



Simulation numérique de l'essai d'indentation instrumentée

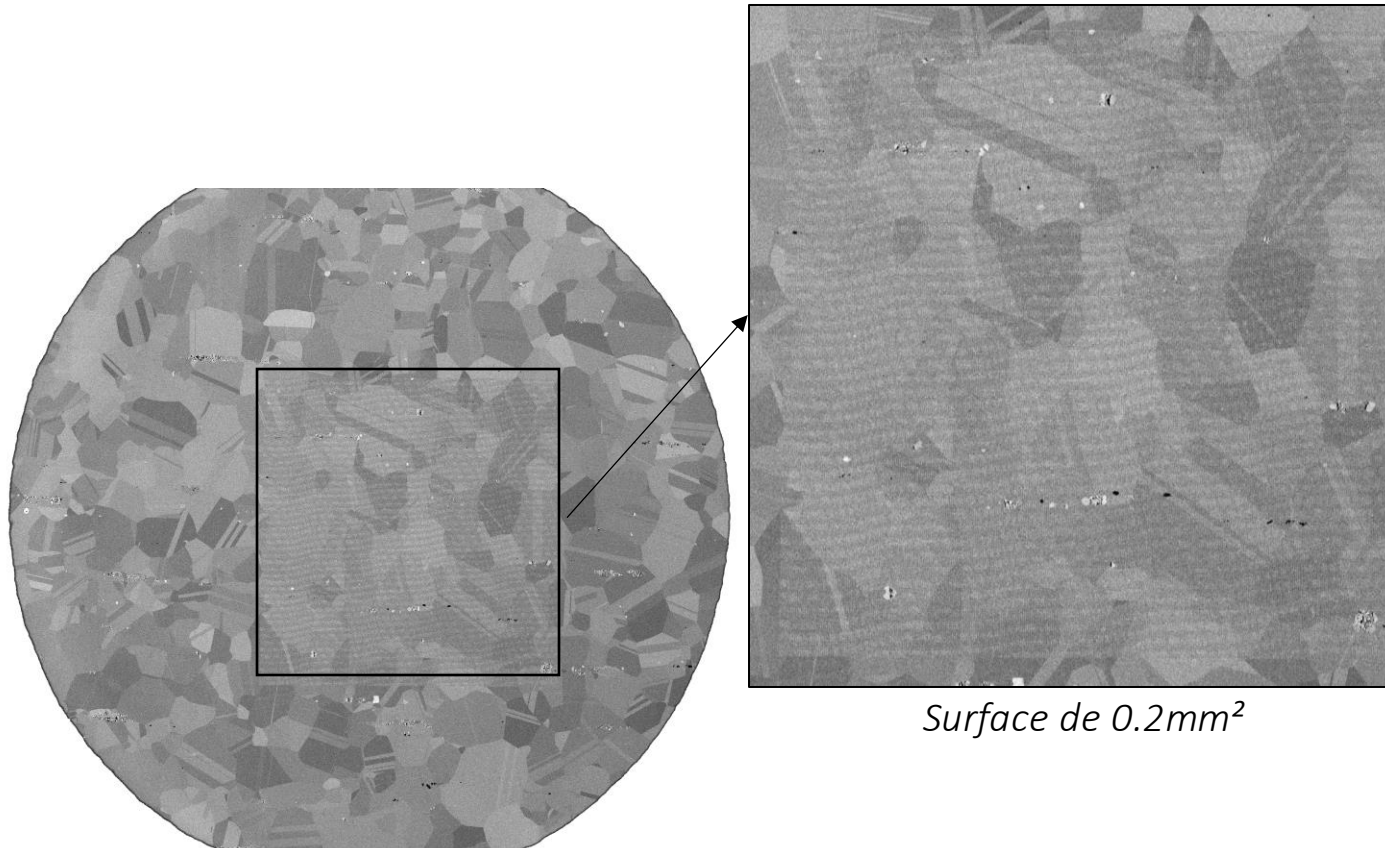
Emilie Despinoy

Encadrants de stage : Henry Proudhon, Samuel Forest, Vladislav Yastrabov, Damien Texier

Sommaire

1. Contexte
2. Calcul mécanique en élasticité isotrope
3. Calcul mécanique en élasticité cubique
4. Analyse EBSD

Contexte



Cartographie MEB de nano-indentation

Indentation : comportement global

- Dureté globale
- Module d'élasticité globale

Nano-indentation : comportement local

- Nano-dureté
- Module d'indentation (≈élasticité local)



Propriétés élastiques et plastiques ?

Contact mécanique en élasticité isotrope : Théorie de Hertz (1882)

Hypothèses de travail

- o géométrie connue d'équation :

$$y_i = \frac{1}{2R_i}x_i^2 + \frac{1}{2R_i}z_i^2$$

- o pas de frottement, ni forces tangentielles
- o surfaces lisses
- o matériaux **homogènes, isotropes, élastiques** :

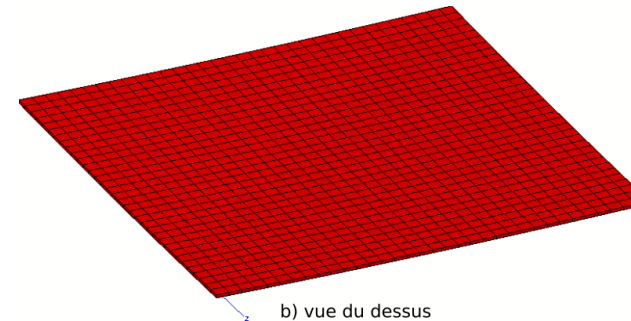
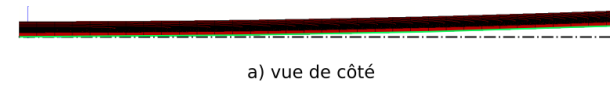
$$\frac{1}{E_r} = k_1 + k_2, k_i = \frac{1 - \nu_i^2}{E}$$

$$H = \frac{4}{3\pi} E_r \sqrt{\frac{h}{R}}$$

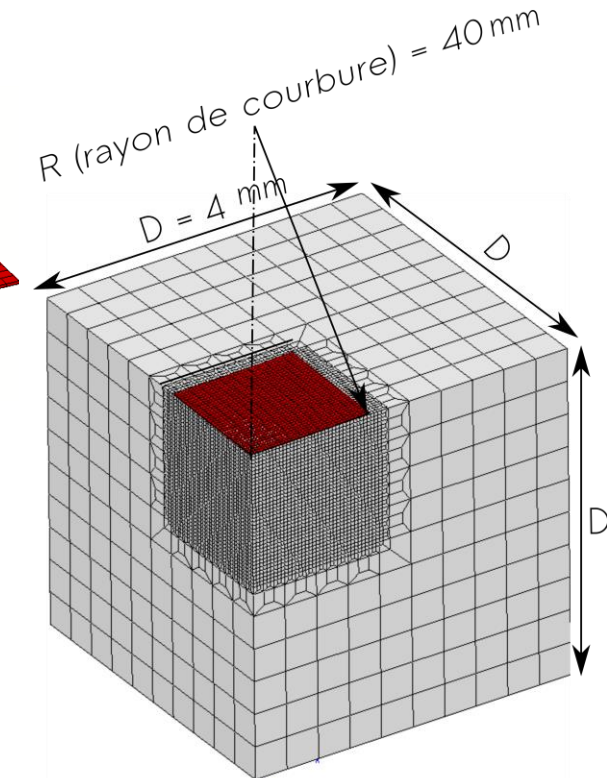
- o a « R (contact non-conforme)

Avec a : rayon du contact, R : rayon de courbure

Contact sphère/plan



Indent

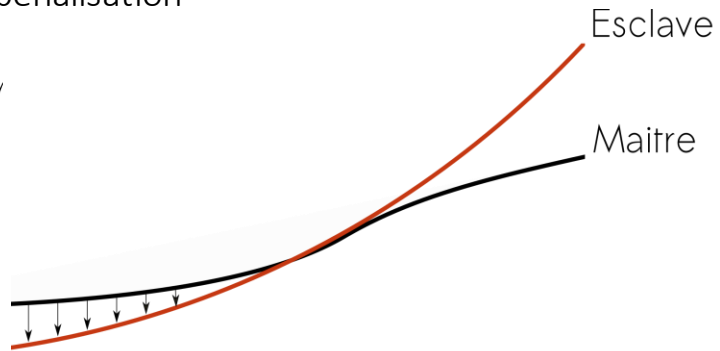


Traitement du problème par MEF - Elasticité isotrope

Formulation du contact

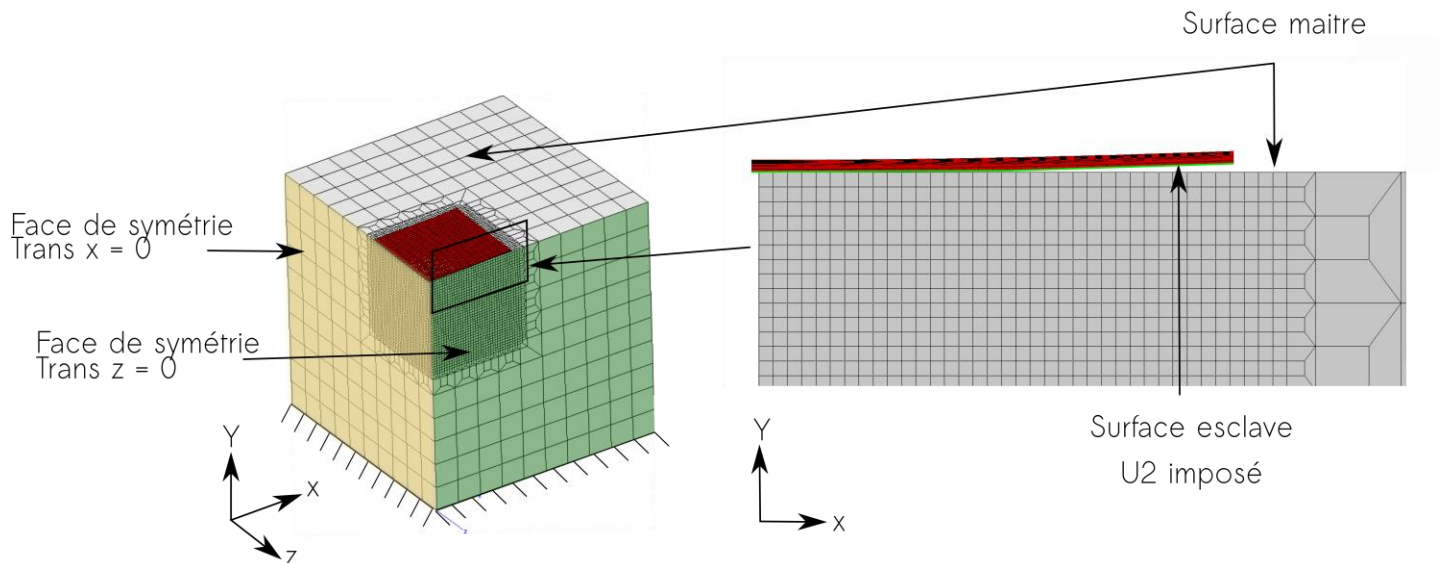
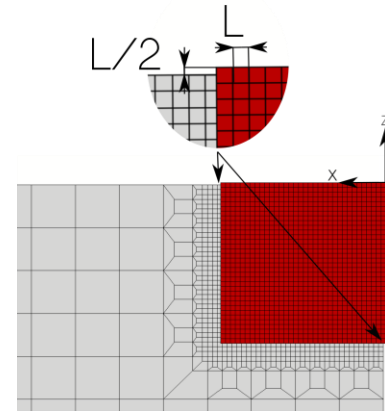
- Méthode de pénalisation

$$p_{ref}^n = E.L$$



Conditions limites et chargement

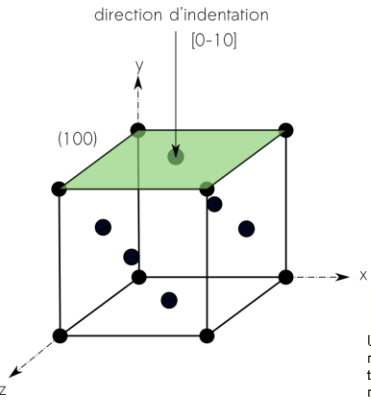
- à $t = 0$:



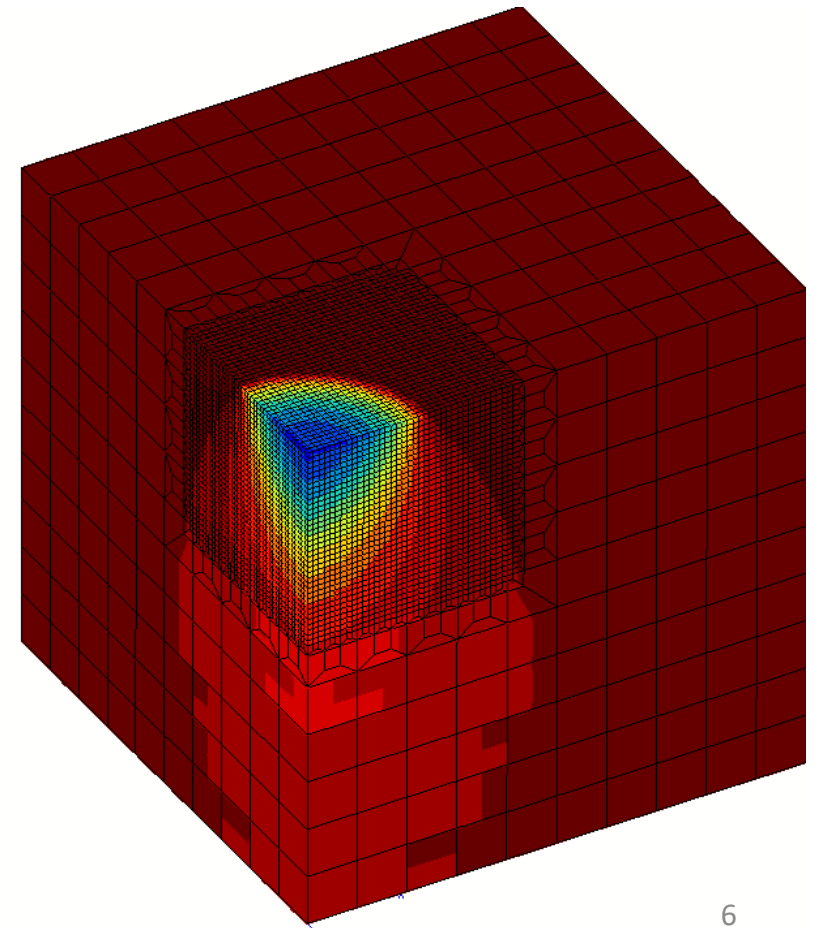
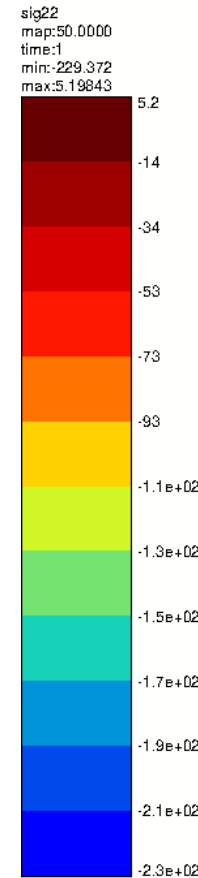
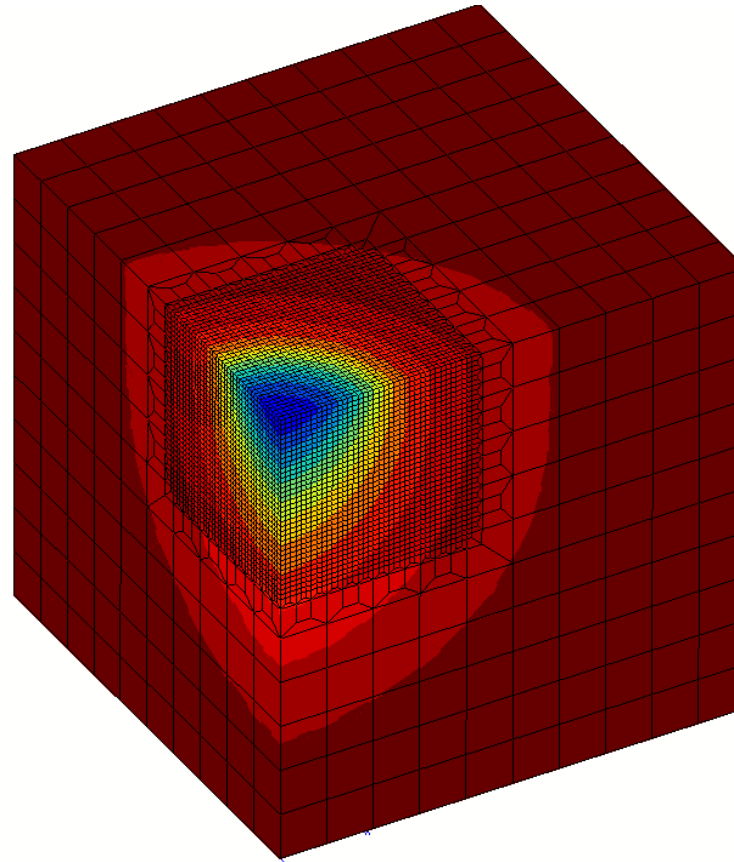
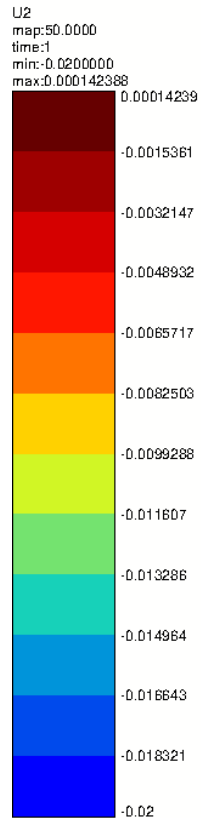
Résultats numériques, D/R = 0.1 - Elasticité isotrope

Modélisation	3D 1/4	
Discrétisation	c3d20	c3d8
Matériaux	E, ν	

Ddls	Temps
207 563	13h20



$$p_{ref}^n = 5,28 \cdot 10^2$$



Etude de convergence - Elasticité isotrope

Solutions analytiques – Contact sphère/plan

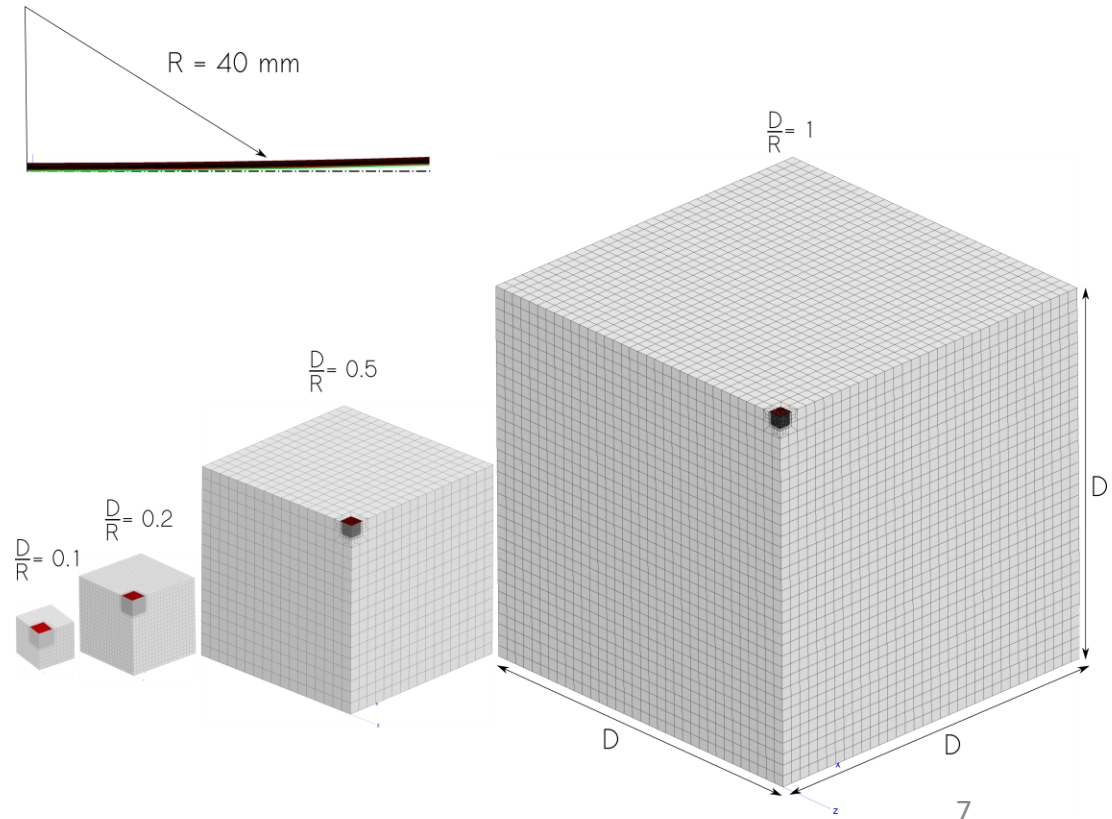
- Pas de convergence de maillage
- Convergence du modèle vers les solutions analytiques

→ Rayon de contact $a = \left(\frac{3RF}{4E_r} \right)^{\frac{1}{3}}$

→ Déplacement $\delta = \frac{a^2}{R}$

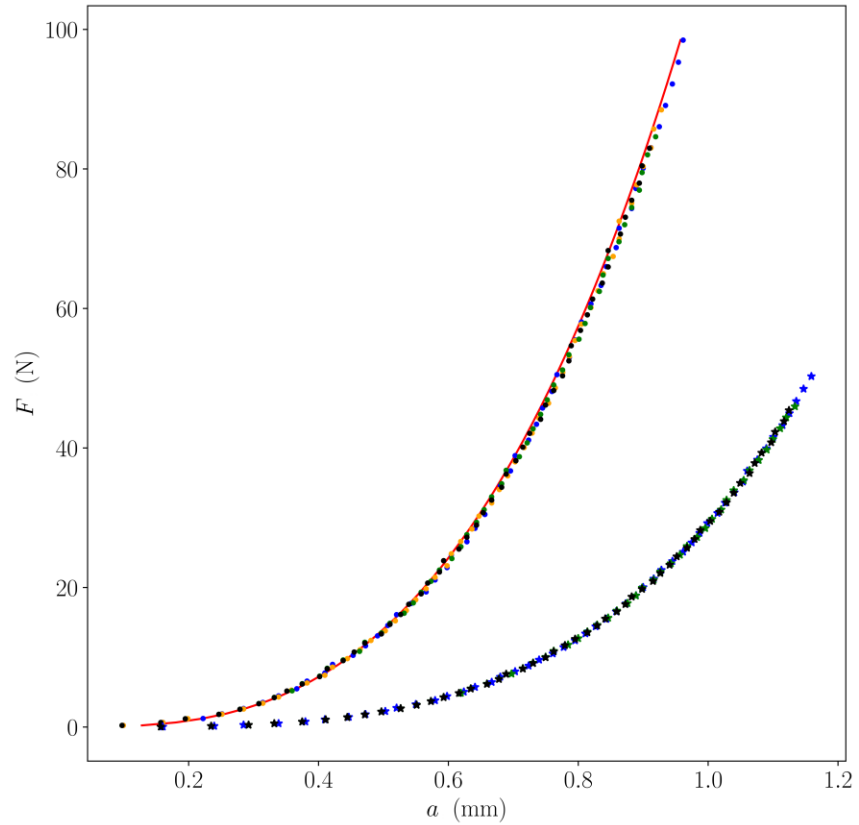
Paramètres à varier

- Coefficient de pénalité
- Rapport D/R avec R constant



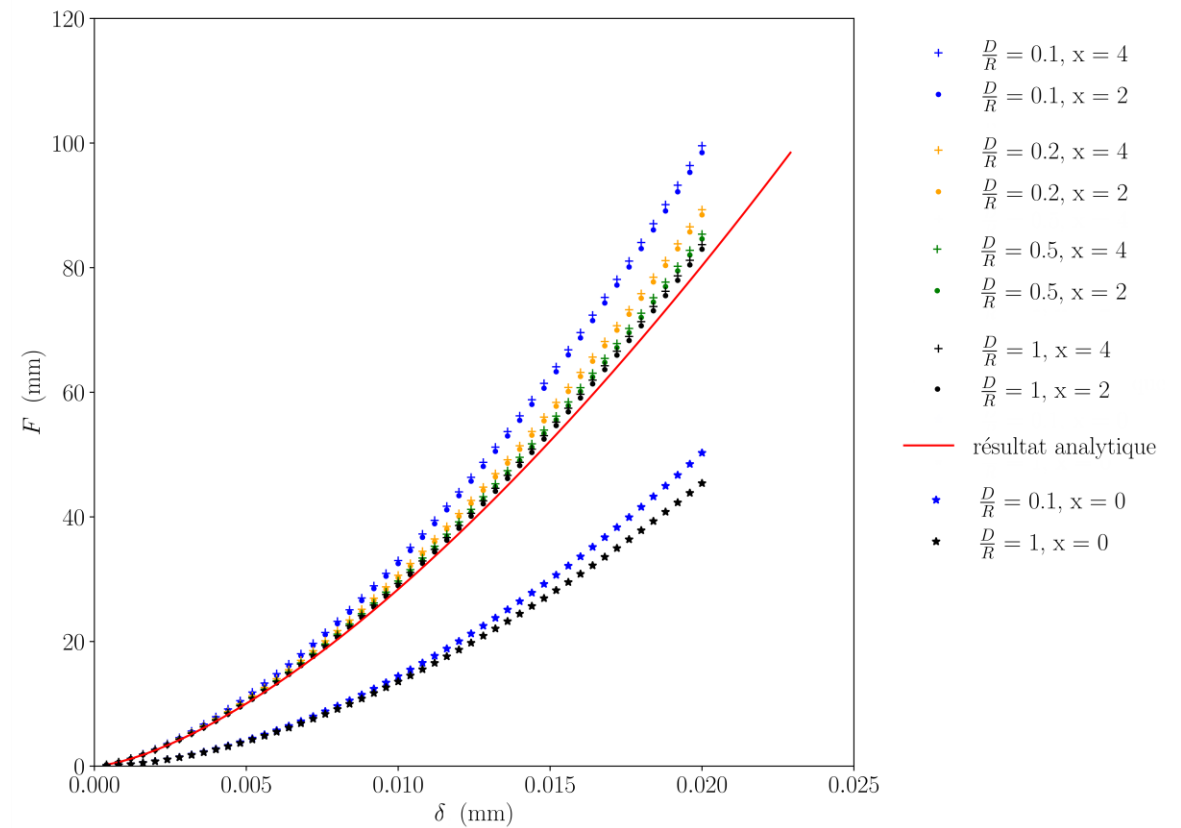
Analyse des résultats - Elasticité isotrope

$$p^n = 5,28.10^x$$

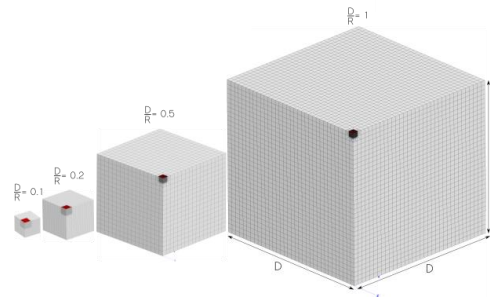


Courbe force-rayon de contact

$$p^n = 5,28.10^x$$



Courbe force-déplacement



Contact mécanique en élasticité cubique

Hypothèses de travail

- Anisotropie faible
 - Indent axysymétrique
-
- Contact supposé **circulaire**

→ "La meilleure approximation de cette solution est une solution de première ordre correspondant à une **solution isotrope équivalente**." [Vlassak et al.]

$$E_{eq} = \frac{1}{\pi \cdot h_0}$$

$$h(\theta) = \frac{1}{2}[h(0) + h(\frac{\pi}{2})] + \frac{1}{2}[h(0) - h(\frac{\pi}{2})]\cos(2\theta)$$

$$h(0) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{C_{22}}{C_{11}C_{22} - C_{12}^2} \left(\frac{1}{C_{66}} + \frac{2}{C_{12} + \sqrt{C_{11}C_{22}}} \right) \right)}$$

$$h(\frac{\pi}{2}) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{C_{33}}{C_{11}C_{33} - C_{13}^2} \left(\frac{1}{C_{55}} + \frac{2}{C_{13} + \sqrt{C_{11}C_{33}}} \right) \right)}$$

Méthodologie employée

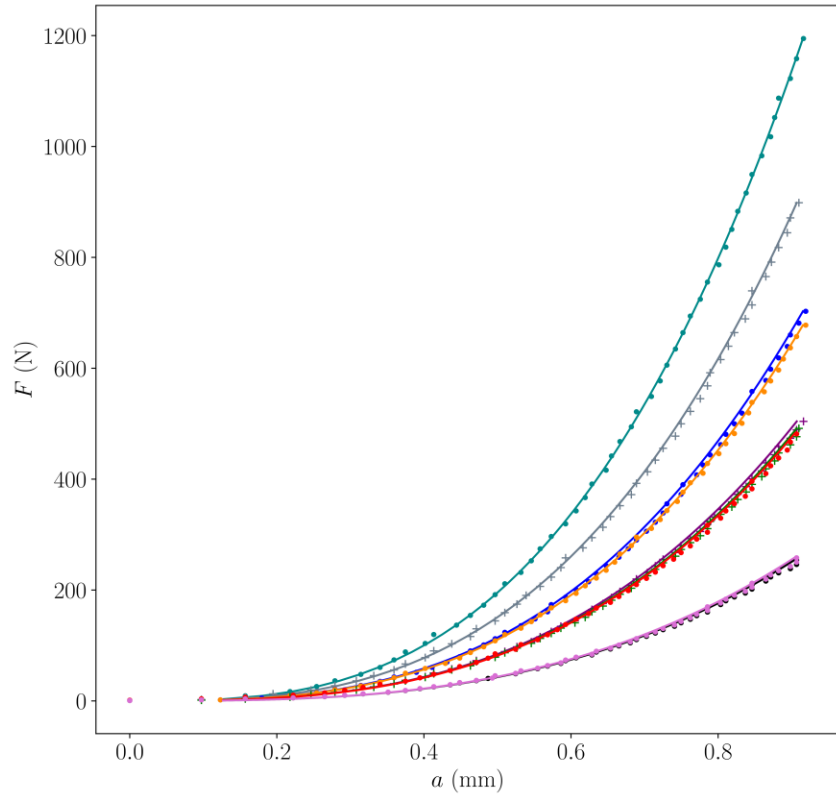
- Paramètres matériaux : C_{11} , C_{12} , C_{44}
- Facteur de Zener $F = \frac{2C_{44}}{C_{11} - C_{12}}$

	Facteur de Zener
Matériau #1	0.25
	1
Matériau #2	2
	0.25
Matériau #3	1
	2

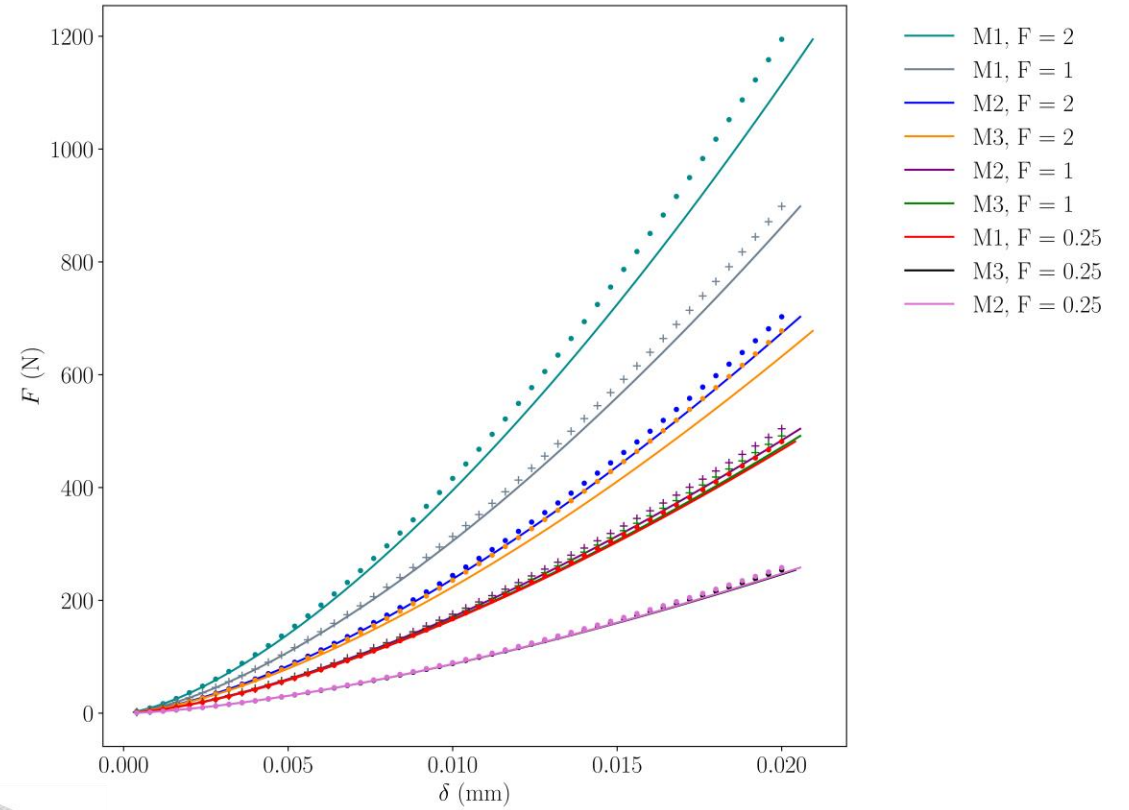
pénalité à vérifier



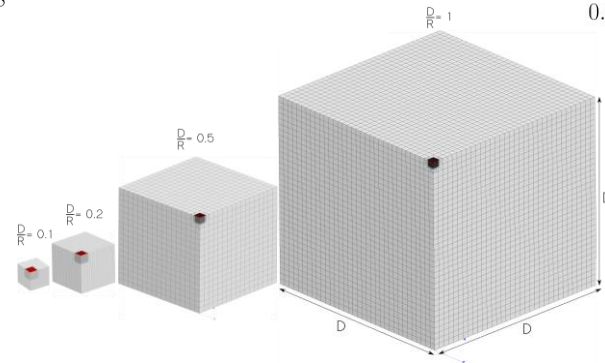
Analyses des résultats - Elasticité anisotrope cubique



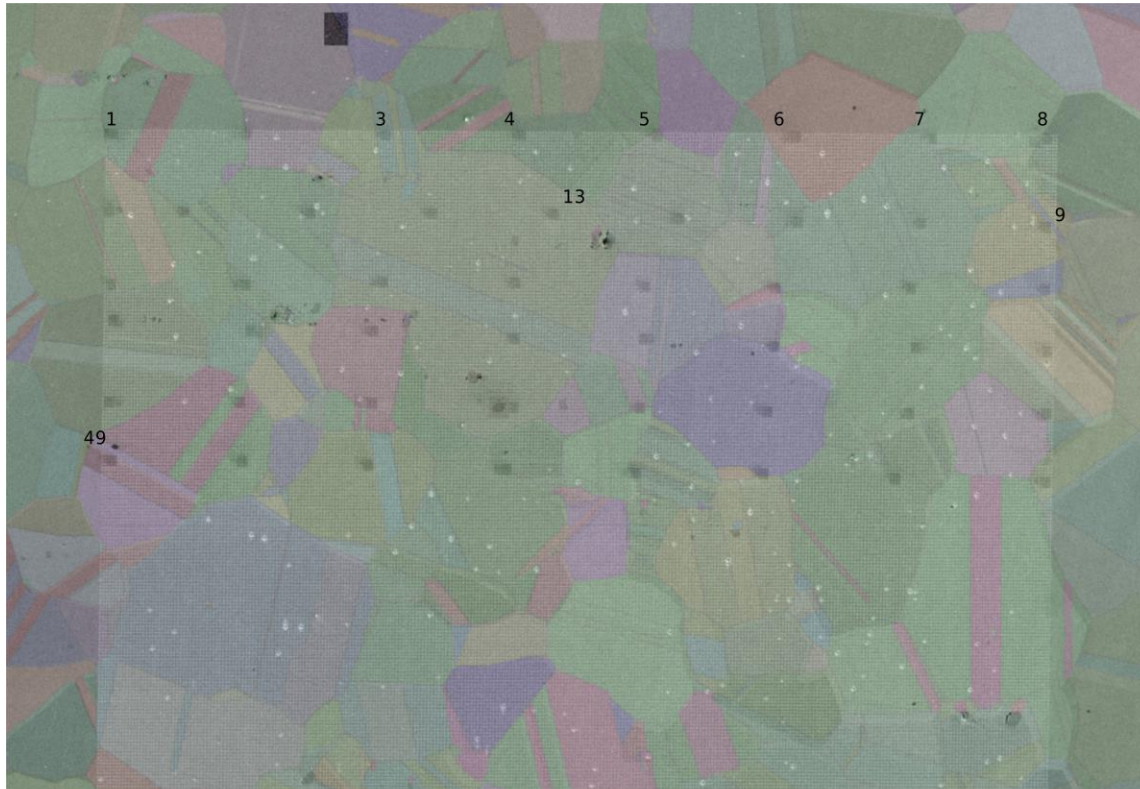
Courbe force-rayon de contact



Courbe force-déplacement

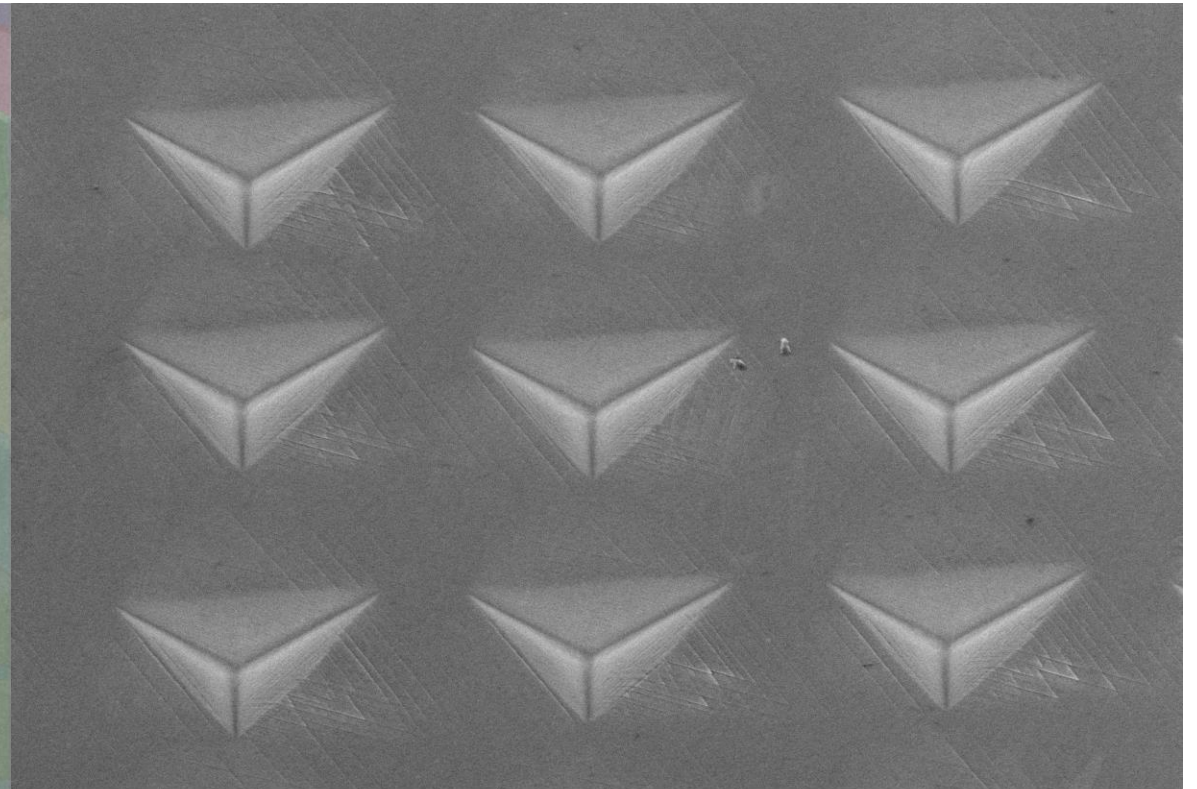


Analyse des données EBSD



	HV	HFW	WD	curr	det	mag	bias	mode	tilt	200 μm	
	5.00 kV	726 μm	4.0 mm	86 pA	ETD	175 x	0 V	SE	0 °	UAR CASTAING	

Cartographie d'indentation avec traitement EBSD

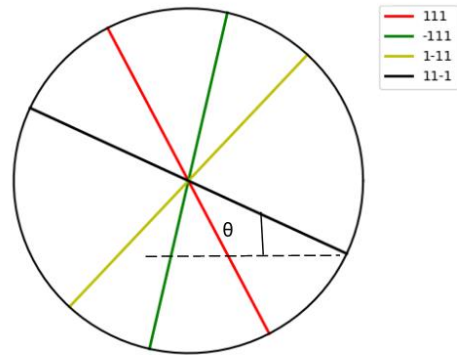
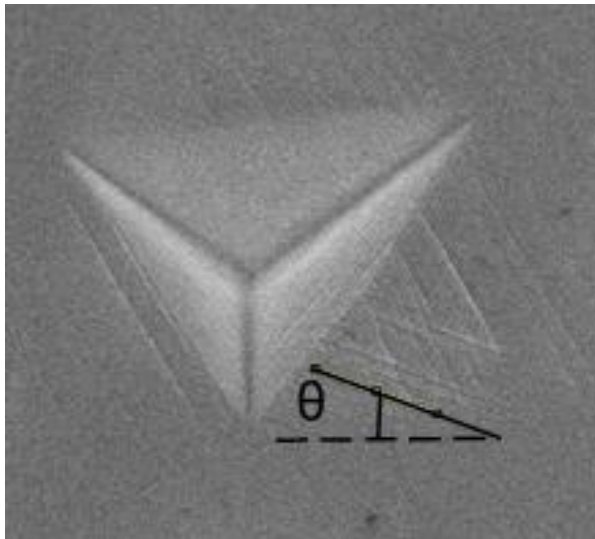


	HV	HFW	WD	curr	det	mag	bias	mode	tilt	1 μm	
	5.00 kV	6.35 μm	4.0 mm	86 pA	TLD	20 000 x	0 V	SE	50 °	UAR CASTAING	

Imagerie MEB de la zone 013

Analyse EBSD : Identification des systèmes de glissement

Plans de glissement



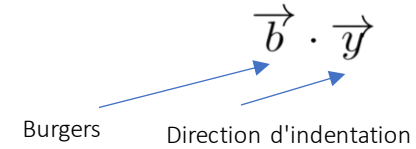
Zone 013			Moyenne des orientations
Plan 1			
128,624	129,015	130,611	129,417°
Plan 2			
163,325	163,056	164,733	163,705°

Orientation	
111	117.656°
111	77.115°
111	47.033°
111	155.009°

Directions de glissement

- o Difficile de connaître les directions exactes....

➔ Utilisation d'un indice de visibilité



Systèmes de glissement	B4	B2	B5	C5	C3	C1
Indice de Visibilité	0,681	0,253	0,428	0,532	0,434	0,966

Annexe 1

$$\textcircled{1} \quad Y_i(t) = \frac{X_i^2(t) + Z_i^2(t)}{2R} + U2_i(t)$$

avec $U2_i$ = déplacement imposé lors des conditions limites

indent/esclave

$$\textcircled{2} \quad Y_A^{vrai}(t) = Y_A + U2_A(t)$$

matériau indenté/maître

$A_v (X_A, Y_A, Z_A)$

$A_p (X_A + U1_{Av}, Y_A + U2_{Av}, Z_A + U3_{Av})$

Conditions de contact

$$\textcircled{4} \quad Y_A^{vrai}(t) > Y_A^{projete}(t)$$

$$\textcircled{3} \quad Y_A^{projete}(t) = Y_i + \frac{(X_A + U1_A(t))^2 + (Z_A + U3_A(t))^2}{2R} + U2_i(t)$$