

Atelier « Procédé plasma thermique : Dépôt et Découpe »

du 03 au 05 Juin 2009 Limoges

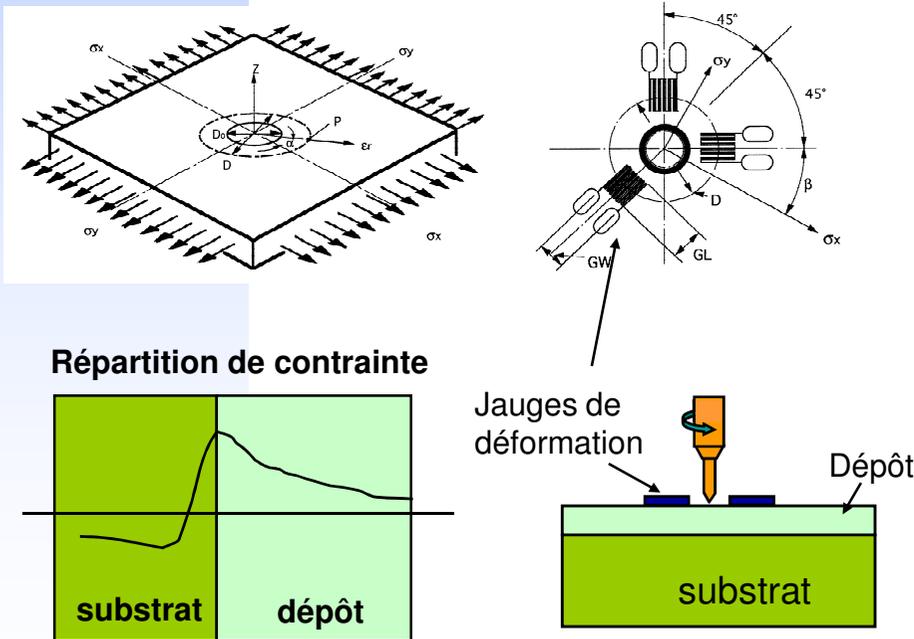
Caractérisation mécanique de dépôts de projection thermique - Mesures de Modules d'Young

Hanlin LIAO, Jean-Louis SEICHEPINE

LERMPS-Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

Importance du module d'Young

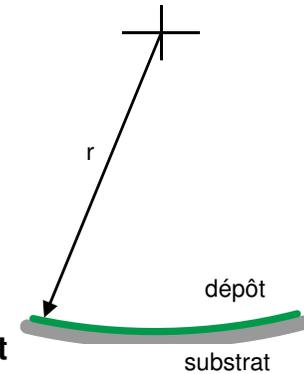
Méthode du trou incrémental



Méthode de la flèche finale

$$\sigma = \frac{E_d e_d^3 + E_s e_s^3}{6e_d(e_s + e_d)} \cdot \frac{1}{r}$$

- e_s : épaisseur du substrat
- e_d : épaisseur du dépôt
- E_s : module d'Young du substrat
- E_d : module d'Young du dépôt
- r : rayon de courbure



Déformation → contraintes

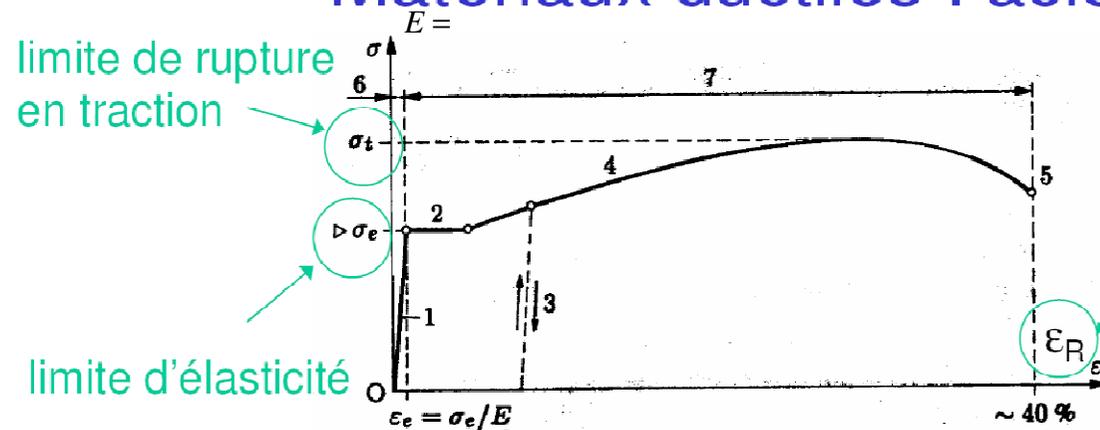
Module d'Young

Qualité du dépôt

Définition



Matériaux ductiles : acier doux



limite de rupture
en traction

limite d'élasticité

allongement
à la rupture

Module d'Young

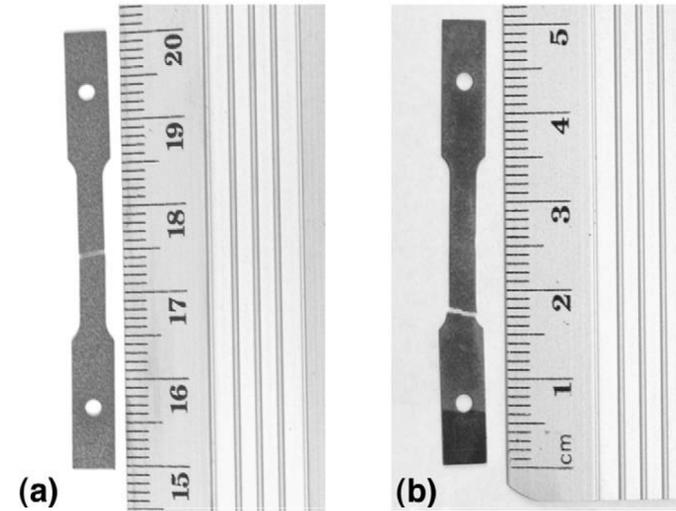
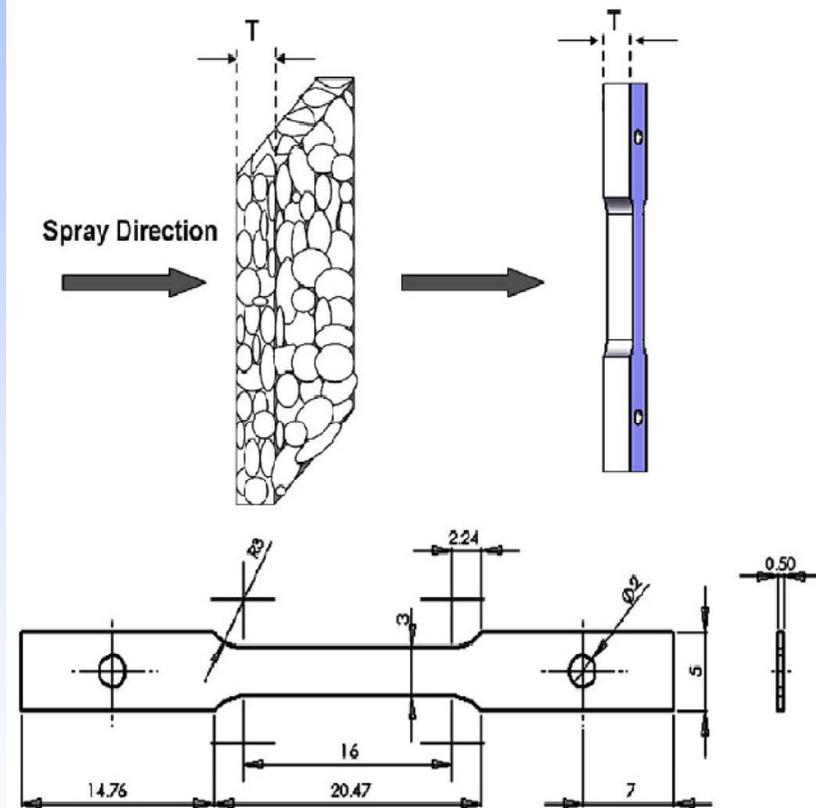
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

- 1 : droite de Hooke
- 2 : palier d'étirage
- 3 : déchargement élastique
- 4 : zone de l'écrouissage
- 5 : rupture
- 6 : zone élastique
- 7 : zone plastique

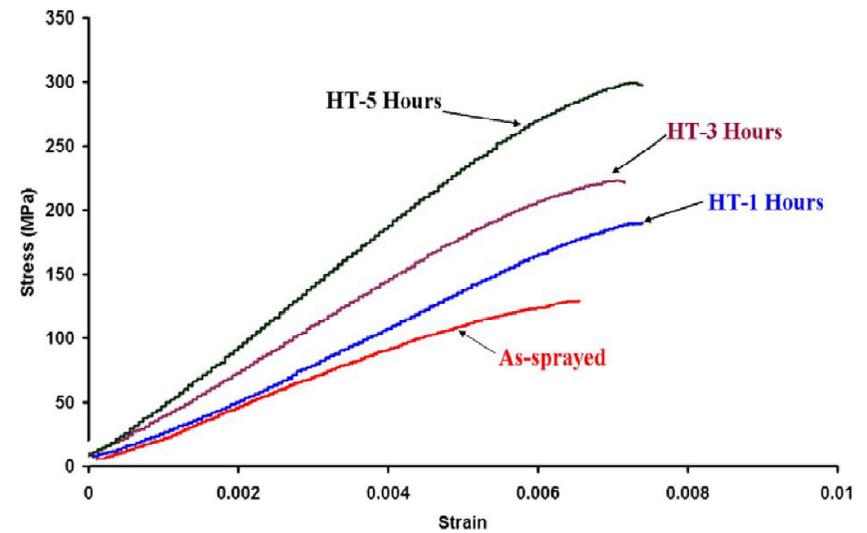
[Frey, 2000, Vol. 2]

Essai de traction

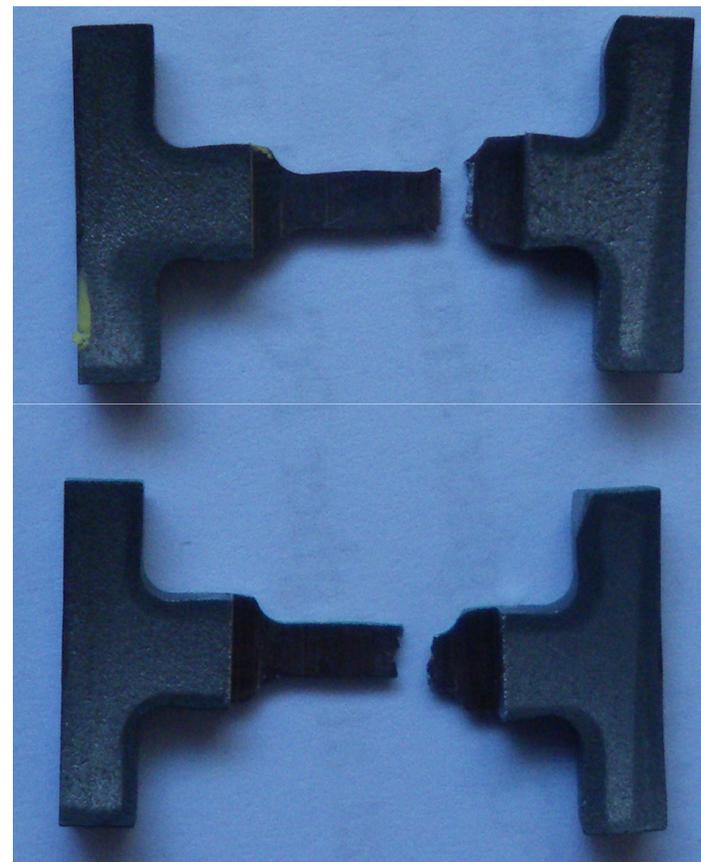
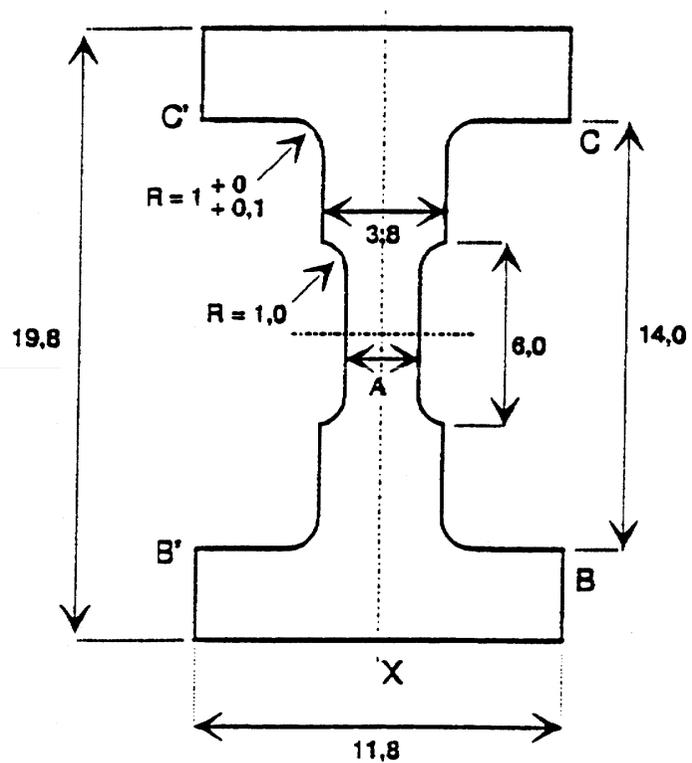
Essai direct sur le dépôt



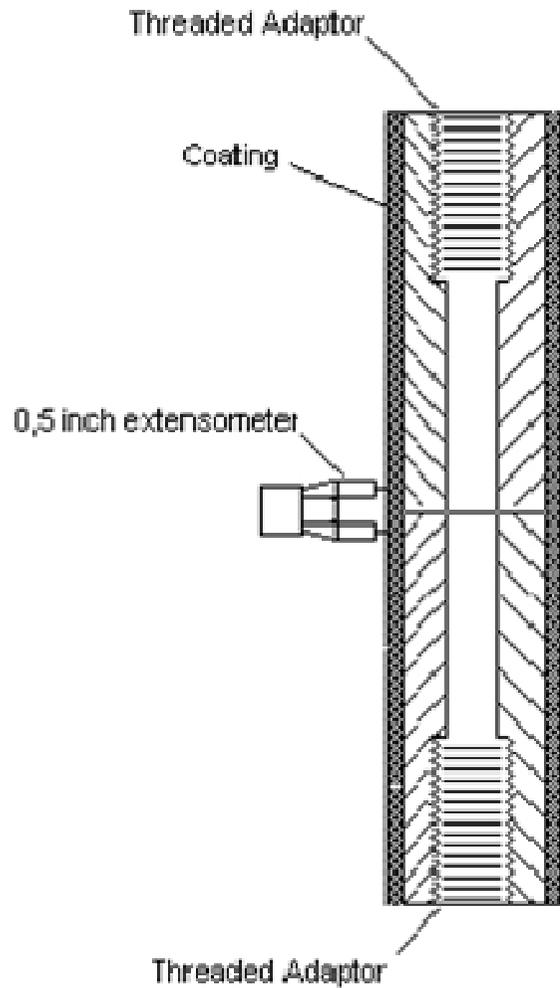
Dépôts d'inconel 625 rompus en traction
(a) après un traitement thermique de 5 h et (b) brut



Micro éprouvette

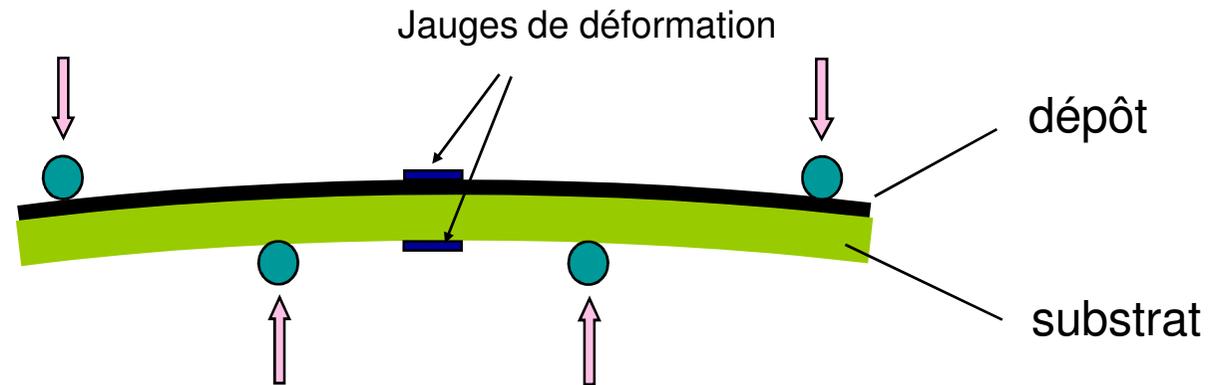


Essais de traction



Evaluation du module d'Young d'un revêtement projeté sur un tube coupé.

Flexion quatre points



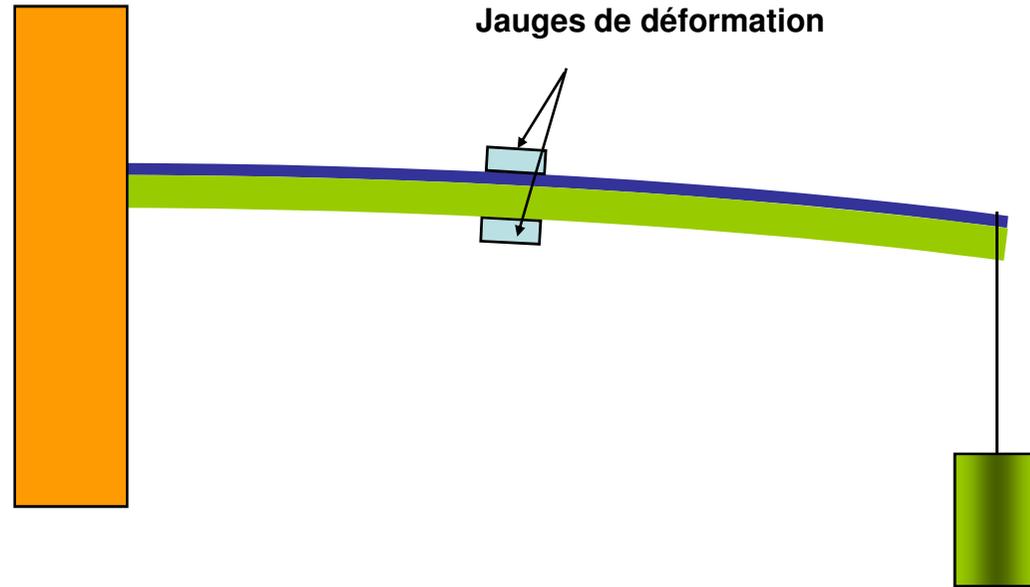
$$E_r = E_s R \frac{KR + 2K - R}{2R - K + l}$$

l : position de fibre neutre à partir de l'interface

avec $l = e_s - \left(\frac{K}{K+1} \right) (e_s + e_r)$ $K = -\frac{\epsilon_s}{\epsilon_r}$

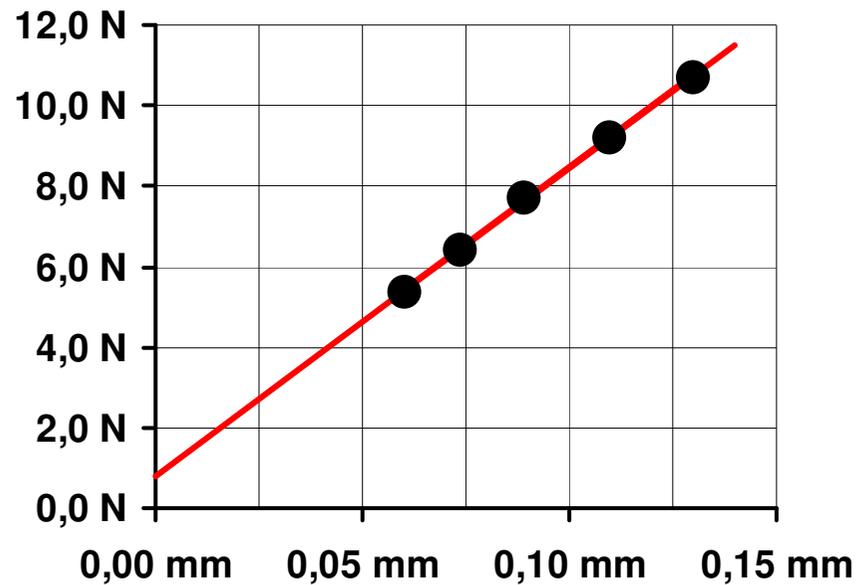
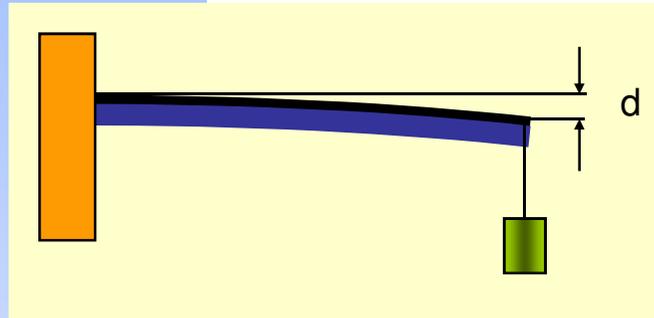
R , rapport des épaisseurs $R = \frac{e_s}{e_r}$

Flexion simple



**Combiné avec un calcul
par éléments finis**

Flexion simple modifiée

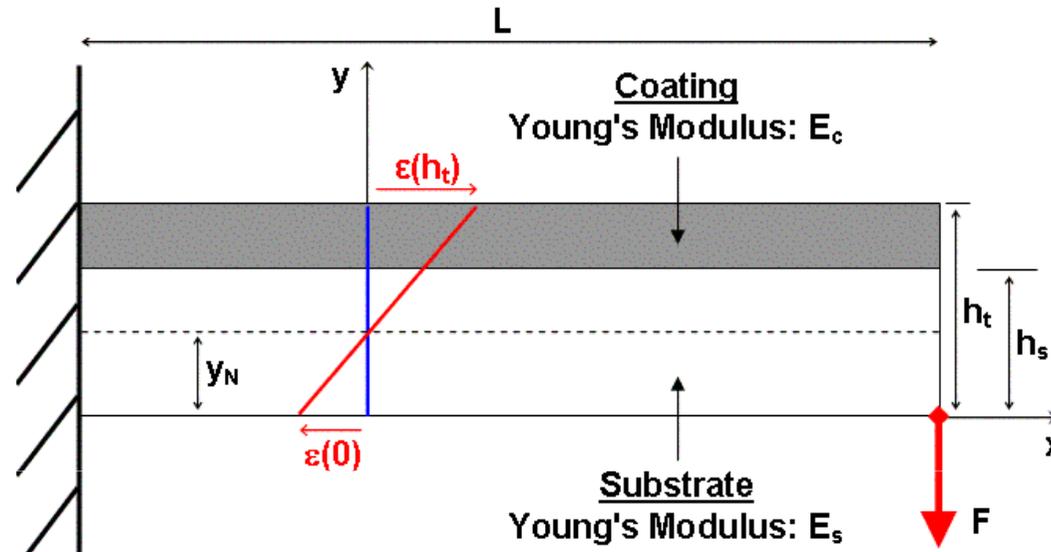


Module d'Young apparent
de l'échantillon :

$$E_e = \frac{4 FL^3}{U b h_t^3}$$

Variation de l'effort appliqué en fonction
de la flèche de l'extrémité libre.

Calcul analytique pour la flexion simple modifiée



Module d'Young apparent E_e en fonction des modules du substrat E_s et du revêtement E_c :

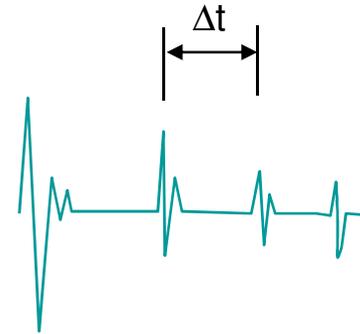
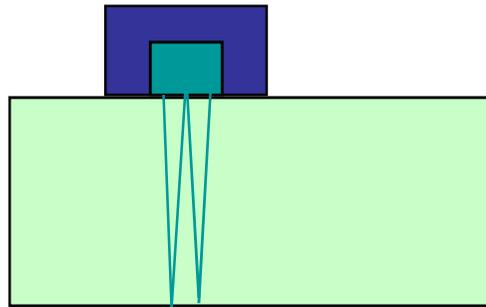
$$E_e = \frac{12}{h_t^3} \left[E_s \left(y_N^2 h_s - y_N h_s^2 + \frac{1}{3} h_s^3 \right) + E_c \left(y_N^2 (h_t - h_s) - y_N (h_t^2 - h_s^2) + \frac{1}{3} (h_t^3 - h_s^3) \right) \right]$$

Avec :

$$y_N = \frac{1}{2} \frac{E_s h_s^2 + E_c (h_t^2 - h_s^2)}{E_s h_s + E_c (h_t - h_s)}$$

Méthode acoustique

Émetteur et capteur



Vitesse longitudinale

$$V_l = \frac{2e}{\Delta t}$$

$$E = \rho V_l^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu}$$

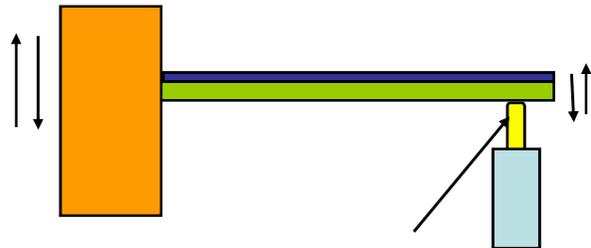
Vitesse transversale

$$V_t$$

$$E = \rho V_t^2 \frac{3V_l^2 - 4V_t^2}{V_l^2 - V_t^2}$$

Vibration résonance

Générateur de vibration



Sonde de déplacement

ε : rapport des épaisseurs dépôt/substrat

L: longueur de la pièce

H: épaisseur du substrat

N_f : fréquence de résonance, substrat seul

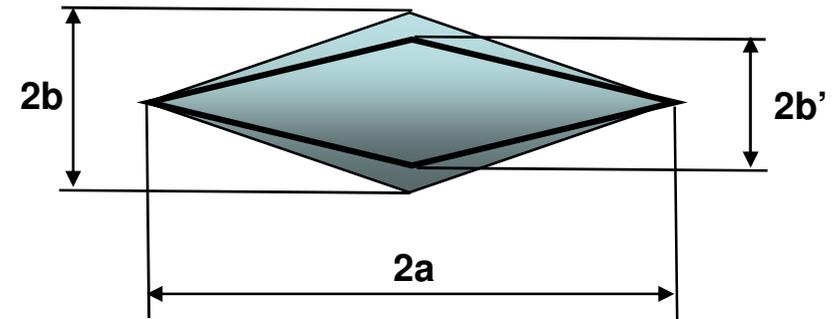
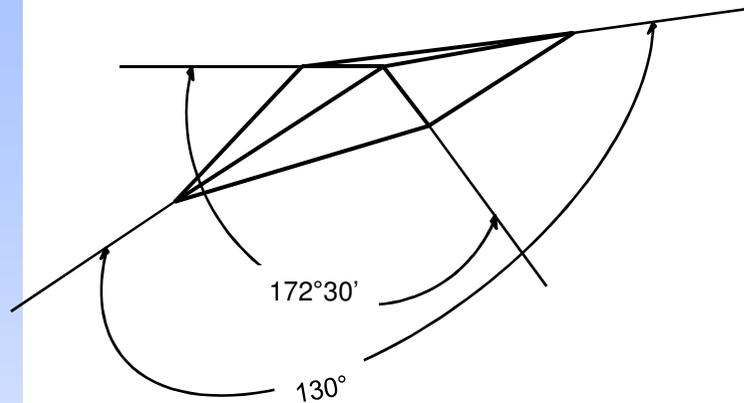
$N + \Delta N$: fréquence de résonance, dépôt + substrat

$$\left(1 + \frac{\Delta N}{N}\right) = \frac{1 + \varepsilon^3 \left(\frac{E_d}{E_s}\right) + \frac{3\varepsilon(1 + \varepsilon)^2 (E_d / E_s)}{1 + \varepsilon(E_d / E_s)}}{1 + \varepsilon \left(\frac{\rho_d}{\rho_s}\right)}$$

Quand $H \ll L$

$$E_s = 0,946\rho \frac{L^4}{H^2} N_f^2$$

Indentation Knoop



Marshall :

$$\frac{b'}{a'} \approx \frac{b'}{a} = \frac{b}{a} - \alpha \frac{H}{E}$$

$$\frac{a}{b} = 7,11$$

$$\alpha = 0,45$$

Conway

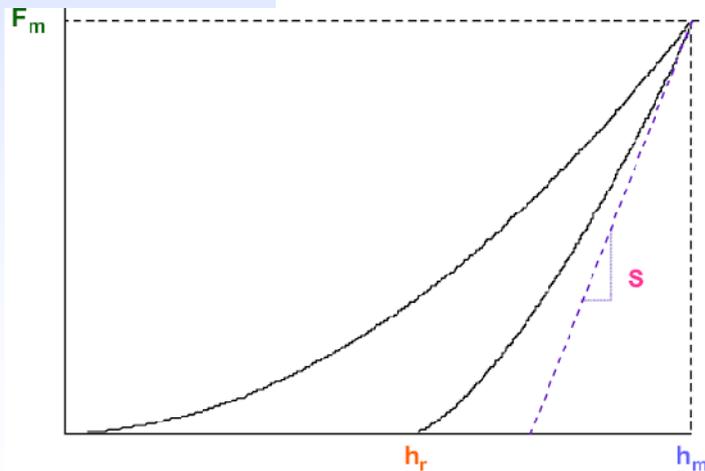
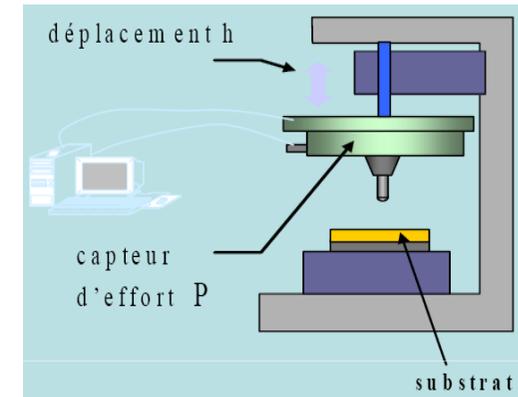
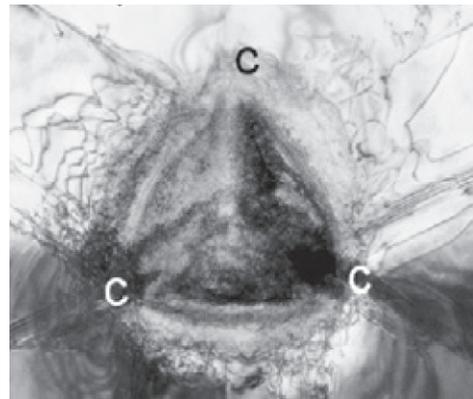
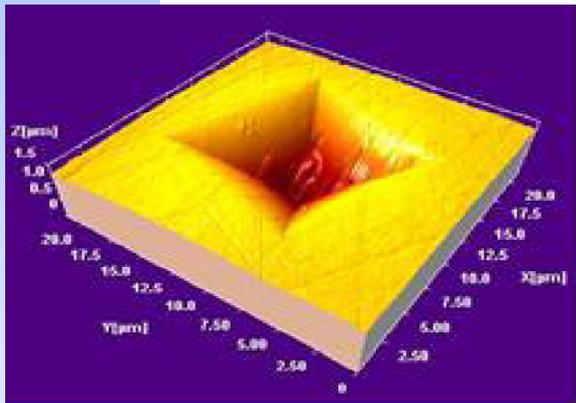
$$\left(\frac{b'}{b}\right)^2 = 1 - 2\left[(1 - \nu^2) \tan \gamma\right] \left(\frac{H}{E}\right)$$

Avec

$$\gamma = (130^\circ + 172^\circ 30') / 2$$

Nano indentation

Mesure de la profondeur d'indentation d'une pointe de diamant (Berkovich, Vickers, Sphérique) en fonction de la charge appliquée



Gradient de charge sur profondeur

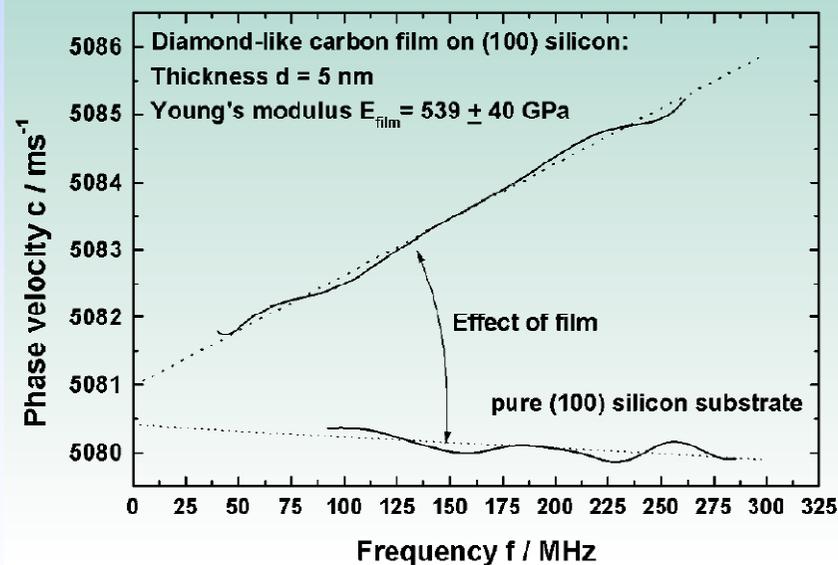
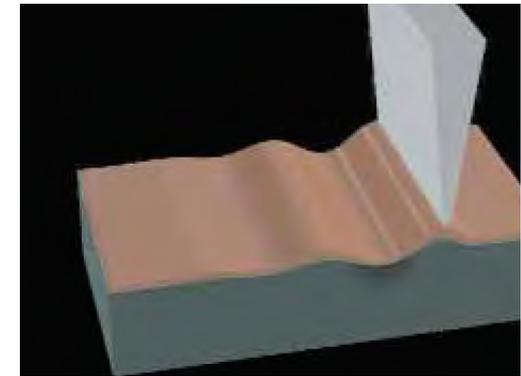
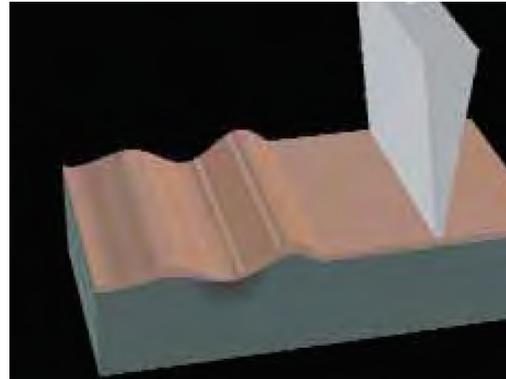
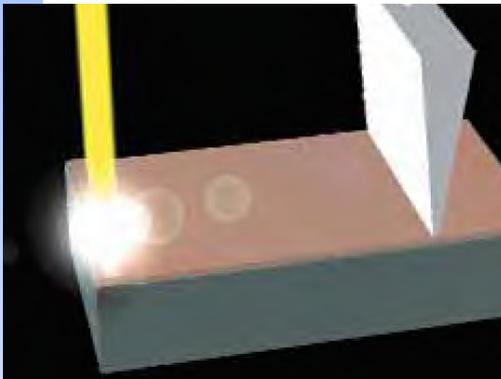
$$S = \frac{dP}{dh} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} Ee \beta$$

$\beta = 1,034$ pour indenteur de Berkovich

$$\frac{1}{E_e} = \frac{(1-\nu_s^2)}{E_s} + \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i}$$

E_i : Module d'Young de l'indenteur
 E_s : Module d'Young du matériau mesuré
 E_e : Module d'Young équivalent

LAWAVE® méthode



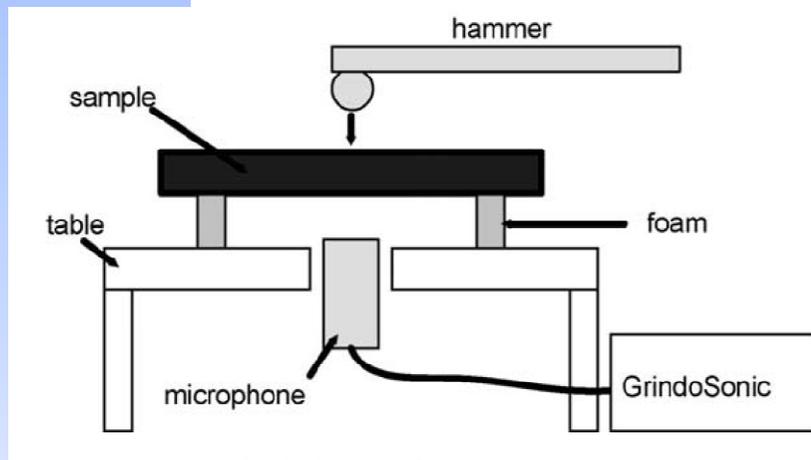
Mesure de le module de Young d'un revêtement 5nm



La vitesse de propagation de l'onde en fonction de coefficient de Poisson, la densité et le module d'Young

$$C = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}}$$

Méthode Dynamique



Les essais ont été faits de la température ambiante à 1273 K sous Ar, Dimension de la pièce : 50mm×4mm×3mm

$$E_D = \left[0.9465 \left\{ M \frac{(f_R)^2}{w} \right\} \right] \left(\frac{t}{L} \right)^3 T_1$$

Où M est la masse du spécimen en g, w et t sont la largeur et l'épaisseur, respectivement, du spécimen, en mm, T_1 est un facteur de correction relatif au coefficient de Poisson,

$$T_1 = 1 + 6.585(1 + 0.0752 \nu + 0.8109 \nu^2) \left(\frac{t}{L} \right)^2 - 0.868 \left(\frac{t}{L} \right)^4 - \left[\frac{8.340(1 + 0.2023 \nu + 2.173 \nu^2)(t/L)^4}{1 + 6.338(1 + 0.1408 \nu + 1.536 \nu^2)(t/L)^2} \right]$$

Pour faible température un petit marteau est employé pour exciter la pièce. Pour la haute température, un petit projectile en céramique, propulsé par de faibles pressions d'Ar, a été utilisé pour appliquer une légère impulsion mécanique au spécimen.

Le son généré par la fréquence de résonance hors-plan fondamentale f_R de la barre en flexion à la température absolue T , a été enregistré par un microphone acoustique.

E corrigé en fonction de la température

$$E_{DT} = E_{D0} \left(\frac{f_R}{f_0} \right) \left[\frac{1}{(1 + \alpha_T \Delta T)} \right]$$

Où E_{DT} et E_{D0} sont les modules d'Young à la température d'essai et à la température de la pièce, respectivement, f_0 est la fréquence de résonance à la température ambiante, α_T est le coefficient de dilatation thermique et ΔT est la différence de température entre la température d'essai et la température de la pièce.

Modèles empiriques

Equation de Sprigg

$$E^* = E_s \exp(-bp)$$

E^* , module d'Young du dépôt

E_s , module du matériau massif

p , fraction de porosités, fissurations volumiques et interfaces des particules dans le dépôt

b , constante dépendant du matériau, pour l'inconel 625, $b = 5,16$

Equation de Hashin-Hasselman

$$E^* = E_0 \left[1 + \frac{Ap}{1 - (A + 1)p} \right]$$

E^* , module d'Young de dépôt

A , constante = -33.4

p , fraction volumique de pores, fissures et interfaces des particules

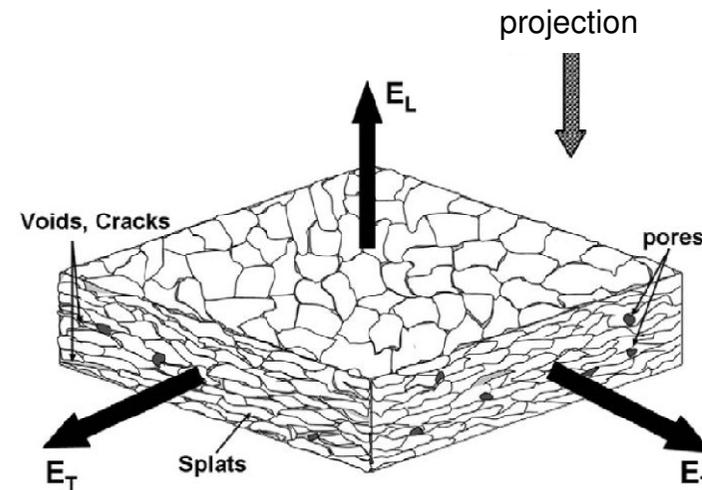
E_0 , module du matériau massif

Modèles empirique

Modèle de ZHAO

$$E_L = \frac{E_m(1-p)}{1 + 2\pi\rho}$$

$$E_T = \frac{E_m(1-p)}{1 + 2\pi\rho\alpha^{-2}}$$



Suppose qu'il y a des pores elliptiques

$$\alpha = \frac{\text{Rayon dans le sens parallèle au dépôt}}{\text{Rayon dans le sens perpendiculaire au dépôt}}$$

E_m : module d'Young du matériau massif

p : fraction volumique de pores elliptiques,

ρ : fraction volumique totale de porosités, oxydes,

E_L : module dans la direction perpendiculaire au dépôt,

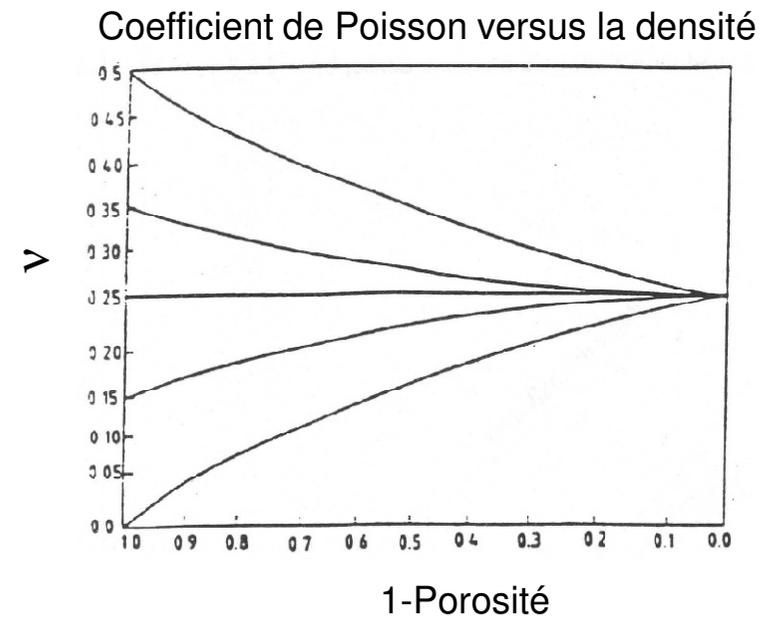
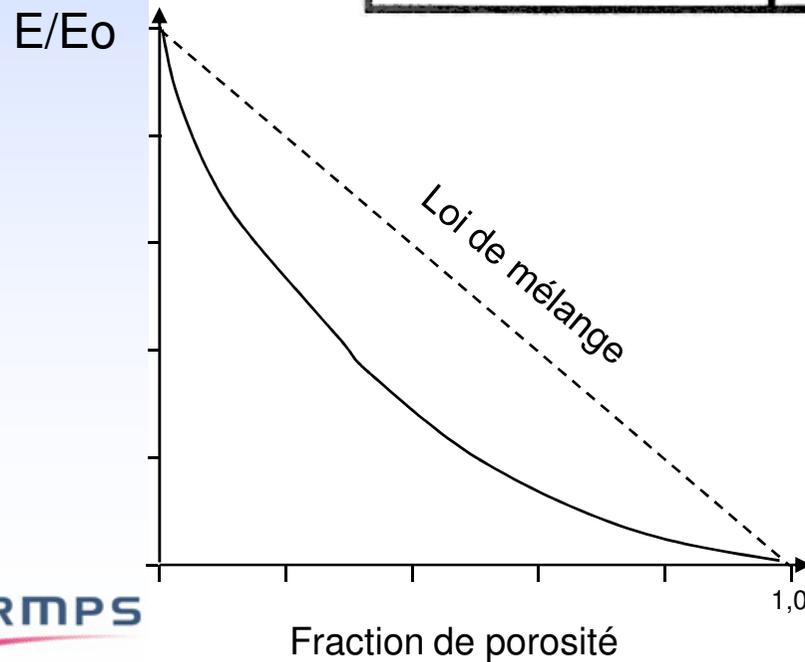
E_T : module dans la direction parallèle au dépôt

Pour un dépôt d'inconel 625, avec $E_m = 205$ GPa, $p = 0.04$, $\rho = 0.14$ et $\alpha = 1.5$,
 E_L et E_T sont de 105 et 141 GPa, respectivement.

Modèles empirique

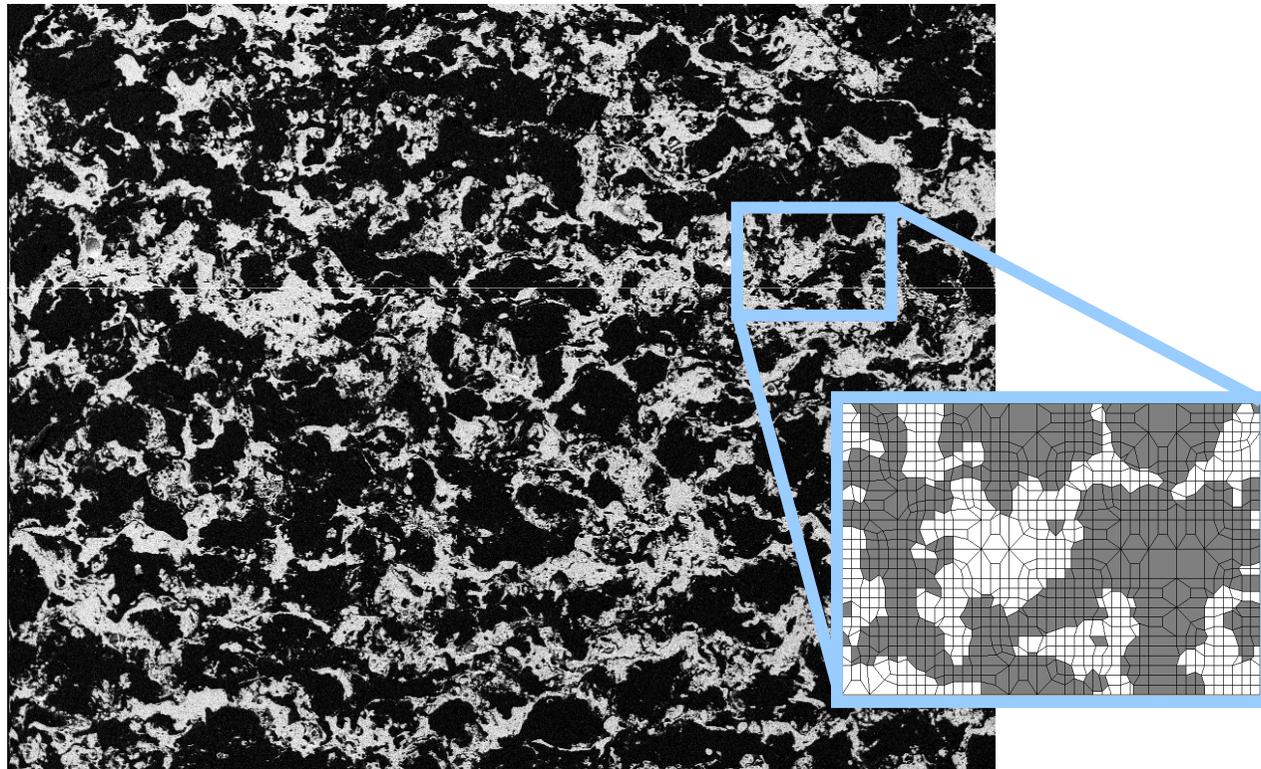
Quelques formule pour estimer le module d'Young de matériaux poreux

$\frac{E}{E_0} = 1 - b_E P$	$b_E = \frac{5}{4} \frac{a}{c} + \frac{3}{4}$	Rossi
$\frac{E}{E_0} = (1-P)^{2n+1}$	n constante empirique	Soroka et Sereda
$\frac{E}{E_0} = 1 - \frac{3(1+\nu)(9+5\nu)}{2(7-5\nu)} P$		Budiansky
$E^* = \frac{E (1-P)^2}{(1+b_p \cdot P)}$	$b_p = 2 \text{ à } 3\nu$	Hashnin et Shtrikman
$\nu^* = \frac{1}{4} \frac{(4\nu + 5P - 7\nu P)}{(1 + 2P - 3\nu P)}$		idem



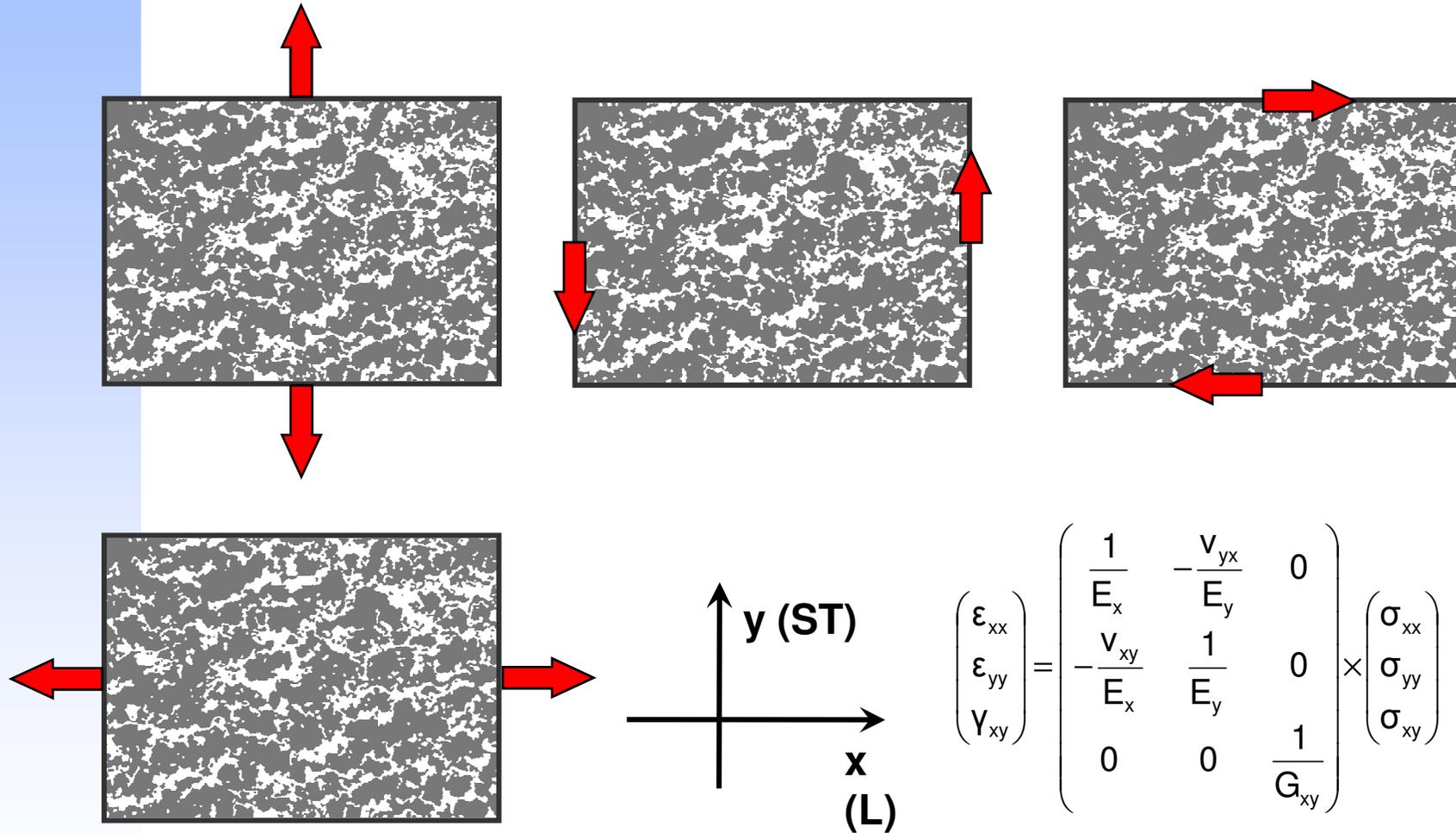
Micrographie combinée avec la modélisation

Evaluation de la loi de comportement d'un matériau composite à partir d'une micrographie (le comportement des phases étant supposé connu).



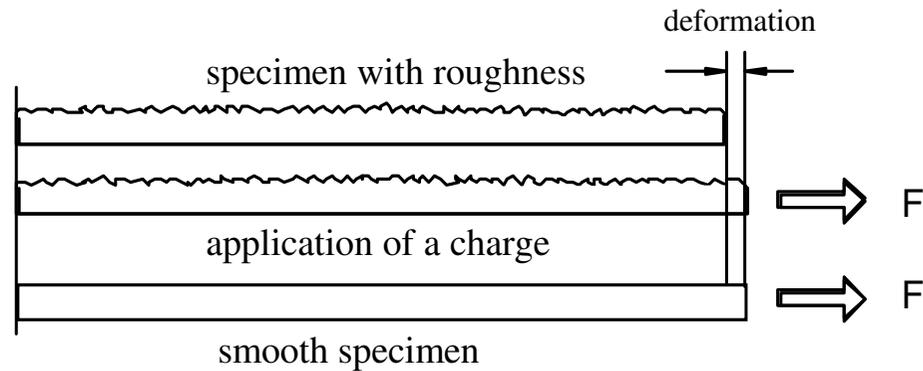
Elaboration d'un maillage bidimensionnel à partir d'une micrographie binarisée filtrée.

Micrographie combinée avec la modélisation

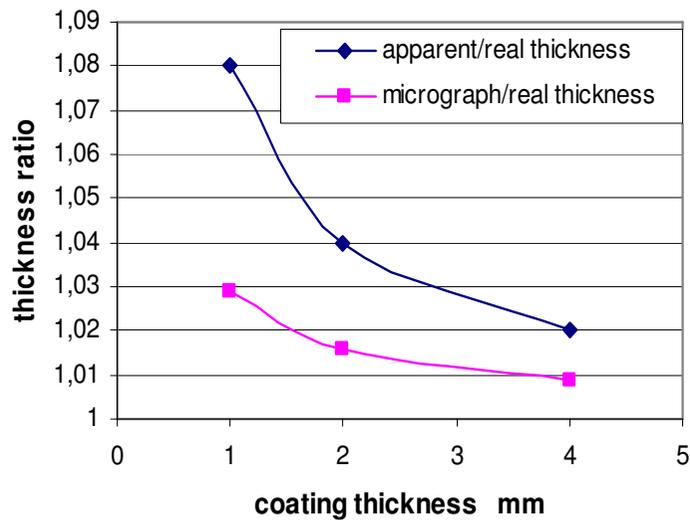


Détermination des paramètres de la loi de Hooke bidimensionnelle anisotrope par simulation d'essais de traction et de cisaillement.

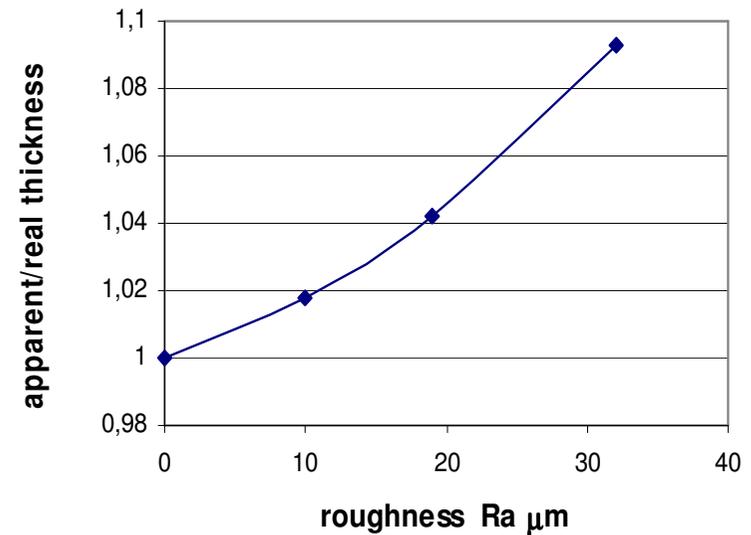
Épaisseur de dépôt: un paramètre important



Modélisation de l'épaisseur réelle en considérant la rugosité



Influence de l'épaisseur moyenne de dépôt sur le rapport épaisseur apparente/épaisseur réelle



Influence de la rugosité de surface sur le rapport épaisseur apparente/épaisseur réelle

Exemples de résultats

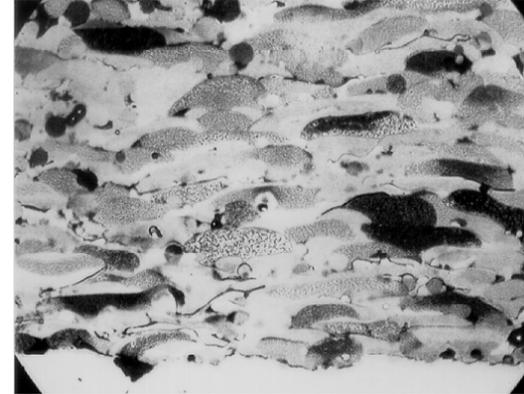
NiCrBSi

flamme

Porosité % : 5.0

Oxyde % : 3.0

Module d'Young GPa: 49.0



APS

Porosité % : 2.5

Oxyde % : 3.0

Module d'Young GPa: 55.5

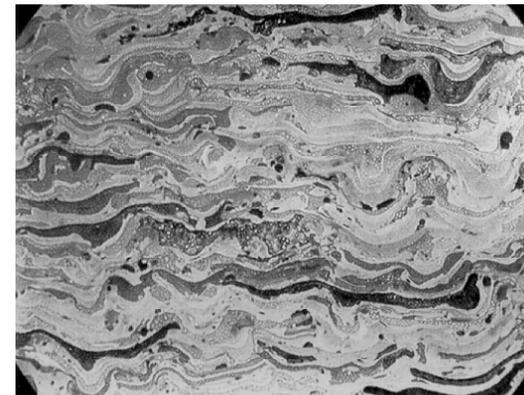


HVOF

Porosité % : 0.5

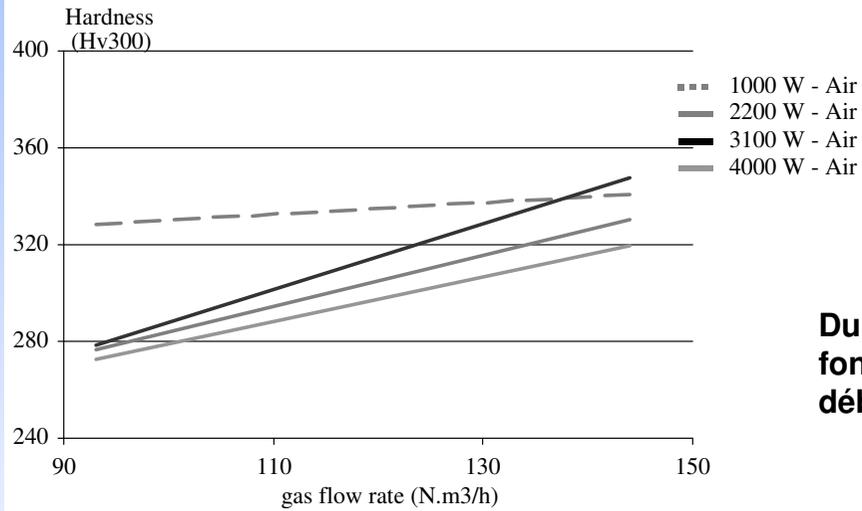
Oxyde % : 0.2

Module d'Young GPa: 81

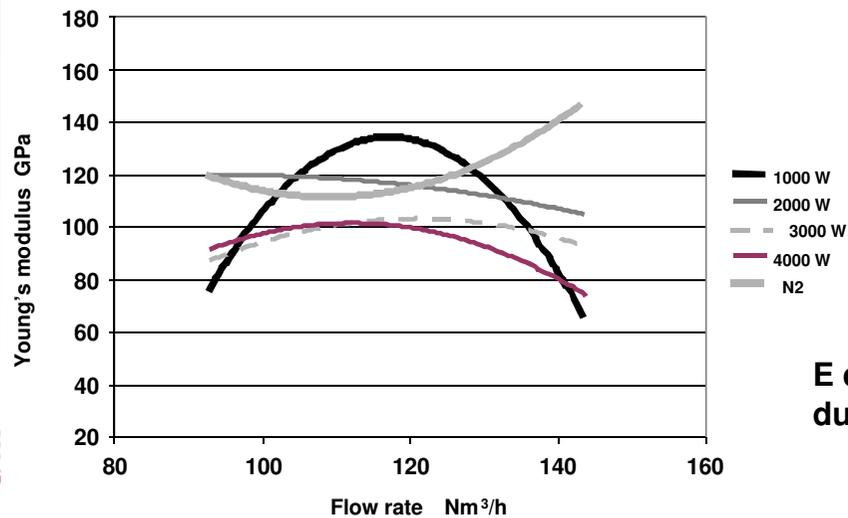


Dépôt Fe par arc-fil

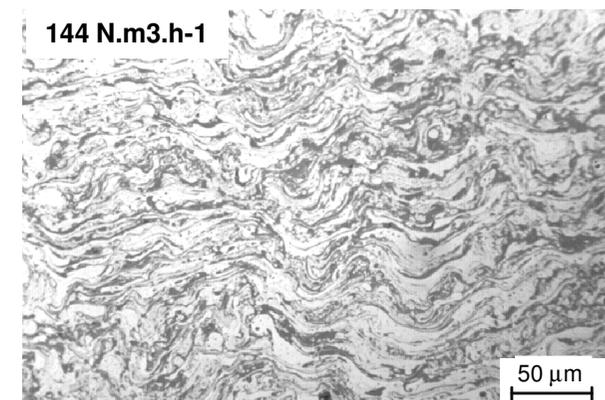
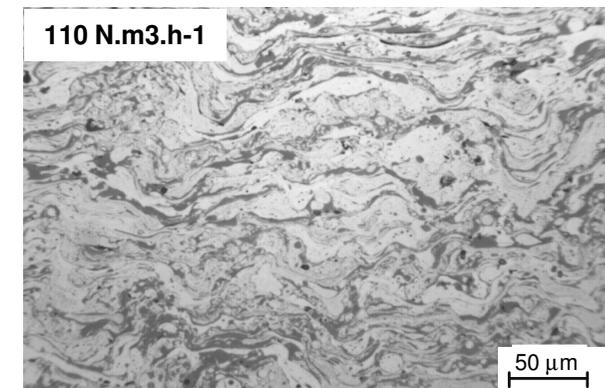
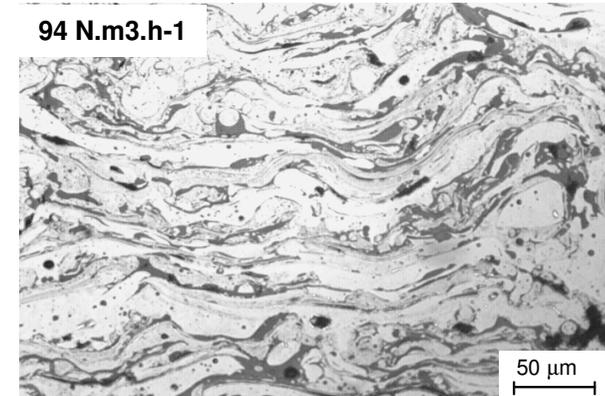
- (a) air atomization, low flow rate (94 N.m3.h⁻¹),
- (b) medium flow rate (110 N.m3.h⁻¹),
- (c) high flow rate (144 N.m3.h⁻¹),



Dureté en fonction du débit d'air



E en fonction du débit d'air



Conclusions

Le module d'Young est une caractéristique importante pour le dépôt

De nombreuses méthodes existent pour l'estimer

Il faut choisir les méthodes adaptées aux dépôts

F. Azarmi et al. / Surface & Coatings Technology 203 (2009) 1045–1054
Y.H. Zhao, G.P. Tandon, G.J. Weng, Acta Mech. 76 (1989) 105–130.
Y.H. Zhao, G.J. Weng, J. Appl. Mech- T. ASME 57 (1990) 158–167.
R.M. Spriggs, J. Am. Ceram. Soc. 44 (12) (1961) 628–629.
Z. Hashin, J. Appl. Mech-T. ASME 29 (3) (1962) 143–150.
D.P. Hasselman, J. Am. Ceram. Soc. 45 (1962) 452–453.
L. Michelle. et al, Journal of the mechanical behavior of biomedical materials2 (2009)
E. Le Bourhis, Vacuum 82 (2008) 1353–1359
C.C. Chiu J. Am Ceram. Soc. 73 [7] pp 1999-2005 (1990)
http://www.ccl.fraunhofer.org/download/LA_Wave.pdf
I. Jansen et al. International Journal of Adhesion & Adhesives 29 (2009) 210–216
D. Schneider, T. Schwarzl, Surface and Coatings Technology 91 (1997) 136-146
C. Richard thèse UTC, 1992
S.V. Raj et al. / Materials Science and Engineering A 513–514 (2009) 59–63
R.C. Rossi, J. Am. Ceram. Soc 51 (1968) pp433-430
I. Soroka, P.J. Sereda, J. Am. Ceram. Soc 45 (1962) 84