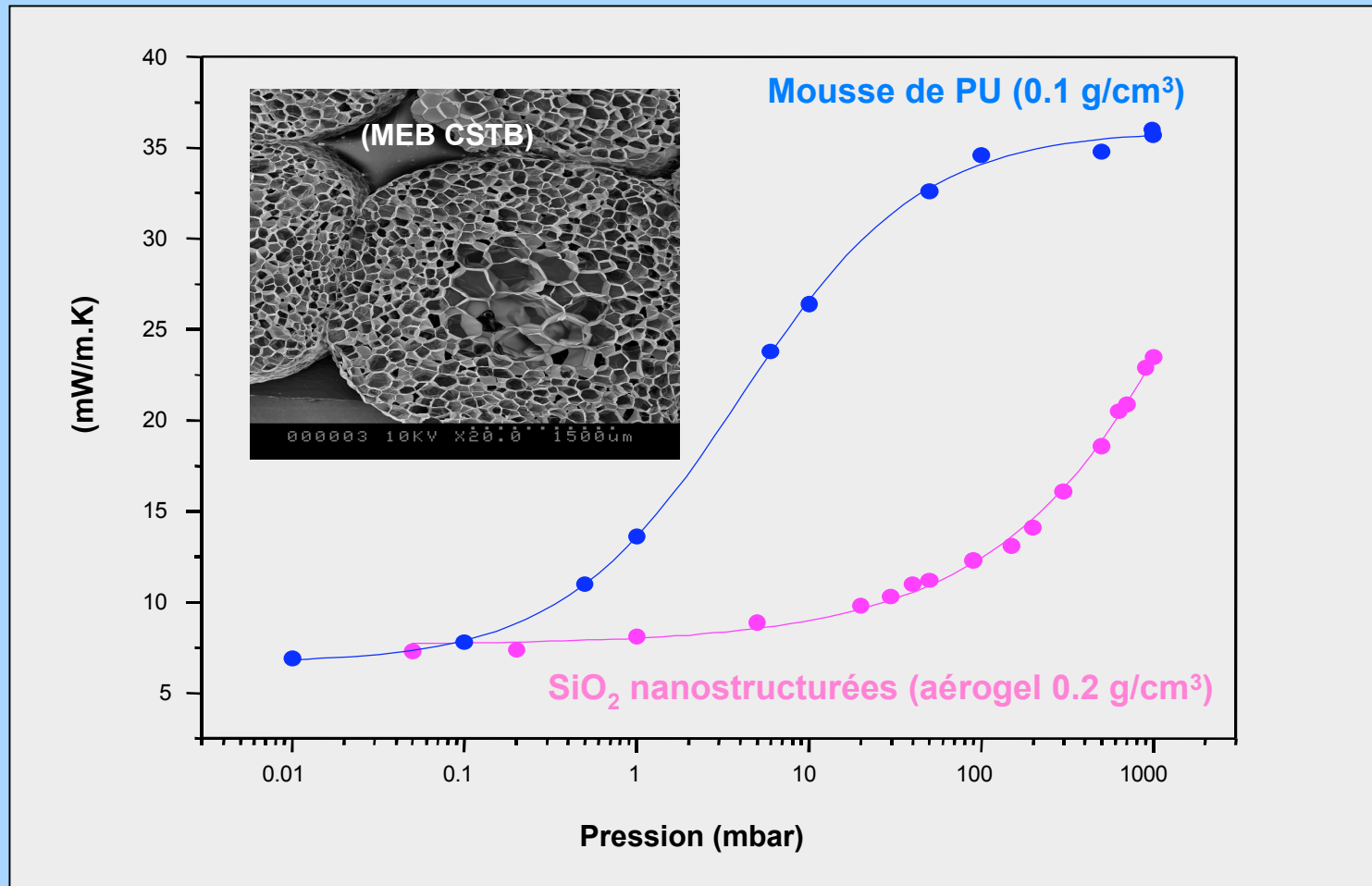
I. Introduction (1) : Les matériaux nanostructurés légers (1)

Des matériaux super-isolants dans les conditions « ambiantes »



I. Introduction (2) : Les matériaux nanostructurés légers (2)

De très faibles niveaux de conductivité sous vides primaires

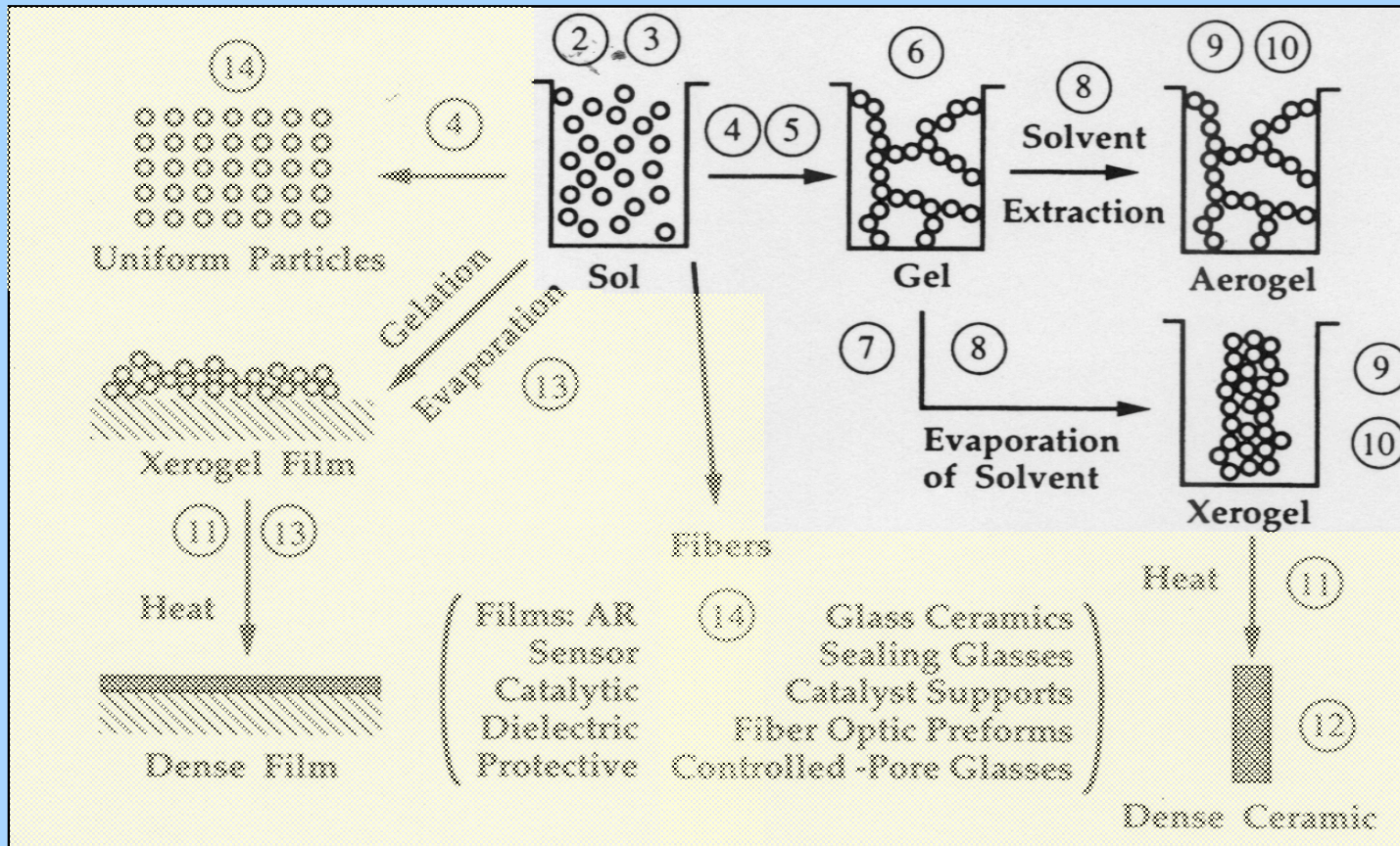


I. Introduction (3) : Les aérogels (1)

Des matériaux issus de la chimie « douce » (synthèse sol-gel)

et

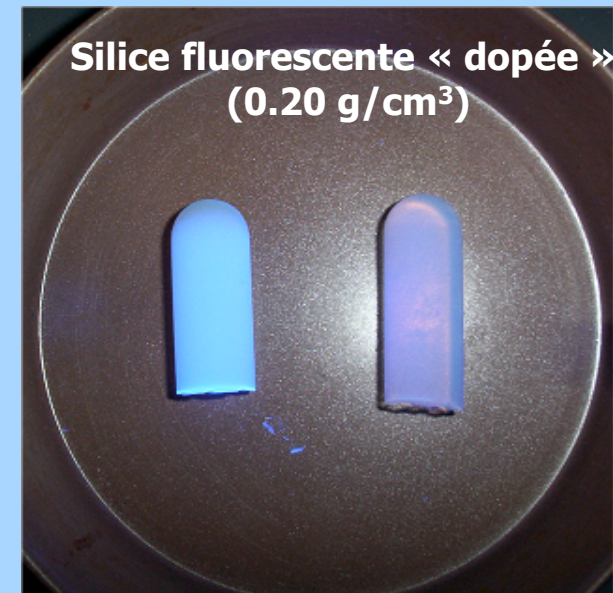
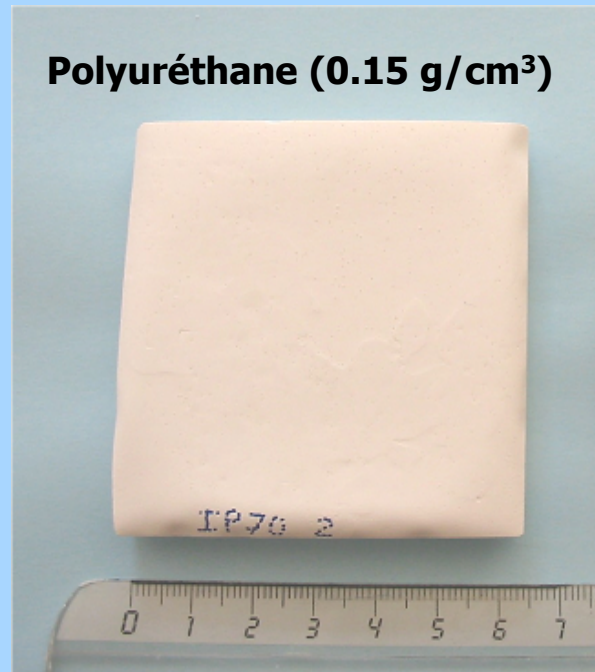
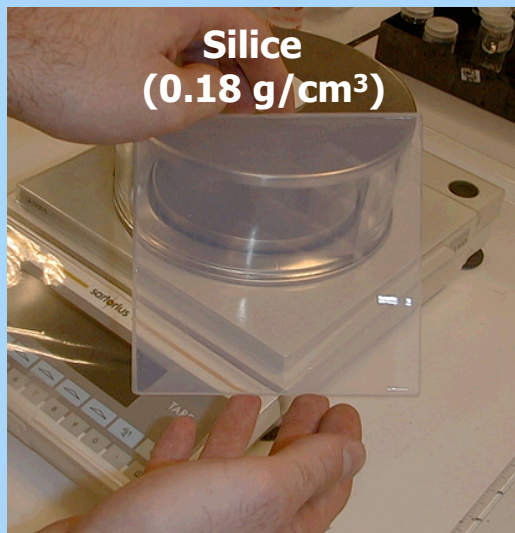
séchés par voie supercritique (CO₂, ...) ou évaporative (si traitement de surface)



I. Introduction (4) : Les aérogels (2)

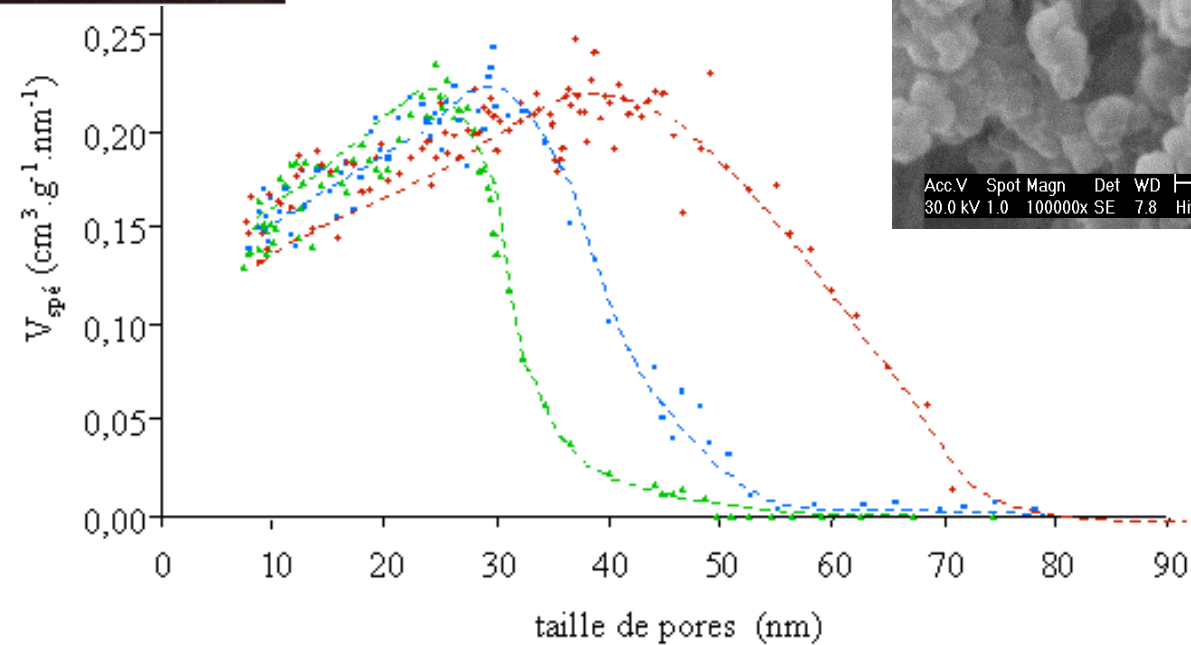
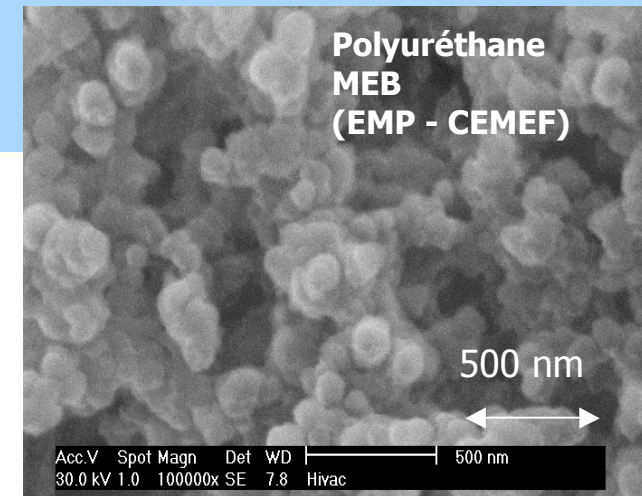
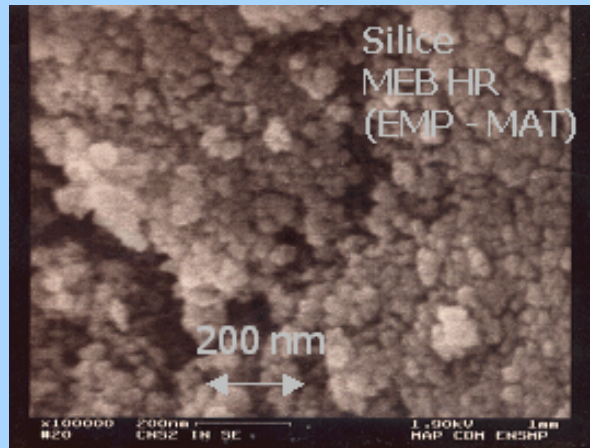
Une large « gamme » de compositions

De l'inorganique ... à l'organique ... en passant par les « hybrides »



I. Introduction (5) : Les aérogels (3)

Des matériaux « légers », nanostructurés et nanoporeux



Transferts conductifs et radiatifs

II. Transferts thermiques (1) : Représentation « de base »

Modèle parallèle découplé

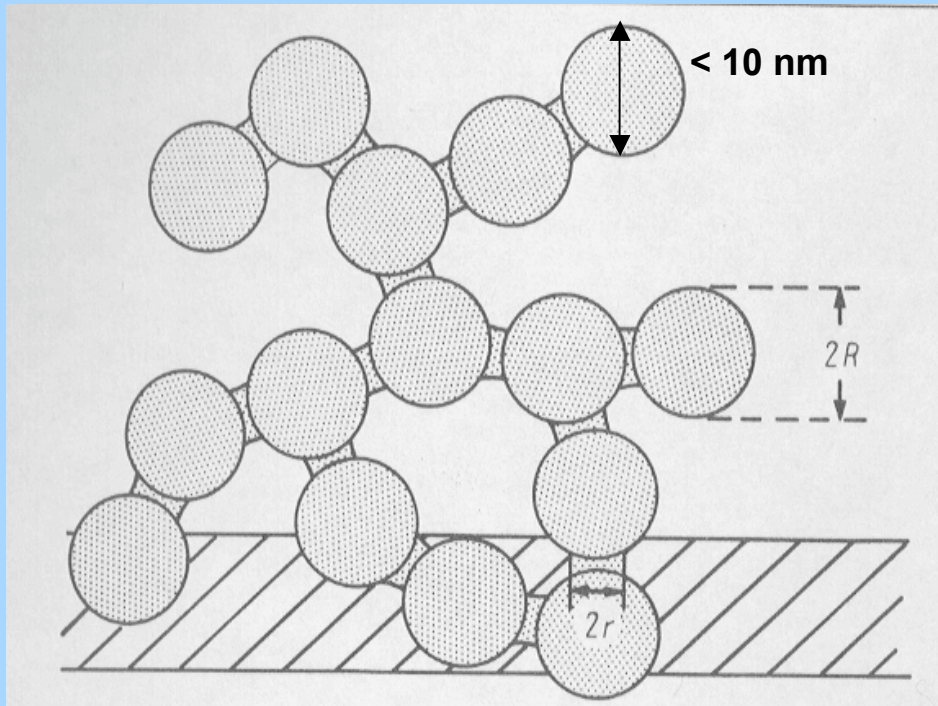
$$eq = \left(1 \right) \cdot s' + g' + rad$$

(à températures « ambiantes »)

II. Transferts thermiques (2) : Conduction « solide » (1)

$$eq = (1) \cdot s' + \cdot g' + rad$$

Influences « structurales »



Faible densité (i.e. très grande porosité)

$$= 1 \frac{\text{aérogel}}{\text{bulk}}$$

Tortuosité « élevée »

Contacts particuliers nanométriques

II. Transferts thermiques (3) : Conduction « solide » (2)

Quelques représentations schématiques

Modèle « géométrique »

$$\frac{s}{bulk} = \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R} \right) e^{2,4(1 - \frac{r}{R})}$$

$$\frac{r}{R} \sim 0,02$$

$$\frac{s}{bulk} \sim 10^{-3}$$

M. Gronauer et J. Fricke,
Acustica, Vol. 59 (1986) 177-181

Modèle « phonique »

$$\frac{s}{bulk} = \frac{1}{bulk} \cdot bulk$$

$$= k \frac{0.88}{bulk} \cdot bulk$$

$k \sim 0.5$ (SiO₂, RF, MF, Carbone, ...)

$$\frac{s}{bulk} \sim 10^{-2}$$

L.W. Hrubesch et R. W. Pekala,
J. Mater. Res., 9, n°3, (1994) 731-738

II. Transferts thermiques (4) : Conduction « gazeuse »

$$eq = \left(1 + \frac{g'}{g} \right) \cdot g' + rad$$

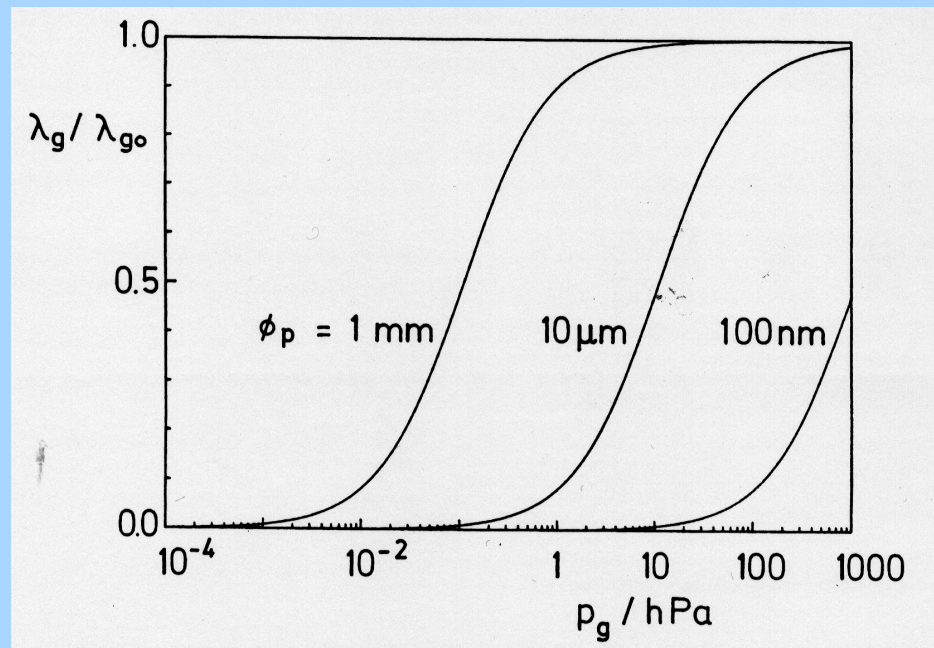
Régime de Knudsen

$$g = \frac{g_0}{1 + \frac{T}{P \cdot d}}$$

($\frac{T}{P \cdot d} = 0,808$ pour l'air)

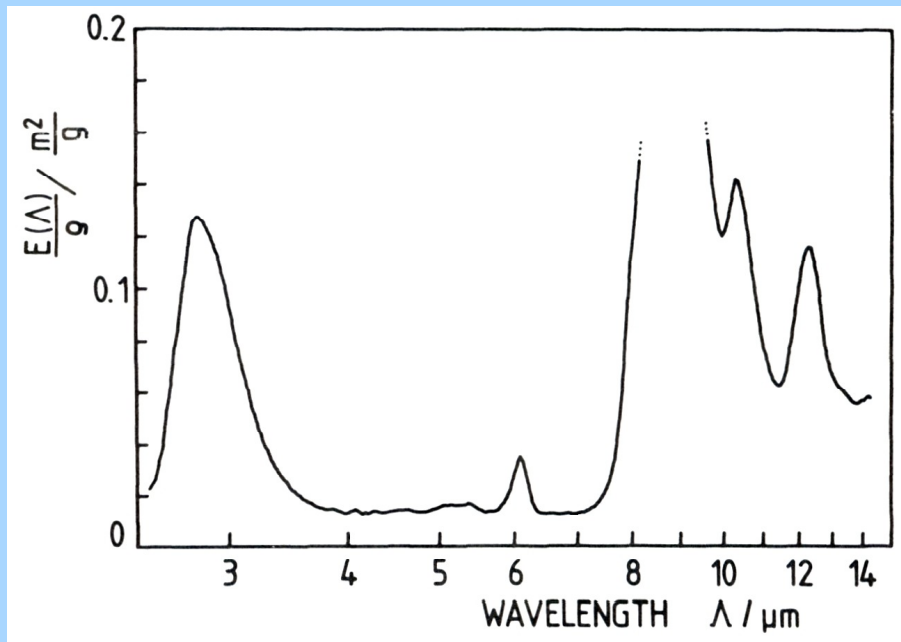
$$g' = \frac{1}{V_{ptot}} \cdot \frac{d_{max}}{d_{min}} \cdot \frac{V}{d} (d) \cdot g(d) \cdot d$$

J. Fricke, « Physical aspects of heat transfer and the development of thermal insulations »
 IEA, International Conference and workshop on « HiPTI – VIP »,
 Zurich EMPA, 22-24/01/2001



II. Transferts thermiques (5) : Contribution radiative

$$eq = (1 - \tau_s) \cdot g' + \tau_{rad}$$



R. Caps, J. Fricke,
Int. J. of Solar Energy 3 (1984) 13-18

Modèle de Rosseland

$$\tau_{rad} = \frac{16}{3} \cdot n^2 \cdot \frac{T_r^3}{E(\lambda)}$$

avec :

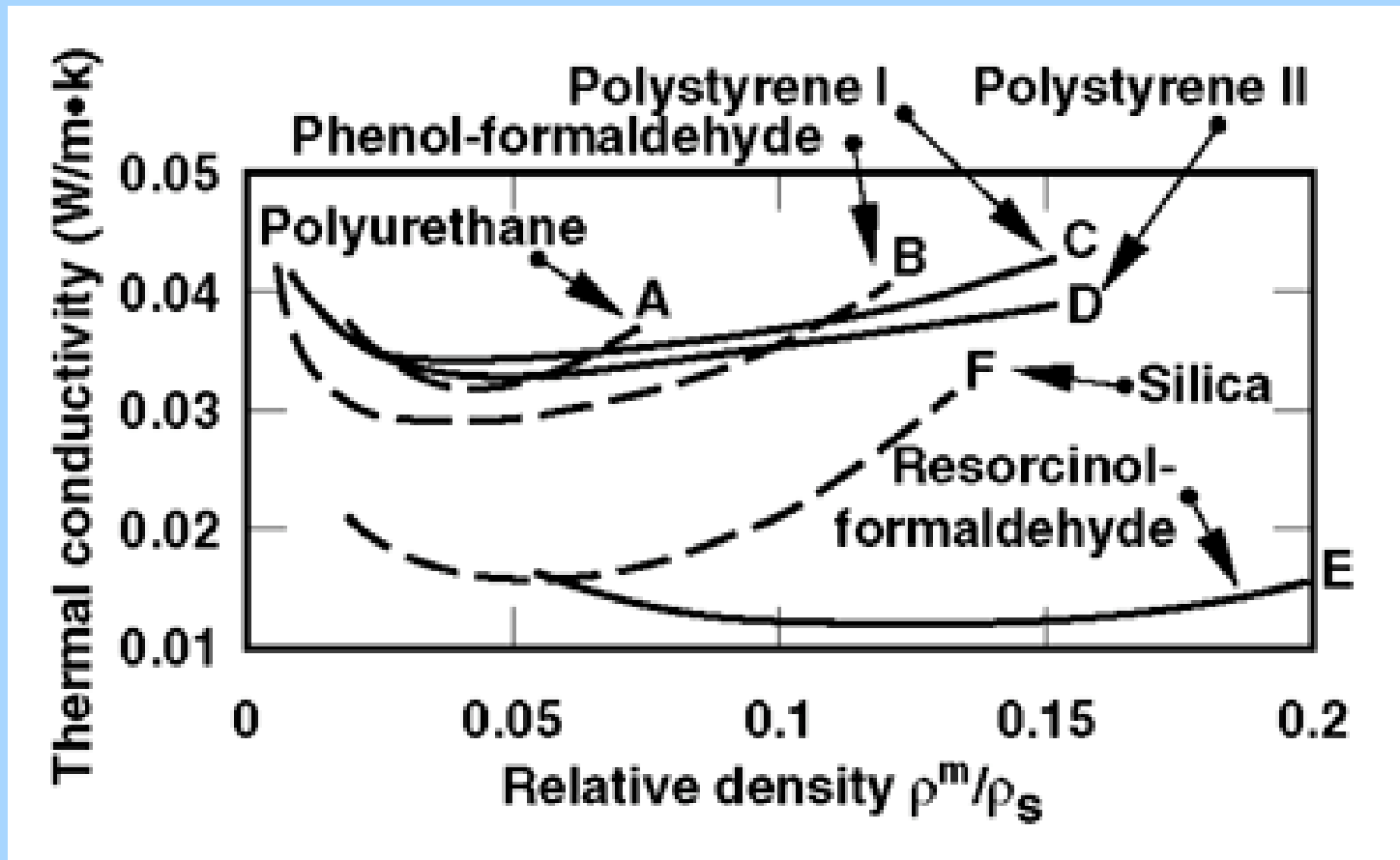
$$n = 1 + 0.25$$

(loi de Gladstone)

$$\frac{1}{E(T)} = \int_0^1 \frac{1}{E(z)} f(z) dz$$

($f(z)$, fonction de Rosseland)

II. Transferts thermiques (6) : Conductivité thermique



(Lawrence Livermore National laboratory)

II. Transferts thermiques (7) : Métrologie

- **Méthodes stationnaires de type « plaque chaude » plutôt privilégiées**

D. Büttner, R. Caps, J. Fricke

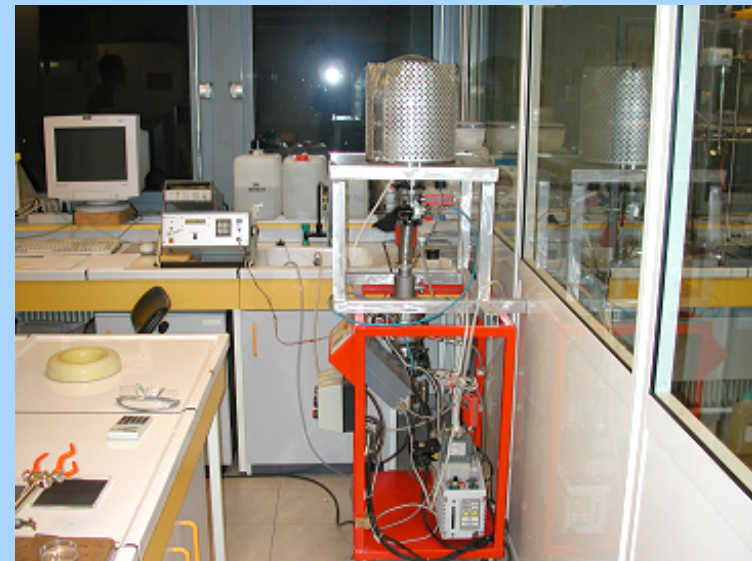
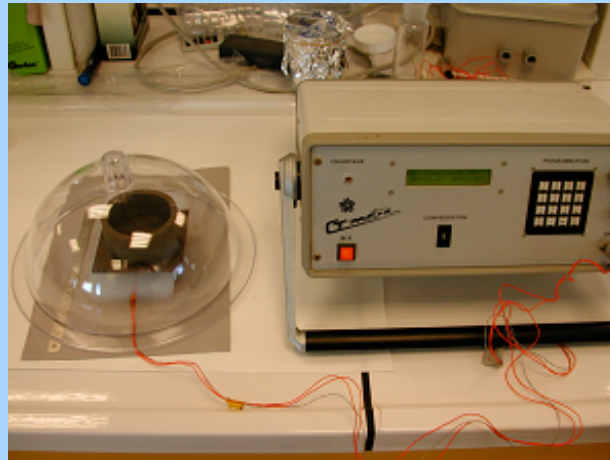
Thermal conductivity of evacuated transparent silica aerogel tiles,
High-Temperatures – High Pressures 17 (1985) 375-380

mais, ...

- **Mesures transitoires « comparables »**

A. Rigacci, B. Ladevie, H. Sallée, Br. Chevalier, P. Achard, O. Fudym

**Measurements of comparative apparent thermal conductivity
of large monolithic silica aerogels for transparent sperinsulation applications,**
High-Temperatures – High Pressures 34 (2002) 549-559

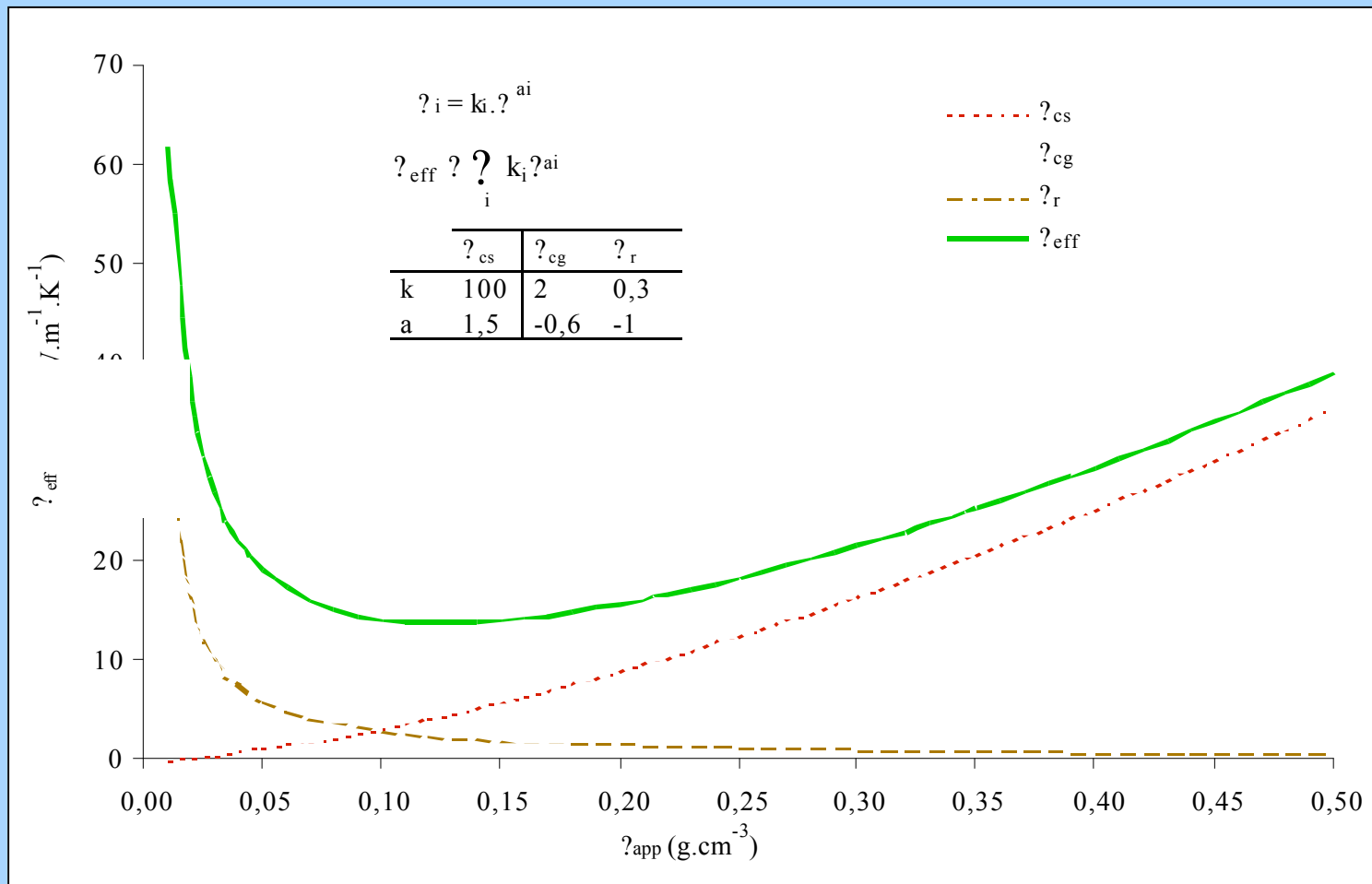


Propriétés thermiques des aérogels de silice



III. Aérogels de silice (1) : Influence de la densité (1)

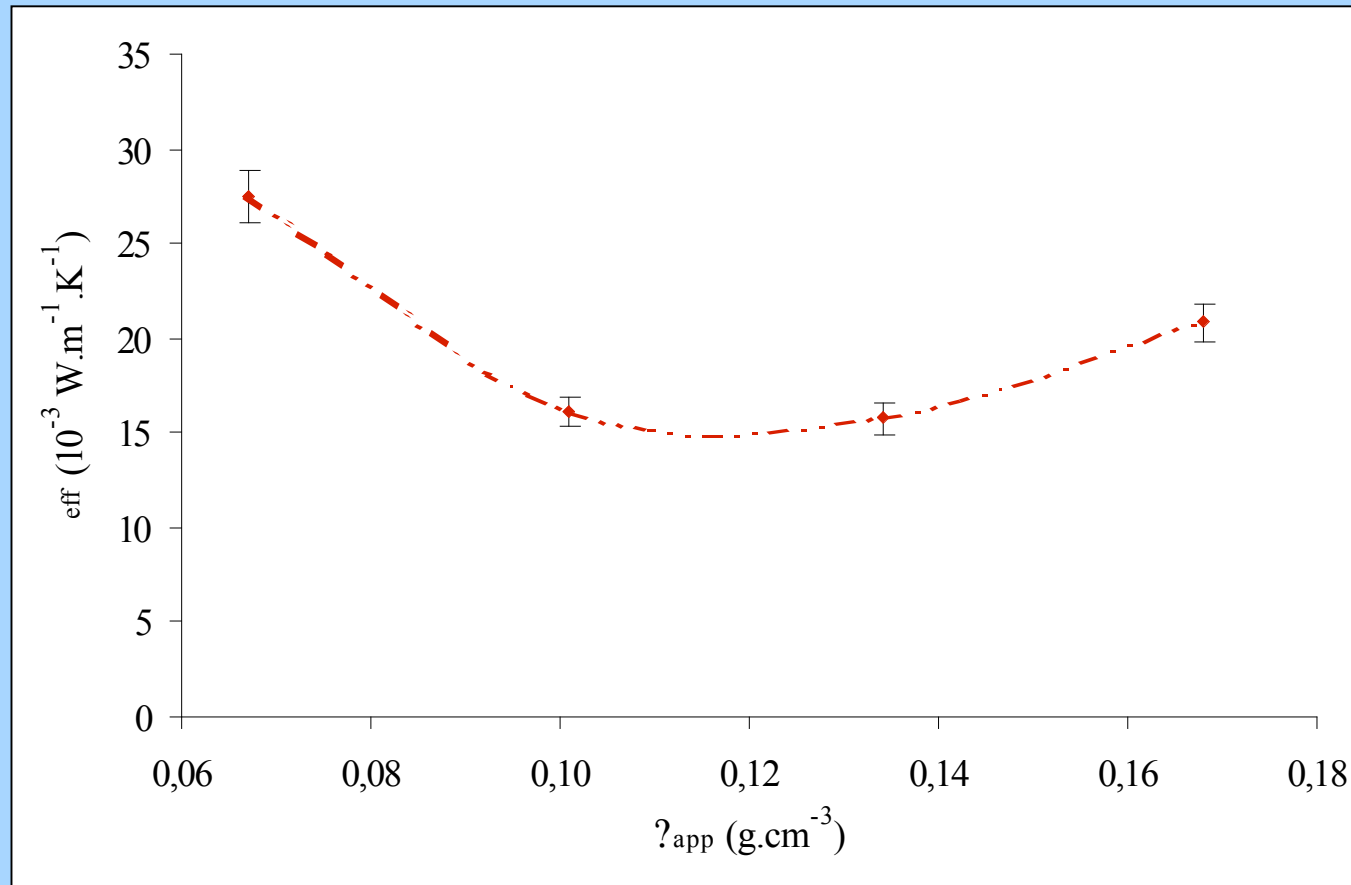
Optimum « attendu » ...



E. Hümmer, X. Lu, T. Rettelbach, J. Fricke, Journal of Non-Crystalline Solids 145 (1992) 211-216

III. Aérogels de silice (2) : Influence de la densité (2)

Optimum mesuré ...



A. Bisson,

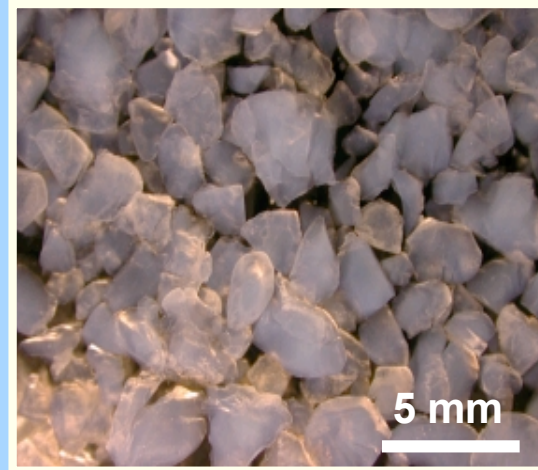
« Synthèse et étude de matériaux nanostructurés à base de silice pour la superisolation thermique »
Thèse Ecole des Mines de Paris (cofinancement ADEME/PCAS)

III. Aérogels de silice (3) : Influence de la mise en œuvre et du vide partiel (1)

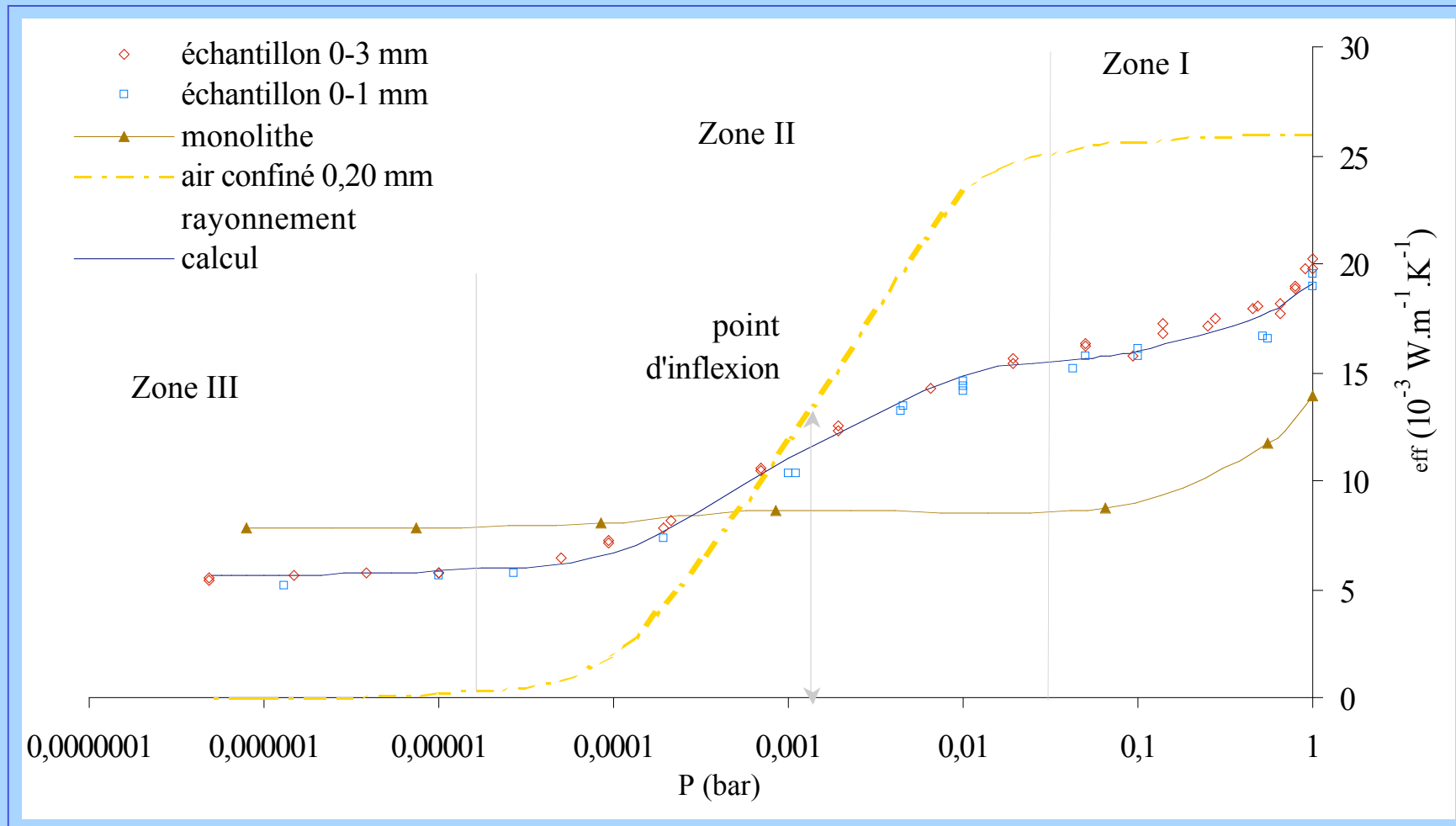
Aérogels monolithiques



Aérogels divisés

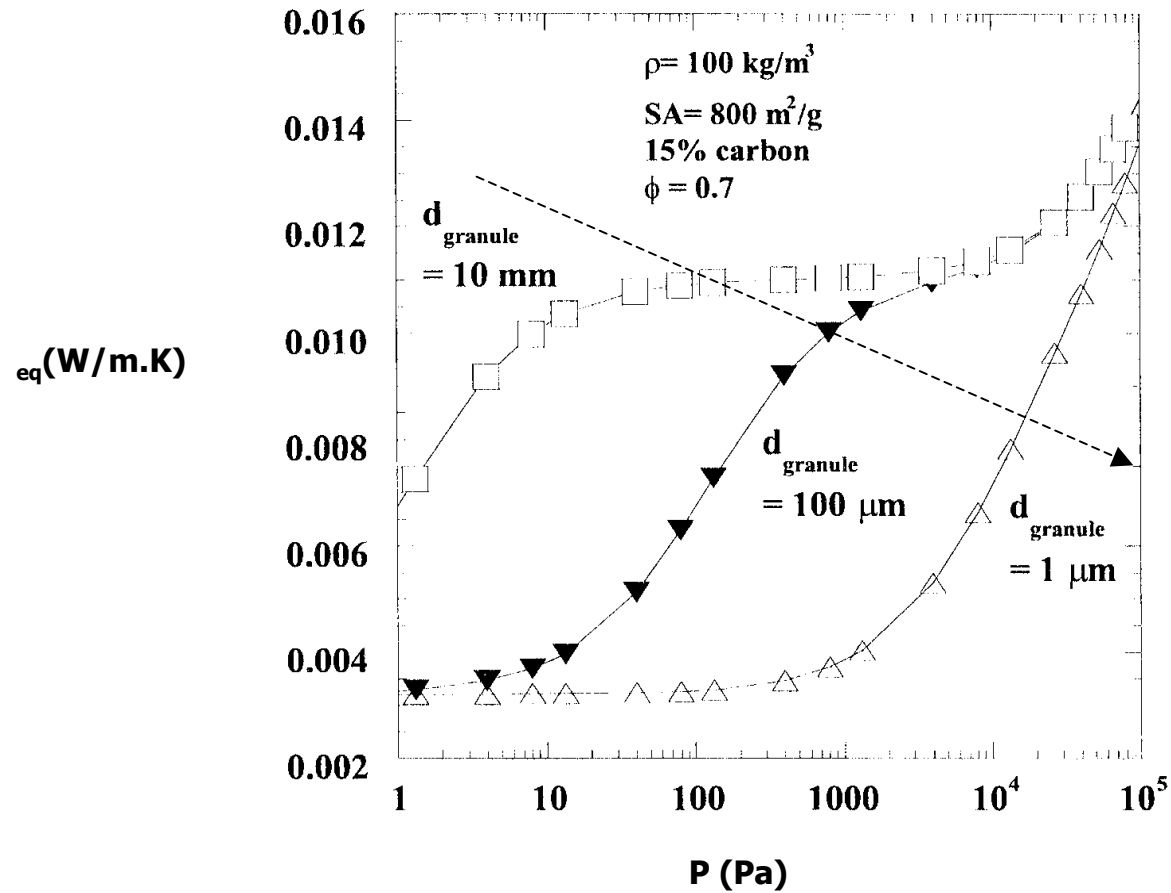


III. Aérogels de silice (4) : Influence de la mise en œuvre et du vide partiel (2)



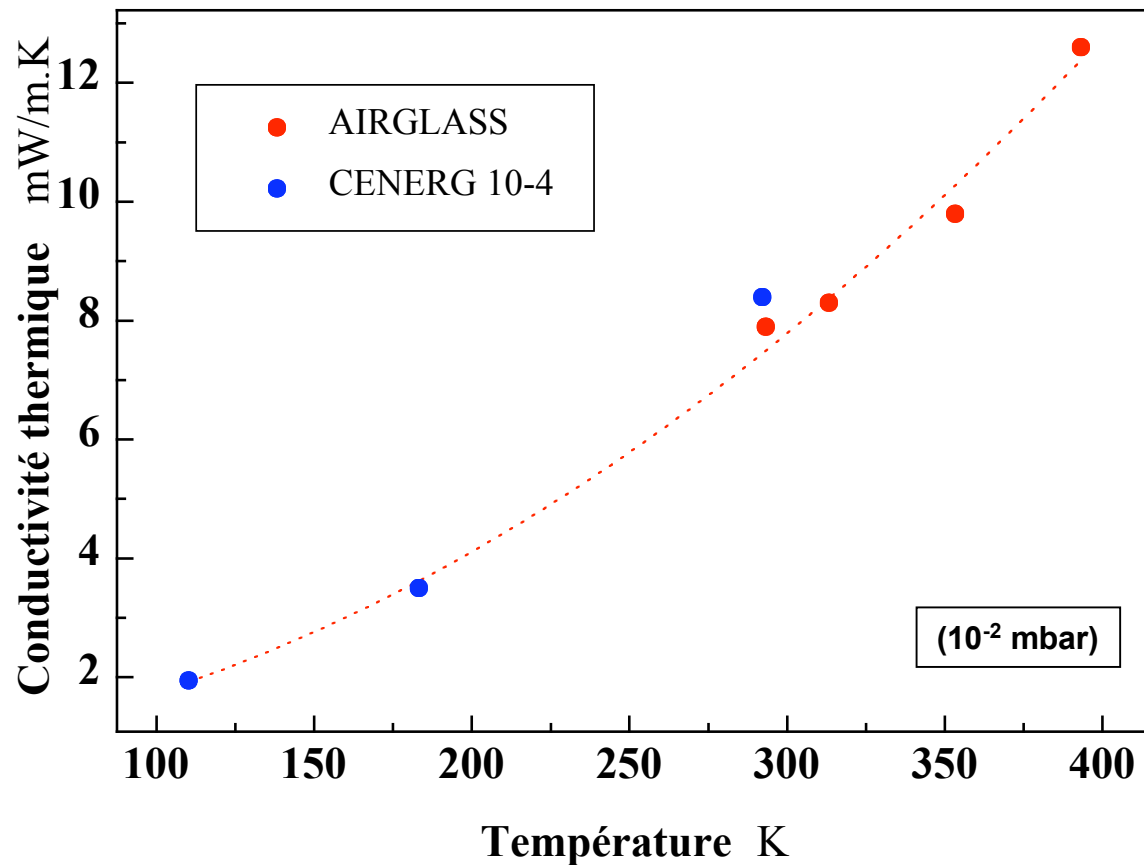
A. Bisson,
« Synthèse et étude de matériaux nanostructurés à base de silice pour la superisolation thermique »
Thèse Ecole des Mines de Paris (cofinancement ADEME/PCAS)

III. Aérogels de silice (5) : Influence de la granulométrie



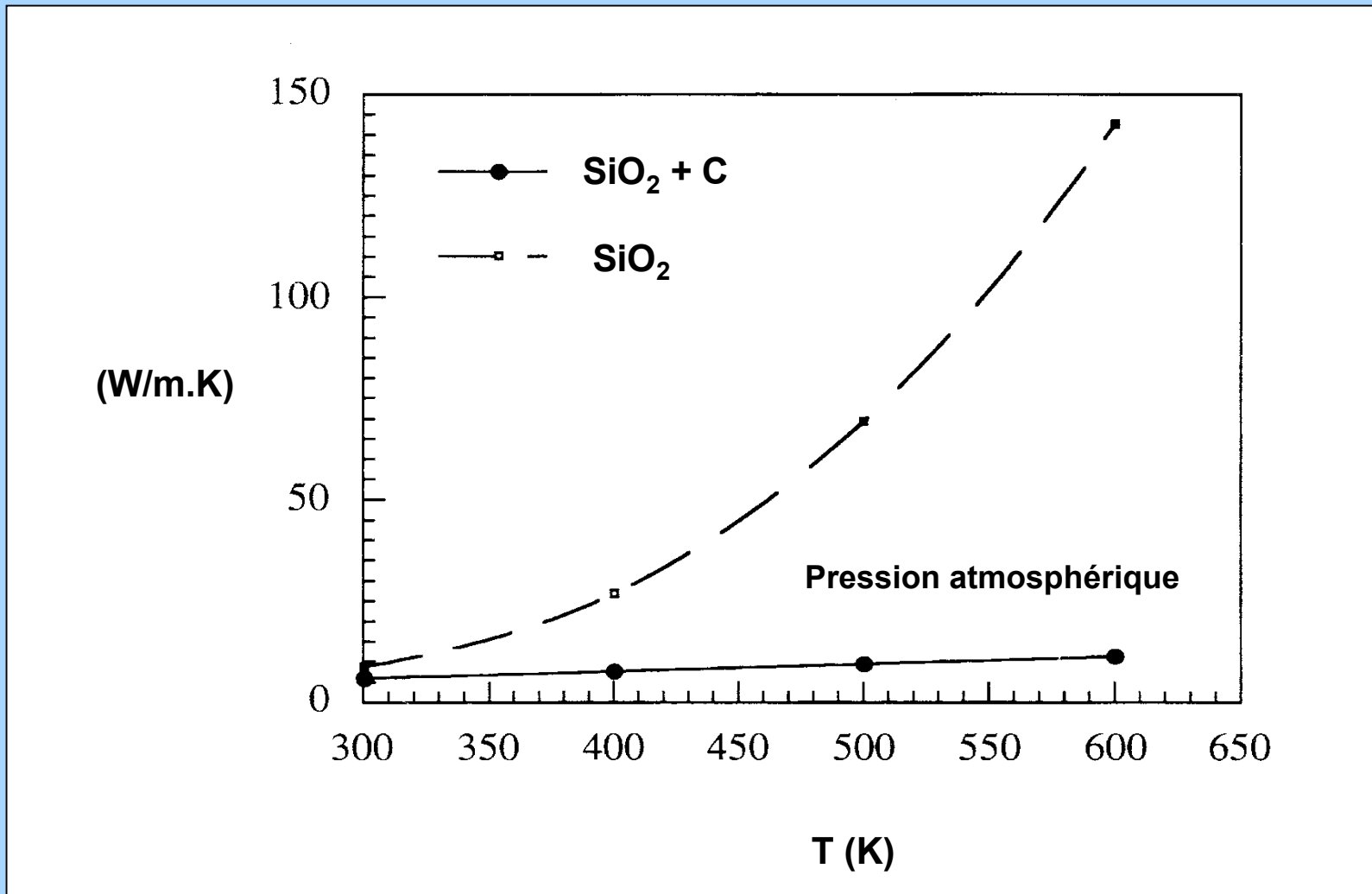
D. Smith *et al.*, JNCS, 225, (1998)

III. Aérogels de silice (6) : Influence de la température (1)



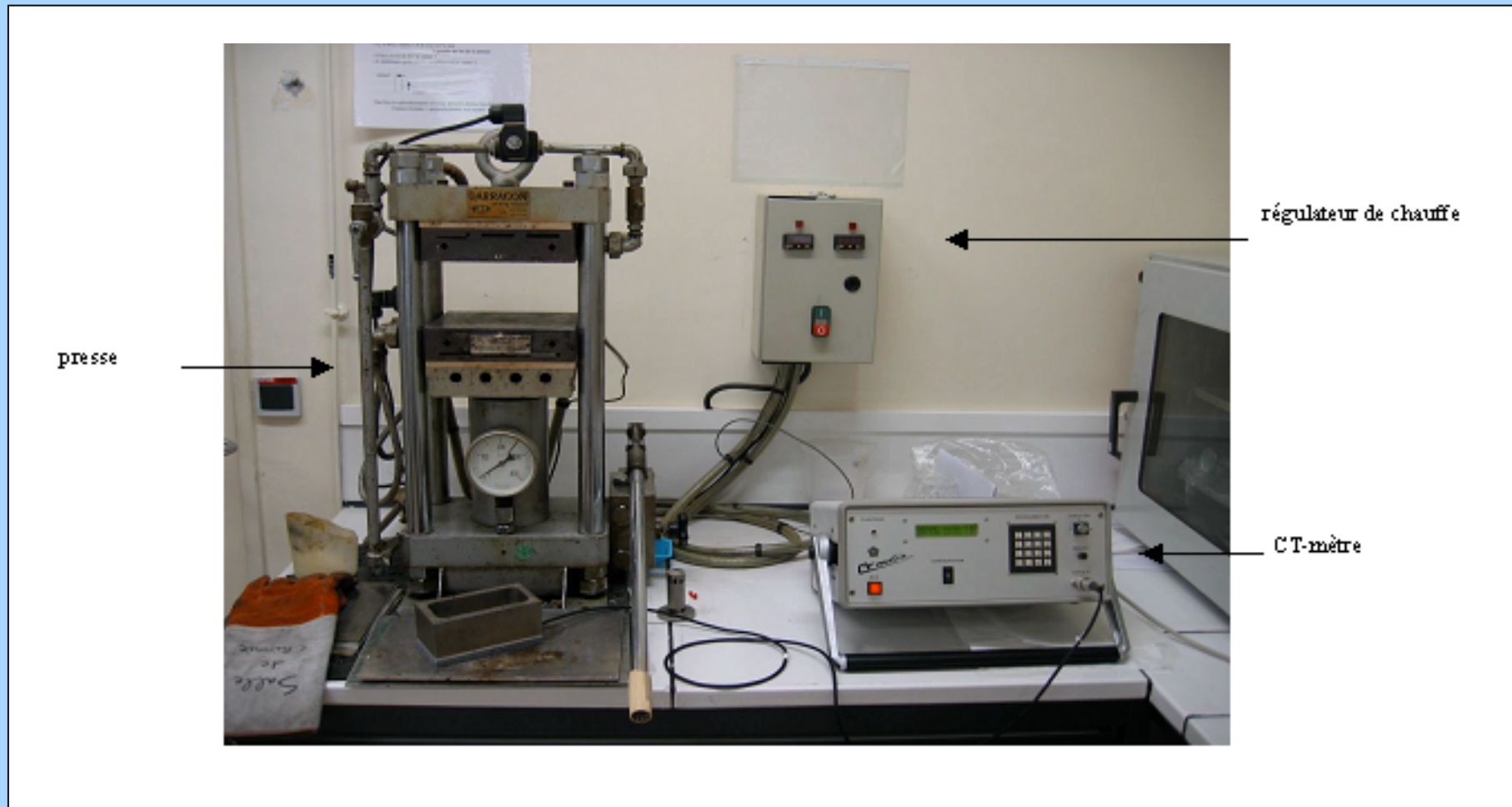
Collaboration ARMINES-CENERG / CSTB

III. Aérogels de silice (7) : Influence de la température (2)



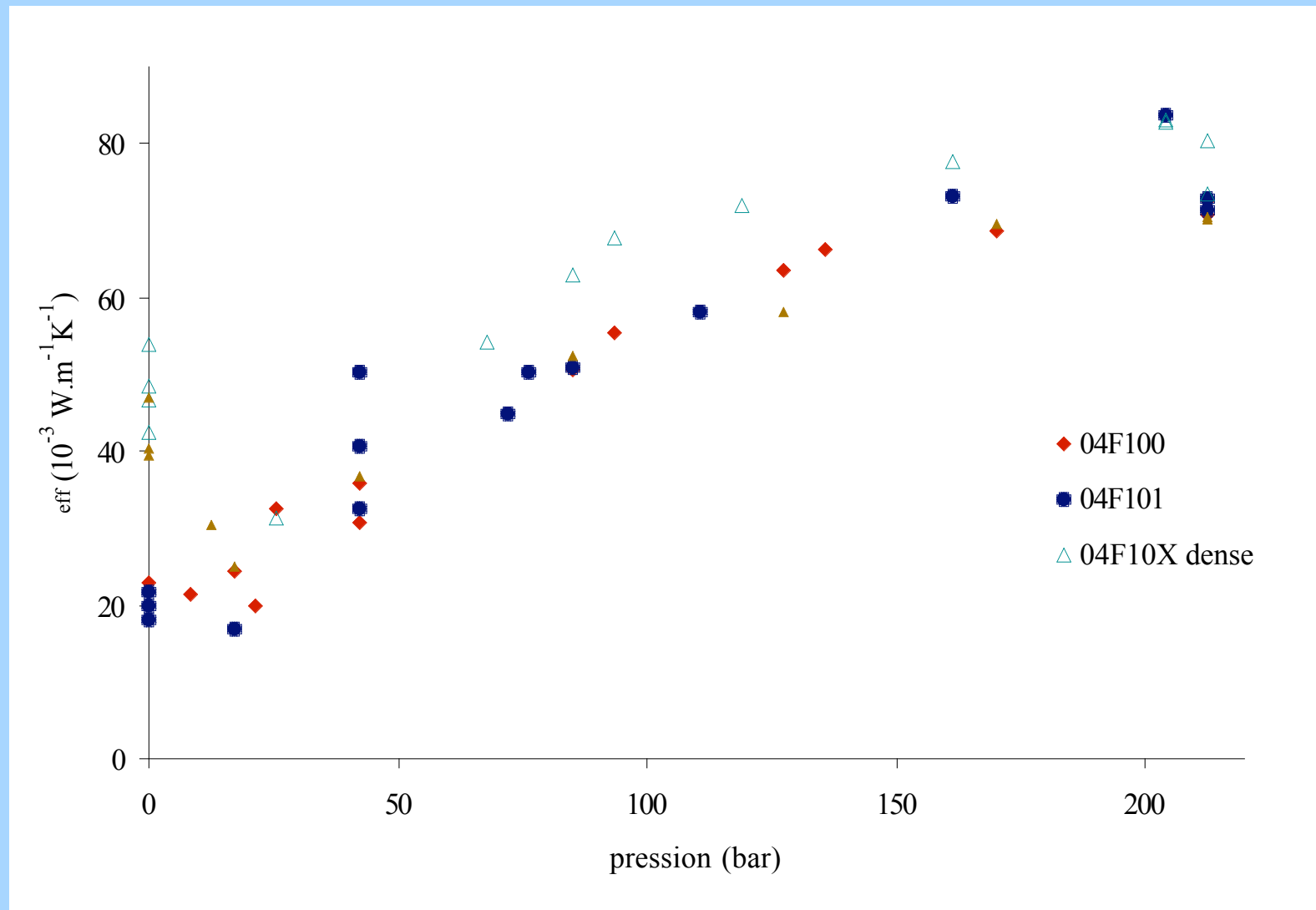
S.Q. Zeng, A. Hunt, R. Greif, Journal of Non-Crystalline Solids 186 (1995) 2271-2277

III. Aérogels de silice (8) : Influence de la compression (1)



Moyens expérimentaux ARMINES/CEP + CEMEF

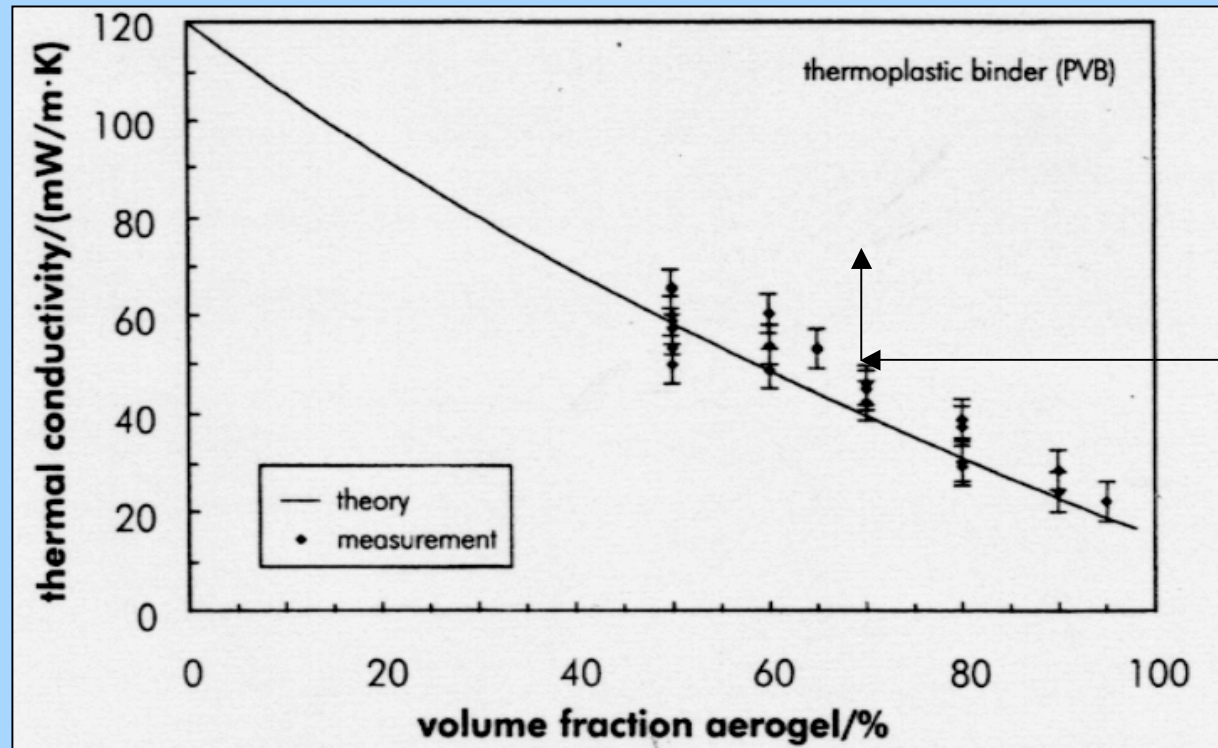
III. Aérogels de silice (9) : Influence de la compression (2)



III. Aérogels de silice (10) : Influence du liantage

Un exemple de liantage organique

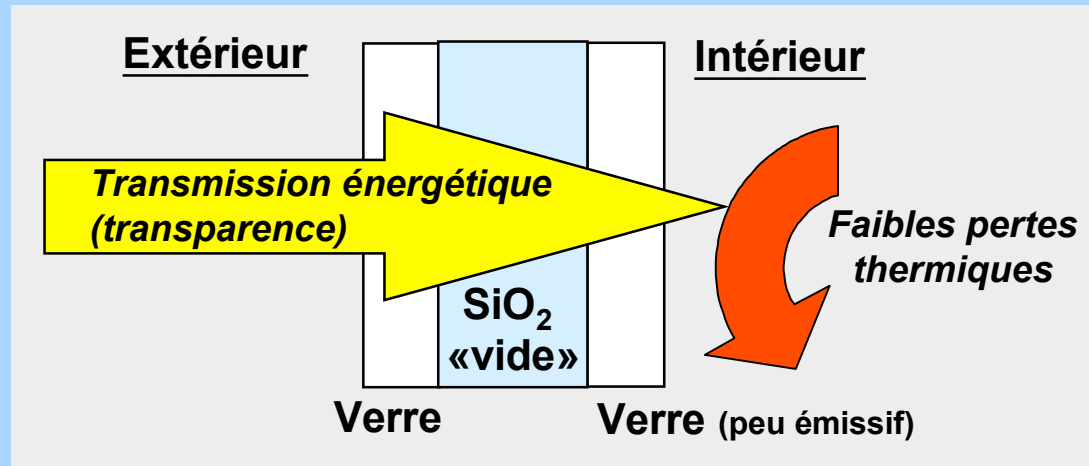
Nanogel™ / PVB (125 mW/m.K)



M. Schmidt et F. Schwertfeger, JNCS 225 (1998)

III. Aérogels de silice (11) : Applications envisagées (1)

Vitrage « aérogel »



Projet Eu FP5 HILIT+ (ENK6-CT-2002-00648)

U ~ 0.6 W/m₂.K

III. Aérogels de silice (12) : Applications envisagées (2)

Matériau « de remplissage »



Convention ADEME/ARMINES/PCAS n°01.04.062

III. Aérogels de silice (13) : Applications envisagées (3)

Isolants en rouleaux (ou *blankets*)





Les matériaux de type aérogels :
Des super-isolants thermiques nanostructurés

Arnaud RIGACCI

Ecole des Mines de Paris

Centre Energétique et Procédés (CEP)

Equipe « Energétique, Matériaux et Procédés »

(Etablissement de Sophia Antipolis)