



Les biomatériaux

Damien Fabrègue, SGM

Les métaux utilisés pour les applications biomédicales

→ Pourquoi les métaux ?

- ✓ certaine inertie chimique (vieillessement)
- ✓ bonnes propriétés mécaniques (module d'Young, ténacité, tenue en fatigue)
- ✓ capacité de mise en forme
- ✓ prix

• Quels métaux ?

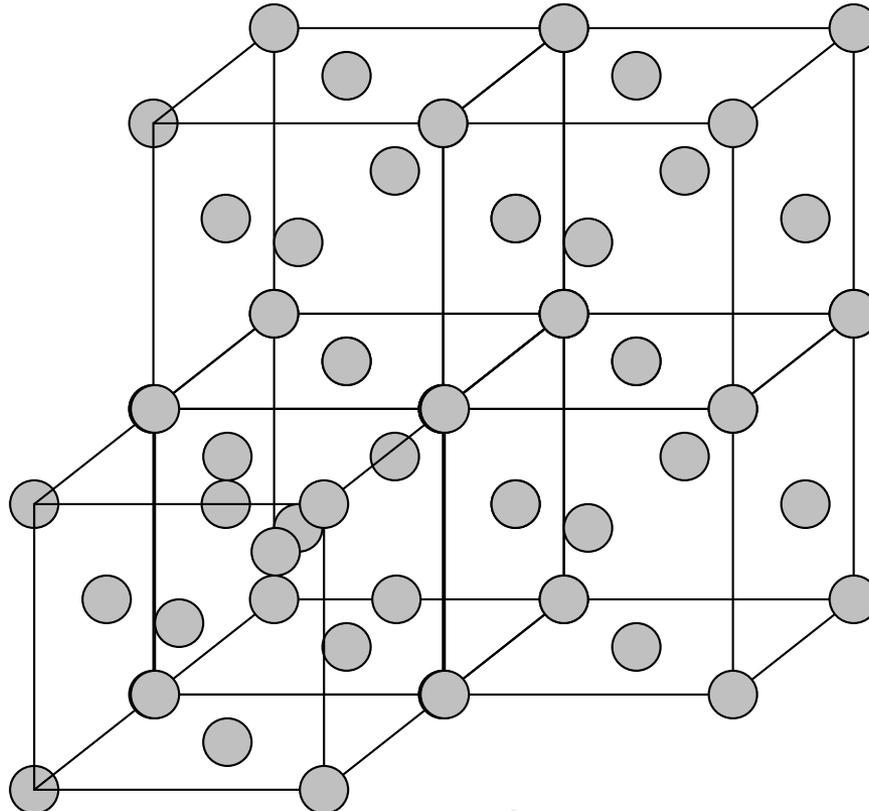
- ✓ Titane pur
- ✓ Alliage de titane TA6V
- ✓ Aciers inox
- ✓ Alliages de Co-Cr-Mo
- ✓ Alliages à mémoire de forme

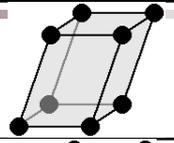
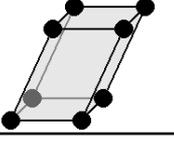
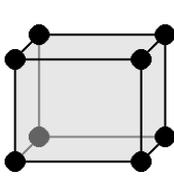
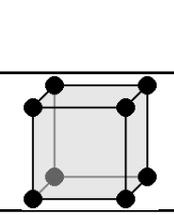
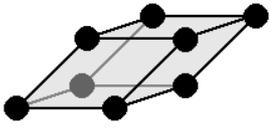
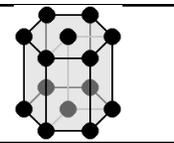
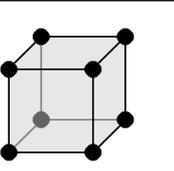
Les métaux utilisés pour les applications biomédicales

→ Liaison atomique :

- ✓ mise en commun d'électrons délocalisés
- ✓ énergie de la liaison moyenne

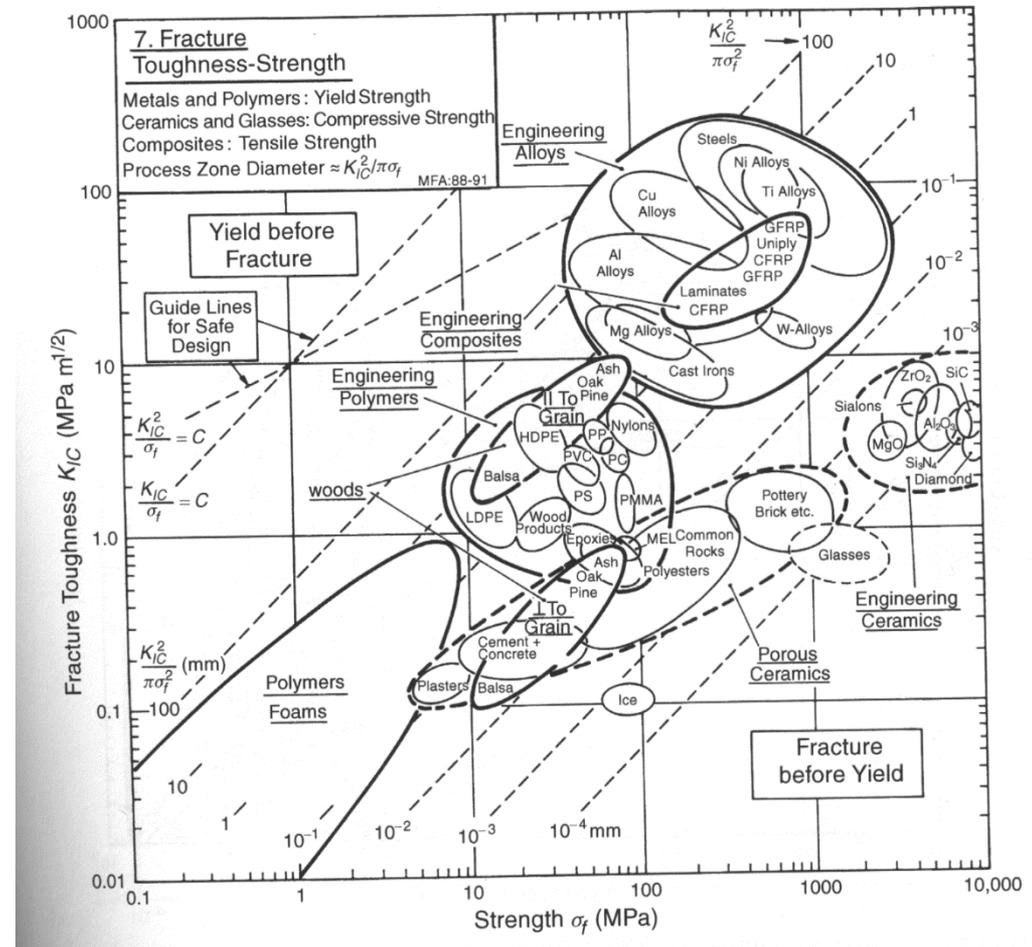
→ Arrangement cristallin: ordre parfait dans les 3 directions



Système cristallin		Paramètres du réseau	Symétrie minimale	Réseaux de Bravais
1. Triclinique		$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma = 90^\circ$	—	1. Simple ou primitif P
2. Monoclinique		$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$	Axe d'ordre 2	2. 3. A bases centré C
3. Orthorhombique		$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	3 axes \perp d'ordre 2	4. 5. Bases centrées A ou B ou C 6. Faces centrées F 7. Centré I
4. Quadratique ou tétragonal		$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	1 axe d'ordre 4	8. 9.
5. Rhomboédrique		$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ < 120^\circ$	1 axe d'ordre 3	10.
6. Hexagonal		$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	1 axe d'ordre 6	11.
7. Cubique		$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$		12. 13. 14.

Propriétés des métaux

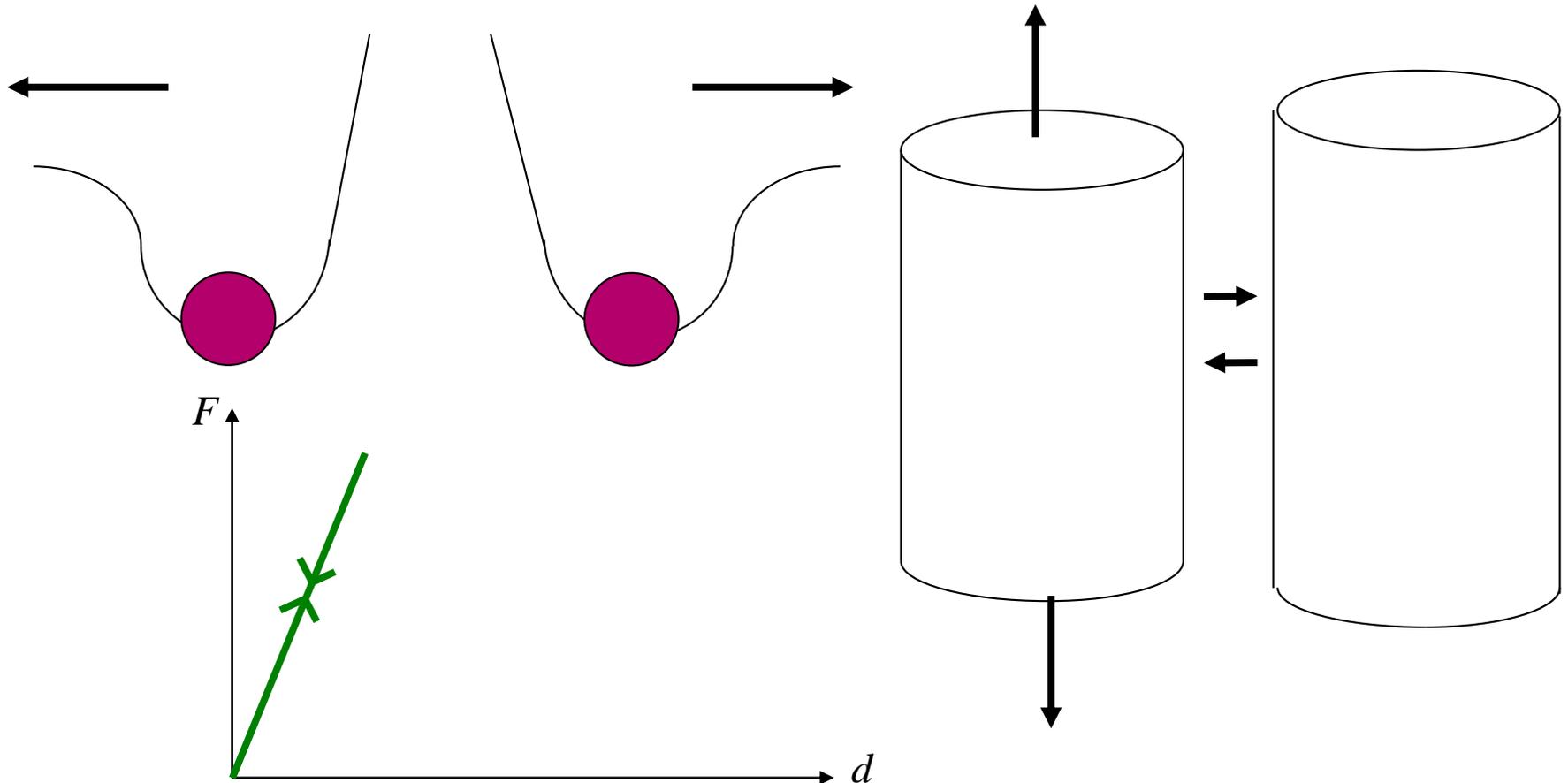
- Propriétés communes:
 - ✓ Bons conducteurs thermiques
 - ✓ Bons conducteurs électriques
 - ✓ Module d'Young élevés (de 60 à 250 Gpa)
 - ✓ Bonne ténacité
 - ✓ Bonne ductilité
 - ✓ Bonne aptitude à la mise en forme
 - ✓ Possibilité d'assemblage (soudage)
 - ✓ Stables lors de la stérilisation !!!



Elasticité

→ quand on applique un déplacement à un matériau \Rightarrow déformation élastique non rémanente

→ vient du déplacement des atomes autour de leur position d'équilibre



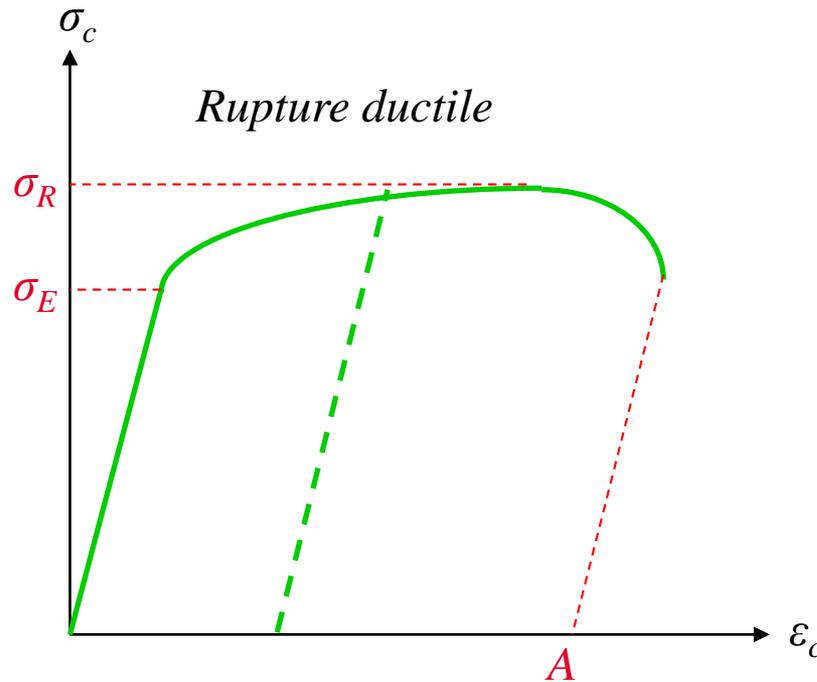
Elasticité

- on définit le module d'Young E (en traction) par la rigidité de la pente élastique
- dépend uniquement de la nature chimique du matériau
- très difficile à changer

Matériau	Aluminium	Fer	Cuivre	Polystyrène
Module d'Young E (MPa)	70000	220000	124000	3000

Propriétés des métaux

- Pourquoi ces bonnes propriétés mécaniques ?

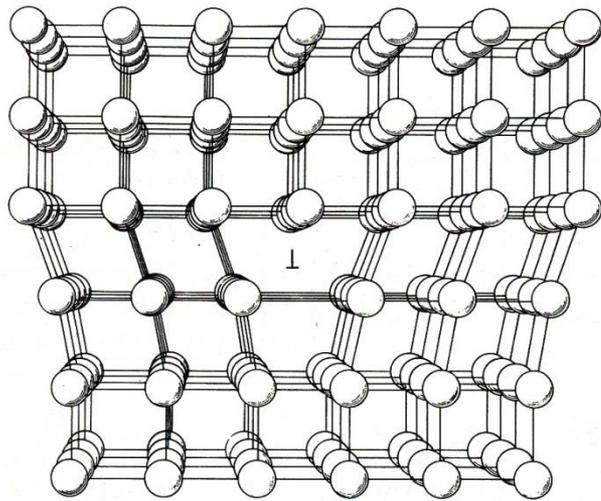


→ les matériaux métalliques se durcissent de plus en plus quand on les déforme

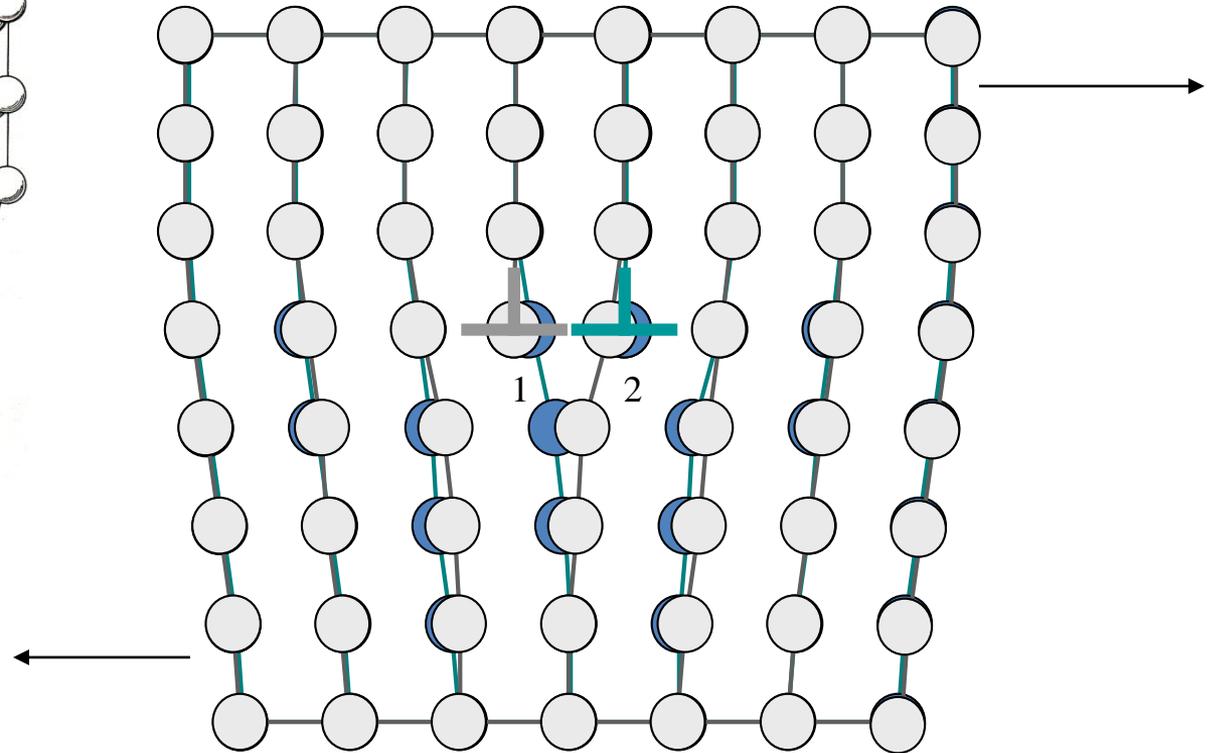
→ dû à la présence de défauts dans le cristal

Mécanisme physique de la déformation plastique

Matériau 'réel' : présence de défauts. Défauts linaires : dislocations

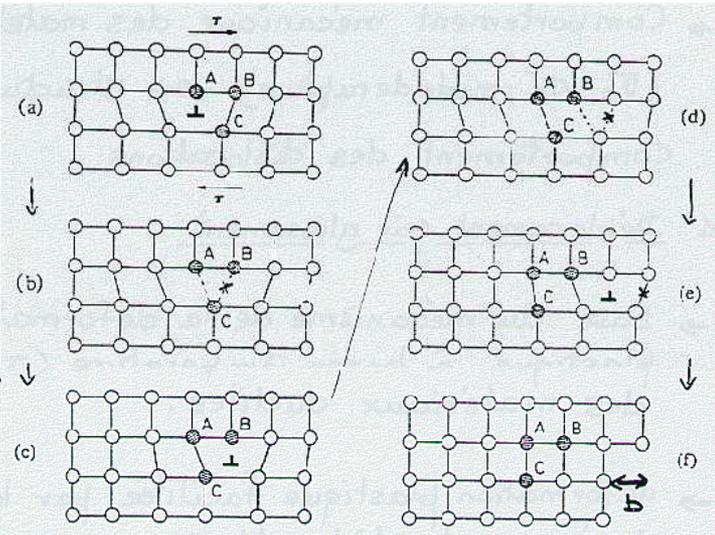
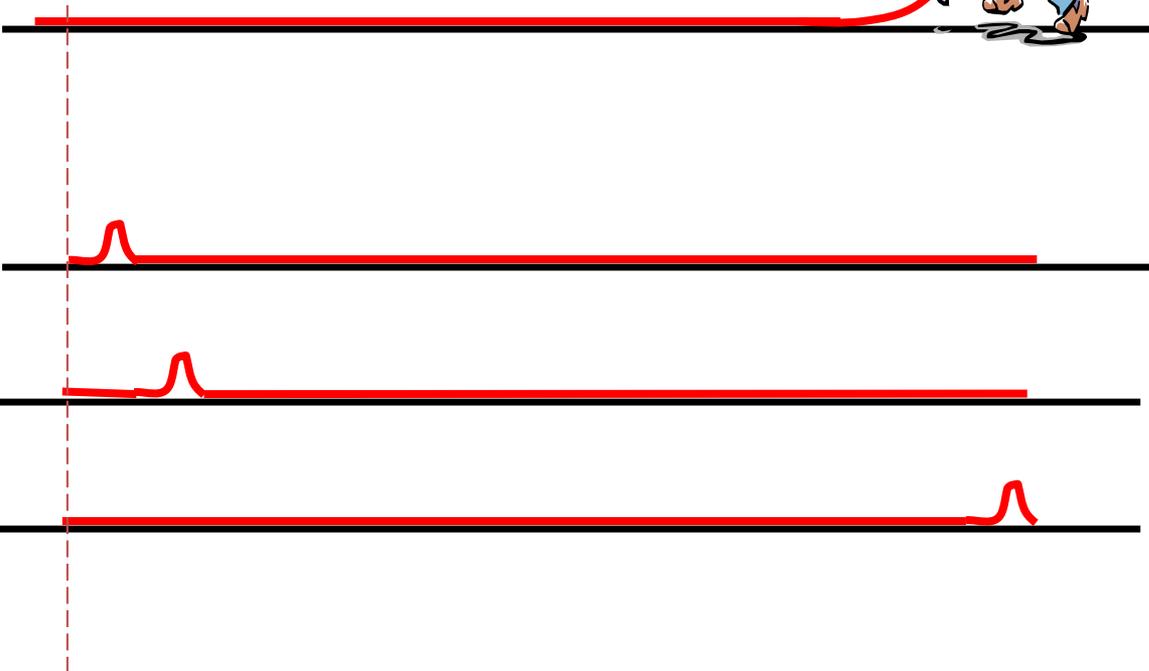


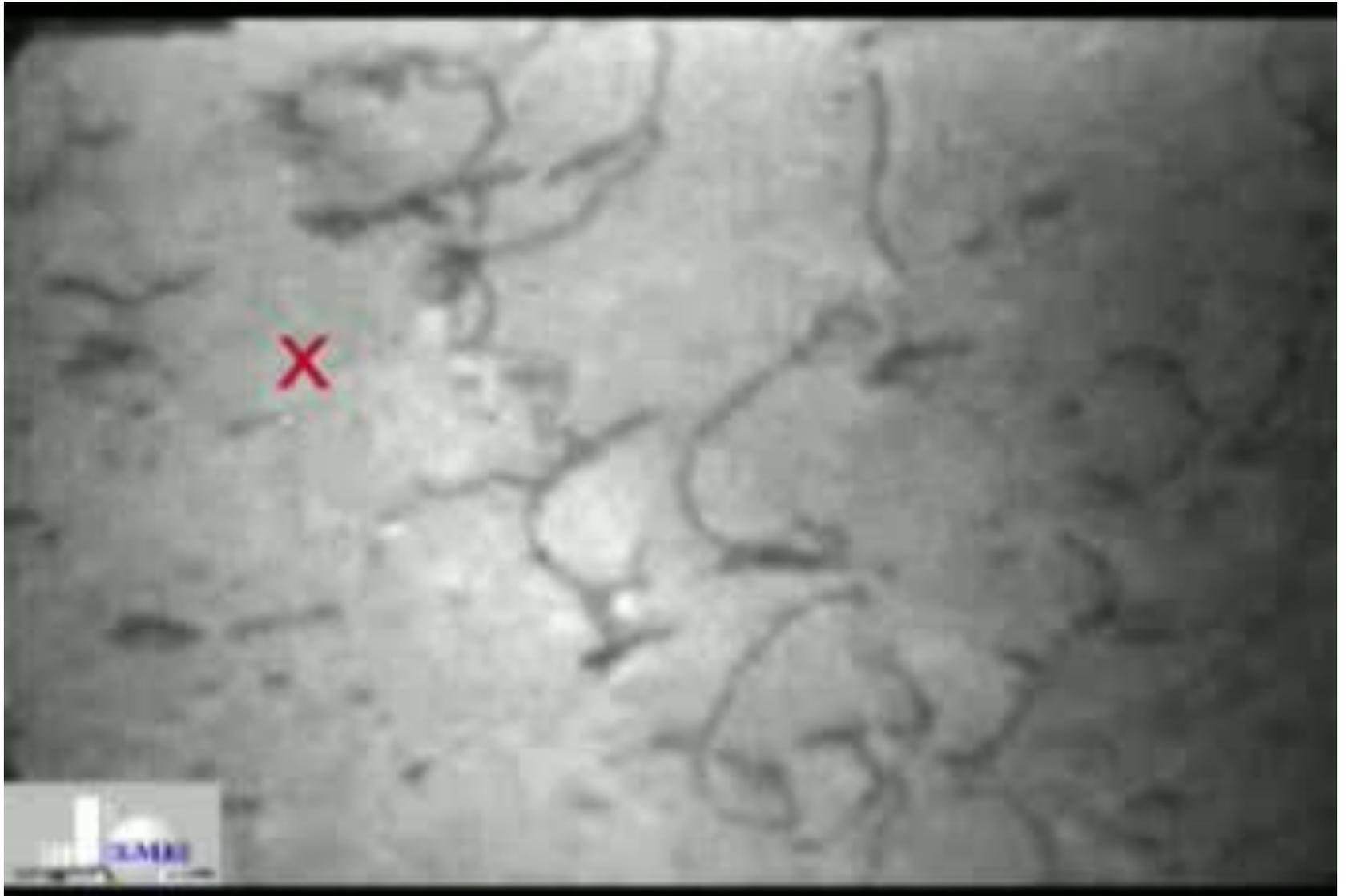
Dislocation 'coin'



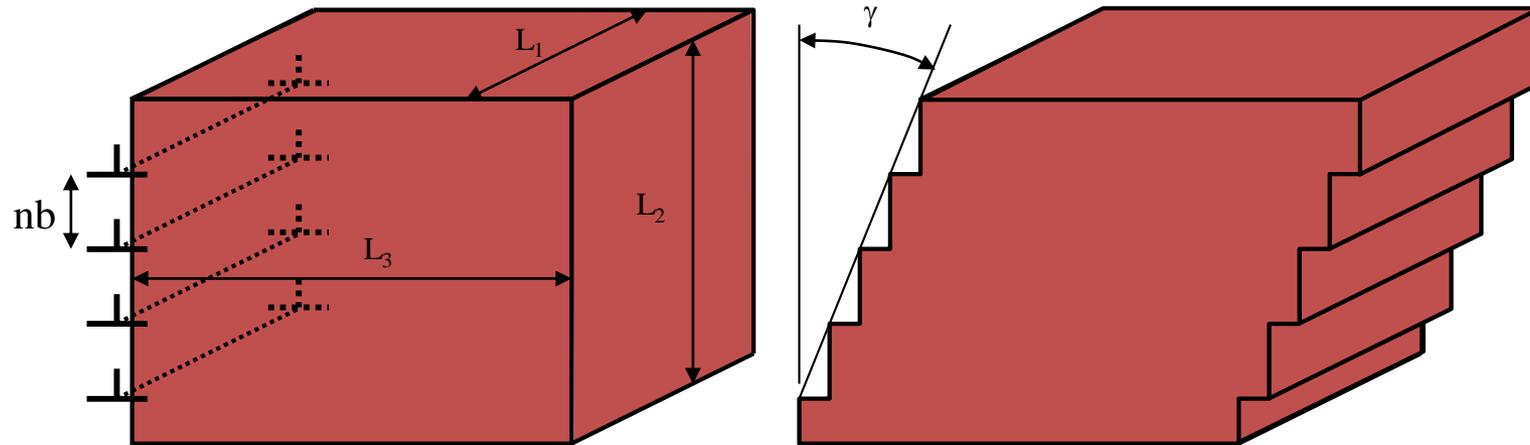
*glissement d'une dislocation 'coin' : déformation plastique
Par faibles mouvements atomiques*

Déformation plastique par mouvement de dislocations : analogie au déplacement d'un tapis lourd par petits mouvements

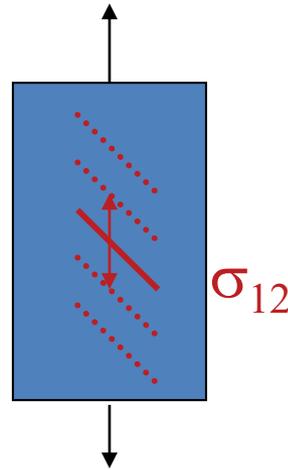
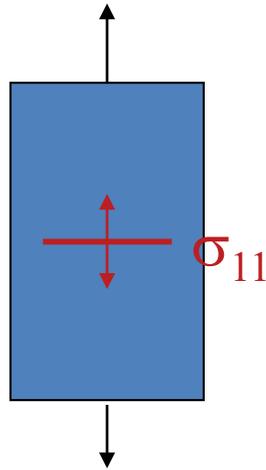
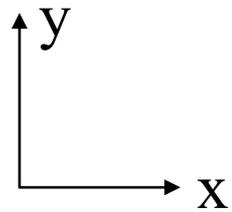




De nombreuses dislocations existent dans le matériau : déformation plastique aisée par cisaillement

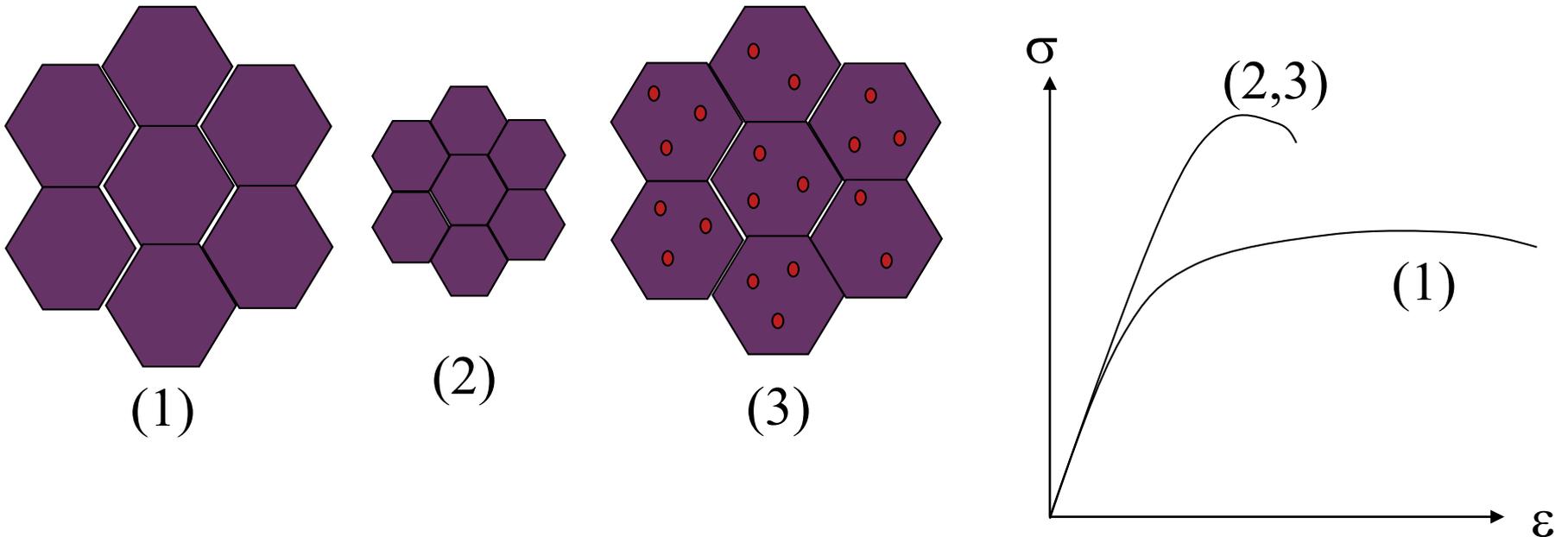


Ex : en traction



Les métaux utilisés pour les applications biomédicales

- Possibilité de modifier « à volonté » la résistance des matériaux métalliques
- taille de grains (dislocations 'bloquées' par les joints de grains),
 - atomes ou précipités d'une seconde phase,
 - déformation plastique (enchevêtrement de dislocations)



- La déformation plastique sera liée au libre parcours moyen des dislocations

Les métaux utilisés pour les applications biomédicales : un exemple

- Propriétés demandées:

- 1) Possibilité d'usinage

« sur place »:

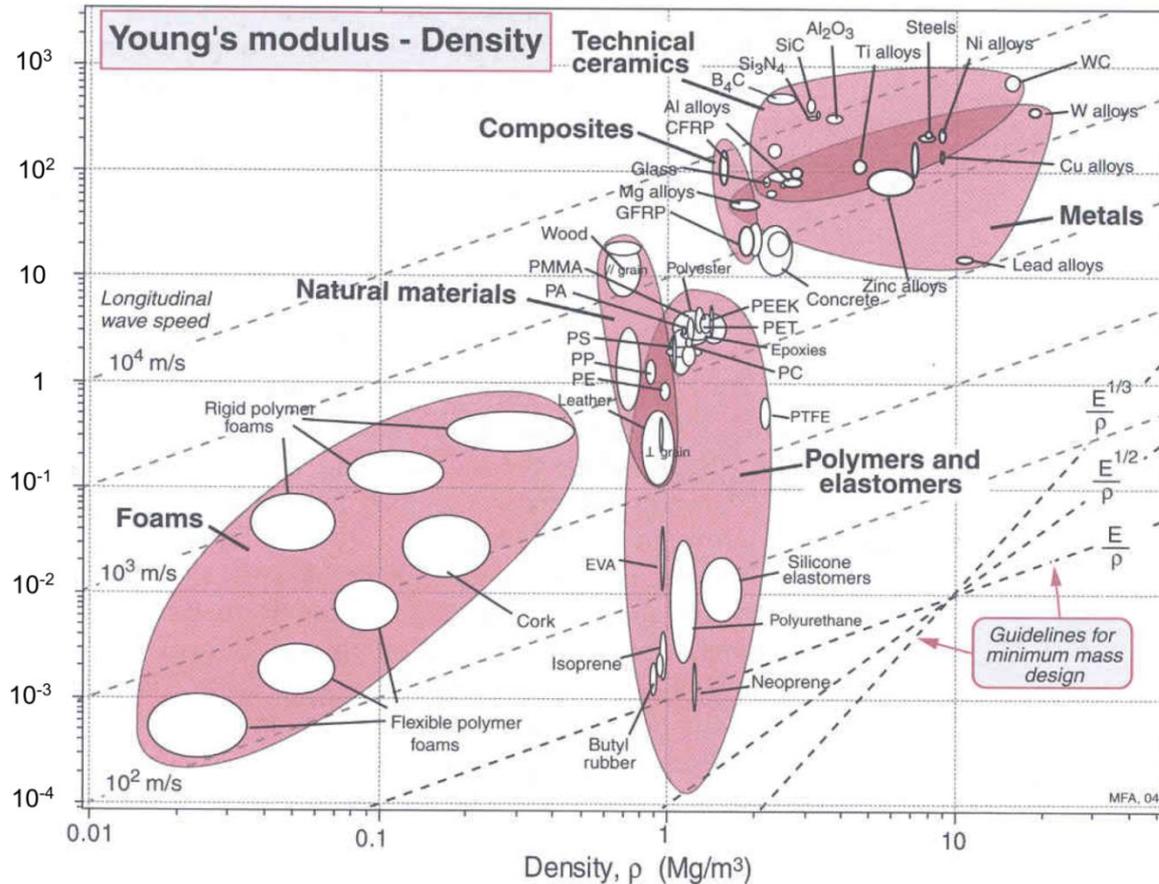
→ céramiques éliminées

- 2) Résistance à la flexion élevée

Indice à maximiser E/ρ

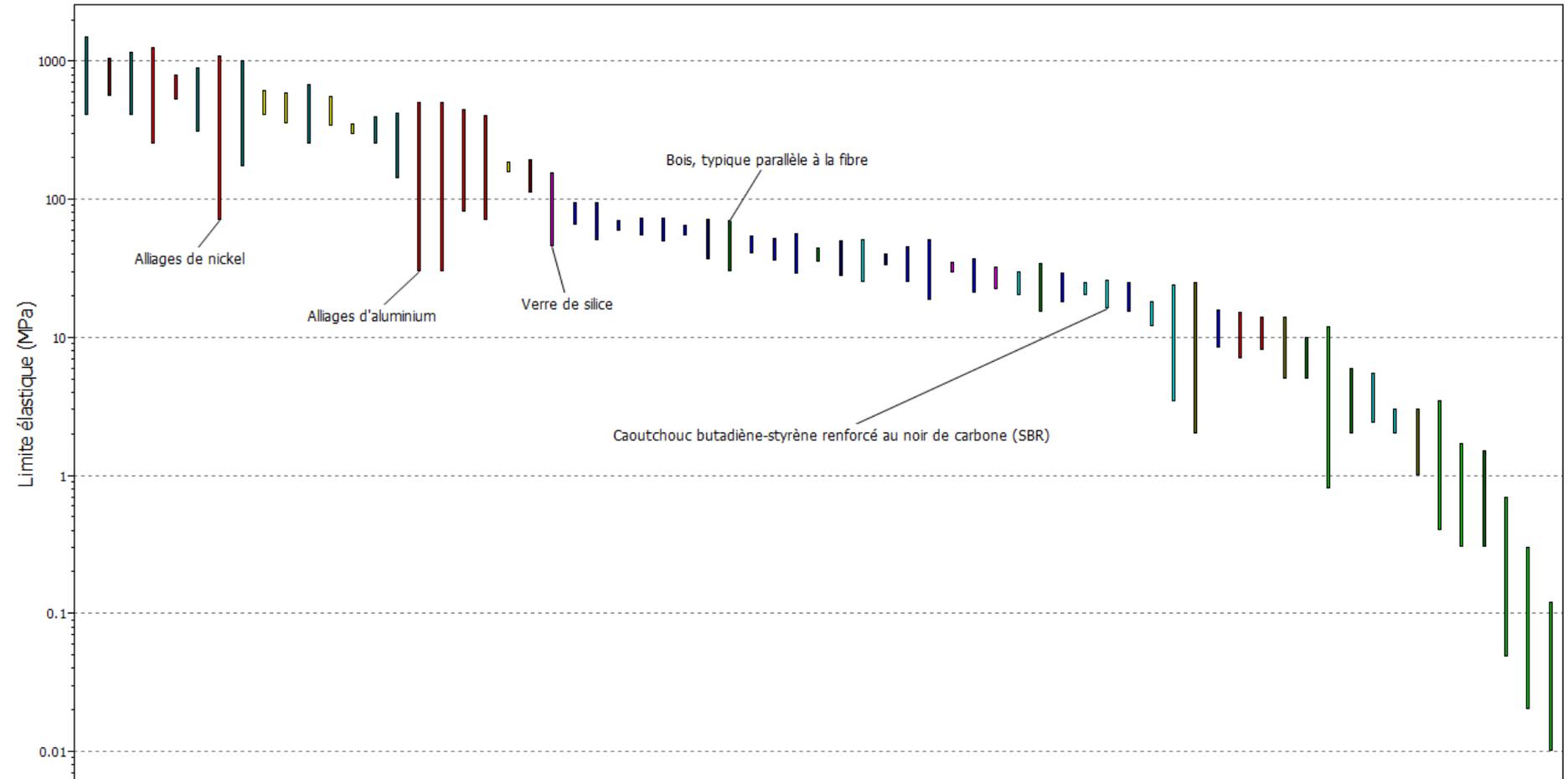


Les métaux utilisés pour les applications biomédicales : un exemple



- Donc meilleur choix, céramiques techniques puis métaux (et matériaux « naturels !!) et polymères ou mousses

Les métaux utilisés pour les applications biomédicales : un exemple



Les métaux utilisés pour les applications biomédicales : un exemple

- Propriétés demandées:
 - 1) Possibilité d'usinage
« sur place »:
→ céramiques éliminées
 - 2) Résistance à la flexion élevée
 - 3) Pas de déformation plastique
(limite d'élasticité !!!)
Polymères: entre 6 et 110MPa
→ équivaut à entre 6 kg et 110kg
Si section=10mm²
Métaux= entre 100 et 800kg....
→ métaux



Les métaux utilisés pour les applications biomédicales : un exemple

Quel métal ?

- Résistant
- Contact avec le corps ok
- Possibilité d'usinage

→ **Acier Inoxydable**



Les métaux utilisés pour les applications biomédicales : un exemple

- Aciers = Fer + Carbone

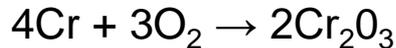
1) Carbone : ok pour la biocompatibilité

2) Fer : oxydation → rouille → bof

Quand on ajoute suffisamment de chrome à l'alliage Fer-Carbone, il devient inoxydable

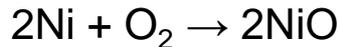
→ résistance accrue à l'environnement (gaz, liquide,...)

→ formation d'une couche protectrice d'oxyde de chrome (plus de formation de rouille=oxyde de fer, plus de décarburation à haute température)

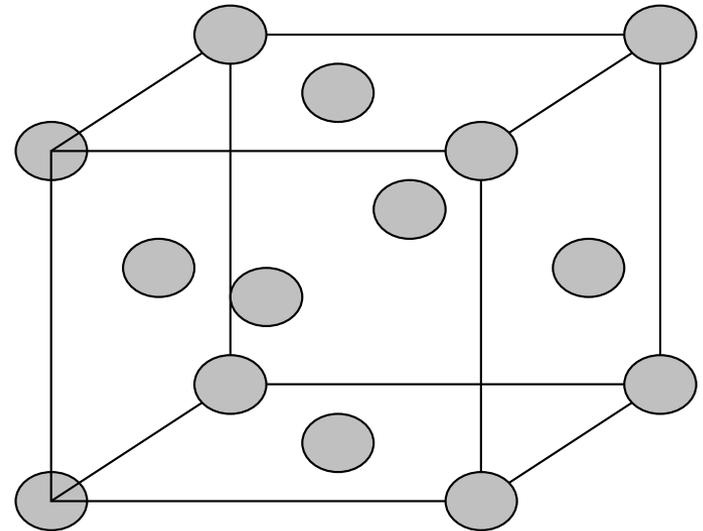


Couche passive très fine

L'ajout de nickel améliore la tenue à la corrosion car il s'intègre à la couche passive:



En général structure cfc



Les métaux utilisés pour les applications biomédicales : un exemple

Le [Centre international de recherche sur le cancer](#) classe le nickel dans les substances possiblement [cancérogènes](#) pour l'homme. L'exposition chronique au nickel est un facteur de risque du [cancer du poumon](#), inscrit à ce titre dans les tableaux de maladies professionnelles.

Le nickel est le plus [allergisant](#) de tous les métaux. Plus de 12 % de la population y est allergique, dont une majorité de femmes. La réaction la plus fréquente est une [dermatite de contact](#) provoquée par un bracelet de montre, des bijoux fantaisie, des accessoires vestimentaires (boucles, boutons, fermetures éclair, etc.).

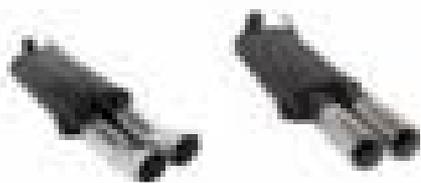
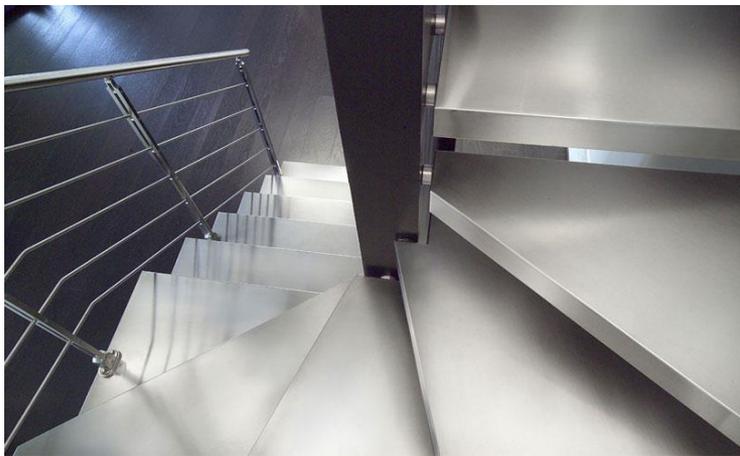
Prix: Ni: 10000 euros/tonne
Cr: 1850 euros/tonne
Fe: 500 euros/tonne
Ti: 7000 euros/tonne
Mn: 1750 euros/tonne

Les métaux utilisés pour les applications biomédicales : un exemple

- Aciers inox pour chirurgie orthopédique (plaque de renforts vissées dans l'os). Acier austénitique de type 316L (C : 0,02 %, Cr : 16-18 %, Ni : 11-13 %, Mo : 2 %)
 - ✓ Bonne résistance à l'usure
 - ✓ Non magnétique (IRM)
 - ✓ Peu d'effets secondaires cités (malgré le taux de Ni!!!)
 - ✓ Facilité d'usinage
- Le Ni peut être remplacé par N et Mn mais prix....



Autres applications des aciers inox



Les métaux utilisés pour les applications biomédicales : un 2ème exemple

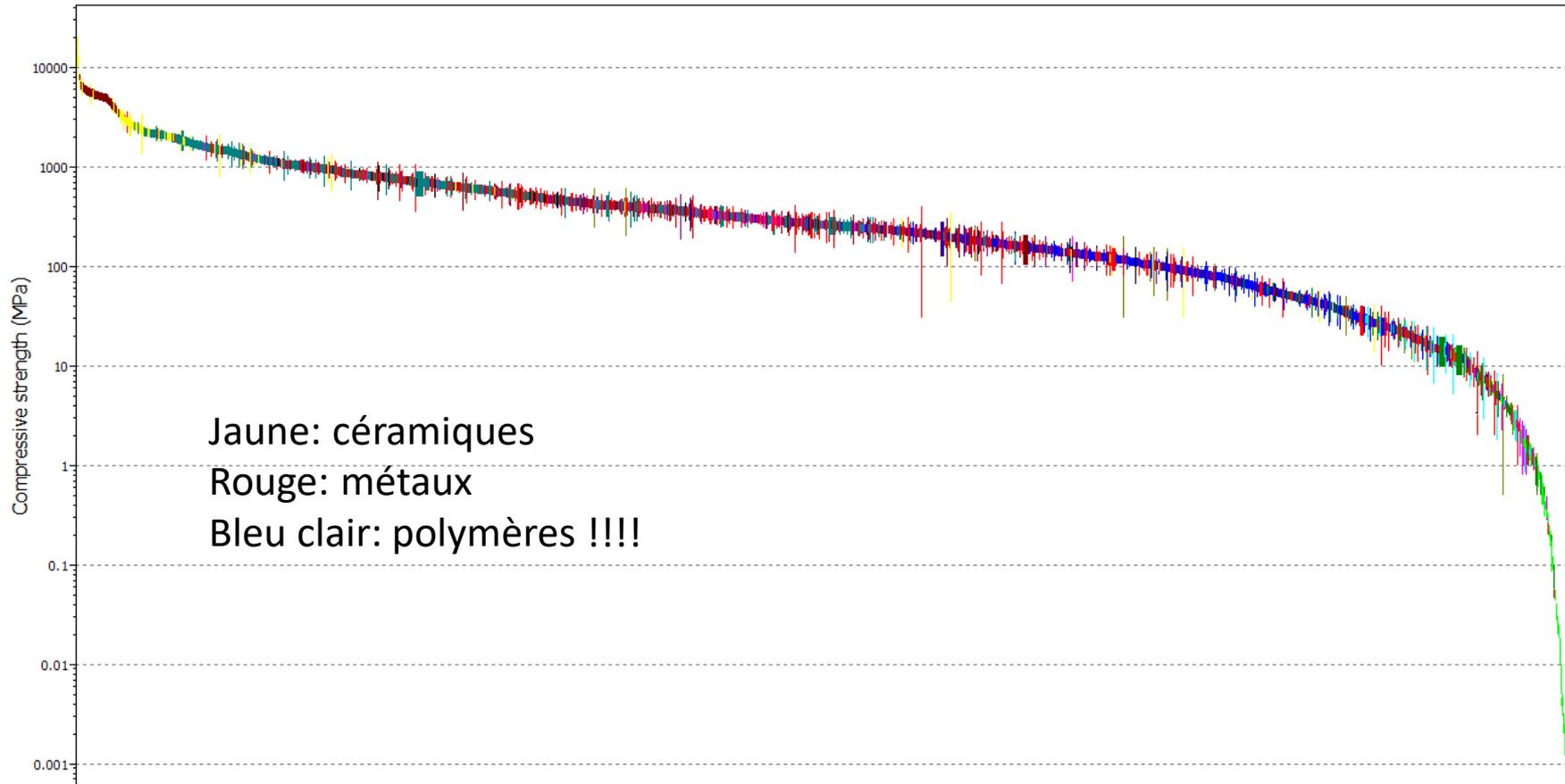
- Propriétés demandée:
 - 1) Forme complexe à obtenir
 - 2) Possibilité de visser ou d'assembler la fausse dent
 - 3) Résistance à la compression
 - polymères out (6 à 110MPa)
 - alumine (2500 MPa)
 - aciers (400MPa)
 - 4) Ténacité
 - alumine = $5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$
 - métaux = de 20 à 120 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$



Les différents matériaux métalliques utilisés

- Propriétés demandées:

3) Résistance à la compression



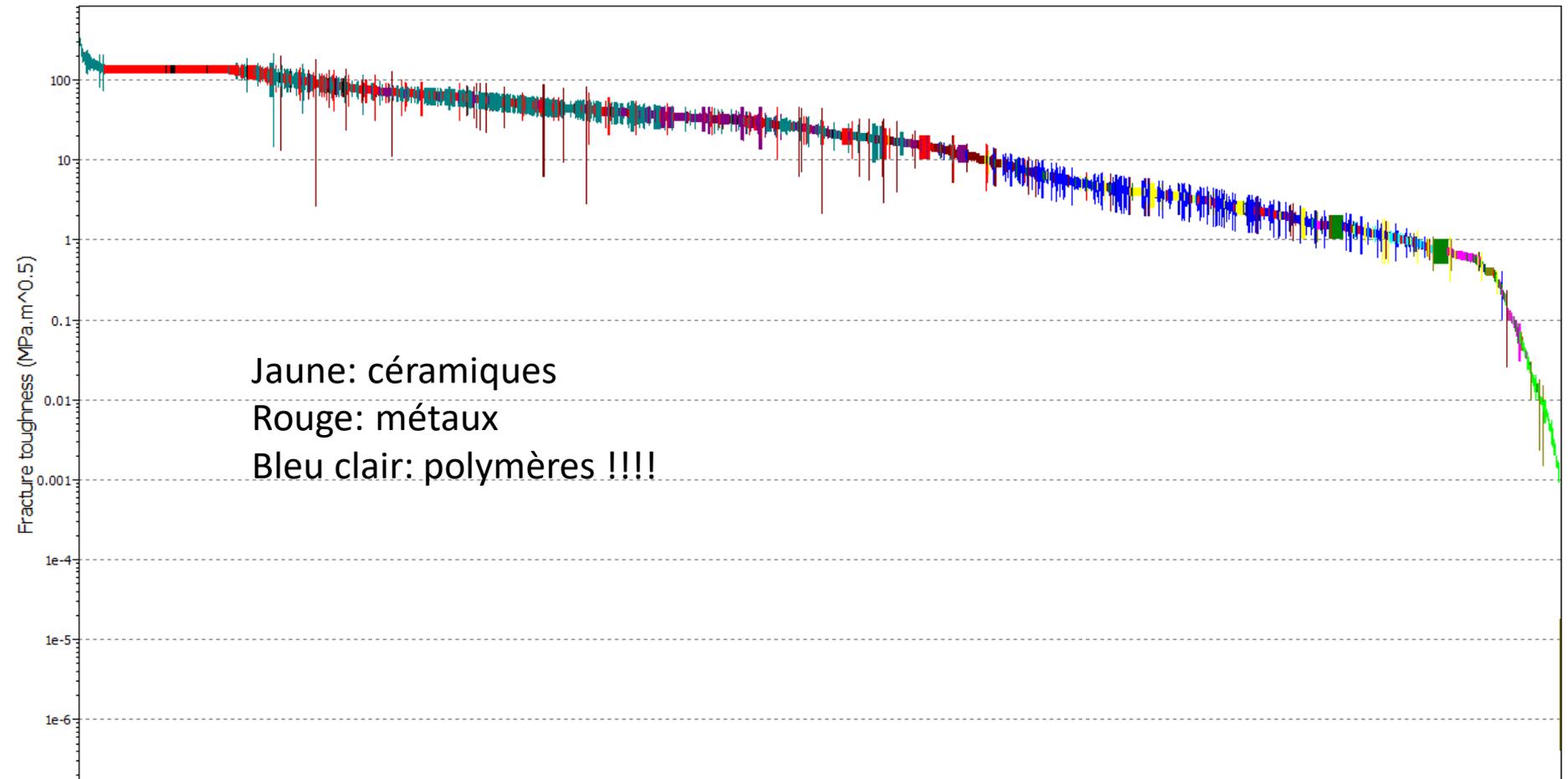
Les différents matériaux métalliques

- Propriétés demandées: **utilisés**

4) Ténacité

→ alumine = 5 MPa√m

→ métaux = de 20 à 120 MPa√m



Les différents matériaux métalliques utilisés

- Propriétés demandée:
 - 1) Forme complexe à obtenir
 - 2) Possibilité de visser ou d'assembler la fausse dent
 - 3) Résistance à la compression
 - polymères out (6 à 110MPa)
 - alumine (2500 MPa)
 - aciers (400MPa)
 - 4) Ténacité
 - alumine = 5 MPa√m
 - métaux = de 20 à 120 MPa√m



Quel métal ?

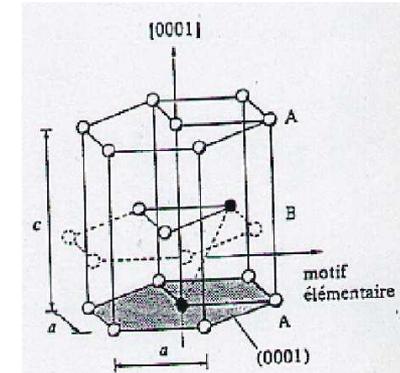
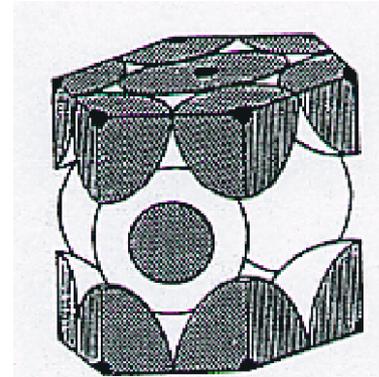
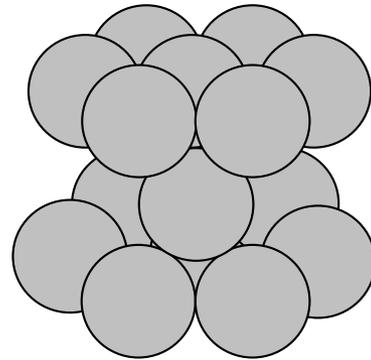
- Résistant
- Contact avec le corps ok à long terme
- Grande ténacité
- Possibilité d'usinage



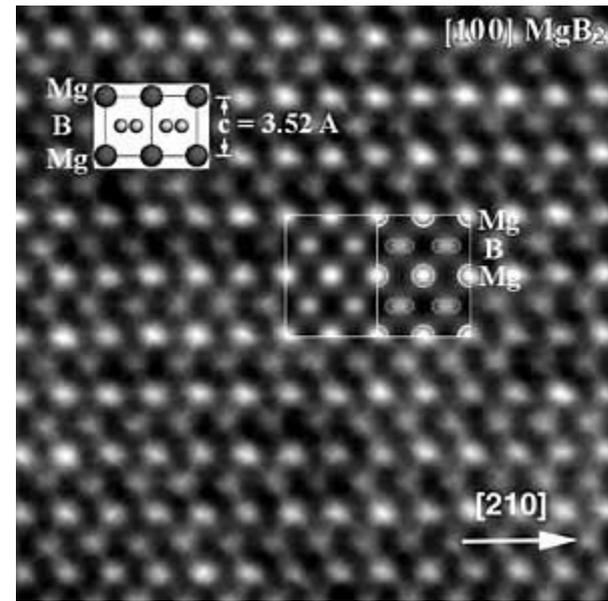
→ Titane pur

Le Titane pur

*Hexagonal
compact
(NC=12)*

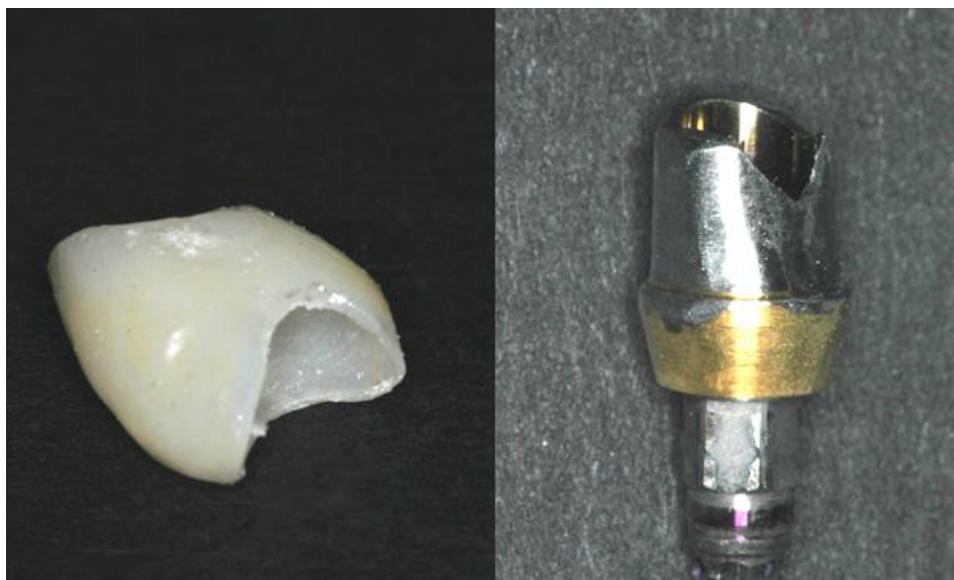


Ex: Mg, Ti α , Zn, Fe ϵ , ...



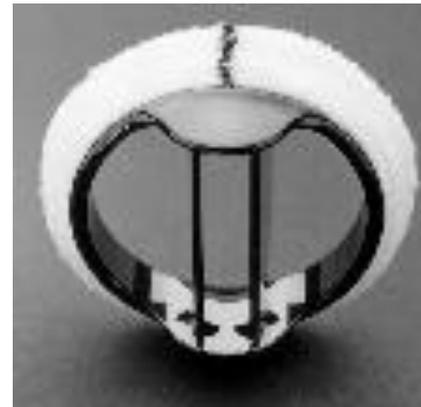
Le Titane pur

- Plaques vis et implants dentaires
- Biocompatible (pas ou peu d'allergie)
- Densité= 4,5 au lieu de 8 pour les inox
- Plus grande élasticité (module d'Young plus faible)=114 GPa au lieu de 220...



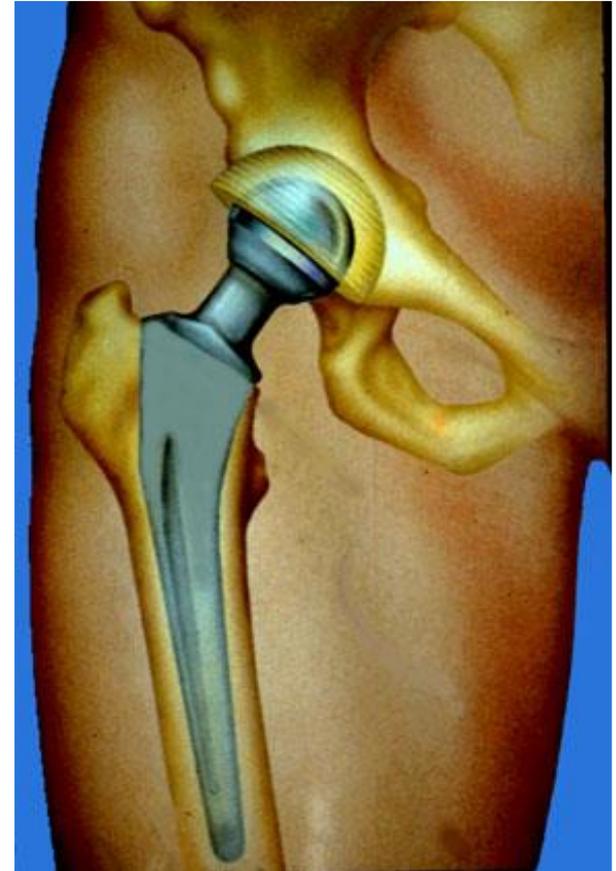
Le Titane pur

- Aussi utilisé pour les valves cardiaques



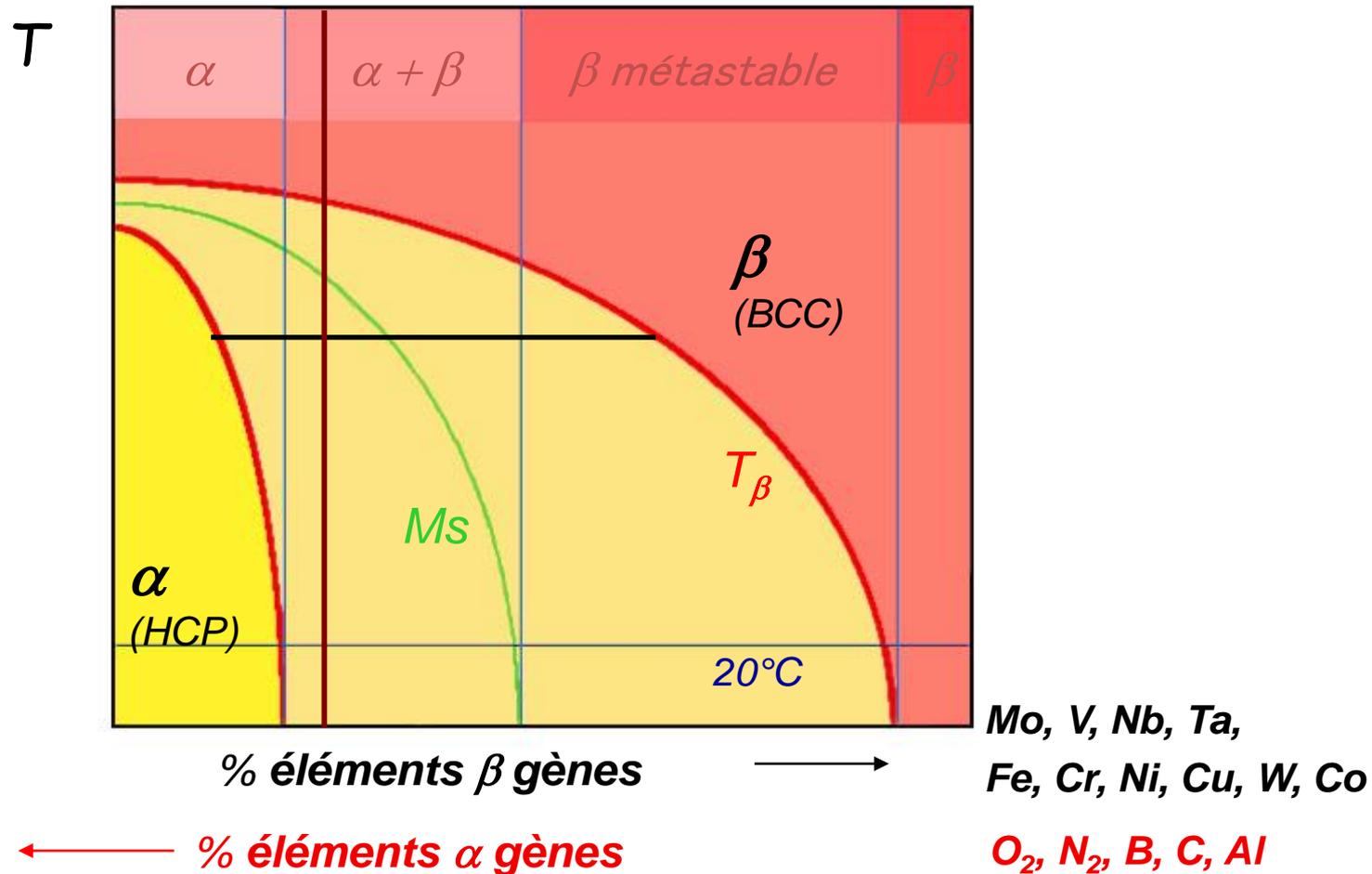
Les différents matériaux métalliques utilisés

- Propriétés demandées:
 - 1) Biocompatibilité
 - 2) Mise en forme sur mesure
 - 3) Implantation « à la main »....
 - 4) Résistance à l'usure
 - 5) Résistance à la traction
 - 6) Résistance à la fatigue
 - 7) Examen post opératoire possible à l'IRM
- Céramiques out (points 3, 5, 6)
→ Polymères out (point 5)
→ Métaux out (point 4)
- Corps en alliage de titane et tête en céramique

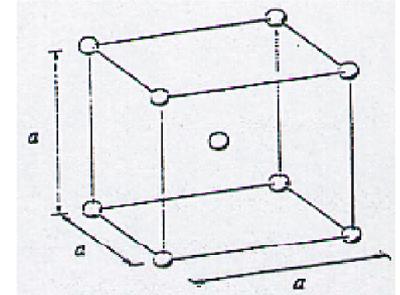
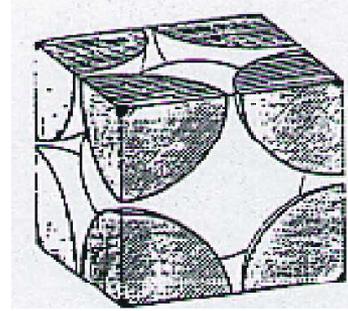
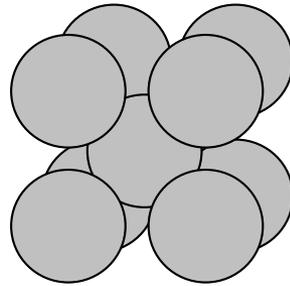


Les alliages de Titane

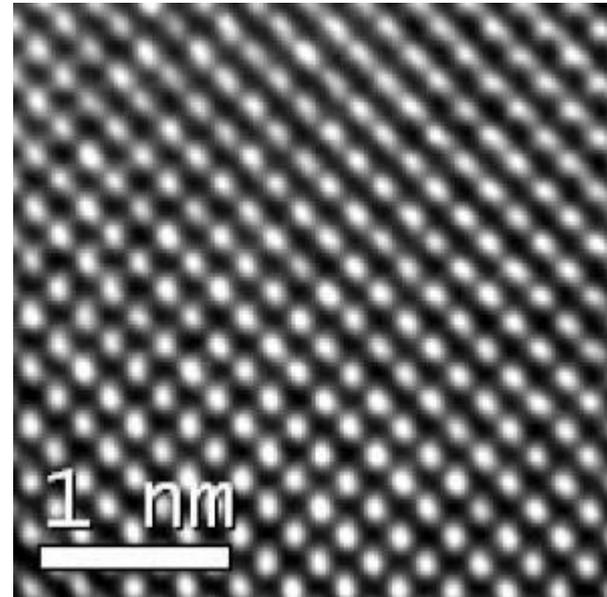
- Structure



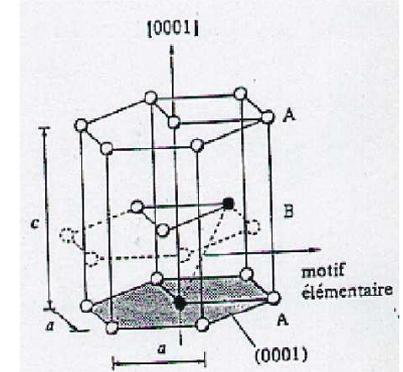
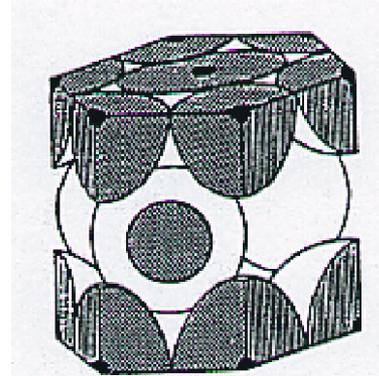
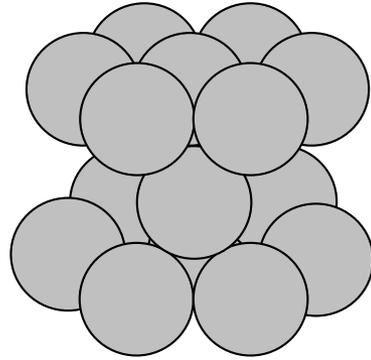
*Cubique
centré
(NC=8)*



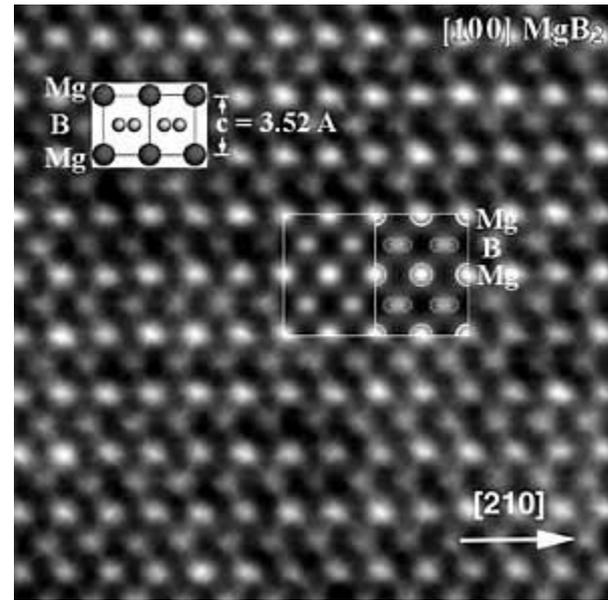
Ex: Cr, Mo, W, Ti β , Fe α , ...



*Hexagonal
compact
(NC=12)*



Ex: Mg, Ti α , Zn, Fe ϵ ,...



Les alliages de Titane

- Propriétés du TA6V

Conditions de TT	Rm (MPa)	Rp 0.2 (MPa)	A (%)	Z (%)
Forgé $\alpha+\beta$ Etat recristallisé	880	710	13	36
Forgé $\alpha+\beta$ Etat recuit	897	828	10	25
Forgé $\alpha+\beta$ + 4H 594°C	938	876	15.2	34
Forgé $\alpha+\beta$ + 24H 594°C	973	904	15.5	47
Forgé β R. Air + 705°C	856	773	11.2	23
Forgé β R. Eau + 705°C	932	863	5.9	6

Les alliages de Titane

- Propriétés

Nuance	Rm (MPa)	Rp 0.2 (MPa)	A (%)	E (GPa)
Ti : CP T40	483	352	28	110
Quasi α : IMI 685	1020	914	8	110
$\alpha+\beta$: TA6V4	1000	910	18	110
$\alpha+\beta$: IMI 550	1138	1035	12	110
β -Cez	1250	1150	11	115
β -Cez max	1700	1650	7	115
β -Cez 100% β	927	723	9	70

Les alliages de Titane

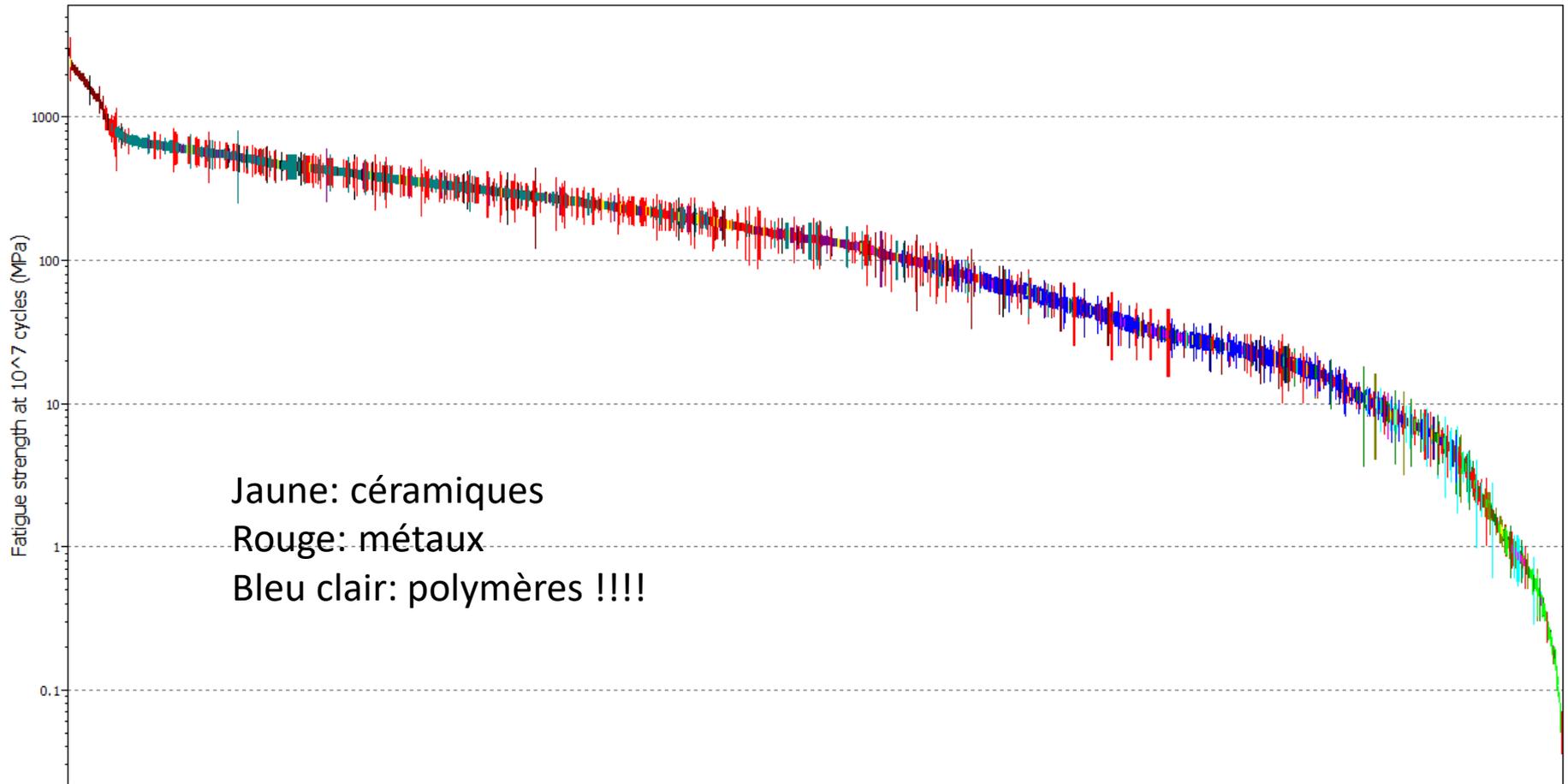
- Chirurgie du rachis
 - Propriétés demandées:
 - 1) Biocompatibilité
 - 2) Mise en forme sur mesure
 - 3) Résistance à la traction
 - 4) Résistance à la fatigue**
 - 5) Examen post opératoire possible à l'IRM
- Céramiques out (points 3, 4)
→ Polymères out (point 3)



→ Alliage de titane



Les alliages de Titane



Autres applications des alliages de Titane



Les différents matériaux métalliques utilisés

- Propriétés demandée:

- 1) Forme complexe à obtenir

- 2) Déformable facilement et sans risque de rupture

- 3) Résistance à la compression

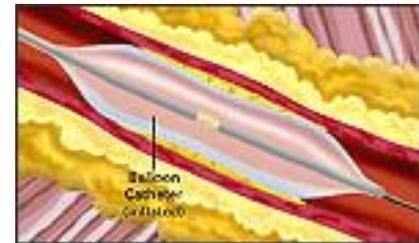
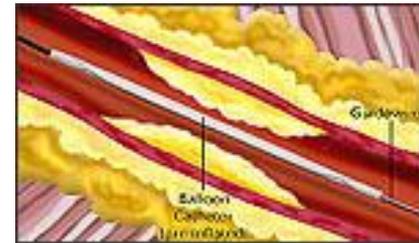
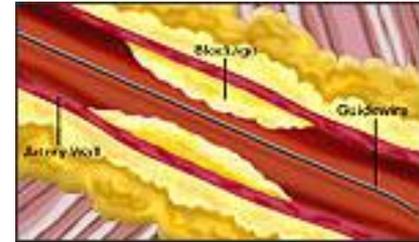
→ polymères out (6 à 110MPa)

→ alumine (2500 MPa)

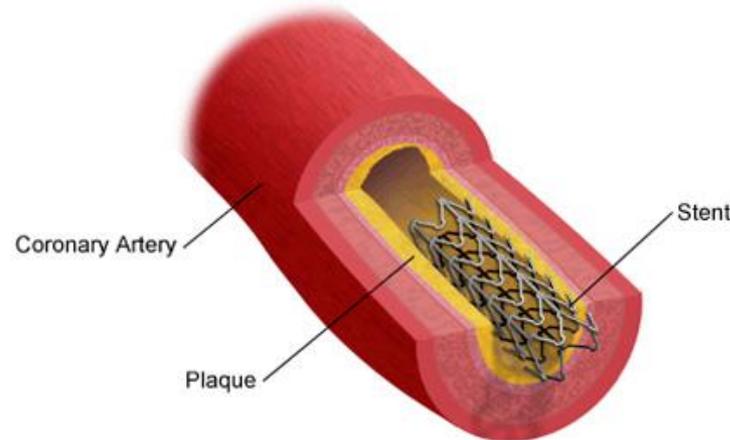
→ métaux

(de 200 à 1200MPa)

- 4) Implantation aisée



Stent Inside a Coronary Artery



<http://www.youtube.com/watch?v=77fPzbExkxA>

Les différents matériaux métalliques utilisés

- Propriétés demandée:

- 1) Forme complexe à obtenir

- 2) Déformable facilement et sans risque de rupture

- 3) Résistance à la compression**

→ polymères out (6 à 110MPa)

→ alumine (2500 MPa)

→ métaux

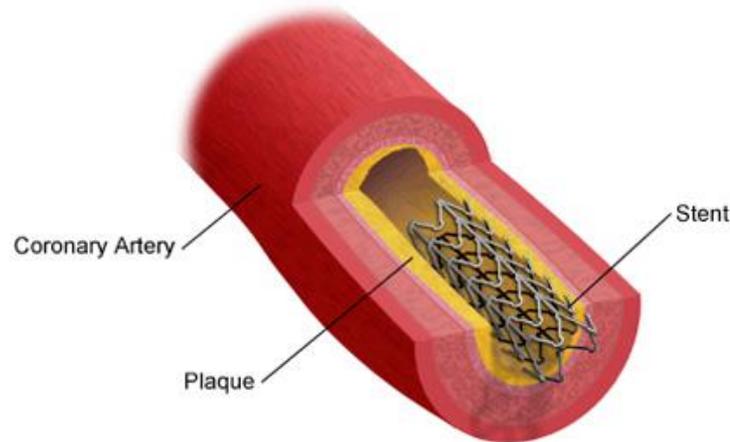
(de 200 à 1200MPa)

- 4) Implantation aisée**

→ les alliages à mémoire de forme



Stent Inside a Coronary Artery

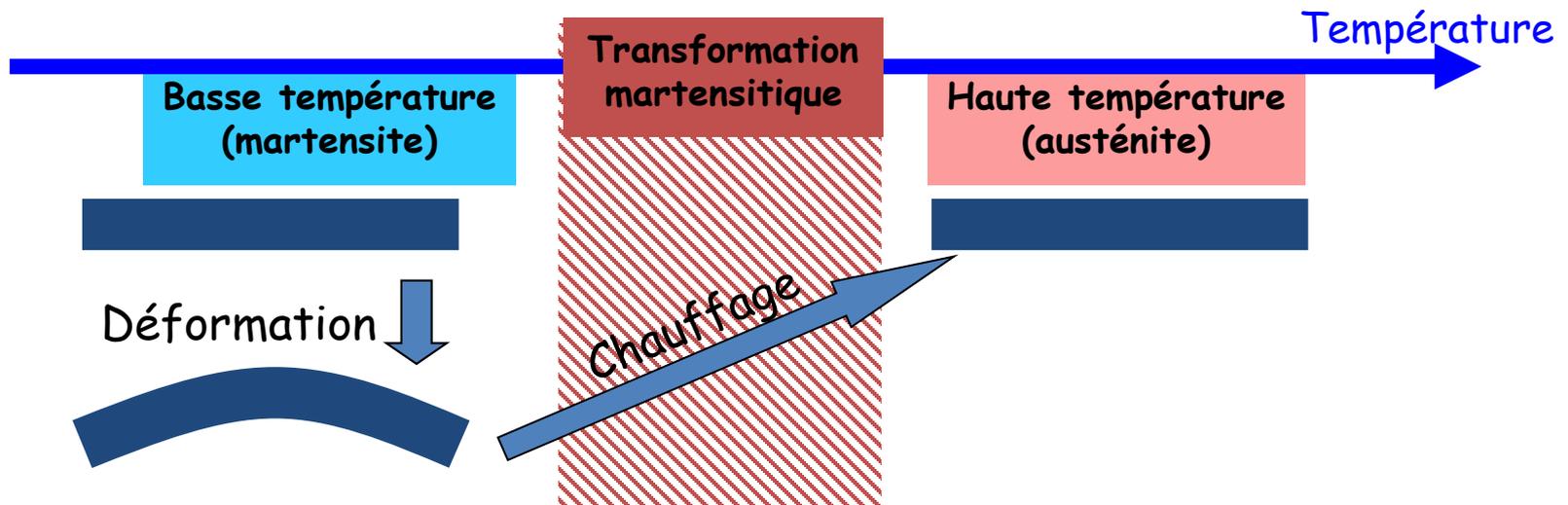


Alliages métalliques à mémoire de forme :

Présentation de la transformation martensitique

Introduction

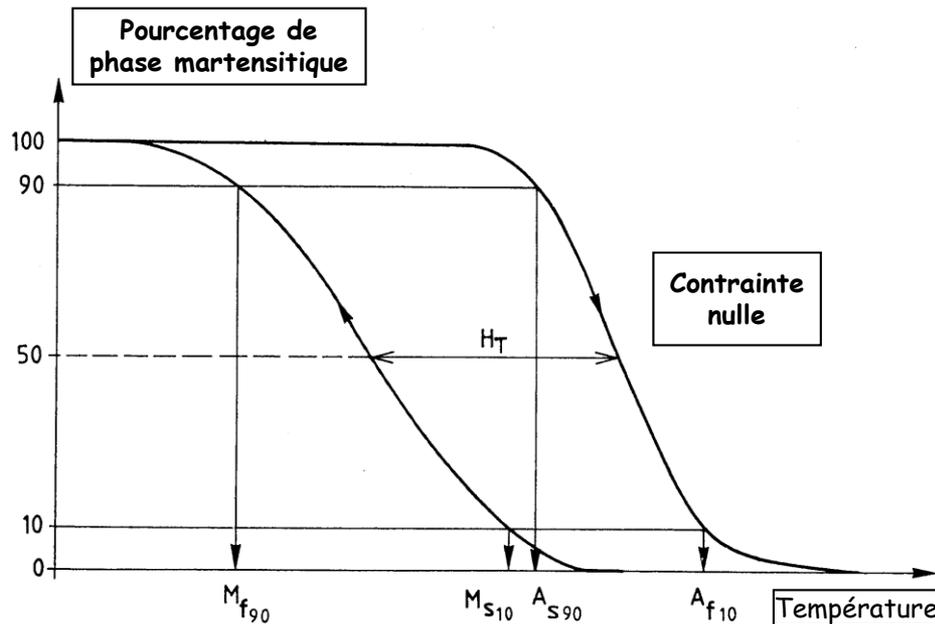
Qu'est-ce que l'effet mémoire de forme ?



- Caractéristiques des transformations martensitiques thermoélastiques:

Phase haute température : phase mère ou austénite (A)

Phase basse température : phase martensitique (M)



Points de transformation :

Chauffage

A_s Austénite start

A_f Austénite finish

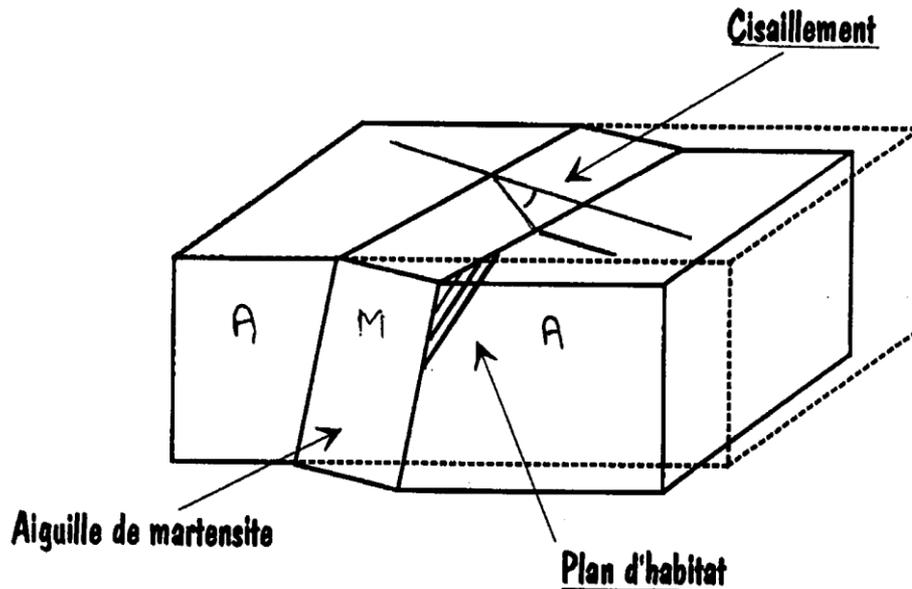
Refroidissement

M_s Martensite start

M_f Martensite finish

Caractéristiques géométriques macroscopiques (œil nu, microscope optique)

- Interface austénite-martensite = PLAN => Plan d'accolement (plan d'habitat)
- Cisaillement homogène
Parallèle au plan d'accolement
- Typiquement, l'angle de cisaillement est de l'ordre de 10-12°

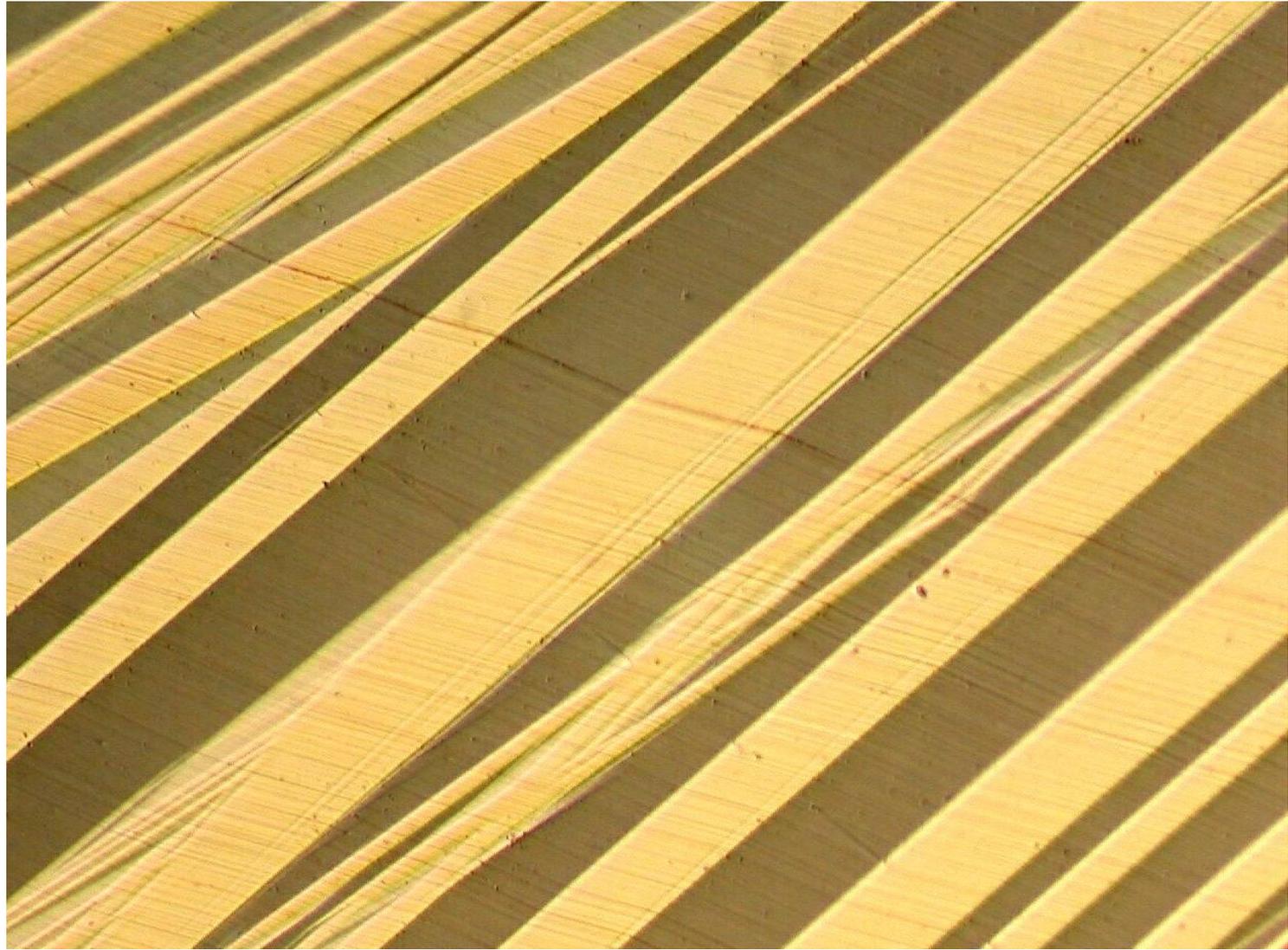


* **Monocristal de phase haute température**
=> plusieurs orientations de martensite possibles appelées variantes, avec des plans d'accolement et de cisaillement différents.

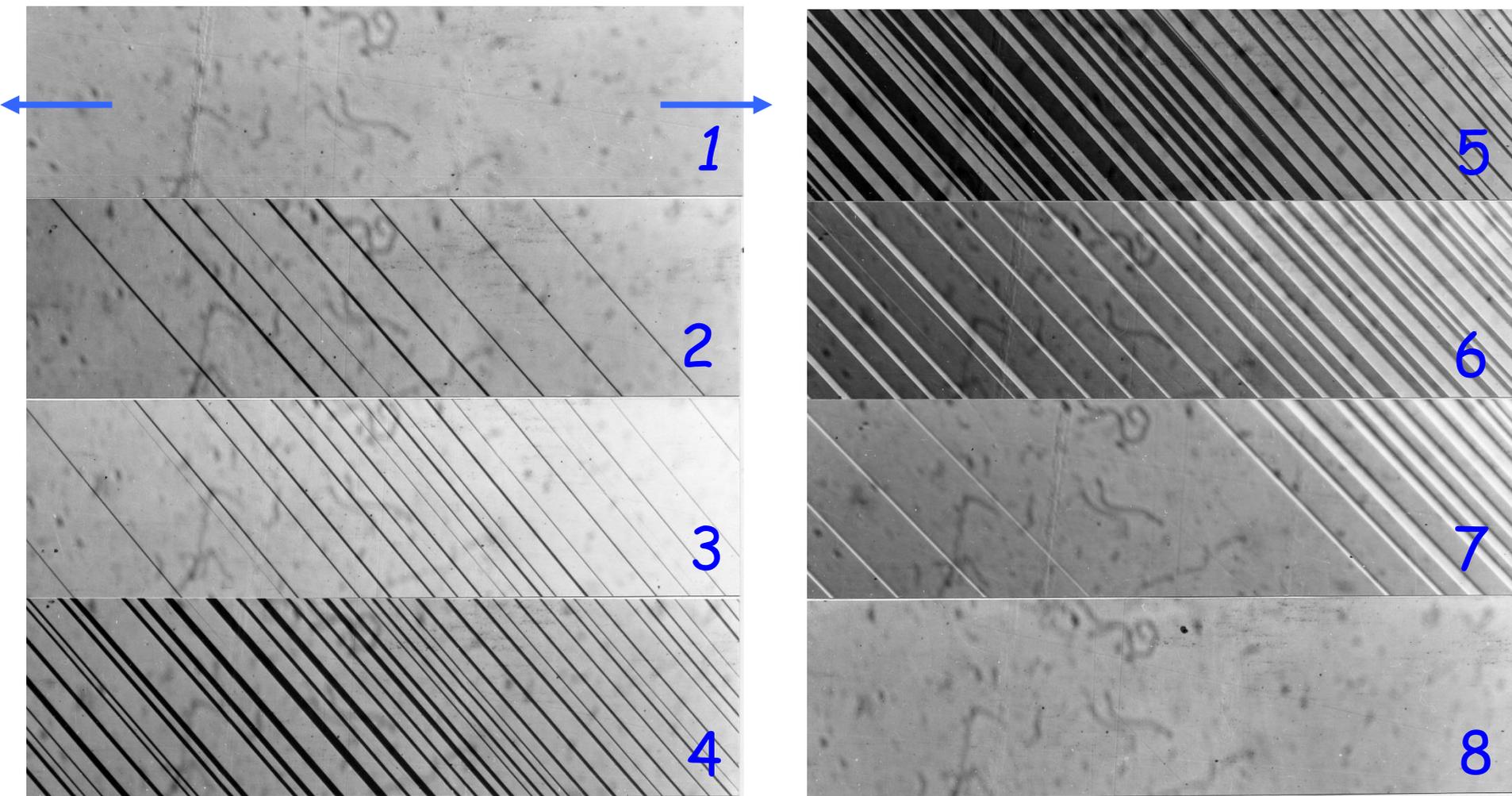
Exemple:

Phase haute température cubique :

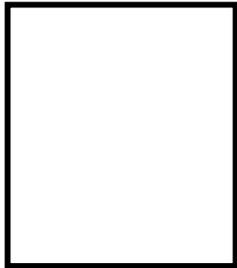
=> 24 variantes



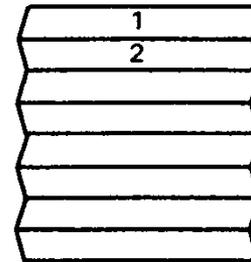
' Education ' sous contrainte... Une variante privilégiée



Cristal d'austénite



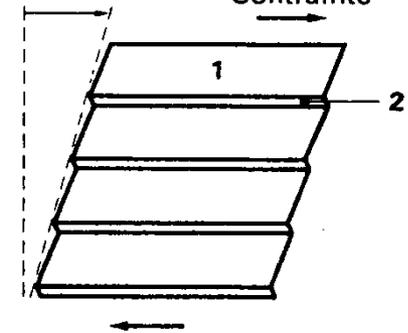
Refroidissement
→
Transformation
martensitique



$T < M_f$

Déformation
macroscopique

Contrainte
→



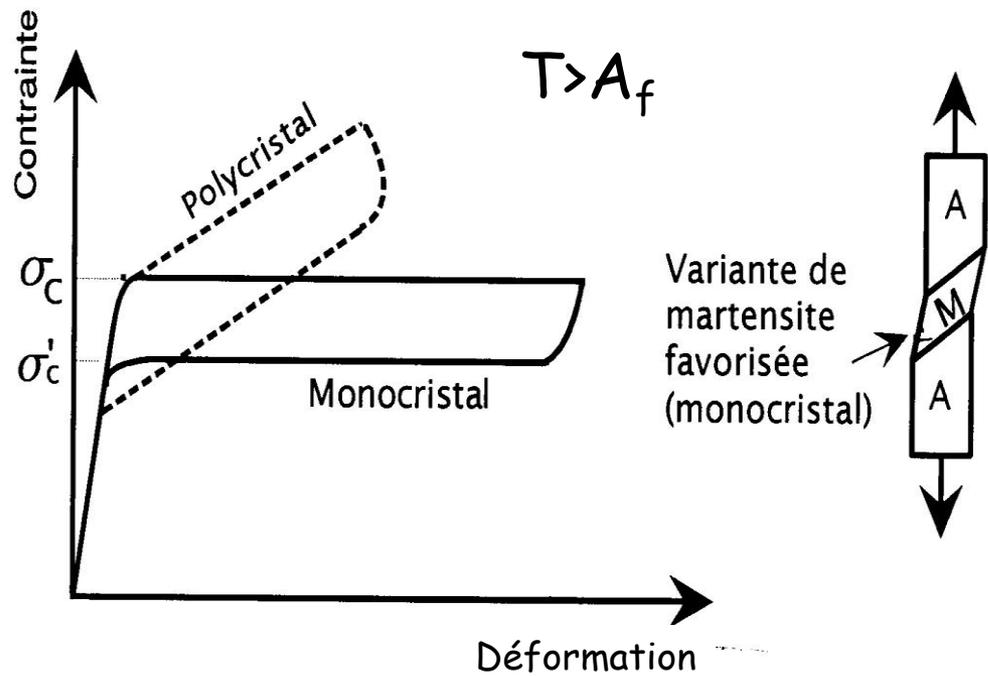
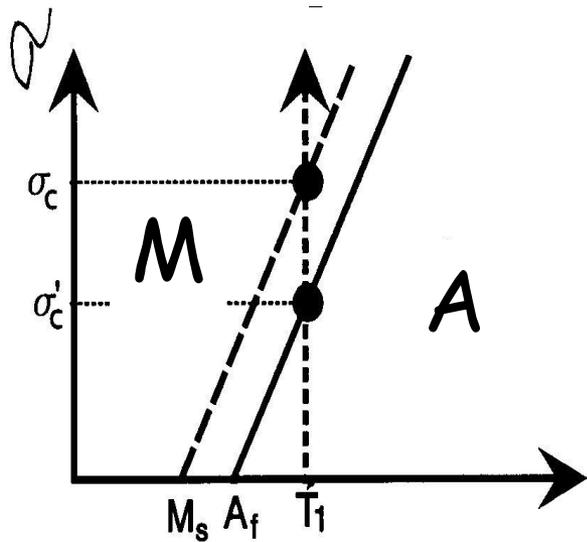
Ⓐ avant contrainte : les variantes
sont équiprobables

Ⓑ application de la contrainte
de cisaillement σ : croissance
de la variante de type 1 par
rapport à la variante de type 2

Deux effets mis à profit :

- Effet mémoire de forme (transformation en température)
- Effet 'super-élastique : variantes favorisées sous contrainte)

Effet super élastique



D'autres applications des AMF

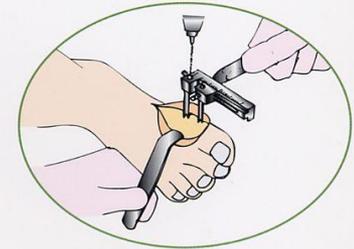
Agrafes à mémoire de forme chaude



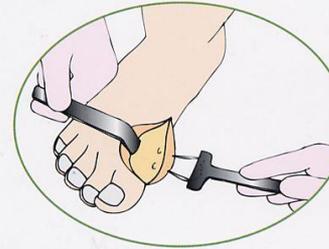
1- Après immobilisation des fragments

Pour le perçage, vous disposez de :

- un viseur réglable,
- à canons interchangeable et ajustables en hauteur,
- mèche,
- broches de positionnement,
- jauge de profondeur.



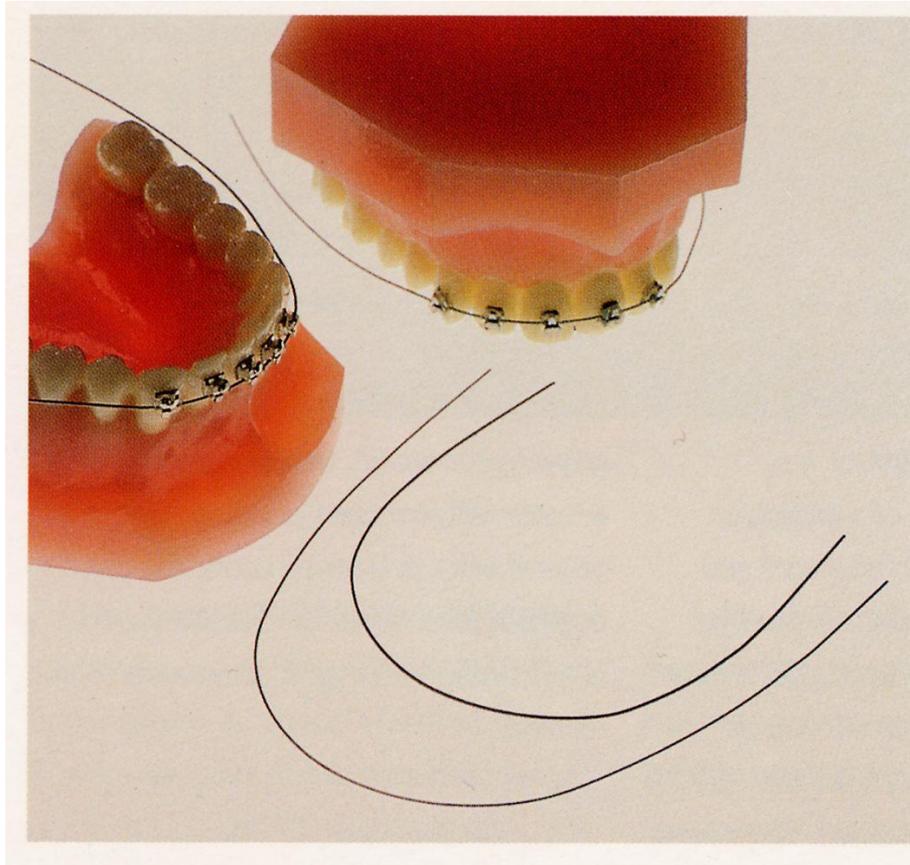
2- Sortir l'agrafe de son conditionnement



A l'aide d'une pince, la dégager de son support; puis l'introduire dans les trous. L'agrafe ne se refermera que lorsqu'elle sera chauffée à 48°C.

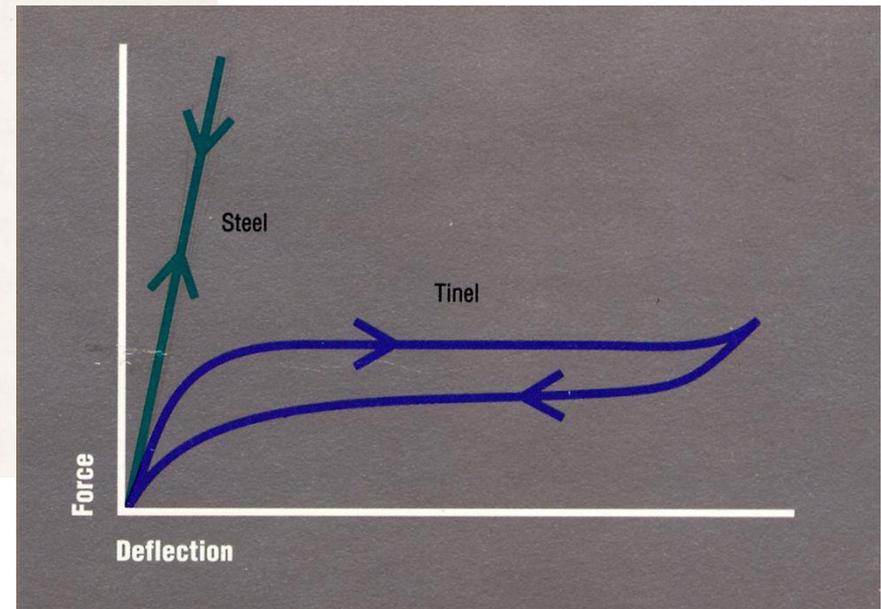


D'autres applications des AMF



*Superelastic
orthodontic arch
wires move teeth
with a low, con-
tinuous force.*

Raychem



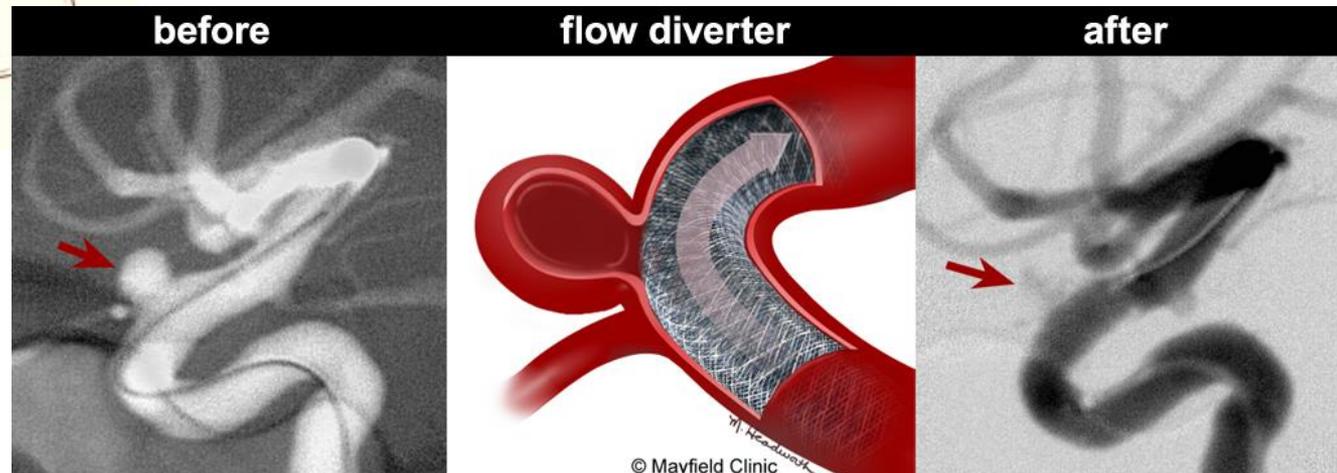
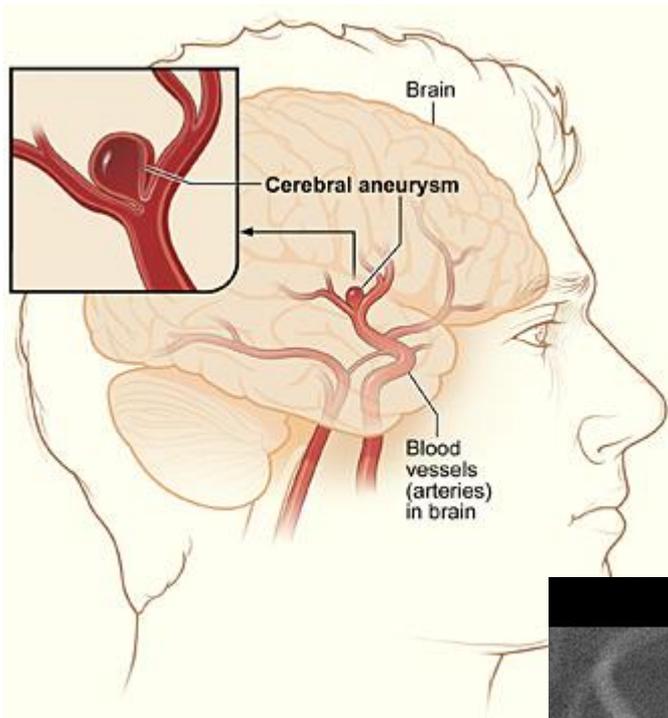
D'autres applications des AMF



Superelastic wire helps doctors locate breast lesions safely and precisely while minimizing patient discomfort.

Raychem

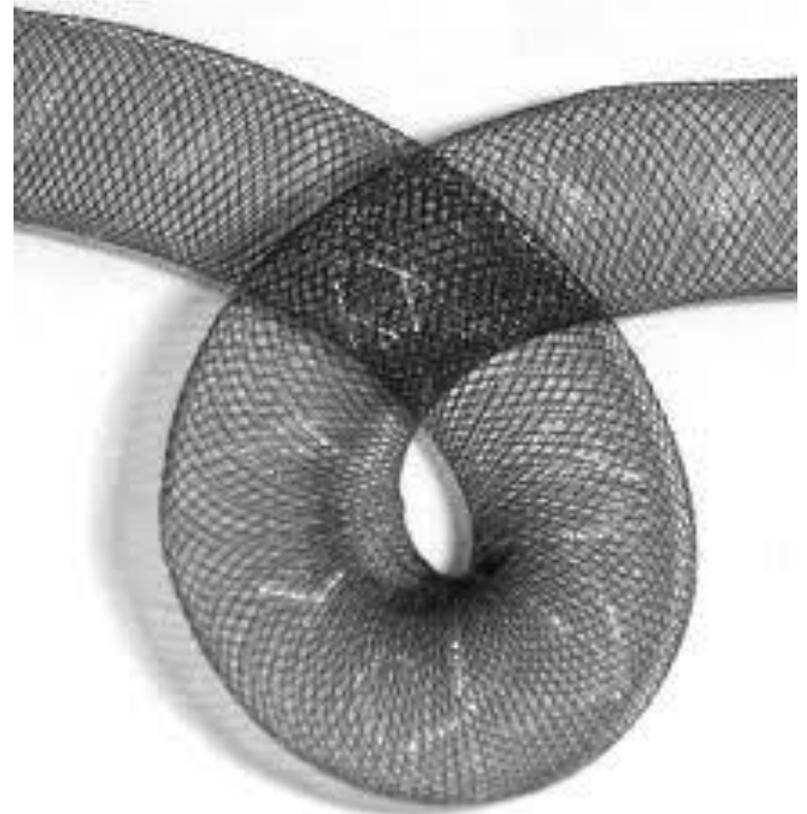
Stents pour anévrisme cérébraux



Stents pour anévrisme cérébraux

- Propriétés demandée:
 - 1) Forme complexe
 - 2) Souple et résistant (céramique et polymère impossible)
 - 3) Pas de toxicité

Fils métalliques (métaux nobles)



Les différents matériaux métalliques utilisés

- Propriétés demandés
 - 1) Biocompatible
 - 2) Résistance à la fatigue
 - 3) Résistance à l'usure
 - 4) Résistance en flexion→ métaux

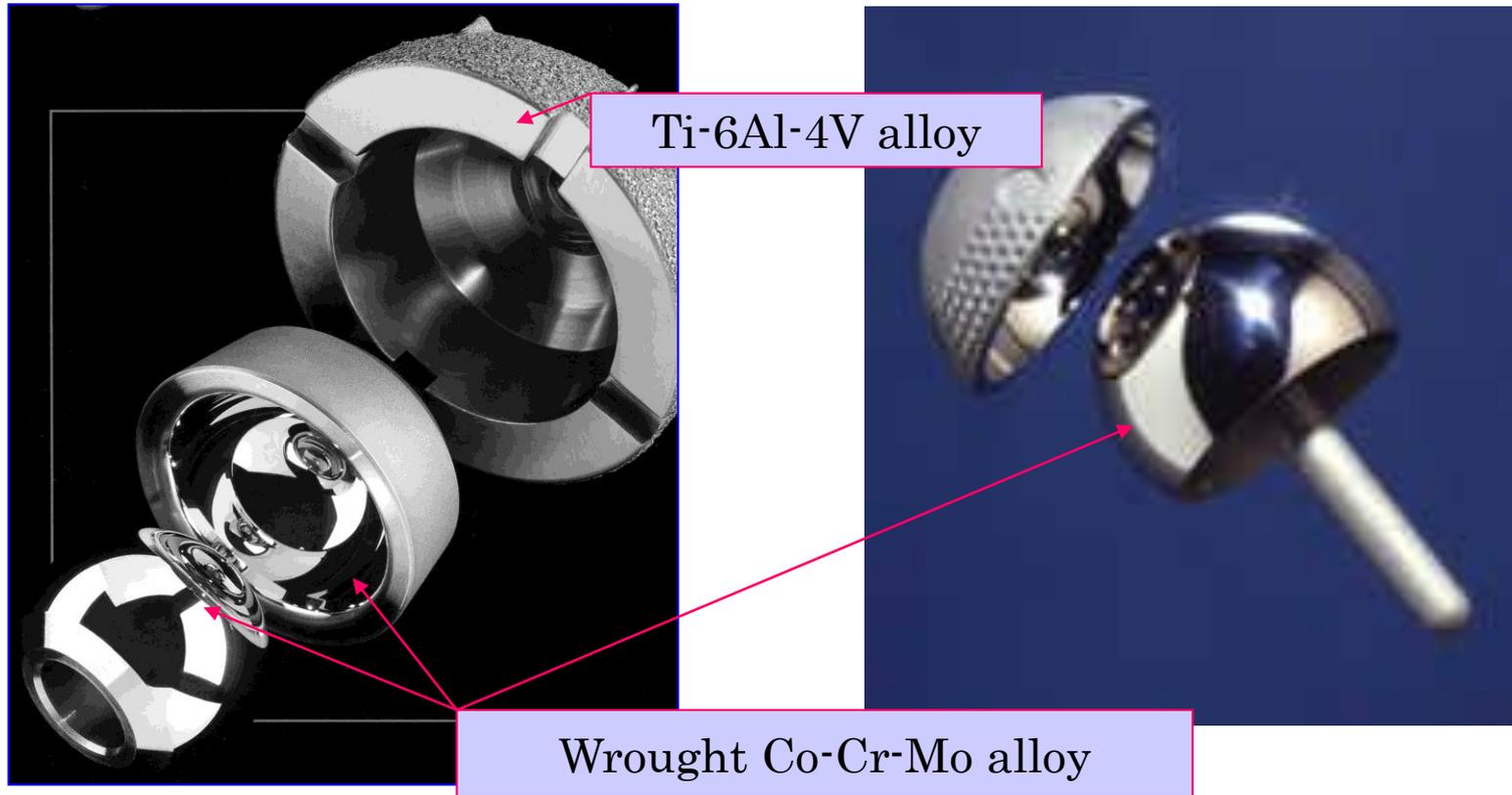


Les alliages de cobalt

- Alliages de Co-Cr-Mo et parfois Ni....
- Utilisés pour leur très bonne résistance à l'usure, plus cher que les inox
- Super alliages donc très bonnes propriétés mécaniques



Les alliages de cobalt: le futur



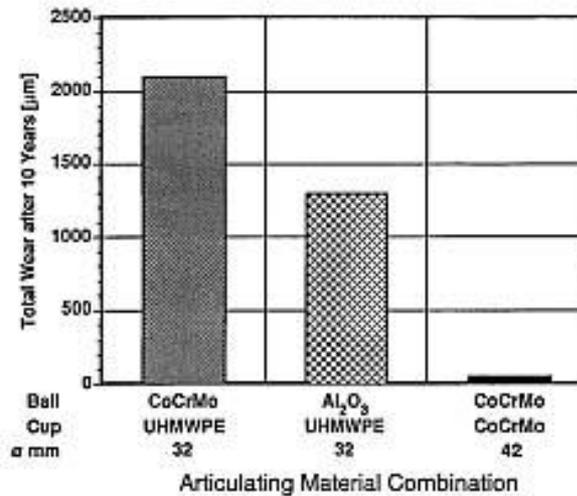
Les différents matériaux métalliques utilisés

- Propriétés demandées pour les outils chirurgicaux:
 - 1) Facilité de stérilisation
 - 2) Biocompatibilité
 - 3) Résistance mécanique
 - 4) Rigidité
 - 5) Parfois il faut que ça coupe ou que cela pique....
- **Métaux (Inox, AMF)**

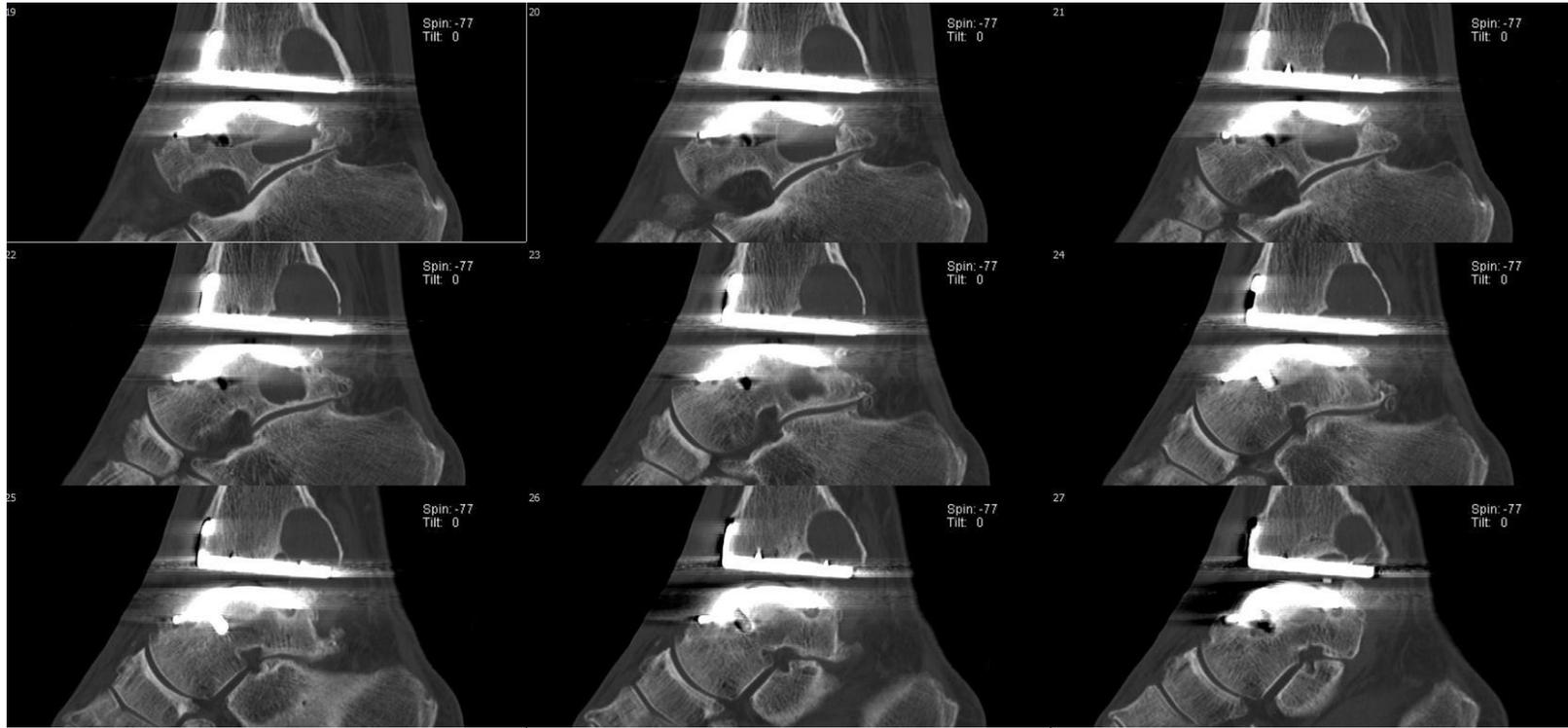


Problèmes liés à l'utilisation des métaux

- Module d'Young trop élevé
⇒ Ostéolyse
- Usure
⇒ Débris
⇒ Infections

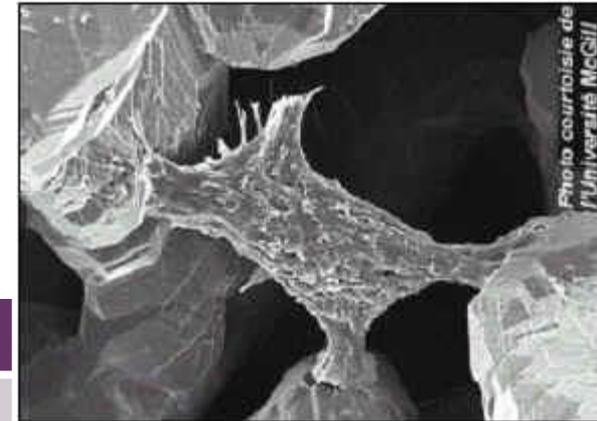
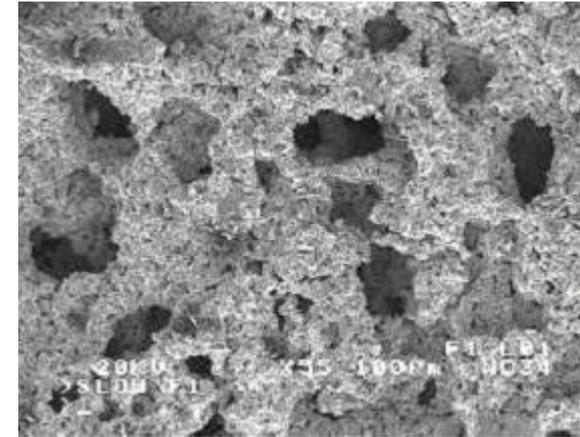


Problèmes liés à l'utilisation des métaux



Challenges pour les matériaux métalliques

- Fonctionnalisation de la surface
- Compréhension des interactions entre matériaux
- Matériaux poreux
 - 1) Pour l'accrochage osseux
 - 2) Pour se rapprocher du module d'Young de l'os



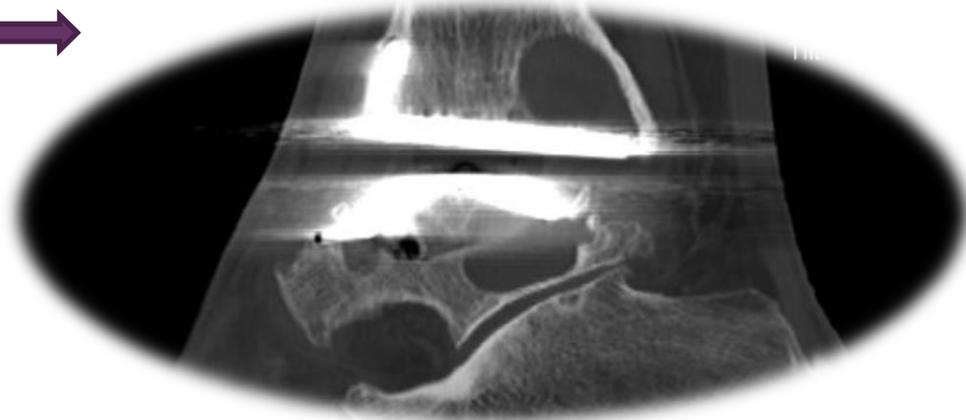
	E (GPa)	σ_{max} (MPa)	E_{max} (%)
Os	0.4-2	5-15	2-5
Ti solide	110	175	
Ti poreux	0.6-2.2	5-15	2-5

A-t-on besoin de science des matériaux ?

- Problème avec un modèle de prothèse de cheville....



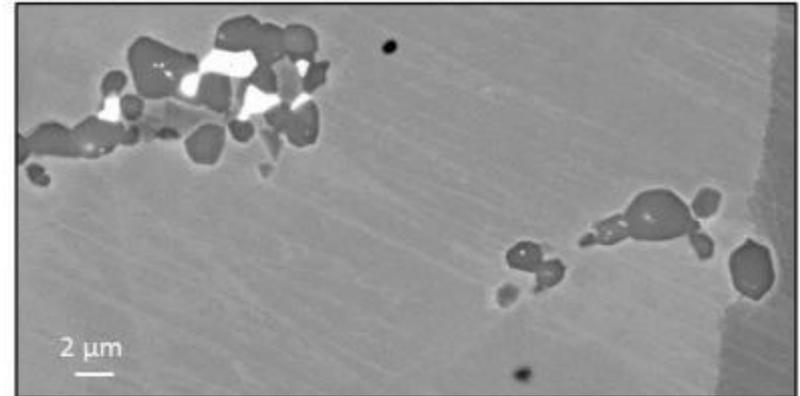
Après quelques mois....



A-t-on besoin de science des matériaux ?

- Eude sur des explants
- Le matériau ne devrait avoir qu'une seule phase....

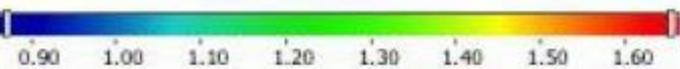
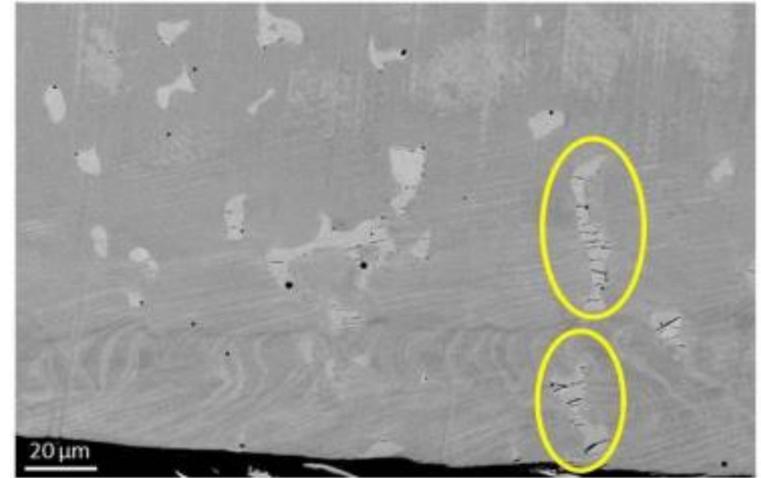
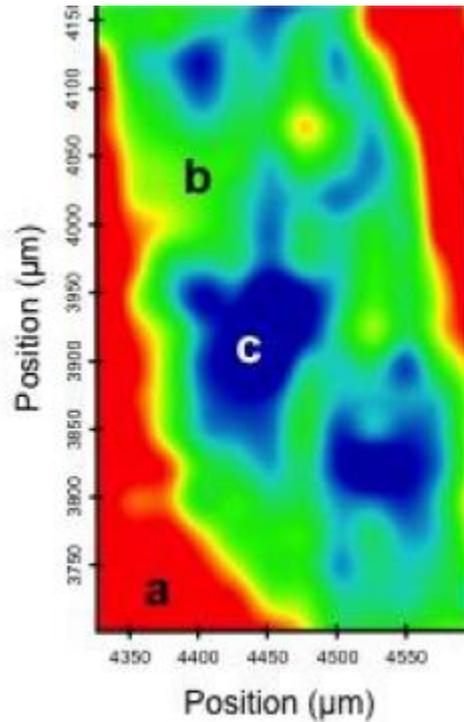
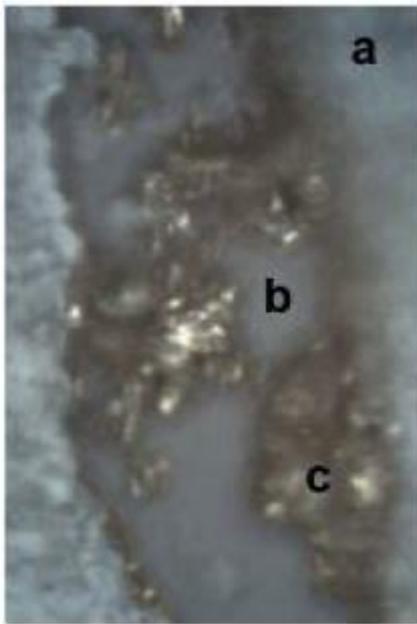
Component (% w(i))	A1	A2	B1	C1	D1	Average
Co	66	64	64	63	65	65
Cr	29	29	28	29	29	29
Mo	3	6	7	7	6	6



- Composition trop élevée en Cr (pour meilleure propriété de corrosion et moins d'artefact à l'imagerie)

A-t-on besoin de science des matériaux ?

- Est-ce que c'est embêtant ?



A-t-on besoin de science des matériaux ?

- Est-ce que c'est embêtant ?

