

1. Introduction

1.1. L'ingénieur et les matériaux

1.2. Classification des matériaux

1.3. Propriétés des matériaux de construction

2. Les ciments

2.1. Introduction

2.2 Principe de fabrication ciment portland

2.3 Constituants principaux et additions.

2.4 Les principales catégories de ciment.

2.5 Caractéristiques du ciment portland.

3. Les granulats

3.1 Introduction

3.2 Courbes granulométriques

3.3 Classification des granulats

3.4 Caractéristiques des granulats

3.5 Différents types de granulats

4. La pâte de ciment

4.1 Introduction

4.2 Caractéristiques

5. Le mortier

5.1 Introduction

5.2 Composition

5.3 Les différents mortiers

5.4 Caractéristiques principales

6. Le béton

6.1 Introduction

6.2 Classification

6.3 Sélection des éléments

6.4 Etude de la composition

6.5 Caractéristiques principales du béton frais

6.6 Caractéristiques principales du béton durcissant

6.6 Caractéristiques principales du béton durcissant

6.7 Les déformations du béton

7. Briques, blocs de béton, béton préfabriqué

7.1 Briques

7.2 Blocs de béton

7.3 Béton préfabriqué

Glossaire

Bibliographie

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 traiteront 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.
- **Sommaire du chapitre 1**
 - **1.1. L'ingénieur et les matériaux**
 - **1.2. Classification des matériaux**
 - **1.3. Propriétés des matériaux de construction**

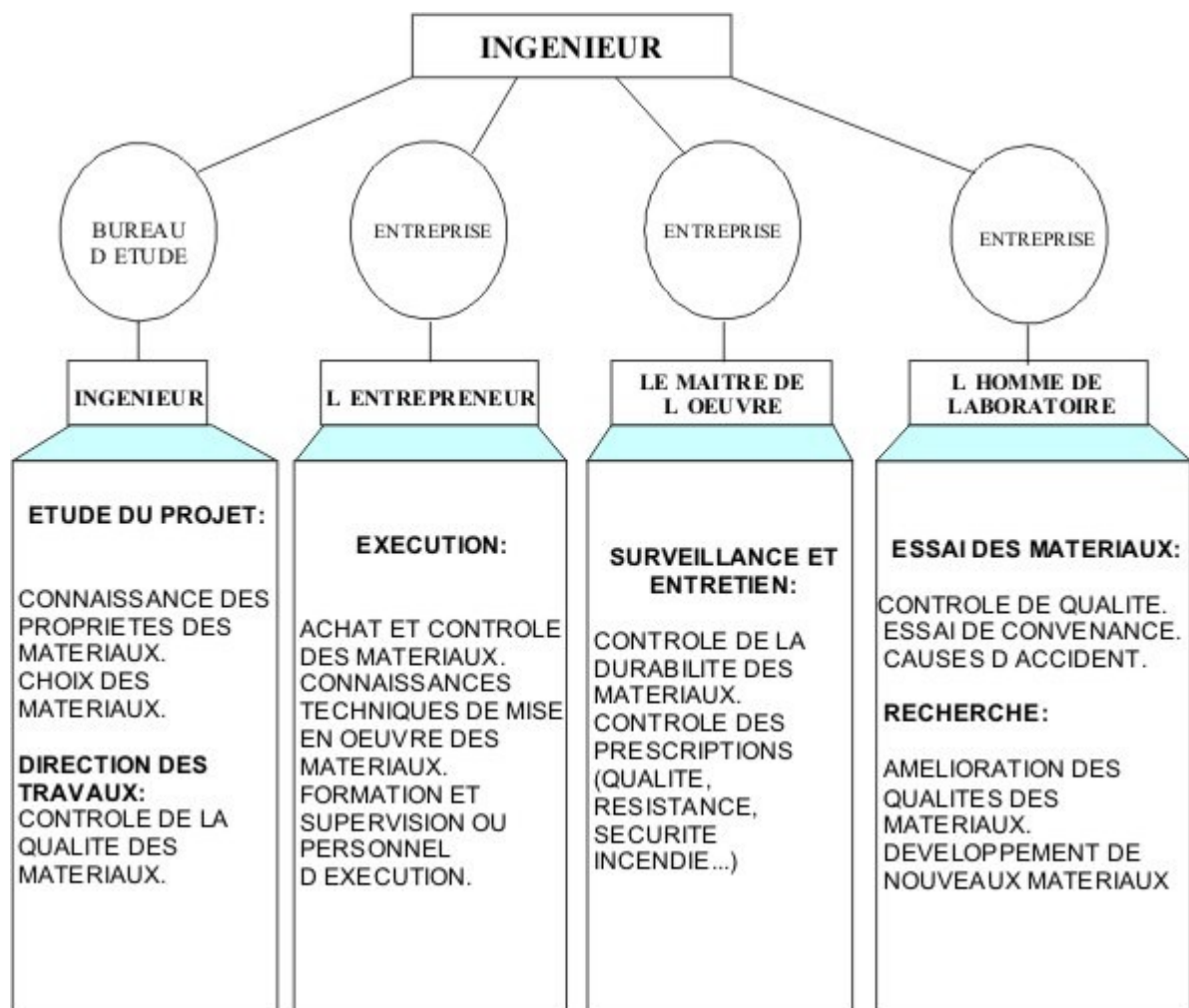
• **1. L'Ingénieur et les Matériaux**

- 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'électricité, 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

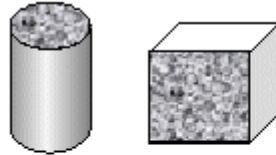
La masse volumique apparente

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, ..).



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

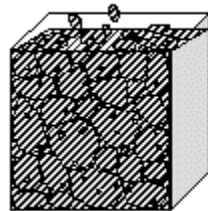
γ_{ap} – Masse volumique apparente (kg/m³).

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/m³).

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/m³.

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

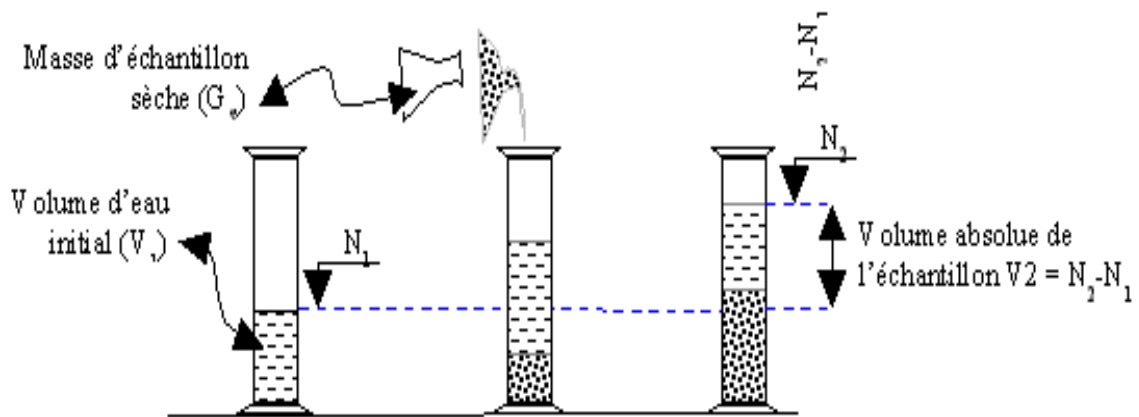
(γ)

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/cm³, kg/m³ ou T/m³).

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 inférieurs 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 voluménomètre d'eau (N_1), ensuite on verse l'échantillon sec dans le voluménomètre 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:

$$\frac{N_2 - N_1}{W} = \rho$$

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.

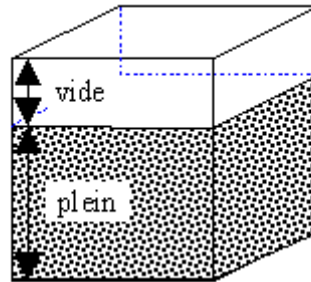


Fig 1.2: Volume quelconque

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.

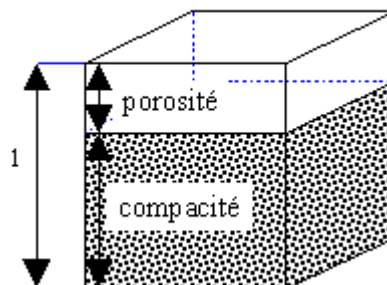


Fig 1.3: Volume initaire

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:

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

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 (%)

$$H_v = \frac{G_{ab} - G_s}{V_0} \cdot \%$$

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 (%)

$$H_p = \frac{G_{ab} - G_s}{G_s} \cdot \%$$

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:

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

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:

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

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 :

$$E = \frac{W \%}{100} P_s$$

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

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

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

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.

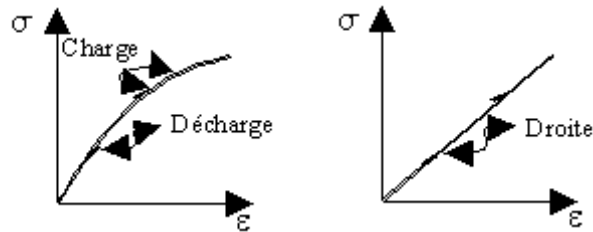
1.3.2 Les propriétés mécaniques

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:

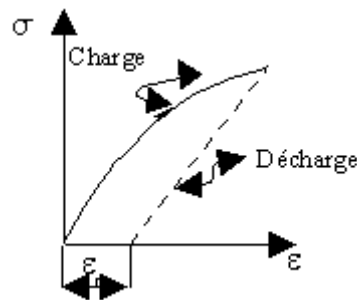
Lorsque l'on effectue un essai de mise en charge et si, après décharge le corps reprend les mêmes formes qu'il avait avant l'essai et qu'il ne reste aucune déformation résiduelle, on dit que le corps a un comportement parfaitement élastique (Fig 1.4).



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:

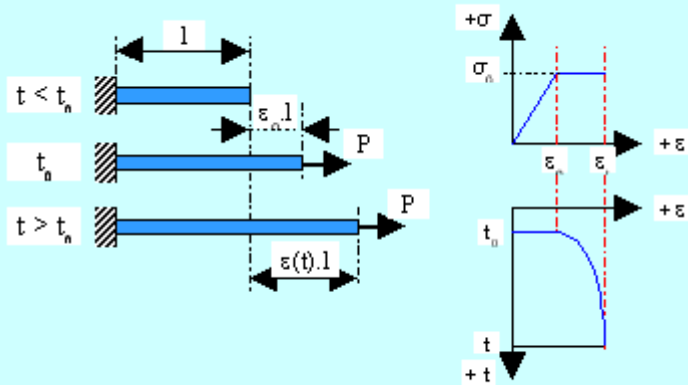
Fluage

(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

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

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

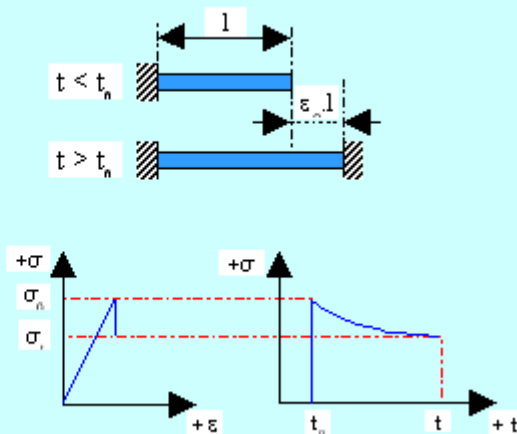


Relaxation

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 même 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

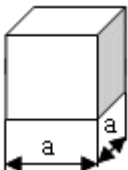
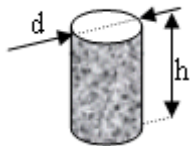
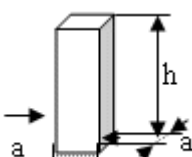
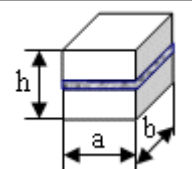
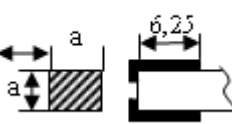
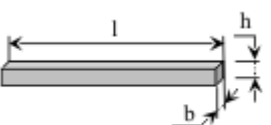
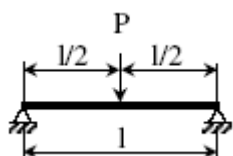
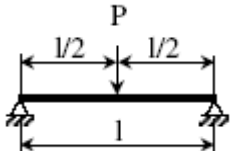
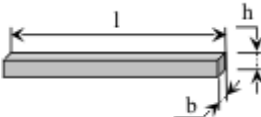
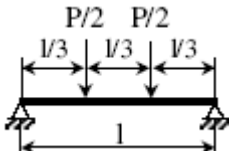
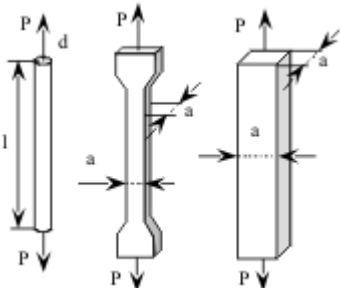
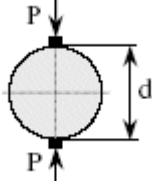
Echantillon	Schéma	Formule de calcul	Matériaux testés	Dimension des échantillons (cm)
Cube		$R = \frac{P}{a^2}$	Béton Mortier Roche naturelle	15x15x15 7,07x7,07x7,07 10x10x10 15x15x15 20x20x20
Cylindre		$R = \frac{4P}{\pi d^2}$	Béton Mortier Roche naturelle	d=15 ; h=30 d=h= 5; 7; 10; 15
Prisme		$R_{pr} = \frac{P}{a^2}$	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	Matériau x testés	Dimension des échantillons (cm)
Essai de traction par flexion				
Prismatique Brique		$R_f = \frac{3Pl}{2bh^2}$	Ciment Brique	4x4x16 15x15x15



				
Prismatique	 	$R_{pf} = \frac{4l}{bh^2}$	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		$R_{tf} = \frac{P}{\pi d l}$	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.

- **Sommaire du chapitre 2**
- **2.1. Introduction**
- **2.2 Principe de fabrication ciment Portland**
- **2.3 Constituants principaux et additions.**
- **2.4 Les principales catégories de ciment.**
- **2.5 Caractéristiques du ciment portland.**

2.1 Introduction

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du **clinker** qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450 – 1550 °C, température de fusion.

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau et par ce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une **consistance** de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce **durcissement** est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

L'expression de «pâte de ciment durcissant» sera utilisée pour désigner la pâte de ciment dans la transformation d'un état plus ou moins fluide en un état solide.

2.2 Principe de fabrication ciment portland

La fabrication de ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes:

- préparation du cru
- cuisson
- broyage et conditionnement

Il existe 4 méthodes de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement du matériau:

- Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne).
- Fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide).
- Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée).
- Fabrication du ciment par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche).

La composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la **chaux** (CaO) avec la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3), et l'oxyde de fer (Fe_2O_3). La **chaux** nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier Fe_2O_3 , l'oxyde ferrique.

Le principe de la fabrication du ciment est le suivant: calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température ($1450\text{ }^\circ\text{C}$) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le **clinker**.

Un mélange d'argile et de calcaire est chauffé. Au début, on provoque le départ de l'eau de mouillage, puis au delà de $100\text{ }^\circ\text{C}$, le départ d'eau d'avantage liée. A partir de 400°C commence la composition en gaz carbonique (CO_2) et en **chaux** (CaO), du calcaire qui est le carbonate de calcium (CaCO_3).

Le mélange est porté à $1450\text{--}1550\text{ }^\circ\text{C}$, température de fusion. Le liquide ainsi obtenu permet l'obtention des différentes réactions. On suppose que les composants du ciment sont formés de la façon suivante: une partie de CaO est retenue par Al_2O_3 et Fe_2O_3 en formant une masse liquide. SiO_2 et CaO restant réagissent pour donner le silicate bicalcique dont une partie se transforme en silicate tricalcique dans la mesure où il reste encore du CaO non combiné.

Fabrication par voie humide

Cette voie est utilisée depuis longtemps. C'est le procédé le plus ancien, le plus simple mais qui demande le plus d'énergie.

Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont mélangés et broyés finement avec l'eau de façon, à constituer une pâte assez liquide (28 à 42% d'eau). On brasse énergiquement cette pâte dans de grands bassins de 8 à 10 m de diamètre, dans lesquels tourne un manège de herses.

La pâte est ensuite stockée dans de grands bassins de plusieurs milliers de mètres cubes, où elle est continuellement malaxée et donc homogénéisée. Ce mélange est appelé le cru. Des analyses chimiques permettent de contrôler la composition de cette pâte, et d'apporter les corrections nécessaires avant sa cuisson.

La pâte est ensuite envoyée à l'entrée d'un four tournant, chauffé à son extrémité par une flamme intérieure. Un four rotatif légèrement incliné est constitué d'un cylindre d'acier dont la longueur peut atteindre 200 mètres. On distingue à l'intérieure du four plusieurs zones, dont les 3 zones principales sont:

- Zone de séchage.
- Zone de décarbonatation.
- Zone de clinkerisation.

Les parois de la partie supérieure du four (zone de séchage - environ 20% de la longueur du four) sont garnies de chaînes marines afin d'augmenter les échanges caloriques entre la pâte et les parties chaudes du four.

Le **clinker** à la sortie du four, passe dans des refroidisseurs (trempe du **clinker**) dont il existe plusieurs types (refroidisseur à grille, à ballonnets). La vitesse de trempe a une influence sur les propriétés du **clinker** (phase vitreuse).

De toutes façons, quelque soit la méthode de fabrication, à la sortie du four, on a un même **clinker** qui est encore chaud de environ 600-1200 °C. Il faut broyer celui-ci très finement et très régulièrement avec environ 5% de gypse CaSO_4 afin de «régulariser» la **prise**.

Le broyage est une opération délicate et coûteuse, non seulement parce que le **clinker** est un matériau dur, mais aussi parce que même les meilleurs broyeurs ont des rendements énergétiques déplorables.

Les broyeurs à boulets sont de grands cylindres disposés presque horizontalement, remplis à moitié de boulets d'acier et que l'on fait tourner rapidement autour de leur axe (20t/mn) et le ciment atteint une température élevée (160°C), ce qui nécessite l'arrosage extérieur des broyeurs. On introduit le **clinker** avec un certain pourcentage de gypse en partie haute et on récupère la poudre en partie basse.

Dans le broyage à circuit ouvert, le **clinker** ne passe qu'une fois dans le broyage. Dans le broyage en circuit fermé, le **clinker** passe rapidement dans le broyeur puis à la sortie, est trié dans un cyclone. Le broyage a pour but, d'une part de réduire les grains du **clinker** en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout du gypse (environ 4%) pour réguler quelques propriétés du ciment portland (le temps de **prise** et de **durcissement**).

A la sortie du broyeur, le ciment a une température environ de 160 °C et avant d'être transporter vers des silos de stockages, il doit passer au refroidisseur à force centrifuge pour que la température de ciment reste à environ 65 °C.

Fabrication par voie sèche

Les ciments usuels sont fabriqués à partir d'un mélange de calcaire (CaCO_3) environ de 80% et d'argile ($\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$) environ de 20%. Selon l'origine des matières premières, ce mélange peut être corrigé par apport de bauxite, oxyde de fer ou autres matériaux fournissant le complément d'alumine et de silice requis.

Après avoir finement broyé, la poudre est transportée depuis le silo homogénéisateur jusqu'au four, soit par pompe, soit par aéroglisseur.

Les fours sont constitués de deux parties:

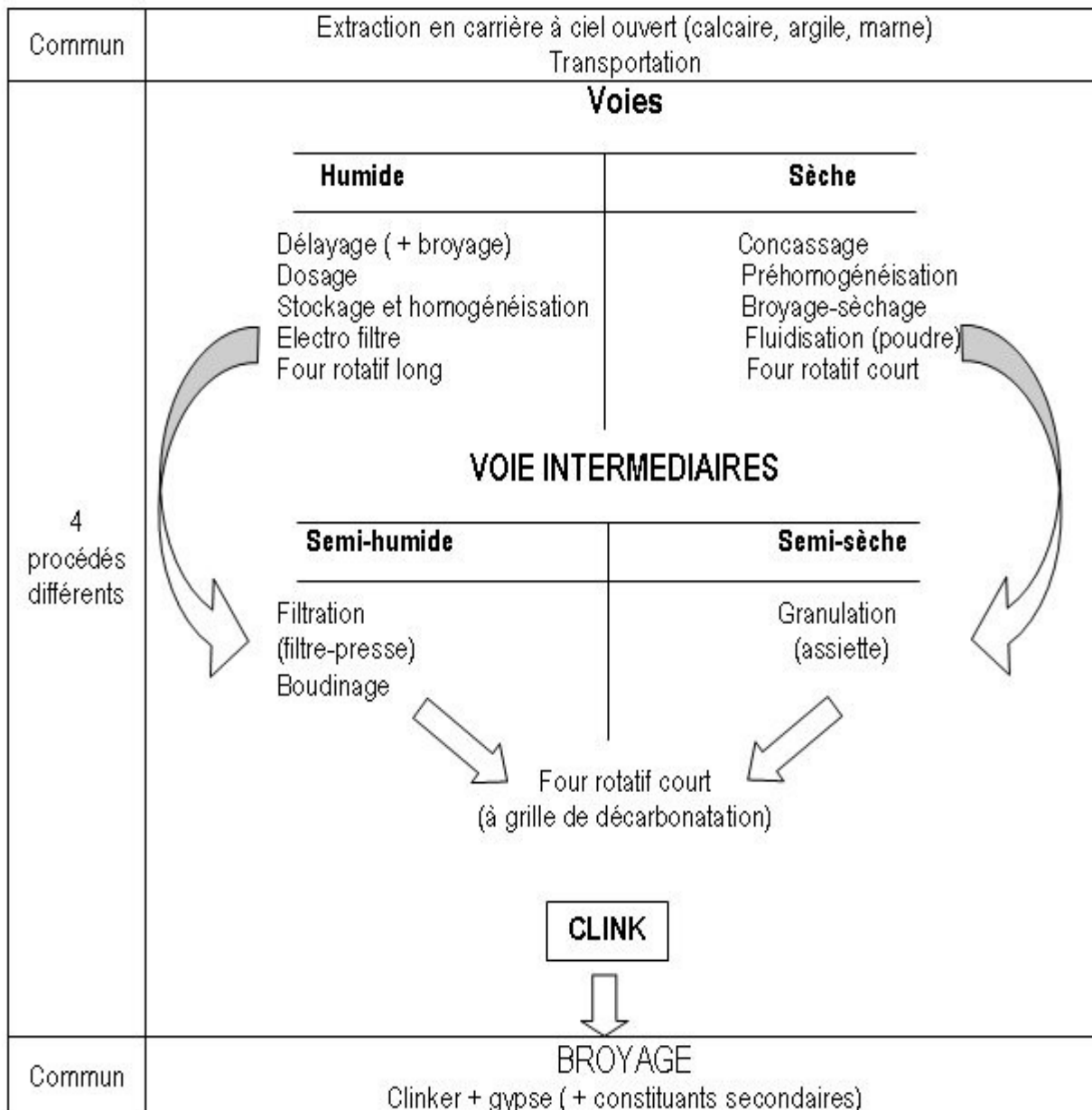
- Un four vertical fixe, préchauffeur (cyclones échangeurs de chaleur).
- Un four rotatif.

Les gaz réchauffent la poudre crue qui circule dans les cyclones en sens inverse, par gravité. La poudre s'échauffe ainsi jusqu'à 800 °C environ et perd donc son gaz carbonique (CO_2) et son eau. La poudre pénètre ensuite dans un four rotatif analogue à celui utilisé dans la voie humide, mais beaucoup plus court.

La méthode de fabrication par voie sèche pose aux fabricants d'importants problèmes techniques:

1. La ségrégation possible entre argile et calcaire dans les préchauffeurs. En effet, le système utilisé semble être néfaste et en fait, est utilisé ailleurs, pour trier des particules. Dans le cas de la fabrication des ciments, il n'en est rien. La poudre reste homogène et ceci peut s'expliquer par le fait que l'argile et le calcaire ont la même **densité** (2,70 g/cm³). De plus, le matériel a été conçu dans cet esprit et toutes les précautions ont été prises.
2. Le problème des poussières. Ce problème est rendu d'autant plus aigu, que les pouvoirs publics, très sensibilisés par les problèmes de nuisance, imposent des conditions draconiennes. Ceci oblige les fabricants à installer des dépoussiéreurs, ce qui augmente considérablement les investissements de la cimenterie. Les dépoussiéreurs sont constitués de grilles de fils métalliques portés à haute tension et sur lesquels viennent se fixer des grains de poussière ionisée. Ces grains de poussière s'agglomèrent et sous l'action de vibreurs qui agitent les fils retombent au fond du dépoussiéreur où ils sont récupérés et renvoyés dans le four. En dehors des pannes, ces appareils ont des rendements de l'ordre de 99%, mais absorbent une part importante du capital d'équipement de la cimenterie.
3. Le problème de l'homogénéité du cru est délicat. Nous avons vu comment il pouvait être résolu au moyen d'une préhomogénéisation puis d'une homogénéisation.

Le schéma de la fabrication du ciment



Le schéma de la fabrication du ciment par voie sèche

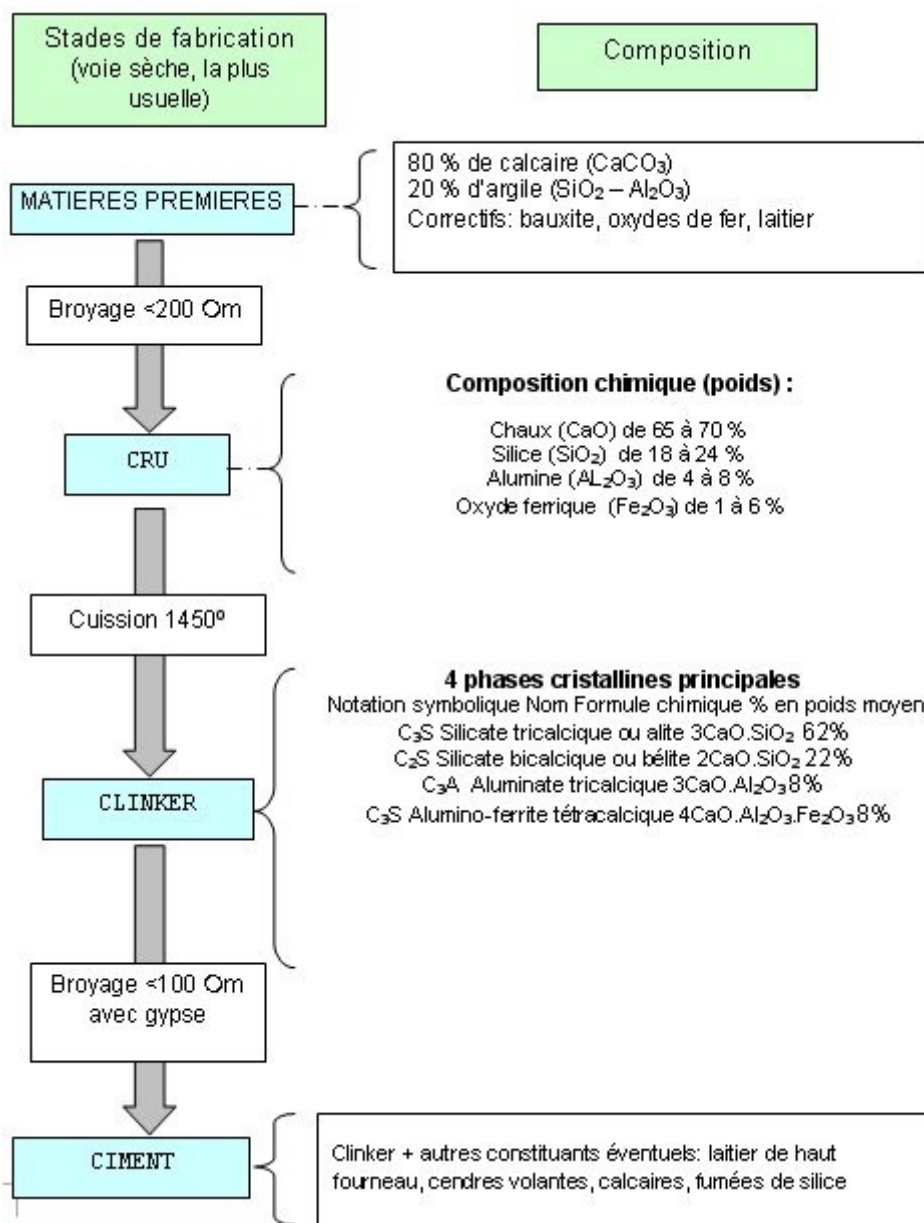
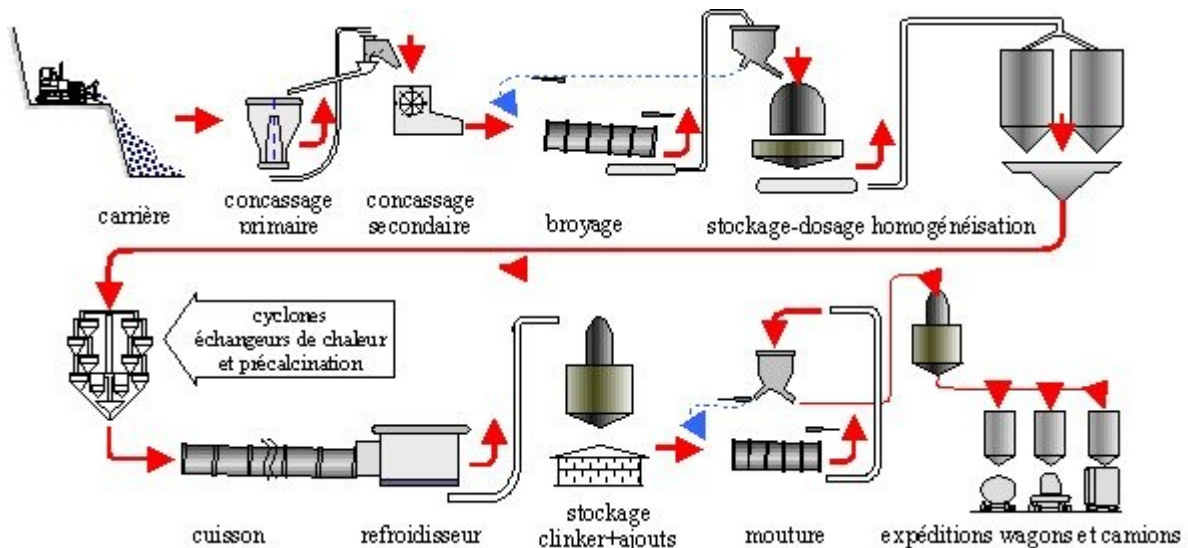


Figure 1. Fabrication du ciment



2.3 Constituants principaux et additions

2.3.1 Constituants du clinker

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du **clinker** sont:

- Le silicate tricalcique $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_3S) (50-70% du **clinker**).
- Le silicate bicalcique $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_2S) (10-30% du **clinker**).
- L'aluminate tricalcique $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) (2-15% du **clinker**).
- L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tétracalcique)
 $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF) (5-15% du **clinker**).

Le **clinker** contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis (Na_2O , K_2O), de la magnésie (MgO), diverses traces de métaux.

La teneur en alcalis et magnésie doit rester faible, car ces matières peuvent influencer défavorablement la stabilité du ciment durci.

A l'aide du microscope, on peut distinguer la structure minéralogique du **clinker** en trois phases, auxquelles les chercheurs donnèrent les noms suivants:

- A = alite (phase cristallisée), se présente sous la forme de cristaux polygonaux assez grands (grains anguleux foncés) de l'ordre de 50μ .
- B = bélite (phase vitreuse), se trouve sous forme impure dans le **clinker** (grains légèrement arrondis et rayés).
- C = célite (phase vitreuse légèrement foncée et claire), se trouve dans le **clinker** sous forme impure et de phase vitreuse.

2.3.2 Les autres constituants des ciment

Le ciment portland est composé de **clinker** moulu auquel on ajoute une quantité de gypse, destiné à régulariser la **prise**. Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute les autres constituants associés au **clinker** grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques.

Les constituants les plus utilisés sont:

Calcaires:

Les calcaires sont considérés comme un des constituants principaux du ciment. Ils doivent présenter une proportion de carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75% en masse.

Laitier granulé de haut fourneau:

Le **laitier** est un sous-produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques. Il est obtenu par refroidissement rapide (trempe) de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.

Cendres volantes (V ou W):

Elles sont les produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques. On distingue:

Les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés **pouzzolaniques**;

Les cendres volantes calciques (W) qui ont des propriétés hydrauliques et parfois **pouzzolaniques**.

Schistes calcinés:

Ce sont des schistes que l'on porte à une température d'environ 800 °C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi **pouzzolaniques**.

Fumée de silice:

Les fumées de silices sont un sous-produit de l'industrie du silicium et de ses alliages. Elles sont formées de particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de 0,1 μm). Pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principal, elles doivent être présentes pour au moins 85 % (en masse). Les fumées de silices ont des propriétés **pouzzolaniques**.

Fillers:

Ce sont des "constituants secondaires" des ciments, donc ils ne peuvent jamais excéder 5 % en masse dans la composition du ciment. Ce sont des matières minérales, naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau).

2.4 Les principales catégories de ciment.

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale.

2.4.1 Classification des ciments en fonction de leur composition

Les ciments constitués de **clinker** et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes **NF** P15-301 et ENV 197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse):

- **CEM I**: Ciment portland (CPA - dans la notation française),
- **CEM II**: Ciment portland composé (CPJ),
- CEM III: Ciment de haut fourneau (CHF),
- CEM IV: Ciment **pouzzolanique** (CPZ),
- CEM V: Ciment au **laitier** et aux cendres (CLC).

La proportion (en masse) des différents constituants est indiquée dans le tableau 2.2. Les constituants marqués d'une étoile (*) sont considérés comme constituants secondaires pour le type de ciment concerné; leur total ne doit pas dépasser 5%. (Les **fillers** sont considérés comme des constituants secondaires).

2.4.2 Classification des ciments en fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours; des sous classes "R" sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées, classe 32,5, classe 42,5, classe 52,5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du tableau 2.3. Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs garanties lorsqu'elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées.

Tableau 2.2: Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition

[illegible]

Tableau 2.3: Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe

Classe	Résistance à la compression (MPa) EN 196-1				Retrait à 28 jours	Début de prise	Stabilité
	au jeune âge		à 28 jours		P 15-433	EN 196-3	EN 196-3
	2 jours	7 jours	mini.	maxi.	($\mu\text{m}/\text{m}$)	(min)	(min)
32,5		(17,5)	/32,5 (30)	$\leq 52,5$	≤ 800	/90	≤ 10
32,5 R	/13,5 (12)	/	/32,5 (30)	$\leq 52,5$	$\leq 1\ 000$	/90	≤ 10
42,5	/12,5 (10)		/42,5 (40)	$\leq 62,5$	$\leq 1\ 000$	/60	≤ 10
42,5 R	/20 (18)		/42,5 (40)	$\leq 62,5$	$\leq 1\ 000$	/60	≤ 10
52,5	/20 (18)		/52,5 (50)			/60	≤ 10
52,5 R	/30 (28)		/52,5 (50)			/60	≤ 10

Tableau 2.4: Limite des classes et sous classes de résistances (nouvelle norme AFNOR)

Désignation de la classe	Sous classe éventuelle	Résistance à la compression		
		à 2 jours minimaux	à 28 jours minimales	à 28 jours maximales
350	-	-	250	450
450	- R (rapide)	- 150	350 350	550 550
550	- R (rapide)	- 225	450 450	650 650
THR Très hautes performances	-	300	550	-

2.5. Les caractéristiques du ciment portland

2.5.1 La prise

Dès que le ciment anhydre a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue sont évolutives dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée la pâte reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire épouser par moulage la forme désirée. Mais au bout d'un certain temps, les cristaux d'hydrates prenant de plus en plus d'importance, le mélange a changé de **viscosité** et se raidit, on dit qu'il se fait **priser**.

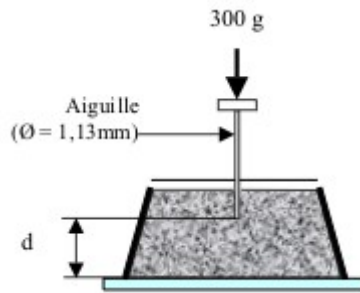


fig 2.3: Détermination du temps de début de prise

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, ce qui, dans la pratique, se mesure au moyen de l'aiguille normalisée (appareil de Vicat) et correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance ($d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$) du fond de l'anneau de 40 mm de hauteur remplie de pâte pure de ciment.

De même, la fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau.

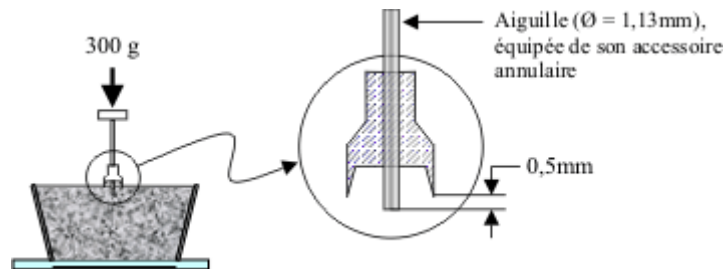


fig 2.4: Détermination du temps de fin de prise

Le phénomène de prise du ciment est lié à de nombreux paramètres tels:

- la nature du ciment,
- la finesse de mouture du ciment; plus son broyage a été poussé, plus le temps de prise est court,
- la température; alors qu'à zéro degré la prise est stoppée, plus la température ambiante est élevée plus la prise est rapide, pour un ciment donné le début de prise sera de 18 heures à 2 °C, de 5 heures à 10 °C, de 3h 30 à 20 °C et de 30 min à 35 °C (fig 2.5),
- la présence de matières organiques dans l'eau ou dans l'un des autres constituants du béton qui ralentit la prise,
- l'excès d'eau de gâchage qui a, entre autres inconvénients, une action retardatrice sur la prise (fig 2.7)

En fonction de leur classe de résistance, les normes spécifient un temps de prise minimum qui est, à la température de 20 °C, de:

1 h 30 pour les ciments de classes 35 et 45.

1 h pour les ciments des classes 55 et HP.

Il est à noter que pratiquement tous les ciments ont des temps de prise largement supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2 h 30 à 3 h pour la majorité des ciments.

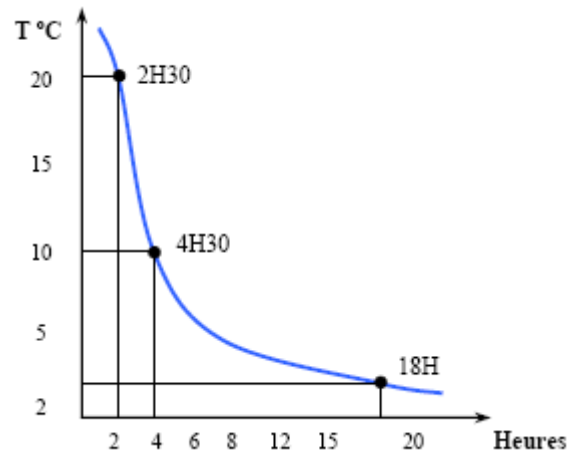


fig 2.5: Evolution du temps de *prise* en fonction de la température

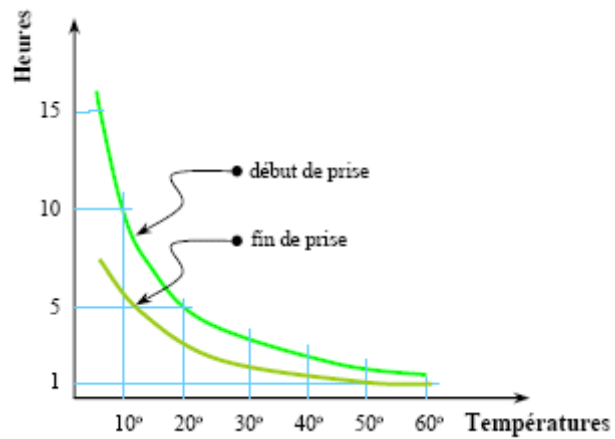


fig 2.6: Influence de la température sur la *prise* des ciments



fig 2.7: Influence du E/C sur le temps de prise

2.5.2 Le durcissement

C'est la période qui suit la prise et pendant laquelle se poursuit l'hydratation du ciment. Sa durée se prolonge pendant des mois au cours desquels les résistances mécaniques continuent à augmenter.

Comme le phénomène de prise, le durcissement est sensible à la température, ce qui conduit notamment en préfabrication, à chauffer les pièces pour lesquelles on désire avoir des résistances élevées au bout de quelques heures.

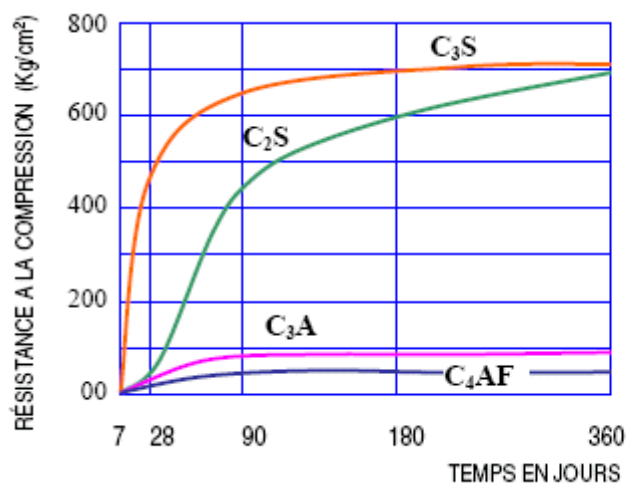
Prise et durcissement des constituants du clinker:

Pour mieux comprendre les propriétés des ciments portland, il est intéressant d'étudier comment réagit en présence d'eau chacun des constituants anhydres du ciment pris isolément.

Tableau 2.5: Le comportement et le dégagement de chaleur des constituants du *linker*

N ^o	CONSTITUANTS	COMPORTEMENT DES CONSTITUANTS PURS	CHALEUR DEGAGEE
1	C ₃ S	- Fait prise et durcit rapidement. - Haute résistance atteinte à <i>court terme</i>	120 cal / gr
2	C ₂ S	- Réagit lentement - Haute résistance atteinte à <i>long terme</i>	62 cal / gr
3	C ₃ A	- Prise de façon très désordonnée et rapide - Faible résistance <i>(Pour régulariser la prise du C₃A, il faut ajouter du gypse)</i>	207 cal / gr
4	C ₄ AF	Faible résistance	100 cal / gr

Le graphique ci-dessous montre le développement des résistances dans le temps des constituants purs du ciment portland.



- C₃S et C₂S – Constituants résistants (représentent ~70% en poids).
- C₃A et C₄AF – Requis comme fondants (représentent ~20% en poids).
- Gypse – Régularisation prise (représentent ~4% en poids).

fig 2.8: Le développement des résistances dans le temps des constituants purs du CP.

Dans une poudre de ciment portland en contact avec l'eau, l'aluminate tricalcique (C₃A) réagit en premier, se dissout et se recristallise. Vient ensuite la réaction d'hydrolyse, de l'alite-Silicate tricalcique (C₃S) forme autour des grains une pellicule de gel et met en même temps des ions Ca²⁺ en

solution. L'hydrolyse et la recristallisation de (C_3A) sont rapides. Cette activité est si grande qu'il faut la retarder car elle conduirait à des prises trop rapides et rendrait le liant inutilisable sur chantier.

Evolution physico-chimique de la pâte de ciment:

En gâchant le ciment avec l'eau, on obtient une pâte dans laquelle l'eau entoure chaque grain de ciment en formant un réseau capillaire. Les composés anhydres du ciment sont alors attaqués en surface par l'eau pour produire des composés hydratés. Dans le cas des silicates de calcium C_3S et C_2S , la **chaux** hydratée se dissout et il se dépose des cristaux de $Ca(OH)_2$ en plaquettes hexagones alors que les silicates de calcium hydratés forment un gel composé de fines aiguilles à la surface du ciment. Ces aiguilles se développent en dimension et en nombre tout en réduisant les interstices capillaires entre les grains. Quand les aiguilles entre les grains de ciment se rapprochent, la pâte devient plus raide. Cette rigidité est au début faible et peut encore être facilement détruite mécaniquement. C'est le début de la **prise**.

Après quelques heures, les interstices capillaires sont partiellement comblés par le gel. La pâte de ciment acquiert une certaine résistance. C'est le **durcissement** qui commence. La résistance continue à croître à mesure que le gel devient plus compact, d'une part, parce qu'il y a un accroissement de la cohésion entre les aiguilles et accroissement du feutrage des aiguilles, d'autre part, parce qu'il se formerait des joints de soudure entre les aiguilles de tobermolite des divers grains de ciment.

Dans les pâtes de ciment durcies, il reste de ce fait toujours des grains de ciment non hydratés.

L'hydratation des grains de ciment continue non seulement des mois, mais des années durant, pour autant que le gel soit entouré d'eau, car le gel de tobermolite ne peut se former qu'en présence d'eau.

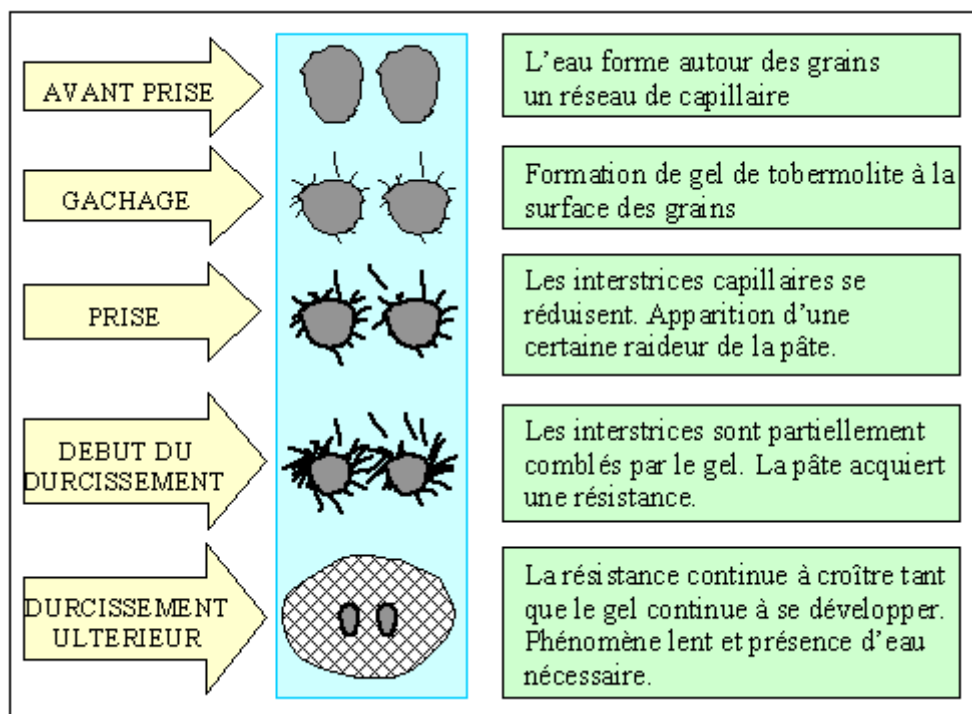
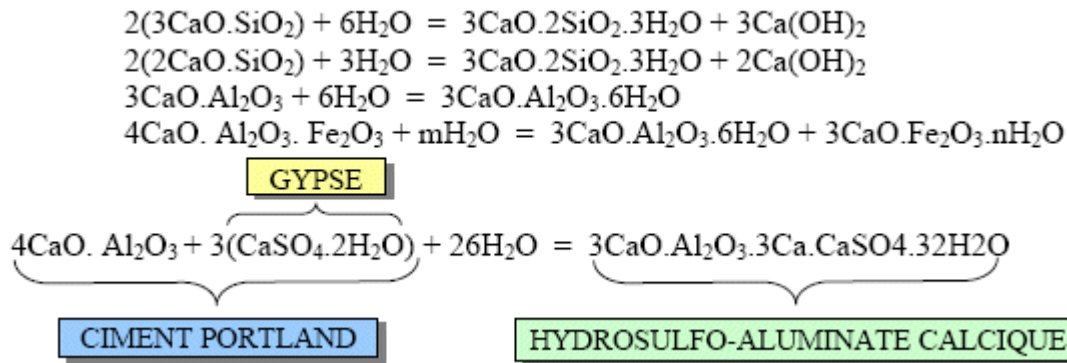


fig 2.9: L'évolution physico-chimique de la pâte de ciment

Quelques réactions chimiques importantes:



Les réactions d'hydratation du ciment Portland sont très complexes. Nous ne considérons que les quelques-unes utiles à connaître pour mieux comprendre les propriétés des ciments portlands.

2.5.3 La finesse de mouture (finesse de Blaine)

Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm²/g). Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3000 à 3500 cm²/g.

Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes, par contre plus le ciment est sensible à l'éventellement et plus le **retrait** est important. En outre, la finesse de mouture influence la plasticité et la cohésion de la pâte de ciment à l'état frais, ainsi que son pouvoir de rétention d'eau et la ressuée.

La surface massique de ciment étudié n'est pas mesurée directement, mais par comparaison avec un ciment de référence dont la surface massique est connue. Il s'agit de faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment. Toutes choses étant égales par ailleurs, plus la surface massique de cette poudre est importante et plus le temps t mis par l'air pour traverser la poudre est

longue: Dans les conditions normalisées décrites, la surface est proportionnelle à $\frac{1}{\sqrt{t}}$.

L'appareil utilisé pour déterminer la finesse de mouture de ciment est appelé «Perméabilimètre de **Blaine**». Cet appareil est schématisé sur fig 2.11. Il se compose pour l'essentiel d'une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester et d'un manomètre constitué d'un tube en verre en forme de U rempli, jusqu'à son repère inférieur (n° 4) d'une huile légère. La cellule est équipée d'une grille en sa partie inférieure. Un piston sert à tasser le ciment dans la cellule sous un volume V défini.

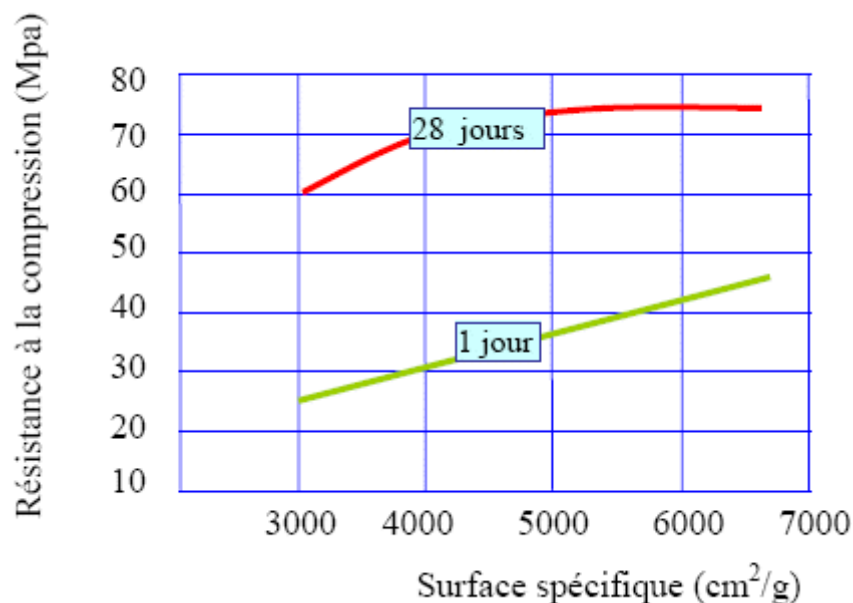


fig 2.10: Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression

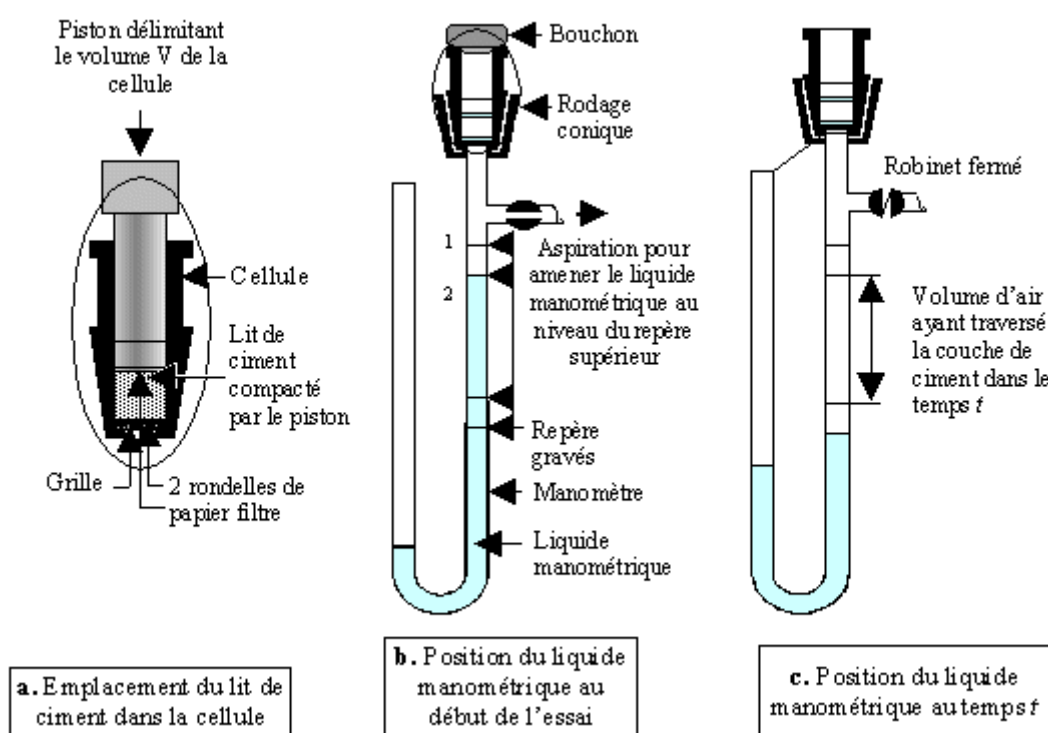


fig 2.11: Principe de fonctionnement de perméabilimètre de *Blaine*.

2.5.4 Le retrait

La pâte de ciment se rétracte dans l'air sec (alors qu'au contraire elle gonfle dans l'eau), ce phénomène se poursuivant dans le temps et ceci pendant des durées d'autant plus longues que les pièces sont massives. C'est le **retrait** qui est cause des fissures que l'on observe dans des pièces en béton.

En fait il existe plusieurs types de **retrait**:

*Le **retrait** avant **prise** dû essentiellement à la perte prématurée d'une partie de l'eau de gâchage par évaporation et dont l'amplitude est dix fois celle du **retrait** hydraulique classique. Ce **retrait** qui provoque des contraintes de traction supérieures à la résistance du béton à la traction, qui est alors pratiquement nulle, se traduit par l'apparition, à la surface du béton encore plastique, de grosses crevasses peu profondes, pouvant être refermées par talochage,

*le **retrait** hydraulique, qui découle d'une part de la **contraction Le Chatelier** (le volume des hydrates est inférieur au volume des constituants de départ) et d'autre part du **retrait** de dessiccation (contraction au séchage), est de l'ordre de 0,2 à 0,4 mm/m pour les bétons. Dans le cas de béton à faible rapport E/C, la dessiccation d'origine "endogène" (consommation de l'eau de gâchage pour hydratation) peut être prépondérante sur la dessiccation par échange avec le milieu externe,

*le **retrait** thermique, qui est dû à la contraction du béton lors de son refroidissement.

L'importance du **retrait** hydraulique, en dehors du facteur de temps, est fonction de nombreux paramètres parmi lesquels:

- la nature du ciment
- le dosage en eau (fig 2.12)
- la propreté des **sables**
- la forme et la dimension des granulats

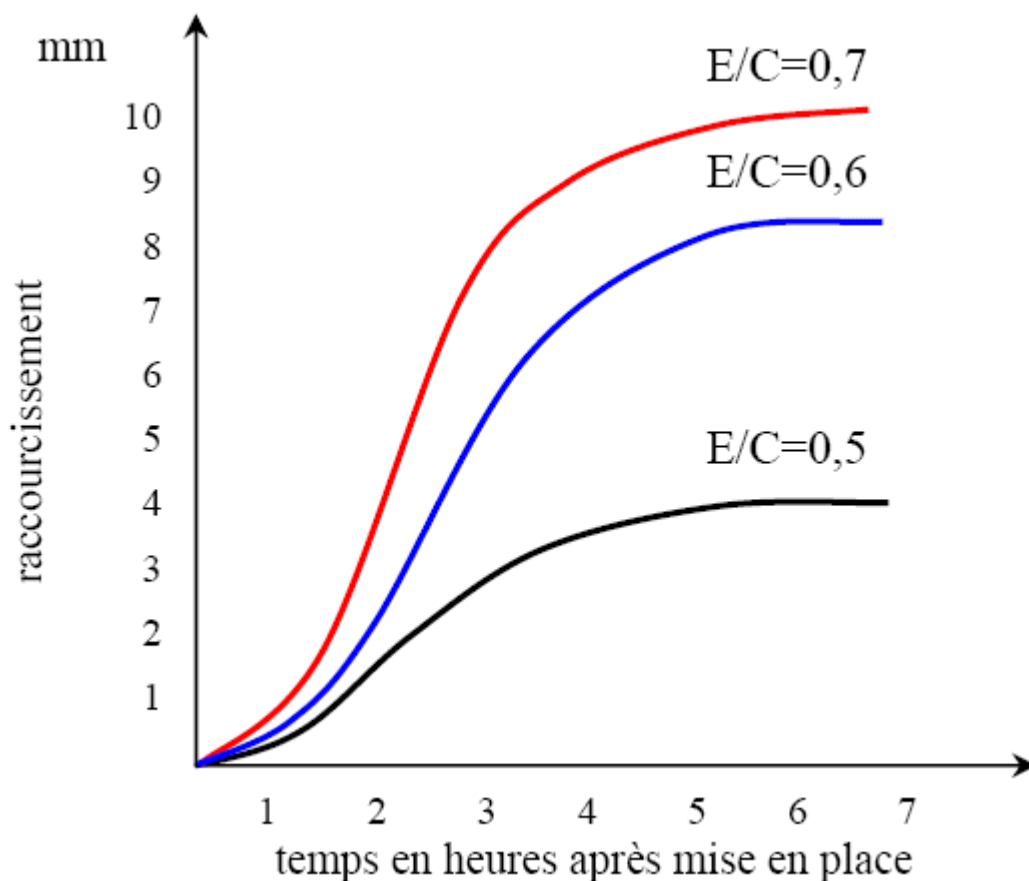


fig 2.12: Influence du E/C sur le **retrait** plastique des mortier.

2.5.5 Chaleur d'hydratation

Le phénomène de **prise** du ciment s'accompagne d'une réaction exothermique dont l'importance dépend de différents paramètres, en particulier:

- la finesse de mouture: plus le ciment est broyé fin, plus la chaleur d'hydratation est élevée
- la nature des constituants: les ciments CPA comportant presque exclusivement du **clinker** dégagent plus de chaleur que des ciments avec constituants secondaires
- la nature minéralogique du **clinker**: plus les teneurs en aluminat tricalcique (C_3A) et silicate tricalcique (C_3A et C_3S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte
- la température extérieure.

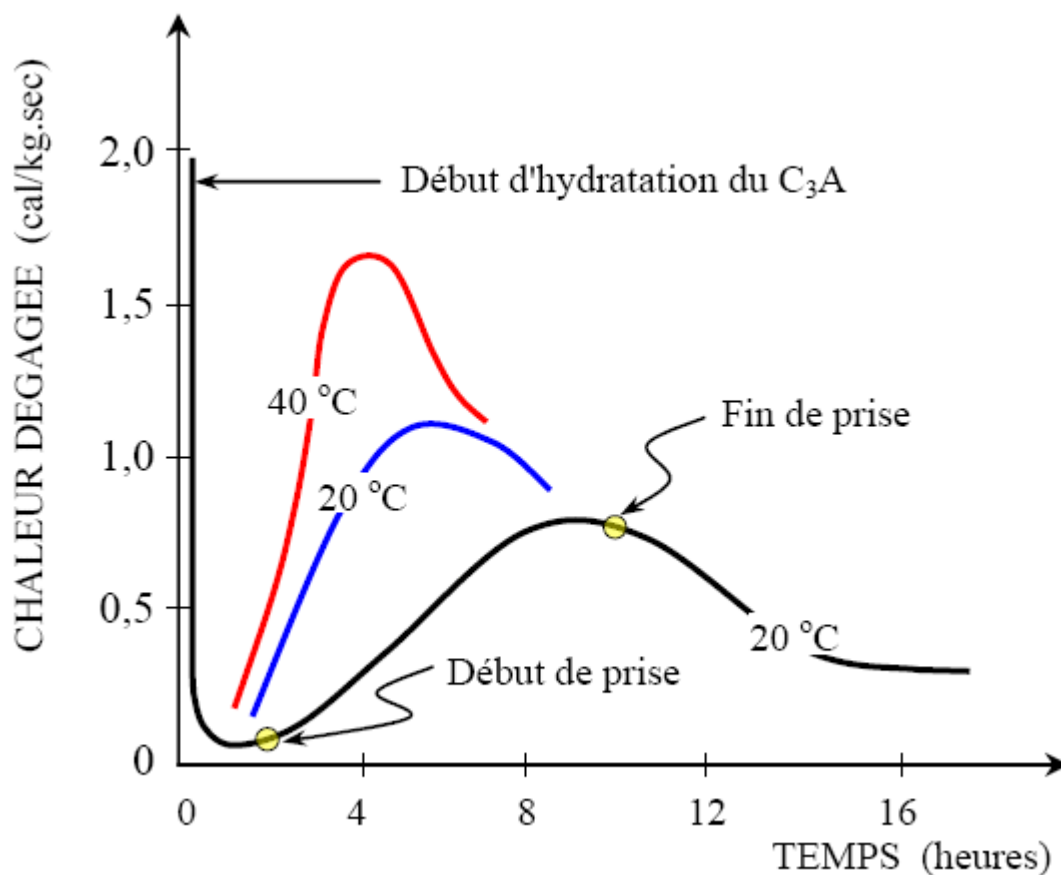


fig 2.13: Chaleur dégagée lors de l'hydratation du CP

2.5.6 Stabilité de volume

La réaction d'hydratation est accélérée par un traitement thermique de la pâte, de façon à pouvoir constater l'expansion éventuelle du ciment dans un délai très court.

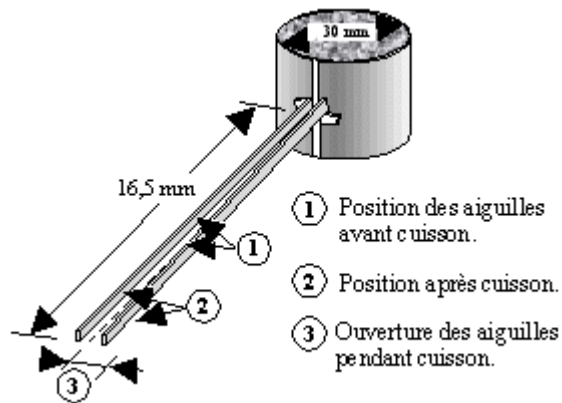


fig 2.13: Aiguilles de Le Châtelier

Un essai permet de s'assurer que le ciment ne contient pas de substances susceptibles de provoquer une expansion dangereuse au cours du temps.

On simule l'effet du temps en accélérant les processus de **durcissement** par une cuisson à 100 °C pendant 2 heures d'une pâte durcie de ciment à **consistance** normale âgée de 24 heures. Pour mesurer l'expansion, on utilise les aiguilles de Le Châtelier (fig 2.13). La différence d'ouverture des aiguilles avant et après cuisson doit rester inférieure à 10 mm.

Ouverture d'aiguille causée par cuisson à 10 mm.

L'essai d'étuvage a été supprimé pour les ciments Portland, car depuis de nombreuses années, il n'y a jamais eu de ciment Portland défectueux selon cet essai. On continue par contre à utiliser ce type d'essai pour contrôler la stabilité de volume des **chaux** hydrauliques.

Aujourd'hui on contrôle la pureté et la stabilité des ciments portland par voie chimique tels:

- Perte au feu
- Insoluble
- Teneur en SO_3 , en MgO , en C_3A etc..

2.5.7 Résistance à la compression

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortier dit "normal", à 28 jours d'âges en traction et en compression des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm. La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en Mpa.

Le mortier utilisé est réalisé conformément à la norme EN 196-1. Le **sable** utilisé est un **sable** appelé "**sable** normaliser CEN EN 196-1".

Pour chaque type de ciment, il existe effectivement plusieurs classes de résistances pour lesquelles les fabricants garantissent des valeurs minimales et maximales.

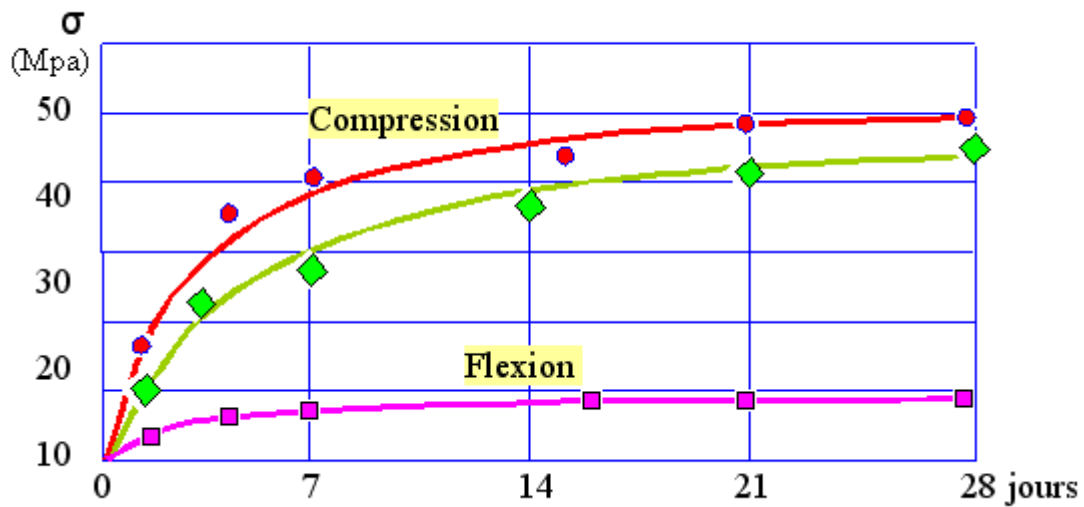


fig 2.14: Résistance du mortier normal

3. Les granulats

3.1. Définition

Le **granulat** est un fragment de roche, d'une taille inférieure à 125 mm, destiné à entrer dans la composition des matériaux destinés à la fabrication d'ouvrages de travaux publics, de génie civil et de bâtiment.

Les granulats utilisés dans les travaux de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et des caractéristiques propres à chaque usage. Les granulats constituent le squelette du béton et ils représentent, dans les cas usuels, environ 80 % du poids total du béton.

Les granulats sont nécessaires pour la fabrication des bétons; du point de vue économique, car ils permettent de diminuer la quantité de liant qui est plus cher; du point de vue technique, car ils augmentent la stabilité dimensionnelle (**retrait**, **fluage**) et ils sont plus résistants que la pâte de ciment. Il faut par conséquent, augmenter au maximum la quantité de granulats, en respectant toutefois les deux conditions suivantes:

- Les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité;
- La qualité de pâte liante doit être suffisante pour lier tous les grains et remplir les vides.

3.2. Courbes granulométriques

Importance de la composition granulométrique

Les propriétés physiques et mécaniques du béton dépendent de beaucoup de facteurs. Généralement on souhaite obtenir un béton résistant, étanche et durable. Pour atteindre ce but, il faut:

- que le béton à l'état frais soit facile à mettre en œuvre et à compacter (pour réduire la **porosité**).
- un maximum de granulats par unité de volume de béton (pour réduire la quantité de pâte liante nécessaire pour remplir les vides, tous les vides devant être remplis de pâte liante).
- un minimum de surface spécifique (pour réduire la quantité d'eau de gâchage et obtenir un rapport C/E plus élevé).

Par ailleurs:

- il faut choisir D_{max} aussi grand que le permet la dimension minimum de la pièce à bétonner et l'encombrement des granulats.
- la proportion de chaque dimension des grains doit être choisie de façon à remplir les vides laissés par les grains de dimensions supérieures.
- il faut réduire la teneur en éléments fins au minimum requis pour obtenir une bonne maniabilité et une bonne **compacité**.

Les courbes granulométriques apporteront quelques éléments de réponses à ces conditions.

La condition essentielle pour obtenir le moins de vides possibles (meilleure **compacité**) dans un mélange de **sable** et gravillon est de: 35 % de **sable** de 0/5 et 65 % de gravillons 5/20.

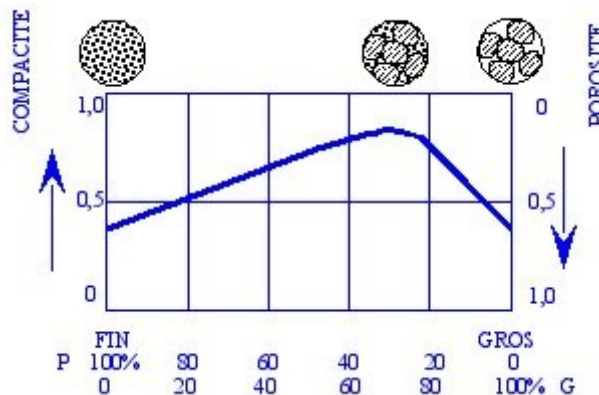


Fig. 3.5: Compacité d'un mélange de grains fins et de grains grossiers

Les courbes granulométriques des différents granulats peuvent être déterminées par l'essai de l'analyse granulométrique (NF P 18-560).

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de **tamis**, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des **tamis** et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de **tamis**.

On considère que le tamisage est terminé lorsque le refus ne varie pas de plus de 1 % entre deux séquences de vibration de la tamiseuse. On trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamisats sous les **tamis** dont les mailles D sont indiquées

en abscisse selon une graduation logarithmique. Par exemple pour le tracé de la courbe granulométrique d'un **sable** 0/5, on pèse une certaine quantité (après séchage) soit 2 kg par exemple. Le poids des tamisats successifs permet de déterminer les pourcentages du tamisats (tableau 3.1) correspondant à chacun des **tamis** utilisés.

Tableau 3.1: Résultats d'une analyse granulométrique correspondant à un **sable** (fig. 3.5)

Maille des tamis en (mm)	Tamisats cumulés	
	en poids (g)	en (%)
8	2000	100
5	1920	98
2,5	1740	90
1,25	1300	75
0,63	860	53
0,315	500	25
0,16	200	10
0,08	40	2

La courbe correspondant à ce **sable** normal, est présentée sur la fig. 3.6, sur lequel ont été également portées les courbes des **sables** très fins et grossiers ainsi que celles de graviers. La forme des courbes granulométriques apporte les renseignements suivants:

- Les limites d et D du granulat en question;
- La plus ou moins grande proportion d'éléments fins; par exemple la courbe située au-dessus de celle du **sable** normal correspond à un **sable** à majorité de grains fins et c'est l'inverse pour celle située en dessous. En effet, ces trois **sables** sont des **sables** 0/5 mm mais les proportions de grains fins (<0,5 mm par exemple) sont pour chacun d'eux: 25%, 45% et 60%;
- La continuité ou la discontinuité de la **granularité**; par exemple, les courbes de **sables** sont continues mais la courbe du gravier 5/31,5 présente une discontinuité; en effet le palier s'étendant de 10 à 20 mm signifie que le granulat en question ne contient pas de grains compris entre 10 et 20 mm.

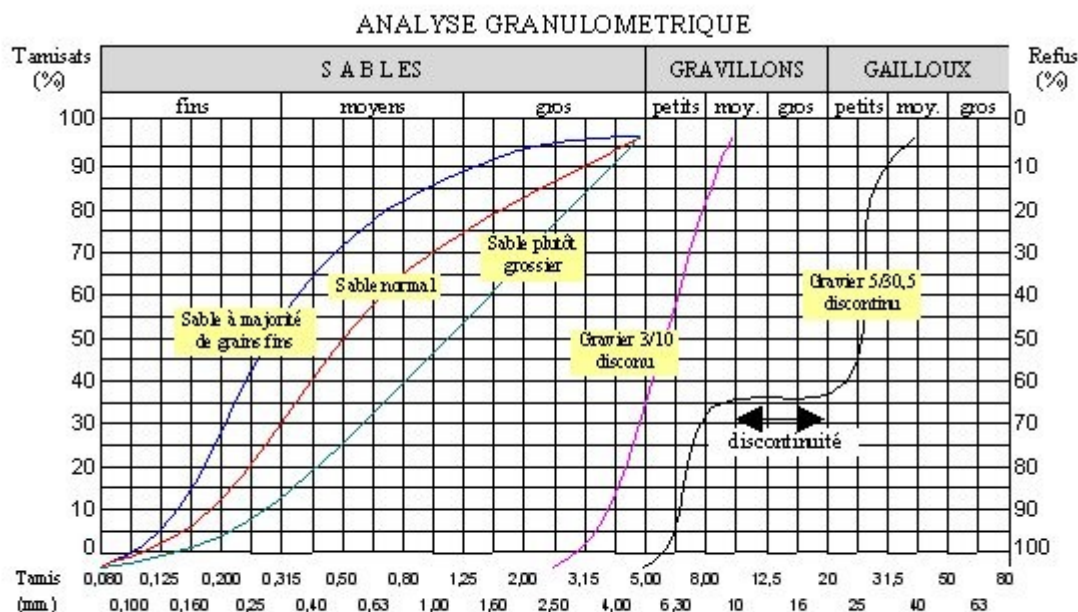


Fig. 3.6: Courbes granulométriques dans différents cas

Module de finesse

Les **sables** doivent présenter une **granulométrie** telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le **sable** est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un **sable** peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les **tamis** de modules 23, 26, 29, 32, 35, 38. Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des **sables** à bétons.

Dans le cas de la courbe granulométrique du **sable** normal présenté sur la fig. 3.6, son module de finesse est égal à:

$$MF = (98 + 90 + 75 + 53 + 28 + 10)/100 = 3,54$$

Les dimensions nominales normalisées des **tamis**, seuls appareils utilisés actuellement, sont les suivantes:

Tableau 3.2: Dimensions nominales des tamis

Modules	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tamis	0,08	0,100	0,125	0,160	0,200	0,250	0,315	0,40	0,50	0,63	0,80
Modules	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Tamis	1,00	1,25	1,60	2,00	2,50	3,15	4,00	5,00	6,30	8,00	10,00
Modules	42	43	44	45	46	47	48	49	50		
Tamis	12,50	16,00	20,00	25,00	31,50	40,00	50,00	63,00	80,00		

3.3. Classification des granulats

On trie les granulats par dimension au moyen de **tamis** (mailles carrées) et de passoirs (trous circulaires) et on désigne une classe de granulats par un ou deux chiffres. Si un seul chiffre est donné, c'est celui du diamètre maximum D exprimé en mm; si l'on donne deux chiffres, le premier désigne le diamètre minimum d, des grains et le deuxième le diamètre maximum D.

Un granulat est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D. Lorsque d est inférieur à 2 mm, le granulat est désigné 0/D.

Il existe cinq classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrées (Norme **NFP18-101**):

- Les **fines** 0/D avec $D \leq 0,08$ mm,
- Les **sables** 0/D avec $D \leq 6,3$ mm,
- Les gravillons d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm,
- Les cailloux d/D avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm,
- Les **graves** d/D avec $d \geq 6,3$ mm et $D \leq 80$ mm,

Il peut être utile dans certains cas d'écrire la classification suivante:

Tableau 3.3: *Classes granulaires des granulats*

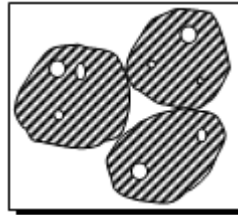
APPELLATION		Dimension de la maille des tamis en (mm)
Pierres cassées et cailloux	Gros	50 à 80
	Moyens	31,5 à 50
	Petits	20 à 31,5
Gravillons	Gros	12,5 à 20
	Moyens	8 à 12,5
	Petits	5 à 8
Sable	Gros	1,25 à 5
	Moyens	0,31 à 1,25
	Petits	0,08 à 0,31
Fines, farines et fillers		inférieur à 0,08

3.4. Les caractéristiques principales des granulats

3.4.1 Caractéristiques physiques

(a) La **masse volumique** absolue

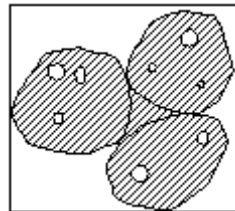
La **masse volumique** absolue d'un matériau est la masse d'un mètre cube de ce matériau, déduction faite de tous les vides, aussi bien des vides entre les grains que des vides à l'intérieur des grains.



Volume hachuré = Volume absolu (sans pores)

(b) La masse volumique réelle

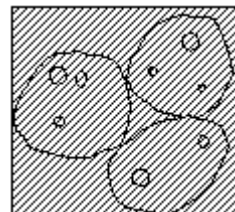
La **masse volumique** réelle d'un matériau est la masse d'un mètre cube de ce matériau déduction faite des vides entre particules. La déduction ne concerne pas les vides compris dans le matériau mais seulement ceux entre les particules.



Volume hachuré = Volume réelle (apparent)

(c) La masse volumique apparente

La **masse volumique** apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. La **masse volumique** apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté. Il faut donc préciser: **masse volumique** apparente à l'état compacté ou **masse volumique** apparente à l'état non compacté.



Volume hachuré = Volume du récipient

(d) Absorption

La plupart des granulats stockés dans une atmosphère sèche pendant un certain temps, peuvent par la suite absorber de l'eau. Le processus par lequel le liquide pénètre dans la roche et l'augmentation de poids qui en résulte sont appelés absorption.

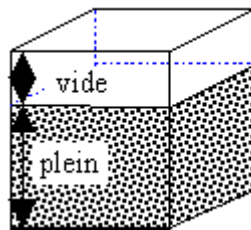
L'absorption peut varier dans de très larges mesures suivant la nature du granulat. Elle peut varier de 0 à plus de 30 % du poids sec pour granulat léger.

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.

(e) Porosité et compacité

(1) Porosité

En général la **porosité** est le rapport du volume des vides au volume.



$$p = \frac{\text{volume des vides}}{\text{volume total}}$$

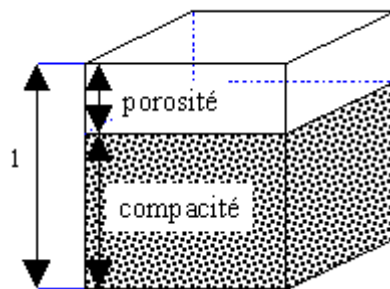
Volume quelconque

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

(2) Compacité

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

Ou volume des pleins par unité de volume apparent.



Volume unitaire

$$c = \frac{\text{plein}}{\text{vide} + \text{plein}}$$

$$p = \frac{\text{vide}}{\text{vide} + \text{plein}}$$

La **porosité** et la **compacité** sont liées par la relation:

$$p+c=1$$

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

En effet:

$$p + c = \frac{\text{volume des pleins}}{\text{volume total}} + \frac{\text{volume des pleins}}{\text{volume total}} = \frac{\text{volume total}}{\text{volume total}} = 1$$

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

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

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

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

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

(f) Teneur en eau

La teneur en eau d'un matériau 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.

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

E = Poids d'eau dans le matériau.

P_s = Poids du matériau sec.

P_h = Poids matériau humide

Si W est exprimé en % :

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

Les granulats utilisés pour la confection du béton contiennent généralement une certaine quantité d'eau variable selon les conditions météorologiques. L'eau de gâchage réellement utilisée est par conséquent égale à la quantité d'eau théorique moins l'eau contenue dans les granulats. Il faut par conséquent disposer de moyens pour mesurer combien il y a d'eau dans les granulats.

(g) Propreté et forme des granulats

Propreté des granulats

Les granulats employés pour le béton doivent être propres, car les impuretés perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des adhérences entre les granulats et la pâte.

La propreté désigne:

d'une part, la teneur en fines argileuses ou autres particules adhérentes à la surface des grains, ce qui se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on frotte les granulats entre les mains.

D'autre part, les impuretés susceptibles de nuire à la qualité du béton, parmi lesquelles on peut citer les scories, le charbon, les particules de bois, les feuilles mortes, les fragments de racine.

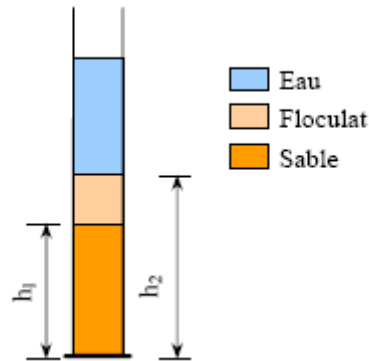


Fig. 3.8: Détermination de l'équivalent de *sable* piston

Dans le cas des *sables*, le degré de propreté est fourni par essai appelé "équivalent de *sable* piston PS" (norme P 18-597) qui consiste à séparer le *sable* des particules très fines qui remontent par *floculation* à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage. L'essai est fait uniquement sur la fraction de *sable* 0/2 mm. La valeur de PS doit selon les cas être supérieure à 60 ou 65. L'essai dit "équivalent de *sable* piston" permet de mesurer le degré de propreté du *sable*

$$PS = 100 \frac{h_1}{h_2}$$

Tableau 3.4: Valeurs préconisées pour l'équivalent de **sable** par

PS	Nature et qualité du sable
< 60	"Sable argileux" risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité
$60 \leq PS < 70$	"Sable légèrement argileux" de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
$70 \leq PS < 80$	"Sable propre" à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$PS > 80$	"Sable très propre" l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Forme des granulats

La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques:

- La longueur L, distance maximale de deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulat,
- L'épaisseur E, distance minimale de deux plans parallèles tangents au granulat,
- La grosseur G, dimension de la maille carrée minimale du **tamis** qui laisse passer le granulat.

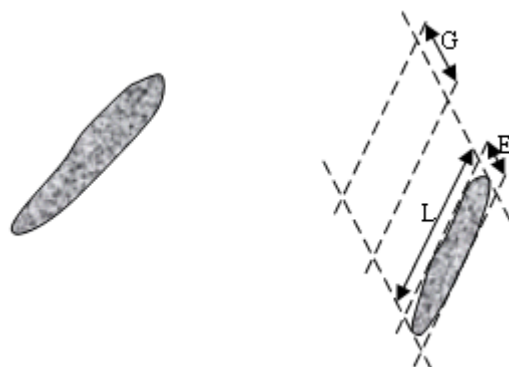


Fig. 3.9: Forme d'un granulat

La forme des granulats influence:

- La facilité de mise en œuvre et le compactage du béton.
- La **compacité** du mélange, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment.

La forme est d'autant meilleure qu'elle est proche d'une sphère ou d'un cube:

Tableau 3.5: Forme des granulats

cubes, sphères	trois dimensions à peu près égales (bonne compacité)
plaquettes	une dimension beaucoup plus petite que les deux autres (mauvaise compacité)
aiguilles	une dimension beaucoup plus grande que les deux autres (très mauvais compacité)

3.4.2 Caractéristiques mécaniques

Méthodes de mesures

Les caractéristiques mécaniques des granulats ne sont pas déterminées par des essais habituels de traction ou de compression. Par contre, il existe des essais tentant de reproduire certaines sollicitations propres à des usages spécifiques des granulats, par exemple le degré d'usure pour les granulats utilisés pour les bétons routiers.

Essai Micro Deval

Le principe de cet essai est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. Il fait l'objet de la norme **NF P 18-573**.

Le coefficient Los Angeles calculé à partir du passage au **tamis** de 1,6 mm, mesuré en fin d'essai, caractérise le grranulat.

Les granulats sont classés en 6 catégories allant de A à F, chacune d'elle devant les conditions suivantes:

Tableau 3.6: Catégories des granulats selon la résistance aux chocs et à l'usure

CATEGORIES	$L_A + M_{DE}$	L_A	M_{DE}
A	≤ 25	≤ 20	≤ 15
B	≤ 35	≤ 25	≤ 20
C	≤ 45	≤ 30	≤ 25
D	≤ 55	≤ 35	≤ 30
E	≤ 80	≤ 45	≤ 45
F	> 80	> 45	> 45

L_A – Coefficient Los Angeles.

M_{DE} – Coefficient Micro Duval.

3.5. Différents types de granulats

Les granulats utilisés pour le béton sont soit d'origine naturelle, soit artificiels.

3.5.1. Les granulats naturels

Origine minéralogique

Parmi les granulats naturels, les plus utilisés pour le béton proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que le quartz et quartzites, ou de roches éruptives telles que les basaltes, les granites, les porphyres.

Granulats roulés et granulats de carrières

Indépendamment de leur origine minéralogique, on classe les granulats en deux catégories:

1. Les granulats **alluvionnaires**, dits roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion. Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, nuisibles à la résistance du béton. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico-calcaires.
2. Les granulats de carrière sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de pré criblage est **indispensable** à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres: origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage La sélection de ce type de granulats devra donc être faite avec soin et après accord sur un échantillon.

3.5.2. Les granulats artificiels

Sous-produits industriels, concassés ou non

Les plus employés sont le **laitier** cristallisé concassé et le **laitier** granulé de haut fourneau obtenus par refroidissement à l'eau.

La **masse volumique** apparente est supérieure à 1 250 kg/m³ pour le **laitier** cristallisé concassé, 800 kg/m³ pour le granulé.

Ces granulats sont utilisés notamment dans les bétons routiers. Les différentes caractéristiques des granulats de **laitier** et leurs spécifications font l'objet des normes **NF P 18-302** et **18-306**.

Granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement

Il s'agit de granulats élaborés spécialement pour répondre à certains emplois, notamment granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels (granulats ferreux, carborundum...) ou granulats réfractaires.

Granulats allégés par expansion ou frittage

Ces granulats, très utilisés dans de nombreux pays comme l'URSS ou les Etats- Unis, n'ont pas eu en France le même développement, bien qu'ils aient des caractéristiques de résistance, d'isolation et de poids très intéressants.

Les plus usuels sont l'argile ou le schiste expansé (norme NF P 18-309) et le laitier expansé (NF P 18-307). D'une masse volumique variable entre 400 et 800 kg/m³ selon le type et la granularité, ils permettent de réaliser aussi bien des bétons de structure que des bétons présentant une bonne isolation thermique.

Les grains de poids intéressants puisque les bétons réalisés ont une masse volumique comprise entre 1200 et 2000 kg/m³.

Les granulats très légers

Ils sont d'origine aussi bien végétale et organique que minérale (bois, polystyrène expansé).

Très légers - 20 à 100 kg/m³ - ils permettent de réaliser des bétons de masse volumique comprise entre 300 et 600 kg/m³.

On voit donc leur intérêt pour les bétons d'isolation, mais également pour la réalisation d'éléments légers: blocs coffrant, blocs de remplissage, dalles, ou rechargements sur planchers peu résistants.

4. La pâte de ciment

4.1. Introduction

La pâte de ciment est composée principalement de ciment (C) et d'eau (E). Soit E et C les concentrations (en masse) d'eau et de ciment pour un volume unité de pâte. Dès que l'on mélange le ciment avec l'eau, l'hydratation va commencer et les propriétés de la pâte sont évolutives dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée, la pâte reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire épouser par moulage la forme désirée. Mais après un certain temps les cristaux d'hydrates prenant de plus en plus d'importance, le mélange se raidit, on dit qu'il fait prise, et le matériau commence alors à s'apparenter plus à un solide qu'à un fluide.

La pâte de ciment joue un rôle très important pour solidariser les squelettes granulaires du béton. Elle est un des facteurs influençant la qualité, le prix et les propriétés mécaniques du béton. Bien souvent, un ou plusieurs adjuvants sont également associés au ciment pour influencer sur les qualités de la pâte. En outre, les divers ajouts jouent un grand rôle pour modifier les propriétés selon leurs domaines d'emploi. Ce type de pâtes s'appelle aussi les coulis.

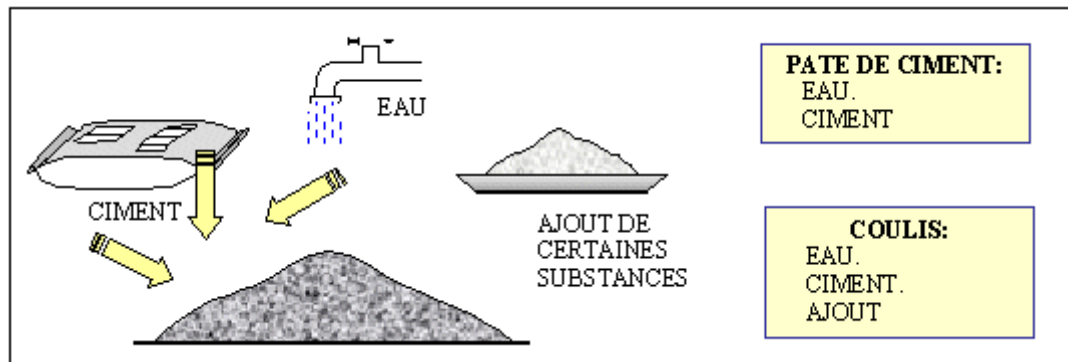


Fig. 4.1: Les constituants des pâtes et des coulis de ciment

Les coulis de ciment sont des mélanges fluides de:

- Ciment (ou autre liant);
- Eau;
- **Adjuvants** et ajouts divers (éventuellement).

4.2 Caractéristiques de la pâte de ciment et du coulis

Les caractéristiques principales de la pâte de ciment sont:

- la **consistance** (fluidité)
- les temps de **prises** (début et fin de **prises**),
- la stabilité, etc...

La **consistance**

La **consistance** de la pâte de ciment est sa plus ou moins grande fluidité. C'est une caractéristique qui évolue au cours du temps. Pour pouvoir étudier l'évolution de la **consistance** en fonction des différents paramètres, il faut pouvoir partir d'une **consistance** qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées. La **consistance** dite "**consistance** normalisée" peut être déterminée par l'essai en utilisant un appareil qui s'appelle "Vicat" (fig. 4.2)

La distance (d) caractérise l'aptitude de la **consistance** de la pâte étudiée.

- Si $(d) = 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$, on dit que la **consistance** de la pâte étudiée est normalisée, (Consistance normalisée).

- Si (d) n'atteint pas cette valeur (c.à.d. $d > 7\text{ mm}$ ou $d < 5\text{mm}$), il convient de refaire l'essai avec une valeur différente du rapport E/C jusqu'à atteindre la valeur recherchée de la **consistance**.

*Fig. 4.2: Appareil de Vicat muni de sa sonde de **consistance***

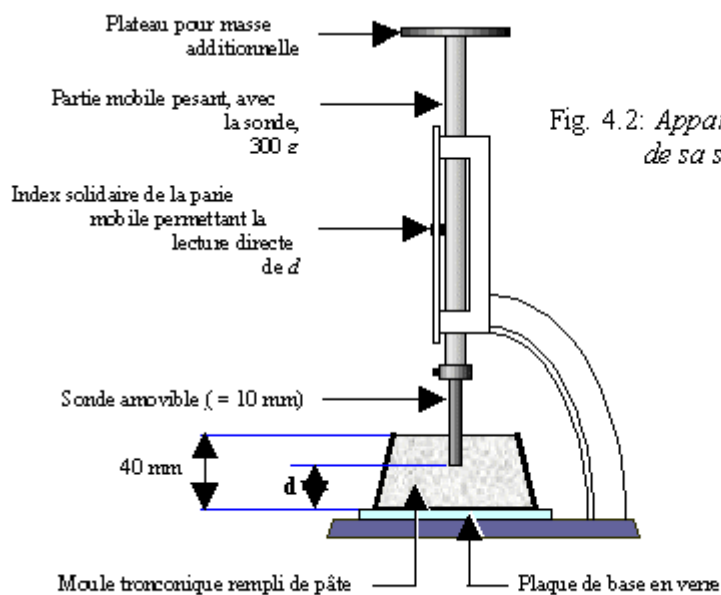


Fig. 4.2: Appareil de Vicat muni de sa sonde de consistance

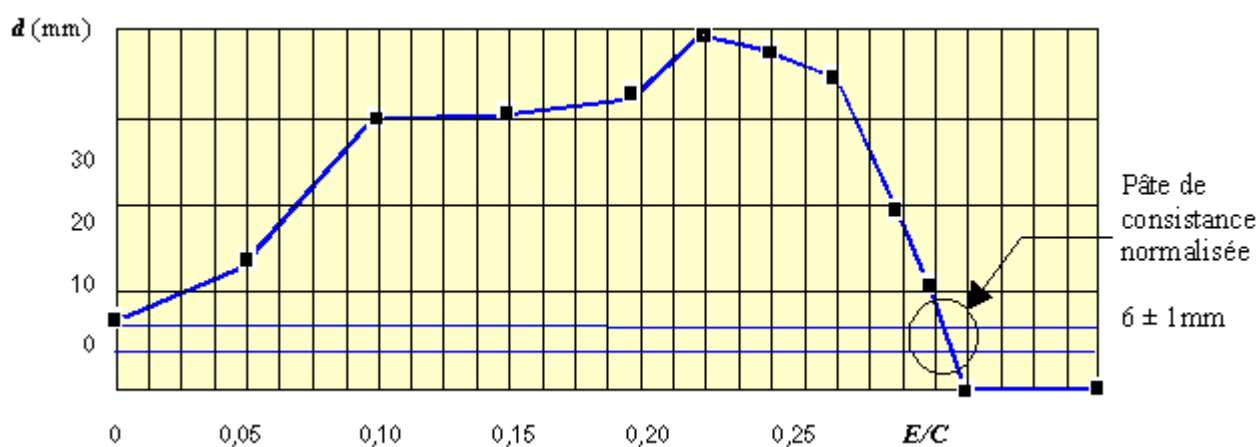


Fig. 4.3: Evolution de la *consistance* d'une pâte de ciment en fonction d' E/C

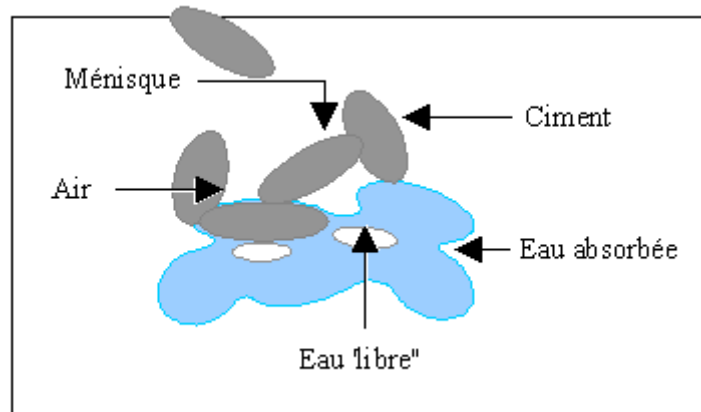


Fig. 4.4: Grains de ciment reliés entre eux par des ménisques capillaires

En effet, la présence d'air et d'eau dans la pâte conduit à l'apparition de ménisques capillaires qui solidarisent les grains de ciment entre eux (fig. 4.4). En l'absence d'eau ($E/C = 0$), il n'y a pas de tels ménisques; en absence d'air (dans l'essai considéré pour $E/C \approx 0,2$) il y en a plus; entre ces deux valeurs extrêmes de E/C la cohésion passe par un maximum pour $E/C \approx 0,18$ qui correspond à l'influence maximum des forces de capillarité. Pour $E/C > 0,18$, l'augmentation de la quantité d'eau contribue à éloigner les grains de ciment les uns des autres et donc à fluidifier le mélange.

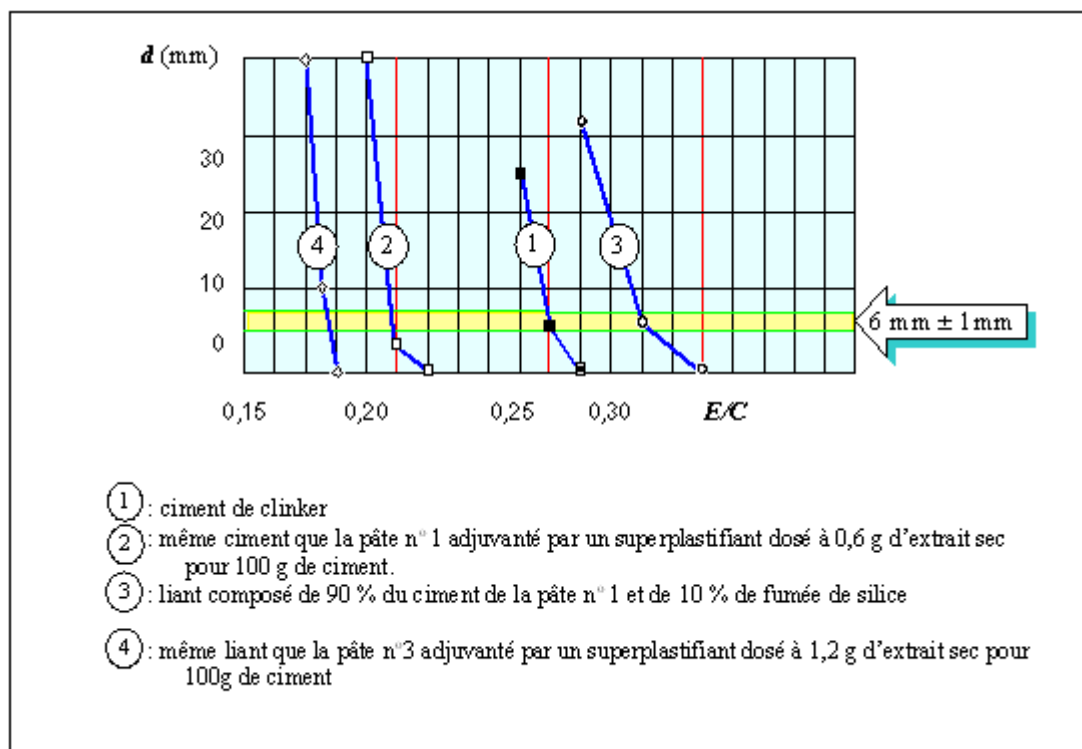


Fig. 4.5: Influence de la nature de ciment et des **adjuvants** sur la **consistance** normalisée.

Caractéristiques de fluidité (Norme NF P 18-358)

En général, les pâtes de ciment entrant dans la composition des mortiers ou des bétons ont des **consistances** beaucoup plus fluides et donc des dosages en eau plus importants. Quant aux pâtes qui sont utilisées pures pour l'injection des câbles de précontrainte, elles sont encore plus fluides et appelées coulis. Pour tester la **consistance** de ces coulis, on utilise alors un autre appareillage: le cône d'écoulement.

Un coulis trop épais mettra plus de temps pour pénétrer dans la gaine et parcourir toute la longueur; de plus la pression d'injection à exercer risque d'être plus élevée. Un coulis trop fluide risque de s'agréger (**ressuage** important). La fluidité se mesure habituellement à l'aide d'un cône de Marsh de 1875 cm^3 . On chronomètre le temps mis par un litre de coulis pour passer au travers d'un ajutage calibré (orifice 10 mm de diamètre et 60 mm de longueur). Plus l'écoulement sera rapide et plus le coulis sera réputé être fluide.

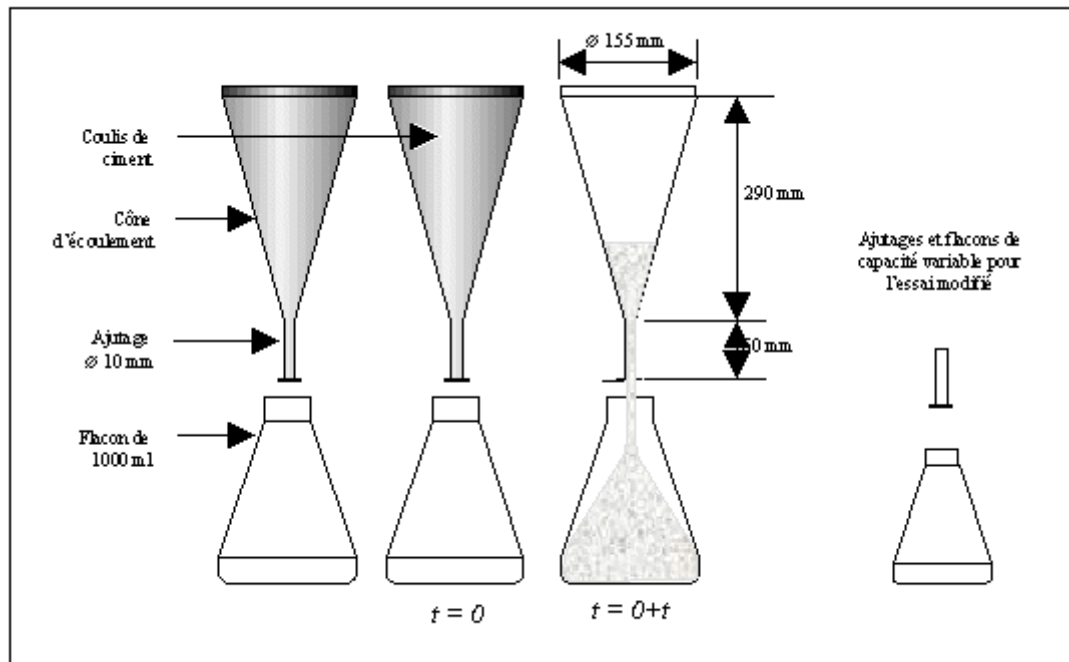


Fig. 4.6: Dimension du cône de Marsh (cône d'écoulement).

Caractéristiques de stabilité (Norme NF P 18-359)

L'essai consiste à mesurer la quantité d'eau qui resseue à la surface du coulis hydraulique laissé au repos et à l'abri de toute évaporation.

L'exsudation du coulis doit être réduite. La mesure s'effectue à l'aide d'une éprouvette en verre de 25 mm de diamètre, de 25 mm de hauteur, que l'on remplit jusqu'à une graduation comprise entre 95 et 100. Cette éprouvette est recouverte afin d'éviter toute évaporation. Les directives actuelles précisent que, dans ces conditions, la quantité d'eau exsudée à la surface du coulis, maintenue au repos pendant trois heures, ne devra pas être supérieure à 2 % du volume de coulis. Cette eau devra, de plus, être complètement réabsorbée 24 h après.

Le **temps de prise** (Norme NF P 18-362): Compte tenue de la température ambiante, le coulis ne devra pas faire **prise** trop tôt (risque d'obturation des gaines), ni trop tard (risque d'exsudation). Les temps de **prise** sont mesurés à trois températures différentes: 5, 20 et 30 °C.

Par temps chaud, le début de **prise** déterminé à 30 °C devra être supérieur à 3 h. Par temps froid, la fin de **prise** déterminée à 5 °C devra être inférieure à 24 h (au-delà, le risque de gel du coulis devient important).

Le **retrait** (Norme NF P 15- 361): Il est mesuré sur prismes de 4 x 4 x 16 cm, conservés à 20 °C et à 50,5 % d'humidité relative. Il doit être à 28 jours inférieurs de 2800 microns/mètre.

5. Le mortier

5.1 Introduction

Dans toute construction, il est indispensable de réunir entre eux les différents éléments (blocs de béton, briques, éléments en béton préfabriqué, etc.) au moyen d'un mortier de ciment ou d'autre liant qui a pour but de:

- solidariser les éléments entre eux;
- assurer la stabilité de l'ouvrage;
- combler les interstices entre les blocs de construction.

Le mortier est obtenu par le mélange d'un liant (**chaux** ou ciment), de **sable**, d'eau et éventuellement d'**additions**. La durée de malaxage doit être optimum, afin d'obtenir un mélange homogène et régulier.

Les mortiers peuvent être:

- préparés sur le chantier en dosant et en mélangeant les différents constituants y compris les **adjuvants**.
- préparés sur le chantier à partir de mortiers industriels secs pré dosés et avant l'utilisation, il suffit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire.
- livrés par une centrale: ce sont des mortiers prêts à l'emploi.

Les mortiers industriels se sont beaucoup développés ces dernières années; permettant d'éviter le stockage et le mélange des constituants sur des chantiers.

5.2 Composition

Le mortier est un des matériaux de construction, qui contient du ciment; de l'eau; du **sable**; des **adjuvants** et éventuellement des **additions**. Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure.

Les liants:

Généralement, on peut utiliser:

- les ciments normalisés (gris ou blanc);
- les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt, ..)
- les liants à maçonner;
- les **chaux** hydrauliques naturelles;
- les **chaux** éteintes

Les sables:

Normalement, les **sables** utilisés sont les **sables** appelés "**sable** normalisé". Les **sables** de bonne **granulométrie** doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important: Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de **sable** humide.

Les adjuvants:

Les **adjuvants** sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d'**adjuvants**:

- les **plastifiants** (réducteurs d'eau);
- les entraîneurs d'air;
- les modificateurs de **prise** (retardateurs, accélérateurs);
- les hydrofuges.

Dans tous les cas des soins particuliers doivent être pris afin d'obtenir des mortiers sans **ressuage**, homogènes d'une gâchée à l'autre.

Les ajouts:

Les ajouts que l'on utilise dans les mortiers sont:

- poudres fines **pouzzolaniques** (cendres, fumée de silice..);
- fibres de différentes natures;
- colorants (naturels ou synthétiques);
- polymères.

5.3 Les différents mortiers

Dans les travaux publics on utilise différents types de mortier:

Les mortiers de ciment

Les mortiers de ciments sont très résistants, prennent et durcissent rapidement. Le dosage du rapport entre le ciment et le **sable** est en général volumétrique de 1:3 et le rapport de l'eau sur ciment est environ 0,35. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables.

Les mortiers de chaux

Les mortiers de **chaux** sont moins résistants par rapport aux mortiers de ciment (gras et onctueux). La durée du **durcissement** des mortiers de **chaux** est plus lente que pour les mortiers de ciments.

Les mortiers bâtards

Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de **chaux**. Généralement, on utilise la **chaux** et le ciment par parties égales, mais des fois on prend une quantité plus ou moins grande de l'un ou l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

5.3.1 Mortiers fabriqués sur chantier

Ils sont préparés avec le ciment et le **sable** du chantier. Le ciment est un ciment courant CPA ou CPJ et parfois des ciments spéciaux comme le ciment alumineux fondu.

On emploie également des **chaux** hydrauliques et parfois des liants à maçonner. Le **sable** est le plus souvent roulé (nature silico-calcaires) parfois concassé et le gâchage s'effectue à la pelle ou à l'aide d'une petite **bétonnière**. Ces mortiers ne sont donc pas très réguliers et les **sables** peuvent être différents d'une livraison à l'autre, mais de toutes façons ils doivent être propre et de bonne **granulométrie**.

Le **sable** est généralement dosé en poids (ce qui est préférable), soit en volume (cas des petits chantiers). Dans ce dernier cas, il est très important de tenir compte du phénomène de foisonnement des **sables**.

5.3.2 Mortier industriel

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortiers, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre.

Les mortiers peuvent contenir des liants et des **sables** variés ainsi que certains **adjuvants** et éventuellement des colorants.

5.4 Caractéristiques principales

Les caractéristiques principales des mortiers sont:

5.4.1 Ouvrabilité

L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils. Les plus connus sont:

a) La table à secousses: le mortier, après avoir été mis en place et démoulé d'un moule tronconique, reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue. L'étalement en % est donné par la formule:

$$E\% = 100 \frac{D_r - D_i}{D_i}$$

Avec D_r = diamètre final et D_i = diamètre initial.

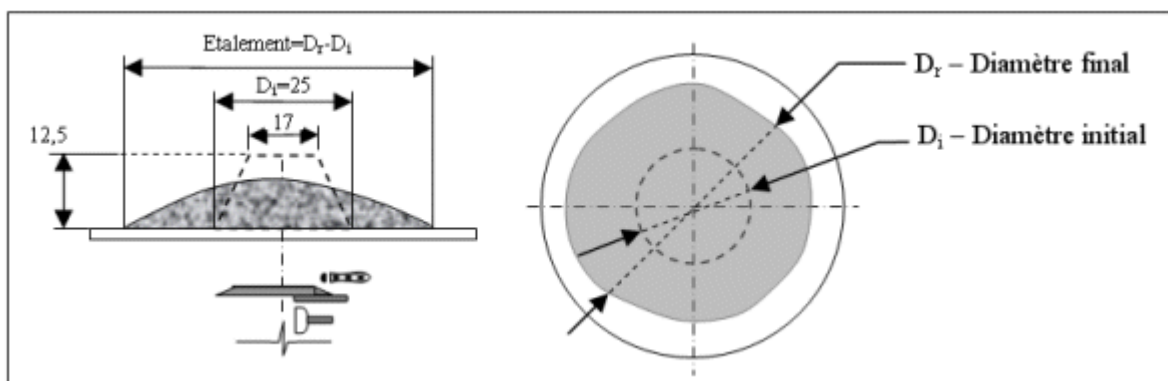


Fig. 5.4.1 : Table à secousses

b) Le maniabilimètre du LCPC: il est constitué d'un moule parallélépipédique comportant une paroi mobile et un vibreur. Le principe de l'essai consiste, après avoir enlevé la paroi mobile, à mesurer le temps mis par le mortier sous **vibrations** pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule.

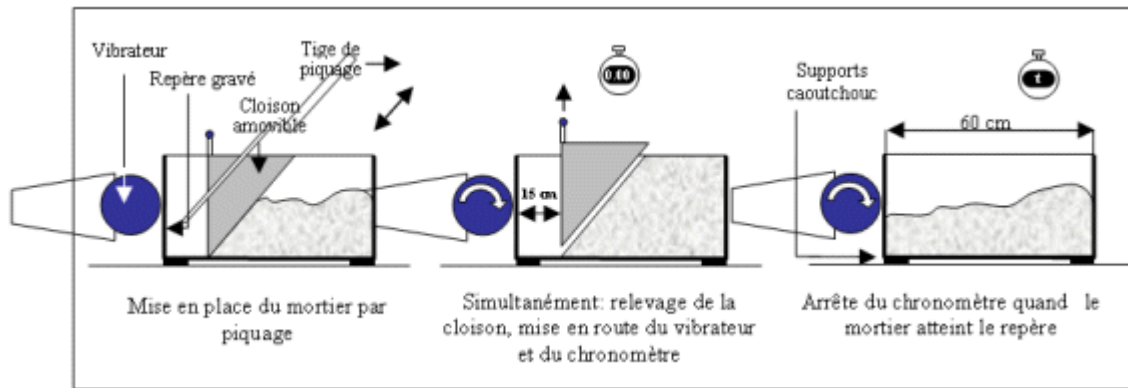


Fig. 5.4.2 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre B

c) Le cône: dans le cas d'un mortier fluide, on peut mesurer le temps d'écoulement d'une certaine quantité de mortier au travers d'un ajustage calibré situé à la partie inférieure d'un cône. Le cône peut aussi être muni d'un vibreur.

5.4.2 Prise

Le temps de **prise** se mesure habituellement sur une pâte pure de ciment de **consistance** normale (24 à 30% d'eau) et conformément à la norme concernée (à l'aide de l'appareil de Vicat). Il est possible d'obtenir (hors norme) le temps de **prise** d'un mortier avec le même appareillage mais en plaçant une surcharge de 700 grammes sur le plateau supérieur. Le poids de l'aiguille pénétrant dans le mortier est de 1000 grammes. Le début de **prise** est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond (taille des plus gros grains de **sable**) et la fin de **prise** est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur.

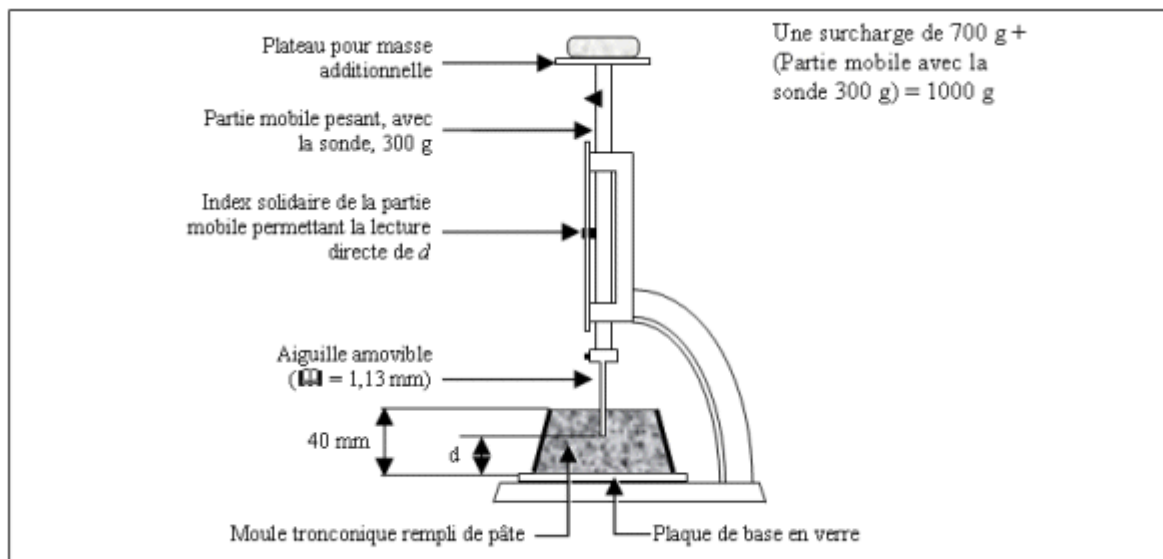


Fig. 5.4.3 : Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge

5.4.3 Résistances mécaniques

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4 x 4 x 16 cm conservés dans l'eau à 20 °C.

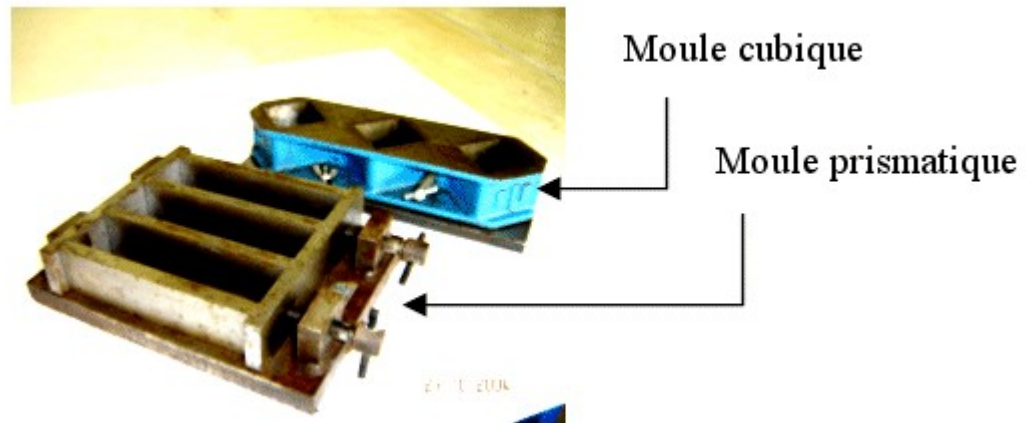


Fig. 5.4.4 : Moule pour moulage des éprouvettes de mortier

Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression. Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours).

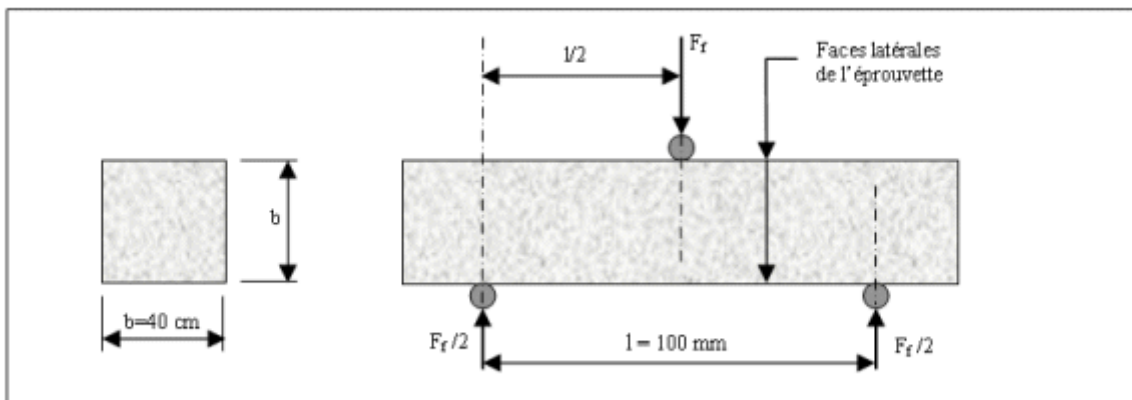


Fig. 5.4.5 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

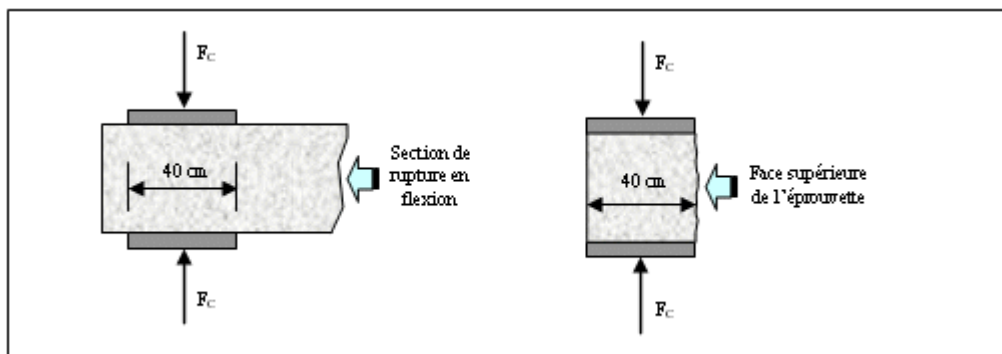


Fig. 5.4.6 : Dispositif de rupture en compression.

Les résistances des mortiers (comme dans le cas des bétons) dépendent de très nombreux facteurs:

- nature et dosage en ciment;
- rapport C/E;

- granulométrie et nature du **sable**;
- énergie de malaxage et mise en œuvre;
- protection les tous premiers jours.

5.4.4 Retraits et gonflements

Les **retraits** se mesurent sur des prismes 4 x 4 x 16 cm en mortier 1/3, munis de plots à leurs extrémités et conservés, après démoulage, dans une enceinte à 20 °C et à 50 % d'humidité relative. Ce **retrait** progresse à peu près comme le logarithme entre 1 et 28 jours.

Le mortier prend son **retrait** plus rapidement que la pâte pure. Le rapport du **retrait** de la pâte pure sur le **retrait** du mortier croît avec le temps. Il est de l'ordre de 1,5 à 2,5 les premiers jours, puis augmente pour atteindre 2,5 à 3,5 en un an. En moyenne, le **retrait** sur mortier est 2 à 3 fois plus faible que celui de la pâte pure (avec le même ciment).

Le gonflement des mortiers (qui se produisent lorsqu'ils sont conservés dans l'eau) se mesure sur les mêmes éprouvettes de 4 x 4 x 16 cm conservées dans l'eau à 20 °C. Ils sont en général assez faibles (cas de ciment stable ayant une expansion aux aiguilles de le Châtelier inférieure sur pâte pure à 10 mm).

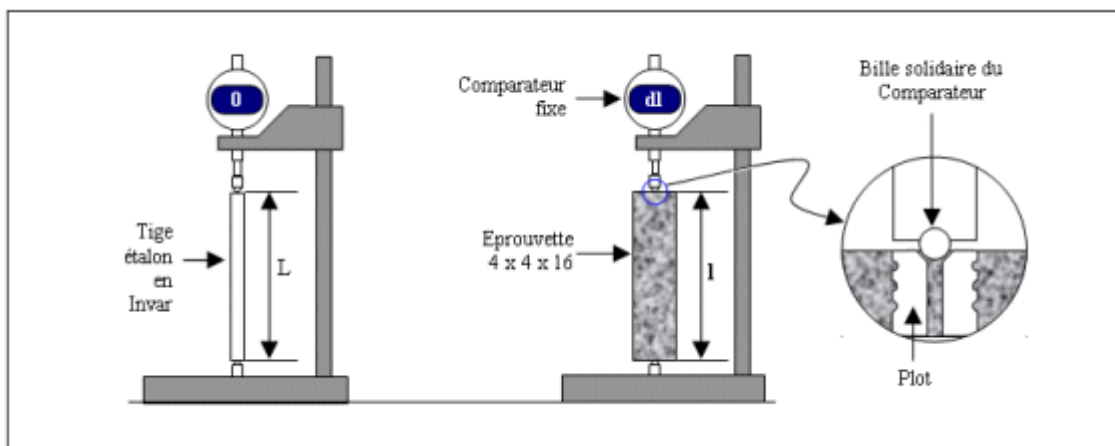


Fig. 5.4.7 : Appareillage pour la mesure du **retrait**

Présentation du chapitre 6

Ce chapitre traite du béton. Après une présentation de ses constituants, de sa mise en œuvre, de ses avantages et de ses inconvénients, nous verrons comment il peut être classifié suivant sa masse volumique ou la nature du liant.

Sommaire du chapitre 6

6.1 Introduction

6.2 Classification

6.3 Sélection des éléments

6.4 Etude de la composition

6.5 Caractéristiques principales du béton frais

6.6 Caractéristiques principales du béton durcissant

6.6 Caractéristiques principales du béton durcissant

6.7 Les déformations du béton

6.1 Introduction

Le béton est un matériau composite aggloméré constitué de granulats durs de diverses dimensions collées entre eux par un liant. Dans les bétons courants, les granulats sont des grains de pierre, **sable**, gravier, cailloux et le liant est un ciment, généralement un ciment portland. Les composants sont très différents: leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m³. Si le type de liant utilisé n'est pas un ciment, on parle alors, selon le liant utilisé, de béton de résine, de béton d'hydrocarboné, de béton d'argile, etc.

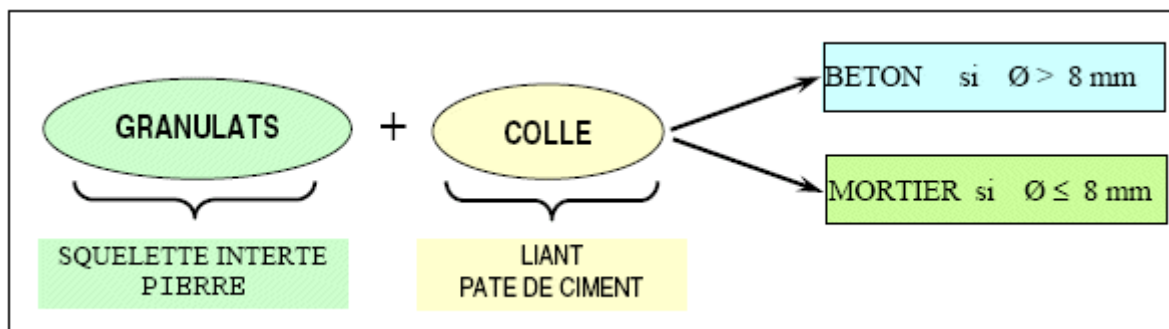


Fig 6.1.1 : La différence entre le béton et le mortier.

Les différents granulats forment le squelette granulaire du mortier ou du béton. Le ciment, l'eau et les **adjuvants** forment la pâte liante. Lorsqu'il y a pas de squelette granulaire, on parle de "pâte de ciment". La pâte est un élément unique et actif du béton enrobant les granulats. L'objectif est de remplir les vides existants entre les grains. La pâte joue le rôle de lubrifiant et de colle.

Dans le béton où une très grande **compacité** est recherchée (béton HP par exemple), la dimension des éléments les plus fins peut descendre en dessous de 0,1 mm (**fillers**, fumée de silice).

De même les granulats très légers ont des masses volumiques inférieures à 100 kg/m³.

Ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton courant, présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 6.1.1: La composition des constituants de béton en poids et en volume

Constituants	Eau	Air	Ciment	Granulats
▪ Volume (%)	14 – 22	1 – 6	7 – 14	60 – 78
▪ Poids (%)	5 – 9		9 – 18	63 – 85

Les divers stades de fabrication et de vie du béton

CONSTITUANTS D'UN BETON :

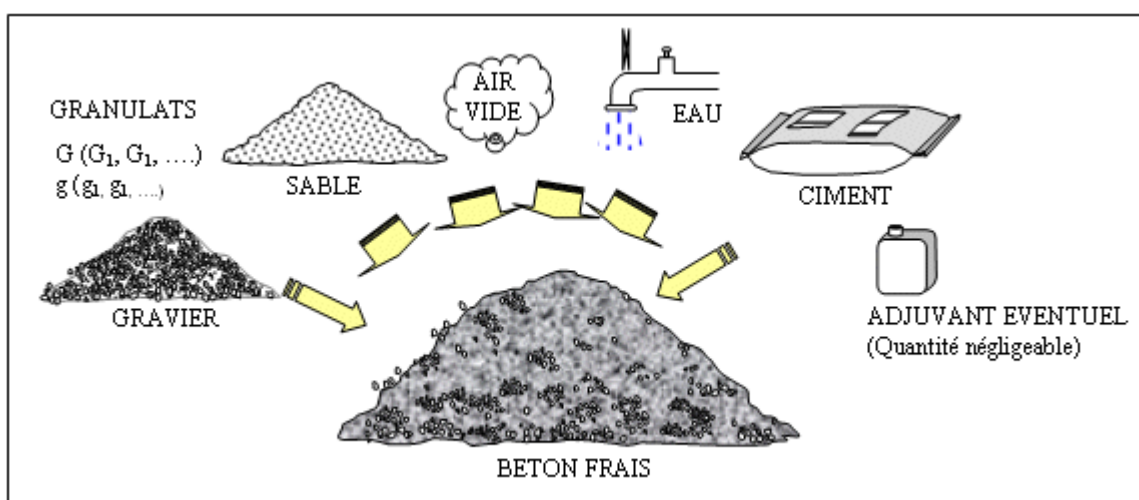


Fig 6.1.2: Les constituants du béton (Fabrication du béton frais)

MISE EN OEUVRE :

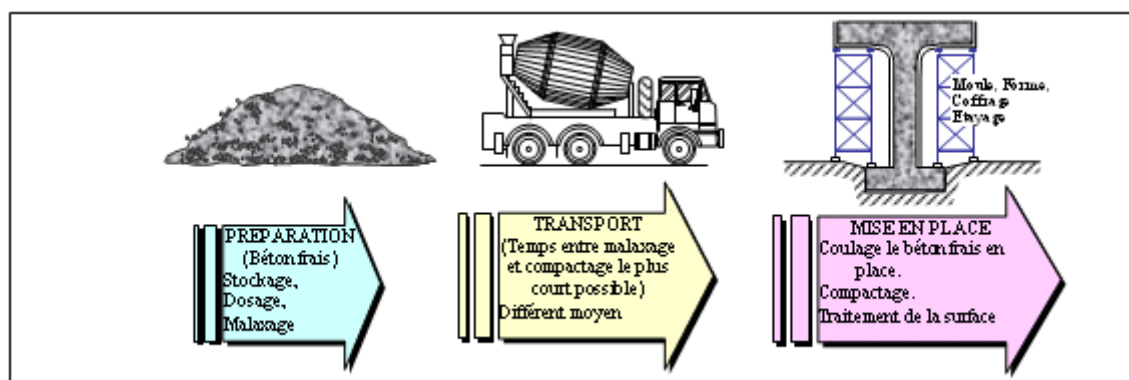


fig 6.1.3: Transport et mise en place le béton frais

Toutes les opérations de mise en oeuvre sont importantes si l'on veut obtenir un béton dense de qualité homogène.

DURCISSEMENT :

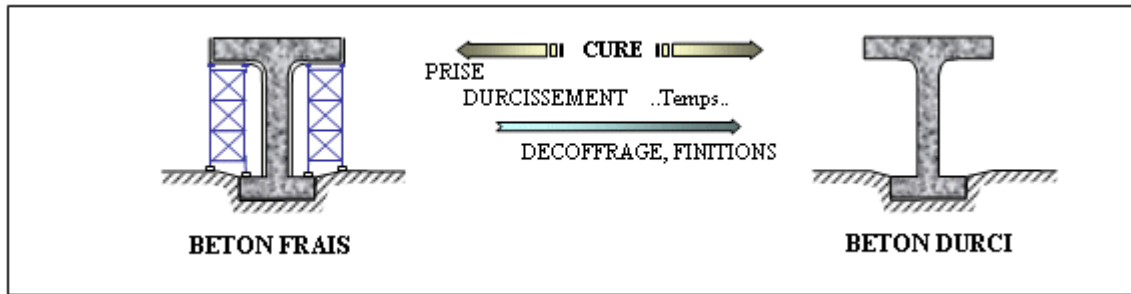


Fig 6.1.4: Durcissement finition

La condition favorable pour le **durcissement** d'un béton:

- l'humidité
- la température supérieure à 50 °C.
- le calme pendant la période de cure (absence de sollicitation d'ordre mécanique ou physique).

VEILLISSEMENT :

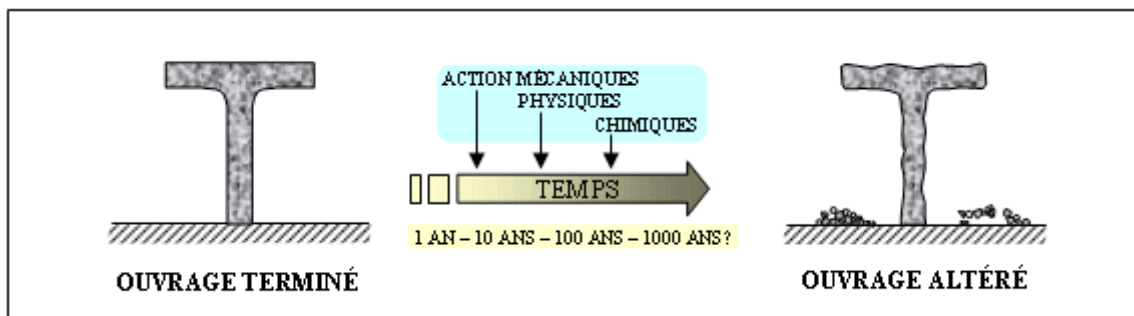


Fig 6.1.5: Détermination, exploitation et destruction

Pour être durable, un béton doit:

- être bien composé.
- correctement mis en oeuvre.
- protégé des causes possibles d'altération par des dispositions constructives adéquates.

Principaux avantages et inconvénients du béton

Avantages du béton:

- Il est peu coûteux, facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien.
- Il épouse toutes les formes qui lui sont données. Des modifications et adaptations du projet sur le chantier sont faciles à effectuer.
- Il devient solide comme de la pierre. Correctement utilisé, il dure des millénaires. Il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles.
- Associé à des armatures en acier, il acquiert des propriétés nouvelles qui en font un matériau de construction aux possibilités immenses (béton armé, béton précontraint).
- Il convient aux constructions monolithiques. Les assemblages sont faciles à réaliser dans le cas de béton coulé sur place. Dans la

plupart des cas, les dimensions des ouvrages et éléments d'ouvrage en béton sont suffisants pour ne pas poser de problème délicat de stabilité.

- Les ressources nécessaires pour sa fabrication existent dans de nombreux pays en quantités presque illimitées.
- Il exige peu d'énergie pour sa fabrication.

Inconvénients du béton:

Les principaux inconvénients du béton ont pu être éliminés grâce à son association à des armatures en acier ou à l'utilisation de la précontrainte. De toutes façons, il reste les quelques inconvénients suivants:

- son poids propre élevé (**densité** de 2,4 environ qui peut être réduite à 1,8 dans le cas de bétons légers de structure et à moins de 1,0 dans le cas de béton légers d'isolation)
- sa faible isolation thermique (elle peut être facilement améliorée en ajoutant une couche de produit isolant ou en utilisant des béton légers spéciaux)
- le coût élevé entraîné par la destruction du béton en cas de modification d'un ouvrage.

6.2 Classification du béton

Le béton fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par sa caractéristique de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, son aptitude au vieillissement, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects. Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories.

En général le béton peut être classé en 4 groupes, selon la **masse volumique**:

- Béton très lourd: $> 2500 \text{ kg/m}^3$.
- Béton lourd (béton courant): $1800 - 2500 \text{ kg/m}^3$.
- Béton léger: $500 - 1800 \text{ kg/m}^3$.
- Béton très léger: $< 500 \text{ kg/m}^3$.

Le béton courant peut aussi être classé en fonction de la nature des liants:

- Béton de ciment (le ciment),
- Béton silicate (la **chaux**),
- Béton de gypse (le gypse) et
- Béton asphalte.

Le béton peut varier en fonction de la nature des granulats, des **adjuvants**, des colorants, des traitements de surface et peuvent ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect.

a) Les bétons courants sont les plus utilisés, aussi bien dans le bâtiment qu'en travaux publics. Ils présentent une **masse volumique** de 2003 kg/m^3 environ. Ils peuvent être armés ou non, et lorsqu'ils sont très sollicités en flexion, précontraints.

- b) Les bétons lourds, dont les masses volumiques peuvent atteindre 6000 kg/m^3 servent, entre autres, pour la protection contre les rayons radioactifs.
- c) Les bétons de granulats légers, dont la résistance peut être élevée, sont employés dans le bâtiment, pour les plates-formes offshore ou les ponts.
- d) Les bétons cellulaires (bétons très légers) dont les masses volumiques sont inférieures de 500 kg/m^3 . Ils sont utilisés dans le bâtiment, pour répondre aux problèmes d'isolation.
- e) Les bétons de fibres, plus récents, correspondent à des usages très variés: dallages, éléments décoratifs, mobilier urbain.

La norme ENV 206 classe les bétons en fonction de leur résistance caractéristique à la compression conformément au tableau 6.1. Dans ce tableau $f_{ck,cyl}$ est la résistance caractéristique mesurée sur cylindres (c'est cette résistance qui correspond à la résistance caractéristique à laquelle il est fait référence dans l'Eurocode 2) ; $f_{ck,cube}$ est la résistance caractéristique mesurée sur cubes. Les valeurs soulignées sont les valeurs recommandées.

Tableau 6.3: Classes de résistance du béton

Classe	<u>C12/15</u>	<u>C16/20</u>	<u>C20/25</u>	<u>C25/30</u>	<u>C30/37</u>	<u>C35/45</u>	<u>C40/50</u>	<u>C45/55</u>	<u>C50/60</u>
$f_{ck,cyl}$ (Mpa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ck,cube}$ (Mpa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60

6.3 Sélection les éléments pour béton

Le béton est composé de granulats, de ciment, d'eau et éventuellement d' **adjuvants**. Parmi les quatre constituants, les granulats jouent un rôle important, d'une part car ils forment le squelette et présentent, dans les cas usuels, environ 80 % du poids total du béton et d'autre part car au point de vue économique, ils permettent de diminuer la quantité de liant qui est le plus cher. En plus, du point de vue technique, ils augmentent la stabilité dimensionnelle (**retrait**, **fluage**) et ils sont plus résistants que la pâte de ciment.

Les granulats utilisés dans les travaux de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et des caractéristiques propres à chaque usage.

Qualités exigées des granulats

Les granulats utilisés pour la fabrication des bétons doivent:

- a) être stables et durables et donc résister:

- à des cycles de mouillage et séchage
- à des cycles de gel et dégel
- à des variations de température
- à l'abrasion et à l'usure
- aux actions chimiques

**stabilité
du béton**

Pour remplir ces conditions, il suffit en général de choisir des granulats compacts (ou peu poreux) et non réactifs avec le ciment

b) posséder une certaine résistance et dureté:

De nombreux essais effectués par Ferret ont montré que si les granulats ont une résistance supérieure à celle de la pâte liante, la résistance du béton n'est que peu influencée par la résistance des granulats seuls, pour autant que l'adhérence de la pâte aux grains soit satisfaisante.

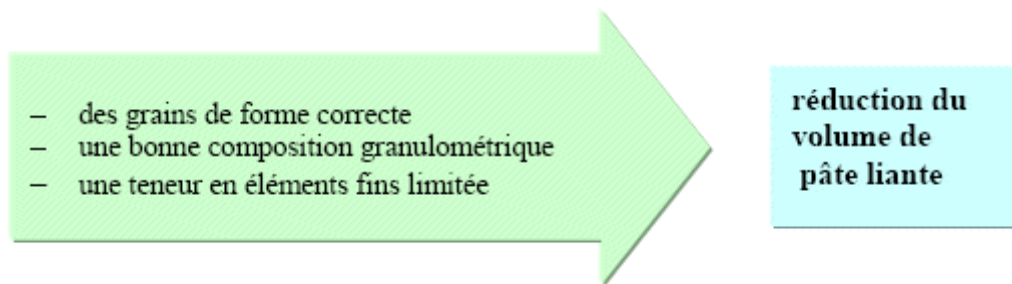
**résistance
du béton**

c) être propre:

- exempts d'éléments argileux
- à des cycles de gel et dégel

**adhérence granulats -
pâte liante**

d) donner un mélange compact, ce qui nécessite



6.4 Etude de la composition du béton

En général il n'existe pas de méthode de composition du béton qui soit universellement reconnue comme étant la meilleure. La composition du béton est toujours le résultat d'un compromis entre une série d'exigences généralement contradictoires.

De nombreuses méthodes de composition du béton plus ou moins compliquées et ingénieuses ont été élaborées. On notera qu'une étude de composition de béton doit toujours être contrôlée expérimentalement et qu'une étude effectuée en laboratoire doit généralement être adaptée ultérieurement aux conditions réelles du chantier.

Une méthode de composition du béton pourra être considérée comme satisfaisante si elle permet de réaliser un béton répondant aux exigences suivantes :

- Le béton doit présenter, après **durcissement**, une certaine résistance à la compression.
- Le béton frais doit pouvoir facilement être mis en oeuvre avec les moyens et méthodes utilisées sur le chantier.
- Le béton doit présenter un faible **retrait** et un **fluage** peu important.
- Le coût du béton doit rester le plus bas possible.

Dans le passé, pour la composition du béton, on prescrivait des proportions théoriques de ciment, d'agrégat fin et d'agrégat grossier. Mais l'élaboration des ciments ayant fait des progrès considérables, de nombreux chercheurs ont exprimé des formules en rapport avec les qualités recherchées:

- minimum de vides internes, déterminant une résistance élevée;
- bonne étanchéité améliorant la durabilité
- résistance chimique;
- résistance aux agents extérieurs tels que le gel, l'abrasion, la dessiccation.

Sur un petit chantier où l'on fabrique artisanalement et souvent bien son béton l'on utilise le vieux principe: 2/3 de gros éléments et 1/3 d'éléments fins, soit 800 litres de gravillons et 400 litres de **sable** par mètre cube de béton pour 350 à 400 kg de ciment. La quantité d'eau de gâchage varie trop souvent

au gré du savoir-faire du maçon, la nature de ciment, l'humidité du granulat passant après la **consistance** du béton à obtenir.

Le béton peut varier en fonction de la nature des granulats, des **adjuvants**, des colorants, des traitements de surface, et peut ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ces performances et par son aspect.

La composition d'un béton et le dosage de ses constituants sont fortement influencés par l'emploi auquel est destiné le béton et par les moyens de mise en oeuvre utilisés.

Dans la composition d'un béton, les deux relations importantes suivantes interviennent:

- La somme des poids des constituants de 1 m³ de béton fini est égal au poids de 1 m³ de béton fini. Si le ciment (C), l'eau (E) et les granulats (G_i) sont les poids des constituants en kg par m³ de béton fini et Δ. la **densité** du béton en place, on a :

$$C + E + (\sum G_i) = 1000$$

- Le volume occupé par les constituants de 1 m³ de béton est égal à 1 m³. Si (C), (E) et (G_i) sont les volumes absolus des constituants en litres par m³ de béton fini, on a :

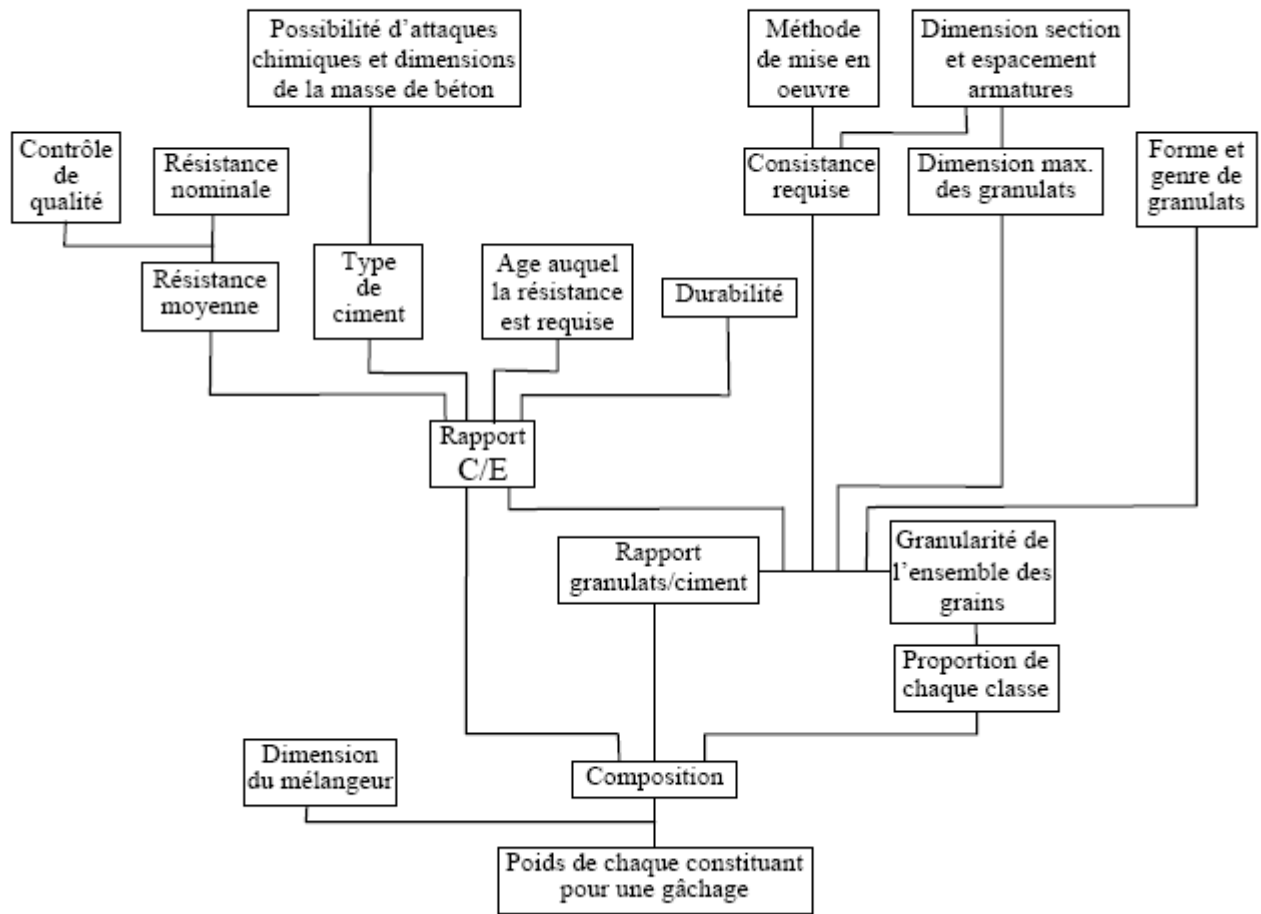
$$C + E + (\sum G_i) + V = 1000$$

Il est avantageux d'écrire ces deux relations sous forme tabulaire :

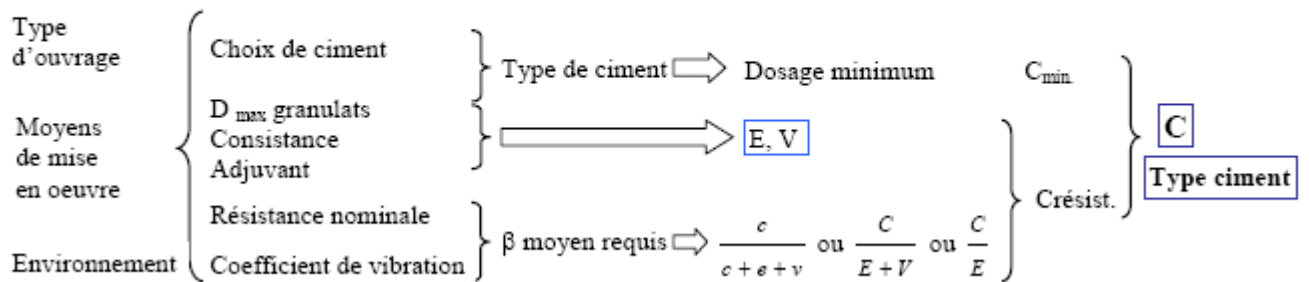
Tableau 6.4.2: Le dosage des constituants de béton en poids et en volumes absolus

CONSTITUANTS	DOSAGE EN POIDS (kg)		Masse spécifique (kg/dm ³)	DOSAGE EN VOLUMES ABSOLUS en L/m ³
	par gâchée de "α" m ³	par m ³		
– Ciment	α C	C	γ _C	c = C/γ _C
– Eau	α E	E	1	e = E
– Granulats 1	α G1	G1	γ _{G1}	g1 = G1/γ _{G1}
– Granulats 2	α G2	G2	γ _{G2}	g1 = G1/γ _{G2}
– Granulats 3	α G3	G3	γ _{G3}	g1 = G1/γ _{G3}
– Air	----	----	----	v
Σ	1000αΔ	1000 Δ	----	1000

DONNEES ET FACTEURS DE BASE



Etude de la composition



$C + E + \Sigma G = 1000\Delta$	CIMENT	γ_C	----	----
	EAU	1.00	----	----
$c + e + \Sigma g + v = 1000$	GRANULATS (1,2)	γ_G	----	----
	AIR	-	-	----
			1000 Δ	1000

$\Rightarrow$ ΣG

Courbes granulométriques

$$G_1 = p_1 \Sigma G, \quad G_2 = p_2 \Sigma G, \dots, \quad G_i = p_i \Sigma G$$

Essai de gâchage

- Béton frais : mesure Δ (contrôle des dosages effectifs) mesure plasticité (contrôle de la **consistance**) mesure teneur en air (contrôle des vides) Fabrication éprouvette (contrôle de β moyen)
- Béton durci: mesure Δ , mesure β cube, évolution scléromètre, évolution essai gel, perméabilité, essais spéciaux...

Corrections

En fonction des observations, des mesures faites lors de l'essai de gâchage et des résistances mécaniques obtenues, il sera nécessaire d'effectuer des corrections.

a) Consistance : Lors de l'essai de gâchage, il est recommandé de ne pas ajouter tout de suite la quantité d'eau totale E prévue. Il est préférable d'ajouter seulement 95 % de E, de mesurer la **consistance**, puis d'ajouter de l'eau jusqu'à obtention de la **consistance** prescrite.

b) Dosage en ciment : Si le dosage en ciment effectivement réalisé est faux, on devra le corriger. S'il faut rajouter (ou enlever) un poids ΔC de ciment pour obtenir le dosage désiré, on devra enlever (ou rajouter) un volume absolu équivalent de **sable**, soit un poids ΔS égal à :

$$\Delta S = \Delta C \cdot \frac{\gamma_{\text{sable}}}{\gamma_{\text{ciment}}} = \frac{2,68}{3,1} \Delta C$$

Si ΔC est important, il faudra aussi corriger la quantité d'eau.

c) Résistances mécaniques : Si les résistances mécaniques sont insuffisantes, il faudra avoir recours à l'une ou plusieurs des possibilités suivantes :

- Augmenter le dosage en ciment (au-delà de 400 kg/m³, une augmentation de dosage en ciment n'a plus qu'une très faible influence sur l'accroissement de résistance).
- Diminuer le dosage en eau sans changer la **granulométrie**.
- Corriger la **granulométrie** et réduire la quantité d'eau.
- Utiliser un autre type de granulats.
- Utiliser un **adjuvant** et réduire la quantité d'eau.
- Utiliser un ciment à **durcissement** plus rapide.

On devra en tous cas toujours veiller à ce que la **consistance** du béton permette une mise en oeuvre correcte

6.5 Caractéristiques principales du béton frais

La caractéristique essentielle du béton frais est l'**ouvrabilité**, qui conditionne non seulement sa mise en place pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, mais également ses performances à l'état durci.

Il existe un très grand nombre d'appareils de mesure de l'**ouvrabilité** du béton reposant sur des principes différents. Certains mesurent une **compacité**, d'autres un temps d'écoulement ou encore utilisent l'énergie potentielle du béton ou nécessitent un apport d'énergie extérieur.

On comprend qu'il est difficile de convenir d'un tel appareil tenant compte de tous les bétons possibles pour tous les usages et qui tiennent compte aussi des différents facteurs de l'**ouvrabilité**. Certains appareils sont utilisés à la fois par les laboratoires et par les chantiers. La distinction proposée est donc parfois assez artificielle, sauf dans le cas d'appareillage très élaboré.

6.5.1. L'ouvrabilité du béton frais.

Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'**ouvrabilité**. On n'en citera que quelques-uns qui sont les plus couramment utilisés dans la pratique.

Affaissement au cône d'Abrams.

Cet essai (slump-test) est incontestablement un des plus simples et des plus fréquemment utilisés, car il est très facile à mettre en œuvre. Il ne nécessite qu'un matériel peu coûteux et peut être effectué directement sur chantier par un personnel non hautement qualifié mais ayant reçu simplement les instructions nécessaires au cours de quelques séances de démonstration. L'appareillage est complètement décrit dans la norme NF P 18-451 et est schématisé sur la figure 6.5.1. Il se compose de 4 éléments: un moule tronconique sans fond de 30 cm de haut, de 20 cm de diamètre en sa partie inférieure et de 10 cm de diamètre en sa partie supérieure; une plaque d'appui; une tige de piquage; un portique de mesure.

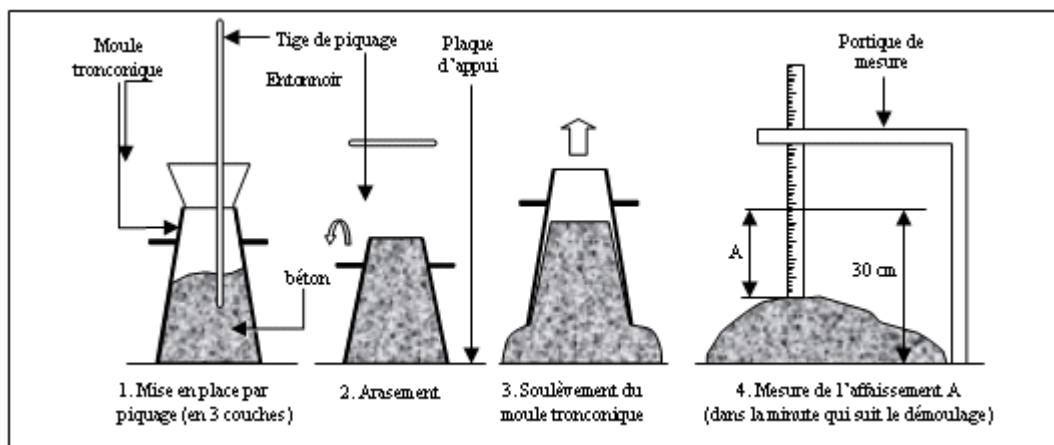


Fig. 6.5.1: Mesure de l'**affaissement au cône d'Abrams**

Les mesures sont évidemment quelques peu dispersées et il ne faut pas accorder à cet essai un caractère trop rigoureux, mais on peut admettre qu'il caractérise bien la **consistance** d'un béton et permet le classement approximatif indiqué au tableau 6.5.1

Tableau 6.5.1 : Appréciation de la **consistance** en fonction de l'affaissement au cône

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme F	0 à 4	± 1 cm
Plastique P	5 à 9	± 2 cm
Très plastique TP	10 à 15	± 3 cm
Fluide F1	≥ 16	

Malheureusement, cet essai ne convient pas pour tester les bétons qui seraient encore plus fermes, plus secs qu'un béton donnant un affaissement presque nul. Dans ce cas-là, il convient de déterminer la **consistance** du béton frais par une autre méthode, qui s'appelle l'essai Vébé, schématisé sur la figure 6.5.2.

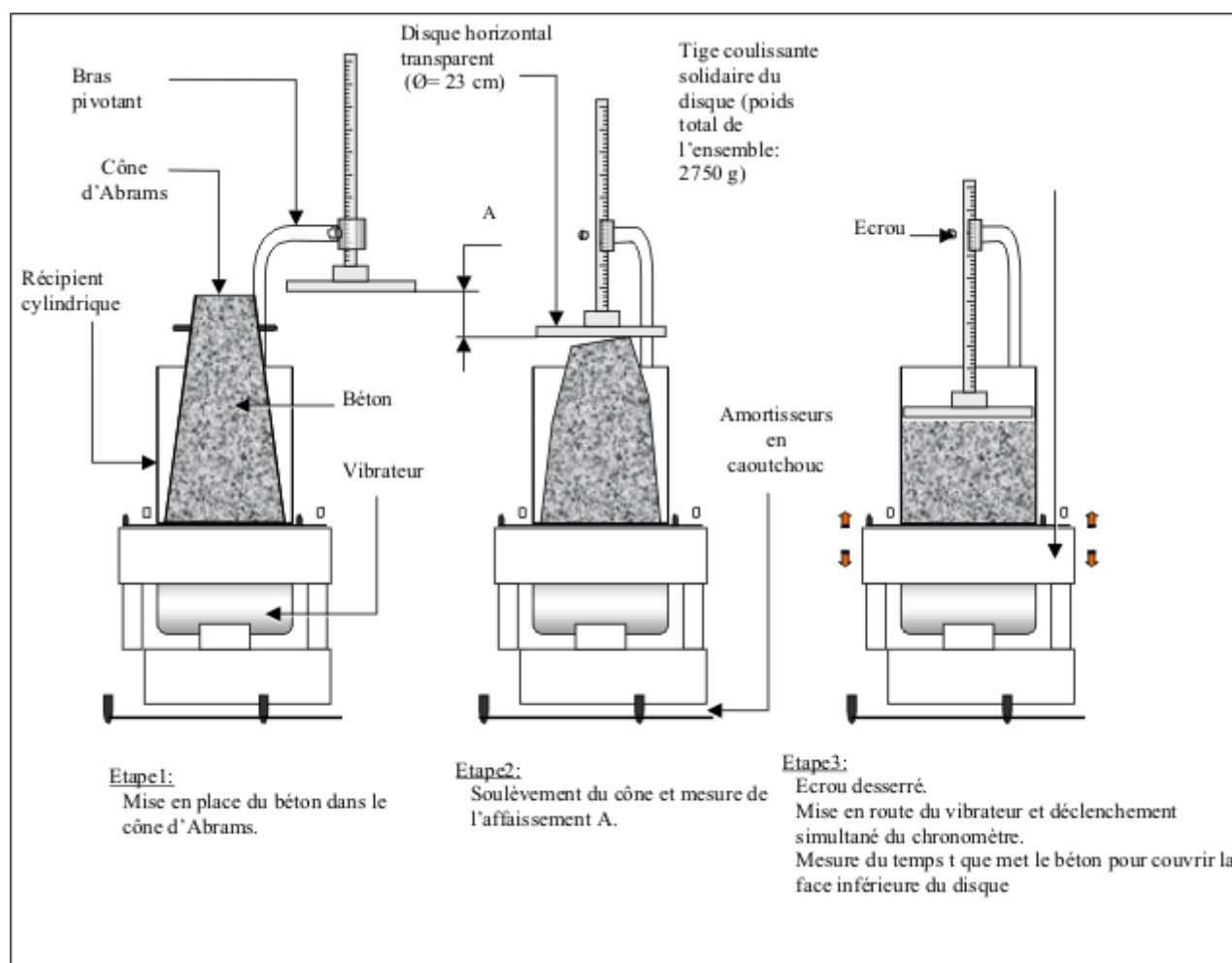


Fig. 6.5.2: Mesure de la **consistance** (Essai vébé)

Etalement sur table (flow-test)

L'essai d'étalement sur table (Flow-test) consiste à utiliser une table à chocs Fig. 6.5.2 comprenant un plateau métallique animé d'un mouvement vertical. Un moule tronconique disposé sur cette table et du matériau à étudier (mortier ou béton). Après arasement et démoulage (en soulevant le moule), on donne à la table, à l'aide d'une manivelle, quinze chocs en quinze secondes (hauteur de chute = 12,5 mm). Le matériau s'étale sous forme d'une galette dont on mesure les deux diamètres perpendiculaires. L'étalement (en %) est donné par la formule :

$$\frac{D - D_1}{D} \times 100$$

avec D_1 : diamètre inférieur du moule :
 D : diamètre moyen de la galette après étalement.

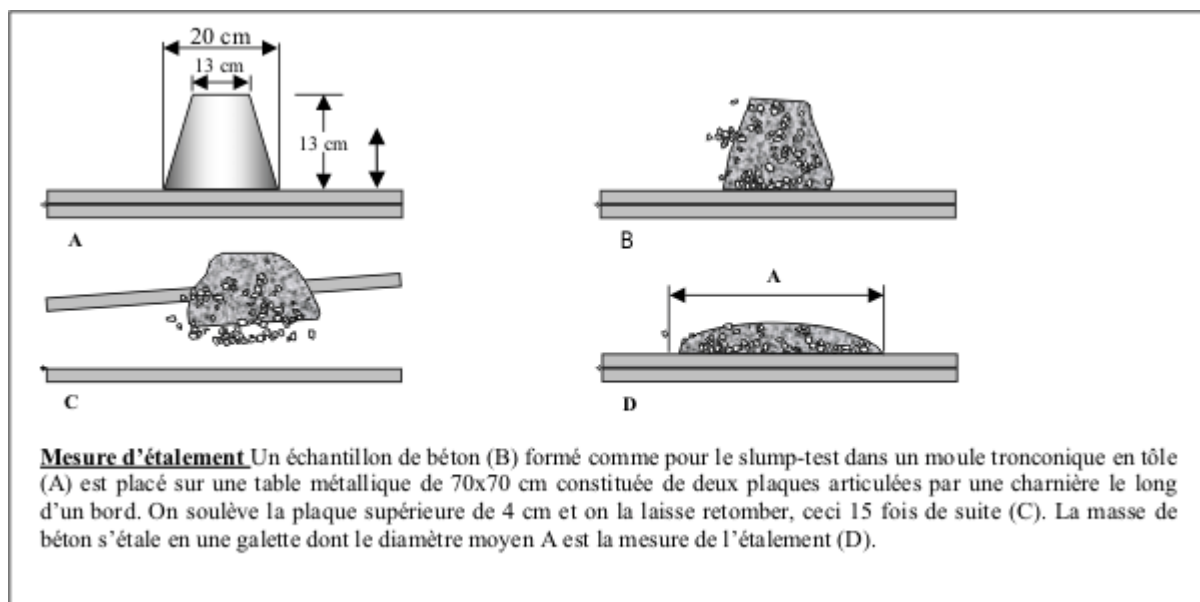


Fig. 6.5.2: Mesure de l'affaissement sur table

C'est un essai très simple utilisable sur mortier ou sur béton (moules et tables de dimensions différentes), aussi bien en laboratoire que sur les chantiers (il est dans ce cas, très utilisé en Allemagne). On peut pour le béton admettre les valeurs données dans le tableau 6.5.1

Tableau 6.5.1: Les valeurs d'étalement à la table

Ouvrabilité	Étalement à la table (%)
Très ferme	10 – 30
Ferme	30 – 60
Normal	60 – 80
Mou	80 – 100
Très mou à liquide	>100

6.5.2. Résistance du béton frais.

La résistance du béton frais est faible, mais elle intéresse plus particulièrement les fabricants pour le démoulage immédiat (avant prise du ciment) d'éléments de grande série.

À la suite d'études faites sur ce sujet, il semble que:

- le rapport optimal E/C est voisin de 0,40 (béton plutôt sec),
- le pourcentage optimal $\frac{\text{Sable}}{\text{Granulat}}$ est d'environ 0,38 (soit : G/S = 2,6 valeur élevée),
- les granulats concassés donnent des résistances plus élevées que les granulats roulés,
- la fréquence de la vibration est prépondérante (résistance triplée quand on passe de 3000 à 6000 périodes par minute).

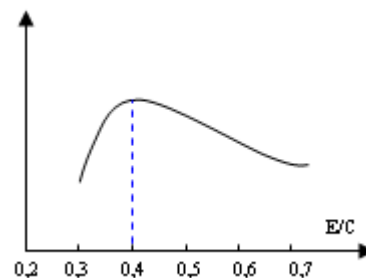


Fig. 6.5.3: Résistance du béton frais

La résistance en compression peut atteindre 0,3 à 0,4 MPa tandis que celle en traction ne dépasse guère 1/100^e de ces valeurs, soit 0,004 MPa.

6.6 Caractéristiques principales du béton durcissant.

La caractéristique essentielle du béton durci est la résistance mécanique en compression à un âge donné (28 jours). Le béton est un matériau travaillant bien en compression, dont la connaissance de ses propriétés mécaniques est indispensable pour le calcul du dimensionnement des ouvrages.

Lorsqu'il est soumis à l'action d'une charge rapidement croissante, le béton se comporte comme un matériau fragile. D'une part, sa rupture n'est pas précédée de déformations importantes et, d'autre part, sa résistance à la traction est beaucoup plus faible que sa résistance à la compression.

On se préoccupe assez peu de sa durabilité, de son imperméabilité. Très souvent un béton de résistances mécaniques élevées est durable bien que l'on puisse confectionner avec un ciment très performant un béton sous-dosé, peu étanche, de durabilité limitée, mais possédant cependant les résistances en compression exigées.

On verra que la résistance du béton dépend d'un grand nombre de paramètres : le type et le dosage des matériaux utilisés, le degré et la condition de réalisation etc.

Par ailleurs, la résistance du béton est fonction d'une quantité de facteurs autres que la classe de ciment et qui sont à contrôler et à surveiller dès le choix de la qualité des granulats et tout au long de la chaîne de bétonnage.

La résistance d'un béton est une notion toute relative et elle dépend de la méthode d'essai utilisée (comprenant la forme des éprouvettes).

Le tableau 6.6.1 ci-dessous indique les différentes catégories de béton avec les valeurs des résistances caractéristiques auxquelles elles correspondent, ces valeurs étant données pour les résultats obtenus sur cylindres et sur cubes, plusieurs pays de la CEE utilisant les cubes pour le contrôle des résistances à la compression.

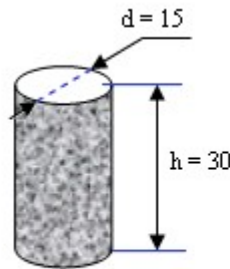
tableau 6.6.1 : Les résistances caractéristiques des bétons

Classe	C12,5/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/45	C45/55	C50/60
f_{ck} cyl.	12	16	20	25	30	35	40	45	50
f_{ck} cube	15	20	25	30	37	45	50	55	60

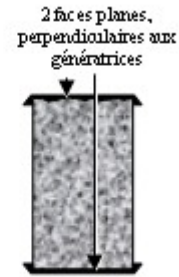
6.6.1 La résistance en compression

La résistance en compression à 28 jours est désignée par f_{c28} . Elle se mesure par compression axiale de cylindres droits de révolution et d'une hauteur double de leur diamètre. Le cylindre le plus couramment employé est le cylindre de 16 ($d = 15,96$ cm) dont la section est de 200 cm^2 . La normalisation européenne indique comme dimension des cylindres $d = 15$ cm de $H = 30$ cm.

Elle varie suivant la taille des éprouvettes essayées. Plus celles-ci sont petites et plus les résistances sont élevées. La résistance sur cylindre d'élanement 2 (par exemple diamètre de 16 cm, hauteur de 32 cm) est plus faible de l'ordre de 20% que la résistance sur cubes de 20 cm (Fig. 6.6.1).



La dimension de l'éprouvette pour mesurer la résistance en compression



Le surfaçage au soufre de l'éprouvette pour l'essai sous presse

Fig. 6.6.1 : Les moules cylindriques, cubiques et les éprouvettes pour mesurer la résistance en compression

Le béton de l'ouvrage a des résistances différentes de celles du même béton essayé sur éprouvettes d'essai normalisés (il y a l'effet de masse et une hydratation différente du fait des évolutions des températures elles-mêmes différentes). La résistance en compression est donc à associer à la méthode d'essai (ou à la référence à la norme utilisée) et à l'échéance fixée.

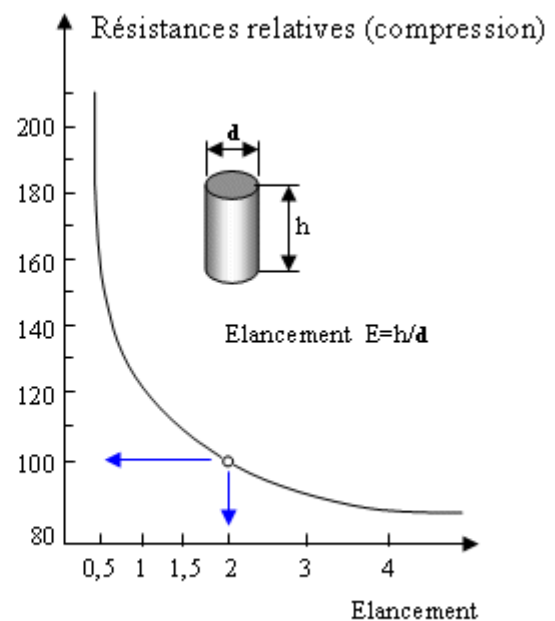
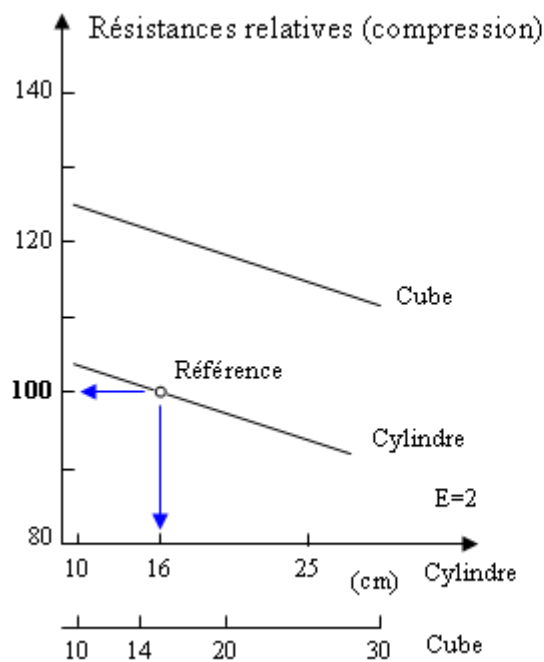


Fig. 6.6.2: Variations des résistances en compression d'un béton en fonction de la forme et des dimensions des éprouvettes

6.6.2 La résistance en traction

Généralement le béton est un matériau travaillant bien en compression, mais on a parfois besoin de connaître la résistance en traction, en flexion, au cisaillement. La résistance en traction à 28 jours est désignée par f_{t28} .

La résistance en traction - flexion

Les essais les plus courants sont des essais de traction par flexion. Ils s'effectuent en général sur des éprouvettes prismatiques d'élancement 4, reposant sur deux appuis (Fig.6.6.2):

- soit sous charge concentrée unique appliquée au milieu de l'éprouvette (moment maximal au centre).
- soit sous deux charges concentrées, symétriques, égales, appliquées au tiers de la portée (moment maximal constant entre les deux charges (Fig.6.6.2.A)).

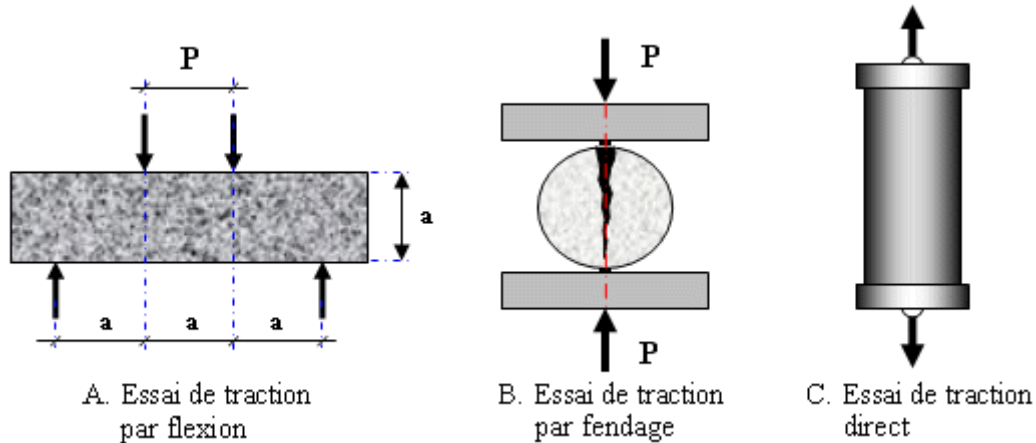


Fig. 6.6.3: Différents essais sur les résistances d'un béton en traction

La résistance en traction par fendage

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. Cet essai est souvent appelé "Essai Brésilien". Si P est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du diamètre vertical, la résistance en traction sera :

$$f_{tj} = 2 \frac{P}{\pi DL}$$

avec : j = âge du béton (en jours) au moment de l'essai ;

D et L = diamètre et longueur du cylindre.

La résistance en traction directe

La mesure se fait par mise en traction de cylindres identiques à celle de la résistance en traction par fendage, mais l'essai est assez délicat à réaliser car il nécessite, après sciage des extrémités, le collage de têtes de traction parfaitement centrées, l'opération devant avoir lieu sans aucun effort de flexion para

6.7 La déformation des bétons.

La résistance mécanique et la déformation sont des caractéristiques importantes du béton, car elles jouent un grand rôle non pas seulement pour la stabilité, mais aussi la durabilité des ouvrages.

Lorsque le béton est soumis à l'action d'une charge rapidement croissante, il se comporte comme un matériau fragile. D'une part, sa rupture n'est pas précédée de déformations importantes et d'autre part, sa résistance à la traction est beaucoup plus faible que sa résistance à la compression. La résistance à la traction s'annule même complètement si des fissures de **retrait** se sont développées.

Le choix judicieux des matériaux, une mise en oeuvre correcte, l'adoption de dispositions constructives appropriées jouent un rôle essentiel dans l'art de construire. Toutefois, comme une partie importante de ses activités est consacrée aux problèmes de dimensionnement des constructions, l'ingénieur attache une importance particulière aux caractéristiques de résistance mécanique et de déformation des matériaux, car leur connaissance lui est indispensable pour réaliser des constructions à la fois sûres et économiques.

Dès la fin de la mise en oeuvre, le béton est soumis à des déformations, même en absence de charges.

6.7.1. Le retrait

C'est la diminution de longueur d'un élément de béton. On l'assimile à l'effet d'un abaissement de la température qui entraîne un raccourcissement.

Causes et constatation	Remèdes
Le retrait avant- prise est causé par l'évaporation d'une partie de l'eau que contient le béton. Des fissures peuvent s'ensuivre car le béton se trouve étiré dans sa masse.	Ils s'agit de s'opposer au départ brutal de l'eau par : - la protection contre la dessiccation. - l'utilisation d' adjuvants ou de produits de cure.
Après la prise , il se produit : - Le retrait thermique dû au retour du béton à la température ambiante après dissipation de la chaleur de prise du ciment. On constate une légère diminution de longueur.	Il faut éviter de surdoser en ciment. Les ciments de classe 45 accusent moins de retrait que ceux de classe 55 de durcissement plus rapide.
- Le retrait hydraulique est dû à une diminution de volume résultant de l'hydratation et du durcissement de la pâte de ciment. Le retrait croît avec la finesse de ciment et le dosage.	Le béton aura d'autant moins de retrait qu'il sera plus compact ; ce qui dépend de la répartition granulaire, car un excès d'éléments fins favorise le retrait ainsi que les impuretés (argiles, limons).

Estimation du **retrait** : $\Delta l = 3 \text{ ‰} \times L$.

Δl – est le raccourcissement.

L – est la longueur de l'élément.

Si une corniche en béton armé a une longueur de 15 m, le **retrait** est de l'ordre de: $3 \text{ ‰} \times 15000 \text{ cm} = 0,45 \text{ cm}$.

6.7.2. La dilatation

Puisque le coefficient de dilatation thermique du béton est évalué à 1×10^{-5} , pour une variation de $\pm 20^\circ\text{C}$ on obtient: $\Delta l = \pm 2 \text{ ‰} \times \text{longueur}$.

Pour chaînage en B.A. de 20 m de longueur et un écart de température de 20°C , on a une dilatation de : $2 \text{ ‰} \times 2000 \text{ cm} = 0,4 \text{ cm}$.

6.7.3. Le fluage

Lorsqu'il est soumis à l'action d'une charge de longue durée, le béton se comporte comme un matériau VISCO-ELASTIQUE. La déformation instantanée qu'il subit au moment de l'application de la charge est suivie d'une déformation lente ou différée qui se stabilise après quelques années. C'est ce que l'on appelle le **fluage** (Fig. 6.7.1).

Le **fluage** est pratiquement complet au bout de 3 ans.

Au bout d'un mois, les 40 % de la déformation de **fluage** sont effectués et au bout de six mois, les 80%. Estimation de la déformation de **fluage**:

$$\Delta l = 4 \text{ à } 5 \text{ ‰ longueur.}$$

Cette déformation varie surtout avec la contrainte moyenne permanente imposée au matériau.

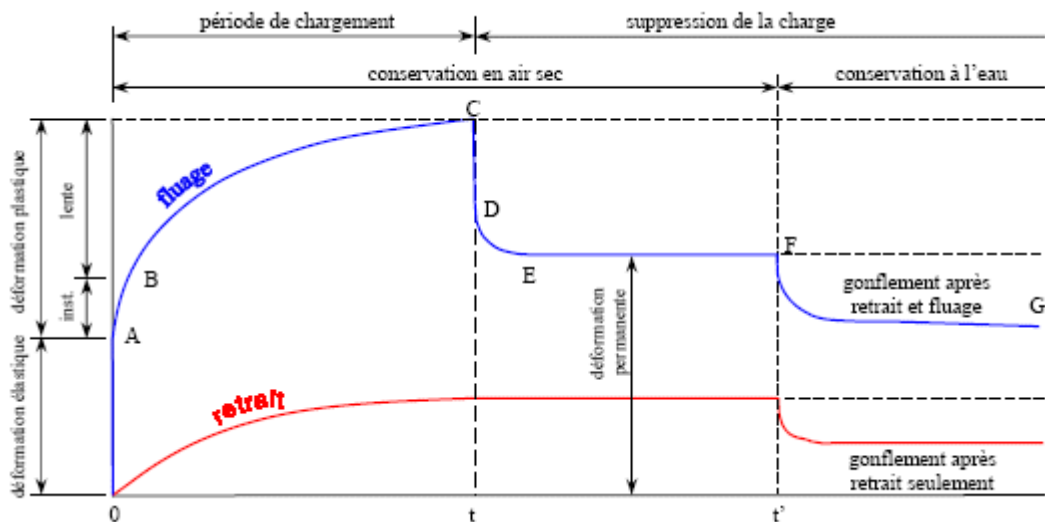


Fig. 6.7.1 : Chargement et déchargement. (Déformation réactive de retour).

6.7.4. Élasticité du béton

Le module d'élasticité E est défini par le rapport:

$$E = \frac{\text{contrainte unitaire}}{\text{déformation relative}}$$

Pour les projets courant, on admet:

$E_{ij} = 11\,000 f_{cj}^{1/3}$ (module de déformation longitudinale instantanée du béton) avec f_{cj} = résistance caractéristique à « j » jours. $E_{vj} = 3\,700 f_{cj}^{1/3}$ (module de déformation différée) avec $f_{cj} = 1,1 f_{c28}$. Il s'ensuit que

$$E_{vj} \approx \frac{1}{3} \text{ de } E_{ij}.$$

Notes : E_{ij} , E_{vj} , f_{c28} , f_{cj} sont exprimés en MPa.

Le module d'élasticité de l'acier est de l'ordre de : $200\,000 \text{ N/mm}^2$, soit $2\,000\,000 \text{ daN/cm}^2$.

6.7.5. Effet «Poisson»

En compression comme en traction, la déformation longitudinale est aussi accompagnée d'une déformation transversale.

Le coefficient « Poisson » est le rapport :

$$\frac{\text{déformation transversale}}{\text{déformation longitudinale}} \quad \text{dont la valeur varie entre } 0,15 \text{ et } 0,30$$

6.7.6. Mécanisme de la fissuration

Deux bétons ayant un même **retrait** final peuvent se comporter très différemment du point de vue de la fissuration (fig. 6.7.2) :

- le béton correspondant à L ne se fissure pas ;
- le béton correspondant à L' se fissure en I au temps t.

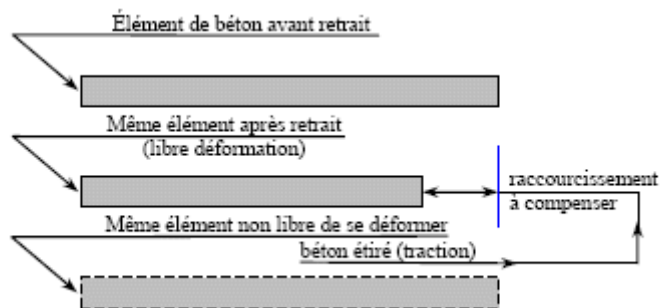
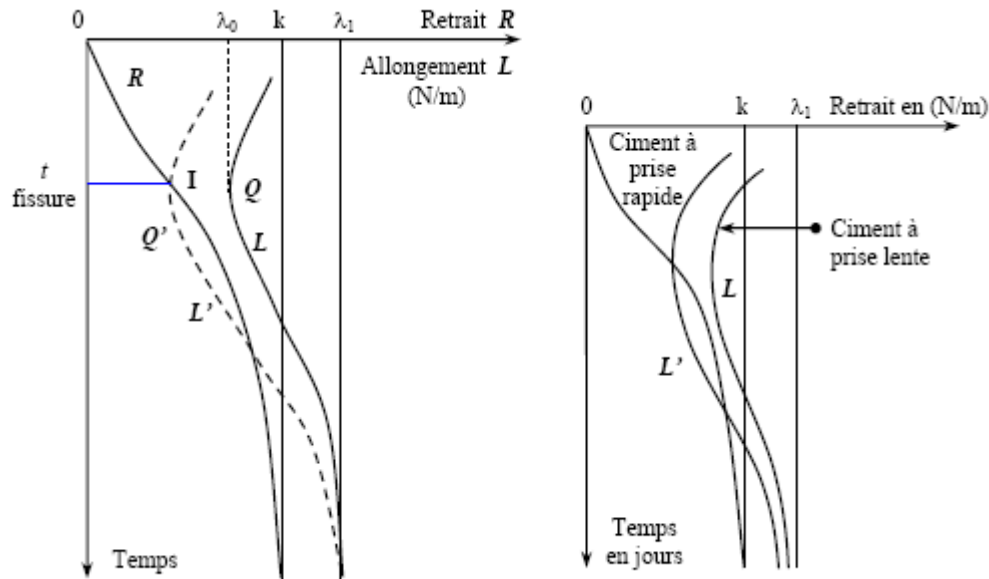


Fig. 6.7.2 : Le **retrait** du béton est pris en compte dans la conception des ouvrages (Exemple: joints de **retrait** des dallages et planchers).

Condition de fissuration d'un béton:

Le phénomène de **retrait** étire le béton de telle façon que l'allongement résultant compense le raccourcissement imposé par le **retrait**, si l'élément était libre de se déformer. Le **retrait** augmente avec le temps, la tension interne aussi: si elle dépasse la limite de rupture du béton, la fissuration se produit.

Sommaire du chapitre 7

7.1 Briques

7.2 Blocs de béton

7.3 Béton préfabriqué

7.1 BRIQUES

Introduction.

Les briques sont les produits céramiques, dont les matières premières sont des argiles, avec ou sans additifs. La forme des briques est généralement parallélépipède rectangle. Elles sont couramment utilisées dans la construction des bâtiments et des travaux publics. Par rapport aux autres matériaux, c'est un des plus anciens matériaux de construction.

Les briques peuvent se diviser en 3 groupes principaux :

Brique ordinaire:

Une brique d'argile est une roche artificielle ayant la forme parallélépipédique rectangle de dimensions bien déterminées. Généralement, on fabrique les briques suivant deux procédés: procédé plastique (l'argile est humectée d'eau de 20 à 25 %) et procédé demi-sèche (l'argile est humectée d'eau de 8 à 12 %).

Après moulage et séchage, les briques sont cuites pour qu'elles deviennent assez dures. La cuisson est faite soit dans le four périodique soit dans le four continu.

En général, les dimensions d'une brique ordinaire sont: 250 x 120 x 5 mm. Selon la technologie de fabrication des briques traditionnelles, il est difficile d'obtenir des briques ayant des dimensions exactement précises, à cause du **retrait** à l'air et **retrait** de cuisson. Selon la Norme, les tolérances sur les briques peuvent être calibrées de la manière suivante: ± 6 mm sur la longueur; ± 4 mm sur la largeur et ± 3 mm sur l'épaisseur. On distingue la **masse volumique** des briques courantes en quatre groupes (Tableau 7.1)

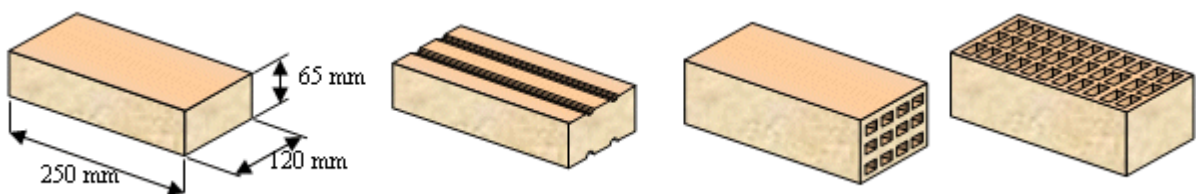


fig. 7.1: Briques pleines et perforées

Tableau 7.1: La classe et la **masse volumique** les briques courantes.

Classe	A	B	C	D
Masse volumique (Kg/m ³)	700 – 1000	1000 – 1300	1300 – 1450	Supérieur de 1450

La capacité d'absorption d'eau d'une brique ne doit pas être inférieure à 8 %.

Tableau 7.2: Dimensions et résistances des briques

Dimensions courantes (mm)				Résistances moyennes		
	Epaisseur	Largeur	Longueur	Catégorie	Résistance	
					MPa	Bar
Briques pleines	40	105	220	I	20	200
ou	55	105	220	II	30	300
perforées	60	105	220	III	40	400
	55	105	330			
Tolérances sur briques calibrées:						
• 3 % sur longueur et largeur • 3 mm sur hauteur				1 MPa = 10 bars 1 bar = 10 Newton/cm ²		

Brique poreuses:

Les briques poreuses peuvent être fabriquées par la technologie traditionnelle en utilisant les argiles ordinaires, auxquelles on ajoute des **additions** fusibles (sciure de bois, tourbe pulvérisée, charbon pulvérisé).

L'emploi des briques poreuses permet de réduire les dépenses de transport et donc le prix des murs. Cependant la résistance d'une brique poreuse étant faible, ce type de briques ne peut pas être utilisé pour construire des murs supportant de fortes charges. Elles seront plutôt employées pour le remplissage des bâtiments à ossature métallique ou béton armé.

Briques d'argiles creuses à perforations:

Les briques creuses qui comportent au moins quatre conduits non débouchants sont fabriqués par voie demi-sèche. Ces briques doivent avoir les dimensions suivantes: 250 x 120 x 88 ou bien 65.

On fabrique les briques à 8 et 18 conduits dont les diamètres sont de 35-45 mm et de 17-18 mm.

Les trous de la perforation sont faits soit verticalement dans la proportion de 60 % de la section totale, soit horizontalement avec alvéoles parallèles au lit de pose dans la proportion de 40 % de la section totale (fig. 7.1) On classe les briques creuses en quatre marques: 150, 125, 100 et 75.

La capacité d'absorption d'eau d'une brique creuse a la même valeur que pour la brique ordinaire donc > 8 %.

La résistance à la flexion est de 20, 18, 16 et 14 kg/cm². Toutes les autres prescriptions techniques imposées aux briques creuses sont les mêmes que pour les briques ordinaires.

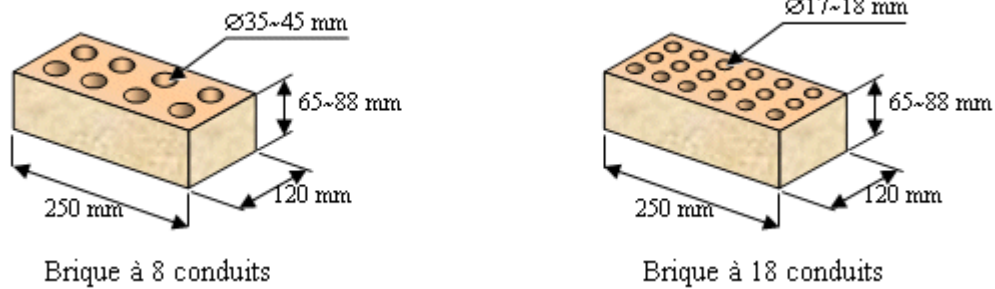


fig. 7.2: Briques creuses comprimées par voie demi-humide.

Caractéristiques et utilisations des briques pleines ou perforées:

Elles servent à réaliser:

- des parements extérieurs ou intérieurs décoratifs (appareillages en briques),
- des murs simples ou doubles enduits ou non.

Les briques sont obtenues soit:

- par filage (passage de l'argile dans la filière),
- par pressage (compression de la pâte dans un moule)

Qualités requises:

- Résistance au gel (à 25 cycles de gel et dégel).
- Peu de dilatation à l'humidité (gonflement).
- Pas d'éclatements dus à l'expansion de grains de **chaux**.
- Peu d'efflorescences (sels) pouvant former des taches.
- Aspect suivant la destination du produit.
- Régularisation des coloris et des dimensions.

Principe de fabrication des briques

Les briques sont obtenues par cuisson de certaines argiles à une température de environ 1000 C°. Par combinaison chimique à partir de 700 C°, l'argile en perdant son eau, se transforme en terre cuite.

L'oxyde de fer des argiles donne la coloration aux briques.

En général la fabrication des briques se compose des cinq opérations principales comme indiquées sur le schéma ci-dessous.

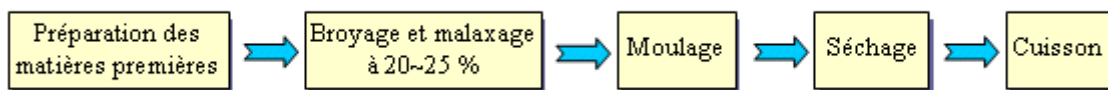
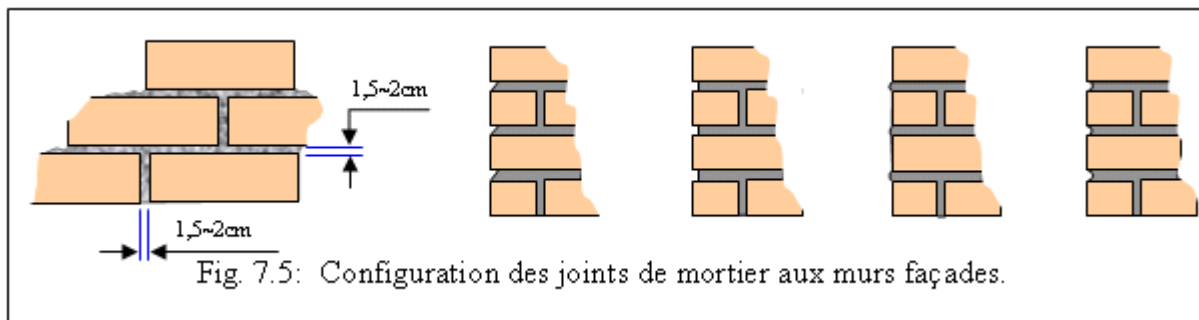
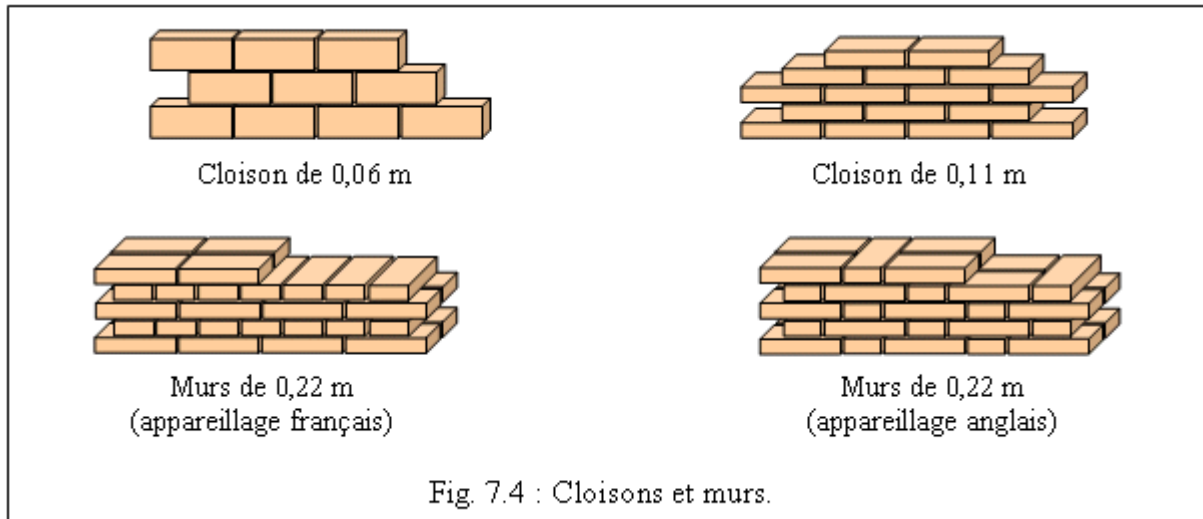


fig. 7.3: Schéma de la fabrication des Briques.

Domaine d'emploi

Les briques pleines et les briques creuses sont essentiellement utilisées pour réaliser les murs, les cloisons, les colonnes en brique etc.



La qualité du mur dépend de la qualité de la mise en oeuvre et des dispositions suivantes :

- respecter le sens de la pose (fig. 7.6): cloisons superposées alvéoles superposée,
- ne pas utiliser de briques cassées ou percer la maçonnerie pour colmater avec du mortier,
- utiliser du mortier bâtard de **chaux** et ciment 500 kg de liant par m³ de **sable** pour les joints,
- utiliser les éléments spéciaux d'angle, tableau, linteau, chaînage, about de plancher.

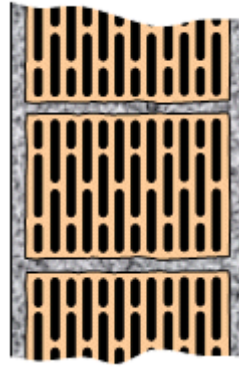
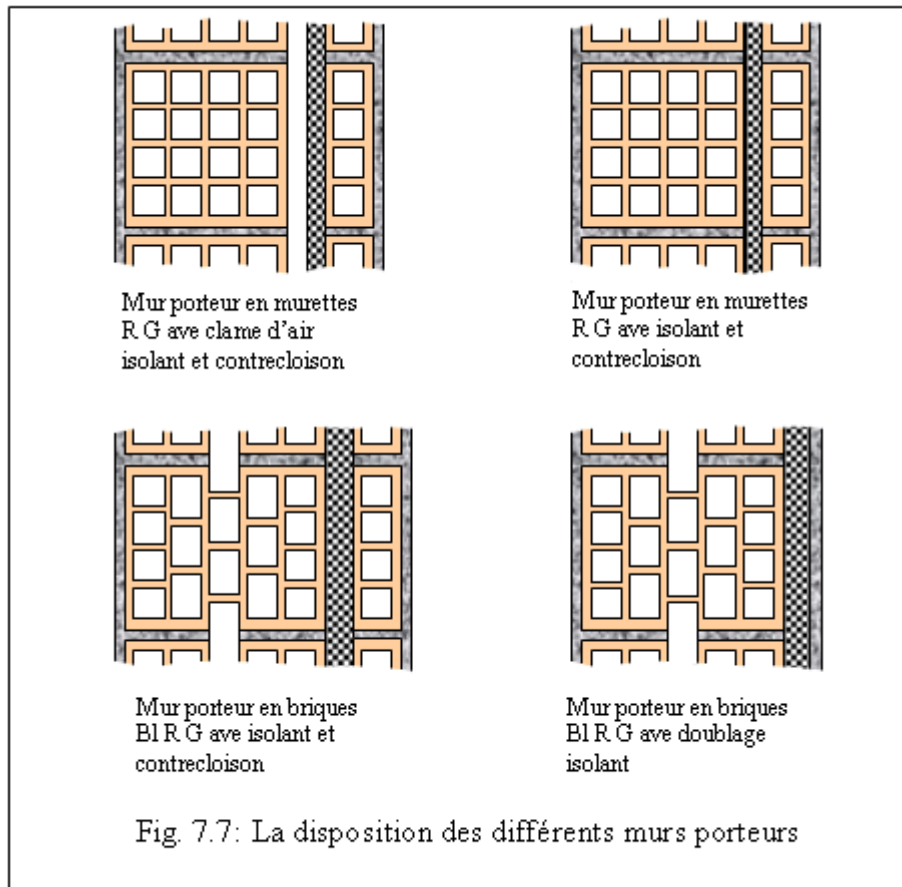


Fig. 7.6: Dispositions des briques

MURS RÉALISÉS AVEC LES BRIQUES CREUSES.

- murs à simple paroi:
 - o non porteurs,
 - o porteurs.
- murs avec cloison de doublage:
 - o sans isolant,
 - o avec isolant.
- Types de briques creuses:
 - o type C: à faces de pose continue,
 - o type R.J. : à rupture de joint (coupure de joint horizontal)



7.2 Blocs de béton.

Introduction

En général les blocs de béton peuvent se classer en trois catégories, selon l'importance de la surface des alvéoles:

- blocs pleins sans alvéoles,
- blocs perforés (section nette > 80% section brute),
- blocs creux (section nette > 60% section brute).

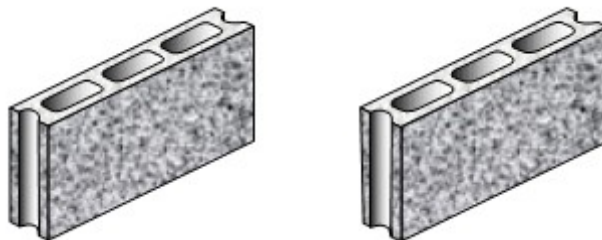


Fig. 7.2.1: Les blocs de béton.

Les blocs de béton non armé (pour mur et cloison), dont la forme est généralement parallélépipédiques, sont fabriqués en usine.

Lorsqu'ils sont employés pour l'habitation, ils sont généralement enduits ou protégés extérieurement, soit pour contribuer à améliorer certaines caractéristiques physiques du mur (thermique, acoustique, feu), soit pour rattraper les irrégularités de surface afin d'obtenir une surface plane destinée à recevoir ultérieurement un parement décoratif.

Les blocs les plus couramment utilisés sont estampillés d'une marque **NF** (fig. 7.2.1), qui garantit la fourniture de matériaux de qualité, aux caractéristiques bien définies et identiques. Ils sont dits " de granulats courants " lorsque la **masse volumique** réelle de leur béton constitutif est supérieure à 1700 kg/m^3 , " de granulats légers " autrement.



Fig. 7.2.1: Marquage des blocs

Selon le type de produit, la destination et le rôle des blocs dans la construction, sans oublier les règles de l'art (conception, calcul et exécution des maçonneries en blocs de béton: DTU no 20-1), la géométrie des blocs et leurs dimensions varient. On peut citer des formes de blocs, des accessoires permettant de traiter des points singuliers des maçonneries: blocs d'angle, blocs de coupe, blocs à feuillure, blocs d'about, planelle, blocs en L et blocs linteau ...

- Classification: d'après leur résistance minimale garantie R , rapportée à la section brute, exprimée en MPa dans l'une des classes de résistance (tableau 7.2.1): 95% de la production doit présenter une résistance au moins égale à la valeur correspondante du tableau.
- Désignation d'un bloc destiné à être enduit: les dimensions d'appellation d'un bloc, exprimées en cm, sont différentes des dimensions de fabrication qui prennent en compte l'épaisseur moyenne des joints horizontaux (1 cm) et verticaux (0,6 cm).
 - fabrication: $(20 + 0,5) \times (19 + 0,4) \times (49,4 + 0,5)$ (cm)
 - appellation: $20 \times 20 \times 50$ (cm).

Exemples de désignation:

- Bloc en béton de granulats courants, perforés, B 80, $20 \times 20 \times 50$, **NF P 14-301**, Marque **NF**.
- Bloc en béton d'argile expansée, creux, 2 lames d'air, L 25, 1100 kg/m^3 , $20 \times 20 \times 50$, **NF P 14-304**, Marque **NF**.

Tableau 7.2.1: Caractéristiques mécaniques des blocs en béton

Caractéristiques mécaniques		Blocs creux			Blocs pleins et perforés		
Granulat courant	Classe	B 40	B 60	B 80	B 80	B 120	B 160
	R (MPa)	4	6	8	8	12	16
Granulat léger	Classe	L 25	L 40	-	L 35	L 45	L 70
	R (MPa)	2,5	4	-	3,5	4,5	7

Principe de fabrication des blocs de béton

Les blocs de béton sont obtenus par pression ou bien par **vibration** de mélange: ciment + **sable** + eau et granulats courants ou bien granulats légers. Pour obtenir les blocs de béton avec la dimension la plus précise, les moules utilisés doivent avoir une stabilité suffisante donc ils sont métalliques. Après démoulage, les produits (blocs de béton) doivent être stocker dans un endroit favorable (humidité ~ 95 %), où ils peuvent prendre le **durcissement** pour ensuite être transporter à la construction. En général, la fabrication des blocs de béton se compose de cinq opérations principales comme indiquer sur le schéma ci-dessous.

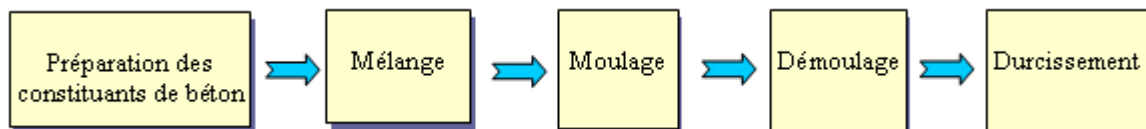


fig. 7.3: Schéma de la fabrication des blocs de béton.

Domaine d'utilisation des blocs de béton

En general les blocs de béton sont utilisés dans différents types d'ouvrage surtout pour réaliser les murs et les cloisons de batiments (tableau 7.2.2 et tableau 7.2.3).

Tableau 7.2.2: Domaine d'utilisation des blocs en béton de granulats courants

Domaine d'utilisation des blocs		Dessin	Dessin	Dimensions d'appellation	Masse indicative (kg)	Type d'ouvrage				
						Façade	Refend	Soubassement enterré	Cloison	About de plancher
Blocs en béton de granulats courants (NF P 14-301)	creux		1	5x20x50	7 ⁵				✓	✓
			1	7x20x50	10 ⁵				✓	✓
			1	10x20x50	11				✓	
			1	12x20x50	12	✓			✓	
			1	15x20x50	13	✓	✓		✓	
			2	15x20x50	16	✓	✓		✓	
			2	17x20x50	17 ⁵	✓	✓		✓	
			2	20x20x50	19	✓	✓	✓	✓	
			3	20x20x50	20	✓	✓	✓		
			4	22x20x50	23	✓	✓	✓		
			5	27x20x50	29	✓	✓	✓		
			1	5x20x40	7 ⁵					
			1	5x20x50	9 ⁵				✓	✓
			2	5x20x40	6					
			2	5x20x50	8					
	pleins et perforés		1	7x20x40	10 ⁵					
			1	7x20x50	13				✓	✓
			2	7x20x40	8 ⁵					
			2	7x20x50	11					
			1	10x20x40	14					
			1	10x20x50	17 ⁵	✓			✓	
			3	10x20x40	11 ⁵					
			3	10x20x50	14					
			1	12x20x40	17					
			1	12x20x50	22	✓			✓	
			3	12x20x40	14					
			3	12x20x50	17 ⁵					

Domaine d'utilisation des blocs			Dessin	Dimensions d'appellation	Masse indicative (kg)	Type d'ouvrage					
						Façade	Refend	Soubassement enterré	Cloison	About de plancher	
Blocs en béton de granulats courants (NF P 14-301)	creux		1	5x20x50	7 ⁵				✓	✓	
			1	7x20x50	10 ⁵				✓	✓	
			2	10x20x50	11				✓		
			1	12x20x50	12	✓			✓		
			3	15x20x50	13	✓	✓		✓		
			2	15x20x50	16	✓	✓		✓		
			2	17x20x50	17 ⁵	✓	✓		✓		
			2	20x20x50	19	✓	✓	✓	✓		
			3	20x20x50	20	✓	✓	✓			
			4	22x20x50	23	✓	✓	✓			
			5	27x20x50	29	✓	✓	✓			
		pleins et perforés		1	5x20x40	7 ⁵					
				1	5x20x50	9 ⁵				✓	✓
				2	5x20x40	6					
				2	5x20x50	8					
			1	7x20x40	10 ⁵						
			2	7x20x50	13				✓	✓	
			2	7x20x40	8 ⁵						
			2	7x20x50	11						
			1	10x20x40	14						
			1	10x20x50	17 ⁵				✓		
			3	10x20x40	11 ⁵	✓					
			3	10x20x50	14						
		1	12x20x40	17							
		1	12x20x50	22	✓			✓			
		3	12x20x40	14							
		3	12x20x50	17 ⁵							

Tableau 7.2.3: Domaine d'utilisation des blocs en béton de granulats légers

Domaine d'utilisation des blocs			Dessin	Dimensions d'appellation (E×H×L) cm	Masse indicative (kg)	Type d'ouvrage				
						Façade	Refend	Soubassement enterré	Cloison	About de plancher
Dessin										
Blocs en béton de granulats léger (NF P 14-301)	creux		1	5×20×50	3 ^s				✓	✓
			1	7 ⁵ ×20×50	5				✓	✓
			1	10×20×50	7 ⁵	✓			✓	✓
			2	15×20×50	11	✓	✓		✓	
			2	17 ⁵ ×20×40	11 ⁵	✓	✓		✓	
			2	17 ⁵ ×30×40	17 ⁵					
			2	20×20×50	13	✓	✓	✓	✓	
			2	20×30×50	18					
			2	22 ⁵ ×20×50	15	✓	✓	✓		
			2	22 ⁵ ×30×50	19					
	pleins et perforés		2	25×20×50	17	✓	✓	✓		
			3	27 ⁵ ×20×50	18 ⁵	✓	✓	✓		
			4	27 ⁵ ×20×50	19	✓	✓	✓		
			3	30×20×50	21	✓	✓	✓		
			1	5×20×50	5				✓	✓
			2	5×20×50	4 ⁵					
			1	10×20×50	8	✓			✓	
			1	15×20×50	11	✓	✓		✓	
			1	15×30×50	17					
			1	17 ⁵ ×20×50	13	✓	✓		✓	
			1	20×20×50	15	✓	✓	✓		
			3	20×30×50	23					

7.3 Béton préfabriqué.

Introduction

Le béton frais est une sorte de matériaux de construction, dont les constituants sont le ciment, les granulats, l'eau et éventuellement des **adjuvants** soit liquides, soit en poudre. Dans le béton frais lors de sa fabrication existe aussi l'air, qui joue un rôle non pas seulement sur sa plasticité, mais également sur ses déformations et ses propriétés finales.

Les méthodes de fabrication du béton sont adaptées à la nature du chantier et aux types de béton à réaliser.

Généralement le béton est fabriqué dans des centrales de béton de BPE " Béton Prêt à l'emploi ", dans des centrales de chantier (fig. 7.1) ou bien dans des **bétonnières** (fig. 7.2) pour les petits chantiers.

Le béton frais obtenu après le mélange doit être homogène et avoir la **consistance** préalable pour les travaux concernés. Pour assurer la réussite de cette opération, il faut choisir un matériel adapté et déterminer un temps de mélange suffisant. Parmi les facteurs influant sur l'homogénéité du mélange du béton, on peut notamment souligner:

- La régularité de chaque constituant : les données retenues pour fixer les paramètres de dosage ou de mélange ne doivent pas être remises en cause par d'éventuelles variations de ceux-ci ;
- La détermination d'une composition de béton tient compte de sa destination et des constituants utilisés : type et classe de ciment, nature et **granularité** des granulats, **adjuvants** ;
- La teneur en eau;
- Le type de matériel utilisé pour le mélange ;
- La durée de mélange et
- Les conditions de transport du béton entre sa fabrication et sa mise en œuvre.



fig. 7.1: Centre de fabrication du béton



fig. 7.2: Bétonnière

Fabrication du béton frais

La fabrication du béton se fait en trois étapes principales : le choix des matériaux (constituants) qui vont être utilisés pour réaliser un béton , le dosage des constituants pour déterminer les propriétés principales du béton frais ainsi qu'en l'état durci (résistance à la compression, la durabilité etc.) et le malaxage, qui est une des phases importantes de la fabrication du béton, car il va conditionner la qualité de son homogénéité, donc pour assurer la réussite de cette dernière opération, il faut choisir un matériel adapté et bien déterminer un temps de malaxage suffisant.

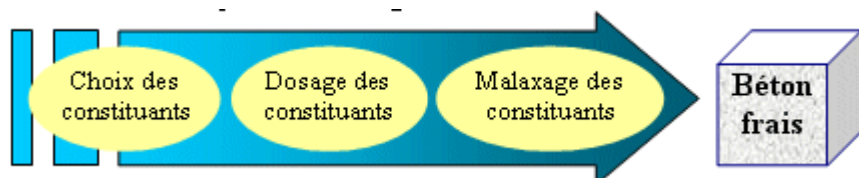


fig. 7.3: Schéma de la fabrication du béton frais

Le béton préfabriqué

Le béton préfabriqué (produit en béton fabriqué en usine) est la production industrialisée de composants. Cette production s'est axée depuis plusieurs années sur les composants de structures :

- poteaux et poutres en béton précontraint ou armé,
- composante de façade,
- éléments pour plancher : prédalles, poutrelles, dalles, alvéolées,
- escaliers, béton à **bancher**,
- dalles de couverture

La fabrication en usine de produits en béton permet de rationaliser la production, d'apporter la qualité d'une fabrication industrielle et de réaliser une importante économie de main-d'œuvre sur le chantier. La gamme des éléments élaborés en usine est très diverse, depuis l'élément standardisé comme le bloc jusqu'à des éléments qui ont plusieurs avantages, dont la disponibilité sur catalogue et leurs possibilités d'assemblage.

L'opération de la fabrication du béton préfabriqué (fig. 7.4) généralement se compose de la préparation du béton frais, la préparation des armatures (mailles, cadres, treillis soudé etc.), la mise en œuvre des armatures, le bétonnage et compactage (par **vibration**) , le **durcissement** (cure).

Pour fabriquer certains types d'éléments en béton préfabriqué (escalier, blocs à **bancher** etc.) il est obligatoire de porter des opérations supplémentaires.

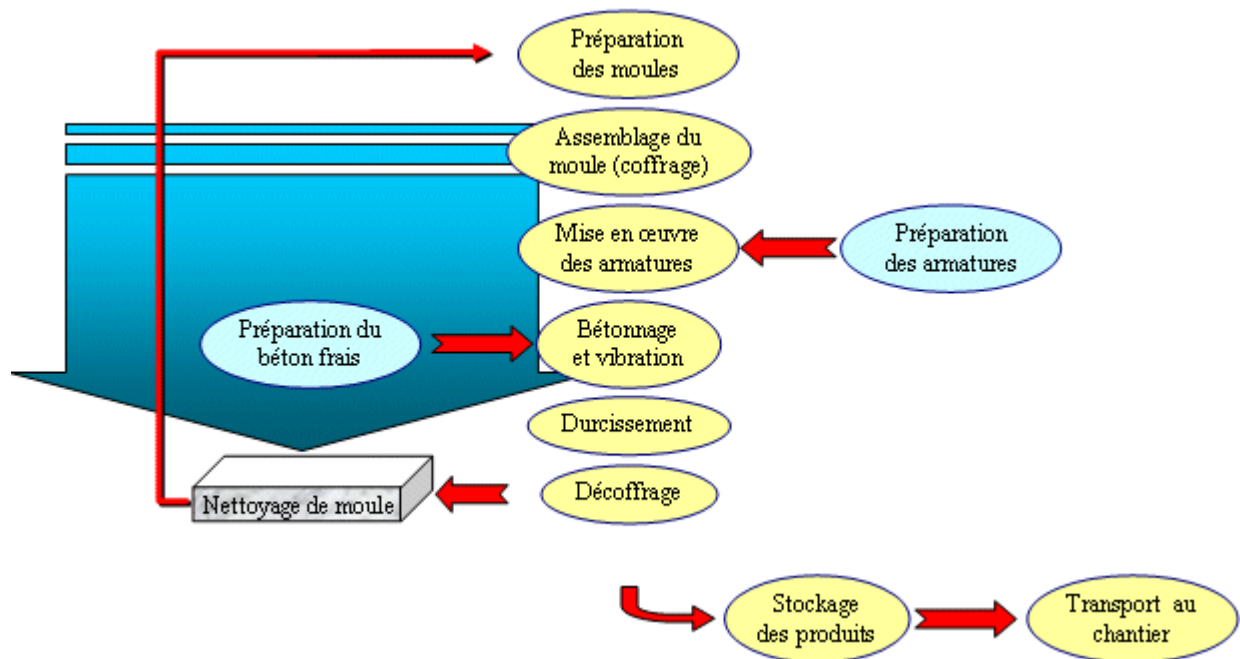


fig. 7.4: Schéma de la fabrication du béton préfabriqué

Bibliographie

1. **Matériaux de construction 1**, Prof. J.P. DELISLE, F. ALOU , Lausanne, octobre 1978
2. **Nouveau guide du béton et de ses constituants** Georges DREUX, Jean FESTA, Edition eyrolles , 1998
3. **Granulats, sols, ciments et béton :Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire**, Raymond DUPAIN, Roger LANCHON, Jean-Claude SAINT-ARROMAN, A CAPLIEZ, Editions CASTEILLA , 2004
4. **Fiches techniques CIM-BÉTON** Centre d'information sur le ciment et ses applications
5. **La pratique des ciments, mortiers et béton**, Michel VENUAT, Edition Le Moniteur , 1989
6. **Travaux de construction : technologie du bâtiment gros-oeuvre**, H. RENAUD, F. LETERTRE Les Éditions Foucher , 1995
7. **Notion de base sur le béton** Mémento CATED, Réf. M 97, octobre 93
8. **LE BETON (TOME-1)**, M. Laquerbe, INSA de RENNES -1974
9. **Matériaux de construction**, G.I. GORCHAKOV , Moscou « ВЫСШАЯ ШКОЛА » 1988

Webographie

<http://www.infociments.fr/>

[http://pros.orange.fr/rhoul/Rhoul_Archi/Fichiers_h](http://pros.orange.fr/rhoul/Rhoul_Archi/Fichiers_htm/lexique_beton.htm)tm/lexique_beton.htm

