Les dents humaines, des matériaux sophistiqués

É. F. BRÈS
Unité des Matériaux et Transformations UMR CNRS 8207
Faculté des Sciences et Technologies
Université de Lille
France

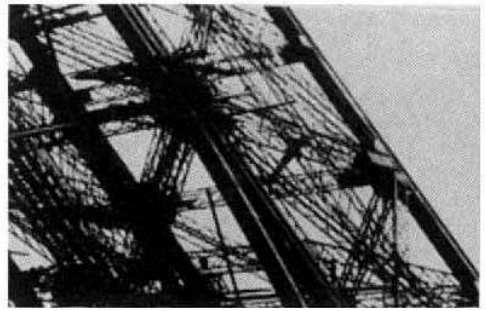
Les dents humaines

- *Les dents humaines sont des matériaux sophistiqués aux propriétés mécaniques et chimiques essentielles au maintient de leur function biologique sur le long terme.*

La machoire humaine

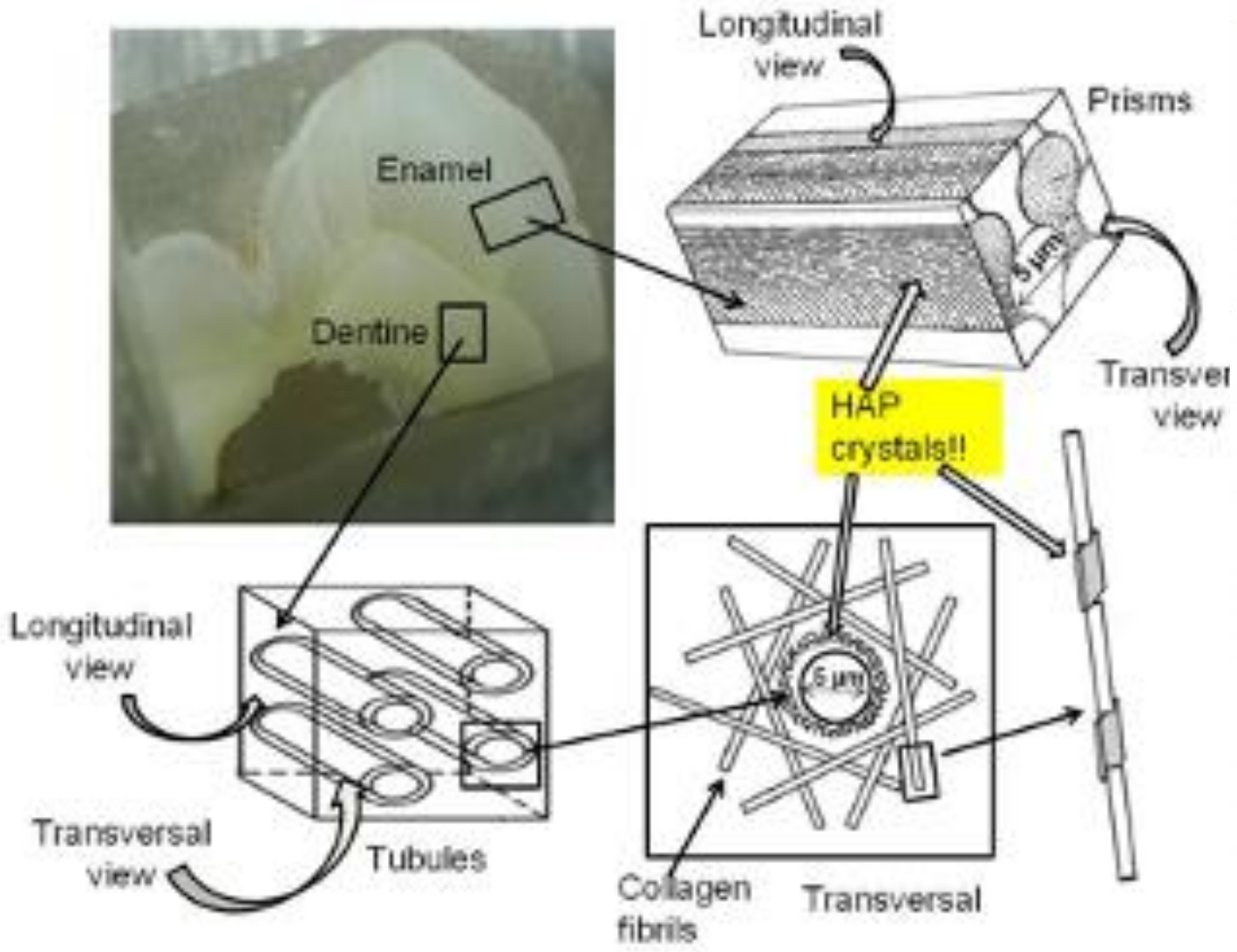
- ***La machoire humaine et ses sous-constituents*** *(l'os alvéolaire, la mandibule, les dents, le ligament parodontal)* ***jouent une role pour la mastication*** *(digestion mécanique)* ***et pour la parole.***
- *Comme pour tous les os, les os de la machoire possèdent une* ***structure hiérarchique*** *avec des structures différentes à chaques échelles de l'espace.*
- ***Les interactions entre les différents sous-éléments confèrent au tissue global des propriétés essentielles pour le maintient des function au long terme de la machoire.*** *Parmis ces propriétés, les propriétés mécaniques (mastication) et chimiques (croissance des tissus, résistance à la carie dentaire).*

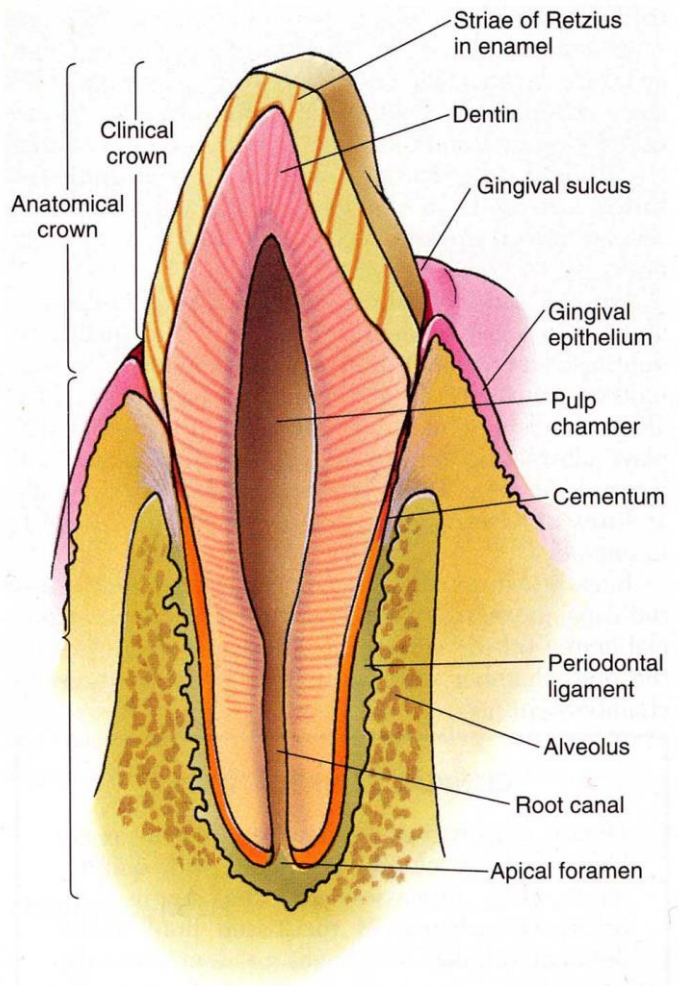
Une structure architecturale
Différentes structures aux différentes échelles de l'espace



Lakes. Materials with structural hierarchy. Nature, 1993, 361, 511-515.
Loyrette, H. Gustave Eiffel (Rizoli, New York, 1985).

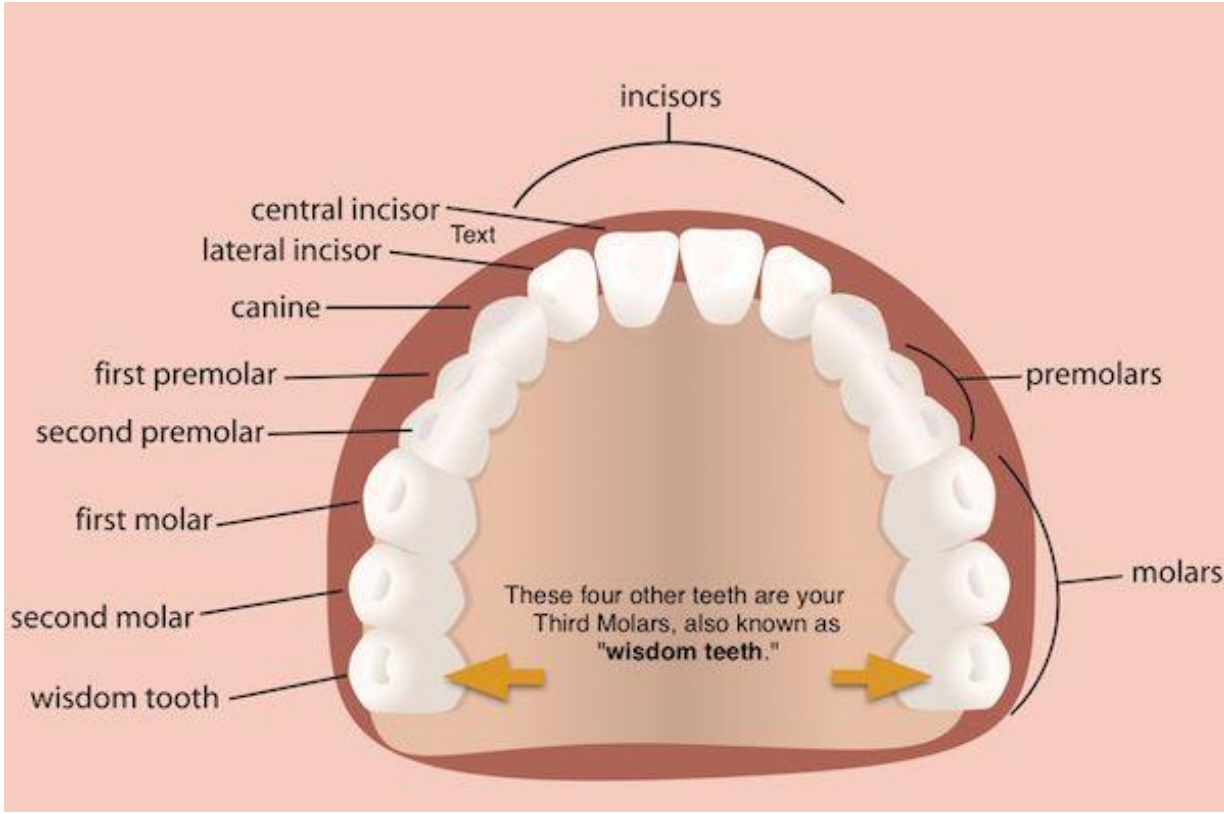
La structure hiérarchique des dents





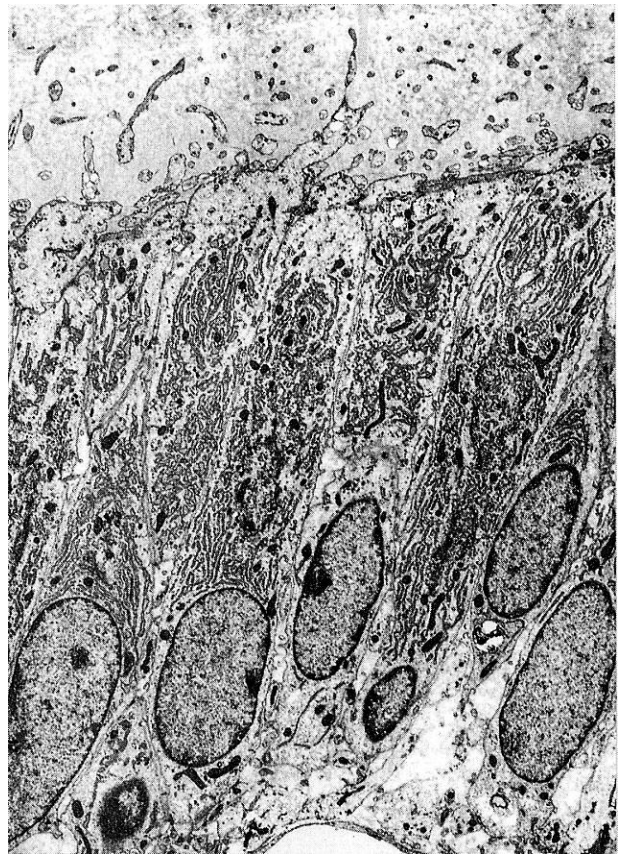
Les dents à l'échelle macroscopique

- Des formes différentes pour des fonctions différentes
  - Les molaires et les prémolaires broient la nourriture
  - Les canines et les incisives déchirent et coupent la nourriture



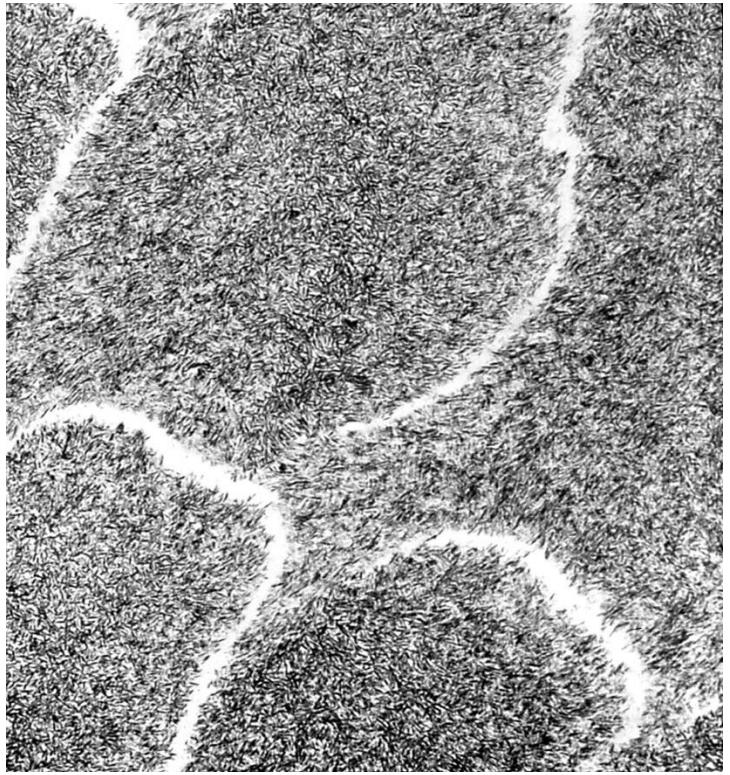
Lémail dentaire à l’échelle microscopique

- Les odontoblastes

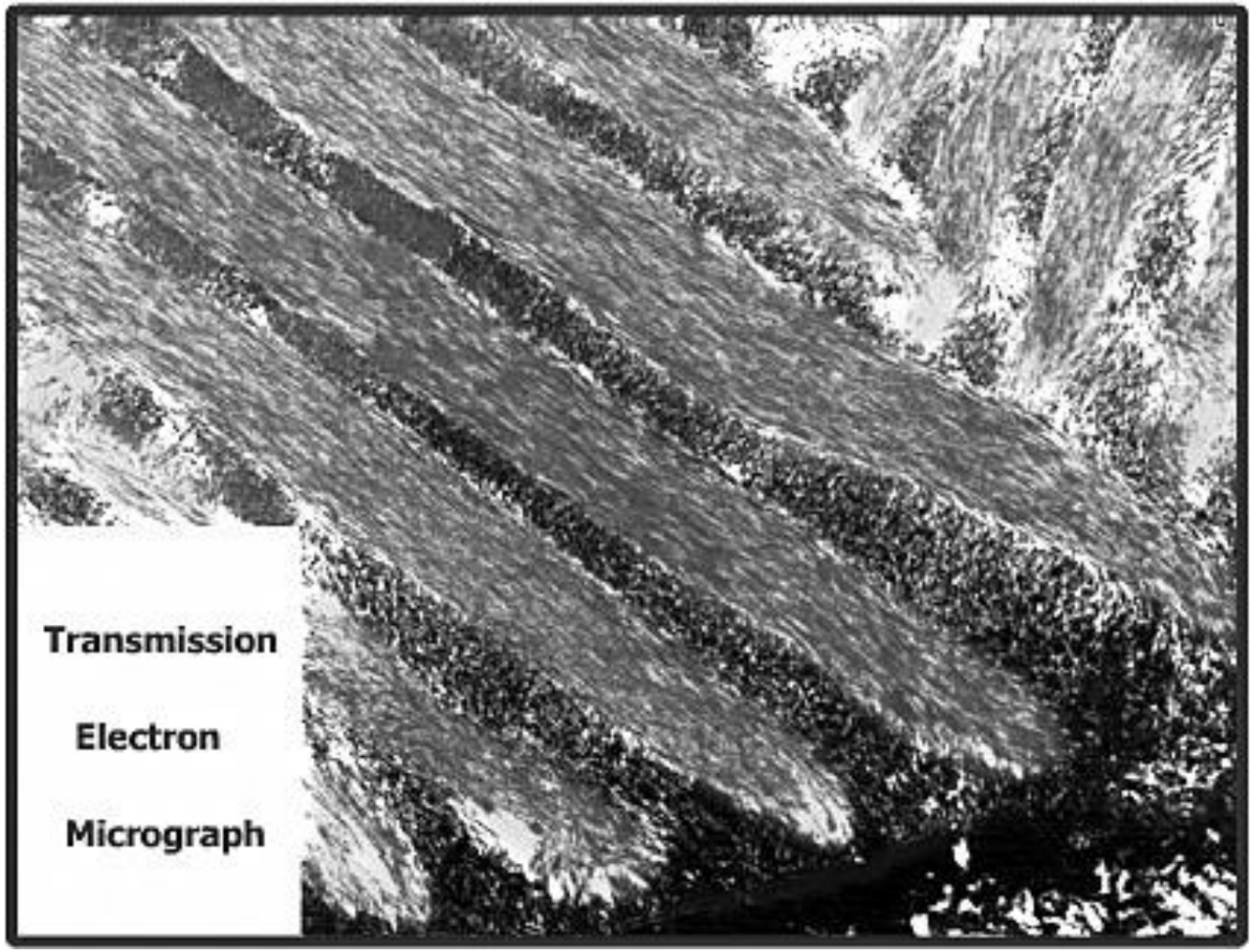


L’émail dentaire à l’échelle microscopique

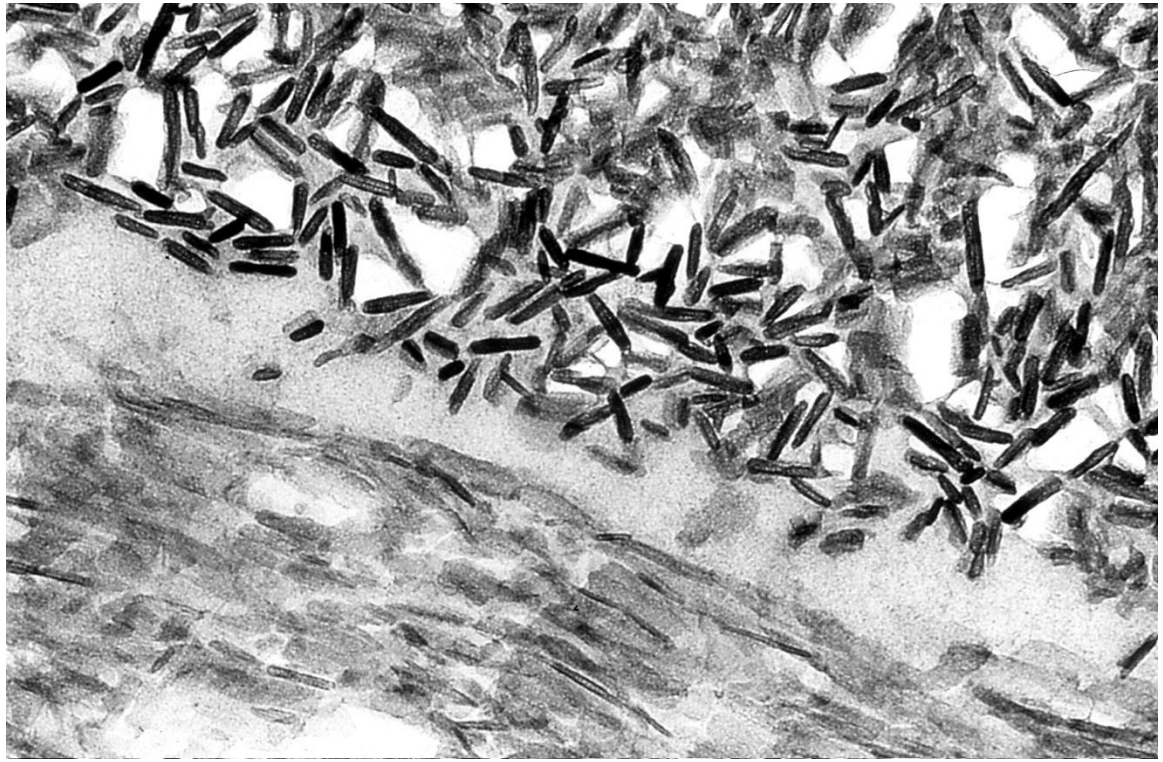
Les prismes



L’émail dentaire à l’échelle microscopique



L’émail dentaire à l’échelle nanoscopique



Les cristaux de l'émail dentaire

La chimie

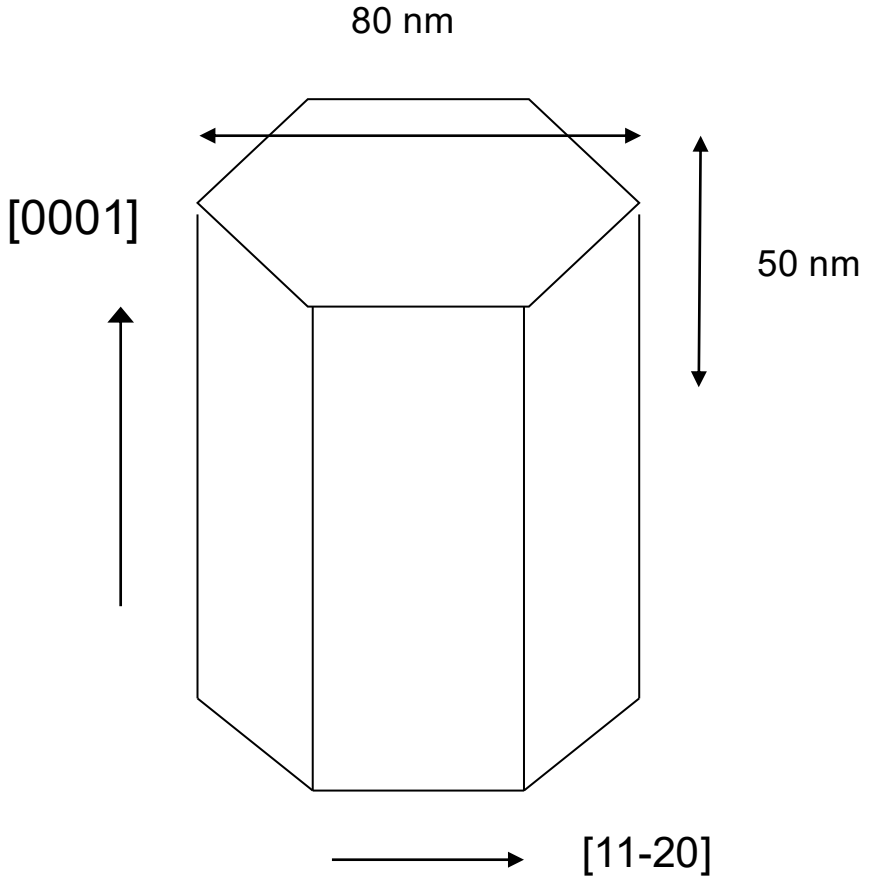
hydroxyapatite "Pure" (OHAP):
$Ca(1)_4Ca(2)_6(PO_4)_6(OH)_2$,

$Ca/P = 1.67$, $P6_3$, $a \sim 9.432$ Å, $c \sim 6.881$ Å

Des propriétés chimiques différentes sont obtenues par différentes substitutions ou des modifications de structure :

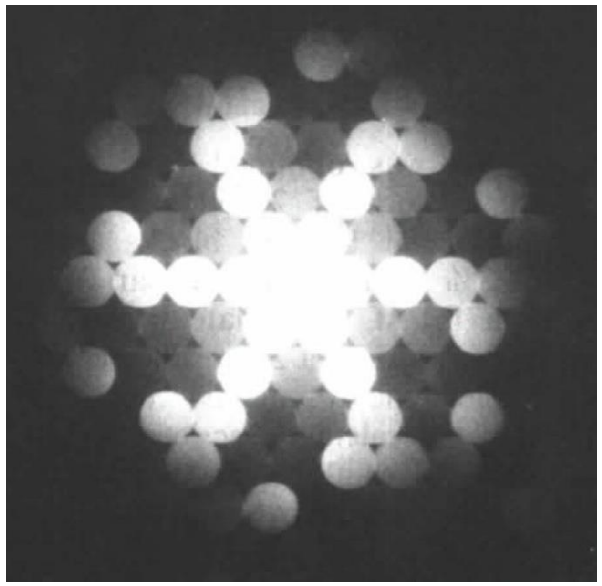
- substitution CO_3^{2-} :
  - site A : replacement des OH^-;
  - Site B : replacement des PO_4^{3-};
- Faible rapport Ca/P ;
- Presence d'eau…

Morphologie



Morphologie en prismes hexagonaux allongés

Détermination du groupe spatial des cristaux d'émail dentaire humains par CBED



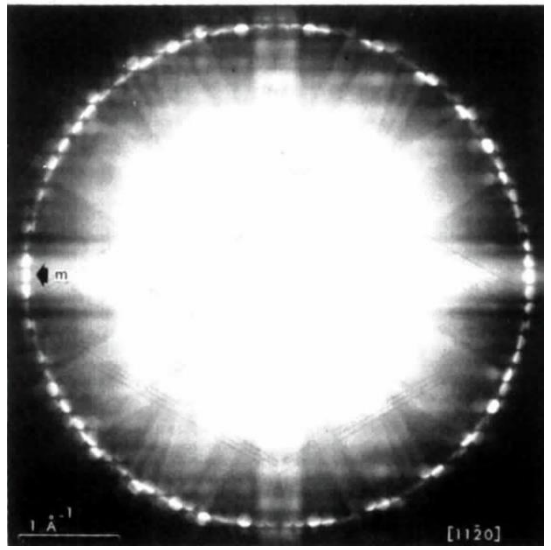
Symétrie d'ordre 6

→ P6

P6/m

$P6_3/m$ →

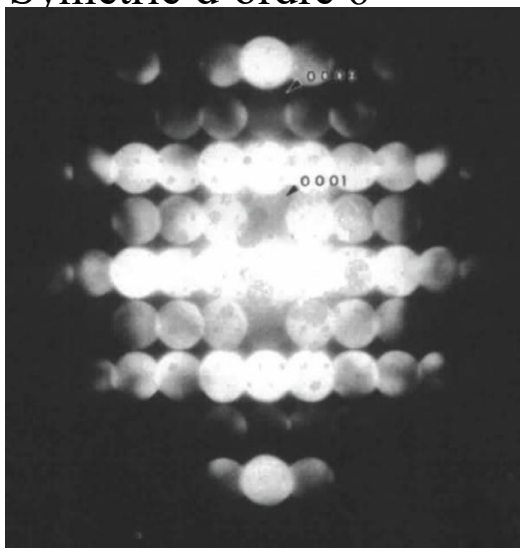
$P6_3$



Perte de la symétrie m

→ P6

$P6_3$

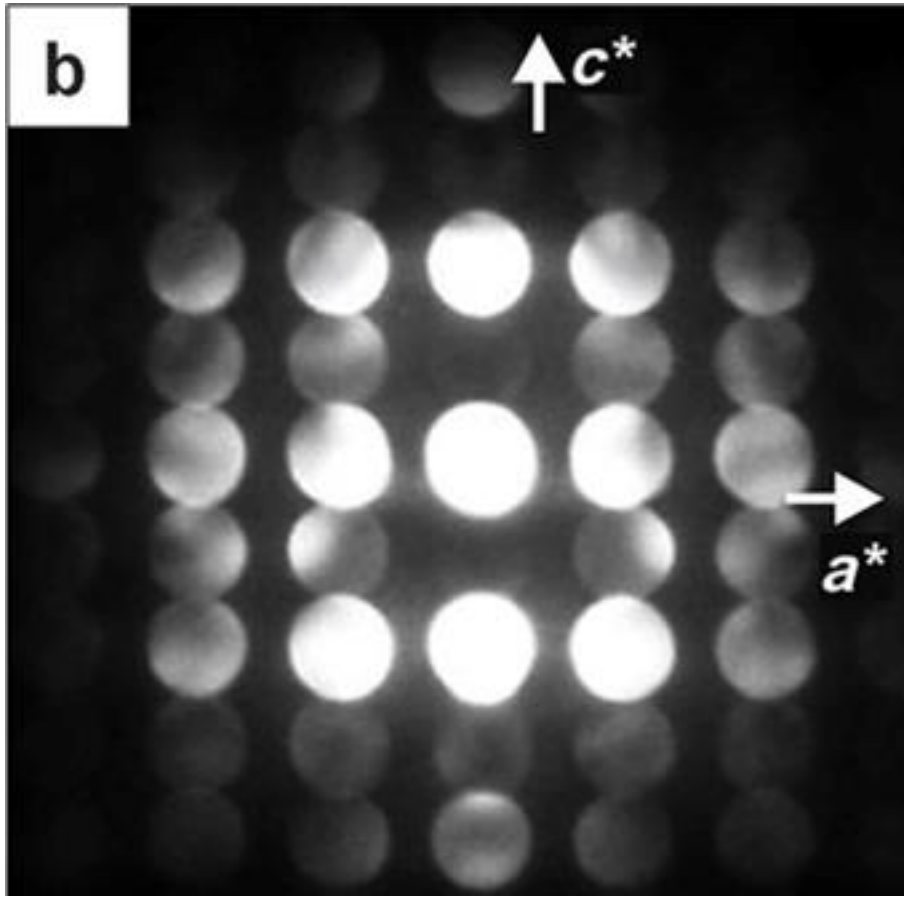


Extinction des réflexions 000l (l impaires)

→ Groupe spatial $P6_3$

Brès *et al.* Space group determination of human tooth enamel crystals, *Acta Crystallographica B,* 49, 56-62, 1993

Déviation du groupe spatial des cristaux d'émail dentaire humain perte du miroir



Le diffractogramme CBED montre une perte du miroir perpendiculaire à l'axe c des cristaux

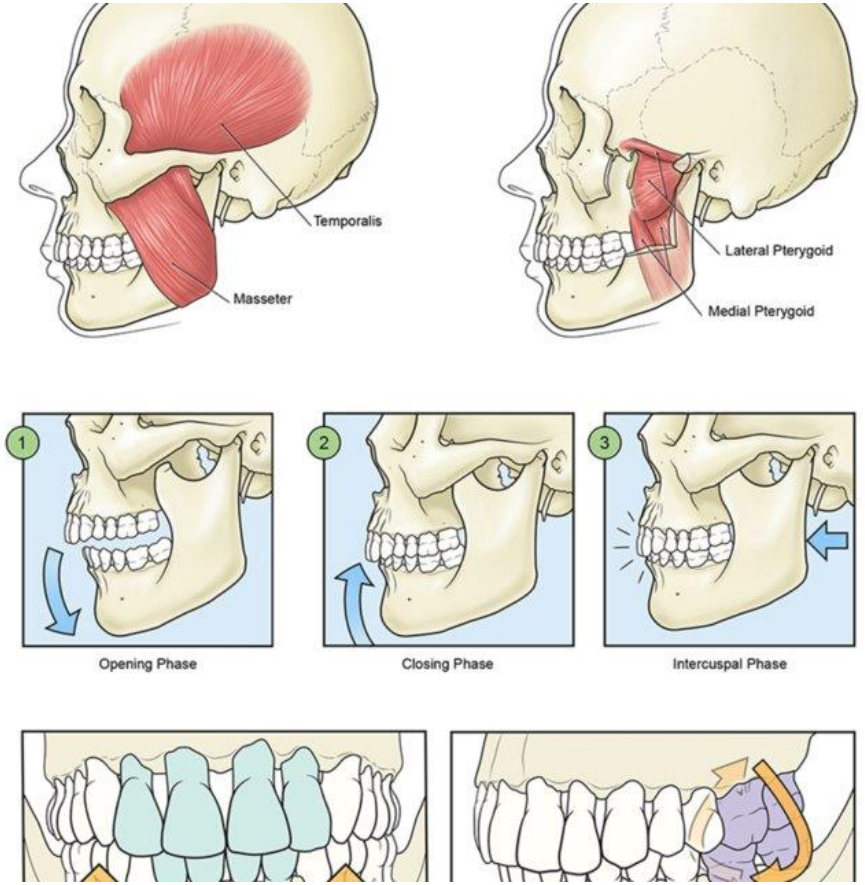
➔ Perte de la centrosymétrie

➔ $P6_3/m \rightarrow P6_3$

Le maintien des propriétés dans le long terme

- Malgré le fait qu'elles sont utilisées dans de mauvaises conditions: charges mécaniques, mouvements abrasifs, chocs thermiques attaques acides, les dents maintiennent leurs propriétés sur le long terme.
- Propriétés mécaniques
  - Résistance à la fracture
  - Résistance à l'érosion
- Propriétés chimiques
  - Résistance à la carie

Les dents servent à la mastication (digestion mécaniques)

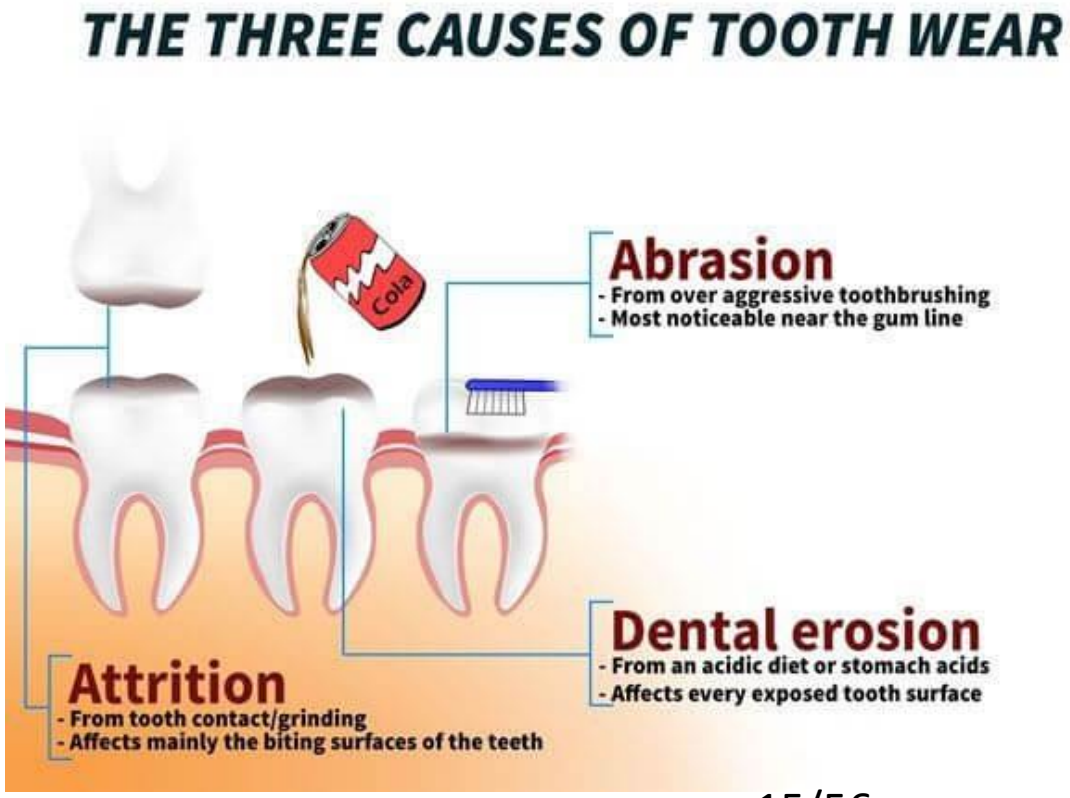


Les dents s’usent

L’émail sain perd seulement 10-40µm par an
(Rekov et al. Second joint american eastern european conference on new materials and triblogy, Gomely, Belarus, 1997).

Alors que les matériaux de restauration perdenet 8-9µm par mois !
(Söderholm et al. Eur. J. Oral. Sci., 109 (2001) 273-281).

Dans le long terme les dents s’usent à cause de la mastication



L'émail dentaire résiste à l'abrasion

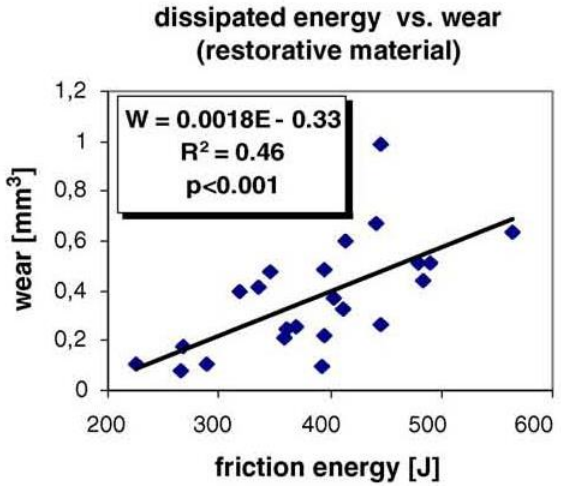


Fig. 5. Sliding wear of enamel and Valux Plus restorative dental material as a function of the dissipated friction energy.

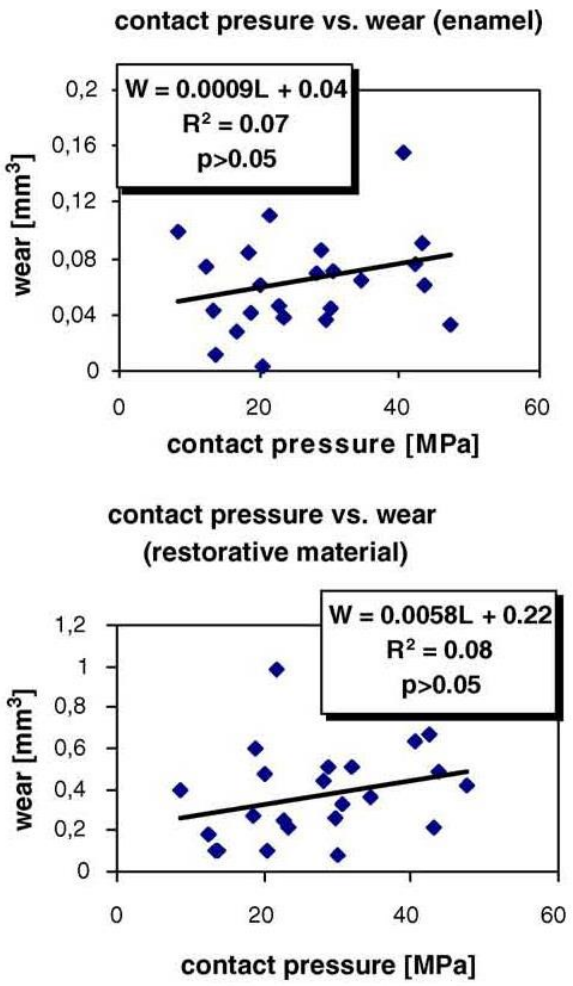


Fig. 6. Sliding wear of enamel and Valux Plus restorative dental material as a function of contact pressure.

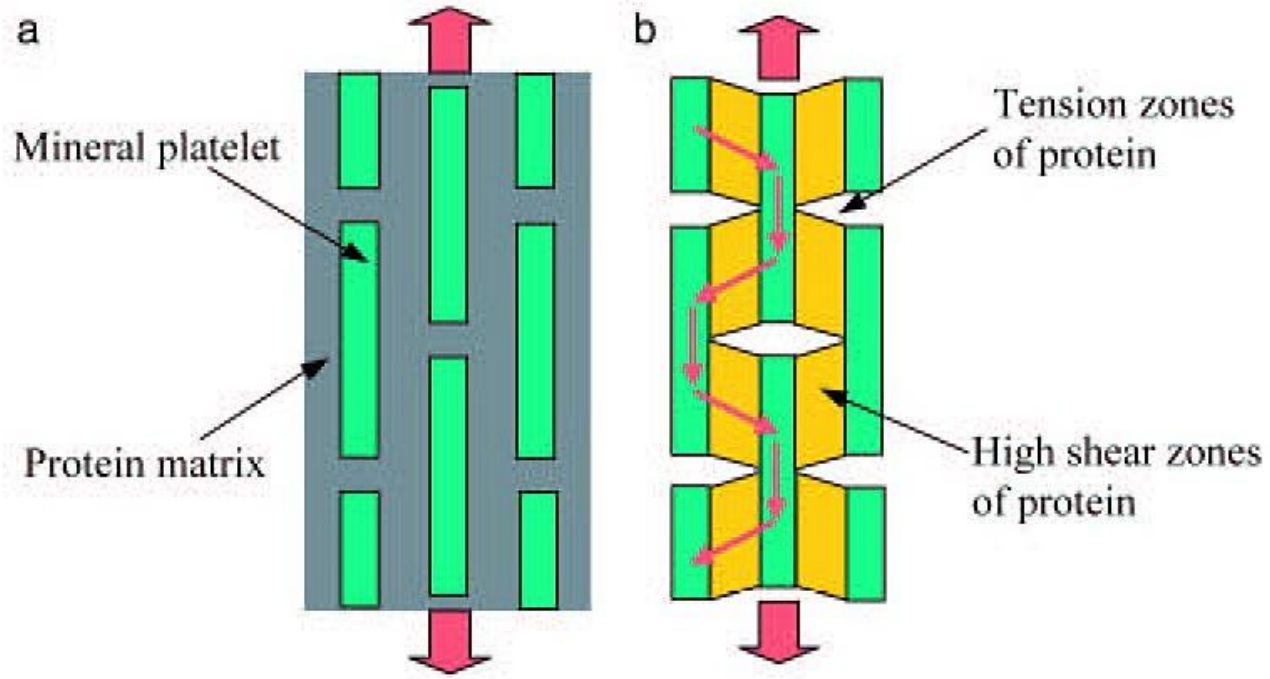
Sajewicz, Wear, 206,2006, 1256, 1261.

Les dents résistent aux charges mécaniques grâce à leurs structures hiérarchiques

- Des charges énormes sont produites lors de la mastication : jusqu'à 1kN chez les humains(Lawn et al. Ann. Rev. Mater. Res. 2010, 40, 55)
  - Absorbées par la couche externe « dure et resistante à l'abrasion l'émail dentaire
  - Transmises au corps de la dent (principalement de la dentine)
  - Transmises à l'os (mandibule et os alvéolaire)
- Plusieurs interfaces
  - La jonction dentine-émail arrête les fissures
  - Jonction dentine-pulpte
  - Le ligament parondontal redistibue les charges (tension et compression)

Park S, Quinn JB, Romberg E, Arola D. On the brittleness of enamel and selected dental materials. Dent Mater 2008;24:1477–85.
An B, Wang R, Arola D, Zhang D. The role of property gradients on the mechanical behavior of human enamel. J Mech Behav Biomed Mater 2012;9:63–72.

Mecanisme du transfert de charges à l'échelle nanoscopique



(*a*) Minéral cristallin inclus dans une matrice protéique.
(*b*) Modèle simplifié montrant la structure minéral –organique qui permet de porter des charges. La plus grande partie des charges est portée par la partie minérale alors que la partie organique transfère les charges.

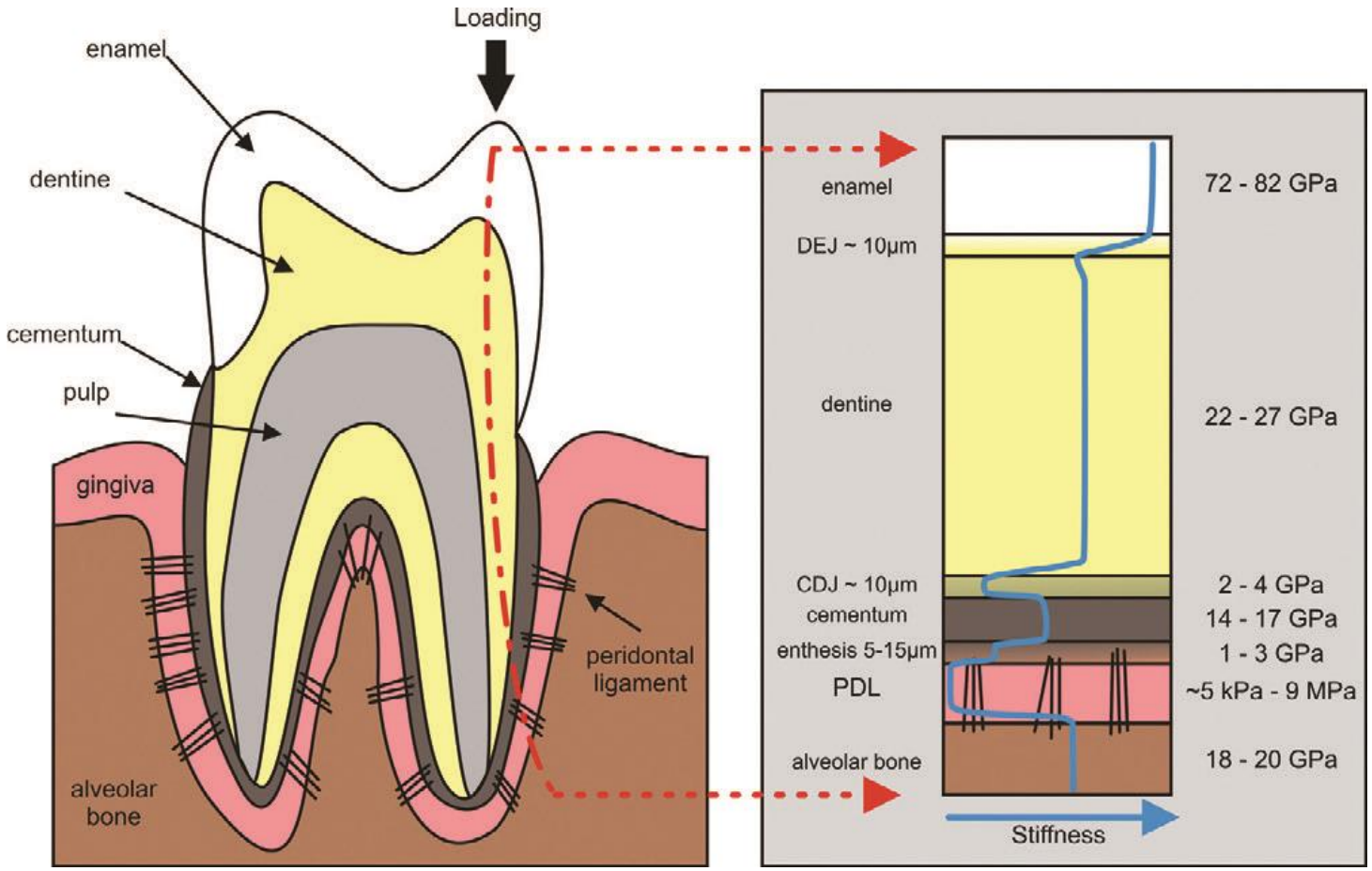
Gao et al. 2003;www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0631609100

Comment ça marche
Déformablité à travers des interfaces molles

- Les matériaux biologiques sont composés de renforcements rigides (minéraux) inclus dans une matrice molle déformable (protéines).
- Lors de la déformation, les renforcements portent les charges et apportent de la rigidité au tissu.
- Les matériaux rigides sont souvent friables, le renforcement doit être protégé contre les déformations importants ce qui est le rôle des couches molles.
- **Le résultat est un matériau rigide qui peut subir des déformations importantes.**

Dunlop et al. https://doi.org/10.1016/S1369-7021(11)70056-6

Effet d'une charge sur une dent



Variation de rigidité à travers plusieurs tissus dentaires (pas à l'échelle)

Rigidité =
Résistance à une force qui provoque une déformation

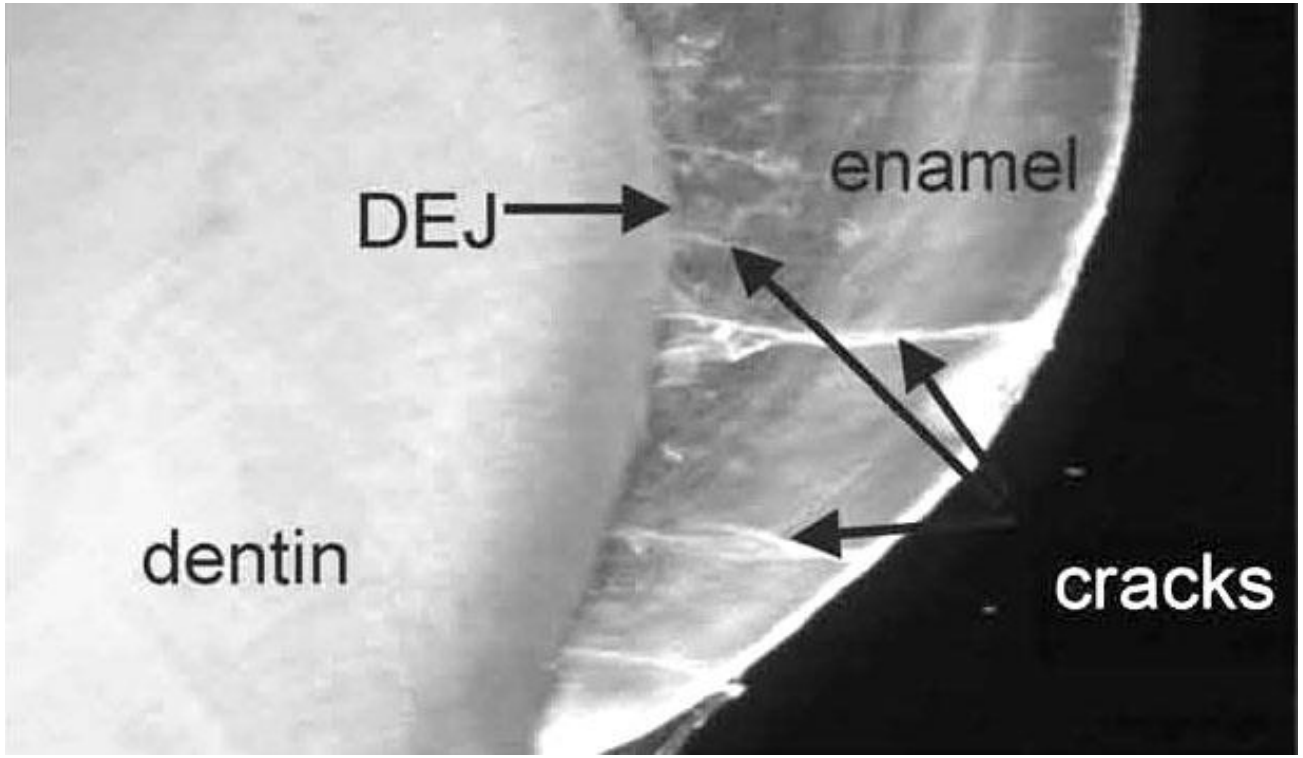
Mesurée par la pente de la courbe contrainte/déformation

Le rôle de la dentine

- Le faible module d'élasticité et la faible dureté de la dentine permet de réduire les contraintes sur les dents.
- Les fissures initiées au niveau de l'émail sont stoppées au niveau de la dentine, ce qui indique que la dentine possède une forte résistance à la croissance de fissures et implique une résistance aux dommages mécaniques à l'ensemble de la dent.

- Fong H, Sarikaya M, White SN, Snead ML. Nano-mechanical properties profiles across dentin–enamel junction of human incisor teeth. Mater Sci Eng C 2000;7:119–28.
- Imbeni V, Kruzic JJ, Marshall GW, Marshall SJ, Ritchie RO. The dentin enamel junction and the fracture of human teeth. Nat Mater 2005;4:220–32.
- Brauer DS, Hilton JF, Marshall GW, Marshall SJ. Nano- and micromechanical properties of dentine: investigation of differences with tooth side. J Biomech 2011;44:1626–9.

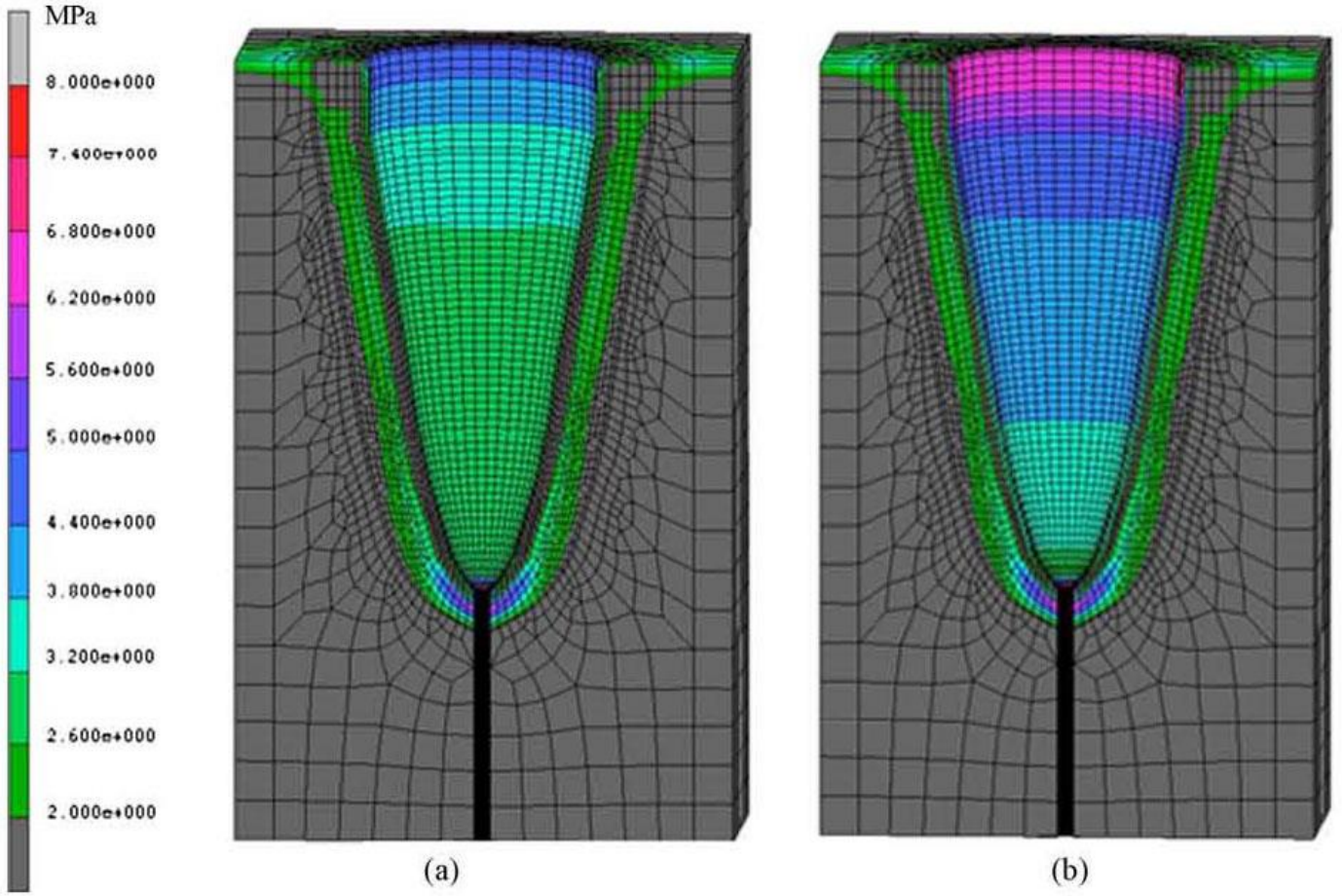
La propriété mécanique de la jonction dentine-émail



Micrographie optique d'une section de dent montrant une fissure que se propage à travers l'émail mais qui est stoppée à la junction dentine-émail sans pénétrer la dentine.

S.J. Marshall et al. Journal of the European Ceramic Society 23 (2003) 2897–2904

Distribution de contrainte mécanique au niveau de la jonction dentine-émail



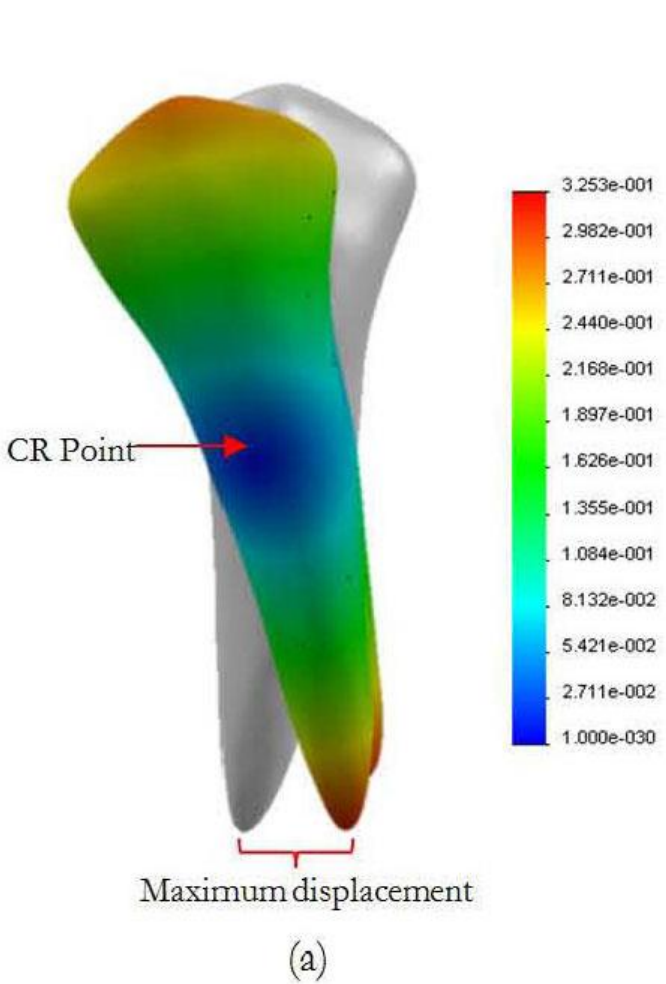
Distribution de contrainte mécanique pour :
a) une racine de dent avec jonctions dentine-émail et dentine-cément
b) une racine de dent sans jonctions dentin-émail et dentine-cément.

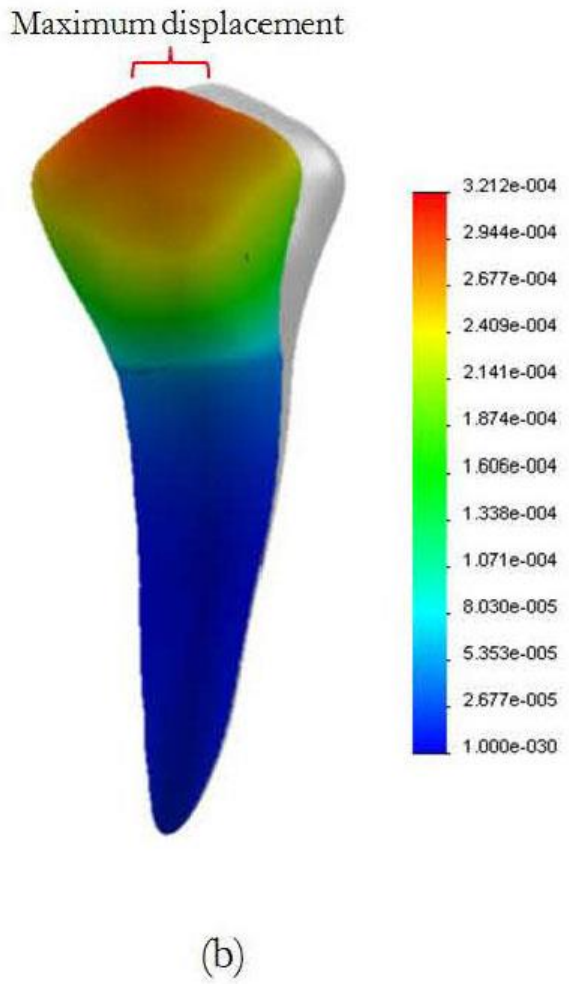
Ren et al. Journal of Dentistry, 38, 2010, 882-891.

Transfert de contrainte de la dent vers la machoire
Le ligament parodontal (PDL)

Pendant la mastication la PDL redistribue les charges (tension et compression) de la dent vers la mâchoire.

Déplacement d'une prémolaire avec ou sans PDL

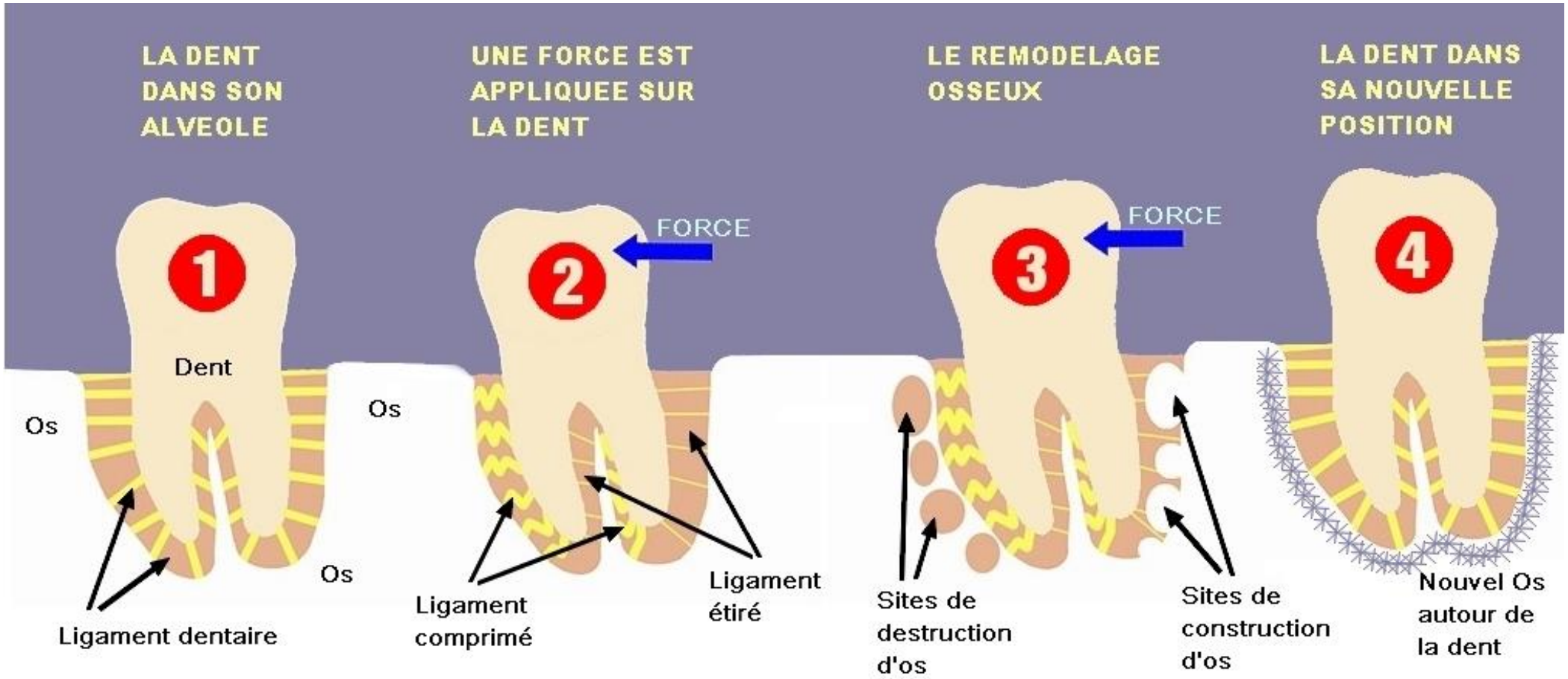




Déplacement minimum and maximumd'une prémolaire (en m)
a) sans PDL
b) avec PDL

Fongsamootra and Suttakul. Engineering Journal, 19, 99, 108, 2014.

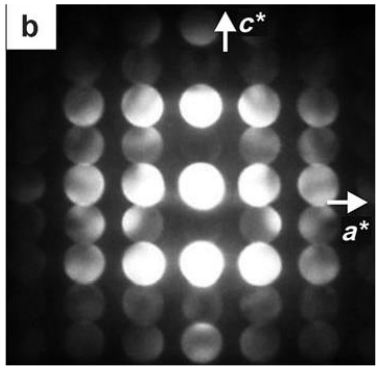
Les contraintes mécaniques peuvent produire de l'os



Les contraintes mécaniques sur l'os produisent de l'électricité

Monocristal d'HA coupé perpendiculaire à son axe c et muni d'électrodes

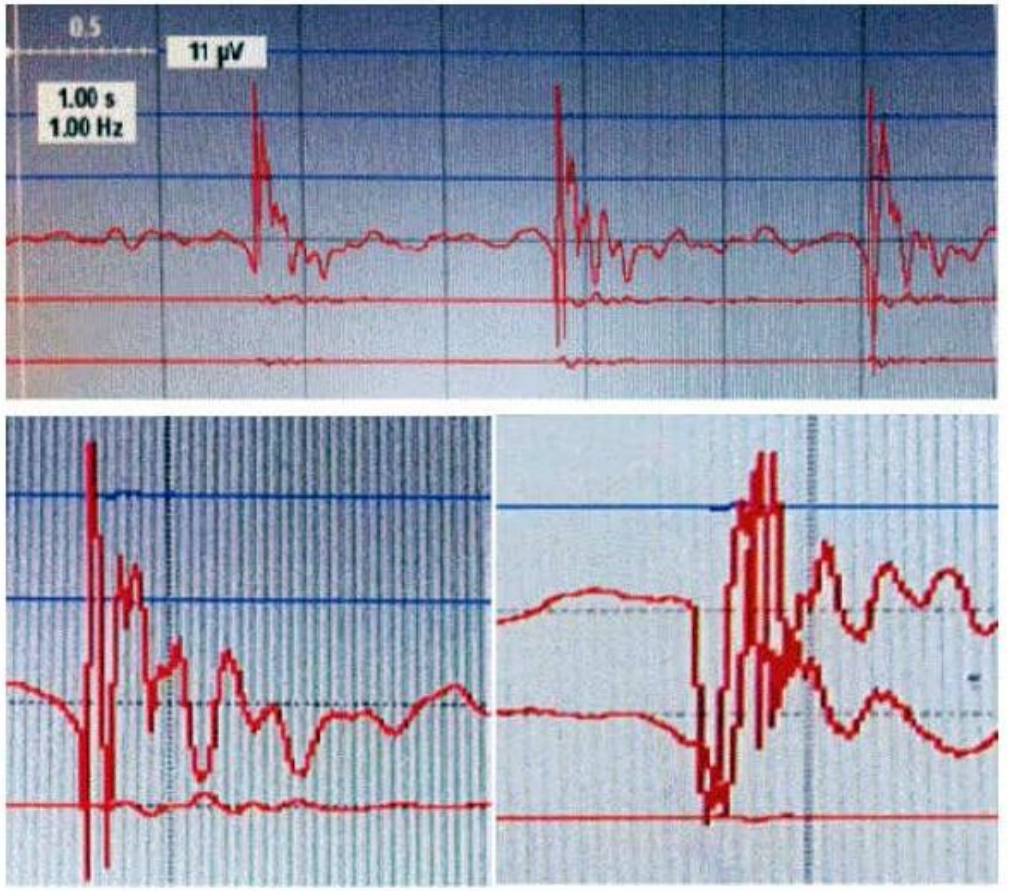
in Recycling and Waste Management, 2017, 2, 122-128.



Diffractogramme CBED d'un cristal d' HAP d'émail dentaire orienté le long de la direction [11-20] direction and montrantl l'absence de plan miroir.

Mugnaioli *et al., Chem. Eur. J.,* 2014, 20, 6849 – 6852.

Piezoélectricité de l'HA



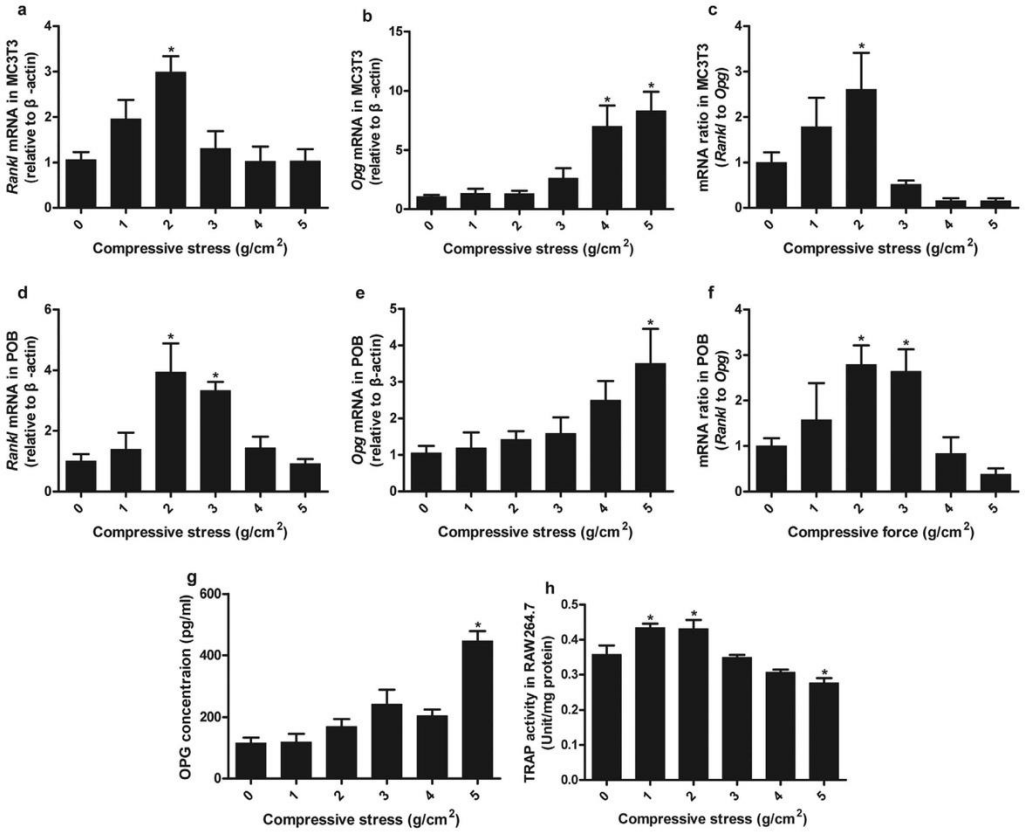
Voltage generé en tappant trois fois sur le cristal

Production d’os par la contrainte mécanique Comment ça marche ?

- La structure hiérarchique fonctionne en concentrateur de contraintes
- Les contraintes mécaniques sur l’os produit de l’électricité
- L’électricité favorise l’activité des cellules osseuses
  - Deux théories
    - Les contraintes en tension favorisent l’activité des ostéoblastes et les contraintes en tension favorisent celle des ostéoclastes.
    - Le type d’effet dépend de la magnitude des contraintes.

Les contraintes mécaniques produisent de l'os !

- La résorption osseuse a lieu sur le coté en compression et la formation d'os a lieu sur le côté en tension (Persson, *Journal of Orthodontics*, 2005, 32, 27–28).
- La différentiation des ostéoblastes et des ostéoclastes varie en fonction de l'amplitude de la contrainte en compression
- < 5.0 g/cm^{-2} pas d'influence sur la viabilité
- à 2.0 g/cm^{-2} la différentiation des ostéoclastes est amplifiée
- > 2.0 g/cm^{-2} inhibition de la différentiation des ostéoclastes
- Shen *et al., Sci. Rep.,* 2017, 7, 44925.



Adaptive osteoblast-regulated osteoclastic differentiation to compressive stress.

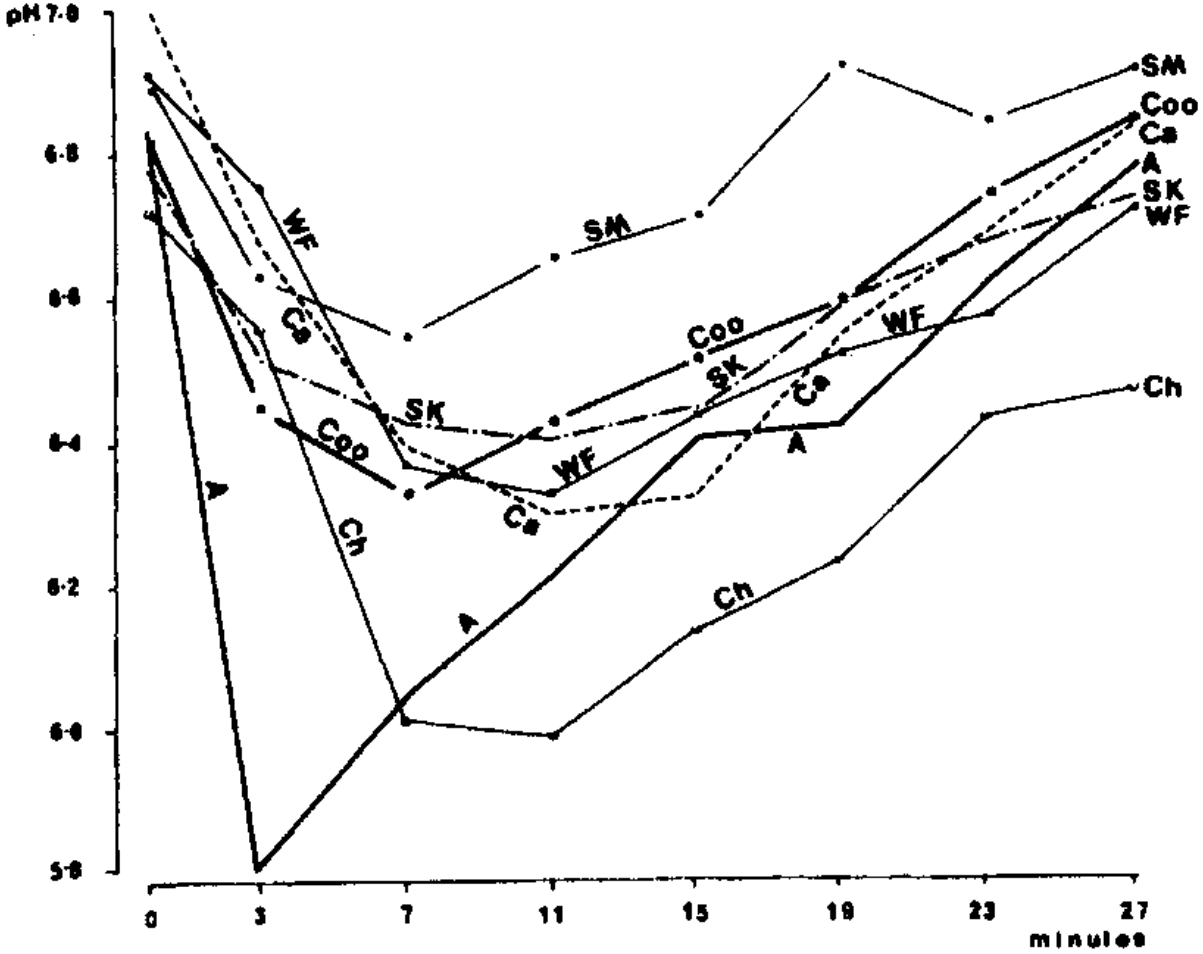
Les dents résistent à la corrosion
Le mécanisme de la carie dentaire

- La carie dentaire est un pathologie bactérienne causée par la production d'acides par des bactéries à la surface des dents.
- Le processus carie est continu et résulte de plusieurs cycles de minéralisation/déminéralisation.

Ils y avaient des dentistes il y a 60 000 ans !

Zubova AV, Zotkina LV, Olsen JW, Kulkov AM, Moiseyev VG, Malyutina AA, et al. (2026) Earliest evidence for invasive mitigation of dental caries by Neanderthals. PLoS One 21(5): e0347662. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0347662

Variations du pH de la bouche après un repas



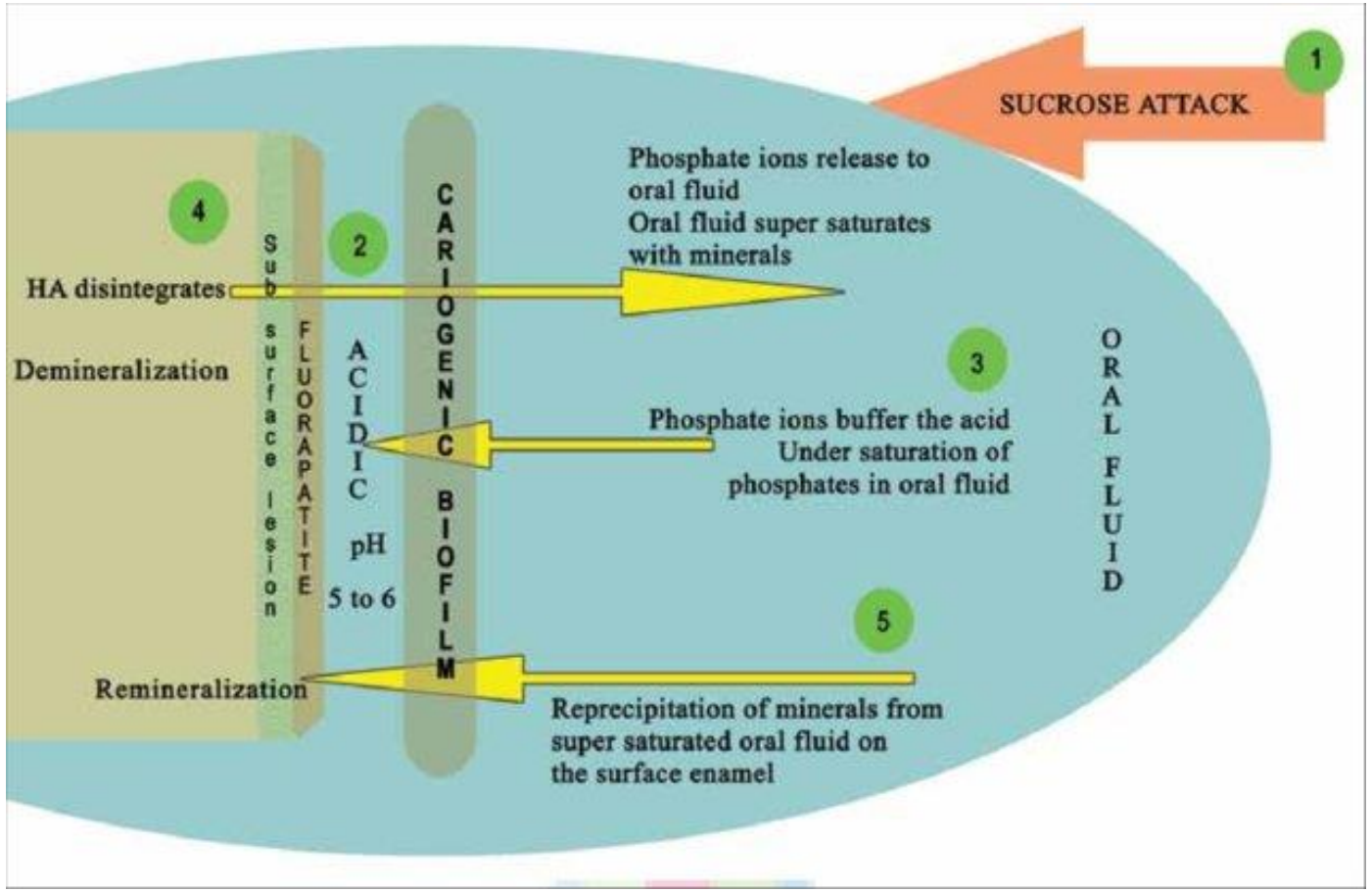
Variation du pH de la bouche après un repas pour des aliments de référence
SM: Lait
Coo: Cookie
Ca: Caramel
A: Jus de pomme
SK: Cracker
WF: Corn flake
Ch: Chocolat

Dodds and Edgar. J. Dent. Res. 1988, 67, 861-865.

Des bactéries transforment la nourriture en acide

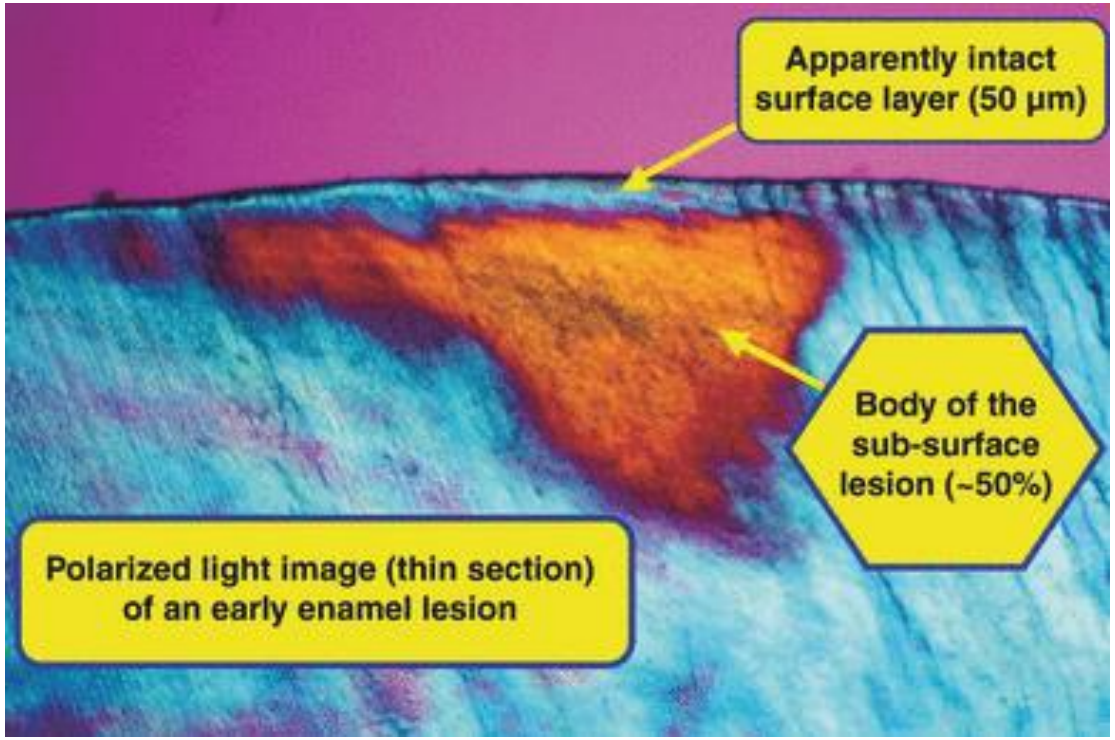
- Des bactéries telles que le Spectroscopus mutans et le Streptococus sangis transforment la nourriture en acide lactique qui dissolvent l'émail dentaire.

Le processus de déminéralisation et de reminéralisation



Usha Sathyanarayanan and Sathyanarayanan Ramarao. Dental caries - A complete changeover (Part I). 2009, Journal of Conservative Dentistry 12(2) DOI: 10.4103/0972-0707.55617

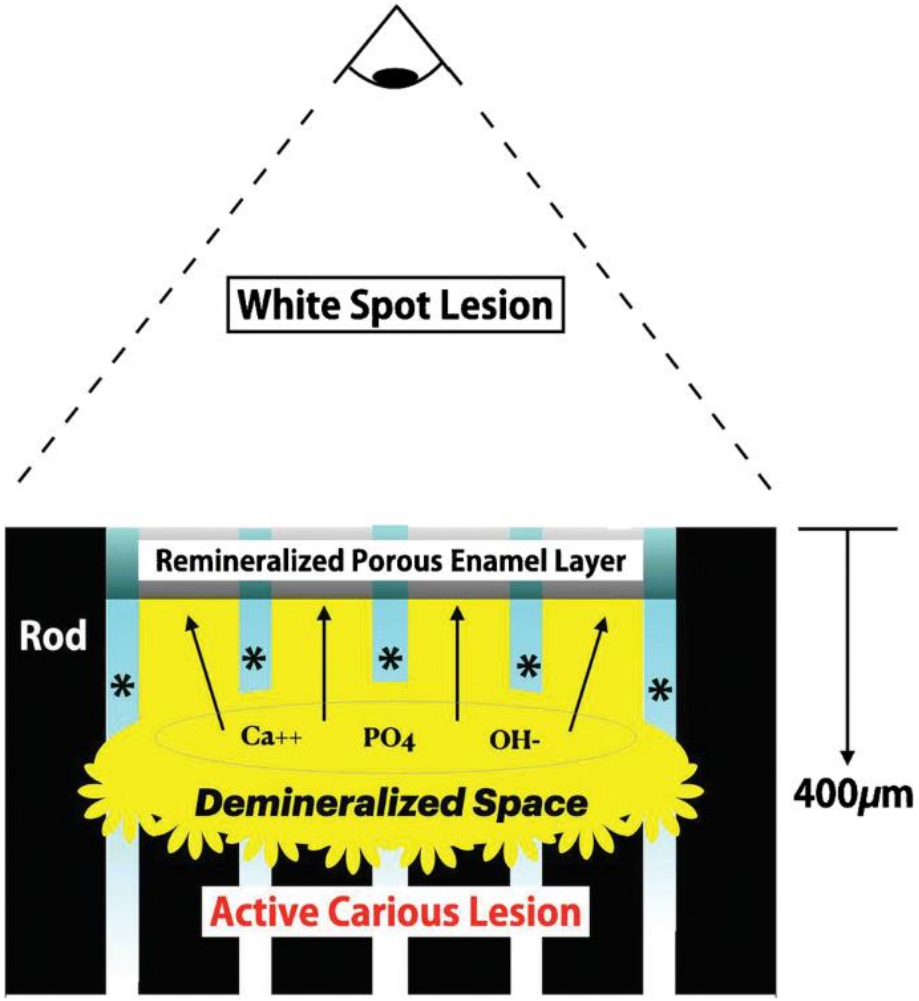
Ce qui se passe à l'échelle macro, les taches blanches



Cross-section d'une lésion carieuse initiale vue en lumière polarisée

Dental caries: a dynamic disease process
JDB Featherstone
https://doi.org/10.1111/j.1834-7819.2008.00064.x

Les taches blanches C’est quoi ?



Roberts et al. Pathophysiology of Demineralization, Part II: *Enamel White Spots, Cavitated Caries, and Bone Infection.* *Current Osteoporosis Reports* volume 20, pages 106–119 (2022)

Le processus carieux à l'échelle nanoscopique

Une ou plusieurs lésions alignées le long de l'axe [11-20] se forment sur les faces de base des cristaux

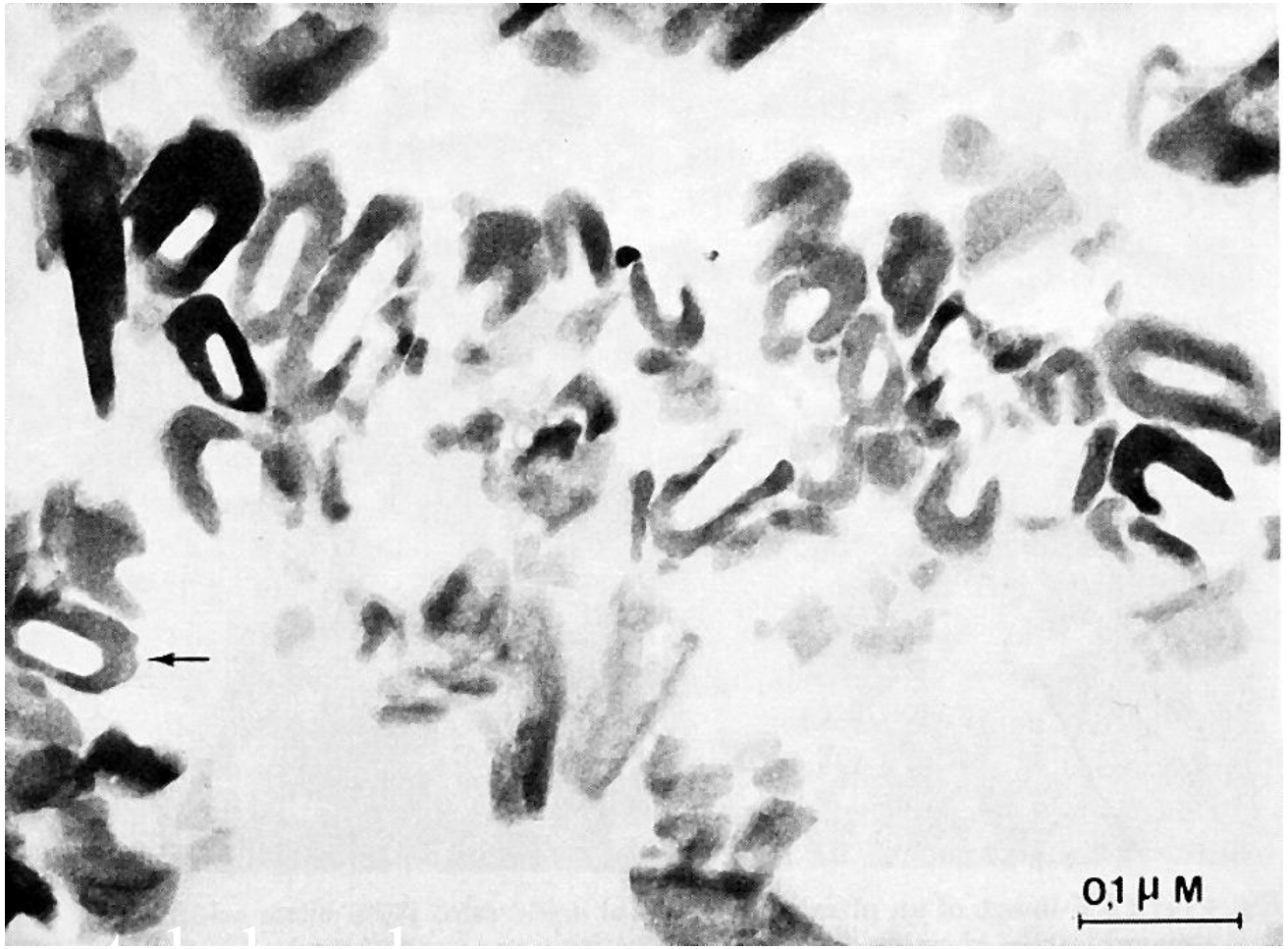
Le grandissement est donnée par la longueurs des cristaux (≈ 80 nm).

Le processus carieux à l’échelle nanoscopique 2

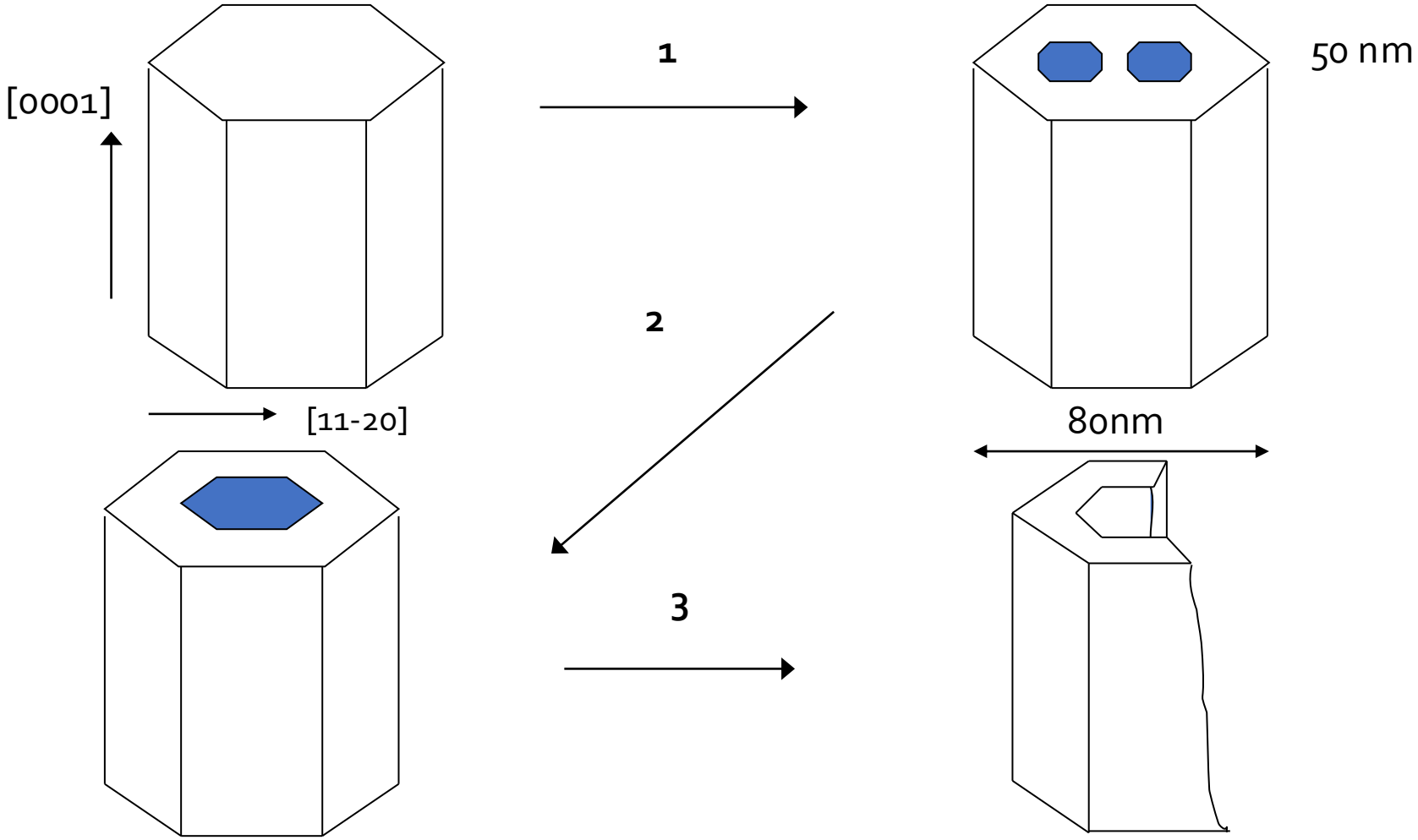
Les lésions se dévelolppent anisotropiquement le long de la direction [0001]

Voegel *and* Frank. 1977. Calcif. Tissue Res., 24, 19-27.

Le processus carieux à l'échelle nanoscopique 3

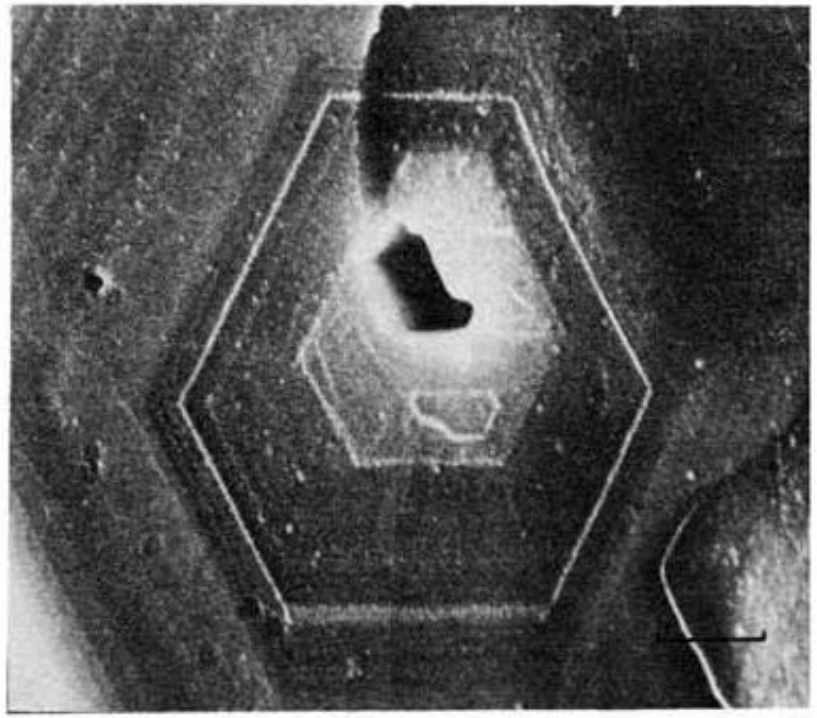


Le processus carieux à l'échelle nanoscopique 3

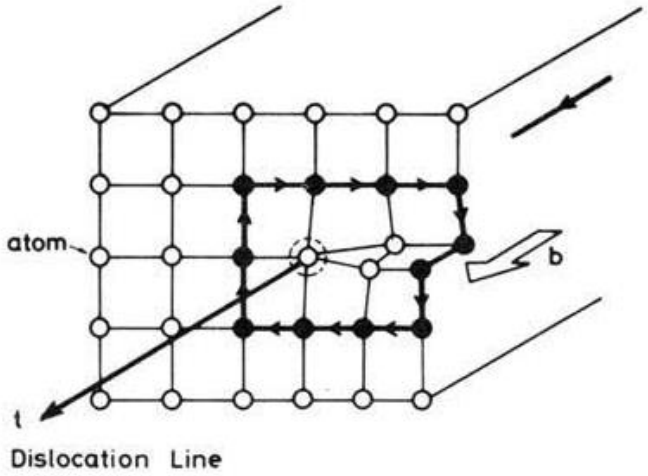


Que se passe-t-il ?

Présence d'un dislocation vis



Piqure de corrosion formée dans un cristal d'apatite au niveau d'une dislocation vis.
La barre fait 4 µm

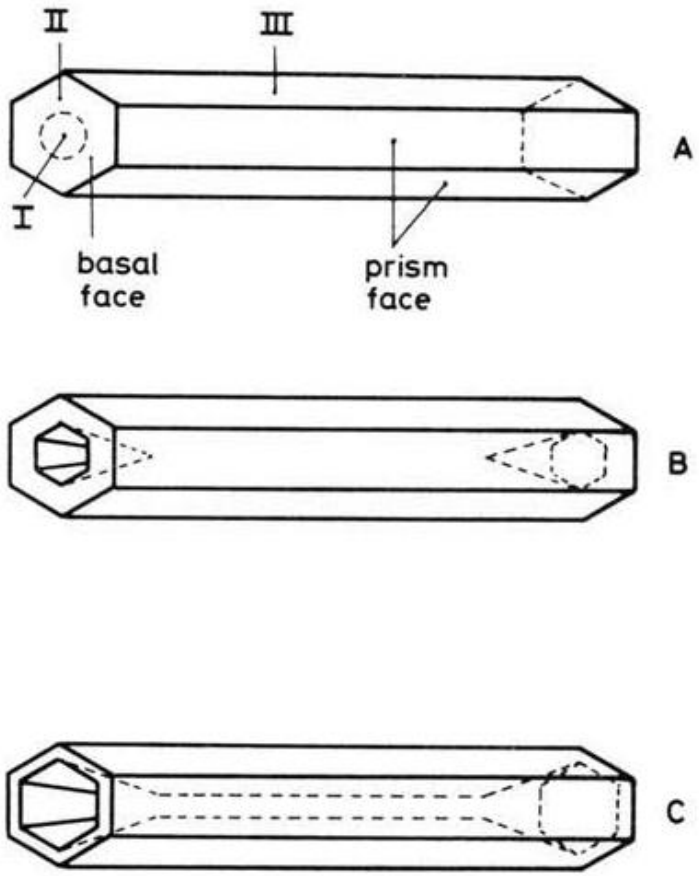


Une dislocation vis dans un cristal

Arends *and* Jongebloed. 1979. *J. Dent Res.* 58, 837-842.

Que ce passe-t-il ?

Presence de dislocations vis



Étapes de la dissolution d'un cristal d'apatite au niveau d'un dislocation vis

La présence d'une dislocation dans un cristal augmente le taux de dissolution d'un cristal à de faibles niveaux de saturation.

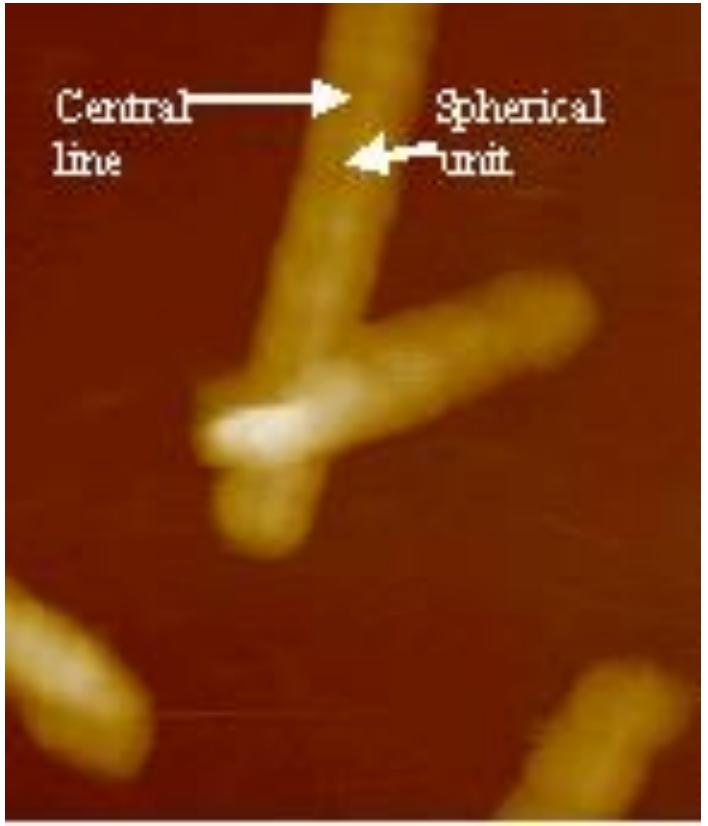
→ Le cristaux peuvent croitre plus rapidement à de faibles taux de saturation et se dissoudrent plus rapidement !

→ L' existence de trous permet de maintenir les propriétés.

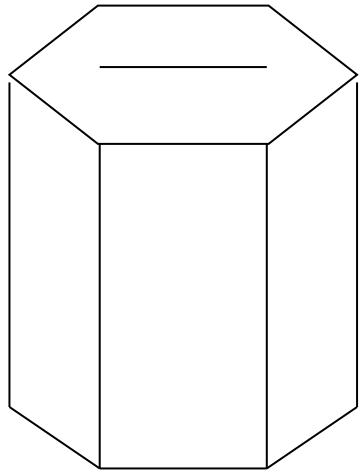
Frank. 1949. *Discussions of the Faraday Soc.* 5, 48.
Frank. 1952. *Advances in Physics*, 1, 91.

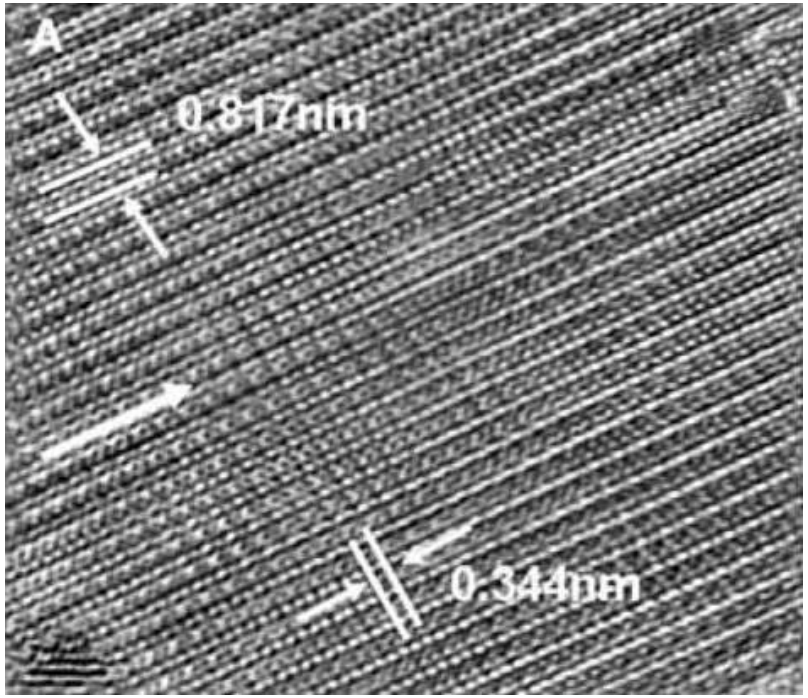
La ligne de contraste (CDL)

- Une ligne de contraste qui varie avec la focalisation du microscope est observée sur le site de dissolution



Robinson *et al.* 2004. *J. Mater. Chem.* 2242-2248,





Reyes-Gasga *et al. 2008.* J Mater Sci. Mater Med. 19. 877-882

Microscopie électronique à haute résolutiobn de la CDL

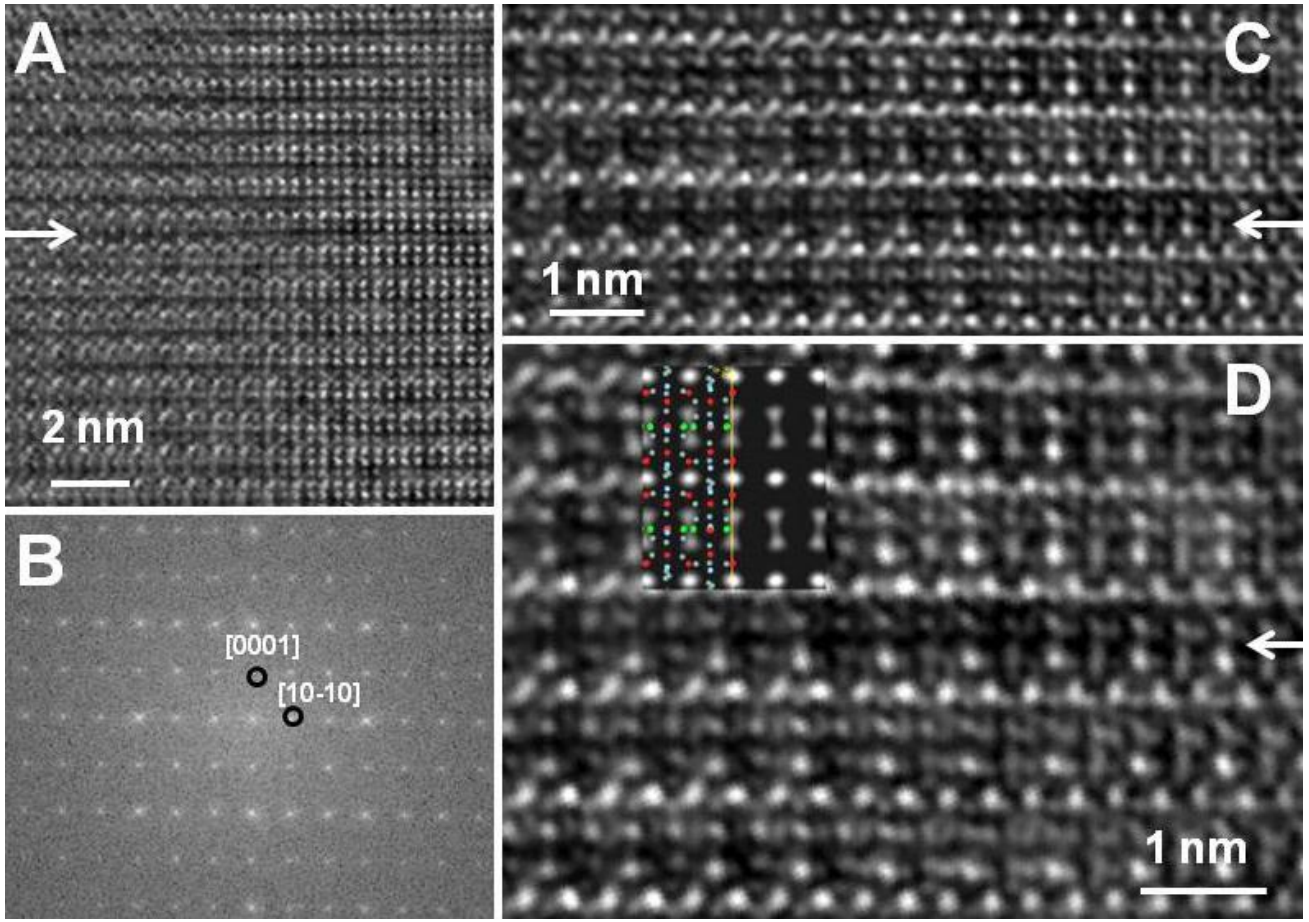


Image corrigées de microscopie électronique à haute résolution

a) Position de la CDL

b) Image FFT de a)

c) Image agrandie de la CDL

d) Image agrandie de c)

Ca en rouge, P en bleu, O en gris et en vers

L'épaisseur de la CDL est de 0.2 nm

La formation des défauts qui favorisent la dissolution anisotropique des cristaux d'émail

- Il y a au moins deux modèles :
  - Les défauts sont produits par l'hydrolyse d'une semence d'OCP
  - Les défauts sont produits par une croissance sur des templates organiques.

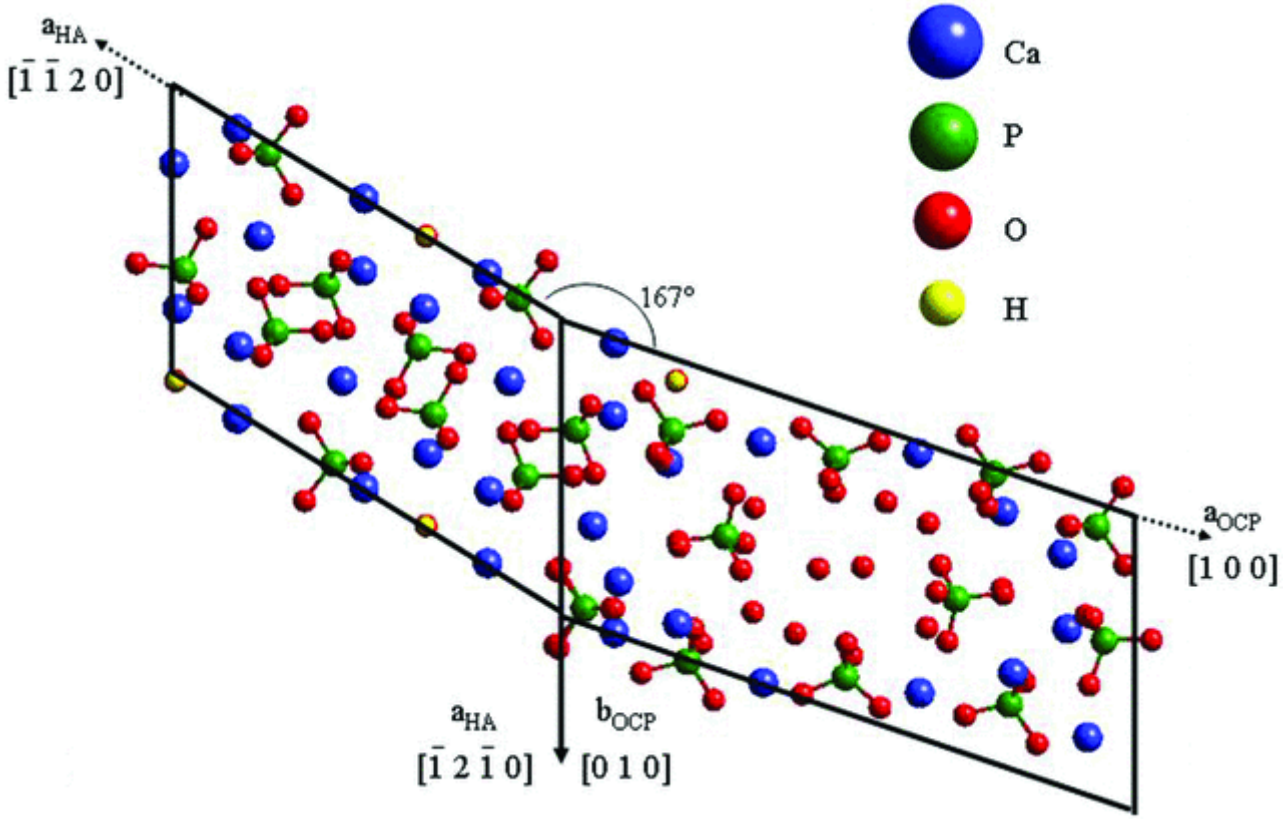
Le modèle d'OCP
Une couche d'OCP est présente au centre des cristaux

OCP : $Ca_8(PO_4)_6$. $5H_2O$; Ca/P = 1.33; *P-1*

[11-20]OHAP est attaché à l' [010]OCP.

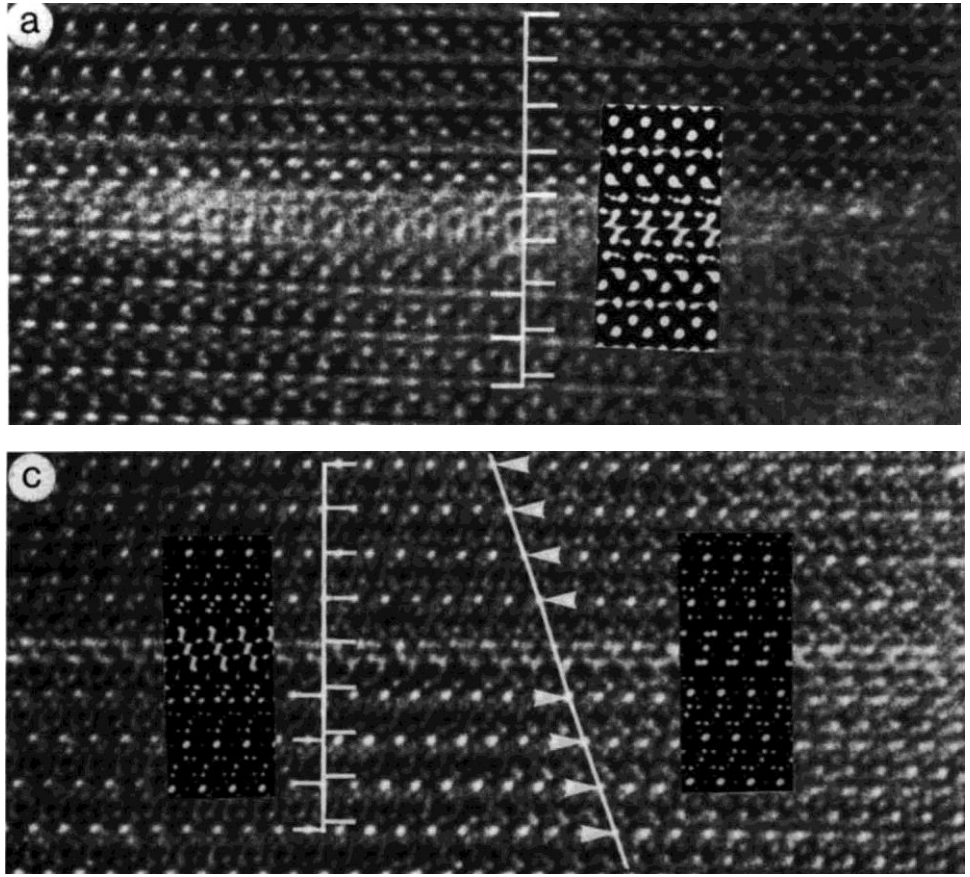
L'axe *c*OHAP est prarallèle à l'axe c de l'OCP,

L'angle entre *a*OHAP et *a*OCP est de 16°.



Brown. 1962. *Nature*, 196, 1048-1050.

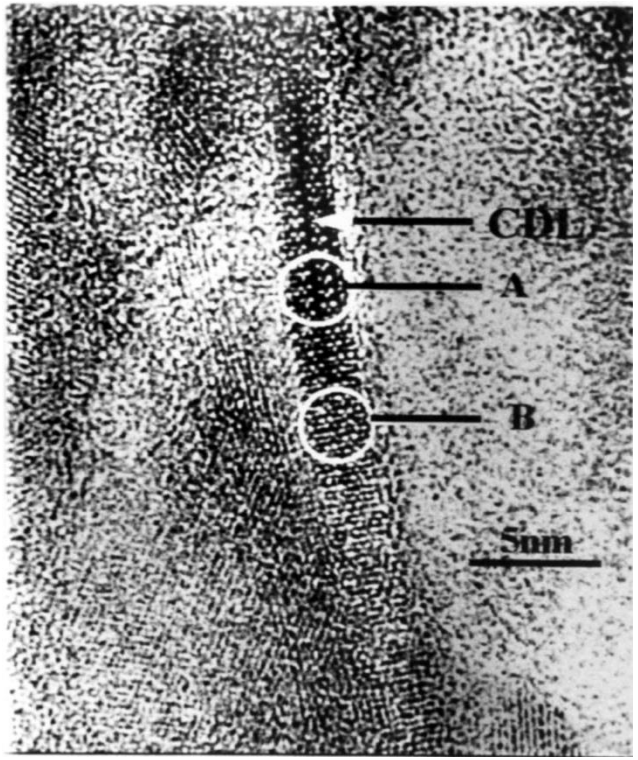
Le modèle d'OCP

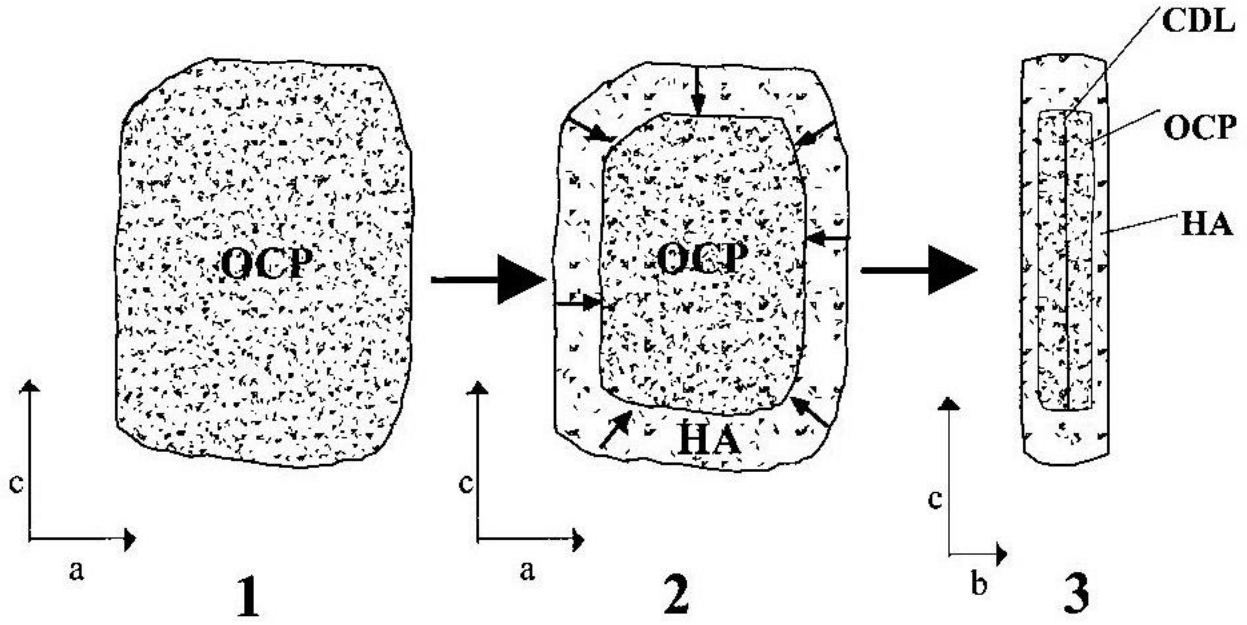


a) Micrographie à haute résolution d'un apatite carbonatée alignée le long de l'axe [-2112] montrant une augmentation de ¼[2-1-11]
c) Image simulée de l'OCP

Nelson *et al.* 1986. Ultramicroscopy 19 253-266

Le modèle de l'OCP

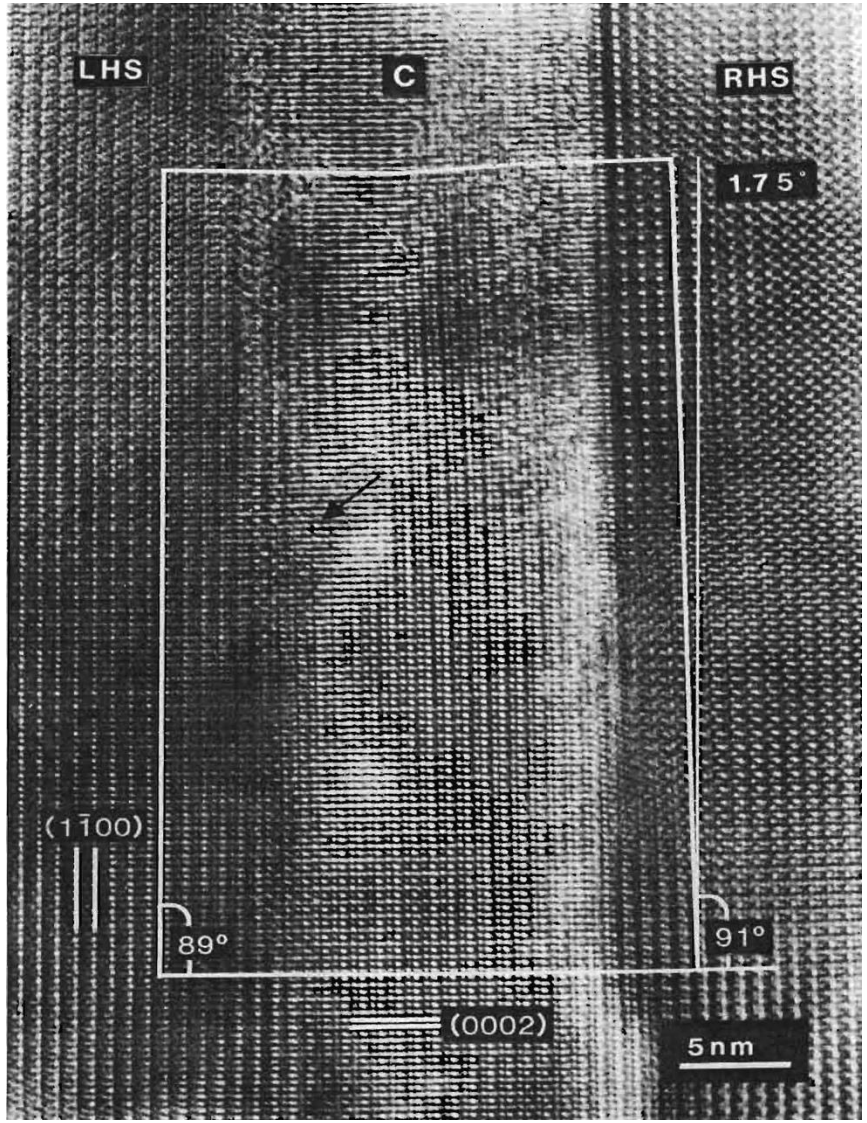




Le modèle de croissance de l'OCP

- Observation d'une DCL dans un cristal de dentine
- P. Bodier-Houllé *et al.* 1998. Acta Cryst. D54, 1377-1381,

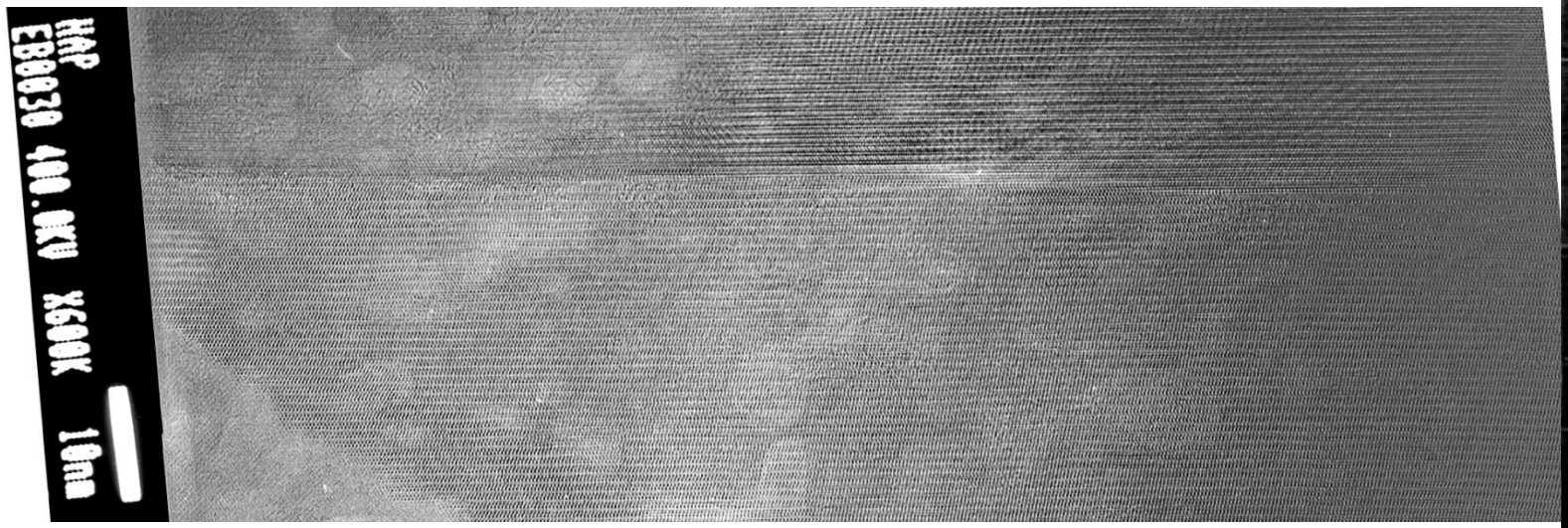
Le modèle de défaut cristallin

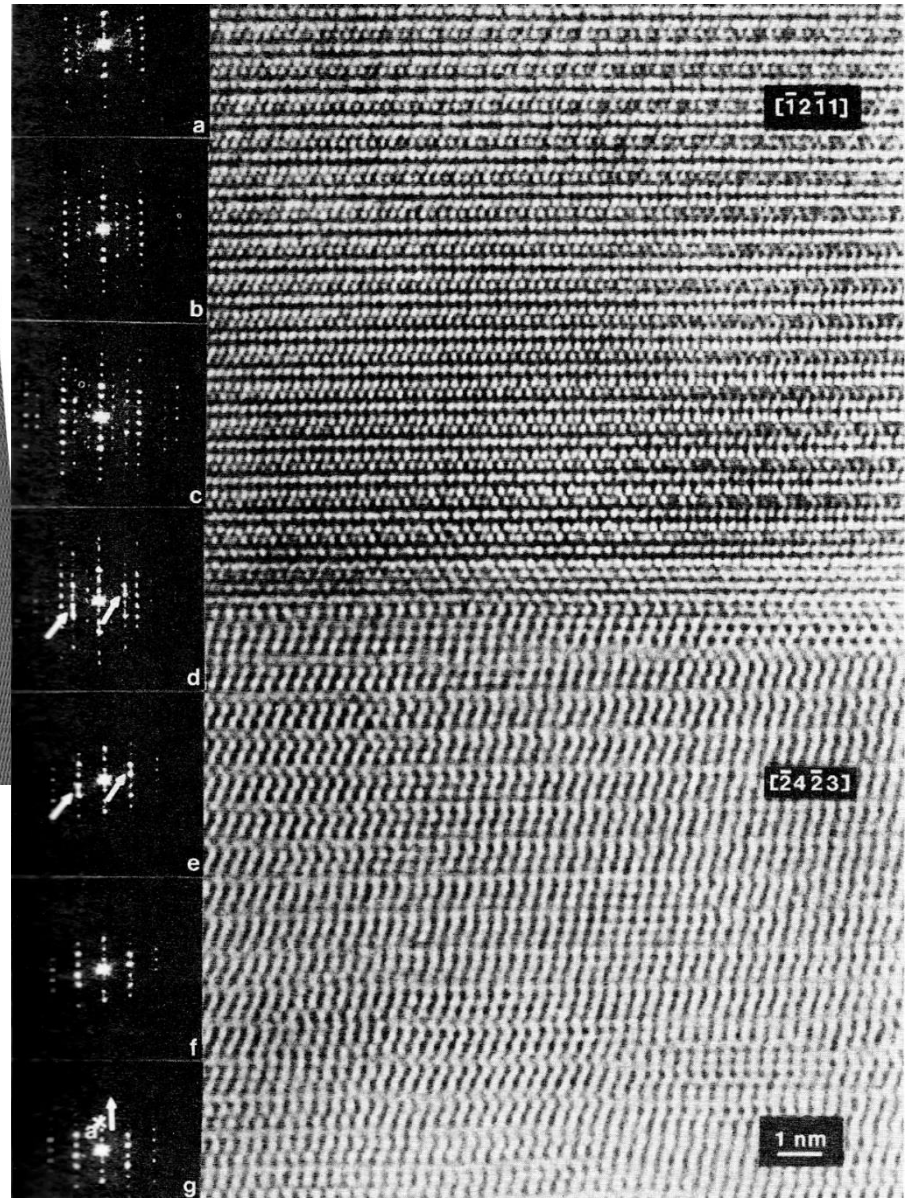


Micrographie à haute résolution d'un cristal d'émail aligné le long de l'axe [11-20]
Les parties droites et gauche ne sont pas parallèles

Brès *et al.* 1984. *Ultramicroscopy* 12 367-372.

Le modèle de défaut cristallin





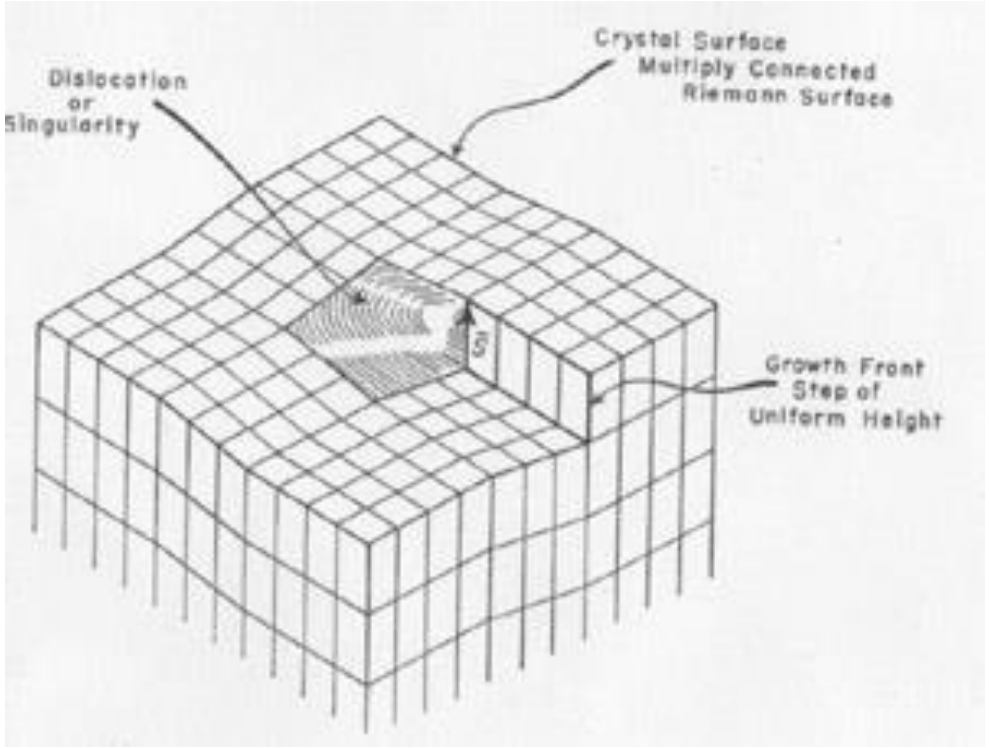
Défaut étendu

Interface entre un grain orienté le long de la direction[-12-11] et un grain orienté le long de [-24-23]

Brès *et al.* 1990. *Journal de Physique*, 51, C1-97-102.

Résultat

- La discolation vis permet au minéral de de dissoudre entre de recristalliser constamment



Dislocation vis au niveau de la surface d'un cristal

Des questions sont toujours ouvertes

- Quelle est la relation entre la CDL et les défauts ?
- Comment les l'alignement des défauts a-t-il lieu ?
- **Des cristaux avec des défauts controllés !**

Conclusion
Les propriétés mécanique des dents
Les propriétés mécaniques

Les dents sont soumises à des charges importantes

ces charges sont encaissées par l'émail dentaire et transmises à l'ensemlbe de la dent

Les fissures sont arrêtées au niveau des différentes interfaces

à l'échelle nanoscopique la combinaison de matériaux doux et durs permet d'obtenir des matériaux durs a de fortes déformabilités.

La structure hiérarchique des tissus fonctionne comme concentrateur de contraintes.

De l'électricité est induite par l'effet piezoélectrique par les contraintes mécaniques.

L'électricité favorise l'activité des cellules osseuses (ostéoblastes et ostéoclastes).

Conclusion
Les propriétés chimiques des dents

Des acides sont produits par la transformation de débris de nourriture par des bactéries

Les dents sont soumises à un processus constant de déminéralisation/réminéralisation

Les cristaux sont détruits d'un manière systématique à l'échelle nanoscopique

La présence de discolations vis augment la cinétique de demineralisation/remineralisation

Merci pour votre attention