

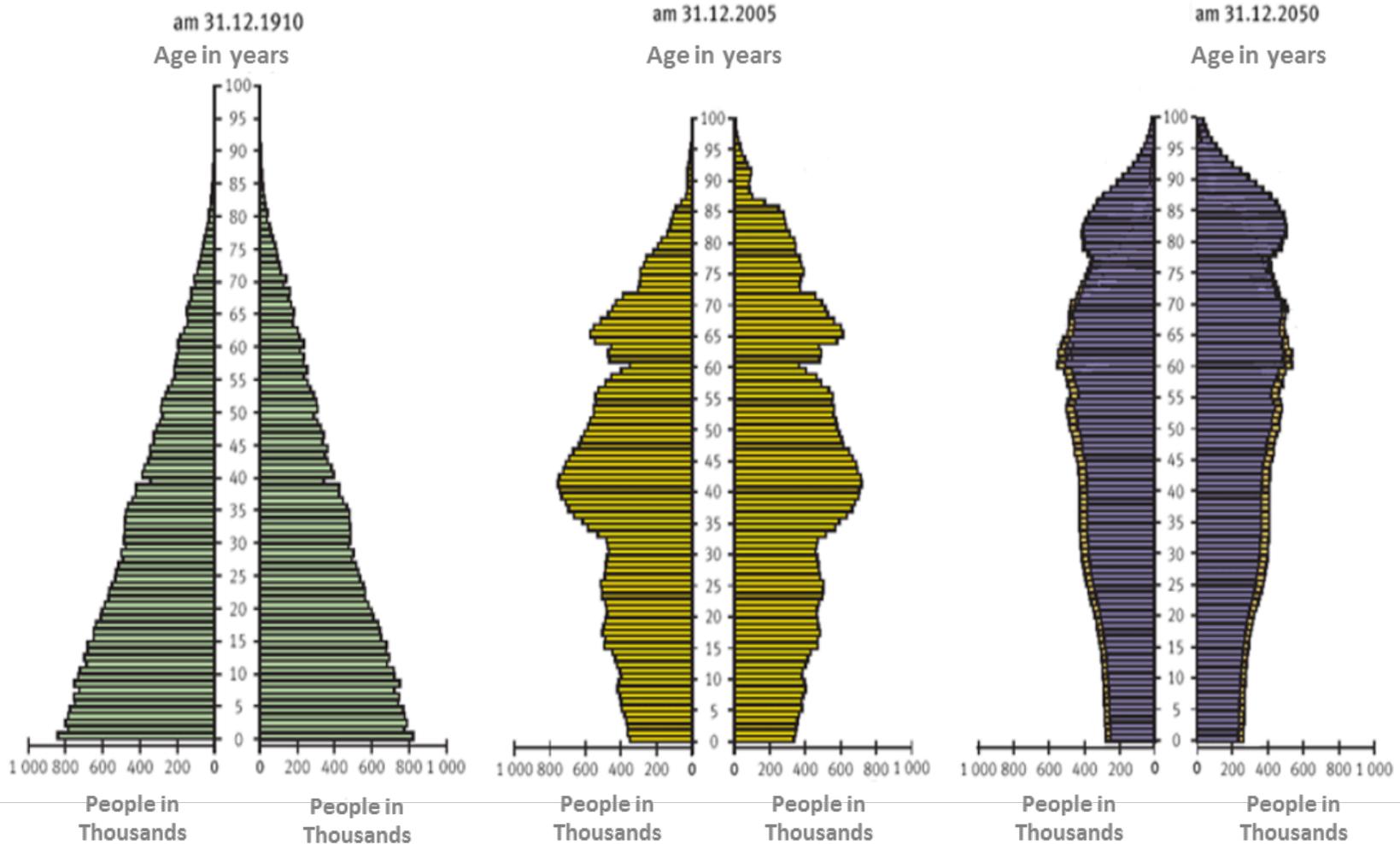
# Les Biomatériaux

**Définition (conférence de Chester ' Biomatériaux ', 1986 :**  
Matériaux non vivants utilisés dans un dispositif médical destiné à interagir avec les systèmes biologiques.

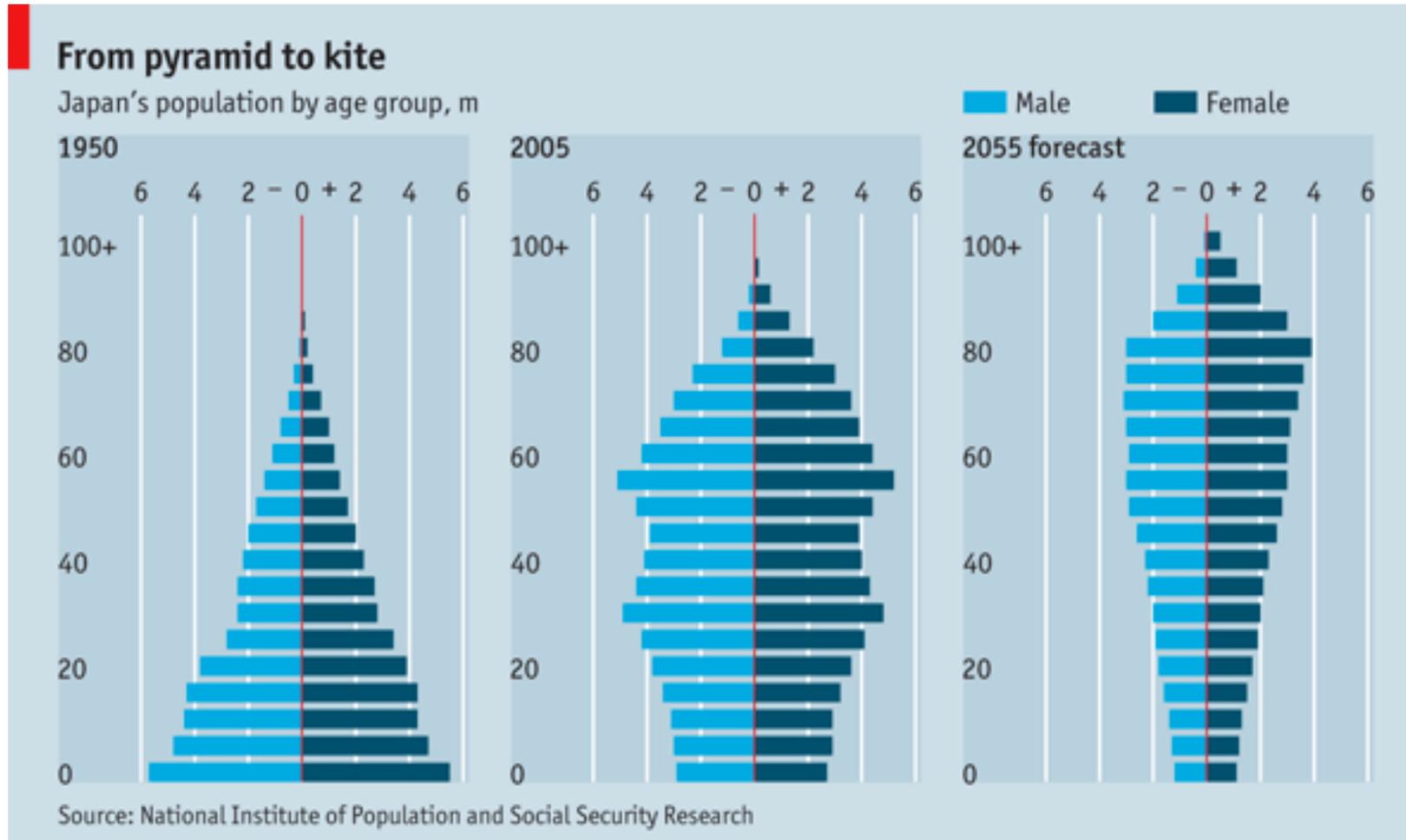
- **1 décembre de 14H00 à 16H00 : Jérôme Chevalier (introduction générale)**
- **08 Décembre de 14H00 à 16H00, Jérôme Chevalier (suite + biocéramiques)**
- **15 décembre de 14H00 à 16H00 : Jérôme Chevalier (biocéramiques)**
- **5 janvier de 14H00 à 16H00 : Laura Preiss (fabrication additive)**
- **12 janvier de 14H00 à 16H00 : Renaud Noharet (applications dentaires)**
- **19 janvier de 14H00 à 16H00 : Jean-Marc Chenal (polymères pour la santé)**
- **26 janvier de 14H00 à 16H00 : Claire Gaillard (nanoparticules et santé / Aspects réglementaires)**
- **02 février de 14H00 à 16H00 : Damien fabrègue (biomatériaux métalliques)**
- ***Validation du cours : présence/interactions + Etude critique d'une publication***

# Contexte : Evolution de la population

(ex. Allemagne)



## Cas du Japon: inversion de la pyramide des âges



- *Poses de prothèses de hanche : 1 Million/an en Europe,*
- *Ostéoporose : 50% des femmes (15% de la population au dessus de 50 ans),*
- *30 Millions de personnes en Europe souffrent de mal de dos : 150.000 chirurgies / an.*

# Les enjeux des biomatériaux

dispositif	Quantité (unités par an, en France)
Prothèses de Hanche	180.000
Prothèses de Genou	120.000
Hémodialyse	15.000
Valves cardiaques	10.000
Stents	50.000
Stimulateurs Cardiaques	40.000

Etats unis :

16 millions de porteurs d 'implants.

- 8 millions de prothèses orthopédiques,

- 1 millions de porteurs de stents.

prothèses orthopédiques : mobilité retrouvée, diminution des douleurs

prothèses vasculaires (valves, stents) : diminution de l 'incidence de la mortalité

Enjeu :

Avec l'augmentation de l 'espérance de vie dans les pays développés, il est nécessaire aujourd'hui de développer des implants plus performants.

Exemple de la prothèse de hanche : durée de vie actuelle 10 à 15 ans - reprises nécessaires

- coût d 'une reprise: jusqu'à 100.000 € (moyenne 50.000€)

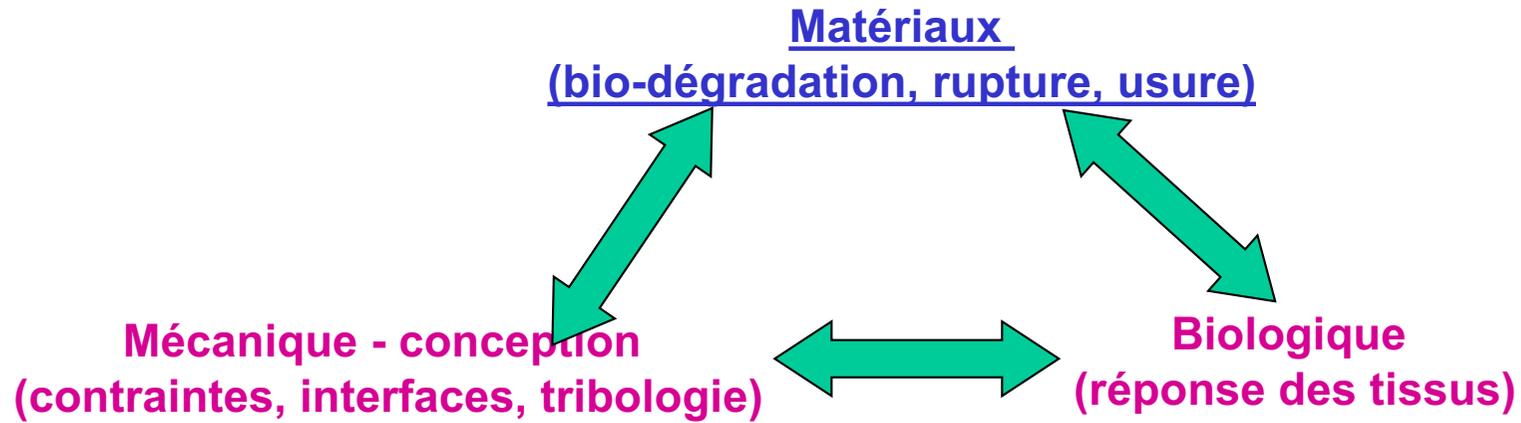
- risque de mortalité : 1 à 3 % (300 personnes par an)

- maladies nosocomiales : 3 à 6 %

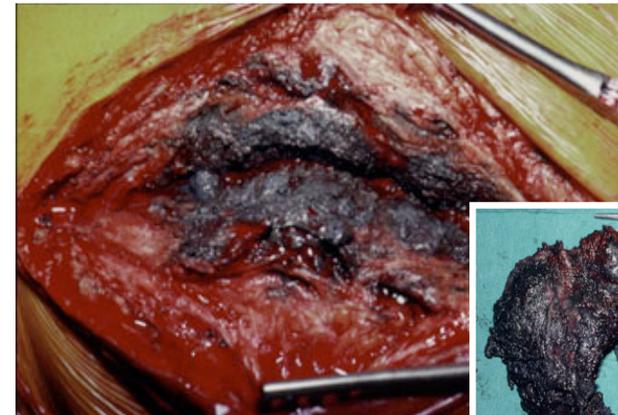
Contexte : nouvelles réglementations européennes (directives plus strictes)



Développer des implants plus durables : un problème multi-factoriel et pluri-disciplinaire

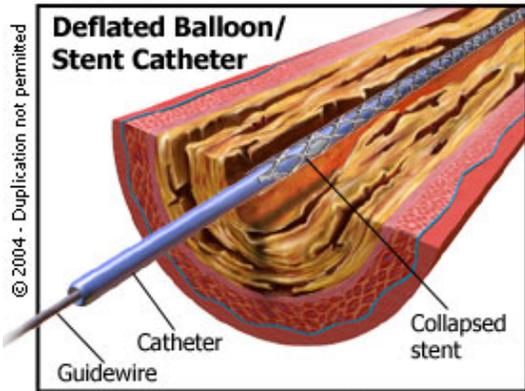


Problèmes couplés : ex : usure → débris → inflammation → ostéolyse → descellement



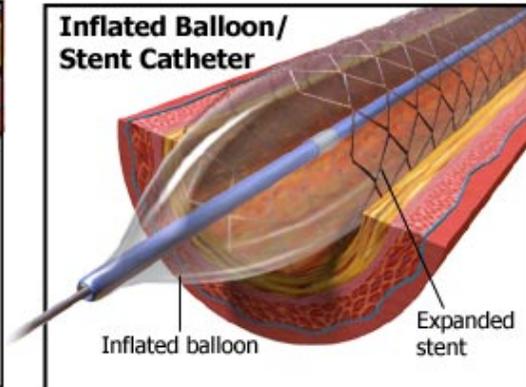
© 2004 - Duplication not permitted

### Deflated Balloon/ Stent Catheter



A balloon catheter equipped with a stent is guided through the artery to the blockage site.

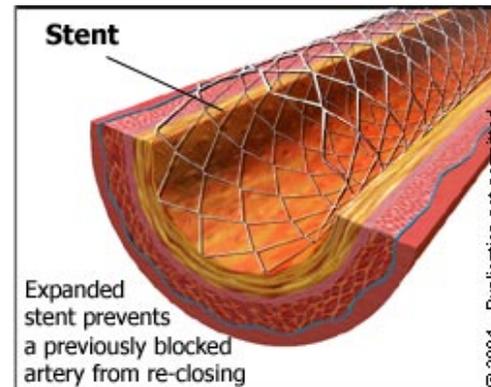
### Inflated Balloon/ Stent Catheter



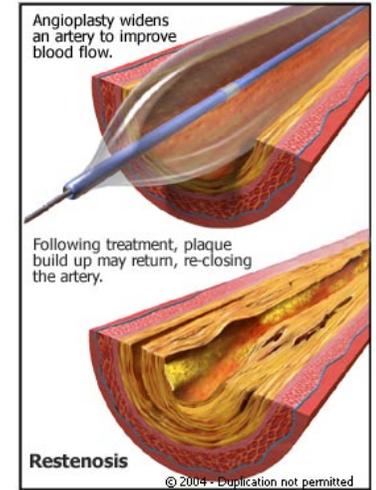
The stent expands inside the artery when the balloon is inflated. The catheter is withdrawn and the stent remains adhered to the artery walls.

© 2004 - Duplication not permitted

### Stent



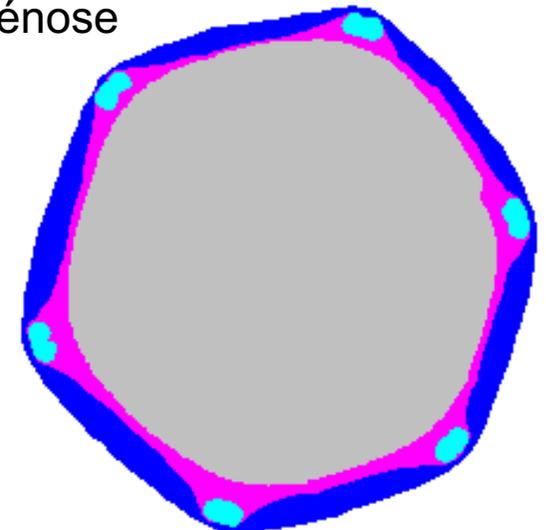
© 2004 - Duplication not permitted



© 2004 - Duplication not permitted

Resténose avec stent :  
~20-25% des cas

Problèmes couplés : ex : raideur → contraintes → inflammation → resténose



# Evolution des biomatériaux : deux paradigmes

## REEMPLACER

## REGENERER

*Biomatériaux  
'inertes'*

*Greffes  
Biocéramiques  
actives  
Fonctionnelles*

*Vers des implants*  
- « *Vivants* »  
- *Sur mesure*  
- *Médecine  
personnalisée*



*Remplacement*

*Comblement  
Liaison os implant*

*Ingénierie tissulaire  
Organoïdes*

1960

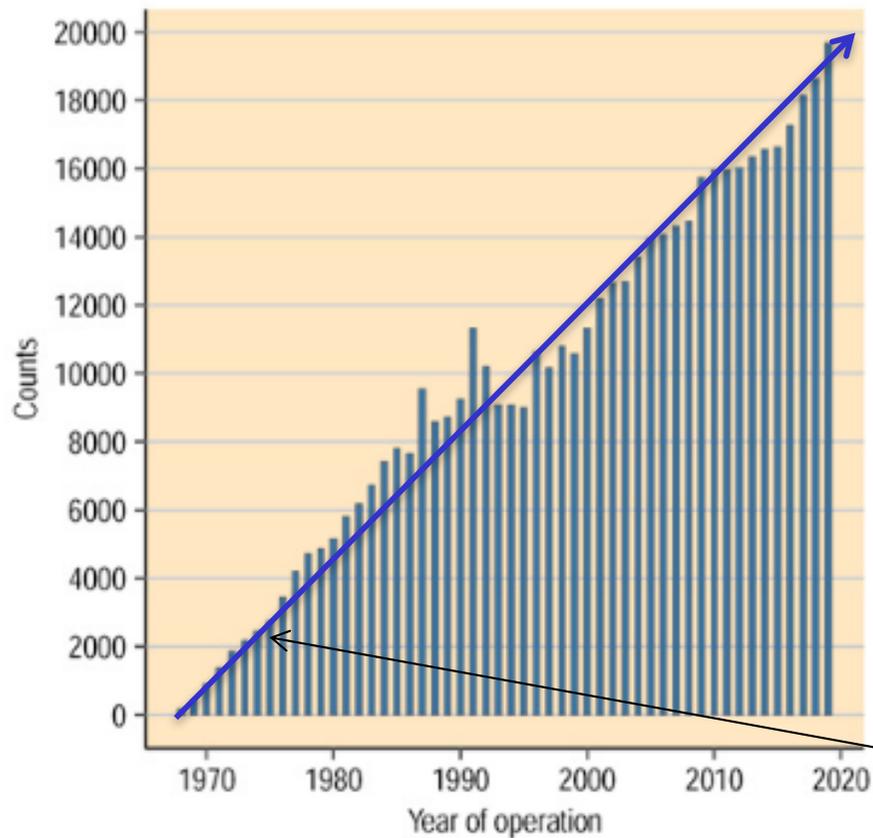
1970

1980

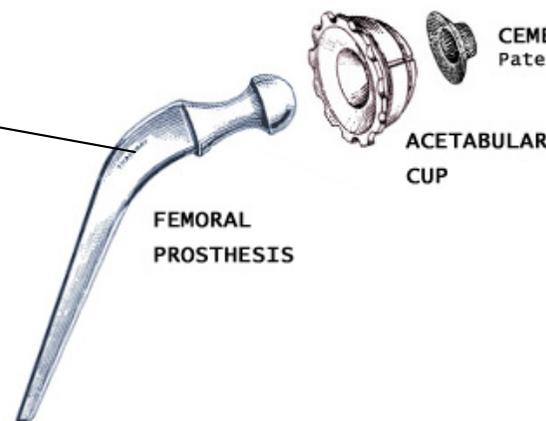
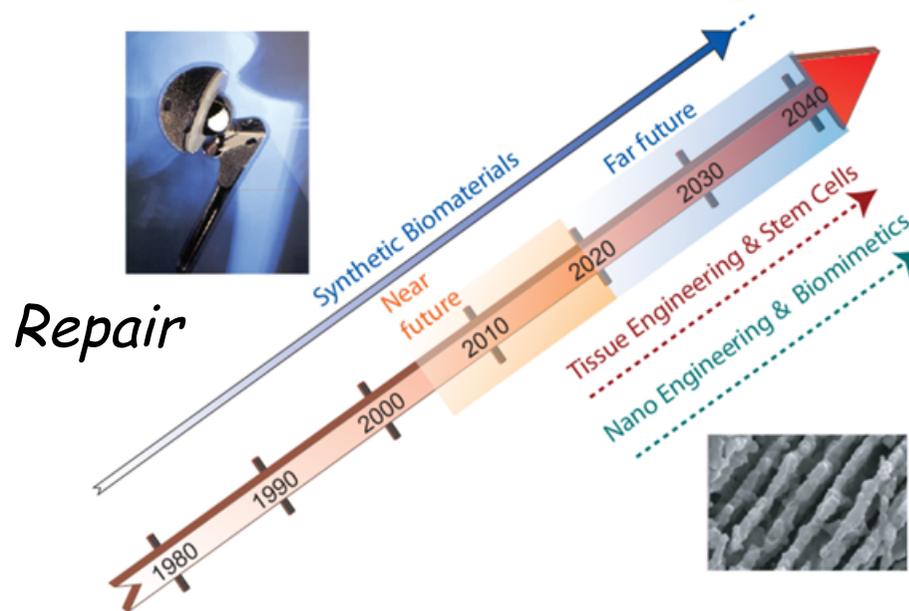
2005

*Réglementaire  
Coûts !*

*L'ingénierie tissulaire se développera dans les prochaines décennies, cependant, dans le même temps, le besoin de prothèses durables continuera à progresser* **Regenerate**



*Number of THRs per year in Sweden (mean survival rate : >98.5% at 7 years)*

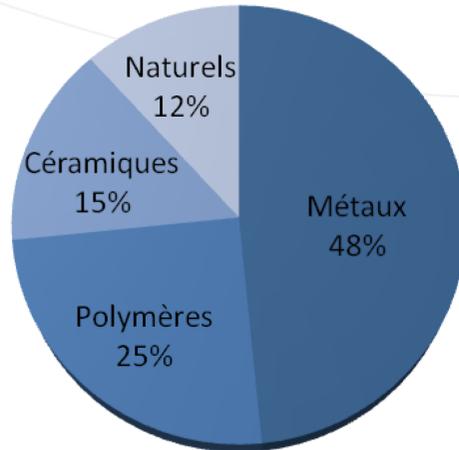


SIR JOHN CHARNLEY (1911-1982)

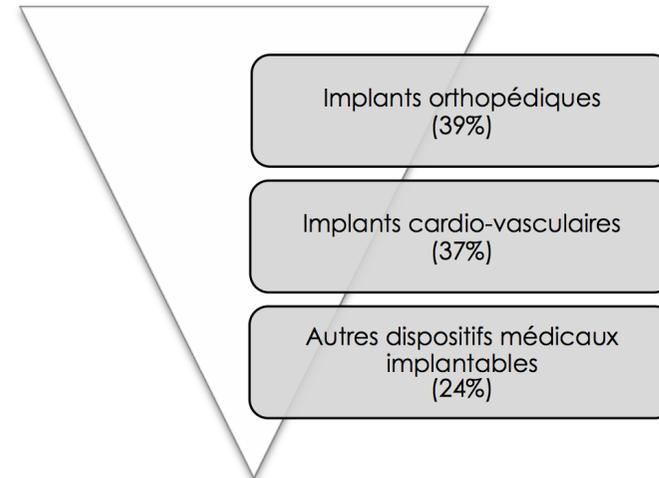
# Marché mondial des biomatériaux

106 Milliards de \$ en 2019\*  
(augmentation prévue 15% par an\*)

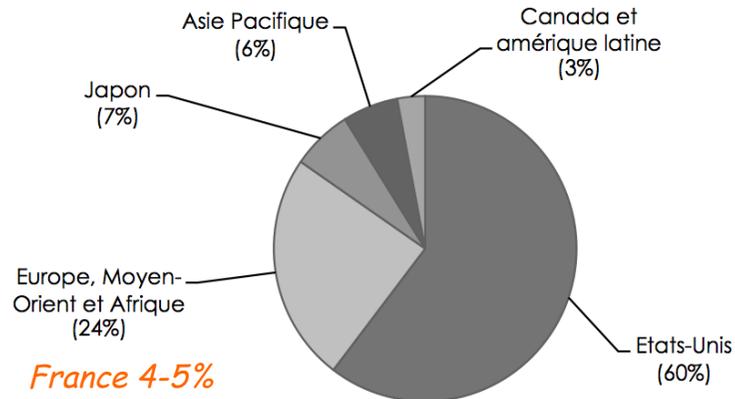
## Marché par type de matériau



## Marché par domaines d'application



## Marché par zones géographiques



- *Marché encore largement dominé par métaux,*
- *Marché porté orthopédie et cardiovasculaire*
- *Marché dominé par USA, fort potentiel en Asie,*
  
- *Recherche vers dispositifs plus durables, moins invasifs,*
- *Potentiel des Dispositifs Médicaux connectés*
- *Potentiel de l'ingénierie tissulaire*
- *Potentiel de la fabrication additive ('impression 3D')*

\*<https://www.grandviewresearch.com/press-release/global-biomaterials-market>

# La France et les biomatériaux

**D'une manière générale, dépendance française forte.**

	Quantité	
<i>Marché français (unités par an)</i>	Prothèses de Hanche	180.000
	Prothèses de Genou	120.000
	Hémodialyse	15.000
	Valves cardiaques	10.000
	Simulateurs Cardiaques	50.000
	Lentilles de contact	1.200.000
	Implants oculaires	140.000
	Implants dentaires	....

En France, désintéressement des grands groupes (PME). En particulier à cause de la responsabilité et des risques.

*Dow Corning* : 4,2 M\$ de dommages intérêts pour implants mammaires.

*Sulzer (2001)* : 1700 reprises de prothèses (résidus de graisse d'usinage...)

*Saint Gobain Desmarquest (2002)*: rupture de près de 1000 têtes fémorales, arrêt d'activité  
(surenchère des dommages et intérêts demandés lors des procès - jusqu'à 1 million €)

**Années 2010** : prothèses métal-métal Depuy (filiale Johnson&Johnson)

**'Implant files' en 2018 – 'durcissement' aspects réglementaires**

# Les principaux champs d'action des biomatériaux

## Chirurgie cardiovasculaire

**Valves cardiaques,  
Simulateurs cardiaques,  
Assistance ventriculaire,  
Prothèses vasculaires.  
Hémodialyse**

## Chirurgie orthopédique

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

## Ophthalmologie

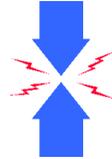
**lentilles (brièveté du contact)  
implants,  
produits visqueux  
de la chambre postérieure**

## Chirurgie dentaire

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

# Biofonctionnalité et biocompatibilité des matériaux

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



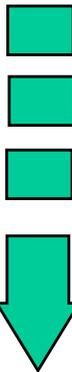
Problèmes d'ostéolyse sérieux avec cupules en téflon, voire UHMWPE...  
Problèmes de rupture de têtes en céramique (alumine), de tiges métalliques...  
Rejets, révision ... France : 300 décès chaque année !!

Les biomatériaux sont souvent au mieux acceptés par l'organisme pour remplir une fonction physique sans réaliser de fonction biologique.



## Biofonctionnalité

Aptitude à remplir une fonction désirée



## Biocompatibilité

Remplir la fonction aussi longtemps que possible dans l'organisme

## Interaction positive recherchée (aide à la régénération)

(ex : aide repousse osseuse, ingénierie tissulaire)

# Biofonctionnalité

## Les conditions qui amènent à utiliser les biomatériaux

- ☞ Défauts congénitaux entraînant une déficience fonctionnelle.  
(*ex : hydrocéphale, valves cardiaques déficientes*)
- ☞ Problèmes de croissance avec conséquences fonctionnelles.  
(*scoliose*)
- ☞ Maladies entraînant des dégradations irréversibles des tissus.  
(*arthrose rhumatoïde, athérosclérose*)
- ☞ Tumeurs nécessitant une suppression de tissus.
- ☞ Les accidents.
- ☞ Les raisons esthétiques.  
(*implants mammaires*)

# Défauts congénitaux entraînant une déficience fonctionnelle.

# Problèmes de croissance avec conséquences fonctionnelles.

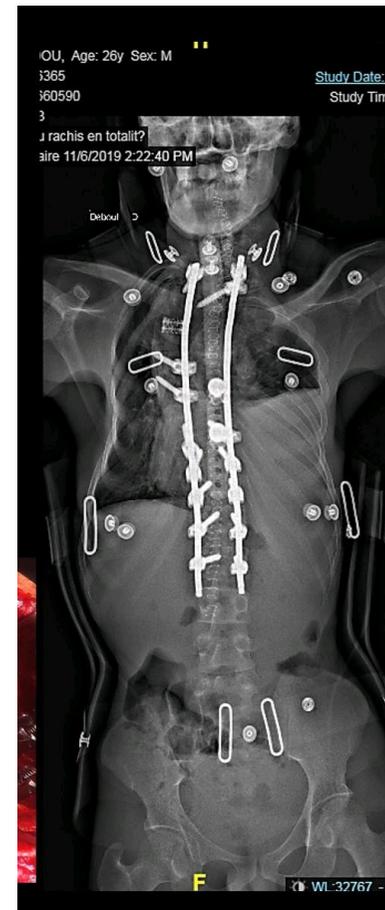
## Traitement de l'hydrocéphale

### Valves cardiaques



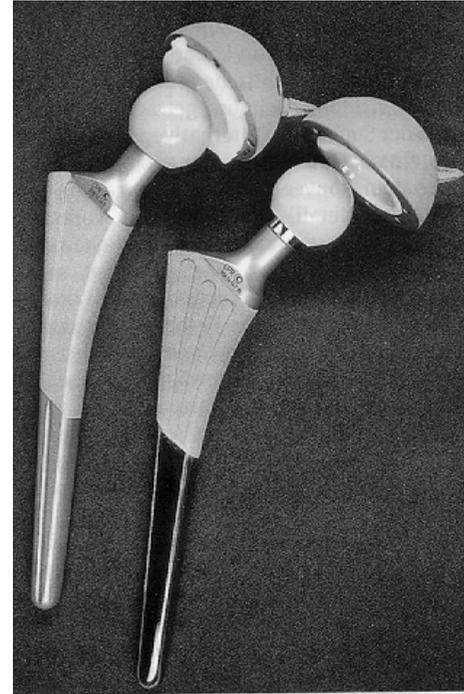
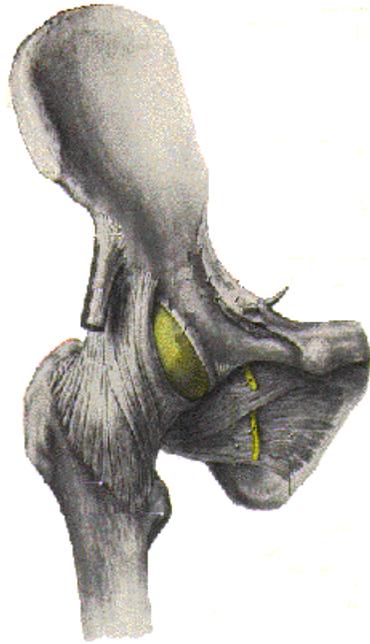
1 nouveau né sur cent  
présente une valve  
cardiaque déficiente

## Scoliose

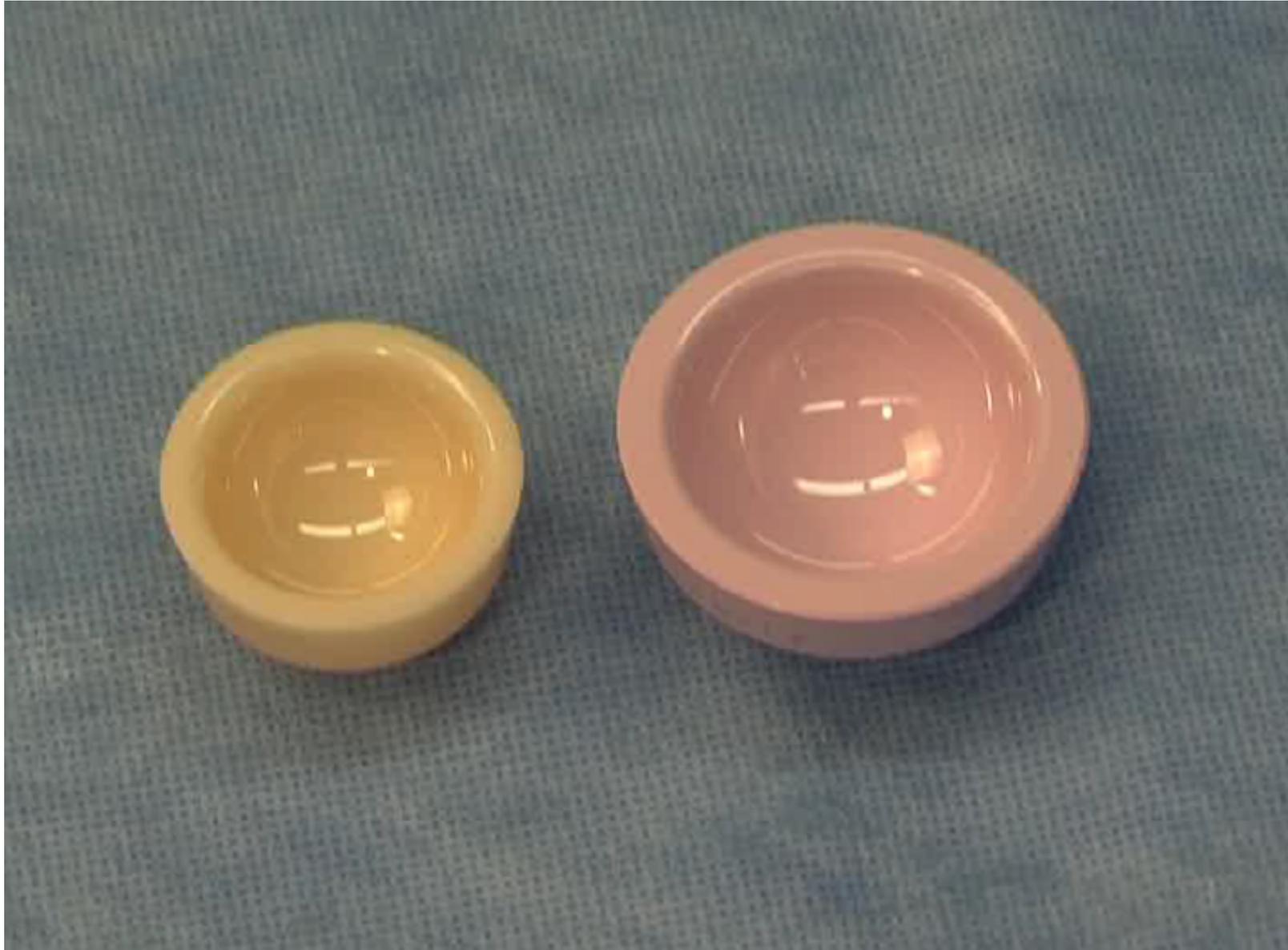


# Maladies entraînant des dégradations irréversibles des tissus.

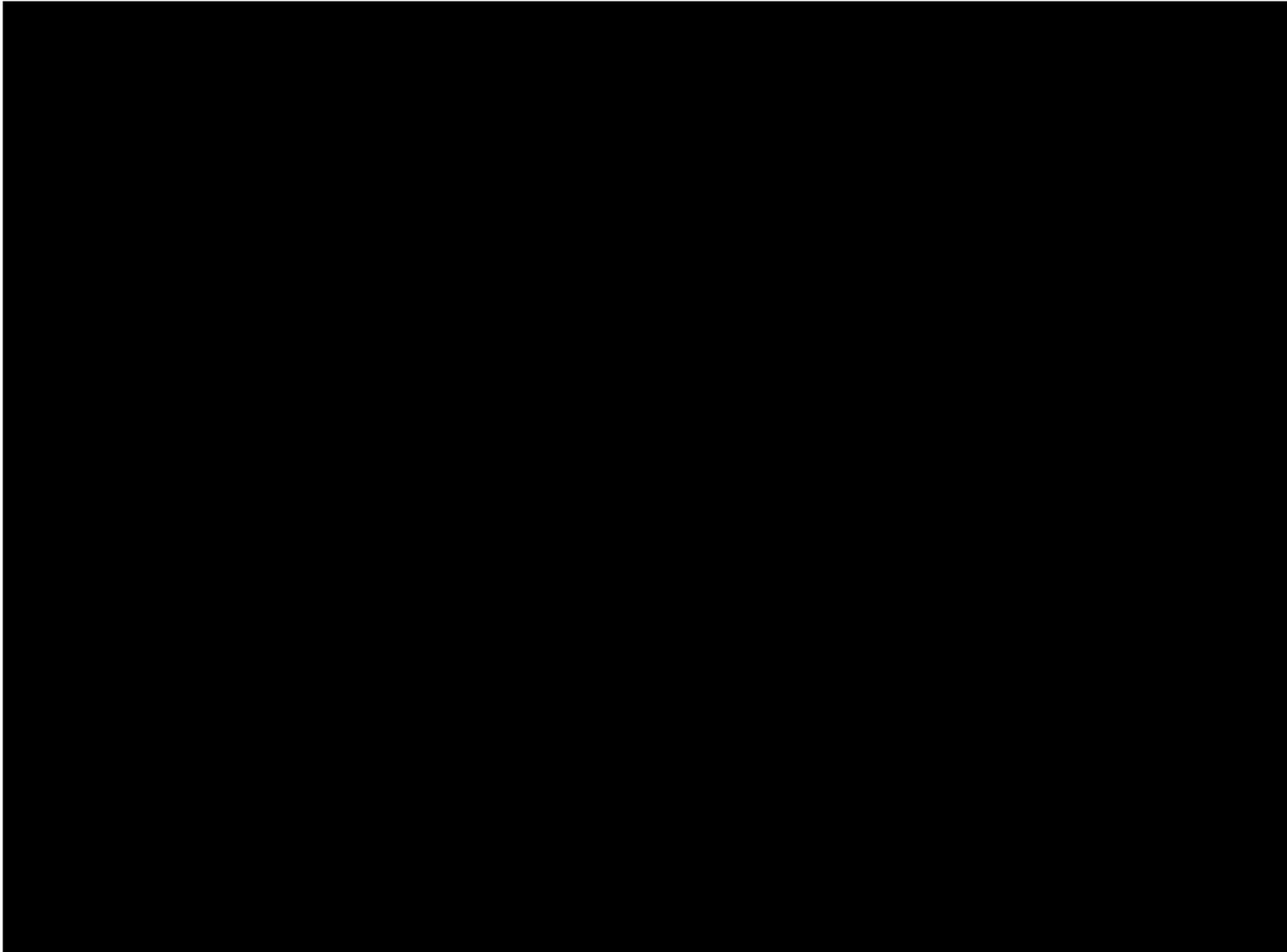
Usure du cartilage (arthrose)



## *Even today : an invasive surgery*

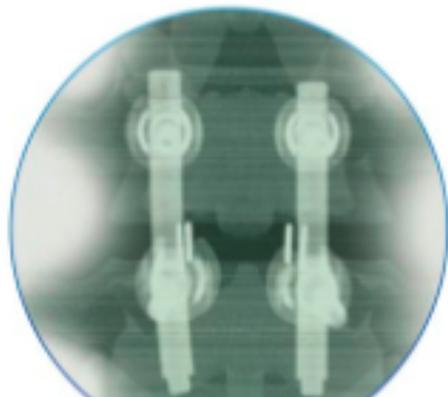
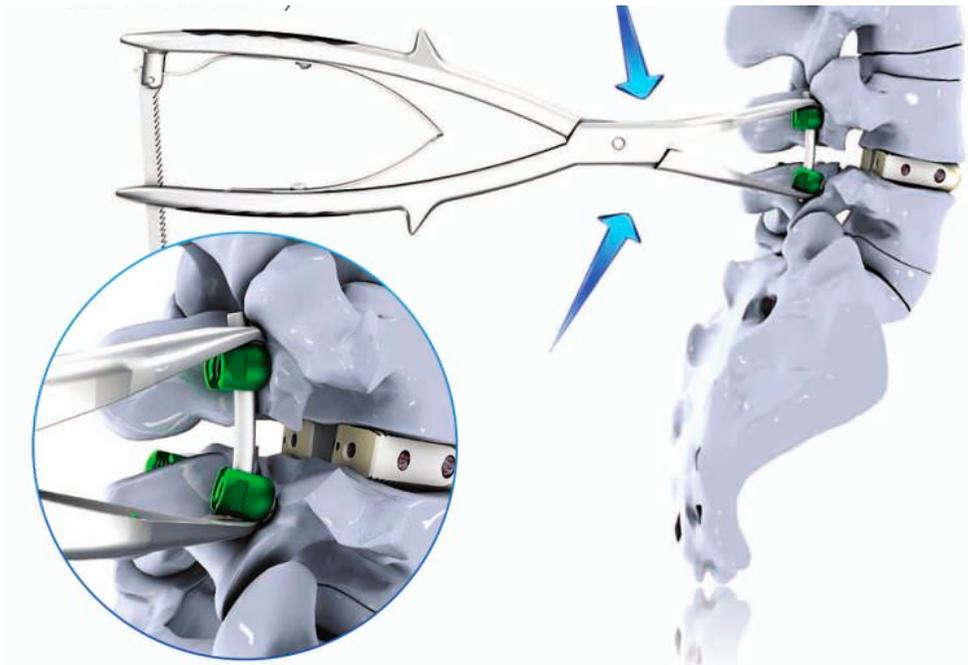


## *Even today : an invasive surgery*



# Maladies entraînant des dégradations irréversibles des tissus.

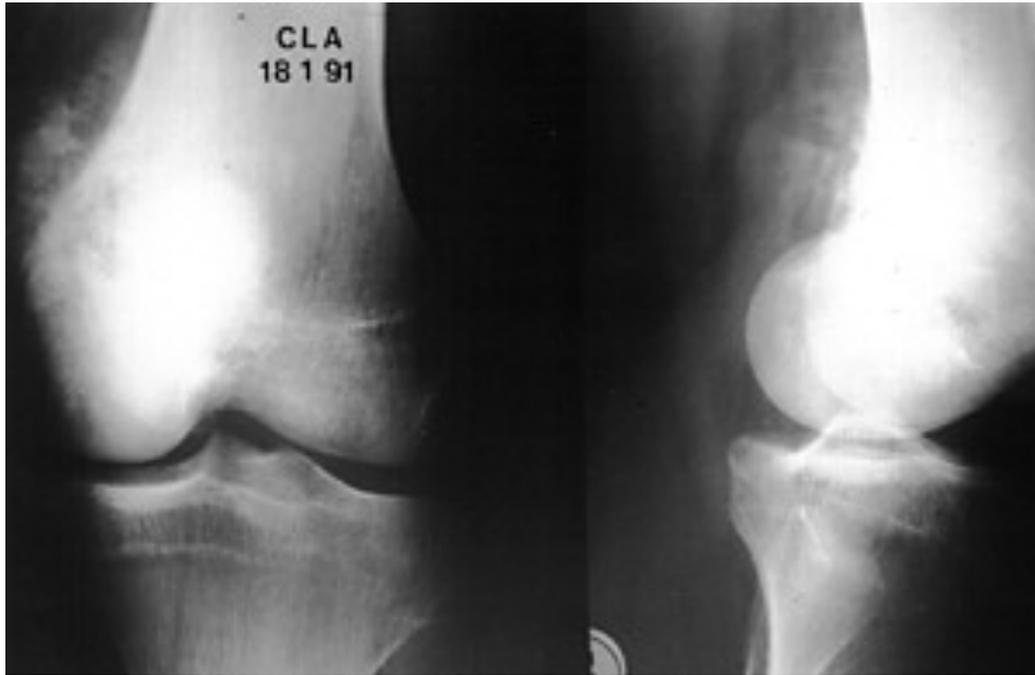
Dégradation des disques intervertébraux ('mal de dos') – 150.000 op./an Europe





## Tumeurs nécessitant une suppression de tissus.

*Cas d'une tumeur du genou, remplacement par une prothèse*

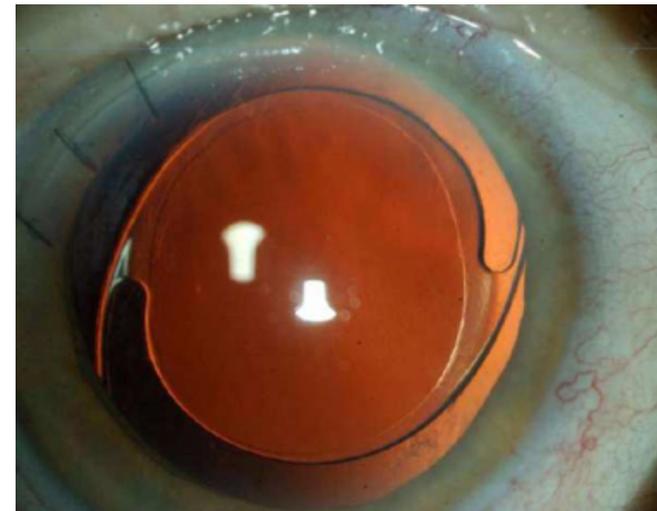
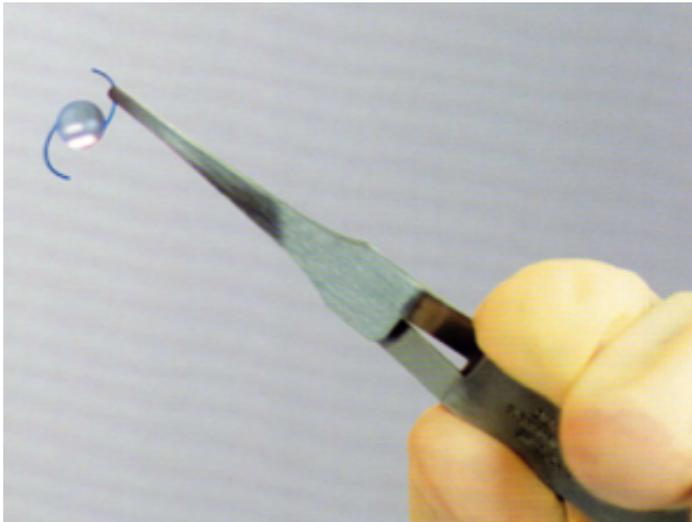
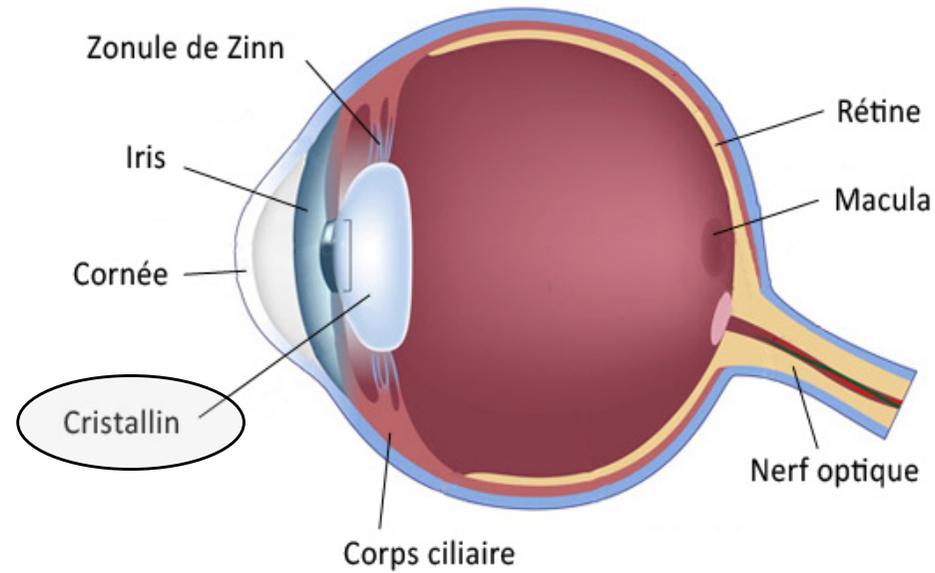


*Radiographie de la tumeur (sarcome)*



*ImageRMN*

# Traitement de la cataracte: implants intra-oculaires



*L'opération de la cataracte est très fréquente (300.000 / an en France)*

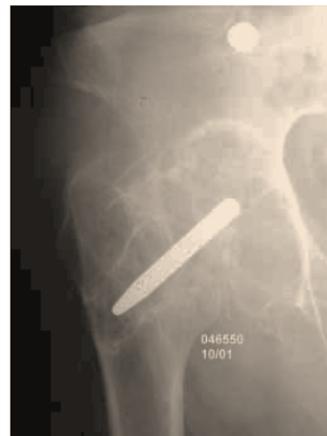
## De matériaux de rencontre...

### Exemple : Le PMMA (Plexiglas) en orthopédie (puis dentaire)

*La première 'prothèse de hanche' date de 1890 (T.Gluck) : C'est un implant en ivoire fixé au fémur par des vis et par un ciment « maison » fait de colophane, de pierre ponce et de plâtre.*

*Entre 1890 et 1945, quelques essais, infructueux, sont testés avec différents matériaux disponibles (ivoire, verre, caoutchouc)*

*Ce sont les frères Judet qui conçoivent, en France, en 1946, la première prothèse posée en nombre : ils utilisent du PMMA (Plexiglas) pour la réalisation d'une tête fémorale fixée sur la tige fémorale naturelle.*

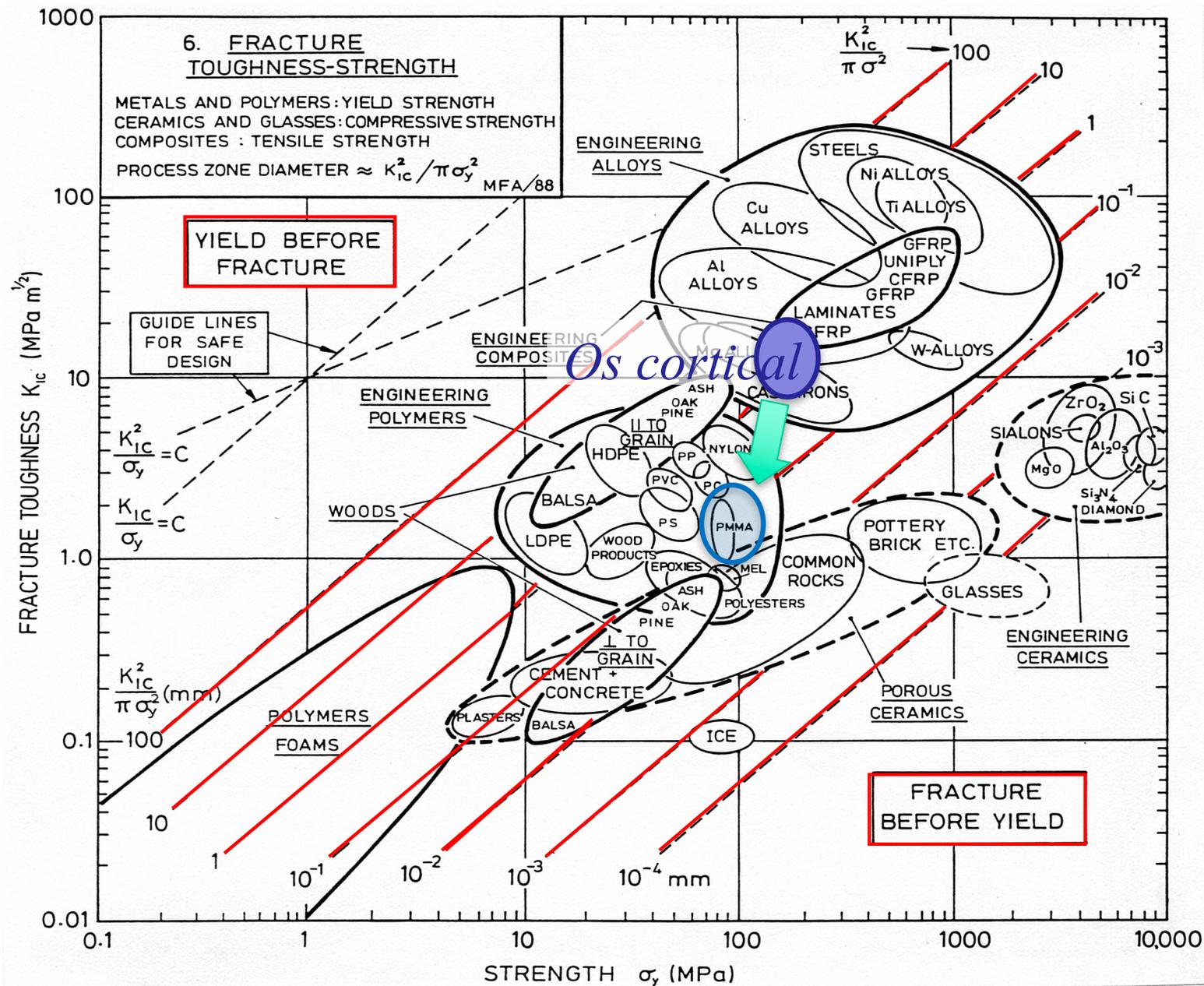


*Quelques prothèses auront duré 50 ans !*

*La plupart bien moins longtemps !*

*Fracture / Usure*

# Pourquoi utiliser du Plexiglas pour la réalisation d'une prothèse de hanche ?!



*Le PMMA (Plexiglas) était utilisé pour réaliser les hublots de Cockpits d'avion pendant la deuxième guerre mondiale. Les fragments (dans les yeux des aviateurs) se sont révélés biocompatibles....*



*Utilisation du PMMA en ophtalmologie, puis en orthopédie après la guerre.*

*(Matériau de 'rencontre')*

# Vers des matériaux spécifiques à propriétés biologiques ciblées

## Le Bioverre 45S5 (Bioglass ®):

*Développé en 1969 par L.L. HENCH*

*45% SiO<sub>2</sub>; 24,5% Na<sub>2</sub>O; 24,5% CaO et 6% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.*

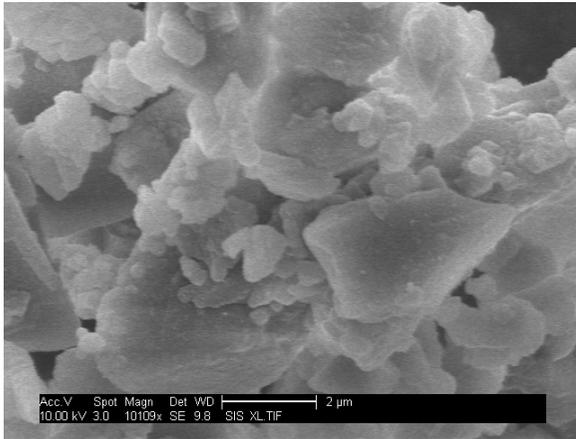
*Propriétés des Bioverres:* *Formation d'une hydroxyapatite carbonatée cristallisée, identique à la partie minérale de l'os, à la surface de l'implant in vitro et in vivo* ➡ *Lien chimique Os/Implant*

*“The human body rejects metallic and synthetic polymeric materials by forming scar tissue because living tissues are not composed of such materials. Bone contains a hydrated calcium phosphate component, hydroxyapatite [HA] and therefore if a material is able to form a HA layer in vivo it may not be rejected by the body.”*

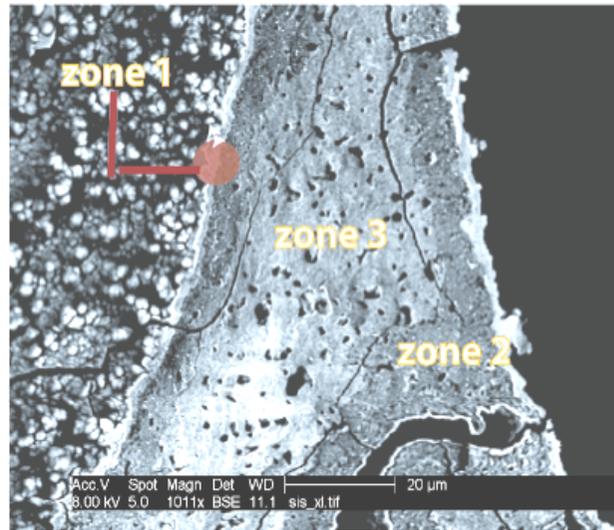
## Intérêts:

- *Un bio-verre permet une accroche implant/tissus rapide, grâce à la formation d'une HA 'naturelle' à sa surface in vivo.*
- *Il favorise la différenciation des cellules souches en ostéoblastes (cellules « produisant » de l'os). Concept de 'céramique ostéo-inductive'.*
- *Effet bactéricide.*

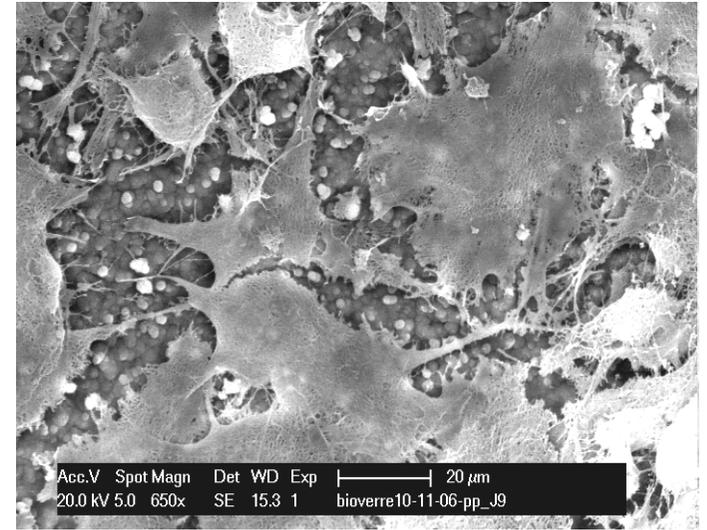




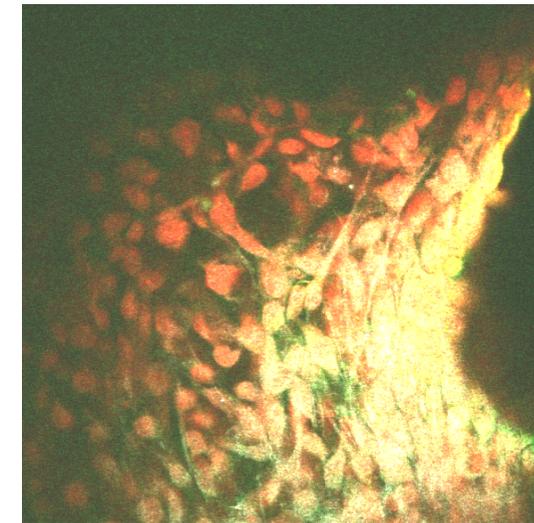
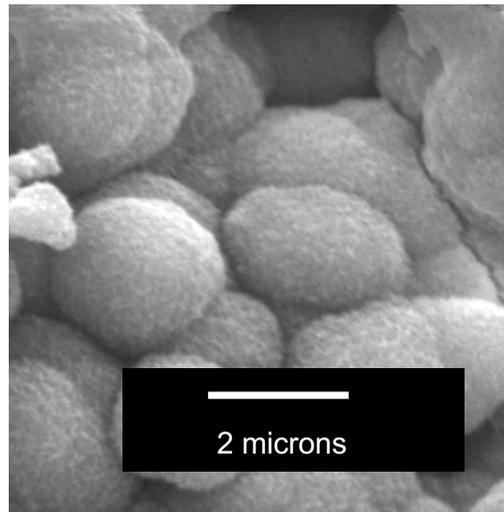
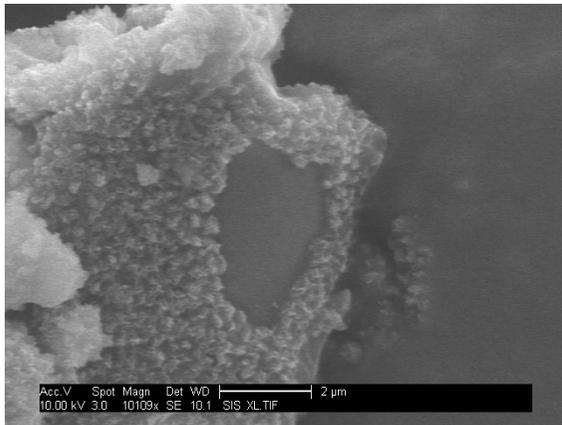
*Release of P and Ca ions  
from the glass*



*Formation of HA in situ*



*Cell proliferation*



*Extracellular matrix  
Collagen*



Wondershare™

12/13 RHONE-ALPES

SOCIAL

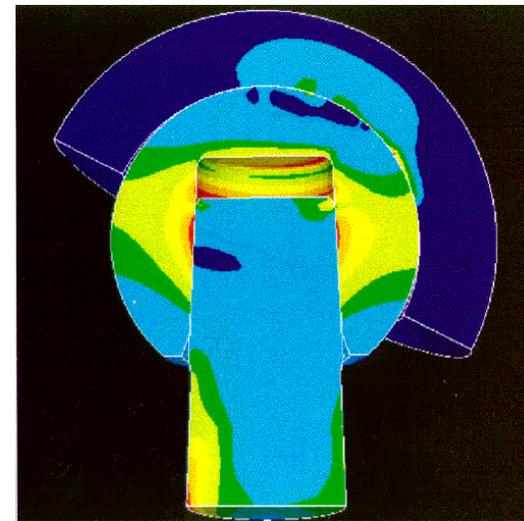
# Impératifs fonctionnels des biomatériaux : transmission des efforts

Fonction majeure des systèmes de remplacement (prothèses orthopédiques) ou de correction (chirurgie du rachis) de la structure osseuse.

Les efforts engendrés ne peuvent pas être considérés comme triviaux :

- prothèse de hanche : jusqu'à 4 \* Poids
  - prothèse de genou : jusqu'à 8 \* Poids
- nombreux points d'attache musculaires, anatomie complexe.

**Calculs par éléments finis.**

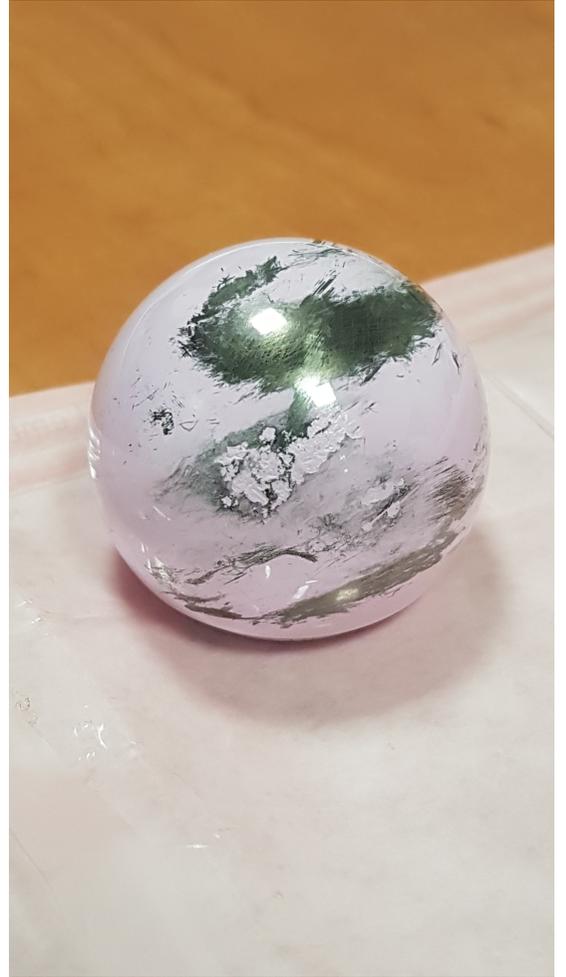


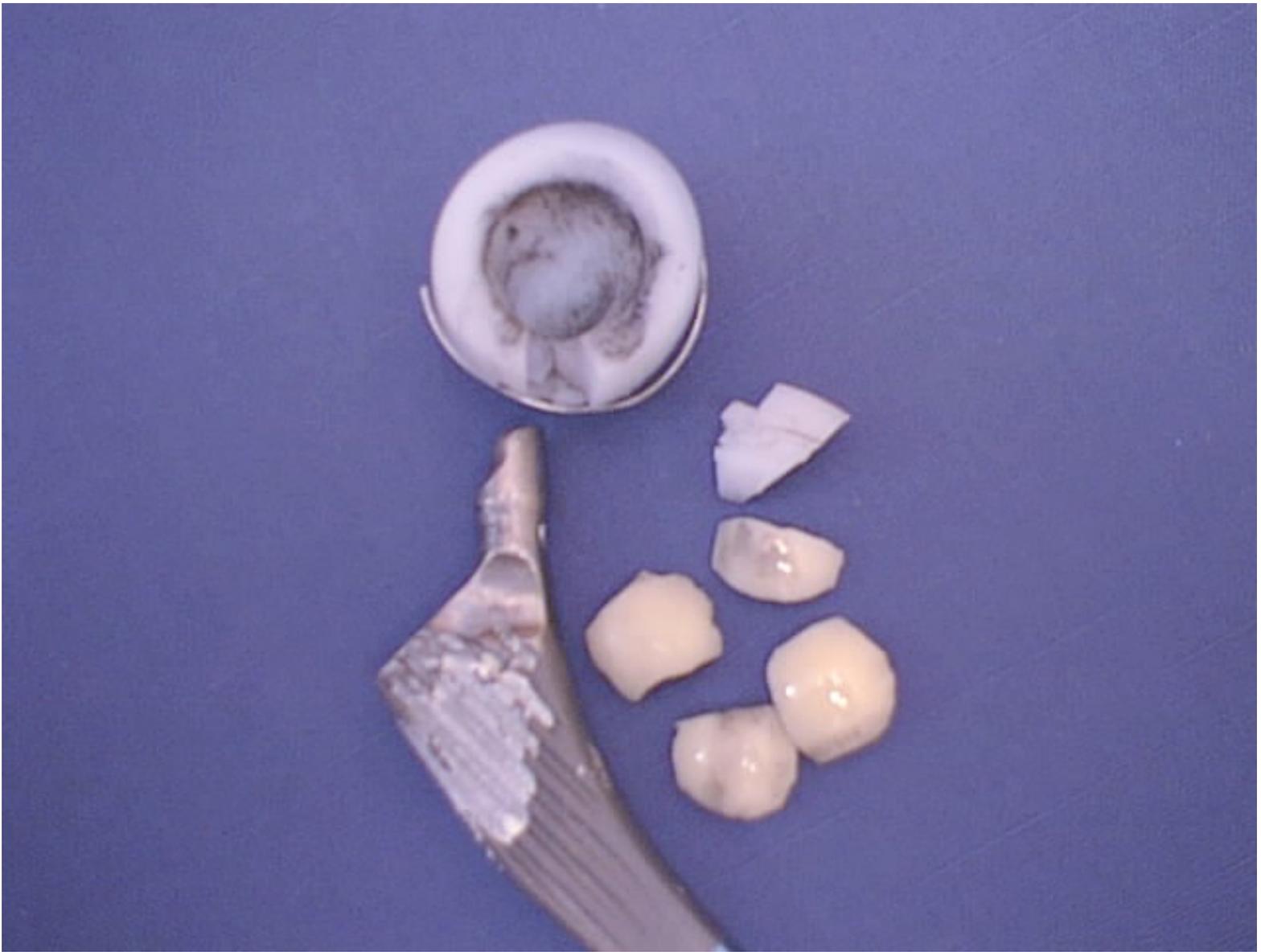
## Caractéristiques mécaniques d'intérêt :

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

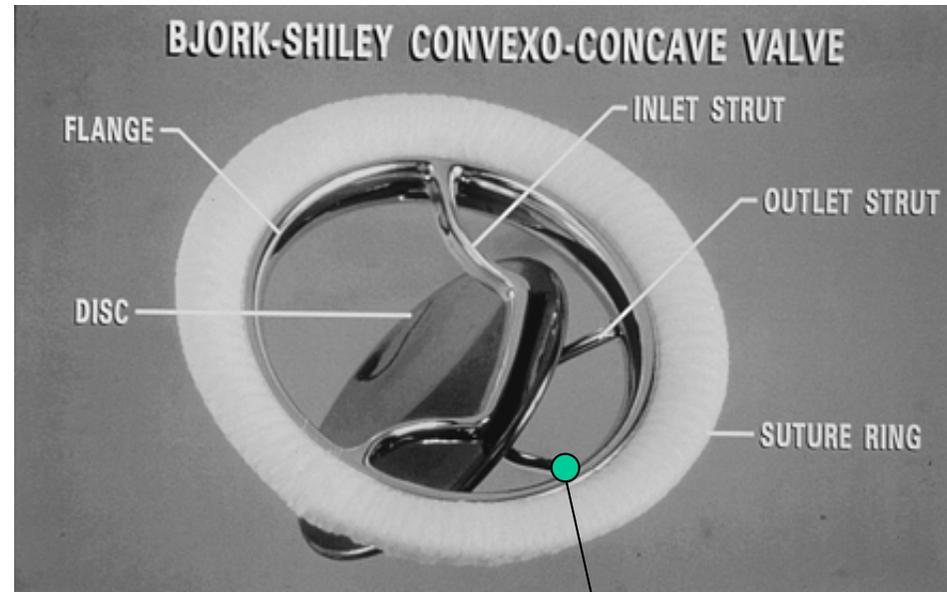
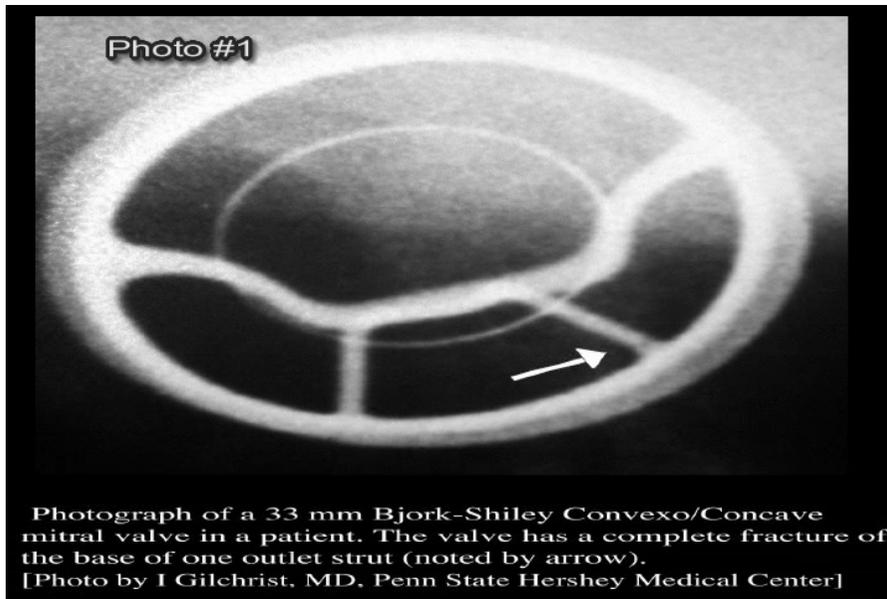


*Crédit Ceramtec AG.*





# Problème de biofonctionnalité : rupture de valves cardiaques



Problème de conception

## Prothèses Bjork-Shiley (Shiley inc., Pfizer)

600 cas de rupture rencontrés sur 80 000 implants, soit moins de 1%  
mais une fracture fatale dans 60% des cas, environ 400 patients (données officielles...).

## 75 ans d'orthopédie, et de choix des matériaux...

*En 1950, le britannique Austin Moore développe un design de prothèse : la tête métallique est portée par une tige fichée dans le canal médullaire du fémur.*

*Le matériau utilisé est un alliage de type **Co-Cr-Mo** ('Vitalium'), développé dans les années (19)30 dans le domaine dentaires à cause de l'explosion du cours de l'or, apprécié pour sa grande tenue à la corrosion.*

### Matériau de rencontre



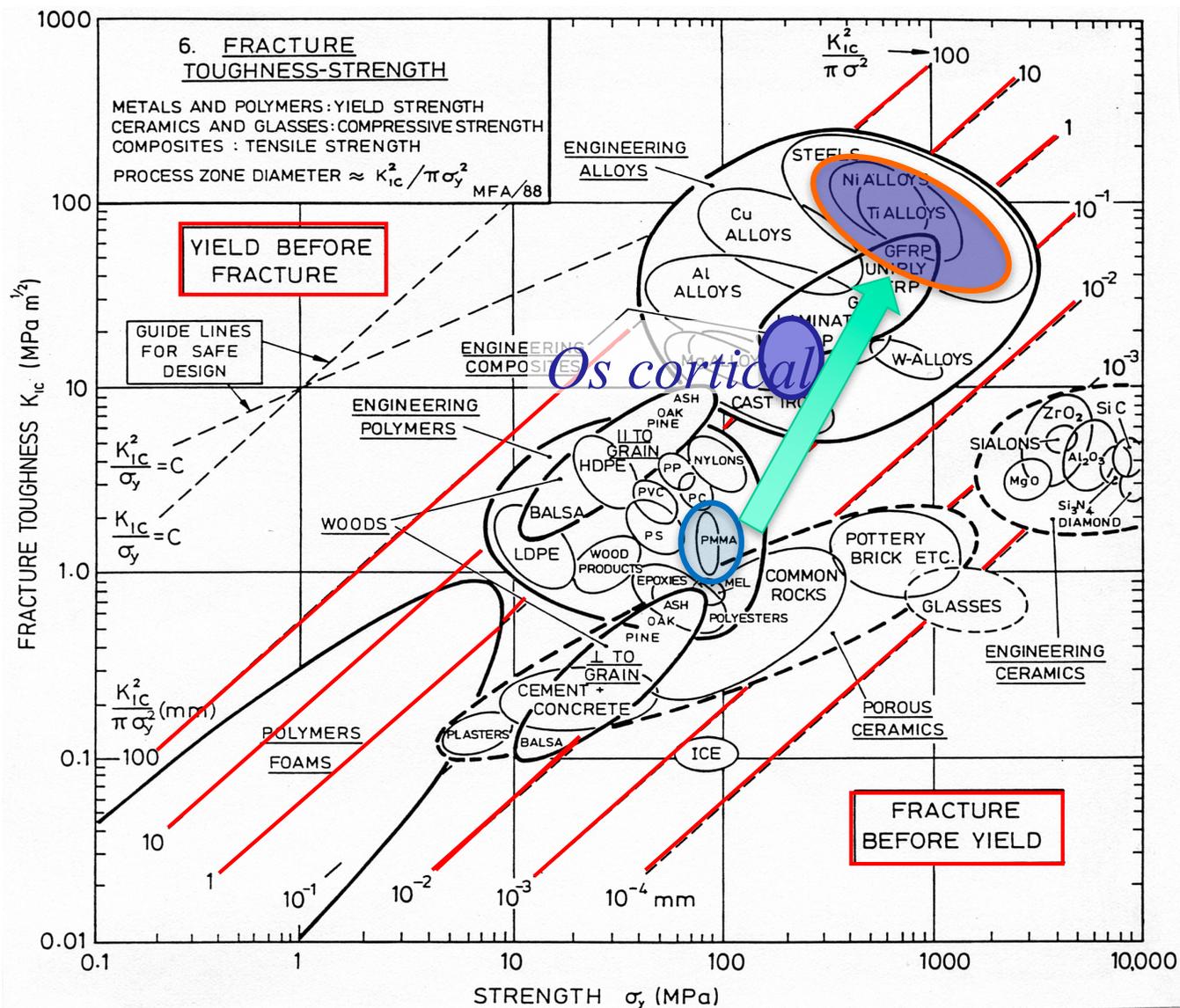
*Perte souvent rapide des prothèses par 'descellement aseptique'*

*Quelques ruptures constatées en fatigue (de la prothèse ou de l'os !)*

*Manque d'ostéo-intégration (les gros trous ne servant qu'à fragiliser la tige...)*

*Le 'scellement' de la prothèse devient une préoccupation majeure.*

*Une tenue mécanique bien évidemment 'meilleure'...que PMMA (et os)  
 (On a souvent cherché à avoir la résistance mécanique la plus forte possible !)*





# Impératifs fonctionnels des biomatériaux : articulation et frottement

frottement = problème n°1 des prothèses orthopédiques (dentaire?)

Les articulations naturelles sont lubrifiées avec le liquide synovial et la combinaison liquide synovial - cartilage présente extrêmement peu de couple de frottement

**Les articulations artificielles sont-elles lubrifiées ??**

Frottement → Débris → Inflammation → **perte prothèse**

**But :** minimiser le couple de frottement, minimiser les débris.

**Solutions actuelles :** métal (ou céramique) – polyéthylène  
céramique - céramique.



1990



2002

# Impératifs fonctionnels des biomatériaux :

## le contrôle du flux sanguin et d'autres fluides

**But des implants cardiovasculaires : reproduire les actions du cœur (pomper le sang), des artères et des veines (conduire le sang) et contrôler le flux (valves cardiaques).**

*Rappel : problèmes artériels, une des principales causes de mortalité.*

**L'étude des implants cardiovasculaires fait souvent appel à la mécanique des fluides (complaisances optimisées, déviations, tenue à la pression artérielle du polymère ... )**

$$C = \frac{\Delta d_0}{d_0 \cdot \Delta p}$$

Il est important de vérifier l'évolution de la complaisance in-vivo (rigidification des polymères)

L'écoulement du sang est en général laminaire, et suit la loi d'écoulement de Poiseuille  
L'écoulement peut parfois être turbulent (artère aorte, branchements, rugosité ... ).

Le sang est un fluide quasi-Newtonien représenté par une viscosité unique :  $3-4 \cdot 10^{-3}$  Pas

# **Impératifs fonctionnels des biomatériaux :** **(autres)**

## **Génération de stimuli électriques**

**Le contrôle de nombreuses fonctions (activité musculaire) est assuré par une activité électrique à travers le système nerveux.**

But des implants : engendrer des pulses électriques sur des sites choisis (pacemakers).  
traduire une activité sensorielle en signal électrique.

**Transmission de la lumière**

**Transmission du son**

**Transport de médicaments**

# La sélection des biomatériaux en relation avec leur biofonctionnalité

**Il n'existe pas un biomatériau 'universel', ni même un groupe de matériaux pour application biomédicales**

On retrouve les trois grandes classes de matériaux :

- Les **métaux et alliages métalliques**,
- Les **céramiques**,
- Les **polymères**.

Des **composites**, ou plutôt **association** de plusieurs biomatériaux.

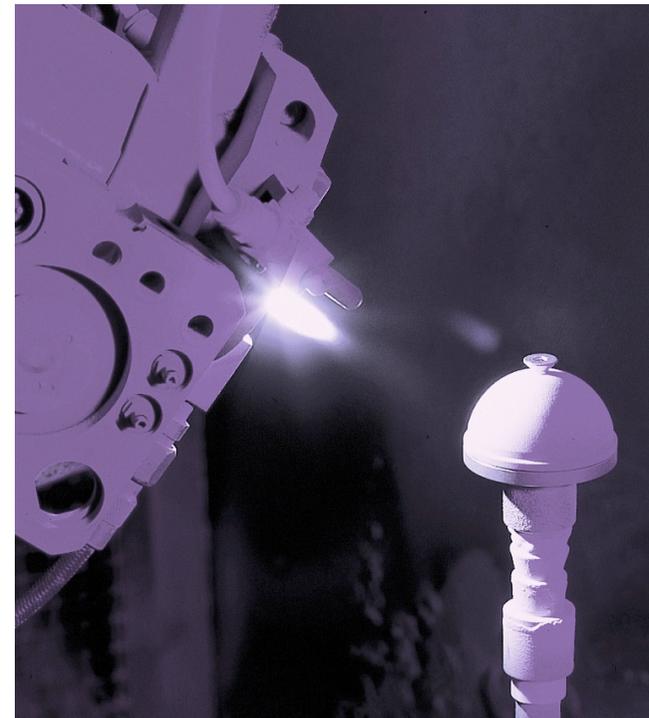
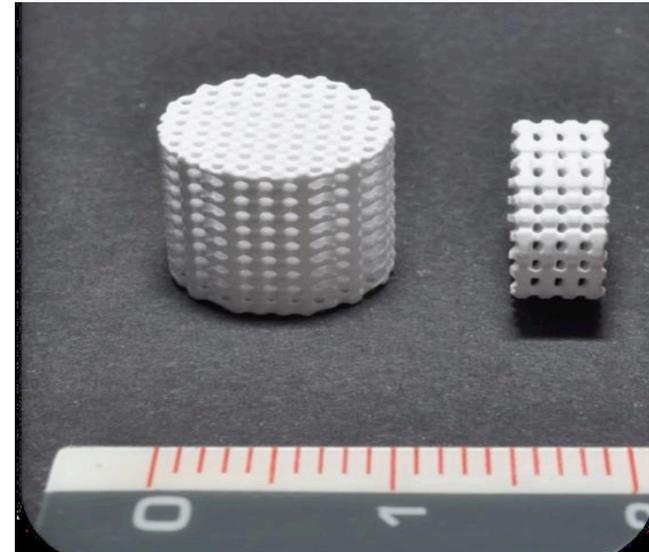
## **Quatre impératifs fondamentaux et incontournables :**

- **résistance à la stérilisation** (vapeur d'eau, gamma, oxyde d'éthylène),
- **résistance à l'irradiation** (gamma, voire RX),
- **contrôle des interactions biologiques**
- **non dégradables par les médicaments (ou dégradation contrôlée)**.



# *'Matériaux' : choix et éventail des propriétés*

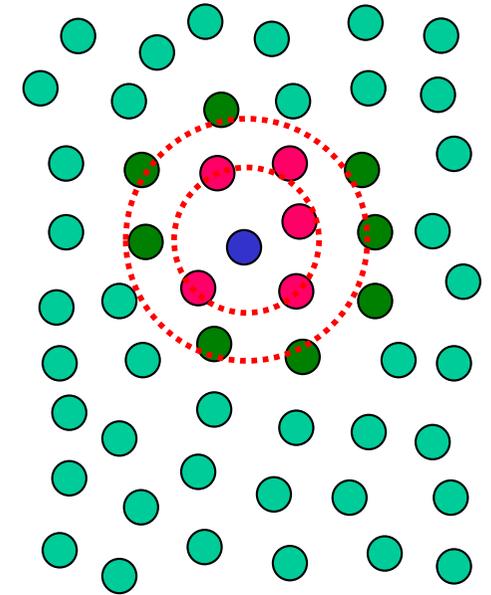
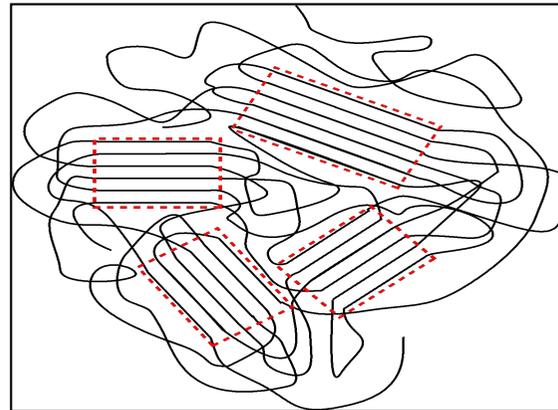
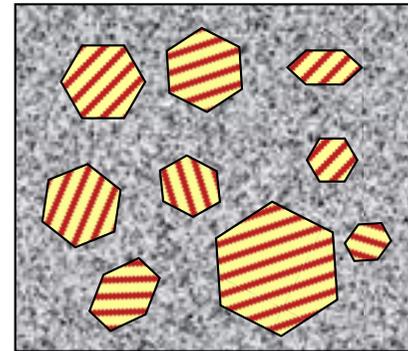
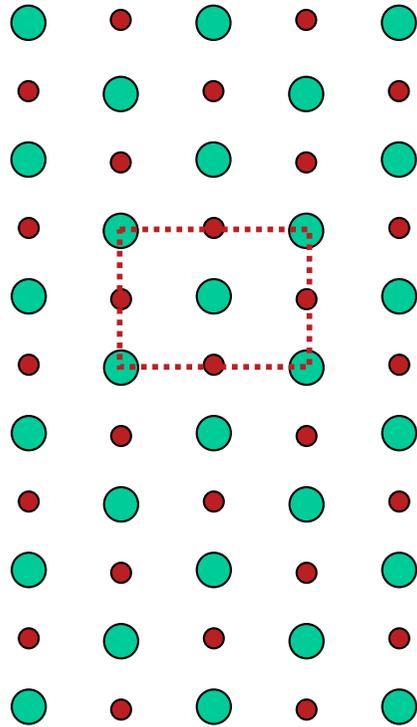
*Etats de la matière : pâtes, gels, solides, granules, revêtements*



# 'Matériaux' : choix et éventail des propriétés

Etats de la matière : matériaux amorphes, cristallins

## Ordre et désordre



### Cristal:

Répétition en 3D d'un motif unique.

Céramiques, métaux

### Semi-cristallins:

cristaux (ou lamelles cristallines) dans une matrice amorphe: vitrocéramiques, polymères semi-cristallins...

### Amorphe:

Organisation à courte distance, mais pas d'ordre à longue distance.

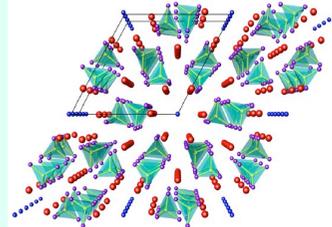
Verres

# Relations 'microstructure'-propriétés : Des Hydroxyapatites

Composé stœchiométrique de référence (haute cristallinité) :

Hydroxyapatite (HA)  
 $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$

≅ *émail dentaire*

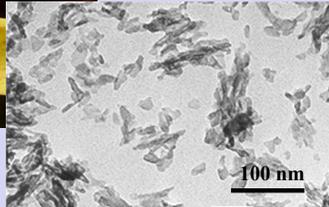
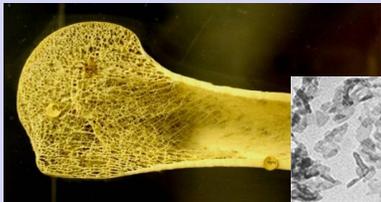


Faible solubilité, haute stabilité thermique, tenue mécanique (frittée en général > 1250°C)...



Substituts osseux  
ostéoconducteurs (et  
non/peu résorbables)

Souvent associée au b-TCP ou carbonatée (CHA), plus résorbables in vivo)



Os : tissu minéralisé (nanocomposite minéral/organique)

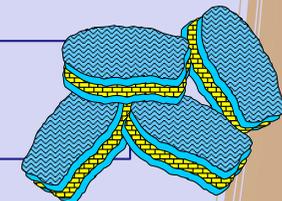


Minéral osseux ~ 70%<sub>mass.</sub> :  
≠ HA !



= *apatite sous-stœchiométrique, nanocristalline, recouverte d'une couche ionique hydratée amorphe hautement réactive*

Synthèse possible d'analogues au minéral osseux : « apatites biomimétiques » en conditions proches des conditions physiologiques



Solubilité modulable, métastabilité in vivo et forte réactivité

Forte capacité d'échanges ioniques et d'adsorption de (bio)molécules / principes actifs

# La sélection des biomatériaux : les métaux et alliages métalliques

*Facilité de mise en forme, prop. mécaniques, faible coût*

**Les métaux sont les ancêtres des biomatériaux, ce sont les premiers à avoir été implantés.**

Le fer manque de résistance à la corrosion,  
Le plomb est très toxique,  
Le cuivre : toxique, pas de bonnes prop. méca.  
Le zinc inhibe la repousse osseuse,  
Le platine et l'or : pas de bonnes prop. méca.



**Seul le titane pur est encore utilisé (GB), le titane adhère très bien à l'os et possède d'excellentes propriétés mécaniques.**

L'or pour certains implants dentaires.

**Trois grandes catégories d'alliages**

- les aciers inoxydables (+ gros tonnage),
- les alliages base cobalt (Cr-Co),
- les alliages base titane.

Meilleure tenue à la corrosion  
Propriétés mécaniques  
(contrainte à rupture > 500 MPa)



Les alliages métalliques sont principalement utilisés en orthopédie  
*Utilisation d'alliages à mémoire de forme (TiNi)  
dentaire - cardiovasculaire- ostéosynthèse*

*Corrosion quoi qu'il en soit, propriétés en frottement médiocres*

# La sélection des biomatériaux : les céramiques

*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)*

# La sélection des biomatériaux : les polymères

*Grande variété, légèreté, élasticité (accommodation des contraintes), amortissement*

**L'utilisation des polymères dans le domaine des biomatériaux est très vaste.  
On retrouve les polymères dans tous les grands champs d'action des biomatériaux.**

**Orthopédie** : UHMWPE (polyéthylène haute densité) et 'ciments' PMMA,

**Chirurgie cardiovasculaire** : polyesters (prothèses cardiovasculaires, valves),

**Chirurgie dentaire** : ciments PMMA, nouveaux 'amalgammes'.

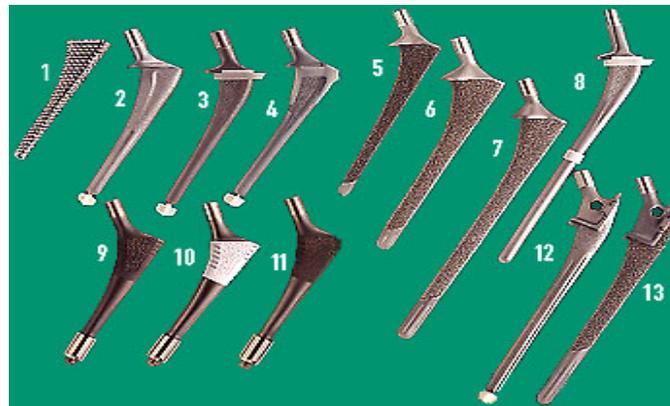
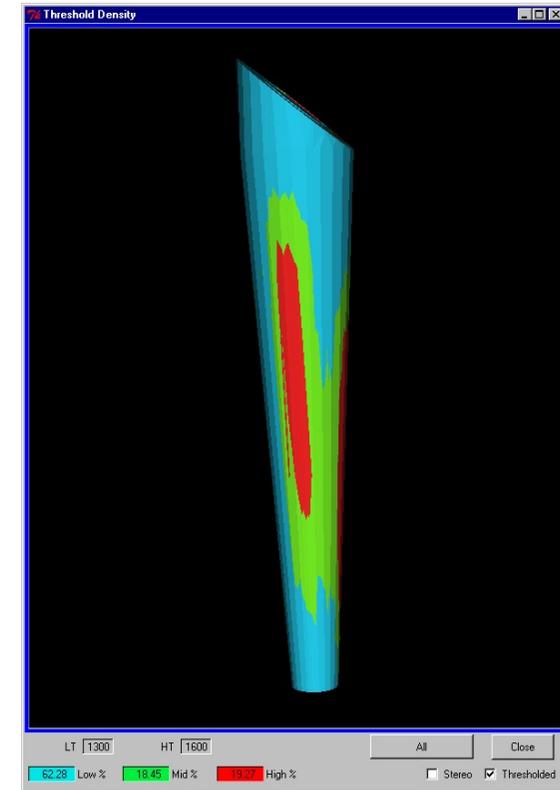
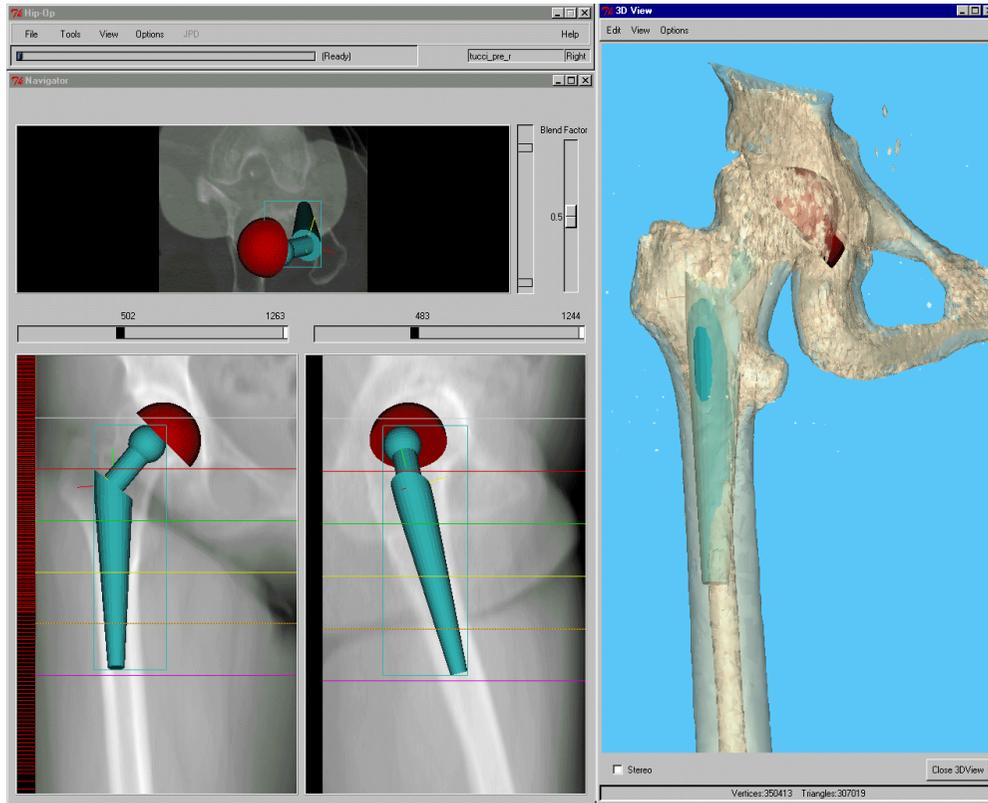
**Ophthalmologie** : lentilles de contact.

*Sensibilité au fluage, à l'hydrolyse, dégradation en frottement  
instabilité aux rayonnements (gamma)  
réactivité à certains médicaments*

# Une approche souvent empirique voire ' chaotique '



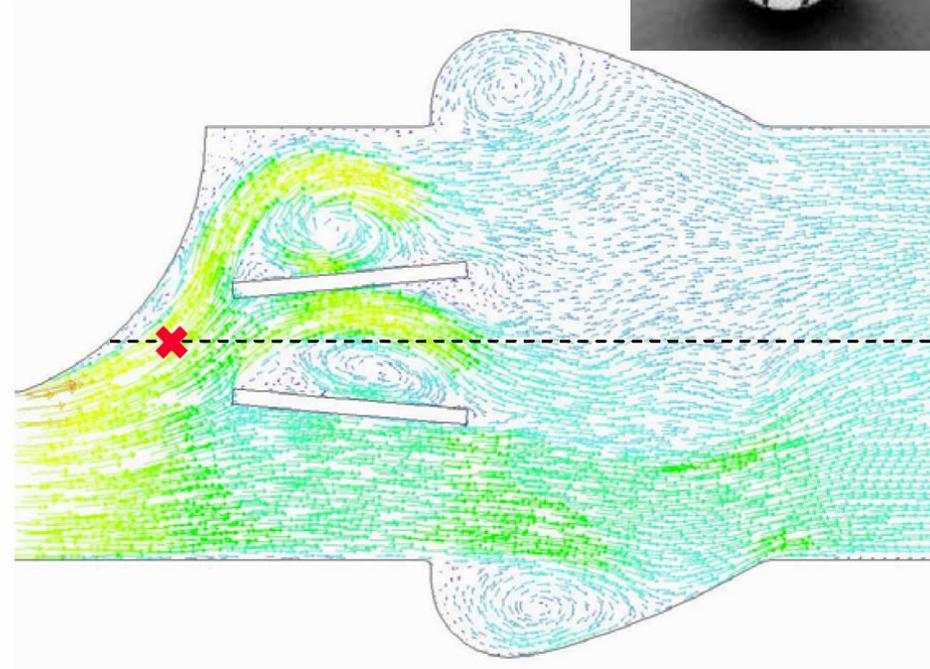
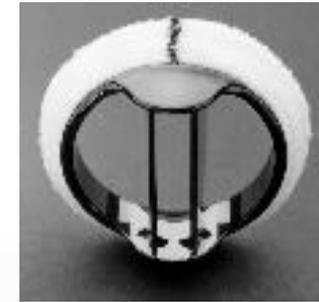
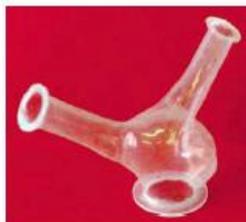
# Vers une certaine rationalisation...



# Apport de la simulation / personnalisation



Source : Deplano et al. Atelier biomécanique CNRS  
Pompe mécanique simulant le cœur gauche



Source : Deplano et al. Atelier biomécanique CNRS  
Modélisation d'un implant cardiovasculaire, présence d'une sténose

# Biocompatibilité

**l'interaction 'inévitable' et de plus en plus recherchée  
entre le matériau et les tissus**

**L'environnement organique vivant est très agressif : NaCl 0.1 M, 37°C, pH : 5,5 - 7,4  
Contient des acides organiques, des protéines, des macromolécules ...  
Excellent électrolyte**

**Extrêmement bien équipé pour se défendre contre toute intrusion (bactéries)  
Système immunitaire**



**Tous les matériaux subissent une dégradation  
ou tout au moins une action des tissus**



**La défense se traduit généralement  
par une inflammation des tissus**

**La durée du contact (>10 ans) peut constituer un stimulus permanent à l'inflammation  
(douleurs chroniques)**

**La réponse des tissus contrôle la durée de vie des implants**

# Biocompatibilité

## La biodégradation des matériaux

Le fluide physiologique représente une solution saline, excellent électrolyte qui facilite les mécanismes de corrosion et d'hydrolyse

Le fluide physiologique représente un grand nombre d'espèces moléculaires et cellulaires capables d'accélérer certaines réaction ou de dégrader les matériaux



Processus passifs, proches des problèmes de biofonctionnalité, relativement aisés à prédire par des tests *in-vitro* (corrosion, hydrolyse).

Processus actifs, plus complexes, faisant intervenir des mécanismes immunitaires difficilement prédictible par des tests *in-vitro* (action des macrophages).

# La biodégradation des matériaux

## La corrosion des métaux et alliages

Processus analogues à ceux rencontrés *in-vitro*  Très bien expliqués

Utilisation de métaux nobles (or, argent) ou présentant un phénomène de passivation

 Acier inoxydable, titane, alliages base cobalt, alliages base titane

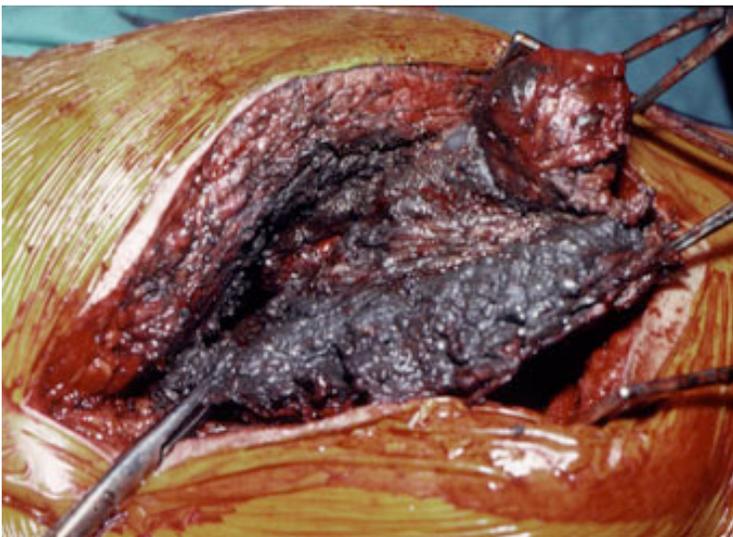
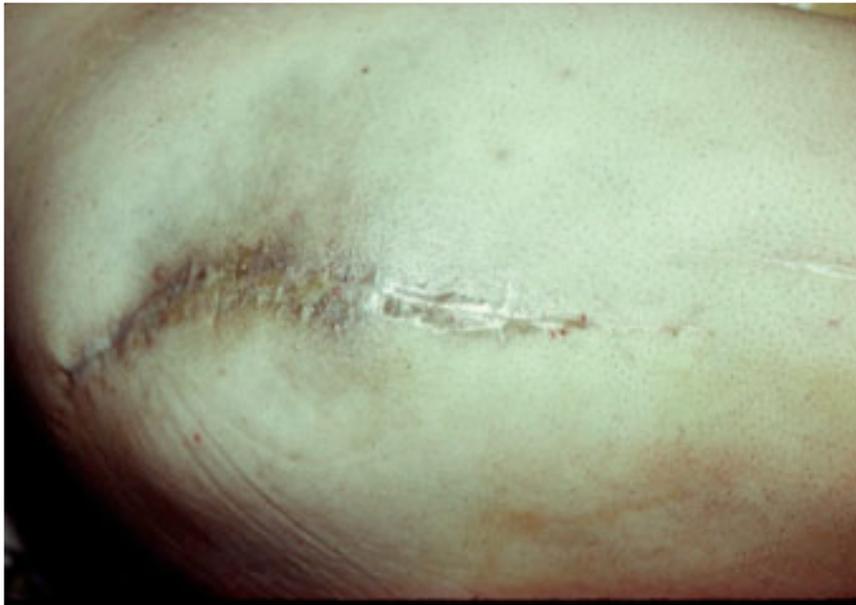
**Il y a toujours relargage d'ions métalliques dans le corps humain**

-  Quelle quantité d'ions est rejetée dans l'organisme ?
-  Quelle est la proportion de métal excrétée (principalement dans les urines) ou accumulée ?
-  Où les ions s'accumulent-ils ?
-  Quelle peut être l'effet induit par cette réjection (effet carcinogène, poison) ?

*Rôle des protéines et cellules dans le processus de corrosion ?? (tests in-vitro dans sérum physiologique)*

# Biocompatibilité

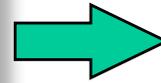
ex. de la métallose (relargage d'ions métalliques)



# La biodégradation des matériaux

## L'hydrolyse des polymères

Les polymères sont capables d'absorber une grande quantité d'eau (jusqu'à 90%)



Diffusion des espèces H<sub>2</sub>O  
Hydrolyse

☞ Absorption et hydrolyse très rapides : polymères aliphatiques



sutures, délivrance médicaments

☞ Peu d'absorption, hydrolyse : polyesters aromatiques, polyamides



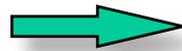
dégradation lente par la surface

☞ Absorption, pas d'hydrolyse : silicones



gonflement, fissuration

☞ Peu d'absorption, pas d'hydrolyse : PTFE



Subsistent très longtemps dans l'organisme

# L'interaction des biomatériaux avec les tissus

## Les premiers instants du contact –rôle des protéines

La première interface est inévitablement une interface sang - biomatériau

Adsorption des protéines du sang sur les biomatériaux

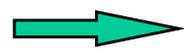
(important dans le cas des polymères)

Adsorption : liaisons secondaires (hydrogène)

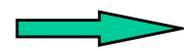
### Forces motrices de l'adsorption :

- ☛ caractéristiques polaires des protéines,
- ☛ caractère partiellement soluble des protéines

Protéines : quantité et affinité variable



Compétition in-vivo, multicouche



Médiateurs chimiques : séquences cellulaires

- Implication très importante sur certains résultats à long terme (prothèses de hanche)
- Importance de la surface des matériaux
- Recherche actuelle sur la fonctionnalisation des surfaces

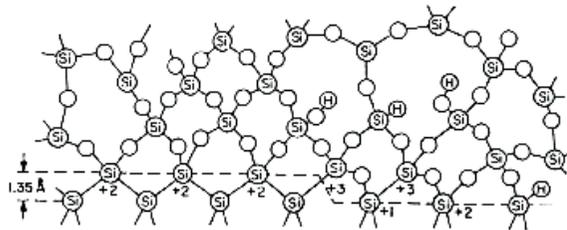
Constituant	Compo.
Protéines (tot.)	20 g/l
Albumine	12 g/l
Globuline	8 g/l
Fibronectine	<1g/l
Fibrinogène	inconnu
Sodium	3,3 g/l
Potassium	0,16 g/l
Calcium	0,06 g/l

*Composition du liquide synovial humain  
(lubrification de la hanche)*

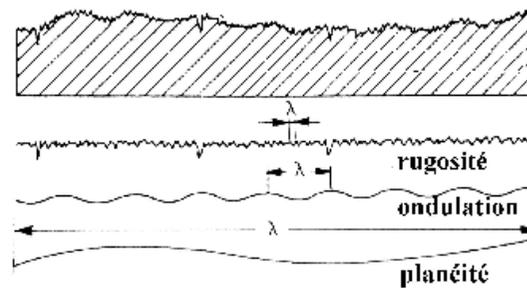
# L'interaction des biomatériaux avec les tissus

## Interactions matériau cellules – importance de la surface

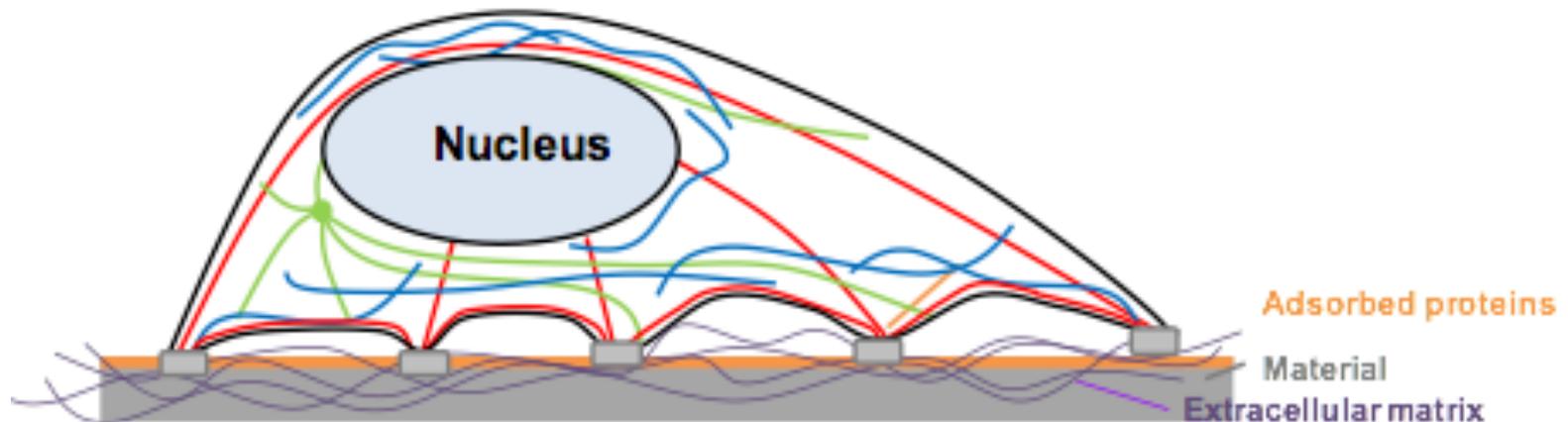
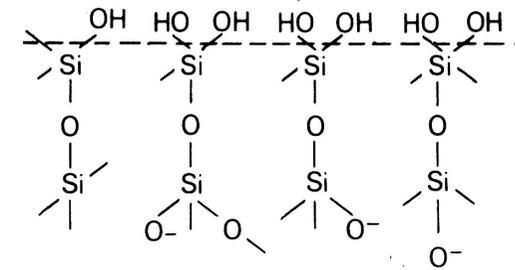
*Structure et composition:  
reconstruction de surface*

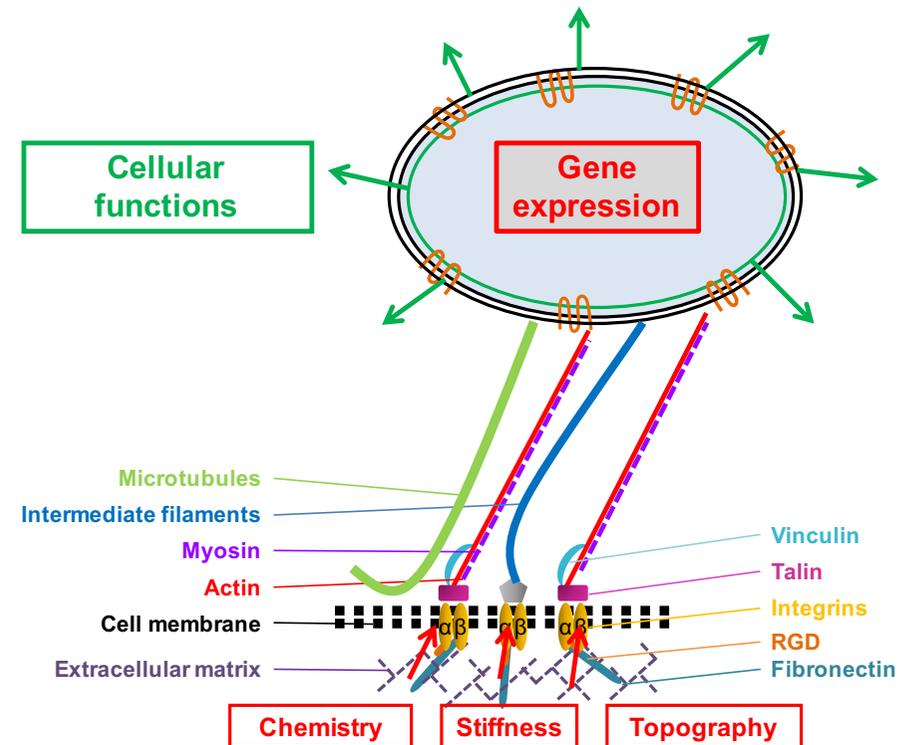
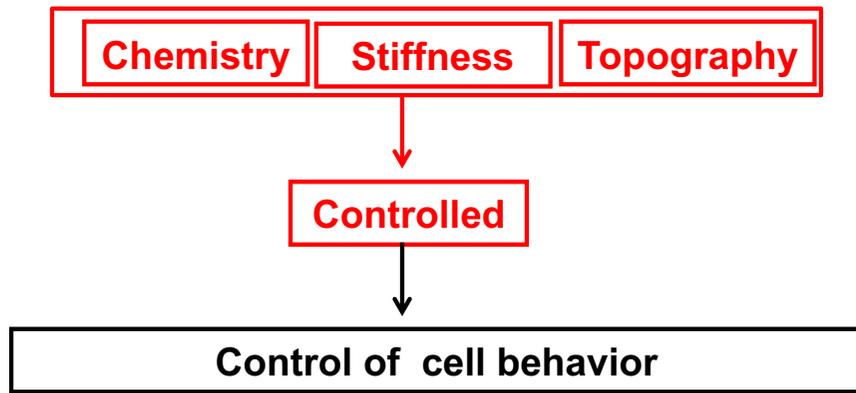
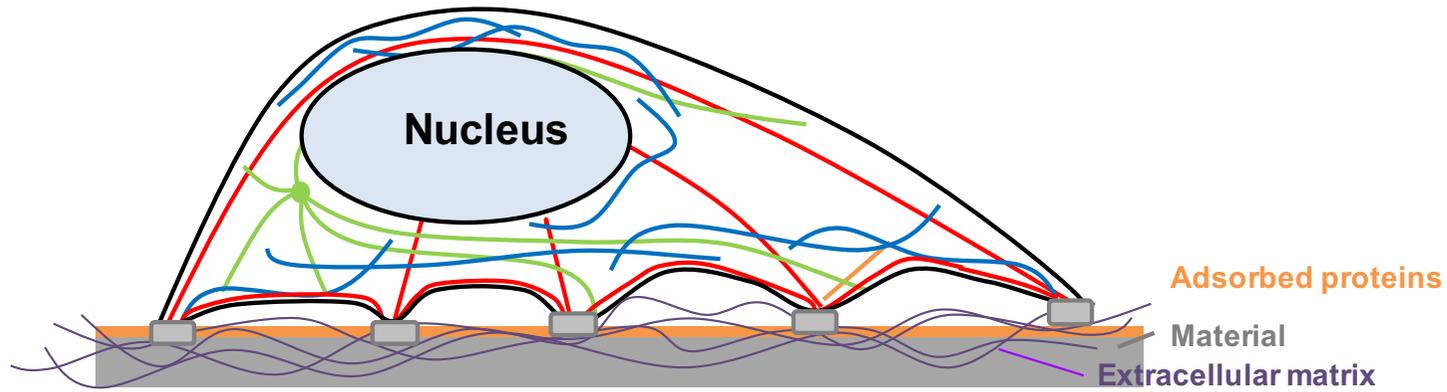


*Morphologie de surface*



*fonctions chimiques  
superficielles*





# Une multitude d'options et de stratégies pour guider le comportement cellulaire

