

Les céramiques

Génie Mécanique – mars 2022
5GM - CE

xavier.boulnat@insa-lyon.fr

Les céramiques:

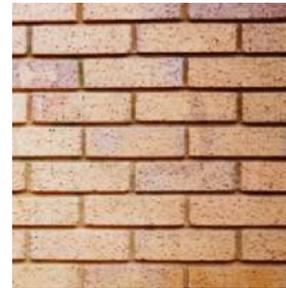
- *Qu'est ce que c'est ?*
- *A quoi ça sert ?*
- *Propriétés*
- *Challenges liés à la Conception:*
 - *Étude de cas 1 : la prothèse de hanche*
 - *Etude de cas 2: élément chauffant d'un four*

Les céramiques

Définition : *un matériau céramique est solide à température ambiante et n'est ni métallique, ni organique.*

Les céramiques

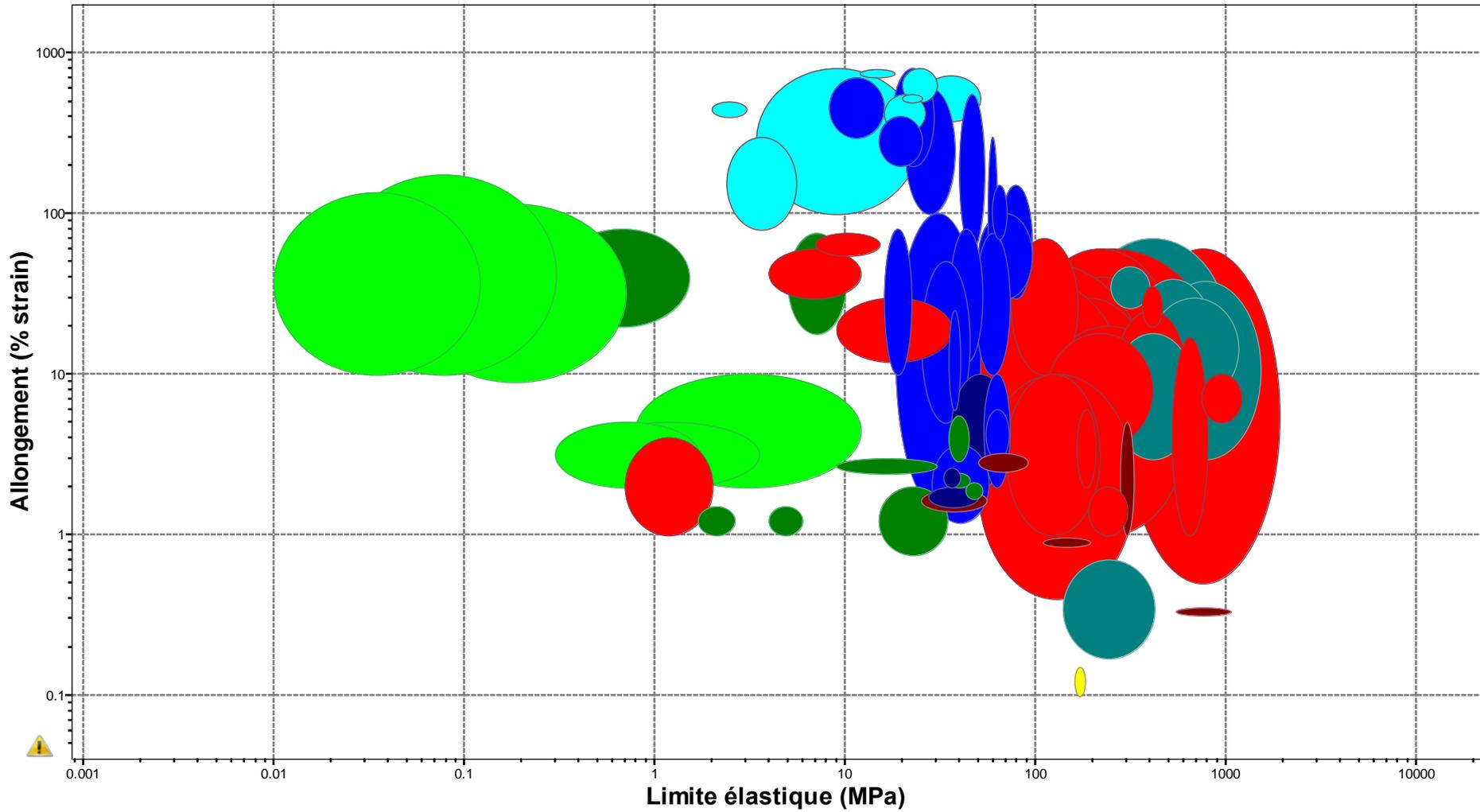
Définition : un matériau céramique est solide à température ambiante et n'est ni métallique, ni organique. Cette famille regroupe les **céramiques naturelles** (pierre, brique, béton) dont l'utilisation remonte à des millénaires ainsi que les **céramiques techniques**, oxydes (Al_2O_3 , ZrO_2 ...), carbures (SiC , WC ...), nitrures (AlN , Si_3N_4 ...) depuis le **début du XX^{ème} siècle**.



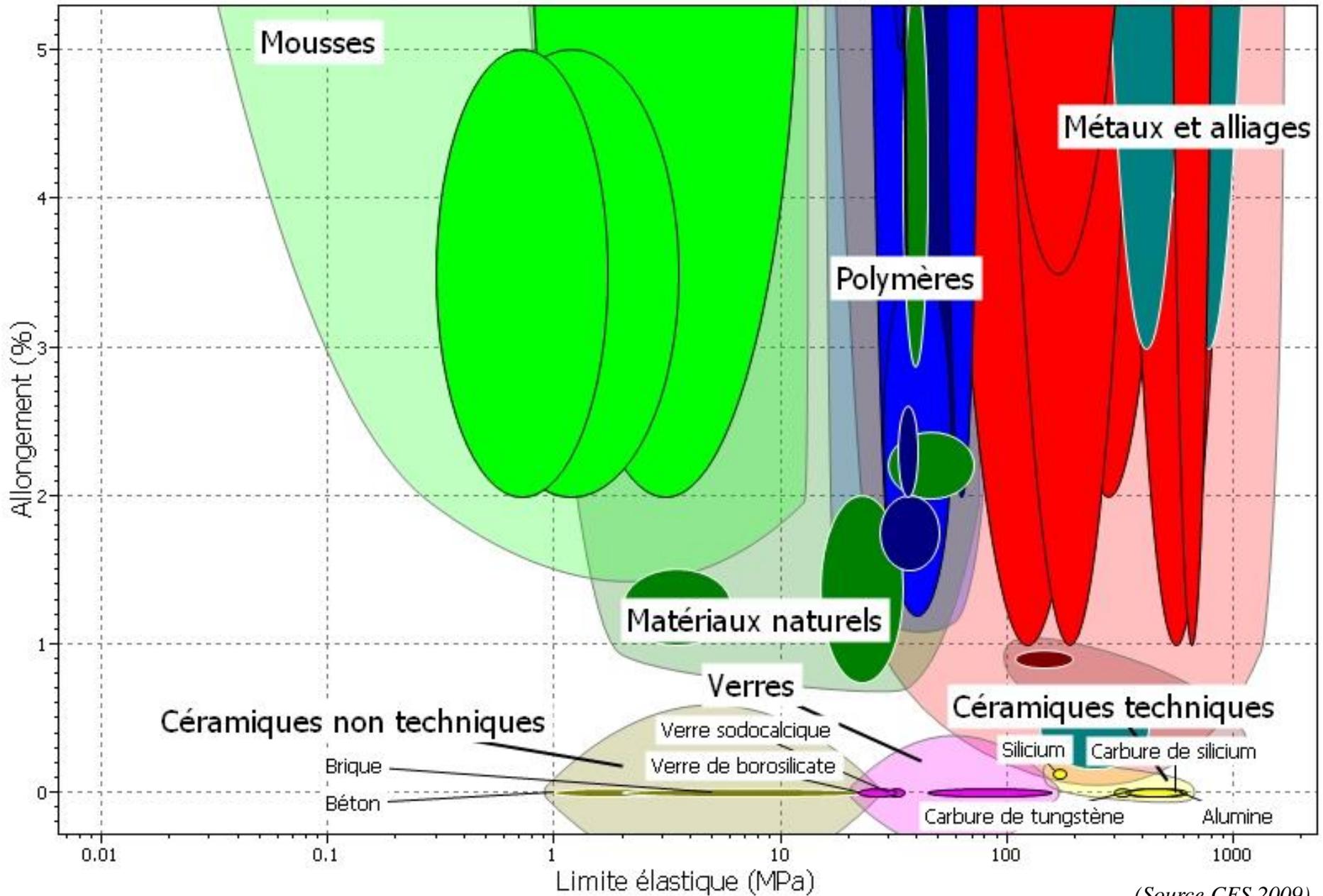
<https://www.knivesandtools.fr>



Les céramiques: propriétés

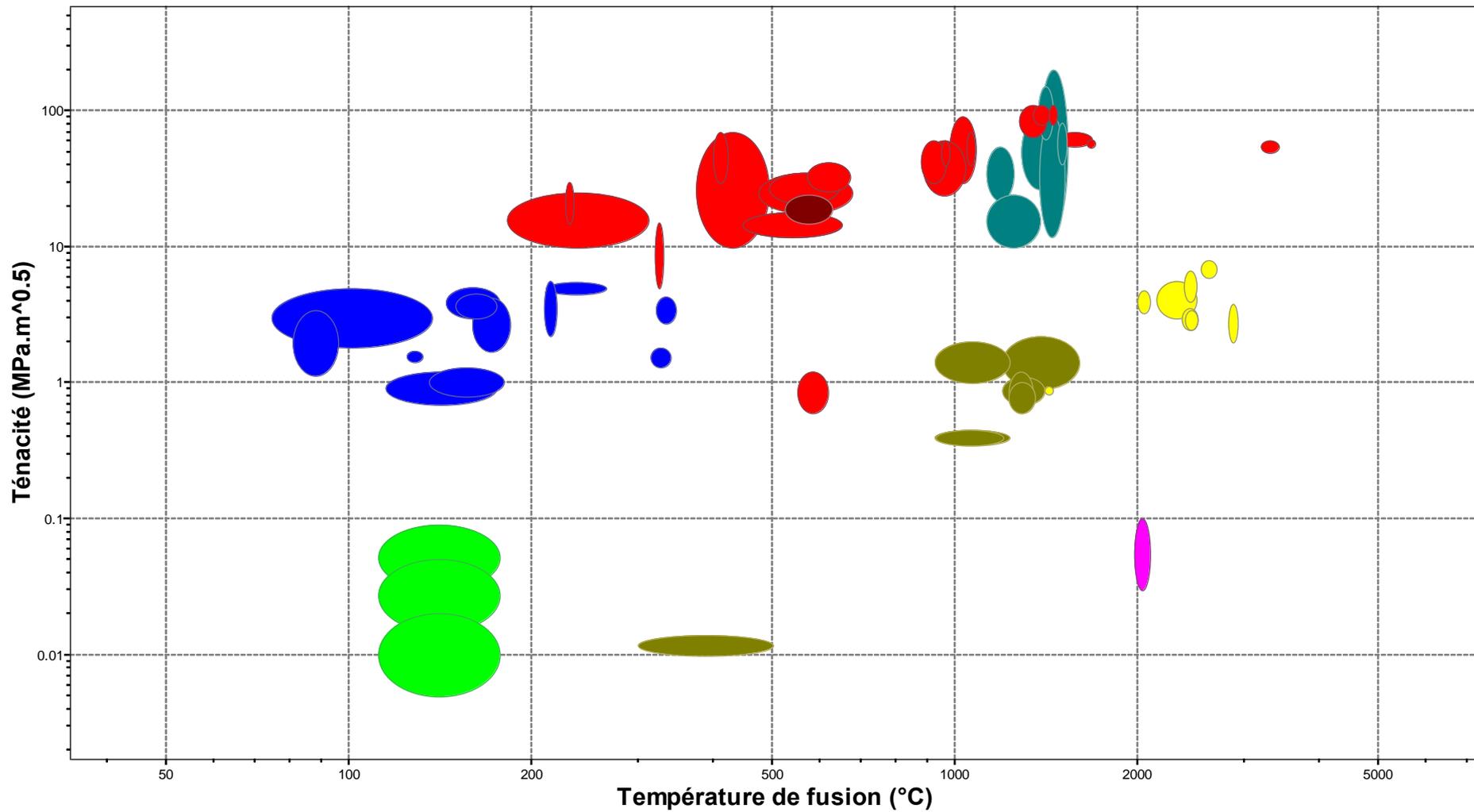


Les céramiques: propriétés

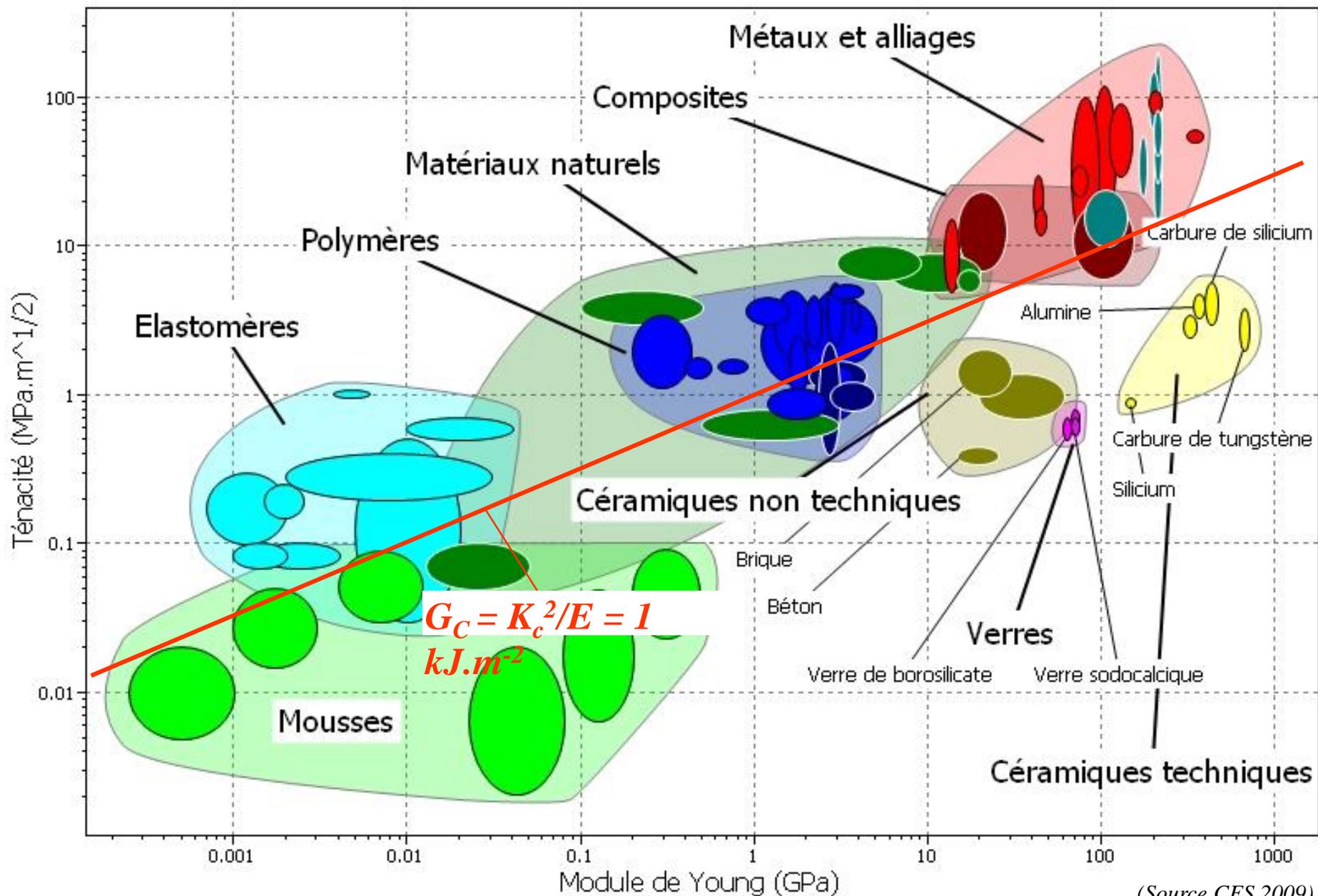


(Source CES 2009)

Les céramiques: propriétés

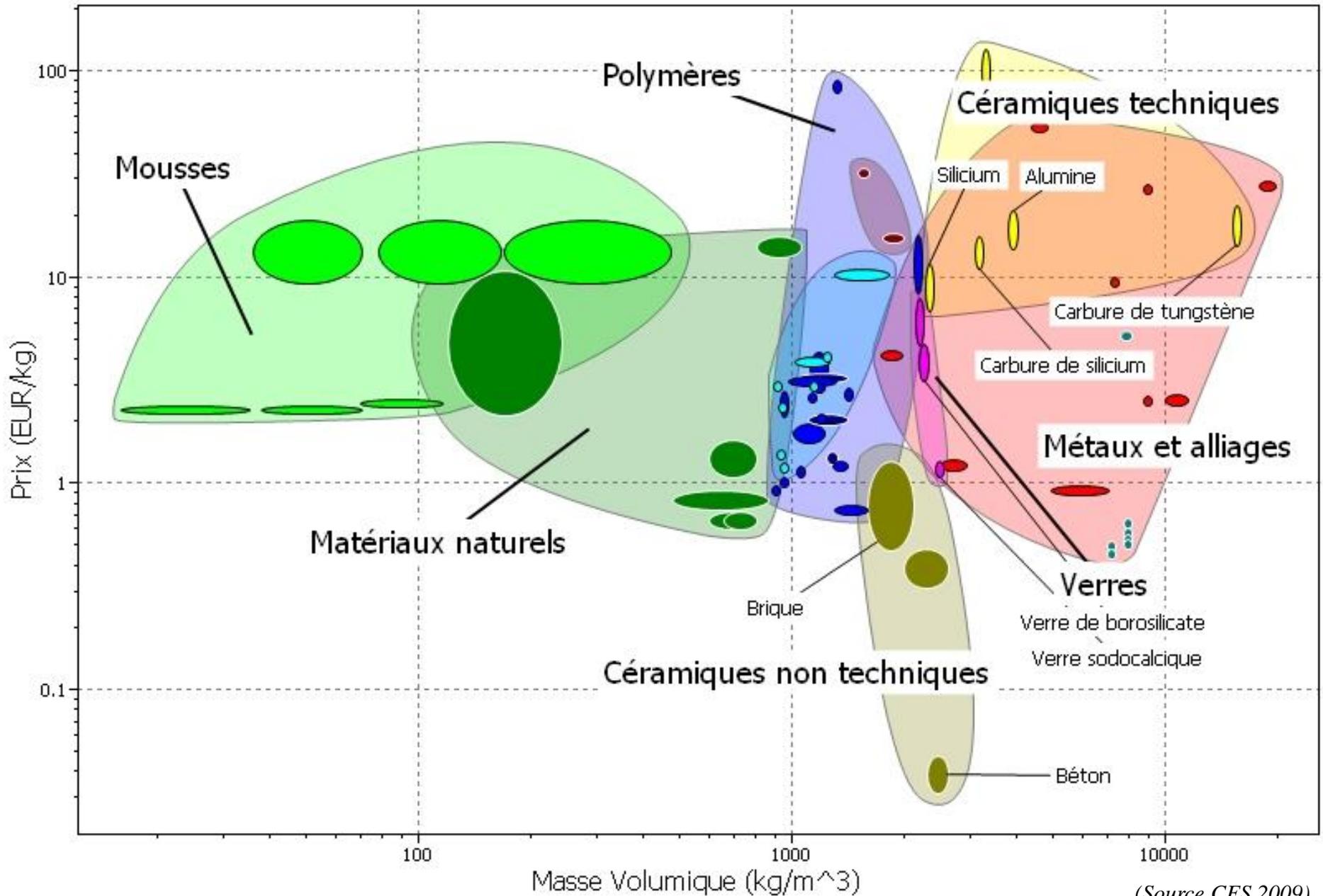


Les céramiques: propriétés



(Source CES 2009)

Les céramiques: propriétés



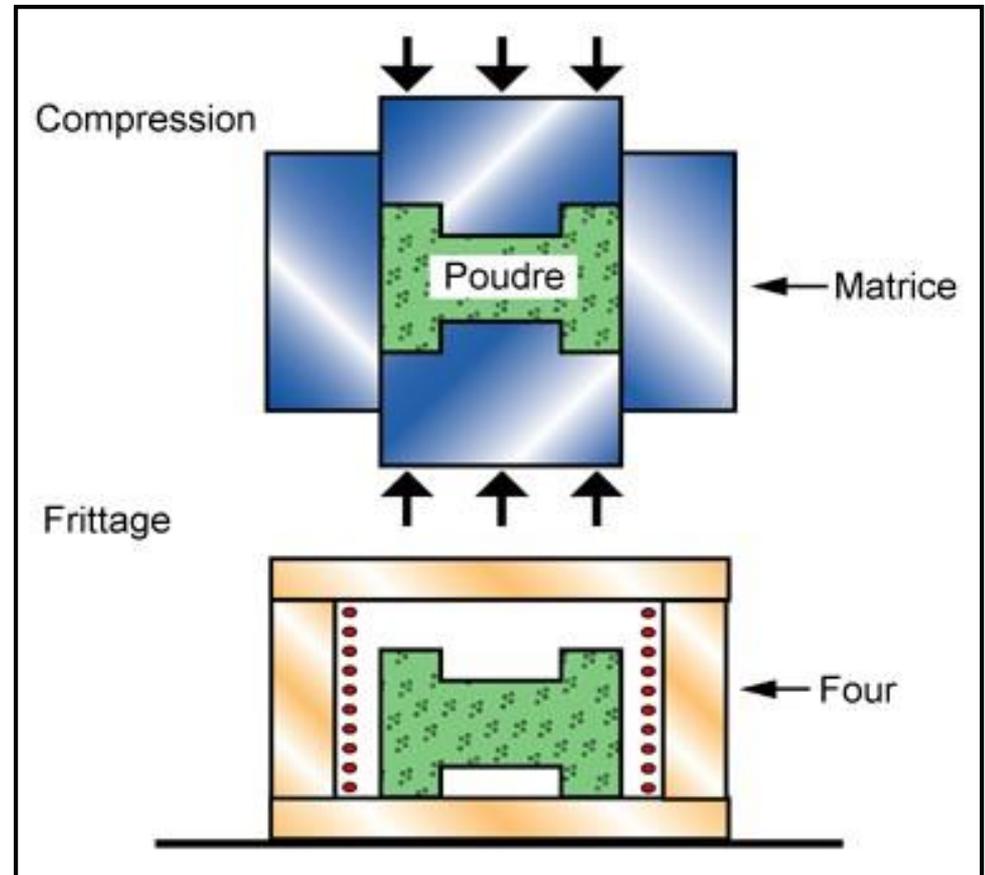
(Source CES 2009)

Les céramiques: procédés



Solidification à haute température d'une pâte humide plastique (verres minéraux)

*Agglutination par chauffage (**frittage**) d'une poudre sèche préalablement comprimée, sans passer par une phase liquide*

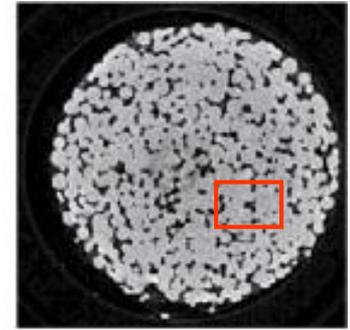
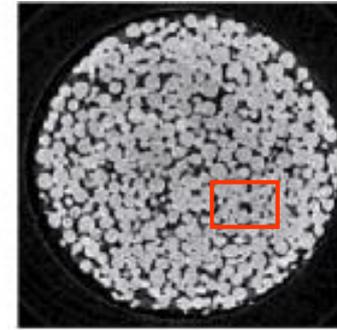
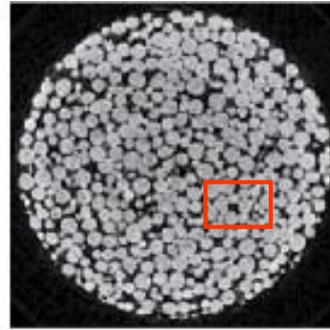


Les céramiques: procédés

Principe du frittage des poudres (sintering)

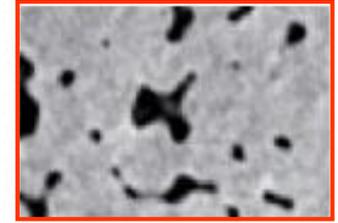
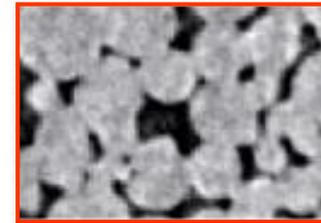


Compaction
→
puis chauffage



Temps

Consolidation du matériau par
minimisation de l'énergie du
système (surface libre) et
soudage/pontage des grains par
diffusion



Diminution de la **porosité** jusqu'à 1 ou 2%

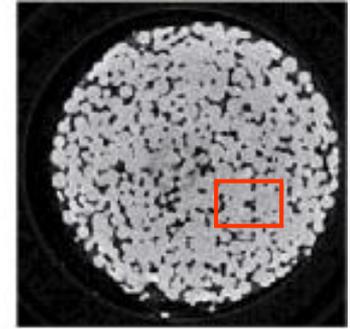
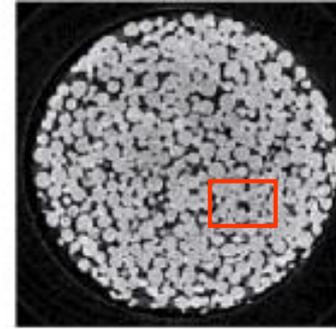
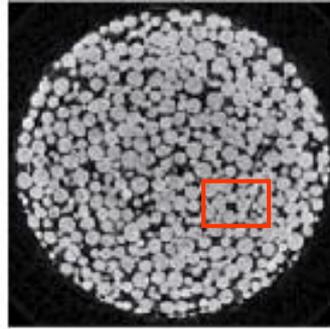
Procédé applicable *aux céramiques ou aux métaux*, sans contraintes induites par l'usinage. Le contrôle de la porosité est essentiel pour limiter la fragilité des céramiques

Les céramiques: procédés

Principe du frittage des poudres (sintering)

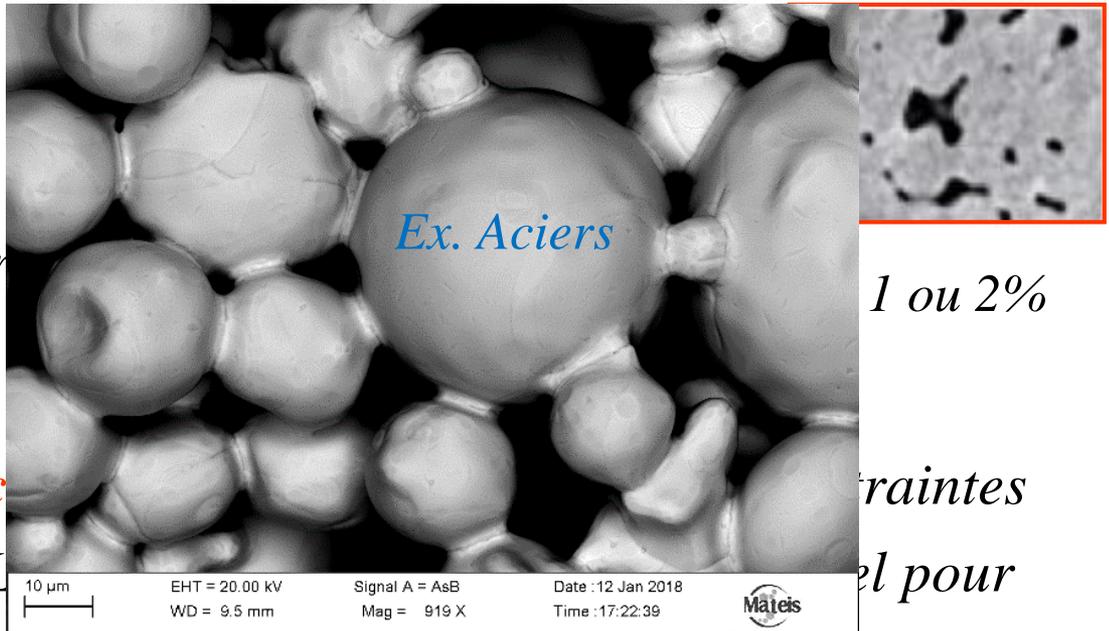


Compaction
→
puis chauffage



Temps

Consolidation du matériau par minimisation de l'énergie du système (surface libre) et soudage/pontage des grains par diffusion



1 ou 2%

Procédé applicable aux contraintes induites par l'usinage. L

raintes

el pour

limiter la fragilité des céramiques

Les céramiques

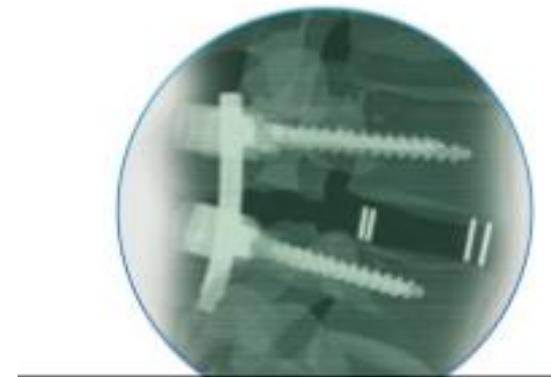
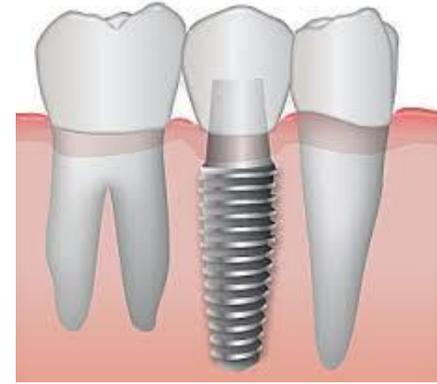


- *grande résistance à rupture / dureté / résistance à l'usure*
- *Utilisation très haute température*
- *faible masse volumique,*
- *Inertes (agressions climatiques et chimiques)*
- *isolant électrique, conductivité thermique faible*
- *Optique: opaque ou translucides*



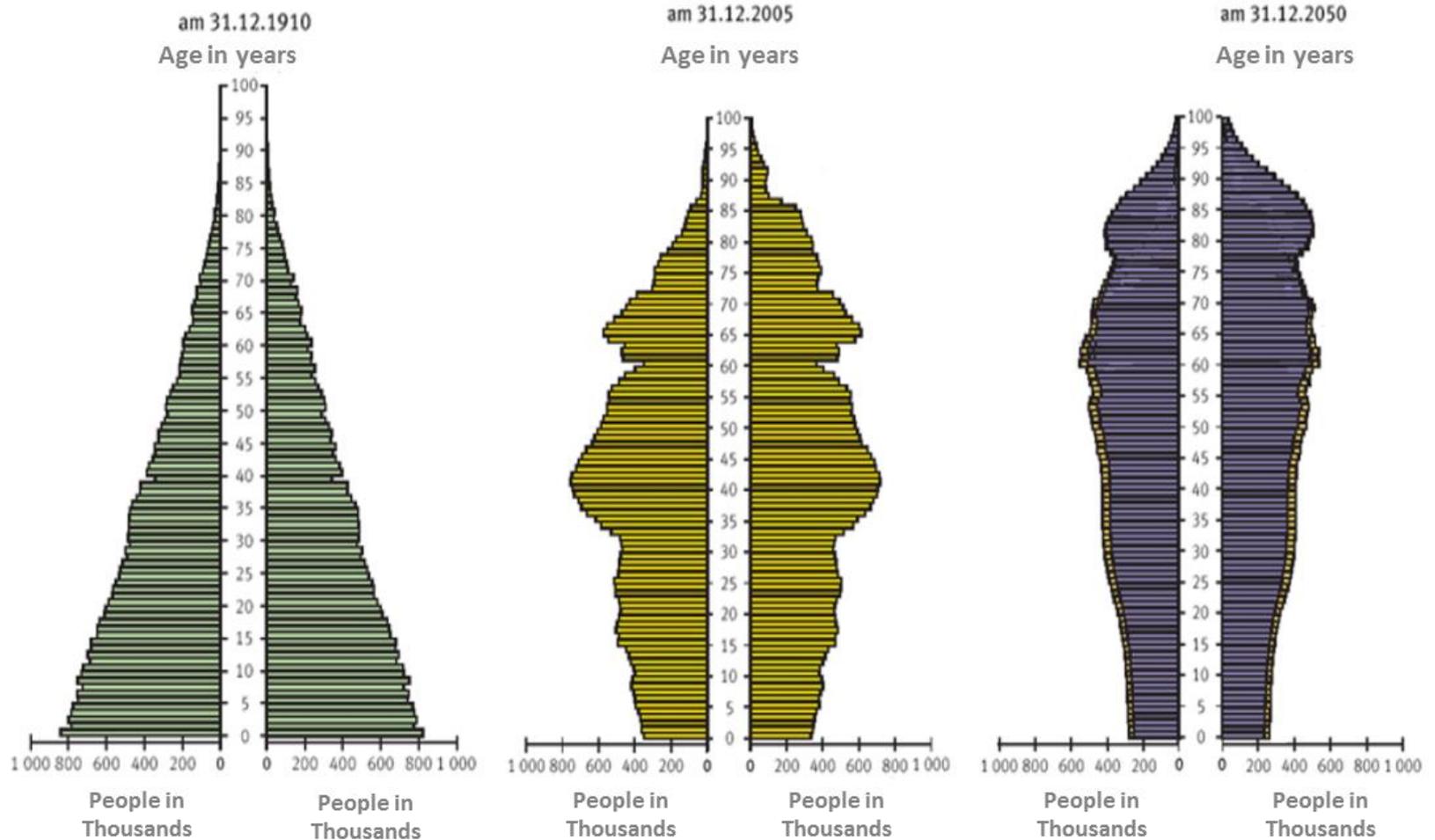
- *matériaux fragiles et très sensibles à de petites imperfections,*
- *mise en forme et usinage difficiles et coûteux*
- *meilleur comportement en compression qu'en traction*
- *sensibilité aux chocs thermiques*

Cas d'application: les céramiques pour les prothèses orthopédiques



Cas d'application: les céramiques pour les prothèses orthopédiques

Les biomatériaux ont-il un avenir ?



Exemples : - Prothèse de hanche: 1 Million / an en Europe !

- 30 Milliards € de chiffre d'affaire dans le monde ! (4 Mds € pour Tata-steel)

Cas d'application: les céramiques pour les prothèses orthopédiques

Marché mondial des biomatériaux

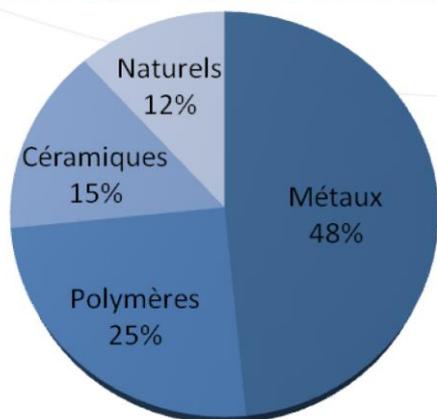
25,3 Mds \$ en 2012 à 33,6 Mds \$ d'ici 2019

Croissance annuelle : 4,1%

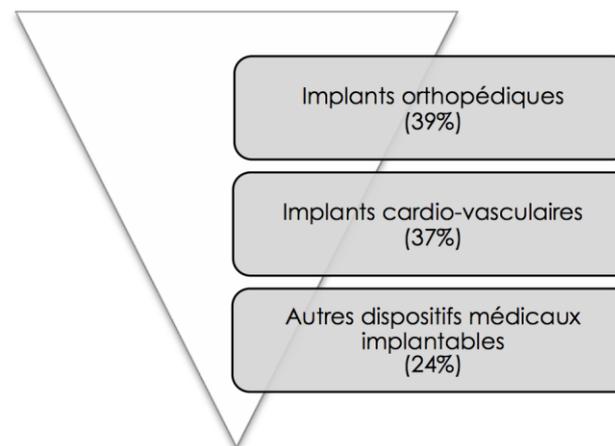
Porté par l'Amérique du Nord et l'Europe

Forte croissance attendue en Asie

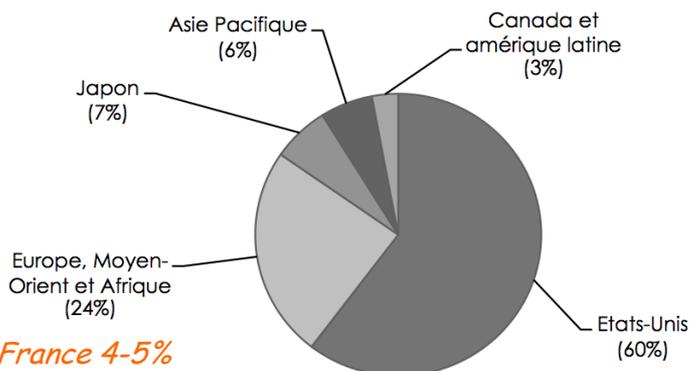
Marché par type de matériau



Marché par domaines d'application



Marché par zones géographiques



- *Marché encore largement dominé par métaux,*
- *Marché porté par l'orthopédie,*
- *Marché dominé par USA, fort potentiel en Asie,*

- *Recherche vers dispositifs plus durables, moins invasifs,*
- *Potentiel de l'ingénierie tissulaire.*

Cas d'application: les céramiques pour les prothèses orthopédiques

Chirurgie orthopédique

**Prothèses articulaires,
Ligaments et tendons artificiels,
Chirurgie du rachis,
Réparation des fractures,
Matériaux de comblement osseux**

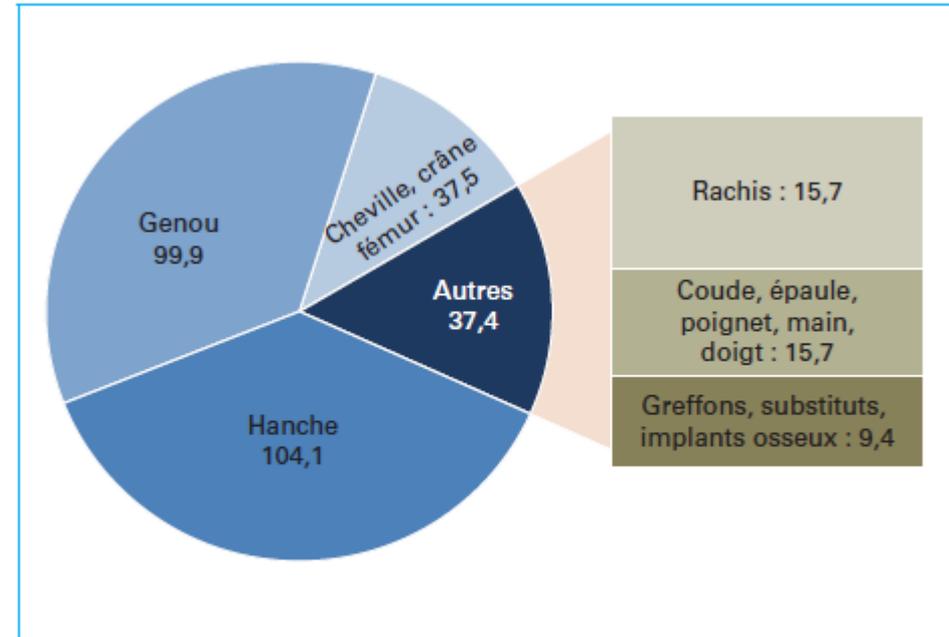


Figure 1 – Dépenses de l'assurance maladie pour les différents types de prothèses orthopédiques en France en 2010 (M€) [5]

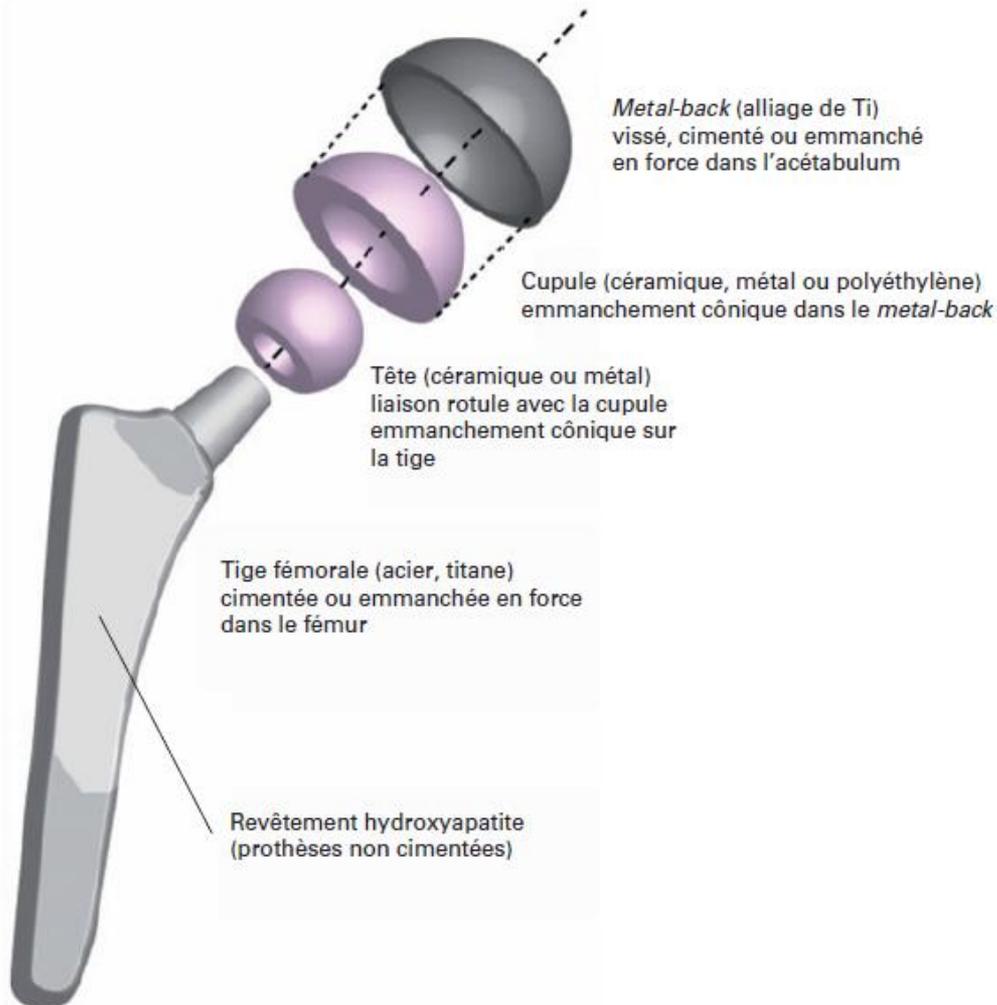
Chirurgie dentaire

**Restauration/comblement dentaire,
implants,
Reconstruction maxillo-faciale,
Orthodontie.**



Cas d'application: les céramiques pour les prothèses orthopédiques

Prothèse de hanche



Cahier des charges ?



De gauche à droite : cupule acétabulaire se composant d'une calotte en CoCrMo poli miroir insérée dans un support en polyéthylène recouvert de titane pour favoriser l'ancrage avec l'os, une tête fémorale en CoCrMo insérée sur une tige fémorale. Le support en polyéthylène permet de mieux absorber les chocs.

Cas d'application: les céramiques pour les prothèses orthopédiques

Biofonctionnalité et biocompatibilité

Près de 2.000.000 prothèses de hanches implantées chaque année dans le monde avec succès. Procédure chirurgicale éprouvée.

MAIS

Problèmes d'ostéolyse sérieux avec cupules en téflon, voire UHMWPE...

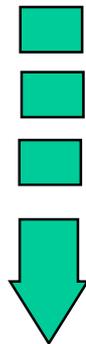
Problèmes de *rupture de têtes en céramique (alumine)*, de tiges métalliques...

Rejets, révision ... France : 300 décès chaque année !!



Biofonctionnalité

Aptitude à remplir une fonction désirée



Biocompatibilité

Remplir la fonction aussi longtemps que possible dans l'organisme

Bioactivité

(ex : aide repousse osseuse, ingénierie tissulaire)

Cas d'application: les céramiques pour les prothèses orthopédiques

Impératifs fonctionnels des biomatériaux:

Transmission des efforts !

Caractéristiques mécaniques d'intérêt :

- module d'Young (os : 20 GPa),
- Contrainte à rupture
(traction/compression/torsion),
- Ténacité des céramiques.
- Fatigue ($>10^7$ cycles),
- Fluage (polymères),
- Fissuration.

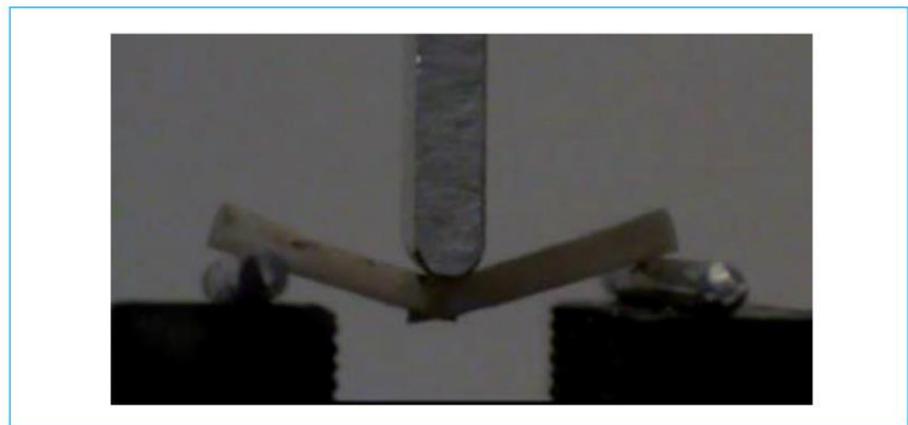
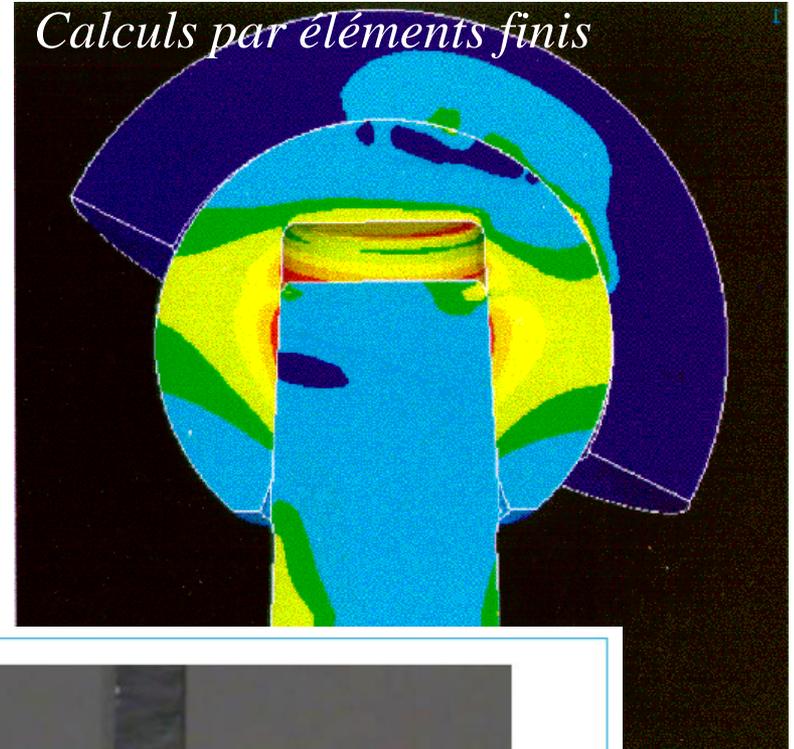
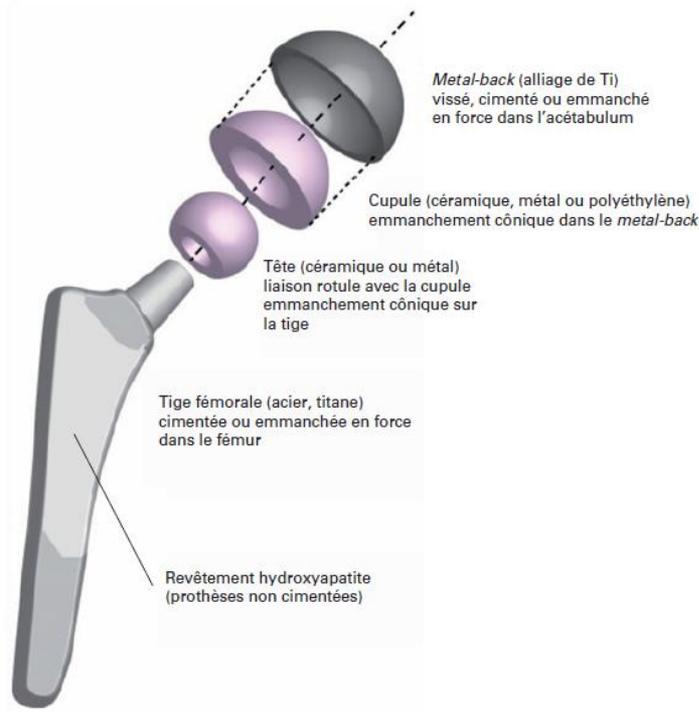


Figure 1 - Essais de flexion 3 points sur un os enfant

Cas d'application: les céramiques pour les prothèses orthopédiques

Prothèse de hanche: exercice



On donne:

$$\sigma_R = \frac{K_{IC}}{y\sqrt{a}}$$

avec a taille du défaut le plus critique,
 y facteur de forme de ce défaut proche de $\sqrt{\pi}$.

1) Rappeler ce qu'est K_{IC}

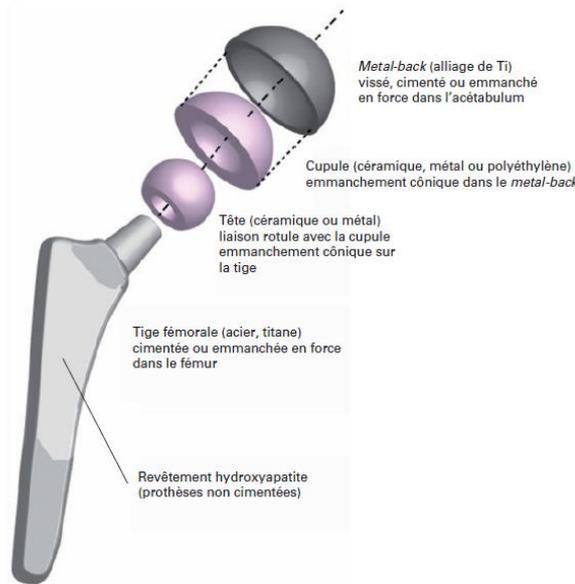
2) Rupture brutale:

Donner la taille de défaut critique à ne pas dépasser à la fabrication pour éviter toute rupture brutale de la pièce lorsqu'elle est soumise à de la traction.

(données disponibles dans le tableau Annexe)

Cas d'application: les céramiques pour les prothèses orthopédiques

Prothèse de hanche: exercice



3) Rupture différée:

Même sans rompre brutalement, la pièce peut laisser se propager une fissure si le défaut dépasse un seuil d'intensité des contraintes K_{I0}

4) Justifier l'usage d'un essai « in vivo » pour valider la pièce en calculant ces seuils.

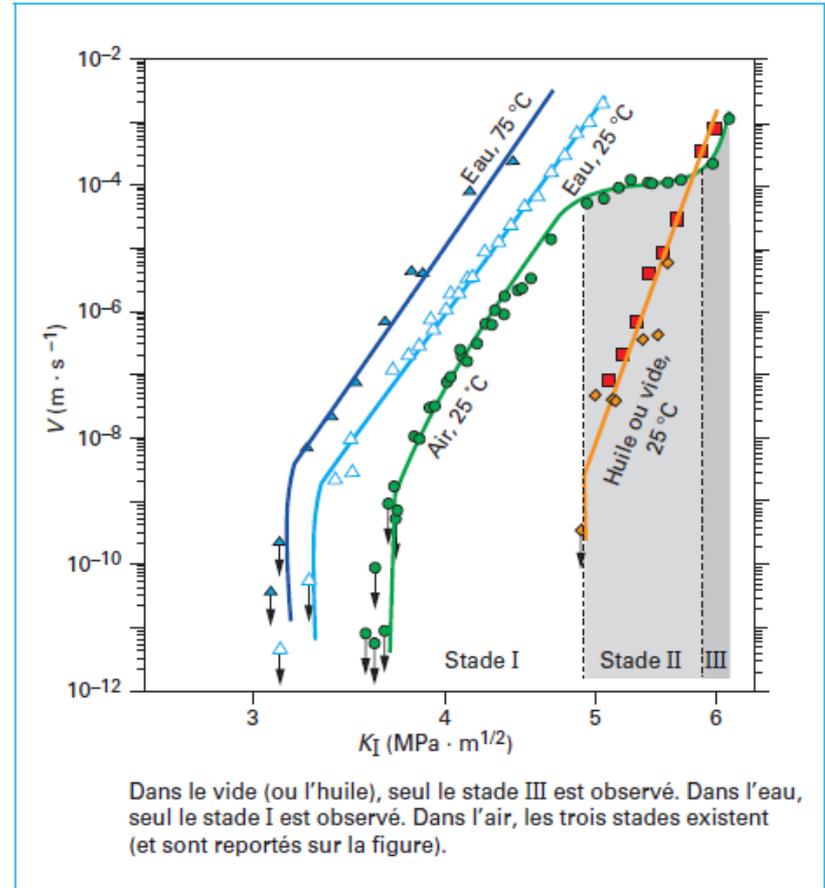


Figure 3 – Effet de l'environnement sur la vitesse propagation des fissures dans la zircone

$$\gamma \propto \frac{K_{I0}^2}{E}$$

Zircone:

- 35 J.m⁻² dans l'eau
- 100 J.m⁻² dans le vide

Cas d'application: les céramiques pour les prothèses orthopédiques

Annexe: Fiche technique Zircon (CES)

Propriétés générales

Masse Volumique	ⓘ	5.9e3	-	6.15e3	kg/m ³
Prix	ⓘ	* 15.8	-	22.8	EUR/kg
Date de première utilisation ("-" signifie "Avant Jésus Christ	ⓘ	1962			

Propriétés mécaniques

Module de Young	ⓘ	200	-	250	GPa
Module de cisaillement	ⓘ	* 60	-	86	GPa
Module de compressibilité	ⓘ	* 160	-	212	GPa
Coefficient de Poisson	ⓘ	0.3	-	0.32	
Limite élastique	ⓘ	500	-	710	MPa
Résistance en traction	ⓘ	500	-	710	MPa
Résistance à la compression	ⓘ	* 3.6e3	-	5.2e3	MPa
Allongement	ⓘ	0			% strain
Mesure de dureté Vickers	ⓘ	1e3	-	1.23e3	HV
Limite de fatigue	ⓘ	* 300	-	500	MPa
Ténacité	ⓘ	6	-	8	MPa.m ^{0.5}
Coefficient d'amortissement (tan delta)	ⓘ	* 5e-4	-	0.001	

Propriétés thermiques

Température de fusion	ⓘ	2.55e3	-	2.7e3	°C
Température maximale d'utilisation	ⓘ	1.2e3	-	1.5e3	°C
Température minimale d'utilisation	ⓘ	-273			°C
Conducteur ou isolant thermique?	ⓘ	Mauvais isolant			
Conductivité thermique	ⓘ	2	-	4.2	W/m.°C
Chaleur spécifique	ⓘ	480	-	520	J/kg.°C
Coefficient de dilatation	ⓘ	10.5	-	11	μstrain/°C

Cas d'application: les céramiques pour les prothèses orthopédiques

Excellente stabilité chimique (oxydes), frottement optimal (mouillabilité, rugosité)

Les céramiques inertes :

- l'alumine,***
- la zircone,***
- le carbone.***

Excellente tenue à la corrosion

Pas de dégradation à long terme

Propriétés mécaniques (contraintes à rupture)

Frottement très faible



Têtes fémorales, cupules (orthopédie)

prothèses dentaires (↑)

Valves cardiaques

Les céramiques bioactives :

- l'hydroxyapatite (HAP)***
- le phosphate tricalcique***
- bioverres***

*Composition proche de l'os
poreux*

Contraintes à rupture limitées



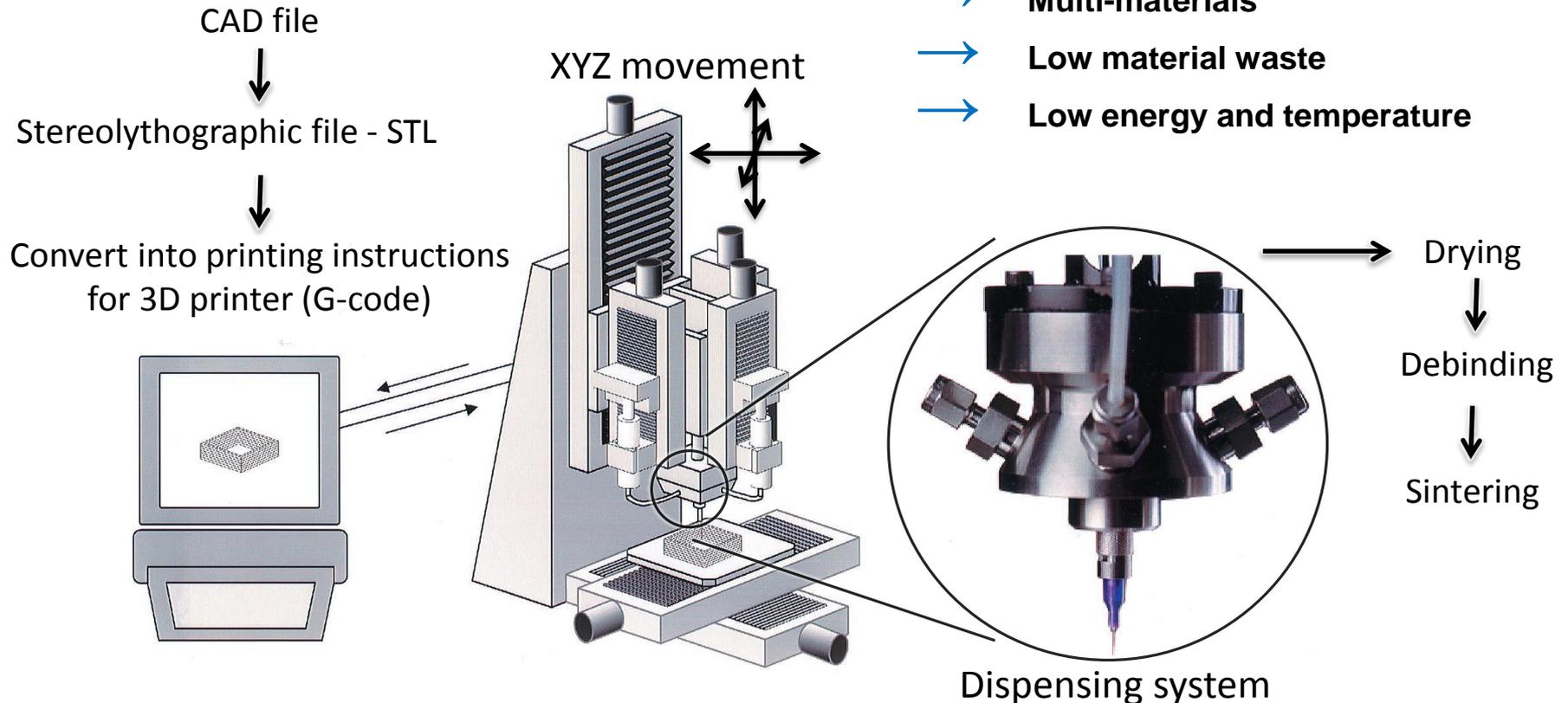
*Matériaux ostéoconducteurs
revêtements, comblement osseux
chirurgie du rachis*

Difficulté de mise en œuvre (coût), fragilité, (rigidité)

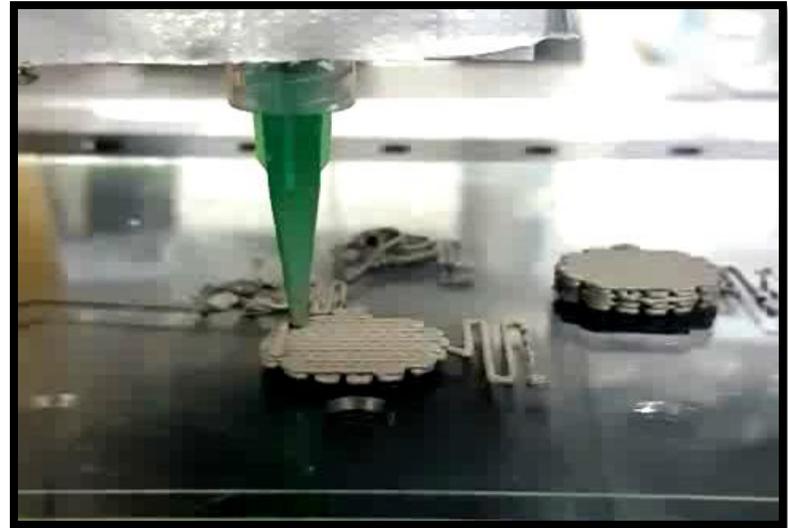
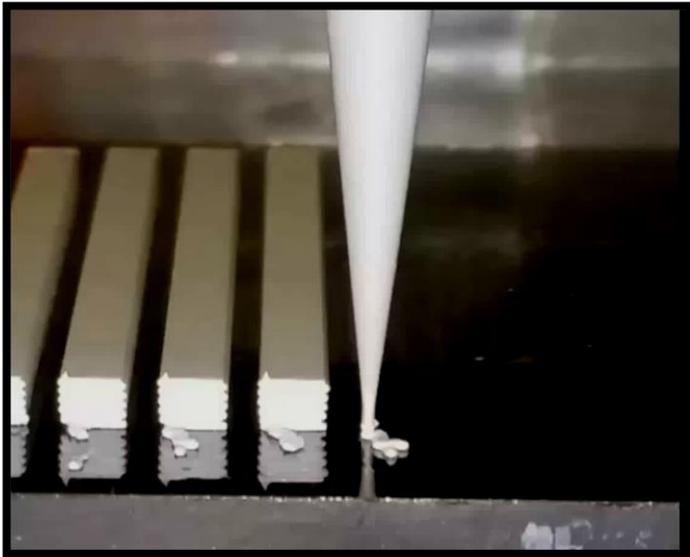
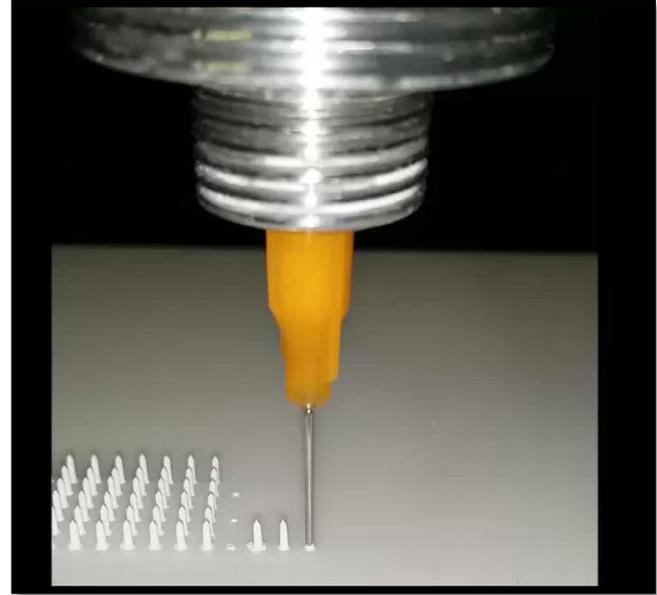
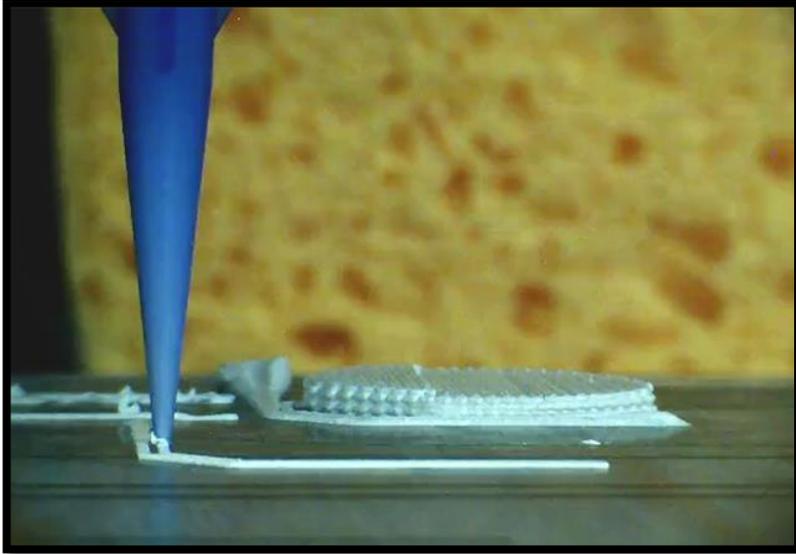
Direct Filament Writing

« An **AM technology** based on the continuous deposition of **ceramic-loaded paste** or ceramic precursor extrudates in a **layerwise fashion** to build up 3D structures »

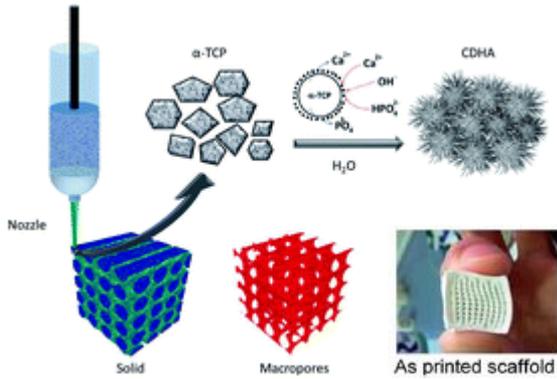
- Graded materials in the 3 dimensions
- Controlled architecture and porosity
- Multi-materials
- Low material waste
- Low energy and temperature



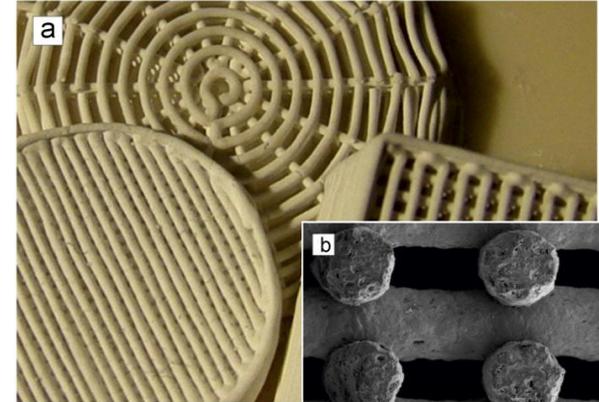
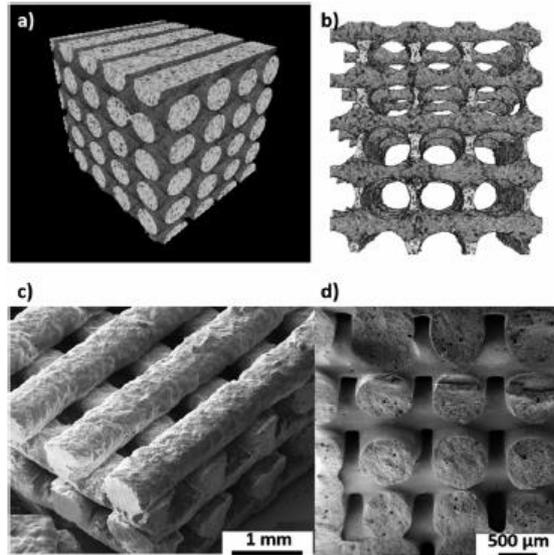
How it works



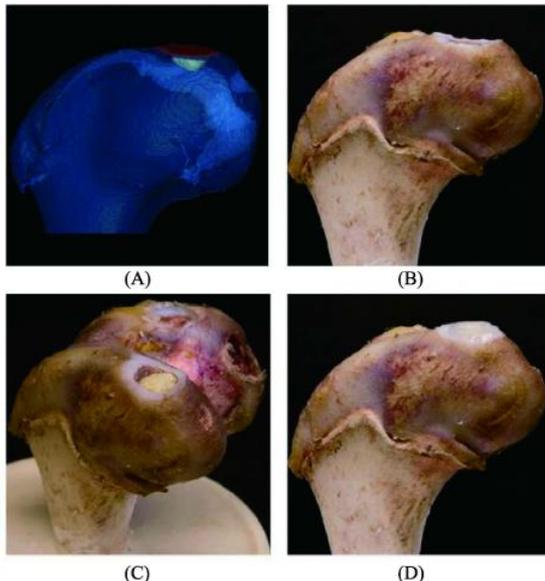
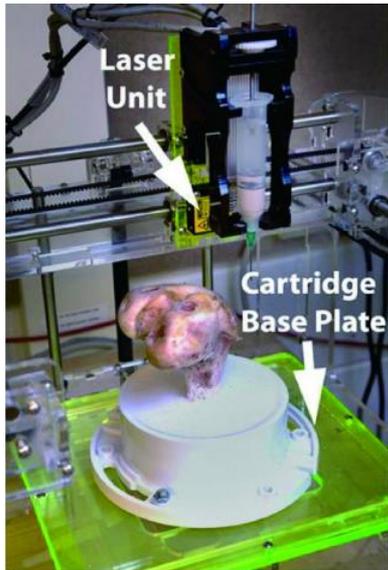
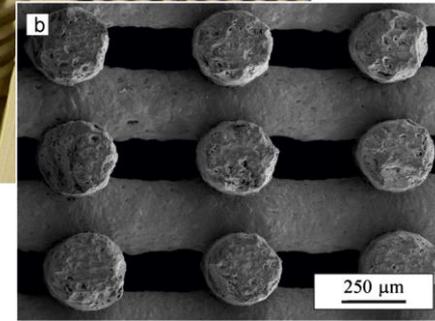
Some examples in the field of biomaterials



CD Hydroxyapatite scaffolds produced by direct ink writing.
Maazouz et al. 2014



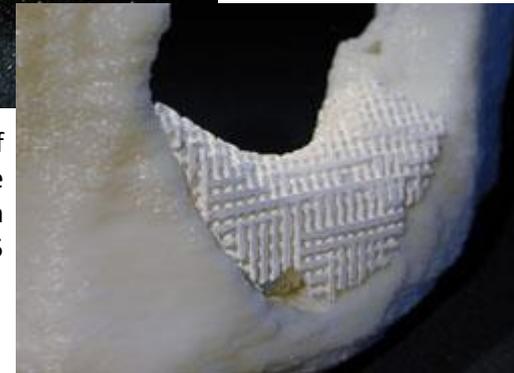
Bioglass scaffolds by DIW
Eqtesadi et al., Materials Letters 2013



Cohen et al, Additive manufacturing for in situ repair of osteochondral defects. Biofabrication 2014



Cesarano et al. Customization of load-bearing hydroxyapatite lattice scaffolds. Int J Appl Ceram Tec 2, 212, 2005



Cas d'application 2: Influence du procédé de frittage

Le **carbure de silicium (SiC)** est une céramique ayant des propriétés semi-conductrices, qui lui permettent d'être utilisé comme élément chauffant dans des fours industriels.

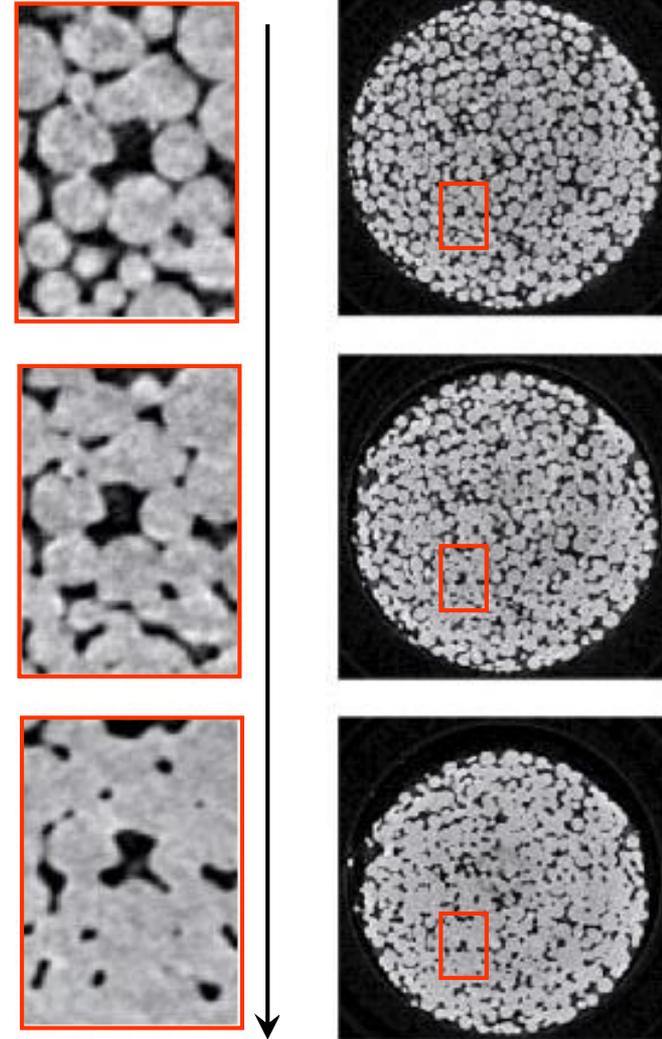
Le carbure de silicium massif a un module d'Young E égal à 450 GPa. Sa résistance à la traction $R_{m,o}$ est égale à 1800 MPa.

Le coût de production du silicium polycristallin massif étant très élevé, on décide d'utiliser plutôt une méthode de fabrication des éléments chauffants par frittage sous pression isostatique d'une poudre de SiC, ce qui conduit toujours à un produit contenant un certain taux de porosité noté p . La résistance à la traction du SiC fritté s'établit selon l'équation suivante $R_m = R_{m,o} e^{-5p}$.

1. *Quel est le pourcentage maximal p_{max} de porosité (en %) que l'on peut tolérer dans les pièces frittées si leur résistance à la traction doit au moins être égale à 1200 MPa ?*

Après les premiers essais de fabrication, on constate que les pièces de SiC fritté n'atteignent pas la résistance à la traction minimale recherchée, soit 1200 MPa.

2. *Quel(s) paramètre(s) de frittage devra-t-on faire varier et dans quel sens (augmentation, diminution) pour obtenir la résistance à la traction recherchée? Justifiez vos réponses.*

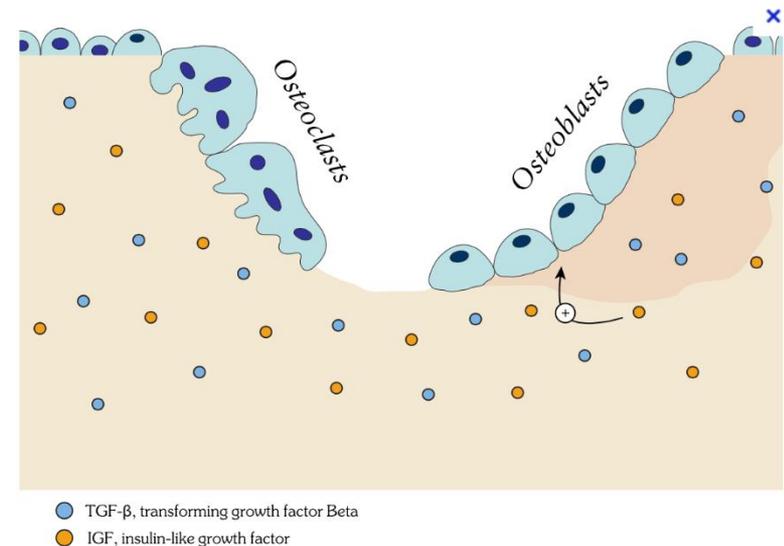


Cas d'application: les céramiques pour les prothèses orthopédiques

L'os : un matériau intelligent

Bone remodeling involves resorption by osteoclasts and replacement by osteoblasts. Osteoblasts and osteoclasts are referred to as bone remodeling units.

Remodeling or bone turnover is the process of resorption followed by replacement of bone with little change in shape and occurs throughout a person's life. Repeated stress, such as weight-bearing exercise or bone healing, results in the bone thickening at the points of maximum stress. It has been hypothesized that this is a result of bone's piezoelectric properties, which cause bone to generate small electrical potentials under stress.



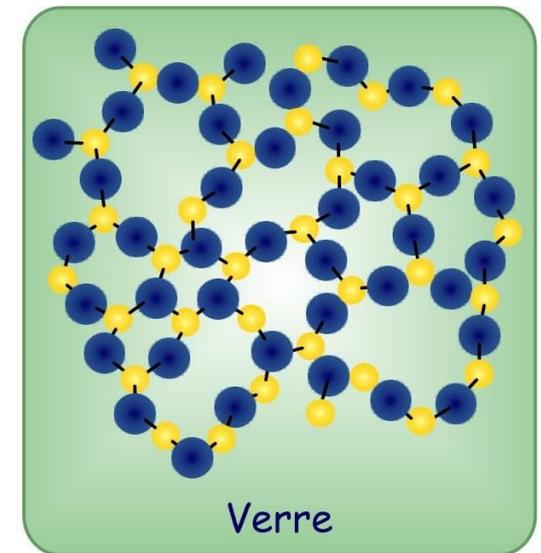
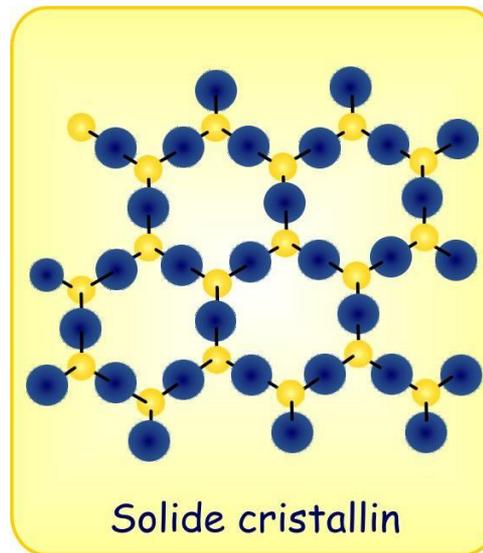
Quel est l'intérêt d'un tel processus ?

Microstructure des céramiques

Les liaisons atomiques constituant les céramiques peuvent être :

- **Ioniques** : empilement dense par attraction électrostatique d'ions provenant d'un métal et d'un non métal (NaCl , Al_2O_3 , ZrO_2 ...)
- **Covalentes** : liaisons entre 2 non-métaux (SiO_2 , Si_3N_4 ...) ou des éléments purs (diamant (C), silicium...) elles sont fortement directionnelles

Les céramiques peuvent se présenter sous une forme **crystalline** ou **amorphe**



Le **verre** est essentiellement composé de silice (SiO_2), c'est un matériau **amorphe** présentant une **transition vitreuse** à une température supérieure à l'ambiante