

## Science des matériaux

### Les propriétés mécaniques des biomatériaux

Pr BENTAHAR Oussama  
2023-2024



#### Objectifs du cours :

- Connaître les propriétés mécaniques des biomatériaux
- Expliquer les principes des essais mécaniques
- Construire et interpréter une courbe contrainte-déformation

#### Introduction

##### 1- Essais mécaniques

- 1.1. Essai de traction
- 1.2. Essai de résilience
- 1.3. Essai de dureté
- 1.4. Essai de flexion
- 1.5. Essai de fatigue
- 1.6. Essai de Fluage

#### Introduction

##### Propriétés mécaniques dépendent de

- nature du matériau (mode d'élaboration, composition chimique),
- structure du matériau,
- traitements de surface,
- facteurs environnants,
- homogénéité (imperfections, impuretés...).

#### 1. Essais mécaniques

Destructifs

Semi-destructifs

Non destructifs

#### 1. Essais mécaniques

##### ► 2 objectifs :

- établir la qualification des matériaux;
- permettre le choix du meilleur matériau en fonction de sa future utilisation.

## 1. Essais mécaniques

Essais peu liés au temps :

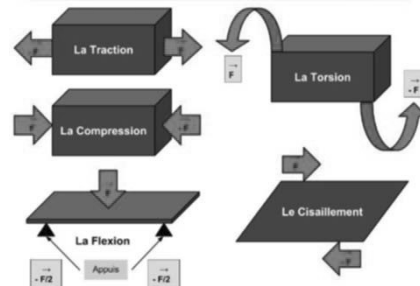
- Traction ou compression
- Dureté
- Résilience

Essais liés au temps :

- Fatigue
- Fluage

## 1. Essais mécaniques

Les principales contraintes mécaniques



## 1. Essais mécaniques

Type de contrainte	Description	Symbole	Exemples
Compression	Les forces ont tendance à écraser le matériau.		Une suspension de vélo qui amortit les chocs; les ressorts d'un matelas qui se compriment sous notre poids; une canette que l'on écrase; etc.
Traction	Les forces ont tendance à étirer le matériau. La traction est l'inverse de la compression car les forces y agissent en sens opposé.		Deux équipes qui tirent sur une corde lors d'une souque à la corde; le câble d'une grue mécanique qui s'étire lorsqu'il soulève du poids; du cuivre qu'on étire pour en faire du fil; etc.
Torsion	Les forces agissant sur le matériau ont tendance à le tordre.		Un pont qui se tord sous l'effet de forts vents; des fils électriques que l'on torsade pour en faire un câble; du linge qu'on essore; etc.
Flexion	Les forces feront courber le matériau sur lequel elles agissent.		Une tablette qui se courbe sous le poids des livres; un poisson qui fait fléchir une canne à pêche; des vêtements qui font courber une corde à linge; etc.
Cisaillement	Le matériau a tendance à se fendre, à se déchirer.		Du papier que l'on déchire; du métal que l'on découpe; etc.

## 1. Essais mécaniques

Type de déformation	Description	
Elastique	Changement temporaire dans la forme ou les dimensions d'un objet. Celui-ci reprend sa forme initiale dès qu'il n'y a plus de contrainte. C'est un changement réversible.	
Permanente (ou plastique)	Changement permanent dans la forme ou les dimensions d'un objet. C'est un changement irréversible car l'objet ne reprend plus sa forme initiale, même lorsque la force causant la déformation est supprimée.	
Rupture	Effet de l'objet sous l'effet d'une contrainte plus forte que le seuil de résistance de l'objet.	

### 1.1. Essai de traction

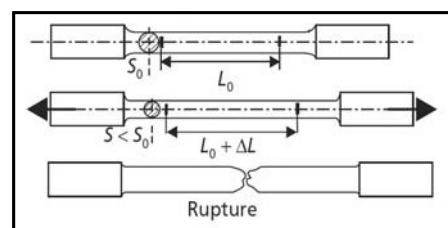
Contrainte  $\sigma$  → éprouvette (forme et dimensions calibrées) → mesure de élévation



Machine de traction

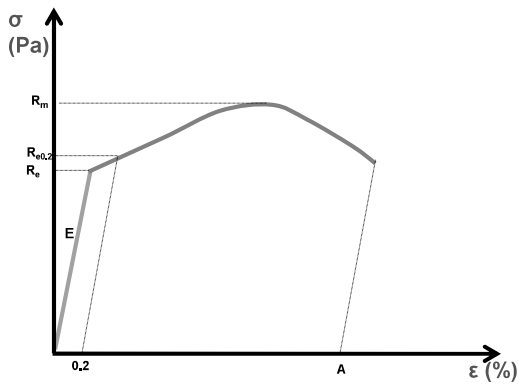
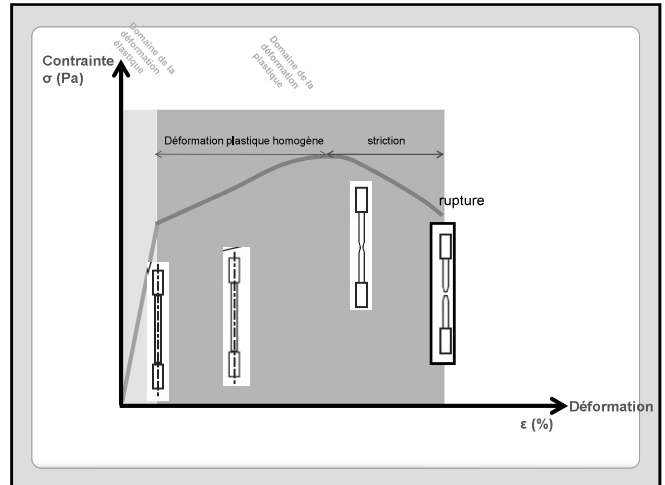
### 1.1. Essai de traction

Contrainte  $\sigma$  → éprouvette (forme et dimensions calibrées) → mesure de l'allongement ( $\Delta L$ )



## 1.1. Essai de traction

L'essai est réalisé sur une machine de traction. On applique progressivement et lentement (sans choc) à une éprouvette cylindrique de forme et de dimensions normalisées, un effort de traction croissant. Durant tout l'essai, on enregistre l'évolution de l'effort de traction (la contrainte  $\sigma = \frac{F}{S_0}$ ) en fonction de la déformation  $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$  de l'éprouvette. L'essai s'arrête à la rupture de l'éprouvette.



## 1.1. Essai de traction

Zone de déformation élastique

Module de Young :  $E$  (Pa)  $\Rightarrow$  rigidité

Loi de Hooke:  $\sigma = E \cdot \varepsilon$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{L_0 \cdot F}{\Delta L \cdot S_0}$$

## 1.1. Essai de traction

Zone de déformation plastique

Limite apparente d'élasticité :  $R_e$  ( $\frac{N}{mm^2}$ )  $\Rightarrow$  élasticité

Limite conventionnelle à 0.2 % d'élasticité :  $R_{e0,2\%}$

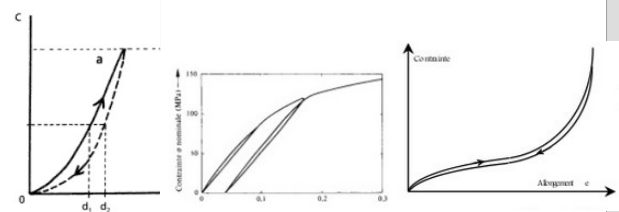
Charge de rupture:  $R_m$  ( $\frac{N}{mm^2}$ )  $\Rightarrow$  ténacité

Allongement à la rupture  $A$  :  $A(\%) = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \Rightarrow$  ductilité

Striction à la rupture  $Z$  :  $Z(\%) = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100$

## 1.1. Essai de traction

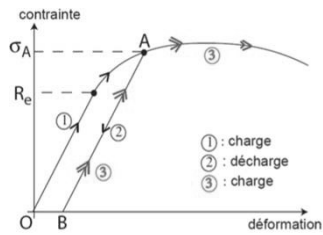
Phénomène d'hystérésis



Courbes contrainte-déformation. Le décalage de la courbe retour définit l'hystérésis (pour une même valeur de contrainte, la déformation est plus importante en retour qu'en aller).

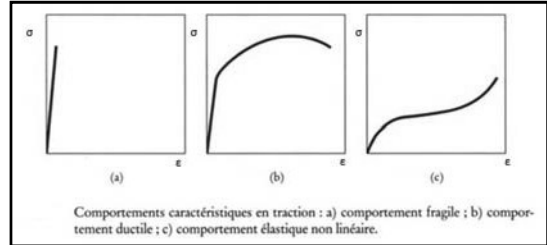
### 1.1. Essai de traction

Ecrouissage



### 1.1. Essai de traction

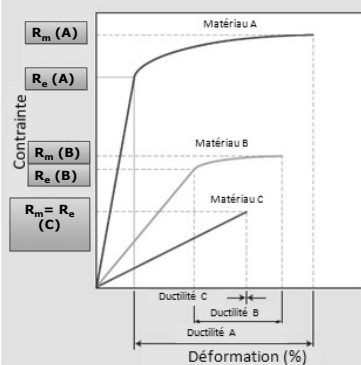
Trois types de courbes de traction correspondent à trois comportements possibles des matériaux :



Comportements caractéristiques en traction : a) comportement fragile ; b) comportement ductile ; c) comportement élastique non linéaire.

### 1.1. Essai de traction

Caractéristiques mécaniques	Symboles conventionnels	Propriétés pratiques
Module d'élasticité en Pa	E	Rigidité
Limite élastique en Pa	$R_e$	Elasticité
Résistance à la traction en Pa	$R_m$	Ténacité
Allongement à la rupture en %	A	Ductilité



Kenneth Anusavice Chiayi Shen H, Ralph Rawls, Phillips' Science of Dental Materials 12th Edition, Elsevier Health Sciences, 2014

**Courbe contrainte/déformation d'un fil orthodontique en acier inoxydable**

$R_m = 1625 \text{ MPa}$   
 $R_{0.2} = 1536 \text{ MPa}$   
 $R_p = 1000 \text{ MPa}$   
 $E = 192 \text{ GPa}$

Kenneth Anusavice Chiayi Shen H, Ralph Rawls, Phillips' Science of Dental Materials 12th Edition, Elsevier Health Sciences, 2014

**Courbe contrainte/déformation de l'émail et de la dentine**

$R_m = 262 \text{ MPa}$   
 $R_p = 235 \text{ MPa}$   
 $R_m = 234 \text{ MPa}$   
 $R_p = 176 \text{ MPa}$   
 $E_{dentine} = 11.7 \text{ GPa}$   
 $E_{émail} = 33.6 \text{ GPa}$

Émail  
 Dentine  
 Pulpes  
 Gencives  
 Canal  
 Ligament  
 Couronne  
 Cément  
 Os alvéolaire  
 Apex de la racine  
 Vessigaux et nerf

Kenneth Anusavice Chiayi Shen H, Ralph Rawls, Phillips' Science of Dental Materials 12th Edition, Elsevier Health Sciences, 2014

## 1.2. Essai de résilience

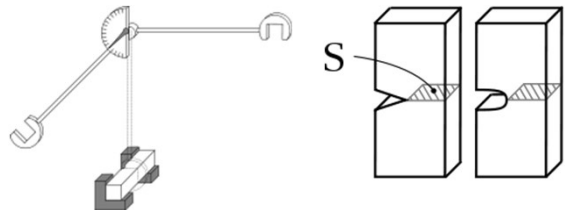
Mesure la résistance d'un matériau à un choc unique le détruisant.

La résilience s'exprime en  $\text{Joules.cm}^{-2}$  ( $\text{J/cm}^2$ ).

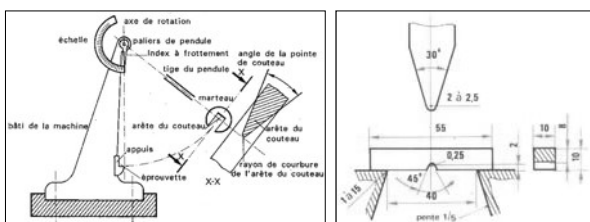
La forme de l'éprouvette est normalisée (entaille en U ou en V).

Elle est notée  $K_{CV}$  ou  $K_{Cu}$  (Charpy + entaille V ou U).

## 1.2. Essai de résilience



## 1.2. Essai de résilience



Mouton de Charpy

Éprouvette

## 1.2. Essai de résilience

On peut observer:

- des ruptures ductiles: dans la zone plastique;
- des ruptures fragiles: la pièce casse dans la phase élastique.

## 1.3. Essai de dureté

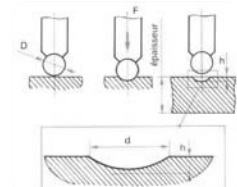
Mesure la résistance opposée par un matériau à la pénétration d'un matériau plus dur.

Il existe 3 procédés principaux:

- Dureté BRINELL;
- Dureté ROCKWELL;
- Dureté VICKERS.

## 1.3. Essai de dureté

Dureté Brinell



Pénétrateur

Bille ( $D=10\text{mm}$ ) en acier ou carbure de tungstène;

Force appliquée

3000 Kg<sub>f</sub> (29420 N);

Durée

2 à 8 s, puis maintien à la charge max 10 à 15 s;

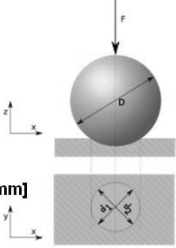
Mesure

Diamètre du cercle imprimé dans le matériau.

1 kgf = 9,80665 N

### 1.3. Essai de dureté

**Dureté Brinell**  
 HB = Dureté Brinell.  
 F = Force appliquée [N]  
 D = Diamètre de la bille [mm]  
 d = Diamètre de l'empreinte laissée par la bille [mm]  
 g = Accélération terrestre [m s<sup>-2</sup>] (9.80665)



$$HB = \frac{2 \cdot F}{g \cdot \pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} = 0,0649 \cdot \frac{F}{D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

### 1.3. Essai de dureté

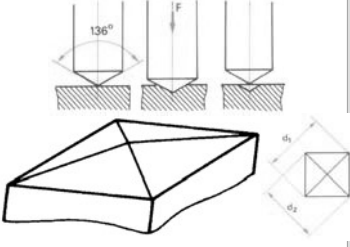
**Dureté Brinell**

Quelques valeurs de Brinell pour quelques matériaux :

Matériau	Nombre de Brinell
Aluminium	15 HB
Cuivre	35 HB
Acier inoxydable	250 HB
Verre	550 HB

### 1.3. Essai de dureté

**Dureté Vickers**



**Pénétrateur:** diamant en forme de tétraèdre (pyramide);  
**Force appliquée:** 5 à 100 Kg<sub>f</sub> (49 à 980 N);  
**Mesure:** faite à partir des diagonales de l'empreinte.

### 1.3. Essai de dureté

**Dureté Vickers**

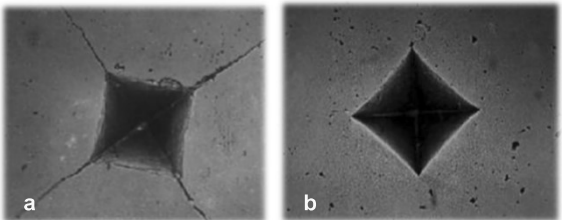
$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{d^2}$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

H<sub>v</sub> : dureté Vickers  
 d<sub>1</sub> et d<sub>2</sub> : mesure des diagonales de l'empreinte réalisée à 90° (mm)  
 F : charge d'essai (Kg<sub>f</sub>)

### 1.3. Essai de dureté

**Dureté Vickers**



**Empreintes de dureté Vickers. a) matériau fragile b) matériau ductile**

### 1.3. Essai de dureté

**Dureté Vickers**

Matériaux	HV
Email	350
Dentine	60
Résine acrylique	20
Amalgame dentaire	100
Céramique dentaire	450
Alliage Co-Cr	420

### 1.3. Essai de dureté

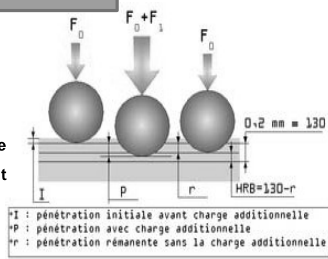
#### Dureté Rockwell

##### Pénétrateur

Bille en carbure de tungstène (essai B) ou cône en diamant (essai C).

##### Principe

mesurer en 3 temps, la profondeur de pénétration dans le matériau testé d'abord sous une première charge  $F_0$  (précharge), puis on applique une charge supplémentaire  $F_1$  (charge d'essai  $F = F_0 + F_1$ ), le 3<sup>ème</sup> temps consiste au retour à la précharge  $F_0$ .



### 1.3. Essai de dureté

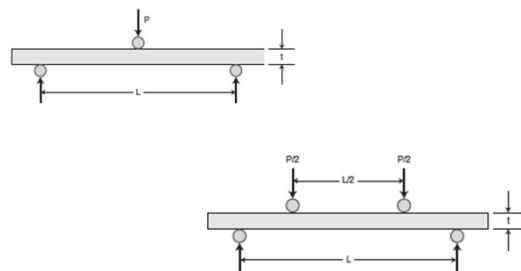
#### Dureté Rockwell

**Mesure:** est celle de l'accroissement de la profondeur de pénétration amenée par la surcharge  $F_1$   
 Une unité Rockwell correspond à un enfoncement de 0,002 mm.

- $HRB = 130 - (500 \times r)$
- $HRC = 100 - (500 \times r)$

Méthode d'essai	Géométrie du pénétrateur	Charge $F$	Principe de l'essai	Paramètre mesuré	Dureté
Brinell	Bille d'acier dur ou de carbure (10 mm de diam.)	3000 kgf		Diamètre de l'empreinte ( $d$ )	$HB = \frac{2 \cdot F}{g \cdot \pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pyramide de diamant à base carrée; angle entre les faces opposées: $136^\circ$	5 à 100 kgf		Diagonale de l'empreinte ( $d$ )	$HV = \frac{0,189 \cdot F}{d^2}$
Rockwell C	Cône de diamant d'angle au sommet de $120^\circ$	Précharge $f$ de 10 kgf; $F = 150$ kgf		Profondeur de l'empreinte	$HRC = 100 - (500 \times r)$
Rockwell B	Bille d'acier dur (1,59 mm de diam.)	Précharge $f$ de 10 kgf; $F = 100$ kgf	Même principe que Rockwell C	Profondeur de l'empreinte	$HRB = 130 - (500 \times r)$

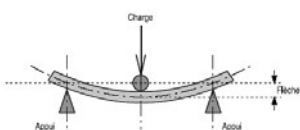
### 1.4. Essai de flexion



### 1.4. Essai de flexion

Essai plus adapté aux matériaux céramiques

On impose à une éprouvette normalisée une déformation, ou flèche, à vitesse de déformation constante, et on mesure la force qu'oppose l'éprouvette à cette déformation.



### 1.4. Essai de flexion

Une éprouvette plate est sollicitée en flexion 3 points ou 4 points entre les appuis d'une machine imposant le déplacement. La courbe force/flèche enregistrée permet de déduire  $E$  et  $R_e$ .

### 1.5. Essai de fatigue

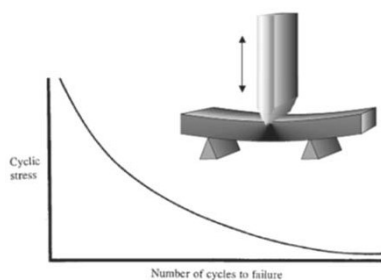
On appelle fatigue d'un matériau, sa résistance à des efforts infiniment répétés, tous situés dans le domaine élastique.

La rupture en fatigue survient par le développement de microfissures dans le matériau (bulle de gaz, rayure, joints de grains)

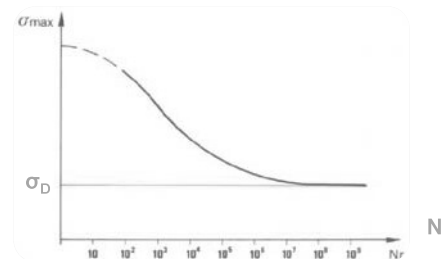
### 1.5. Essai de fatigue

On sollicite jusqu'à rupture plusieurs éprouvettes du même métal, et selon le nombre de cycles de rotation qu'elles ont réussi à encaisser et la contrainte à laquelle elles ont été soumises, on détermine la limite de rupture en fatigue : Limite d'endurance ( $\sigma_D$ ), contrainte que peut subir indéfiniment, sans dommage, un matériau.

### 1.5. Essai de fatigue



### 1.5. Essai de fatigue

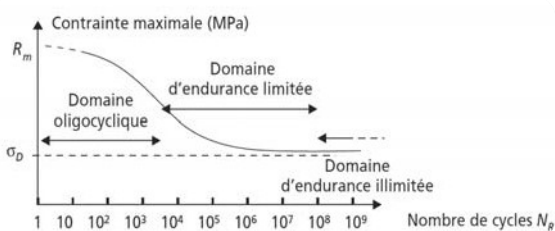


$N_R = 10^8$

Courbe de Whöler

Nombre de cycles à la rupture

### 1.5. Essai de fatigue



### 1.5. Essai de fatigue

On distingue sur cette courbe 3 domaines:

- **Domaine de fatigue plastique oligocyclique**  
Correspond à des contraintes fortes comprises entre  $R_m$  et  $R_e$ . Chaque cycle conduit à une déformation plastique macroscopique.  $N \approx 10^4$ - $10^5$  cycles.
- **Domaine d'endurance limitée**  
Correspond à des niveaux de contraintes  $< R_e$ .  $N \approx 10^5$  à  $10^7$  Cycles. C'est le domaine classique de la fatigue.
- **Domaine d'endurance illimitée**  
Pour des contraintes maximales  $< \sigma_D$  appelée limite d'endurance, la durée de vie  $>$  à celle prévue par les essais ( $N > 10^7$  à  $10^9$  cycles).



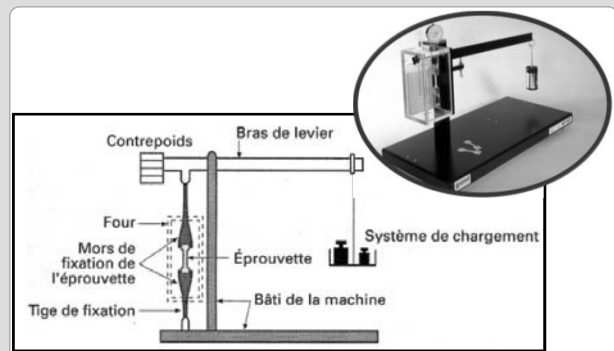
### 1.5. Essai de fluage

Définit la déformation observée lorsqu'une éprouvette est soumise pendant un temps long à une contrainte correspondant au domaine élastique du matériau, à température constante.

Le fluage est encore appelé déformation visqueuse.

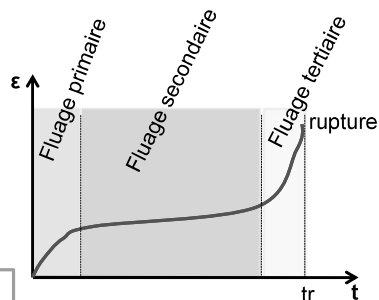
Une courbe du fluage en fonction du temps est tracée.

Le fluage peut être étudié en traction, en compression ou encore en flexion.



Appareil pour essai de fluage

### 1.6. Essai de fluage



t: temps  
ε: Déformation  
tr: temps à la rupture

Courbe théorique d'un essai de fluage

Trois zones différentes :

- le fluage primaire : pendant lequel la vitesse de déformation diminue, ce qui correspond à une augmentation de résistance du matériau ;
- le fluage secondaire : qui fait apparaître une vitesse de déformation constante, qui est la vitesse minimale ;
- le fluage tertiaire : caractérisé par une augmentation de la vitesse de déformation qu'il faut associer à l'apparition d'un endommagement sensible à l'échelle mécanique ou à un adoucissement du matériau.

Le fluage peut être mis en évidence par un essai de traction.

Si la charge  $F$  est supprimée, l'éprouvette récupère rapidement une partie de l'allongement, puis progressivement et plus lentement une autre partie.

La déformation résiduelle qui subsiste mesure le fluage.

Plus la température est élevée, plus le phénomène est accentué.

