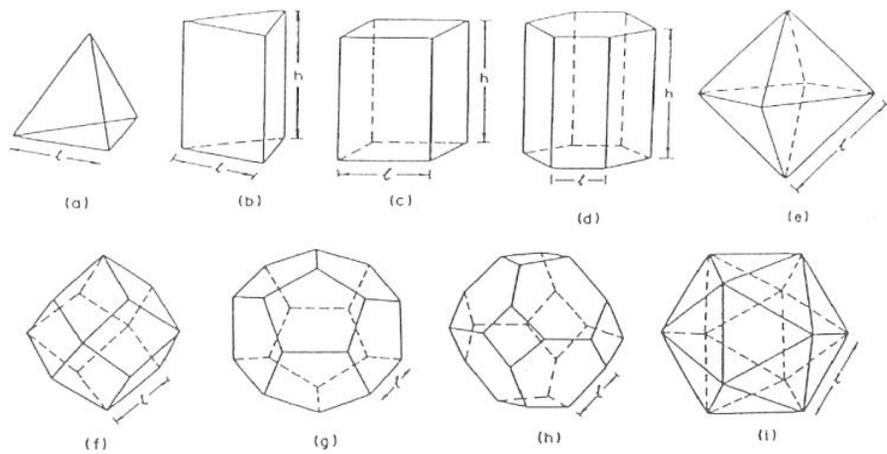
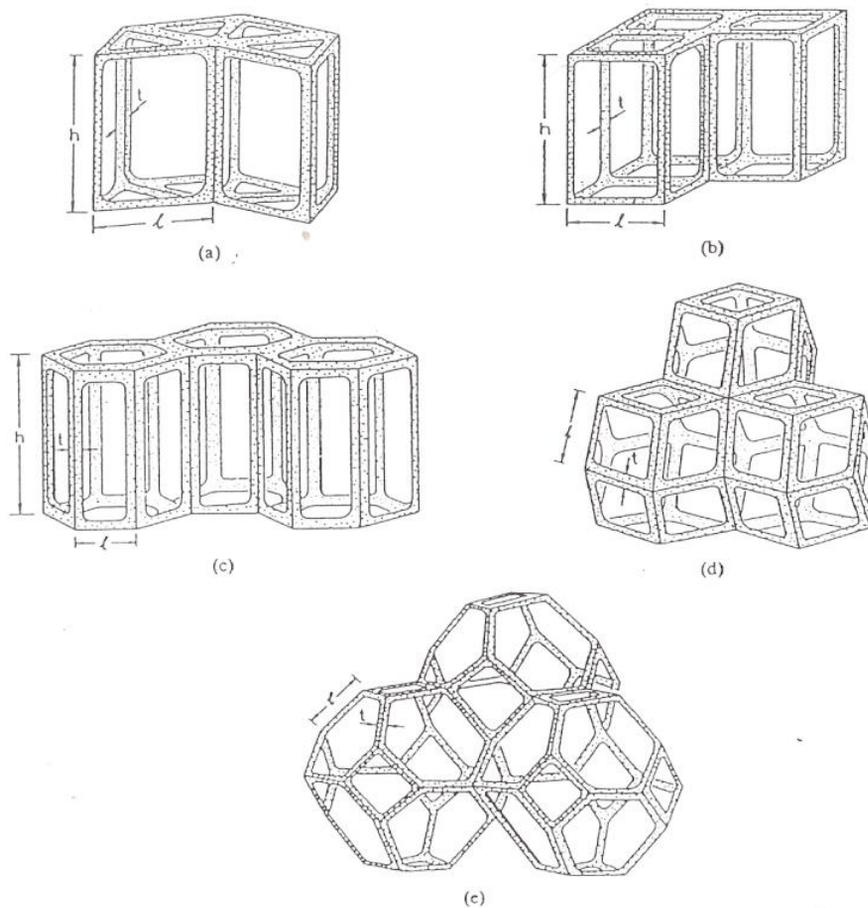


D'après C. Palmonari et G. Timellini
 (Centro di Ricerca e Sperimentazione per l'Industria Ceramica-Bologna)
 La Ceramica N°1/1986

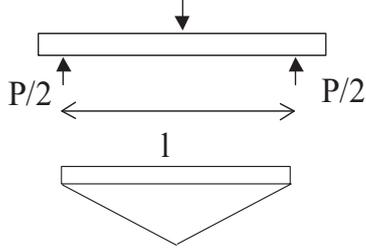


Cellules polyédriques tridimensionnelles : (a) Tétraèdre; (b) Prisme triangulaire; (c) Prisme rectangulaire; (d) Prisme hexagonal; (e) Octaèdre; (f) Dodécaèdre rhomboédrique; (g) Dodécaèdre pentagonal; (h) Tétradécaèdre; (i) Isocaèdre.



Arrangement spatial de polyèdres : (a) Prismes triangulaires; (b) Prismes rectangulaires; (c) Prismes hexagonaux; (d) Dodécaèdre rhomboédrique; (e) Tétradécaèdre.

essai de flexion (3 points)



Poutre à section cylindrique

ou

rectangulaire

$$E = \frac{4}{3\pi} \frac{P l^3}{d^4 Y}$$

$$E = \frac{P}{4bY} \left(\frac{l}{h}\right)^3 \quad \begin{matrix} l > 10 h \\ h < b/2 \end{matrix}$$

Basses fréquences :
pendule de torsion
(libre: bras oscillant)

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi d^4 G}{32 I \ell}}$$

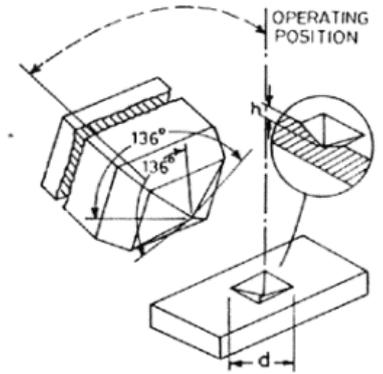
Domaine du kHz :
mise en résonance

$$f = \frac{3.56}{\sqrt{12}} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{h}{\ell}$$

Céramique	E (GPa)	v	G (GPa)
Al ₂ O ₃	420	0.26	166
3Al ₂ O ₃ -2SiO ₂	220	0.3	85
ZrSiO ₄	200	-	-
ZrO ₂ (PS)	200	0.31	76.3
ZrO ₂	206	0.31	76.3
2MgO-SiO ₂	147	-	-
TiO ₂	176	0.25	70.4
SiAlON	290	-	-
Si ₃ N ₄ (pressé à chaud)	310	0.27	122
Si ₃ N ₄ (RBSN)	160	0.28	62.5
SiC	410	0.16	176.7
WC	620	0.21	256

Verre	E (GPa)	v	G (GPa)
Borosilicate	60	0.22	24.6
Sodocalcique	70	0.21	19.3
Vitrocéramique LAS	100	-	-
Vitrocéramique MAS	120	-	-
SiO ₂	70	0.16	30.17

2) Dureté



La Dureté Vraie :
$$H = \frac{F}{S \text{ projetée de l'emprunte}}$$

La Dureté Vickers :
$$H_V = \frac{F}{S \text{ totale de l'emprunte}}$$

Dureté Rockwell : H_{RB} (Bille) ou H_{RC} (Cône)

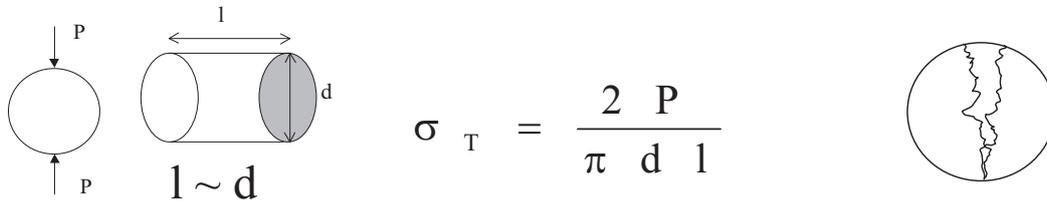
Dureté Knopp : H_K

Matériau	Dureté kg.mm^{-2}	Remarques	Références
B_4C	K 4000 à 8000	polycristallin	Bouchascourt 1978
SiC	V 2100 à 3250	monocristallin, selon l'orientation	Niihara 1979
SiC	V 3000 à 1000	monocristallin, selon l'orientation	Hirai 1979
		respectivement de 0°C à 1500°C	
SiC KI	V 2740	Carborundum	Carborundum 1978
SiC α	V 2800	Carborundum	Carborundum 1979
TiC	V 1500 - 3200	selon stoechiométrie	Chermant 1969
$Si_3N_4 \alpha$	V 2825 à 3630	monocristallin, selon l'orientation	Niihara 1979
$Si_3N_4 \beta$	V 1445 - 2050	monocristallin, selon l'orientation	Chakraborty 1982
$Si_3N_4 \beta$	V 1650 - 1900	polycristallin, selon teneur en $BeSiN_2$	Greskovich 1983
$SiO_2 \alpha$	V 1200 - 1570	monocristallin, selon l'orientation	Chakraborty 1982
SiYALON	K 900 - 1160	selon composition	Messier 1982
Al_2O_3	V 1350 - 2250	selon $\bar{D}(Al_2O_3)$ et $V_V(P)$	Ramlings 1983
Al_2O_3 -ALON	V 2300	aluminalon	Turpin-Launay 1983
$ZrO_2, 3Y_2O_3$	V 1200		Ramadass 1983
BN	K 3000 à 4500	monocristallin, selon l'orientation	Brookes 1983
AlN	V 1600	polycristallin	Boch 1982
TiN	V 1800	polycristallin	Yamada 1980

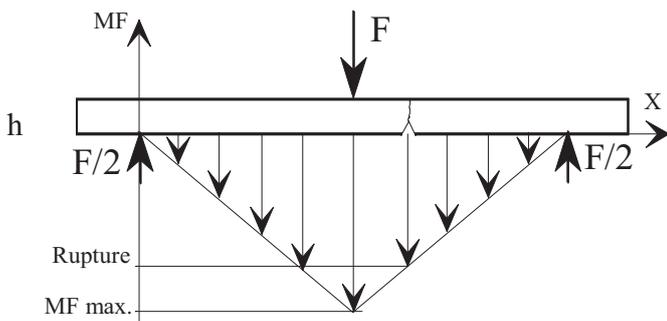
Tableau XI : Valeurs de la dureté Vickers (V) ou Knoop (K) pour différentes céramiques.

Techniques de caractérisation de la résistance

test brésilien (ou contrainte de compression diamétrale)

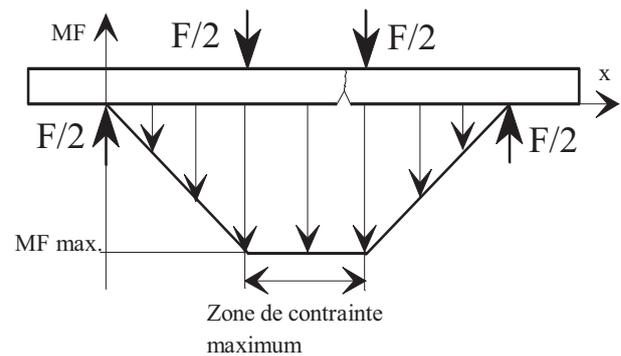


essai de flexion (3 points)



$$\sigma_f = \frac{8Fl}{\pi d^3} \quad \sigma_f = \frac{3Fl}{2bh^2}$$

essai de flexion (4 points)



$$\sigma_f = \frac{3F(l-l')}{2bh^2} \quad \sigma_f = \frac{8F(l-l')}{\pi d^3}$$

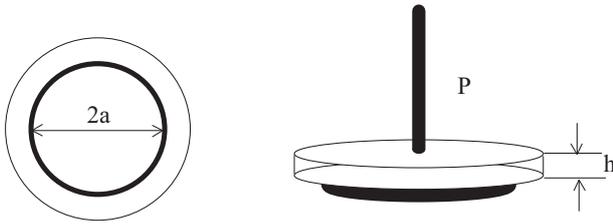
Illustration dans le cas de 32 éprouvettes de béton

Essai de traction	$\sigma_R = 2,1 \text{ MPa}$
Essai de compression diamétrale	$\sigma_R = 2,8 \text{ MPa}$
Essai de flexion	$\sigma_R = 4,2 \text{ MPa}$

Pour toutes les céramiques, la résistance à la flexion est environ 2.5 fois supérieure à la résistance à la traction.

Il met en œuvre des éprouvettes sous forme de disque.
Ce disque est supporté par un anneau.

Flexion biaxiale :



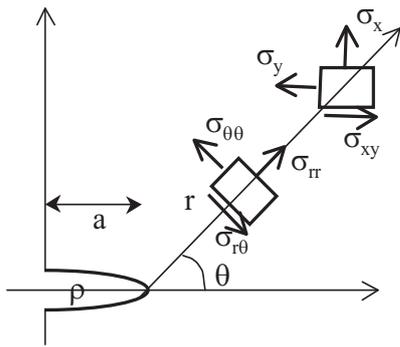
h : épaisseur de l'échantillon,
a : rayon de l'anneau support,
P : la charge maximale
r : rayon de l'anneau pressant

$$\sigma_{fb} = \frac{P}{h^2} \left[(1 + \nu) \left(0.485 \ln \left(\frac{a}{h} \right) + 0.52 \right) + 0.48 \right]$$

$$\sigma_{fb} = \frac{3 P}{2 \pi h^2} \left[\frac{(1 - \nu) (a^2 - r^2)}{2 b^2 + (1 + \nu) \ln \left(\frac{a}{r} \right)} \right]$$

	Résistance en flexion (MPa)	Résistance en compression (MPa)
3Al2O3 2SiO2	230	
Al2TiO5	35	
ZrO2	500 – 2500	
Al2O3	300	
SiC (fritté)	470	2100
Si3N4	230	1900
Si3N4 (pressé à chaud)	700	
Vitrocéramique LAS	100 - 150	
Vitrocéramique MAS	110 – 170	
SiO2 vitreux	100	
Verre borosilicaté	80	
Verre silicosodocalcique	80	

Analyse d'Irwin



$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta)$$

$$u_i = \frac{K_I}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} g_i(\theta)$$

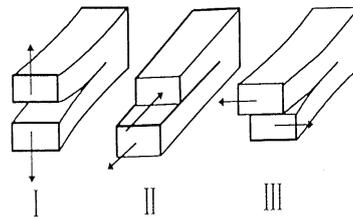
$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$$

Facteur d'intensité de contrainte

TENACITE

$$K_{IC} = \sigma_r Y \sqrt{a_c}$$

Modes de rupture



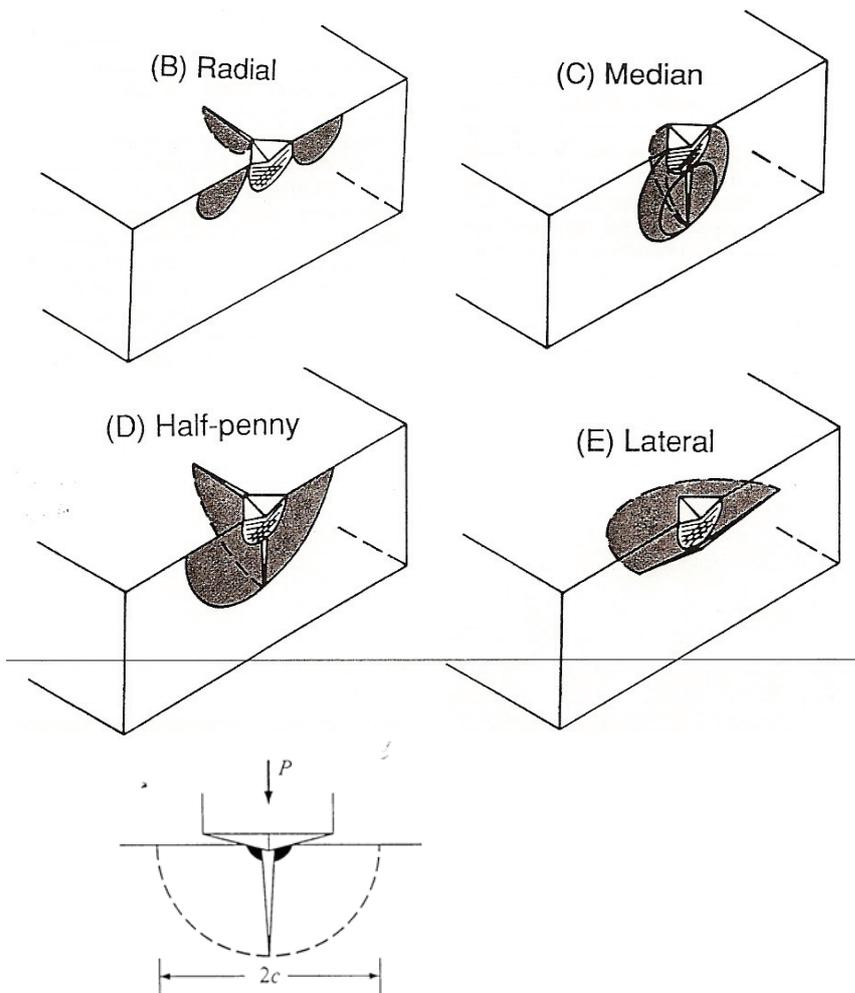
Le calcul en théorie élastique donne des valeurs des contraintes et des déplacements en tout point au voisinage de la fissure (Irwin, Westergaard) . Soit un élément dx, dy à une distance r de la fissure, et l'angle θ avec le plan de la fissure : il est soumis à des contraintes normales σ_x et σ_y et un cisaillement τ_{xy} .

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos(\theta/2) [1 - \sin(\theta/2) \sin(3\theta/2)]$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos(\theta/2) [1 + \sin(\theta/2) \sin(3\theta/2)]$$

$$\tau_{xy} = \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin(\theta/2) \cos(\theta/2) \cos(3\theta/2)$$

Matériau	Densité g/cm ³	Energie de rupture J/m ²	K _{IC} MPa (m) ^{1/2}
Acier à bas C	7.8	-	150
Aluminium	2.7	-	100-350
Si ₃ N ₄	3.03 à 3.07	20 - 60	4.5
SiC	2.87 à 3.09	150-035	4.8
Al ₂ O ₃	35	18 - 46	3.4 - 6.3
WC	1	420	21
Silice		4.42	0.79 - 1
Verre ordinaire		-	0.7
PMMA	-	600	2
Béton	2.5		0.2
Béton armé			10-15
Ciment	-	-	0.3

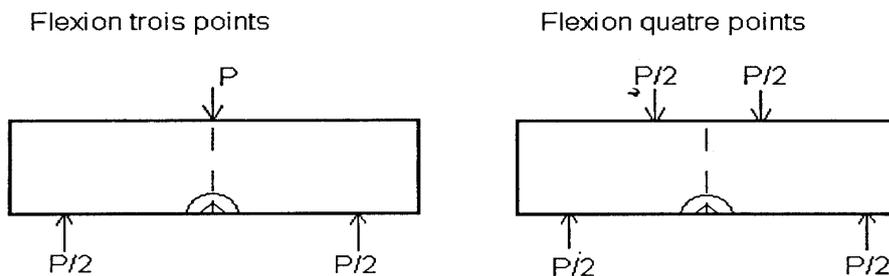


Calcul du K_{IC} à partir des caractéristiques d'une empreinte réalisée par indentation

Vickers

$$K_{IC} = \alpha P C^{-3/2}$$

Calcul du K_{IC} par essai de flexion 4 points post-indentation



$$K_{IC} = (0.016 \pm 0.004) \left(\frac{E}{H} \right)^{1/2} \frac{P}{C^{-3/2}}$$

Avec $H = P / 2d^2$

→ Valeur obtenue par étalonnage

III Effet de la porosité sur les propriétés mécaniques

1) Cas des faibles porosités ($P < 0.3$ typiquement)

a) Effet de la porosité sur la rigidité :

Relations analytiques : Rice R.W.

Treatise on materials science and technology Vol.11 Properties and microstructure
 Edited by R.K. MacCrone

Mackenzie (1950)

concentration limitée de
 pores sphériques ayant une
 distribution en taille uniforme

$$G = G_0 \left(1 - \frac{5(3K_0 + 4G_0)}{9K_0 + 8G_0} P + \theta P^2 \right)$$

$$K = K_0 \left(\frac{1}{1-P} + \frac{3K_0}{4G_0} \frac{P}{1-P} + \zeta P^3 \right)^{-1}$$

Budiansky (1970)

Corps isotropes (verres)

$$G = G_0 \left[1 - 15P \frac{1-\nu}{7-5\nu} \right]$$

$$K = K_0 \left[1 - \frac{3P(1-\nu)}{2(1-2\nu)} \right]$$

$$E = \frac{9KG}{3K+G}$$

a) Effet de la porosité sur la rigidité :

Relations empiriques :

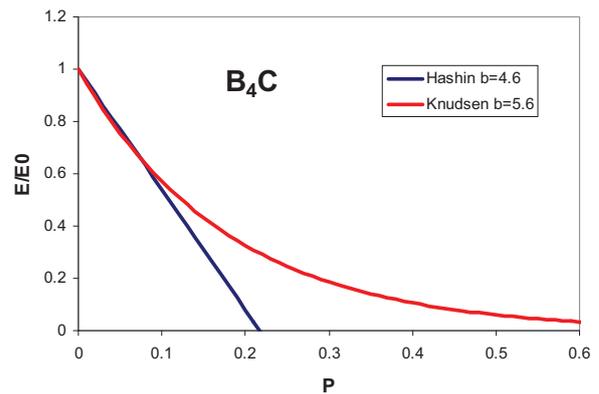
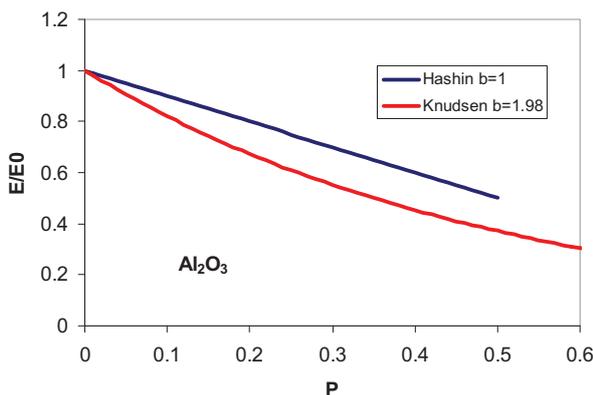
Knudsen (1959)

$P < 50\%$

$$E = E_0 e^{-bP}$$

Hashin (1964)

$$\begin{cases} E = E_0 (1 - P) \\ E = E_0 (1 - b'P) \end{cases}$$



b) Effet de la porosité sur la dureté :

Notion de micro-plasticité

Grande dispersion dans les mesures

$$H = H_0 e^{-bP}$$

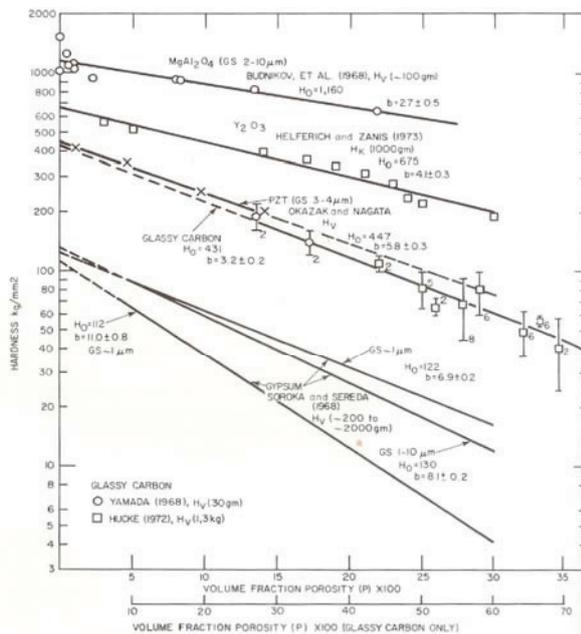
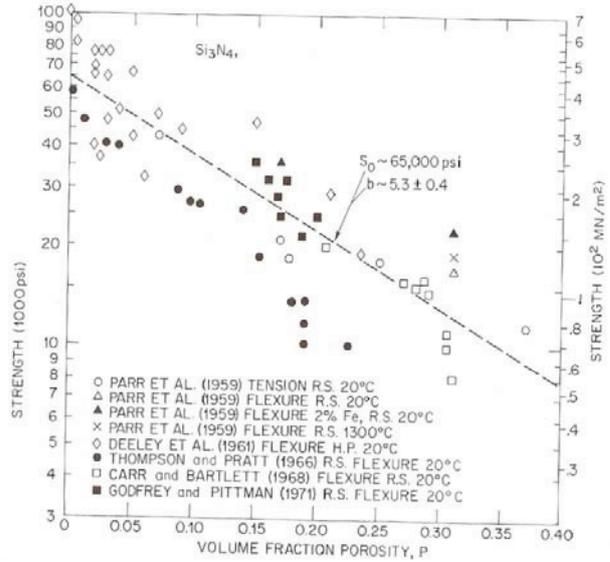


Fig. 40. Hardness of various ceramic materials versus volume fraction porosity. Note that the lower scale is for glassy carbon only. Sub- or superscripts represent the number of tests averaged for a given data point, and bars indicate the standard deviation.

c) Effet de la porosité sur la résistance mécanique :



Pore = concentrateur de contrainte ?

Pore = partie de la fissure ?

c) Effet de la porosité sur la résistance mécanique :

Relations empiriques :

Balshin (1949) $\sigma = \sigma_0 (1 - P)^m$

Dérivé des métaux

Knudsen (1959) $\sigma = \sigma_0 e^{-bP}$

b varie avec la répartition, la forme et la distribution en taille des pores

Fortes porosités

Schiller (1958)

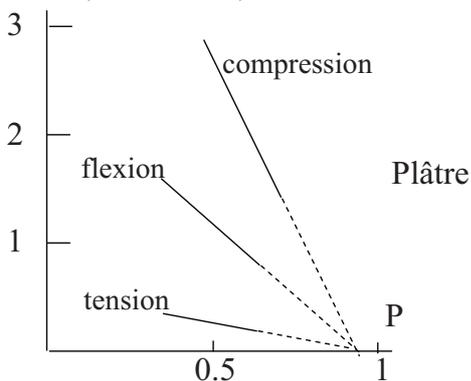
σ (unités arbitraires)

$\sigma = \sigma_0 (1 - (P/P_C)^{1/3})$

pores sphériques

$\sigma = \sigma_0 (1 - (P/P_C)^{1/2})$

pores cylindriques



III Effet de la porosité sur les propriétés mécaniques

2) Cas des fortes porosités (céramiques cellulaires)

Courbe $\sigma = f(\varepsilon)$ 3 zones : - élasticité
- plateau d'écrasement des cellules
- densification

a) Effet de la porosité sur la rigidité : (porosité ouverte)

$$E_m / E_s = A (\rho_a / \rho_s)^2 \quad \text{avec } A \sim 1$$

$$G_m / E_s = C (\rho_a / \rho_s)^2 \quad \text{avec } C \sim 3/8$$

$$\nu = A/2C - 1$$

donc ν indépendant de ρ_a

b) Effet de la porosité sur la résistance mécanique : (porosité ouverte)

L'écrasement est le mécanisme continu pendant lequel toute augmentation de la charge va entraîner une déformation très importante consécutive à la rupture séquentielle des cellules les unes après les autres.

$$\sigma_m / \sigma_s = V (\rho_a / \rho_s)^{3/2} \quad \text{avec } V \sim 0.65$$

c) Effet de la porosité sur la ténacité :

Dans les céramiques expansées à cellules ouvertes, la craquelure s'étend de manière discrète. Chaque fois qu'un barreau est coupé, la fracture avance de la largeur de la cellule.

$$K_{IC}^m / K_{IC}^s = (\rho_a / \rho_s)^{3/2}$$