

# Propriétés mécaniques des Biomatériaux utilisés en Odontologie

---

Société Francophone de Biomatériaux Dentaires

B. JACQUOT

**Date de création du document**    2009-2010

## Table des matières

<b>I</b>	<b>Contraintes et déformations.....</b>	<b>4</b>
<b>II</b>	<b>Caractérisation des propriétés mécaniques.....</b>	<b>5</b>
<b>III</b>	<b>L'essai de traction simple.....</b>	<b>7</b>
	<b>III.1 Diagramme contrainte-déformation en traction d'une éprouvette en métal.....</b>	<b>7</b>
	<b>III.2 Comportement macroscopique d'une éprouvette en métal en traction simple.....</b>	<b>11</b>
	<b>III.3 Comportement microscopique de l'éprouvette en métal en traction simple.....</b>	<b>12</b>
	<b>III.4 Diagramme contrainte-déformation en traction des différents matériaux .....</b>	<b>14</b>
<b>IV</b>	<b>Les essais de compression et flexion.....</b>	<b>17</b>
	<b>IV.1 Essai de compression.....</b>	<b>17</b>
	<b>IV.2 Test de traction diamétrale.....</b>	<b>17</b>
	<b>IV.3 Test de flexion trois points.....</b>	<b>18</b>
<b>V</b>	<b>Essai de cisaillement.....</b>	<b>19</b>
<b>VI</b>	<b>Essais de dureté .....</b>	<b>20</b>
	<b>VI.1 Estimation qualitative de la dureté : échelle de MOHS.....</b>	<b>20</b>
	<b>VI.2 Essais de dureté quantitatifs.....</b>	<b>20</b>
	<b>VI.2.1 Essai BRINELL.....</b>	<b>21</b>
	<b>VI.2.2 Essai VICKERS.....</b>	<b>21</b>
	<b>VI.2.3 Essais ROCKWELL.....</b>	<b>22</b>
	<b>VI.2.4 Essais de microdureté .....</b>	<b>23</b>
	<b>VI.2.5 Essais spécifiques pour polymères et métaux mous.....</b>	<b>23</b>
<b>VII</b>	<b>Rupture Fragile. Essai de résilience.....</b>	<b>25</b>
<b>VIII</b>	<b>Essais de fatigue.....</b>	<b>28</b>
<b>IX</b>	<b>Essais de fluage .....</b>	<b>30</b>
<b>X</b>	<b>Annexes.....</b>	<b>32</b>

## INTRODUCTION

Dans le milieu buccal, les matériaux sont sollicités mécaniquement dans des conditions physiologiques (mastication, déglutition) ou pathologiques (bruxisme). Les restaurations doivent donc posséder des qualités de résistance à ces sollicitations.

Cette résistance correspond à la capacité de supporter les forces appliquées sans se fracturer ou subir une déformation excessive. Cette demande en résistance varie en fonction des indications cliniques. Pour une couronne coulée unitaire, un certain taux de déformation ne pose pas de problème. Par contre, un bridge de longue portée céramo-métallique nécessite le choix d'un alliage de grande rigidité afin d'éviter la fracture de la céramique de recouvrement, matériau fragile.

Dans l'analyse des propriétés mécaniques, la difficulté a été de départager la rigidité intrinsèque du matériau de la géométrie de la structure.

## I CONTRAINTES ET DÉFORMATIONS

---

L'effet des forces sur différents matériaux est expliqué par Robert HOOKE (1635-1703), de façon empirique à l'échelle macroscopique : *un matériau à l'état solide ne résiste à une force appliquée qu'en se déformant sous l'action de cette force*. Les matériaux sont élastiques. Il établit une règle, la loi de HOOKE, selon laquelle l'allongement est toujours proportionnelle à la force appliquée. Cette loi n'est rigoureusement vraie que pour les céramiques, le verre, la plupart des minéraux et les métaux les plus durs.

Mais, dans quelle mesure le comportement d'une structure dépend de son matériau constitutif plutôt que de ses dimensions et de sa forme ? Nous avons besoin de standards objectifs de comparaison qui soient indépendant de la taille et de la forme du matériau.

La considération des conditions qui règnent en chaque point d'un matériau soumis à des forces mécaniques conduit aux notions de contrainte et de déformation. La définition claire et utilisable de ces deux notions est due à Augustin CAUCHY (1789-1857). Quand on soumet un corps à l'action de forces extérieures, des contraintes s'établissent par réaction, à l'intérieur de ce corps. À ces contraintes sont associées des déformations.

Pour s'affranchir de la dépendance des dimensions du matériau, les paramètres **contrainte** et **déformation** sont utilisés.

⇒ ⇒ **La contrainte** détermine avec quelle intensité les atomes du matériau sont écartés les uns des autres ou comprimés les uns sur les autres. Cette contrainte est, pour une traction simple, la force qui agit sur une unité de surface du matériau.

$$\sigma = F/S$$

Elle se mesure en Pascal (Pa).

Les trois principales contraintes sont la traction, la compression et le cisaillement qui sont définies plus loin.

⇒ ⇒ **La déformation** indique dans quelles proportions les liaisons inter atomiques (à l'échelle microscopique) et la structure elle-même (l'objet, à l'échelle macroscopique) ont été déformées. La déformation, pour une traction simple, est le rapport de l'allongement à la longueur initiale.

$$\varepsilon = (L-L_0)/L_0$$

L'allongement est sans unité.

## II CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

---

Pour pouvoir utiliser raisonnablement les matériaux de restauration ou prothétiques en clinique, il est essentiel de déterminer les conditions de déformation et de rupture des matériaux.

Afin de caractériser le comportement mécanique d'un ou de plusieurs matériaux soumis à des forces extérieures qui engendrent des **contraintes** et des **déformations**, on a recours à un certain nombre d'essais mécaniques.

Ces essais mécaniques doivent mettre en jeu des états de contrainte simples et connus, d'interprétation facile et non équivoque. De plus ils doivent être reproductibles. C'est pourquoi des organismes nationaux et internationaux normalisent ces essais (AFNOR, ISO, CEN).

La normalisation des essais porte sur :

- la géométrie de l'éprouvette (une éprouvette est une pièce de dimensions normalisées utilisée lors d'essais mécaniques visant à déterminer le comportement du matériau soumis à différents efforts mécaniques comme le traction, la torsion, la flexion...)
- la préparation de cette éprouvette
- les machines d'essai et leur étalonnage,
- les techniques expérimentales mises en œuvre
- le dépouillement et la présentation des données.

On peut distinguer :

⇒ ⇒ **Les essais peu liés au temps** (dans lesquels la déformation provoquée est peu liée à la durée d'application de la force) :

-L'**essai de traction**, de compression ou de flexion, détermine l'aptitude à la déformation d'un matériau soumis à un effort progressif

-L'**essai de dureté** fournit des renseignements sur la résistance à la pénétration d'une pièce dure soumise à un effort constant

-L'**essai de résilience** caractérise la résistance au choc

⇒ ⇒ **Les essais fortement liés au temps** (dans lesquels la déformation provoquée dépend de la durée d'application de la force) :

-L'**essai de fatigue** étudie le comportement du matériau vis à vis de sollicitations alternées bien inférieures à la contrainte nécessaire pour le rompre

-L'**essai de fluage** mesure la déformation, en fonction du temps, du matériau sous charge constante.

### III L'ESSAI DE TRACTION SIMPLE

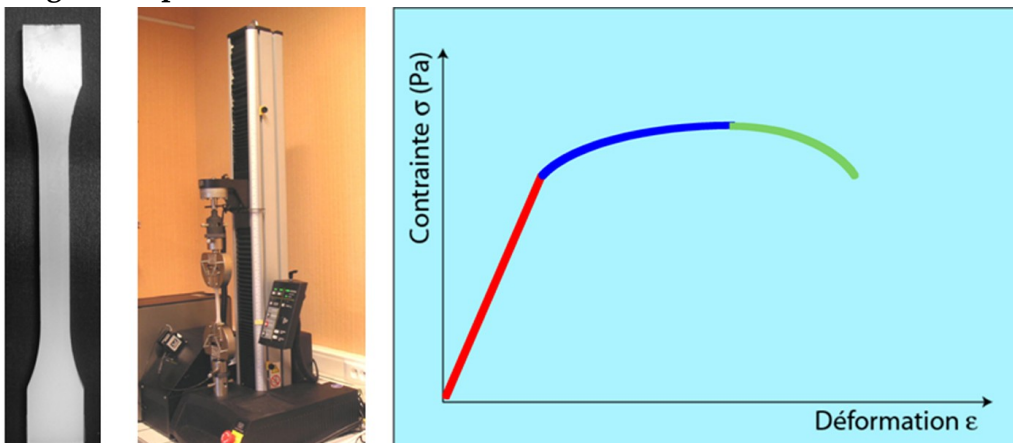
---

L'essai le plus fréquemment utilisé afin de déterminer le comportement mécanique d'un matériau est l'**essai de traction**. Cet essai est caractérisé par sa facilité de mise en œuvre et par la richesse des informations fournies.

On exerce une force de traction sur un barreau de dimension standardisée, jusqu'à sa rupture, en suivant un processus de mise en charge à une vitesse de déformation constante.

L'éprouvette d'essai est prélevée dans le matériau à caractériser et usinée à des dimensions normalisées, afin d'assurer une meilleure comparaison des essais effectués dans différents laboratoires. Pour chaque type de matériau, il existe un type d'éprouvette.

Figure 1. Eprouvette. Machine de traction. Courbe contrainte-déformation



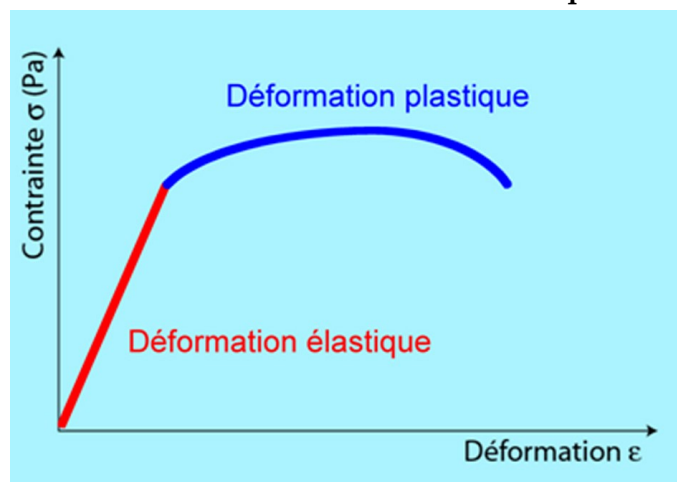
En enregistrant la force appliquée à l'éprouvette par la machine de traction et son allongement progressif on obtient un **diagramme contrainte-déformation**.

### III.1 DIAGRAMME CONTRAINTE-DÉFORMATION EN TRACTION D'UNE ÉPROUVETTE EN MÉTAL

L'application d'une force provoque initialement une **déformation élastique** de l'éprouvette. Cela se traduit sur le diagramme par une droite car la déformation est proportionnelle, pour un métal, à la contrainte (loi de HOOKE).

Cette déformation élastique est réversible. Si la contrainte est annulée, l'éprouvette revient instantanément à sa forme initiale. Cette déformation élastique est suivie d'une déformation irréversible (permanente) appelée **déformation plastique**, qui se traduit sur le diagramme par une courbe qui se termine au moment de la rupture de l'éprouvette.

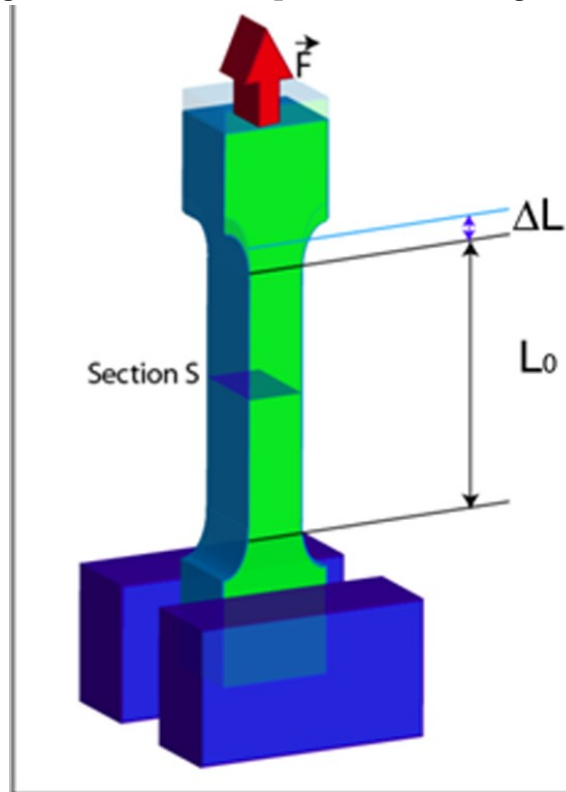
Figure 2. Courbe contrainte-déformation. Domaine élastique et domaine plastique



Différents paramètres sont remarquables :

- Le **module d'élasticité E (ou module de YOUNG)** donné par la pente du domaine élastique du diagramme contrainte-déformation.

**Figure 3 : Traction simple : force et allongement**



⇒⇒ **Le module d'élasticité :**

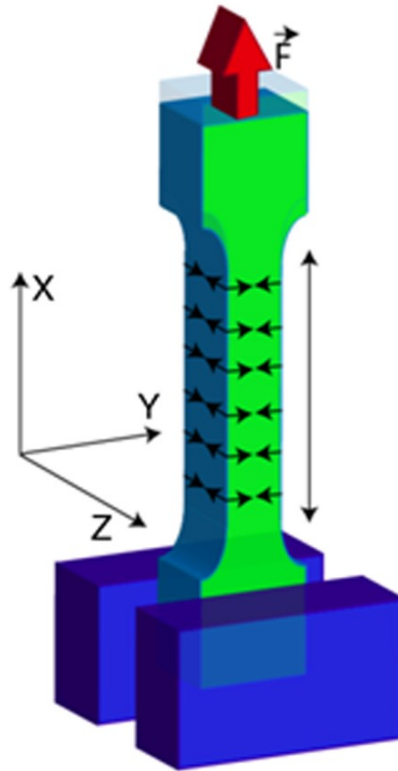
Si l'on raisonne, par simplification, sur un corps parallélépipédique supposé à une seule dimension dans un essai de traction dans un seul axe (uniaxiale, selon l'axe des x), l'éprouvette subit un

allongement (**figure 3**). Pour les petites déformations, il existe une relation linéaire entre la contrainte et la déformation :

$$\sigma_x = E \cdot \epsilon_x = E \frac{\Delta L}{L_0} = E \frac{(L - L_0)}{L_0}$$

E est le module d'élasticité ou **module de YOUNG**

**Figure 4 : déformations dans les trois directions**



⇒ ⇒ En réalité, l'éprouvette se déforme dans les 3 directions (**figure 4**).

Dans le sens Ox il y a un allongement, dans les sens Oy et Oz il y a raccourcissement. Dans ce cas de traction simple, si les contraintes  $\sigma_y$  et  $\sigma_z$  sont nulles, les déformations  $\epsilon_y$  et  $\epsilon_z$  ne le sont pas. Les 3

déformations sont reliées par le coefficient de POISSON.

$$\epsilon_x = -\epsilon_y/\nu = -\epsilon_z/\nu$$

$\nu$  est le coefficient de POISSON

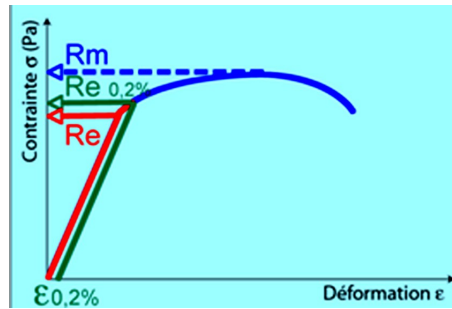
- La **limite d'élasticité  $R_e$**  correspond à la contrainte à partir de laquelle le matériau commence à se déformer plastiquement. En pratique, bien que la définition soit simple, cette limite est difficile à apprécier car le passage du domaine élastique au domaine plastique se fait de façon progressive. La difficulté de lecture donnerait des interprétations erronées de cette limite d'un laboratoire à l'autre. Pour s'en affranchir, on a déterminé une limite conventionnelle d'élasticité à 0,2% ( $R_{e0,2}$ ). C'est la contrainte pour laquelle on mesure une déformation plastique de 0,2%.

- La **résistance à la traction  $R_m$**  se définit comme la contrainte maximale atteinte durant l'essai de traction.

- L'**allongement à la rupture  $\epsilon_r$**  que l'on peut lire sur le diagramme ou sur l'éprouvette rompue.



Figure 5 : Courbe contrainte-déformation. Limite d'élasticité et résistance à la traction



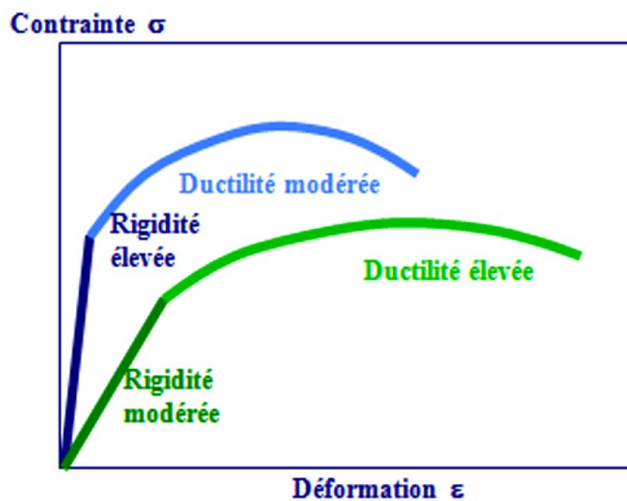
On peut également définir certaines caractéristiques déterminées par l'essai de traction :

- **la rigidité** est fonction de l'énergie des liaisons entre les atomes ou les molécules constituant le matériau. On mesure la rigidité principalement par le module d'YOUNG. Plus ce module est élevé, plus le matériau est rigide.

- **la résistance** caractérise la contrainte maximale qu'un matériau supporte avant de se rompre. Cette résistance est fonction de l'intensité des liaisons mais également de la forme des pièces ou de ses défauts.

- **la ductilité** correspond à la capacité d'un matériau à se déformer de façon permanente avant de se rompre. Plus l'allongement à la rupture est élevé, plus le matériau est considéré comme ductile. A l'opposé, lorsque la déformation permanente est très réduite ou nulle, on parle d'un matériau fragile. Un matériau fragile peut présenter une résistance très élevée (figure 6).

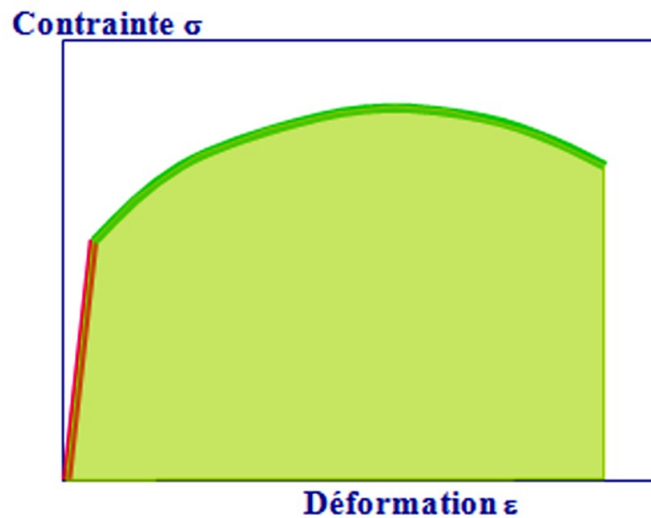
Figure 6. Courbe contrainte-déformation. Deux matériaux avec des rigidités et des ductilités différentes



- **la ténacité** qui représente la quantité d'énergie absorbée à la rupture par un matériau. Elle caractérise la résistance à la propagation brutale de fissures. Sa valeur est égale à l'aire de la

surface sous la courbe contrainte-déformation. Cette caractéristique est importante pour les céramiques.

Figure 7. Courbe contrainte-déformation. Ténacité = surface sous la courbe



### III.2 COMPORTEMENT MACROSCOPIQUE D'UNE ÉPROUVETTE EN MÉTAL EN TRACTION SIMPLE

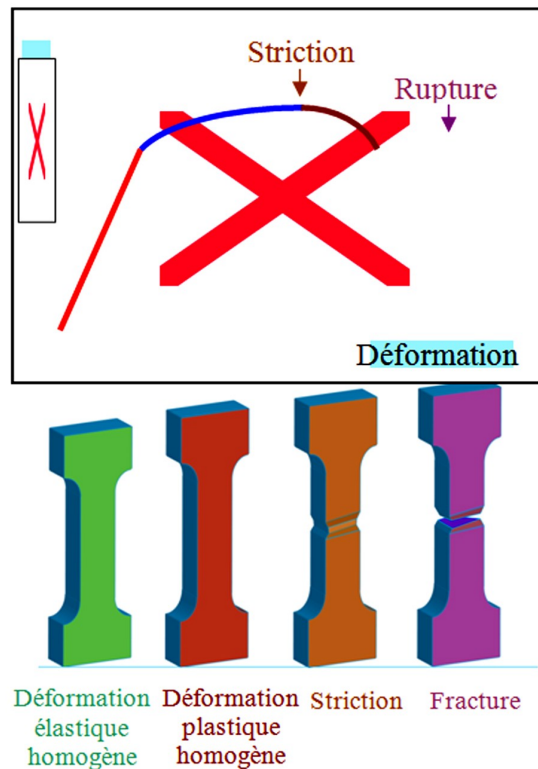
Durant la première partie de l'essai, l'éprouvette a un comportement élastique linéaire. Théoriquement, la pente de la droite est égale au module de YOUNG. Il y a réversibilité totale et instantanée de la déformation.

La déformation élastique est suivie de la déformation plastique.

D'abord, l'allongement de l'éprouvette est accompagné d'une contraction homogène (uniforme) sur toute la longueur de l'échantillon. À partir d'un certain taux de déformation critique (contrainte maximale) la contraction de la section cesse d'être homogène et devient de plus en plus importante en un seul endroit. On parle du phénomène de **striction**. Dès le début du processus de striction, la section locale diminue rapidement et la résistance à l'allongement de l'éprouvette qui est proportionnelle à la section diminue également.

Lorsque la rupture se produit l'éprouvette se contracte de manière brutale en restituant l'énergie stockée. Cette contraction s'accompagne d'une émission sonore qui a pour origine la transformation de l'énergie élastique en énergie cinétique.

Figure 8. Courbe contrainte-déformation. Déformation homogène. Striction. Rupture



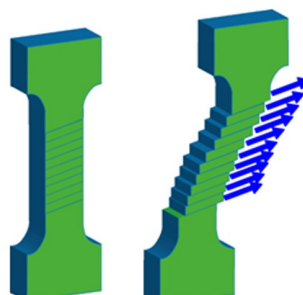
### III.3 COMPORTEMENT MICROSCOPIQUE DE L'ÉPROUVETTE EN MÉTAL EN TRACTION SIMPLE

La déformation élastique réversible est sous la dépendance de l'énergie des liaisons interatomiques. La force de rétraction élastique résulte d'un déplacement minime des atomes du solide de leur position d'équilibre. L'énergie de cohésion de ces solides est très élevée. Les forces de rétraction élastique sont intenses, le module d'élasticité est élevé et le domaine élastique réversible limité.

Que se produit-il physiquement lorsque la limite élastique est atteinte ?

L'échantillon sur lequel on exerce une traction peut être considéré comme un empilement de plans atomiques. La déformation plastique des matériaux cristallins ductiles provient du glissement irréversible de certains plans les uns par rapport aux autres, similaire à celui d'une pile de pièces de monnaie soumise à un cisaillement.

Figure 9. Déformation plastique par glissement le long des plans cristallins préférentiels



Ce glissement se produit suivant certains plans et selon certaines directions cristallographiques. Les plans de glissement actifs dans les métaux, dont les structures cristallographiques les plus courantes sont CC, CFC et HC, sont les plans de plus forte densité atomique. Par ailleurs dans chacun de ces plans, la direction de glissement est la direction cristallographique de plus grande densité atomique.

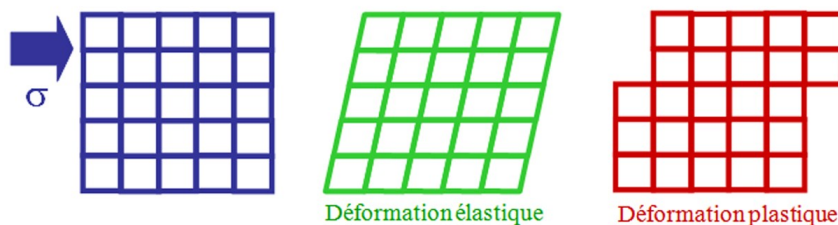
On appelle **système de glissement**, la combinaison d'un plan de glissement et d'une direction de glissement située dans ce plan. Le nombre de systèmes de glissement possibles pour une structure cristalline donnée fournit une première indication sur la ductilité de cette structure.

Structure CFC (Cubique Face Centrée)	12 systèmes de glissement
Structure HC (Hexagonale Compacte)	3 systèmes de glissement
Structure CC (Cubique Centrée)	12 systèmes de glissement

Les métaux cubiques sont donc les plus ductiles.

La **cission critique** correspond à la contrainte nécessaire pour enclencher les premiers glissements cristallographiques. Au delà de cette valeur, le matériau entre dans le domaine plastique et se déforme de façon permanente.

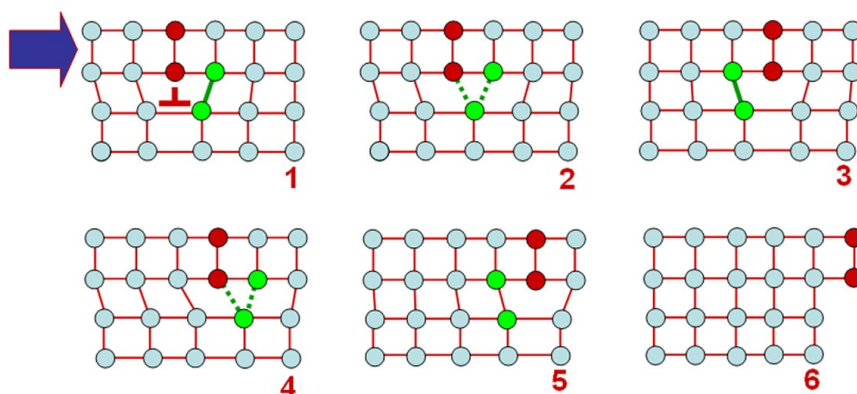
Figure 10. Déformation élastique et plastique d'un solide cristallin



Or on trouve une différence de 3 à 4 ordres de grandeur entre les valeurs théoriques et les valeurs expérimentales de la cission critique de glissement. La valeur expérimentale de la limite élastique est de 10<sup>3</sup> à 10<sup>4</sup> fois plus faible que sa valeur théorique.

Les **dislocations** permettent d'expliquer ce décalage.

Figure 11. Déplacement d'une dislocation-coin dans un cristal



Les dislocations sont des défauts linéaires qui peuvent se déplacer sous l'action d'une cisssion beaucoup plus faible que la cisssion théorique nécessaire pour produire un cisaillement absolu égal à une distance interatomique selon la direction du glissement.

Les dislocations permettent de rompre une ou deux liaisons interatomiques seulement, aussi il n'est pas nécessaire de rompre simultanément l'ensemble des liaisons du plan de glissement pour obtenir le déplacement du plan d'une distance interatomique.

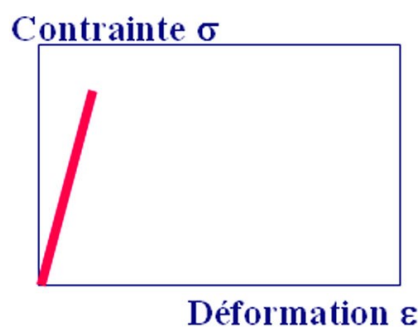
### III.4 DIAGRAMME CONTRAINTE-DÉFORMATION EN TRACTION DES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX

Nous avons raisonné jusqu'à maintenant sur un seul matériau de type métallique. Si l'on analyse les courbes de traction de l'ensemble des matériaux on retrouve trois comportements possibles.

**Un comportement fragile.** Le matériau ne présente pas de domaine de déformation plastique, la rupture se produit alors que les déformations sont purement élastiques. Le verre, les céramiques et les polymères thermodurcissables sont des matériaux à rupture fragile.

Dans le cas des céramiques dentaires, la phase cristalline dans sa matrice vitreuse constitue l'obstacle majeur aux dislocations. La limite élastique de ces matériaux est très élevée car le déplacement des dislocations est très difficile à température ambiante. Cela est dû à la présence de liaisons covalentes et à l'alternance du signe des ions qui entraîne une modification des plans de glissement.

Figure 12. Courbe contrainte-déformation. Comportement fragile

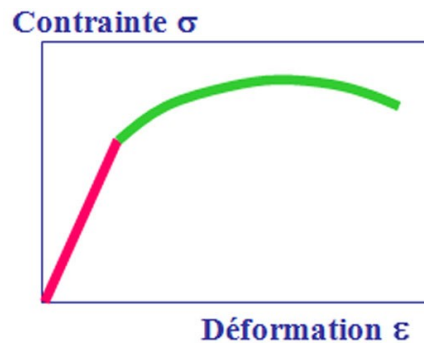


**Un comportement ductile.** Une déformation plastique irréversible suit la déformation élastique réversible. La majorité des métaux et des alliages et certains polymères thermoplastiques présentant ce type de comportement.

Dans les métaux, les liaisons interatomiques ne constituent pas un obstacle majeur à la propagation des dislocations. Les métaux sont donc des matériaux ductiles avec de faibles limites d'élasticité. Aussi, divers procédés permettent d'élever la limite élastique des métaux

par blocage des dislocations. Parmi les obstacles qui permettent un durcissement des métaux on distingue : les atomes étrangers, les autres dislocations, les particules précipités et les joints de grains (voir chapitre sur les alliages dentaires).

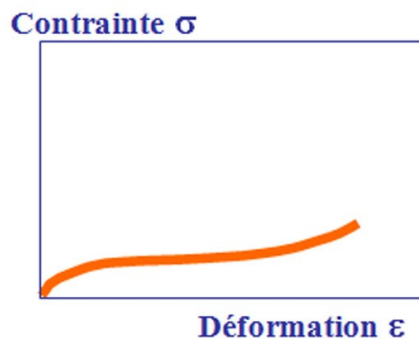
**Figure 13. Courbe contrainte-déformation. Comportement ductile**



**Un comportement élastique non linéaire.** La déformation élastique n'est pas proportionnelle à la charge qui la provoque. Un tel comportement est caractéristique de certains polymères thermoplastiques et des élastomères.

La force de rétraction élastique est engendrée par des mouvements browniens (agitation thermique des molécules) qui agitent les segments de chaînes macromoléculaires et cette force est très faible.

**Figure 14. Courbe contrainte-déformation. Comportement élastique non linéaire**



Les essais de compression et flexion

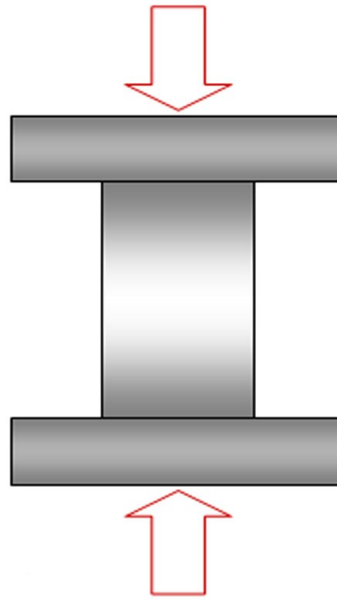
### III.5 ESSAI DE COMPRESSION

L'essai de compression consiste à soumettre une éprouvette de forme cylindrique, placée entre les plateaux d'une presse, à deux forces axiales opposées.

Si le matériau étudié est ductile, la rupture ne peut être atteinte avec ce test.

L'essai de compression est surtout utilisé pour déterminer la contrainte de rupture des matériaux fragiles (comme les céramiques) qui sont difficiles à usiner pour un essai de traction.

**Figure 15 : Test de compression simple**

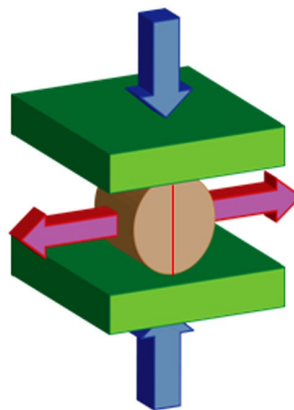


### III.6 TEST DE TRACTION DIAMÉTRALE

Le test de traction simple est difficile à réaliser pour les matériaux fragiles. Un test spécifique a été mis au point pour ces matériaux.

Ce test de traction diamétrale consiste à appliquer une charge sur le côté d'un échantillon cylindrique court jusqu'à la rupture.

C'est un test simple et très reproductible.



**Figure 16. Test de traction diamétrale**

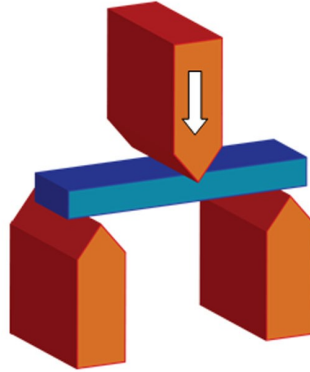
### III.7 TEST DE FLEXION TROIS POINTS

L'essai de flexion 3 points permet également de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. Une barrette du matériau à tester est placée sur deux appuis et l'on applique au centre de la barrette une force croissante jusqu'à rupture.

Comme l'essai de compression, l'essai de flexion ne permet généralement pas d'atteindre la

rupture des matériaux ductiles. L'essai de flexion est surtout adapté aux matériaux fragiles. Cet essai se caractérise par la simplicité du montage de l'éprouvette et sa géométrie simple (peu ou pas d'usinage). Lors du test, la partie supérieure est en compression et la partie inférieure en traction.

**Figure 17. Test de flexion 3 points**



Il existe d'autres types d'essais de flexion comme le test de flexion 4 points, similaire à l'essai de flexion 3 points avec l'avantage de ne pas positionner l'appui au niveau de la zone de rupture. Ceci est en effet une limitation du système à trois points où l'appui central peut endommager l'éprouvette et fausser ainsi les résultats en entraînant une rupture précoce de celle-ci. L'essai de Charpy (essai de résilience) est également un essai de flexion où l'éprouvette est brisée par un choc. Il est décrit plus loin.

## **IV ESSAI DE CISAILLEMENT**

---

À la différence d'un essai de traction ou de compression, un essai de cisaillement implique que toutes les sollicitations soient tangentielles à la surface d'application et qu'elles soient parfaitement égales en tous points de cette surface. Il ne doit y avoir aucune sollicitation perpendiculaire à cette surface.

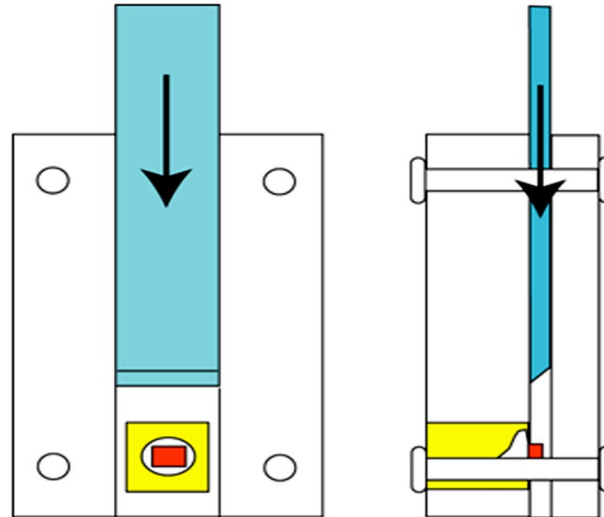
C'est un essai très intéressant pour évaluer un collage ou une liaison céramo-métallique.

Un essai de cisaillement est très difficile à réaliser sans qu'il apparaisse des forces parasites qui faussent les résultats.

La **figure 18** présente un essai de cisaillement pour étudier le collage d'un verrou orthodontique (en rouge) sur la face vestibulaire d'une dent. La lame de la guillotine (en bleu) vient pousser le verrou. La surface d'application de l'essai est la surface de collage du verrou.



Figure 18 : essai de cisaillement sur le collage d'un verrou orthodontique



## V ESSAIS DE DURETÉ

La dureté peut être définie comme une mesure de la résistance à la déformation plastique localisée. Les méthodes de mesure de la dureté sont basées sur la pénétration forcée d'un indenteur à la surface d'un matériau. Une valeur de dureté est déterminée par la mesure de la dimension ou de la profondeur de l'empreinte faite par l'indenteur soumis à des charges et des vitesses d'application contrôlées.

### V.1 ESTIMATION QUALITATIVE DE LA DURETÉ : ÉCHELLE DE MOHS

C'est une mesure (encore très utilisée) de dureté par rayure, mise au point par Friedrich MOHS (1773-1839) un minéralogiste.

Un matériau A est dit plus dur qu'un matériau B si A raye B et n'est pas rayé par B. L'échelle de Mohs qui en résulte est constituée par une séquence de minéraux de plus en plus durs. L'indice (de 1 à 10) associé à chaque minéral est appelé dureté MOHS.

Tableau 1 : Dureté MOHS avec matériaux dentaires équivalents

<b>Talc</b>	<b>1</b>	<b>Plomb</b>
<b>Gypse</b>	<b>2</b>	<b>Or, Etain</b>
<b>Calcite</b>	<b>3</b>	<b>Cuivre, Argent</b>
<b>Fluorine</b>	<b>4</b>	<b>Fer, Nickel</b>
<b>Apatite</b>	<b>5</b>	<b>Cobalt, Aciers C</b>
<b>Feldspath</b>	<b>6</b>	<b>Titane, MgO</b>
<b>Quartz</b>	<b>7</b>	<b>Manganèse</b>
<b>Topaze</b>	<b>8</b>	<b>Acier</b>
<b>Corindon</b>	<b>9</b>	<b>Alumine</b>
<b>Diamant</b>	<b>10</b>	<b>Carbure de bore</b>

Ongle H=2,5
Penny en cuivre H=3,5
Lame de couteau H=5,5

Ce mode de détermination de la dureté demeure très qualitatif.

## V.2 ESSAIS DE DURETÉ QUANTITATIFS

Les essais consistent à enfoncer un pénétrateur (indenteur) dans le matériau. La charge est constante pendant un temps donné et on mesure la dimension de l'empreinte. L'empreinte est d'autant plus grande que le métal est mou.

La dureté H (hardness) s'exprime par le rapport de la force sur la surface de l'empreinte. La dureté est un test empirique et ne correspond pas à une propriété du matériau.

Mais ce test de dureté permet de caractériser les matériaux et de déterminer s'ils sont adaptés à leur utilisation clinique.

### V.2.1 Essai BRINELL

Johan August BRINELL (1849-1925), ingénieur métallurgiste suédois, travaillait sur la transformation des aciers en fonction de la température. Il avait besoin d'un test rapide non destructif pour déterminer la dureté des différents aciers testés. Il met au point son test de dureté BRINELL basé sur un indenteur bille, pour alliages métalliques peu durs.

L'essai consiste à imprimer dans la pièce une bille en acier ou en carbure de tungstène de diamètre D sous une charge F et à mesurer le diamètre d de l'empreinte.

**Dureté Brinell**  $HB = \frac{F}{p} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$  (surface d'une calotte sphérique)

F = charge d'essai (fonction du matériau) de 500 à 3000 daN

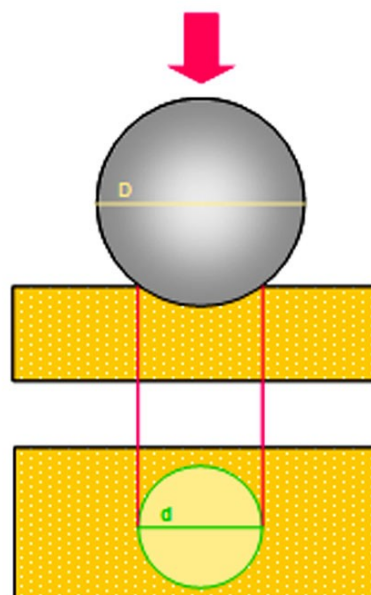
D = diamètre de la bille (5 ou 10 mm)

d = diamètre de l'empreinte en mm

La charge est appliquée progressivement pendant 15 secondes et maintenue à sa valeur finale pendant 15 secondes.

L'essai BRINELL est très peu utilisé en Odontologie. Pourquoi ?

Figure 19. Principe de l'essai de dureté BRINELL



### V.2.2 Essai VICKERS

SMITH et SANDLAND, ingénieurs chez VICKERS Ltd GB ont besoin de tester des matériaux trop durs pour le test BRINELL. En 1925, ils conçoivent une pyramide diamant. Cette pyramide de diamant à base carrée a un angle au sommet de  $136^\circ$ . Après l'indentation, on mesure la moyenne des diagonales  $d_1$  et  $d_2$  de l'empreinte en microscopie optique.

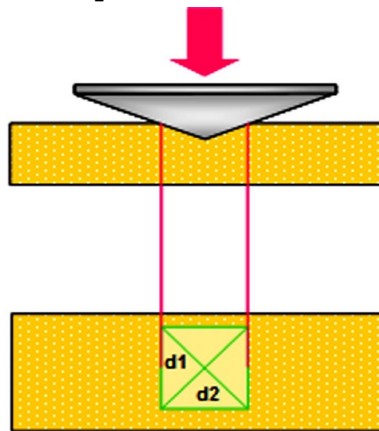
**Dureté Vickers**  $HV = 1,854 F/d^2$

F = charge d'essai (de 1 à 120 daN)

D = diagonale (moyenne de  $d_1$  et  $d_2$ ) de l'empreinte en mm

L'essai VICKERS est adapté pour les alliages durs et les céramiques.

Figure 20. Principe de l'essai de dureté VICKERS



### V.2.3 Essais ROCKWELL

Stanley ROCKWELL travaille comme métallurgiste dans une usine de roulements à billes. Il vérifie les traitements thermiques par des tests de dureté. L'essai BRINNEL donne une indentation trop grosse. L'essai VICKERS est trop long. En 1922, ROCKWELL conçoit un nouveau système avec différents pénétrateurs, adapté aux métaux et aux plastiques avec une large gamme de matériaux testés.

Pénétrateur :

-soit bille en acier de diamètre 1,59 mm = Rockwell b pour les matériaux mous comme les alliages de cuivre

-soit cône en diamant d'angle au sommet  $120^\circ$  et dont l'extrémité est une calotte sphérique de rayon 0,1mm = Rockwell c, pour les matériaux plus durs comme l'acier.

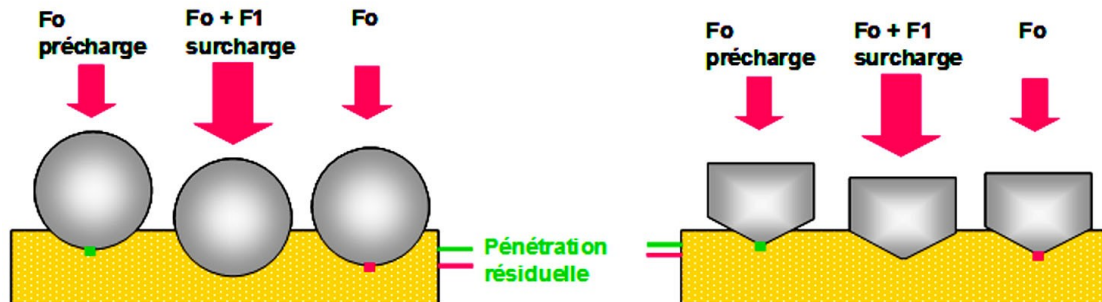
Précharge  $F_0$  faible de 10 daN = niveau de référence

Surcharge  $F_1$  de 60 à 150 daN

Charge  $F_2 = F_0$  à nouveau de 10 daN

On mesure la profondeur de l'empreinte = différence des 2 positions ( $F_2 - F_1$ )

Figure 21. Principe de l'essai de dureté ROCKWELL b et ROCKWELL c



En fonction du type d'indenteur et de la valeur de la charge appliquée on détermine différents types de duretés ROCKWELL (échelle de A à H, de K à M, P, R, S, V) adaptées aux différents types de matériaux. Quand les pièces sont de faibles épaisseur ou diamètre, comme en Odontologie, les duretés Vickers et Rockwell donnent de trop grandes empreintes et on leur préfère les essais de microdureté.

## V.2.4 Essais de microdureté

### 6.2.4.1. VICKERS micro

Essais sous très faibles charges inférieures à 0,2 daN avec une pyramide diamant Vickers. La mesure de la dimension se fait avec un microscope métallographique. Les empreintes font quelques microns.

### 6.2.4.2. Dureté KNOOP

Cet essai a été élaboré par Frederick KNOOP en 1939 au Bureau National des Standards aux Etats-Unis.

L'indenteur est une pyramide de diamant asymétrique avec un angle de  $170^\circ$  pour un axe et de  $130^\circ$  pour l'autre.

La charge est inférieure à 1 daN. On obtient des empreintes inférieures au 1/10 de mm.

L'essai KNOOP est utilisé pour des corps particulièrement fragiles comme les verres, les céramiques ou la dentine. Il existe également des applications spécifiques pour les plastiques.

Quelle que soit la méthode d'essai de dureté choisie, la réalisation de mesures de dureté exige certaines précautions :

- opérer sur une surface plane et polie
- la charge doit être appliquée perpendiculairement à la surface et sans choc.

De plus, il existe des essais de dureté plus spécifiquement adaptés aux polymères ou aux métaux mous.

## V.2.5 Essais spécifiques pour polymères et métaux mous

### 6.2.5.1. Dureté SHORE

Cet essai, utilisé depuis 1907, a été conçu pour les polymères. Il mesure la dureté en terme d'élasticité du matériau. Il utilise un indenteur sphérique ou conique en acier dont on enregistre le rebond. On distingue une dureté SHORE A pour les caoutchoucs mous et une dureté SHORE D pour les caoutchoucs plus durs.

### 6.2.5.2. Dureté BARCOL

Essai inventé par Walter COLMAN qui fonda la firme BARBER-COLMAN. C'est un système portable qui utilise de faibles charges de l'ordre de 1 daN.

Il est adapté pour les métaux mous comme l'aluminium et les plastiques. Il existe 3 modèles adaptés chacun à une gamme de matériaux.

## VI RUPTURE FRAGILE. ESSAI DE RÉSILIENCE

---

La connaissance des caractéristiques mécaniques déduites de l'essai de traction peut être insuffisante, puisque des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite élastique dans des conditions particulières qui rendent le matériau fragile.

La **rupture** est la séparation d'un matériau en deux ou plusieurs parties sous l'action d'une contrainte. Cette séparation se produit à plus ou moins grande vitesse par propagation de fissures existant dans le matériau. La rupture est donc fortement influencée par la présence de microfissures, de pores, d'inclusions de particules fragiles (défauts internes) et par la présence d'entailles (macrofissures) résultant de défauts de fabrication ou de conception.

Tous les matériaux contiennent un certain nombre de microfissures qui deviennent instables et conduisent à la rupture lorsque la force appliquée dépasse une valeur critique.

L'étude élémentaire de la mécanique de la rupture montre que la rupture dépend de deux grandeurs : la contrainte appliquée  $\sigma$  (sigma) et la dimension  $l$  des microfissures. Ces deux grandeurs sont combinées dans le facteur d'intensité des contraintes  $K$ . La rupture se produit lorsque l'on atteint la valeur critique  $K_c$ .

Nous avons visualisé dans l'essai de traction une rupture ductile. Elle se produit après une déformation plastique plus ou moins grande. Elle semble liée essentiellement à la présence d'inclusions plus dures que le métal. Il y a déformation plastique autour des inclusions, formation de microcavités, allongement et coalescence de ces microcavités aboutissant à la rupture.

Il existe un autre type de **rupture dite fragile**. Elle se produit après une déformation plastique très faible voire nulle. Elle est caractérisée par la propagation très rapide possible des fissures (consommation d'énergie faible) soit au travers des grains, soit le long des joints de grains.

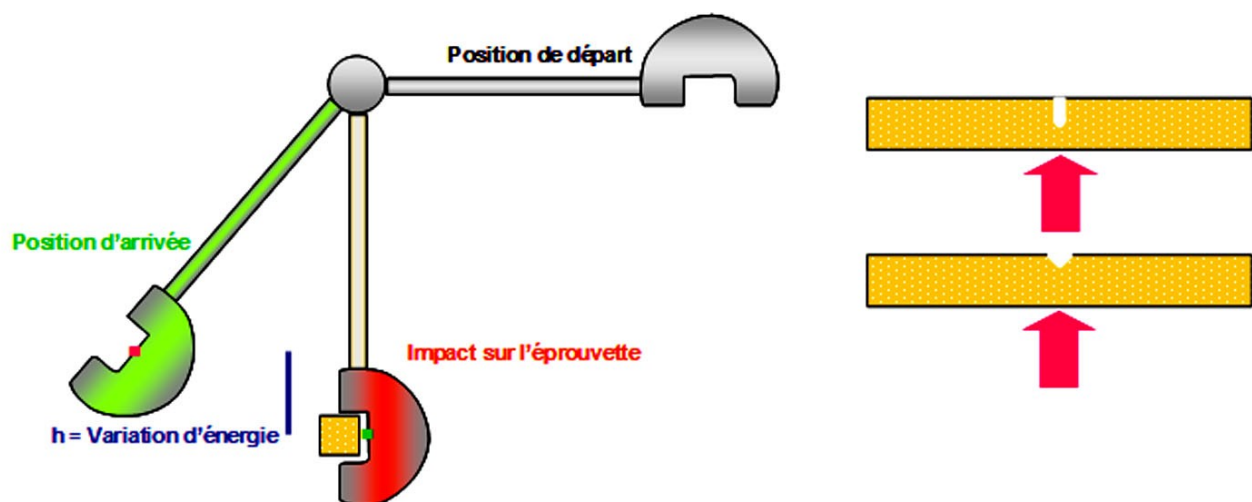
L'**essai de résilience** a été élaboré pour prendre en compte ces phénomènes de rupture. Le moyen le plus classique pour caractériser la fragilisation du matériau sous l'action d'un choc est cet essai de résilience qui est un essai de flexion par choc sur une éprouvette entaillée qui mesure la résistance d'un matériau à la rupture brutale. Il est fréquemment dénommé essai de résilience CHARPY ou même essai CHARPY. En effet, Georges CHARPY, ingénieur dans une usine sidérurgique, met au point en 1901 la machine (mouton CHARPY) qui permet de réaliser cet essai de résilience. Cet essai a permis d'améliorer la qualité des aciers et d'éviter les accidents liés à leur possible fragilité.

C'est un essai de résistance au choc, qui consiste à mesurer l'énergie nécessaire pour casser une éprouvette préalablement entaillée. On utilise en général un échantillon en forme de barreau de section carrée et de dimension standard (10mmx10mmx55mm).

L'entaille peut être soit en V (angle de 45° et de profondeur 2mm), soit en U de profondeur 5mm et de rayon en fond d'entaille de 1mm.

L'essai consiste à imposer un choc à l'aplomb de l'entaille, l'éprouvette étant maintenue par deux appuis sur la face opposée de façon à provoquer l'ouverture de la fissure. On utilise pour cela un mouton-pendule de CHARPY.

Figure 22. Principe de l'essai de résilience utilisant un mouton-Charpy



On détermine l'énergie absorbée dont on déduit la résilience.

La résilience est l'énergie exprimée en Joules par cm<sup>2</sup>, nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette.

Résilience = énergie absorbée par la rupture W (joules) / section au niveau de l'entaille (cm<sup>2</sup>)

Un couteau fixé sur un marteau oscille dans un plan vertical autour d'un axe O.

Le couteau est écarté de la verticale à une hauteur correspondant à une énergie de départ  $W_0 = 300$  joules. On libère le couteau. Dans sa chute en passant à la verticale, il brise l'éprouvette. On mesure la hauteur à laquelle remonte le pendule pour calculer l'énergie non absorbée  $W_1$ .

On calcule l'énergie absorbée par la rupture  $W = W_0 - W_1$

La résilience s'exprime en  $J/cm^2$ .

On la note  $K_{Cv}$  ou  $K_{Cu}$  (Charpy + entaille V ou U)

Il existe encore un autre type de rupture dite par fatigue. Lorsque le matériau est soumis à des sollicitations répétées, la fissuration peut progresser sans que le facteur d'intensité des contraintes ne dépasse la valeur critique  $K_c$ . Ces sollicitations entraînent finalement la rupture de l'échantillon par fatigue.

On constate ces ruptures :

- sous sollicitation cyclique (fatigue mécanique ou thermique)
  - sous sollicitation statique (corrosion sous contrainte, fluage)
  - sous sollicitation complexe (fatigue-corrosion, fatigue-fluage).
- Un essai de fatigue a ainsi été mis au point.

## **VII ESSAIS DE FATIGUE**

---

On appelle fatigue une sollicitation mécanique alternée, souvent mais pas nécessairement périodique, et de faible amplitude.

La fatigue est souvent à l'origine de la rupture des pièces prothétiques dentaires, d'où la nécessité de reproduire ce mode de sollicitation au laboratoire.

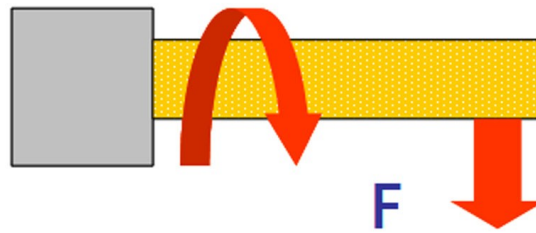
Lorsque l'on soumet un matériau à des cycles répétés d'efforts, il subit des modifications de microstructure regroupés sous le terme général d'endommagement par fatigue.

Cet endommagement ne se signale par aucune modification macroscopiquement décelable et la rupture peut intervenir à des niveaux de contraintes peu élevés, souvent inférieurs à la résistance à la traction ou même à la limite d'élasticité.

Le processus de fatigue implique l'apparition d'une fissuration qui se développe progressivement sous l'action de la répétition des sollicitations.

Les essais les plus simples consistent à imposer à des séries d'éprouvettes (cylindriques ou rectangulaires) des cycles d'efforts périodiques sinusoïdaux soit par charge axiale soit par flexion rotative.

Figure 23. Principe de l'essai de fatigue par flexion rotative ou charge axiale

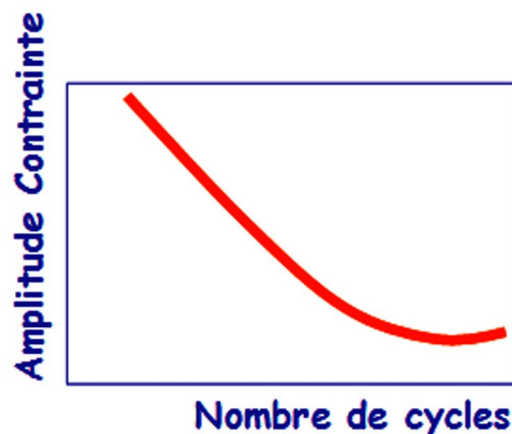


Ce sont les surfaces de l'échantillon qui subissent la contrainte maximale et vont donc être le siège de l'amorçage de la rupture, d'où la nécessité d'un état de surface particulièrement soigné.

Pour chaque niveau de contrainte  $s_{max}$ , on détermine sur une série d'éprouvettes la distribution du nombre de cycles à rupture. On obtient ainsi le diagramme de WÖHLER qui représente la relation expérimentale entre  $s_{max}$  et  $N$  durée de vie de l'éprouvette.

Auguste WÖHLER était un ingénieur allemand qui, préoccupé par la rupture prématurée d'essieux de wagons de chemin de fer, s'est attaché, vers 1870, à déterminer le comportement des matériaux soumis à la fatigue.

Figure 24. Schéma d'un diagramme de WÖHLER type





## VIII ESSAIS DE FLUAGE

---

L'essai de fluage consiste à appliquer un effort  $F$  à l'échantillon (traction ou compression) et à enregistrer son allongement ou sa réduction  $DL$  en fonction du temps.

La différence de principe entre essai de traction et essai de fluage en traction réside donc dans le fait que c'est une vitesse de déformation qui est appliquée dans le premier cas et une contrainte dans le second.

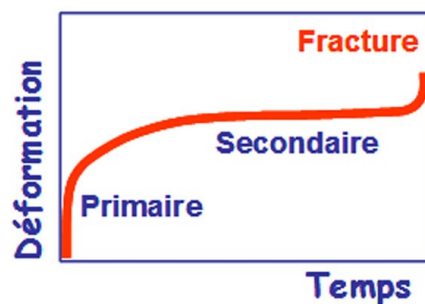
La plupart des métaux ont des températures de fusion élevées, le fluage n'apparaît que pour des températures très supérieures à la température ambiante. Mais certains alliages comme l'amalgame en Odontologie (alliage polyphasé), du fait du mercure, possèdent des phases dont la température de fusion est proche de la température ambiante. L'amalgame peut fluer sous son propre poids à température ambiante. Les polymères fluent pour la plupart à température ambiante.

La température à laquelle un matériau commence à fluer dépend de sa température de fusion  $T_f$  (les métaux fluent à partir de  $0,4T_f$ , les céramiques à partir de  $0,5T_f$ ) ou de sa température de transition vitreuse  $T_g$  (les polymères fluent à partir de  $1T_g$ ).

Pour les métaux, les céramiques et les polymères, la réponse expérimentale (courbe de fluage) comporte trois domaines plus ou moins apparents selon le matériau et la température :

- Le fluage primaire au cours duquel la vitesse de déformation diminue corrélativement à une augmentation de résistance du matériau,
- Le fluage secondaire au cours duquel la vitesse de déformation reste constante,
- Le fluage tertiaire caractérisé par une augmentation de la vitesse de déformation associée à l'apparition d'un endommagement sensible à l'échelle mécanique (formations de cavités).

Figure 25. Schéma d'un diagramme de fluage type



Cette déformation plastique fonction du temps résulte, pour les faibles contraintes d'un réarrangement atomique (fluage par diffusion), pour les contraintes élevées de la montée des dislocations (fluage par dislocations).

## **IX ANNEXES**

---

### **BIBLIOGRAPHIE**

- : Encycl. Méd. Chir. (Paris-France, Odontologie, 23063 B10, 7-1990, 17p.
- BAILON JP, DORLOT JM. : Des matériaux. Presses Internationales Polytechniques, 2000, 736p.
- GORDON JE. : Structure et Matériaux. L'explication mécanique des formes. Pour La Science Diffusion Belin, 1994, 213p.
- KURZ WK, MERCIER JP, ZAMBELLI G. : Introduction à la Science des Matériaux. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1995, 404p.
- LE MEN A. : Propriétés mécaniques des biomatériaux de restauration utilisés en art dentaire, Editions techniques