

CHAPITRE 1: INTRODUCTION

Présentation du chapitre 1

Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord l'importance des matériaux dans le métier d'ingénieur.

Les deux sections suivantes traiterons de la classification et des propriétés principales des matériaux.

En sciences des matériaux, il est possible de classer les matériaux de base en trois catégories, mais dans la construction, il est devenu courant de distinguer les matériaux selon les domaines d'emploi et les caractéristiques principales.

Les propriétés principales des matériaux de construction peuvent être généralement divisées en plusieurs groupes telles que:

- Propriétés physiques.
- Propriétés mécaniques.
- Propriétés chimiques.
- Propriétés physico-chimiques.
- Propriétés thermiques.

Dans le présent chapitre, nous verrons la classification des matériaux. ainsi les différentes propriétés physiques et mécaniques des matériaux de construction.

Sommaire du chapitre 1

1.1. L'ingénieur et les matériaux

1.2. Classification des matériaux

1.3. Propriétés des matériaux de construction

1.1. L'Ingénieur et les Matériaux

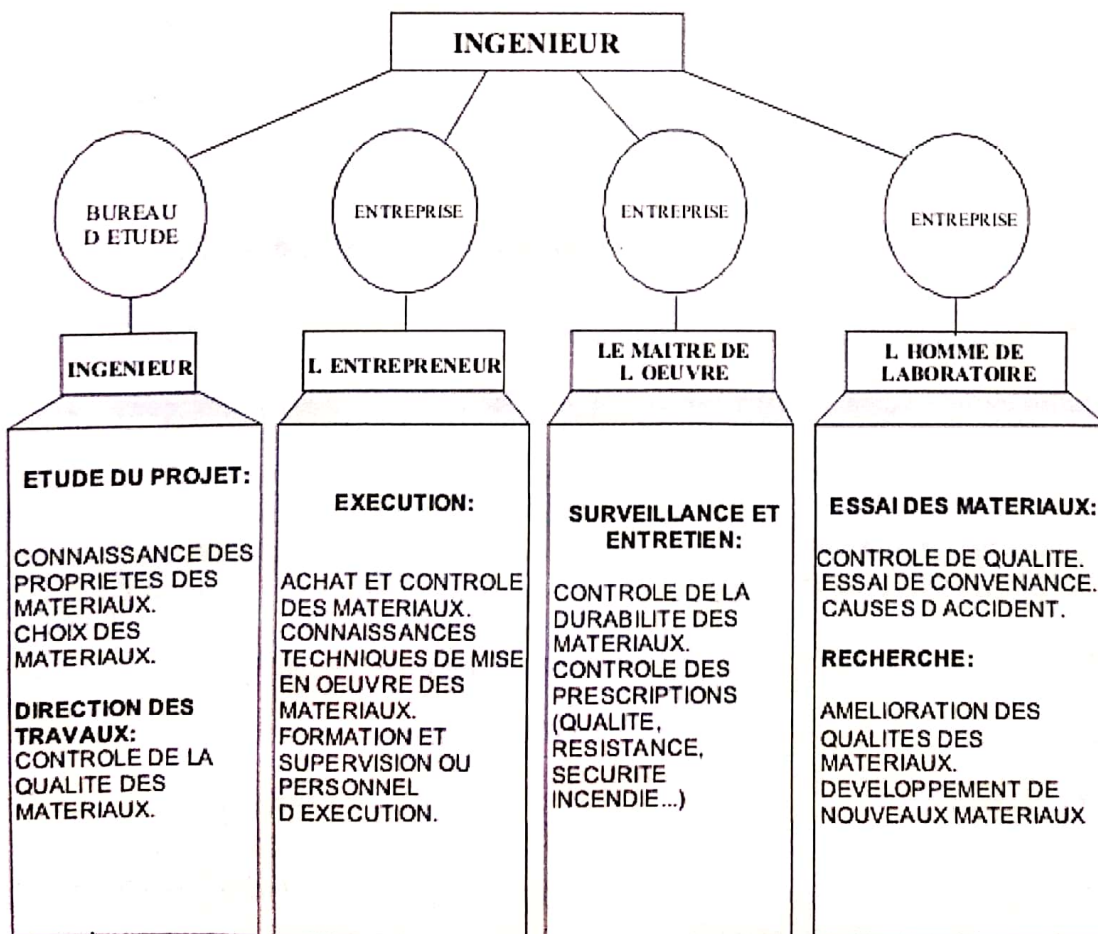
Il existe plusieurs définitions du terme ingénieur.

D'après Larousse: Homme qui conduit et dirige à l'aide des mathématiques appliquées des travaux d'Art.

D'après Robert: Personne qui a reçu une formation scientifique et technique le rendant apte à diriger certains travaux.

En général, l'ingénieur est une personne qui a terminé des études scientifiques de niveau Bac + 5 dans différents domaines: Génie civil, Génie électrique, Génie mécanique etc. Selon le programme des études d'ingénieur à l'Université Nationale du Laos, particulièrement en Génie civil, les étudiants doivent valider en tout 172 unités d'enseignement: 41 unités pour les cours généraux, 56 unités sur les sciences de base et 86 unités concernent la spécialité. Il y a 3 unités d'enseignement de spécialité sur les matériaux de construction.

Comme l'illustre le schéma suivant, l'ingénieur en génie civil doit connaître les matériaux quelque soit son domaine d'activité.



1.2. Classification des matériaux de construction

En sciences des matériaux, il est possible de classer les matériaux de base en trois catégories:

- Les métaux
- Les polymères
- Les céramiques

Mais dans la construction, il est devenu courant de distinguer les matériaux selon des domaines d'emploi et des caractéristiques principales: les matériaux de construction et les matériaux de protection.

Les **matériaux de construction** sont les matériaux qui ont la propriété de résister contre des forces importantes:

- Pierres
- Terres cuites
- Bois
- Béton
- Métaux, etc.

Les **matériaux de protection** sont les matériaux qui ont la propriété d'enrober et protéger les matériaux de construction principaux:

- Enduits
- Peintures
- Bitumes, etc.

1.3. Propriétés des matériaux de construction

Les propriétés principales des matériaux peuvent être divisées en plusieurs groupes tels que:

- Propriétés physiques: (la dimension; la densité; la masse volumique de différentes conditions; la porosité; l'humidité etc..),
- Propriétés mécaniques: (la résistance en compression, en traction, en torsion etc..)
- Propriétés chimiques: (l'alcalinité, l'acide etc..)
- Propriétés physico-chimiques: (l'absorption, la perméabilité, le retrait et le gonflement etc..)
- Propriétés thermiques: (la dilatation, la résistance et comportement au feu, etc..)

Quelques caractéristiques et propriétés physiques courantes des matériaux de construction sont:

Propriétés liées à la masse et au volume:

- Masse spécifique
- Masse volumique
- Porosité, densité

Propriétés liées à l'eau:

- Humidité

- Perméabilité
- Degré d'absorption d'eau
- Variation de dimension en fonction de la teneur en eau

Propriétés thermiques:

- Résistance et comportement au feu
- Chaleur spécifique
- Coefficient d'expansion thermique

Les caractéristiques et propriétés mécaniques principales d'un matériau sont: la résistance à la compression, la résistance à la traction, le module de formation, le module d'élasticité, etc.

Les matériaux de construction doivent:

1. posséder certaines propriétés techniques
2. pouvoir facilement être travaillés
3. être économiques.

La science des matériaux s'efforce de relier les propriétés macroscopiques des matériaux à leur structure microscopique.

La technologie des matériaux s'occupe des domaines d'application de la science des matériaux à l'art de construire (à savoir: choix des matériaux, détermination de leurs caractéristiques, connaissance de leurs propriétés, techniques de mise en oeuvre, méthodes d'essais, développement de nouveaux matériaux ou systèmes de matériaux).

Dans ce cours on va présenter quelques propriétés comme les propriétés physiques et les propriétés mécaniques.

1.3.1 Les propriétés physiques

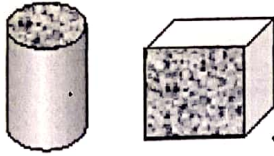
La masse volumique apparente

Définition: C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel, après passage à l'étuve à 105 ± 5 °C, notée γ_0 et exprimée en (gr/cm^3 ; kg/m^3 ; T/m^3).

Détermination:

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la masse volumique apparente des matériaux de construction selon leur dimension et leur dispersion:

a) Pour les matériaux solides : les roches naturelles, le béton, le bois ..., on peut faire des échantillons de forme géométrique (cubique, cylindrique, ..).



$$\gamma_{ap} = \frac{M_s}{V_{ap}}$$

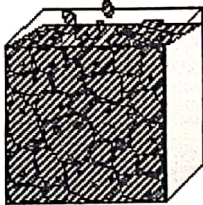
γ_{ap} - Masse volumique apparente (kg/m^3).

M_s - Masse d'un corps sèche.

V_{ap} - Volume apparent.

b) Pour les matériaux incohérents (ensemble de grains – sable ou gravier).

La détermination de la masse volumique apparente peut se faire en utilisant un récipient standart (de volume connu).



$$\gamma_{ap} = \frac{M_s}{V_{ap}}$$

γ_{ap} - Masse volumique apparente (kg/m^3).

M_s - Masse d'un corps sèche.

V_{ap} - Volume apparent.

La masse volumique d'un ensemble de grains est fortement influencée par la composition granulométrique, la forme des grains, le degré de tassement ainsi que la teneur en eau lorsque les grains sont petits. La masse volumique apparente des sables ou des graviers peuvent varier entre 1400 à 1650 kg/m^3 .

c) Pour les matériaux de construction qui n'ont pas de forme géométrique (forme de patate).

La détermination de la masse volumique apparente des matériaux avec cette forme peut se faire de façon indirecte. Dans ce cas, les échantillons étudiés doivent être enrobés de parafine afin d'être protégés de la pénétration de l'eau, ensuite on va les peser dans l'eau.

Pour déterminer la masse volumique des matériaux de ce type on a:

M_s - Masse sèche d'échantillon (g)

M_{S+P} - Masse sèche d'échantillon après avoir enrober une parafine (g).

$M_{(S+P)L}$ - Masse sèche d'échantillon après avoir enrobé de parafine et pesé dans l'eau (g).

g_p - Masse de la parafine ayant enrobé de l'échantillon et γ_p - masse volumique absolue de parafine.

$$\gamma_o = \frac{M_s}{\frac{(M_{S+P} - M_{(S+P)L})}{1} - \frac{g_p}{\gamma_p}}$$

$M_{S+P} - M_{(S+P)L}$ - est la poussée d'Archimède.

$\frac{(M_{S+P} - M_{(S+P)L})}{1}$ - volume apparent d'échantillon absorbée par la parafine.

$\frac{g_p}{\gamma_p}$ - volume de parafine.

La masse volumique absolue (γ)

Définition: C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule, pores à l'intérieur des grains exclus), après passage à l'étuve à 105 °C, notée ρ et exprimée en (g/cm^3 , kg/m^3 ou T/m^3).

Détermination:

Si les matériaux étudiés sont poreux, on doit les concasser et les broyer jusqu'à ce que la dimension des grains de matériaux (l'échantillon) devienne inférieure à 0,2 mm. Ceci afin d'éliminer les pores et les vides existants dans les matériaux. Ensuite, on verse l'échantillon dans un récipient, qui contient de l'eau pour pouvoir déterminer la masse volumique absolue (Voir la figure 1.3.1)

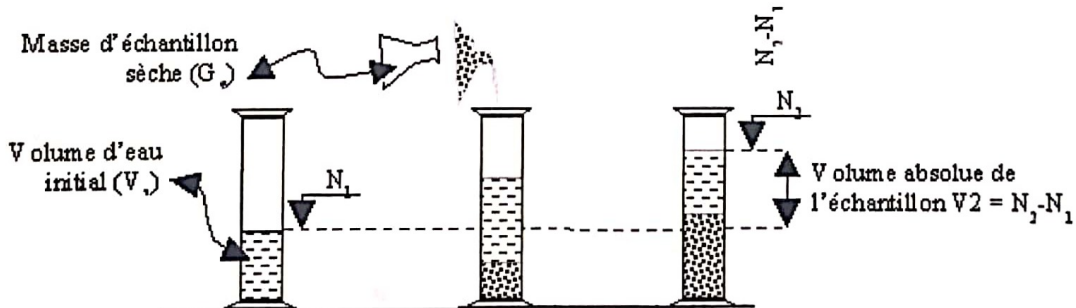


Fig 1.3.1: Détermination de la masse volumique absolue d'un matériau

D'abord on va remplir le volumétre d'eau (N_1), ensuite on verse l'échantillon sec dans le volumétre et le niveau de l'eau va augmenter (N_2). La différence entre le niveau N_1 et N_2 est le volume absolu de l'échantillon. La masse volumique absolue peut se calculer:

$$\gamma = \frac{M_s}{N_2 - N_1}$$

Si les grains ne sont pas poreux, la masse spécifique absolue et apparente sont identiques

$$\gamma_{\text{granulats usuels}} = 2,60 \text{ à } 2,70 \text{ (en moyenne } 2,68)$$

A la place de la masse spécifique et de la masse volumique, on utilise aussi les anciennes dénominations de poids spécifique et de poids volumique ainsi que les notions de densité apparente qui sont des nombres sans dimension égaux au rapport de la masse spécifique ou de la masse volumique à la masse d'un volume égal absolu ou apparent d'eau à 4° C.

La porosité et compacité (les granulats)

Porosité:

La porosité est le rapport du volume vide au volume total.

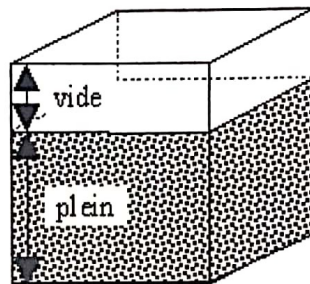


Fig 1.2: Volume quelconque

On peut aussi définir la porosité comme le volume de vide par unité de volume apparent.

$$p = \frac{\text{volume de vide}}{\text{volume total}}$$

Compacité:

La compacité est le rapport du volume des pleins au volume total.

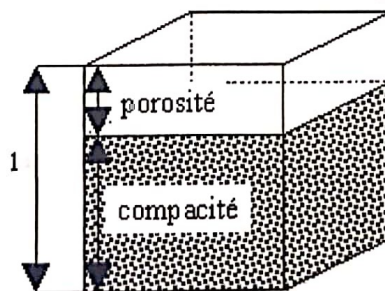


Fig 1.3: Volume initial

Ou volume des pleins par unité de volume apparent.

$$p = \frac{\text{volume plein}}{\text{volume total}}$$

La porosité et la compacité sont liées par relation:

$$p+c=1$$

Porosité et compacité:

La porosité et la compacité sont souvent exprimées en %. La somme des deux est alors égale à 100%. En effet:

$$p+c = \frac{\text{volume de plein}}{\text{volume total}} + \frac{\text{volume de plein}}{\text{volume total}} = \frac{\text{volume total}}{\text{volume total}} = 1$$

Si l'on connaît la masse volumique Δ et la masse spécifique γ_0 d'un matériau, il est aisé de calculer sa compacité et porosité.

$$c = \frac{\text{volume de plein}}{\text{volume total}} = \frac{V_{\text{absolu}}}{V_{\text{apparent}}} = \frac{V_{\text{absolu}}}{V_{\text{apparent}}} \cdot \frac{M}{M} = \frac{M/V_{\text{apparent}}}{M/V_{\text{absolu}}}$$

d'où $c = \frac{\Delta}{\gamma}$ ou, exprimée en %,

$$c\% = 100 \frac{\Delta}{\gamma}$$

$$p\% = 100 \left(1 - \frac{\Delta}{\gamma}\right)$$

L'humidité

L'humidité est une des propriétés importante des matériaux de construction. Elle est un indice pour déterminer la teneur en eau réelle des matériaux au moment de l'expérience. En général l'humidité est notée W et s'exprime en pourcentage (%). On peut déterminer l'humidité de matériaux quelconques en utilisant la formule suivante:

$$W = \frac{G_k - G_s}{G_s} \cdot 100\% \quad (\%)$$

où

G_s – est la masse sèche d'échantillon (après passage à l'étuve)

G_h – est la masse humide d'échantillon.

Le degré de l'humidité des matériaux dépend de beaucoup de facteurs, surtout de l'atmosphère où ils sont stockés, le vent, la température et de la porosité du matériau.

L'absorption de l'eau

L'absorption de l'eau du matériau est la capacité de conserver des échantillons quand ils sont immergés au sein de l'eau à température de 20,5 °C et à la pression atmosphérique. A cette condition l'eau peut pénétrer dans la plupart des vides intersticiels du matériau. Si la porosité du matériau est importante, l'absorption de l'eau est plus grande, mais l'absorption est toujours inférieure à la porosité du matériau.

On peut déterminer le degré d'absorption de deux manières:

a) L'absorption calculée suivant la masse du volume apparent d'échantillon notée H_v (%)

L'absorption volumique $H_v = \frac{G_{ab} - G_s}{V_0} \cdot (Kg/m^3)$

où

G_{ab} – est la masse absorbante.

G_s – est la masse sèche d'échantillon.

V_0 – est le volume apparent du matériau.

b) L'absorption calculée suivant la masse de l'échantillon notée H_p (%)

L'absorption massique $H_p = \frac{G_{ab} - G_s}{G_s} \cdot 100 \cdot (\%)$

où

G_{ab} – est la masse absorbante.

G_s – est la masse sèche d'échantillon.

~~V_0 – est le volume apparent du matériau.~~

Dégré de Saturation (Teneur en eau)

La résistance mécanique des matériaux dépend de plusieurs facteurs. Un des plus importants facteurs influençant la résistance est le degré de saturation. On a remarqué que les matériaux absorbants de l'eau, ont une résistance certainement diminuée. C'est pourquoi on doit déterminer le degré de saturation de matériaux.

Lorsque tous les vides d'un corps sont remplis d'eau, on dit qu'il est saturé. Le degré de saturation est le rapport du volume de vide rempli d'eau au volume total de vide. Il joue un grand rôle dans les phénomènes de destruction des matériaux poreux par le gel. En se transformant en gel, l'eau augmente de 9% en volume environ.

Le degré de saturation est l'absorption maximale de matériaux sous les conditions de pression et de température. Il y a deux moyens pour réaliser la saturation dans les échantillons de matériaux: l'immersion des échantillons dans l'eau bouillante et à la saturation en pression d'air.

Pour déterminer le degré de saturation en pression d'air, on a la démarche suivante:

- Immerger les échantillons dans l'eau.
- Donner la pression de base de 20 mm Hg jusqu'au moment où on peut éliminer toutes les bulles d'air.
- Ensuite on fait baisser la pression de base de 20 mm Hg à la pression atmosphérique. À ce moment là, presque tout le vide est rempli d'eau et dans ce cas-là on dit que les échantillons sont saturés.

Le degré de saturation peut se calculer par la formule suivante:

$$BH = \frac{G_{\text{sat}} - G_s}{V_0} \cdot \%$$

où

BH – est le degré de saturation (%)

G_{sat} – est la masse d'échantillon au moment de saturation.

G_s – est la masse sèche d'échantillon.

V_0 – est le volume apparent du matériau.

Mais de toutes façons, on ne peut pas remplir entièrement les vides de l'échantillon d'eau, c'est pourquoi il est obligatoire de présenter cette valeur en une autre solution: "coefficient de saturation", notée C_{BH} et exprimée en %. Ce coefficient peut être calculé avec la formule suivante:

$$C_{\text{sat}} = \frac{BH}{\gamma} \cdot \%$$

où

γ – est le degré de porosité.

BH – est le degré de saturation.

Pour connaître la diminution de la résistance de matériaux en présence d'eau, on utilise l'indice molle:

$$K_m = \frac{R_{BH}}{R_k} \cdot \%$$

où

K_m – Indice molle

R_{BH} – Résistance d'échantillon au moment de saturation..

R_k – Résistance d'échantillon sec.

A la place de la saturation, on utilise aussi la teneur en eau d'un matériau. Elle est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec. On peut aussi définir la teneur en eau comme le poids d'eau W contenu par unité de poids de matériau sec.

$$W = \frac{E}{P_s} = \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

où

E – Poids d'eau dans le matériau.

P_s – Poids du matériau sec.

P_h – Poids matériau humide

Si W est exprimé en % :

$$W \% = 100 \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

A partir des définitions données plus haut, on peut écrire les relations :

$$E = \frac{W\%}{100} P_s \qquad P_h = P_s + E = \left(1 + \frac{W\%}{100}\right) P_s$$

$$P_s = \frac{P_h}{1 + \frac{W\%}{100}}$$

$$E = \frac{W\%}{100 + W\%} P_h$$

L'eau et les matériaux pierreux (Divers états de l'eau dans un matériau poreux)

On distingue trois grandes catégories d'eau:

- L'eau absorbée: qui se trouve dans le vide entre les particules de matière solide;
- L'eau adsorbée: qui se trouve à la surface des particules solides; Plus les particules sont petites, plus cette eau joue un rôle important. La première couche moléculaire est orientée et présente des propriétés voisines de celles de l'état solide;
- L'eau chimiquement liée: qui fait partie des particules solides.

Ces distinctions ne sont pas toujours absolument claires.

Par exemple, dans le gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et dans le plâtre $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$, l'eau intervient dans l'édifice cristallin, mais tout en conservant son identité. Dans un spectre infra-rouge du gypse et du plâtre, il apparaît les bandes anhydrite CaSO_4 et eau H_2O juxtaposées. On parle d'eau d'hydratation ou de cristallisation.

Par contre, dans la réaction $\text{MgO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2$, l'eau se combine chimiquement en perdant son identité.

L'eau dans les granulats destinés à la confection des bétons

En général, les granulats naturels utilisés pour la confection du béton sont peu poreux et n'absorbent pratiquement pas d'eau lorsqu'ils sont gâchés avec le ciment et l'eau. Par contre, des granulats artificiels, tels le LECA (Light expanded clay aggregate = agrégats légers expansés d'argile), sont poreux. Il faut alors tenir compte de l'absorption de l'eau par les granulats lorsque l'on détermine la quantité d'eau requise pour fabriquer le béton.

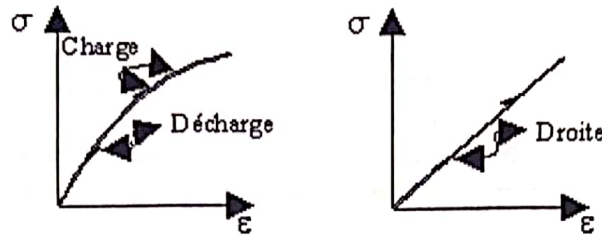
1.3.2 Les propriétés mécaniques

La déformation:

La déformation est une des propriétés essentielles pour des matériaux de construction. Selon la caractérisation des déformations, on les divise en trois sortes:

1. Déformation élastique:

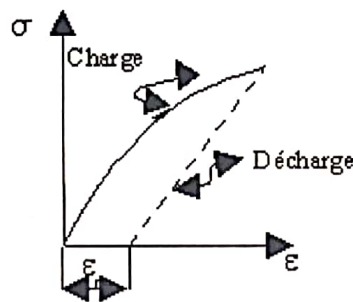
Lorsque l'on effectue un essai de mise en charge et si, après décharge le corps reprend les mêmes formes qu'il avait avant l'essai et qu'il ne reste aucune déformation résiduelle, on dit que le corps a un comportement parfaitement élastique (Fig 1.4).



De nombreux corps soumis à des charges peu élevées ont un comportement presque élastique et la déformation est approximativement proportionnelle à la contrainte. Si l'on reporte les mesures sur un diagramme contrainte (σ) et déformation (ϵ), on obtient une ligne droite (Fig 1.5). Ce type de déformation est appelée élasticité linéaire.

2. Déformation plastique:

La déformation est dite plastique, si après décharge le corps ne reprend pas les mêmes formes qu'il avait avant l'essai, il reste quelques déformations (fig 1.6). Cette déformation est appelée aussi déformation résiduelle.



Le fluage et la relaxation

Lorsqu'un corps est soumis à l'action prolongée d'une force, la déformation instantanée apparaissant lors de la mise en charge est suivie d'une déformation différée lente à laquelle on donne le nom de fluage.

Le fluage peut se manifester de deux façons:

- 1) Le fluage proprement dit (au sens restreint du mot)
- 2) La relaxation.

Admettons que l'action permanente ou de longue durée à laquelle est soumis le corps ait produit un état de contrainte σ_0 et une déformation ϵ_0 à l'instant de la mise en charge. Deux cas extrêmes peuvent se produire:

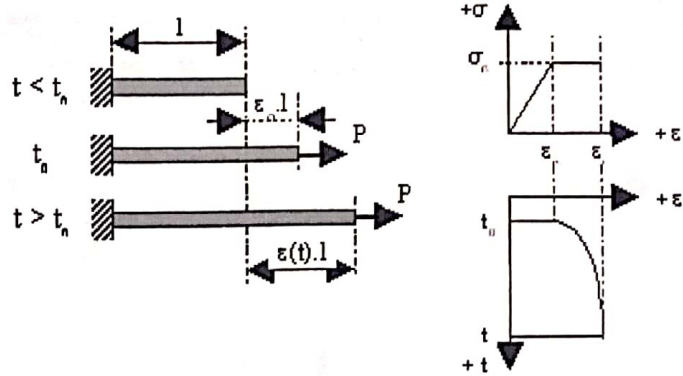
Fluage

(au sens restreint du mot)

La charge P qui a provoqué au temps t_0 la contrainte σ_0 à s'exercer et les déformations $\varepsilon(t)$ sont libres de se développer

$$\sigma = \sigma_0 - \text{constant}$$

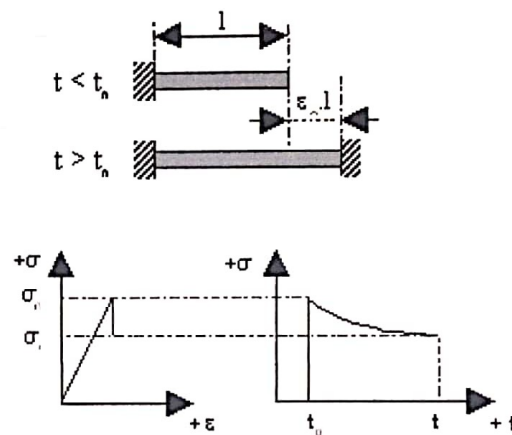
$$\varepsilon = \varepsilon(t) - \text{variable}$$

**Relaxation**

Après que la charge P ait provoqué la déformation ε_0 au temps t_0 , on bloque le corps dans sa position déformée.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \text{constant}$$

$$\sigma = \sigma(t) - \text{variable}$$



La relaxation est une conséquence du fluage, comme cela est bien mis en évidence par les définitions suivantes:

Fluage proprement dit = Fluage sous charge constante.

Fluage sous charge variable = Superposition de fluages débutant à des âges variables.

Relaxation = Fluage sous charge décroissante variable telle que la déformation reste constante.

3. Déformation visqueuse:

La déformation est dite visqueuse, si après décharge le corps ne reprend pas instantanément les mêmes formes qu'il avait avant l'essai, mais il se produit lentement.

La résistance

La résistance des matériaux est un des cours de la formation des ingénieurs en génie civil. Dans ce cours on apprend de façon plus détaillée les calculs du comportement des matériaux, mais dans le cours de "Matériaux de construction" on va montrer seulement la résistance en compression et en traction.

Tableau 1.1 : Schéma et méthode de détermination de la résistance à la compression

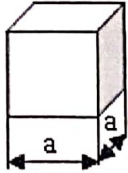
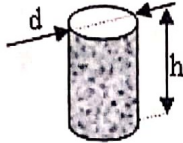
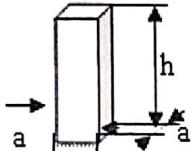
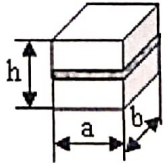
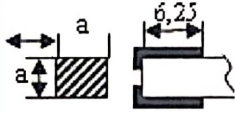
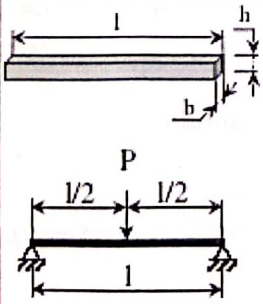
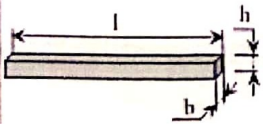
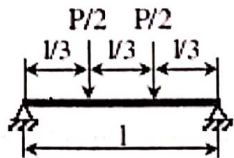
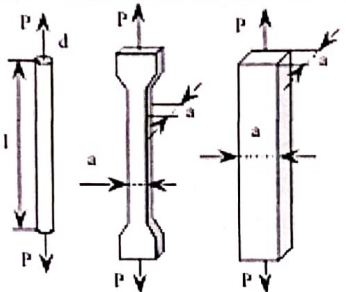
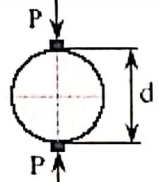
Echantillon	Schéma	Formule de calcul	Matériaux testés	Dimension des échantillons (cm)
Cube		$R = \frac{P}{a^2}$	Béton Mortier Roche naturelle	15x15x15 7,07x7,07x7,07 10x10x10 15x15x15 20x20x20
Cylindre		$R = \frac{4P}{\pi d^2}$	Béton Mortier Roche naturelle	d=15 ; h=30 d=h= 5; 7; 10; 15
Prisme		$R_{pr} = \frac{P}{a^2}$	Béton Bois	a=10; 15; 20 h=40; 60; 80 a=2; h=3
Échantillons assemblés		$R = \frac{P}{S}$	Brique	a=12; b=12,3; h=14
Moitié d'échantillon de Mortier		$R = \frac{P}{S}$	Ciment	a=4; S=25 cm ²

Tableau 3.2.2 : Schéma et méthode de détermination de la résistance à la flexion

Echantillon	Schéma	Formule de calcul	Matériaux testés	Dimension des échantillons (cm)
Essai de traction par flexion				
Prismatique Brique		$R_f = \frac{3Pl}{2bh^2}$	Ciment Brique	4x4x16 15x15x15
Prismatique		$R_{pl} = \frac{4l}{bh^2}$	Béton Bois	15x15x60 2x2x30

				
Essai de résistance en traction pure				
Cylindrique Prismatique		$R_t = \frac{4P}{\pi d^2}$ $R_t = \frac{P}{a^2}$	Béton Armature	5x5x50 10x10x80 d ₀ =1; l ₀ =5; l≥10
Cylindrique		$R_{tI} = \frac{P}{\pi d l}$	Béton	d=15; l=30 d=16; l=32

En général la résistance des matériaux est sa capacité contre les actions des forces externes (les charges, les conditions d'ambiance) étant définie en contrainte maximale quand l'échantillon est détruit.

La propriété principale de béton durci est sa résistance à la compression. Pour pouvoir évaluer la résistance à la compression, on doit avoir la valeur moyenne de trois échantillons au moins, dont les différences entre eux doivent être inférieures à 15 %.

Il existe deux méthodes pour déterminer la résistance des matériaux : Méthode «Destruction d'échantillon» et méthode «Non destruction d'échantillon».

3.2.1 Méthode « destruction d'échantillon »

La Méthode de destruction d'échantillon est la plus utilisée, surtout pour déterminer la résistance à la compression de béton, mortier, bloc de béton etc.. Ce type de détermination est largement usitée dans les laboratoires. Le mode opératoire est le suivant:

- Préparation des échantillons.
- Entretien des échantillons.
- Destruction des échantillons.
- Détermination des valeurs de résistance.

L'opération de l'essai est exécutée sur les réglementations de la norme concernée.

3.2.2 Méthode « Non destruction d'échantillon »



La méthode de non destruction d'échantillon est une des méthodes, qui permet l'obtention rapide de la résistance des matériaux des ouvrages (béton d'un ouvrage), sans procéder à des prélèvements de béton durci par carottage.

Généralement il existe quelques moyens usités :

- On utilise l'appareil qui s'appelle « scléromètre ». En fait il s'agit de tester la dureté de surface d'un béton durci (d'ouvrage). Cette dureté d'autant plus élevée que le béton est plus résistant, cela permet d'avoir un ordre de grandeur de la résistance atteinte par un béton à un âge donné.
- On utilise l'appareil qui peut lancer le rayon X à travers l'ouvrage. Selon le changement de la vitesse du rayon X, il est possible de déterminer la résistance du matériau.
- L'utilisation de l'auscultation sonique : Le principe de l'essai consiste à mesurer la vitesse du son à l'intérieur du béton. Cette vitesse est d'autant plus élevée que le béton est plus résistant; cela permet d'avoir un ordre de grandeur de la résistance atteinte par un béton à un âge donné.