

UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA
Faculté des Sciences et de La Technologie
Département d'Architecture



Support de cours de la matière:

Technologie des matériaux de construction 1

Niveau : 1^{ère} année Licence Architecture

Préparé par :

TAALLAH Bachir

Année universitaire 2020 - 2021

Avant-propos

Ce document est un texte de support pour le cours de Technologie de matériaux de construction 1 de la première année : Licence Architecture, comme il peut être d'un intérêt certain pour les étudiants de la filière Génie civil.

Ce cours permet aux étudiants d'apprendre à effectuer des choix de matériaux de construction en fonction de leurs propriétés, dans les conditions de cohérence, de sécurité, de durabilité et de coût. Aussi prendre consciences de la diversité des matériaux et de leur usage en bâtiment.

Ce cours présente les matériaux de base de gros oeuvres et les matériaux de base des revêtements et des finitions. Il est scindé en treize chapitres :

- **Chapitre 1:** Généralités sur les matériaux de construction;
- **Chapitre 2:** Les pierres naturelles;
- **Chapitre 3:** Les granulats;
- **Chapitre 4:** Les liants;
- **Chapitre 5:** Les adjuvants;
- **Chapitre 6:** Le mortier;
- **Chapitre 7:** Le béton;
- **Chapitre 8:** Le béton armé;
- **Chapitre 9:** Le béton précontraint;
- **Chapitre 10:** Le béton léger ;
- **Chapitre 11:** Les produits céramiques;
- **Chapitre 12:** Les métaux ferreux;
- **Chapitre 13:** Les métaux non ferreux.

Sommaire

Avant-propos	1
Chapitre 1: Généralités sur les matériaux de construction	4
1.1. Objectif de la science des matériaux de construction.....	4
1.2. Classification des matériaux de construction.....	4
1.3. Propriétés des matériaux de construction.....	4
Chapitre 2: Les pierres naturelles	9
2.1. Généralités.....	9
2.2. Exploitation de la pierre naturelle.....	10
Chapitre 3: Les granulats	14
3.1. Définition.....	14
3.2. Différent types de granulats.....	15
3.3. Classification des granulats.....	15
3.4. Caractéristiques des granulats.....	16
3.5. Le choix des granulats selon la fonction du béton.....	24
Chapitre 4: Les liants	25
4.1. Définition.....	25
4.2. Classification.....	25
4.3. Les liants hydrauliques.....	25
4.4. Les liants aériens.....	40
Chapitre 5: Les adjuvants	49
5.1. Définition et rôles des adjuvants (NORME NF EN 934-2)	49
5.2. Fonction d'un adjuvant.....	49
5.3. Désignation des adjuvants.....	49
5.4. Classification des adjuvants.....	50
Chapitre 6: Les mortiers	56
6.1. Généralités.....	56
6.2. Les différents mortiers.....	56
6.3. Mortiers fabriqués sur chantier.....	56
6.4. Les mortiers industriels secs prémélangés.....	57
6.5. Les mortiers frais retardés, stabilisés, prêts à l'emploi.....	57
6.6. Caractéristiques principaux.....	57
6.7. Dosages des mortiers de chaux et de ciments.....	58
6.8 Emplois des mortiers.....	59
Chapitre 7: Le béton	62
7.1 Définition.....	62
7.2 Composants du béton.....	62
7.3 Propriétés essentielles d'un béton.....	63
7.4. Compositions des bétons.....	69
7.5. Différent types de bétons.....	71

Chapitre 8: Le béton armé.....	72
8.1 Définition.....	72
8.2 Problème posé au constructeur.....	72
8.3 Les éléments porteurs.....	72
8.4. La nature des efforts dans les éléments porteurs.....	72
8.5. Propriétés des matériaux.....	73
8.6. Principe du béton armé.....	73
8.7 Application.....	74
8.8 Les armatures.....	74
Chapitre 9: Le béton précontraint.....	75
9.1 Définition.....	75
9.2 Principe du béton précontraint.....	75
9.3 Méthodes de précontrainte.....	77
9.4 Materiel de précontrainte.....	78
9.5 Les domaines d'emploi de la précontrainte.....	79
Chapitre 10: Le béton léger	81
10.1 Définition.....	81
10.2. Types des bétons légers.....	81
10.3. Propriétés des bétons légers	82
10.4 Applications des bétons légers.....	84
Chapitre 11: Les produits céramiques.....	85
11.1 Généralités.....	85
11.2. Classification.....	85
11.3. Matières premières.....	85
11.4. Fabrication.....	86
11.5. Les avantages et les inconvénients des briques de construction.....	91
Chapitre 12: Les métaux ferreux.....	92
12.1 Généralités.....	92
12.2 Minerais.....	92
12.3 Classification des métaux ferreux.....	93
12.4 La fonte.....	93
12.5 L'acier.....	95
12.6 Propriétés générales des métaux ferreux.....	99
Chapitre 13: Les métaux non ferreux.....	100
13.1 Généralités.....	100
13.2 L'aluminium.....	100
13.3 Le cuivre.....	102
13.4 Le cuivre.....	104
Les références.....	105

Chapitre 1

Généralités sur les matériaux de construction

1.1. Objectif de la science des matériaux de construction

L'objectif de la science des matériaux de construction serait de permettre un choix optimal des M.D.C. utilisés dans la réalisation d'un projet, en prenant en compte les conditions d'économie et de sécurité.

1.2. Classification des matériaux de construction

En 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 (photo1.1)
- Terres cuites
- Béton
- Métaux, etc.



Photo 1.1 : Construction en pierres

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

- Enduits (photo1.2)
- Peintures
- Bitumes, etc.



Photo 1.2: Enduits sur supports neufs

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.)

Les matériaux de construction doivent:

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

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

1.3.1 Les propriétés physiques

1.3.1.1. La masse volumique

Définition :

Résultat du rapport **Masse / volume du matériau** : $\gamma = \frac{M}{V}$
 Elle est exprimée en (gr/cm³ ; kg/m³; T/m³).

- La masse volumique est dite **apparente** si le volume du quotient est le volume total du matériau.

$$\gamma_{app} = \frac{M_t}{V_t}$$

- En revanche, la masse volumique est **absolue** si le volume du quotient est le volume des grains solide.

grains solide. $\gamma_s = \frac{M_s}{V_s}$

Remarque : Poids volumique = masse volumique x g (g : accélération de la pesanteur). *Unités* : kN/m³

1.3.1.2. La densité :

La densité apparente et celle des grains solides sont des nombres sans dimension égaux successivement au rapport de la masse volumique apparente et la masse volumique absolue à la masse volumique de l'eau à 4° C (γ_w).

$$D = \frac{\gamma}{\gamma_w} , \quad D_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

1.3.1.3. La porosité et compacité (les granulats)

a. Porosité:

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

$$n = \frac{\text{volume de vide}}{\text{volume total}} \times 100$$

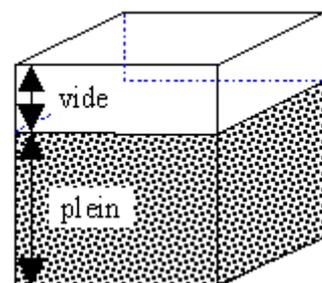


Fig 1.1: Volume quelconque

b. Compacité:

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

$$C = \frac{\text{volume plein}}{\text{volume total}} \times 100$$

☞ La porosité et la compacité sont liées par relation:

$$n+c = 100$$

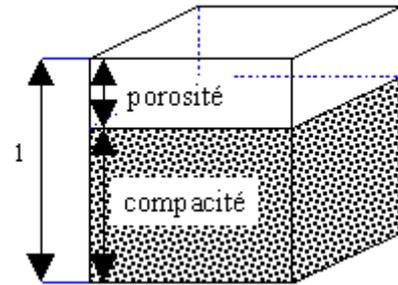


Fig 1.2: Volume initiale

1.3.1.4. La teneur en eau

La teneur en eau d'un matériau est le rapport de la masse de l'eau évaporée lors de l'étuvage (m_w) sur la masse des grains solides (m_d), exprimé en pourcentage :

$$W = \frac{m_w}{m_d} 100\%$$

La teneur en eau d'un matériau dépend de beaucoup de facteurs, surtout de l'atmosphère où il est stocké, le vent, la température et de la porosité du matériau.

1.3.1.5. L'absorption d'eau

L'absorption d'eau du matériau est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau. 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 (%)

où:

G_{ab} – est la masse absorbante.

G_s – est la masse sèche d'échantillon.

V_0 – est le volume apparent du matériau.

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

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

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

1.3.1.6. Degré de Saturation

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.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

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.

1.3.1.7. Les formes de présence de l'eau dans les matériaux

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.

1.3.1.8. 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

1.3.2.1. La déformation:

La déformation est une des propriétés essentielles pour les 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 sur des éprouvettes (Fig 1.3) 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.

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. Cette déformation est appelée aussi déformation résiduelle.

3. Déformation visqueuse:

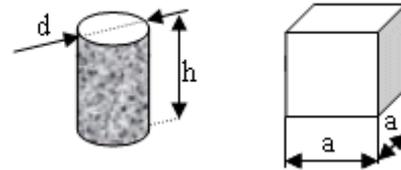
La déformation est dite visqueuse, si après décharge le corps ne reprend pas instantanément les mêmes formes qu'il avait avant l'essai, mais il se produit lentement.

1.3.2.2. La résistance

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 (Fig 1.3), dont les différences entre eux doivent être inférieures à 15 %.

Fig 1.3: Epreuves (échantillons) cylindrique et cubique



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

a. 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 (Fig.1.4 et Fig.1.5).

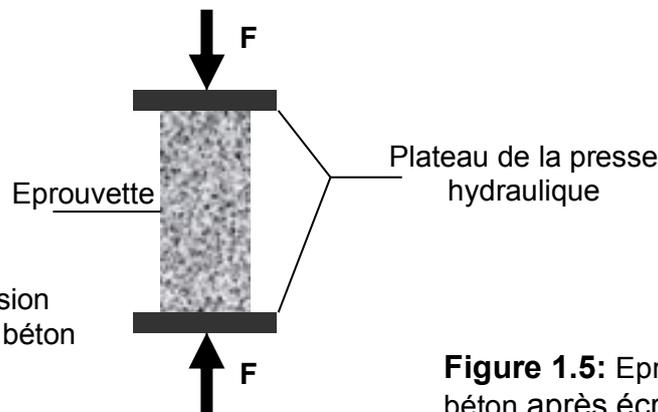


Fig 1.4: Essai de compression sur épreuve de béton

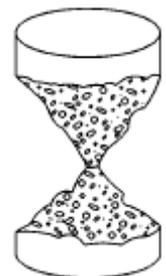


Figure 1.5: Epreuve de béton après écrasement

b. 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 utilisés :

- Scléromètre (Fig1.5),
- l'auscultation sonique.

Fig 1.5: Scléromètre



Chapitre 2

Les pierres naturelles

2.1. Généralités

2.1.1. Définition

Les matériaux de construction trouvent leur origine dans le sol, en premier lieu les pierres qui sont depuis les temps les plus anciens sont des éléments de construction résultent du refroidissement progressif de la masse de la terre passant dans sa première phase de formation de l'état gazeux à l'état liquide (le magma) puis, au contact de l'atmosphère, à l'état solide (l'écorce terrestre).

D'autres pierres naturelles résultent de celles-ci par désagrégation, sédimentation et altération. Les pierres naturelles possèdent des formes et dimensions très variées.

2.1.2. Classification Générale :

Les roches se classent en trois grandes familles suivant leur origine :

2.1.2.1. Roches ignées :

Les roches ignées ou éruptives résultent des refroidissements du magma injecté dans les fissures de l'écorce terrestre. Certaines de ces intrusions sont restées en profondeur, d'autres ont crevé la surface pour former des volcans. Suivant leur composition et leur vitesse de refroidissement, ces roches ont donnés lieu aux principaux types de texture.

* Texture granitique (granit) :	Ce type de roche se présente sous forme de gros cristaux dû à leur vitesse de refroidissement extrêmement lente.
* Texture porphyrique (porphyre) :	La vitesse de refroidissement est moins lente que celle des granits, ce porphyre est présenté par de gros cristaux entouré d'une pâte microcristalline.
* Texture vitreuse (laves et ponces) :	Sont obtenues par une vitesse de refroidissement très rapide, de ce fait la cristallisation n'a pas pu se faire.

2.1.2.2. Roches sédimentaires :

Ces roches proviennent principalement de la destruction mécanique des roches ignées et du dépôt d'organismes calcaires tant animaux que végétaux au fond de la mer.

Exemple : Le calcaire, le schiste.

2.1.2.3. Roches métamorphiques :

Ont pour origine des roches préexistantes (éruptives ou sédimentaires) transformées par un phénomène interne forte pression ou température élevée.

Exemple :

Granit	→	Gneiss,
Calcaire	→	Marbre,
Grès	→	Quartzite,
Argile	→	Ardoise.

2.2. Exploitation de la pierre naturelle :

2.2.1. Extraction de la pierre naturelle

La pierre naturelle extraite de carrières, cette extraction peut se faire par tirage d'explosifs, par sciage au fil hélicoïdal et aux coins d'acier.

2.2.1.1. Tirage d'explosifs :

De nombreux trous profonds et étroits sont forés dans la roche. Au fond de ces trous, on dispose l'explosif (TNT), relié par des fils ou par des mèches à un d'éclancheur, pour la mise à feu.

Ce procédé ne convient qu'à l'extraction des moellons à utiliser bruts ou tout-venant, et destinés :

- à la construction de maçonneries grossières,
- à l'enrochement.
- au concassage et à la fabrication des ciments.

En effet, ce procédé déforce la texture de la pierre.

2.2.1.2. Extraction au fil hélicoïdal :

Il s'agit d'un fil d'acier qui scie la roche, un jet d'eau entraînant du sable rugueux est envoyé dans le trait du scie, c'est en fait le sable qui scie la roche et non le fil.

2.2.1.3. Extraction aux coins d'acier ou spigots :

On creuse d'abord des trous suivant la ligne de séparation que l'on a choisie, puis on enfonce des coins (spigots) en acier au moyen d'un marteau d'une vingtaine de kilos.

2.2.2. Travail de la pierre naturelle :

Les grands blocs extraits sont ensuite débités par clivage ou par sciage à l'aide des scies groupées sur un même châssis (armure) ou de la scie à disque (le disque est recouvert de poussière de diamant). La pierre naturelle peut alors être taillée en fonction de sa nature et de son emploi. C'est ainsi qu'un bloc de pierre peut être travaillé à la boucharde, à la gradine, au ciseau plat, ...etc. La surface de la pierre peut également être ravalée, adoucie, polie mate ou polie brillante.

2.2.3. Forme commerciale de la pierre naturelle :

En général, la pierre naturelle est débitée ou sciée en gros blocs, soit à la carrière soit à l'atelier ; elle est sciée en plaques ou tranches, principalement dans les épaisseurs de 2, 3 et 4cm pour les pierres à polir ; de 5, 6, 8, 10, 12, 15, 16, 18, 20, 22, 25, 28 et 30 pour les pierres à tailler. Dans les commerces, le m³ est utilisé comme unité pour les pierres de construction et le m² pour les pierres polies.

2.3. Caractéristiques, propriétés et utilisations :

L'utilisation des roches doit répondre aux exigences suivantes :

- * Homogénéité de constitution
- * Résistance à la compression
- * Résistance à l'attaque des agents atmosphériques
- * Résistance à l'absorption de l'eau
- * Ouvrabilité c.à.d les pierres doivent se laisser travailler facilement.

Roches	Famille	Caractéristiques	Utilisation
Roches ignées	Le granit	<ul style="list-style-type: none"> • Grande résistance à la compression • Très lourd (poids spécifique entre 2,64 et 3,05 kg/dm³). • Très bonne résistance aux agents atmosphériques. • Se laisse difficilement travailler. Existe en de nombreuses couleurs (gris, bleu, noir, rouge, verdâtre).	<ul style="list-style-type: none"> • Généralement utilisé pour les parements de façades, les escaliers et les perrons.
	Le porphyre	<ul style="list-style-type: none"> • Compact et dur avec des petits et grands cristaux dispersés. • Résiste à l'usure et aux agents atmosphériques. • Difficile à travailler. • Plus lourd que le granit. Couleur généralement grisâtre	<ul style="list-style-type: none"> • convient très bien comme pierraille pour béton et aussi comme pierre à paver.
	Le basalte	<ul style="list-style-type: none"> • Très dur et très compact. • Résistant aux agents atmosphériques. • Très difficile à travailler. • Poids spécifique de 2,88 à 3 kg/dm³. • De couleur variante de gris sombre au bleu-noir 	<ul style="list-style-type: none"> • Pratiquement pas utilisé dans la construction à cause de sa grande dureté ; convient pour des travaux hydraulique (murs de quai, brise-lames). • Cependant, le basalte de lave est moins dur, scié en plaques et utilisé pour les marches d'escalier.

Roches	Famille	Caractéristiques	Utilisation	
Roches sédimentaires	<p style="text-align: center;">* Le calcaire *</p> <p>(Principalement constitué de carbonate de calcium) est partagé en :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pierres blanches • Pierres bleues 	Pierres blanches	<ul style="list-style-type: none"> • Calcaire très sableux (de 15 à 40% de sable). • Bonne résistance à la compression. • Altération rapide de la couleur. • Résistance assez faible aux agents atmosphériques. • Absorption d'eau de 2 à 30% en poids. 	<ul style="list-style-type: none"> • Moellons • Parements
		Pierres bleues	<ul style="list-style-type: none"> • Résistance à la compression allant de 1200 à 1700 kg/cm². • Absorption d'eau de 0,3 à 1,5%. • Résistance à l'usure (devient lisse à l'usure). • Section de rupture lisse avec des cristaux brillants. • Peut être facilement travaillé. 	
	<p style="text-align: center;">* Le schiste *</p> <p>(Présenté en feuilles parallèles dû aux dépôts successifs des lames d'argile)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Très dur et compact. • Doux au touche. • Résistant aux agents atmosphériques. • Existe en de nombreuses couleurs : gris, bleu-noir, vert, violet, rouge-brun. • A structure stratifiée 	<ul style="list-style-type: none"> • Moellons bruts de construction, • Les déchets de schiste servent à la fabrication de briques et de blocs de construction. 	
	<p style="text-align: center;">* Le grès *</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Absorption d'eau : de 4 à 5 % en poids. • Résistant aux agents atmosphériques. • Résistance moyenne à la compression 	<ul style="list-style-type: none"> • maçonnerie extérieure, • pavage 	

Roches	Famille	Caractéristiques	Utilisation
Roches métamorphiques	* Quartzite * (formé par cristallisation de grès)	<ul style="list-style-type: none"> • Très dur. • Surface rugueuse et résistante à l'usure. • Stable aux influences atmosphériques. • Couleur variante du gris au bleu clair. 	<ul style="list-style-type: none"> • beaucoup utilisé pour des sols et des escaliers. • Parements de façade sous forme de dalle ou de bandes
	* Marbre * (formé par cristallisation de calcaire)	<ul style="list-style-type: none"> • Peut être poli • Dureté et résistante aux agents atmosphériques. • Changement de couleur peut se produire sous l'influence de l'atmosphère et de lumière 	<ul style="list-style-type: none"> • principalement pour les travaux d'intérieur tels les parements d'escalier et de sol, appuis de fenêtre, lambris, ...

Chapitre 3

Les granulats

3.1. Définition

- On donnera le nom de granulats à un ensemble de grains inertes destinés à être agglomérés par un liant et à former un agrégat.
- Le terme agrégats, utilisé pour désigner les granulats, est donc impropre. En effet, un agrégat est un assemblage hétérogène de substances ou éléments qui adhèrent solidement entre eux (le mortier ou le béton par exemple).
- Le terme granulat, au singulier, désigne un ensemble de grains d'un même type, quel que soit le critère de classification utilisé. Le terme granulats, au pluriel, sera utilisé pour désigner un mélange de grains de divers types.
- 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.
- Pour certains auteurs il faut y ajouter les matériaux extraits de roches massives ou meubles et mis en oeuvre tels quels (**tout-venant**) pour faire des remblais, par exemple.
- Ce qui va distinguer **le granulat** du **tout-venant**, c'est l'aspect préparation après extraction qui en fait un produit industriel répondant à des critères dimensionnels, physico-mécaniques et chimiques très stricts :

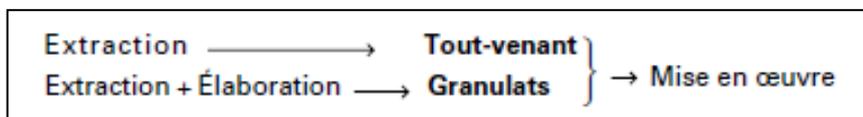


Photo 3.1 : Les granulats

3.2. Différent types de granulats

- Un granulat, en fonction de sa nature et de son origine, peut être :

1. Naturel : d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage). On les distingue selon leur origine :

- **Origine minéralogique** : roches sédimentaires (siliceuses ou calcaires), roches métamorphiques (quartz ou quartzites), roches éruptives (basaltes, granites, porphyres).
- **Origine « d'extraction »**:
 - ☞ Granulats alluvionnaires dits roulés (forme acquise par l'érosion).
 - ☞ Granulats de carrières aux formes angulaires (obtenus par abattage et concassage).

2. Artificiel : d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres (l'argile ou le schiste expansé).

3. Recyclé : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.

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 3.1 : 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. Caractéristiques des granulats

• Le choix des granulats est un facteur important de la composition du béton puisqu'ils représentent les deux tiers du volume de béton. Afin d'obtenir le granulat recherché, il est impératif de connaître quelques unes de ses caractéristiques.

3.4.1. Caractéristiques physiques

3.4.1.1. La granulométrie

• **Définition** : La granulométrie permet de déterminer l'échelonnement des dimensions des grains contenus dans un granulat.

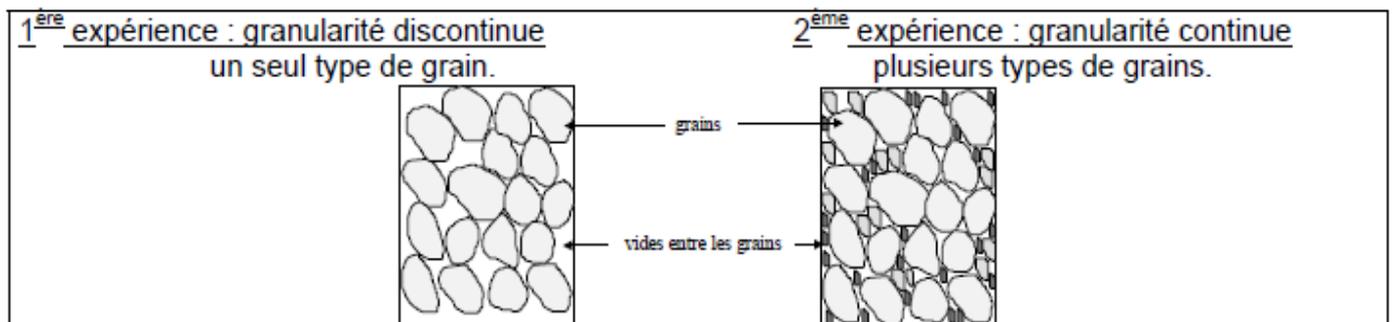


Figure 3.1: La granularité.

• **Conclusion:** Le ciment devra combler les vides entre les grains pour obtenir un béton de compacité maximale. Or le ciment est le constituant le plus cher dans la composition de béton. Il donc est souhaitable de laisser le moins de vides entre les grains. Pour cela on recherchera un dosage optimum de gravier, sable, ciment.

• Il faudra donc déterminer la dimension des grains constituant un sable ou un gravier à l'aide d'un essai en laboratoire appelé **analyse granulométrique** (NF P 18-560) (voir TP).

• **Essai d'analyse granulométrique**

• **Le but l'analyse granulométrique** est de caractériser les granulats en déterminant la grosseur des grains qui les constituent et les pourcentages des grains de chaque grosseur.

• L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres (figure 3.2), dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Un **tamis** est constitué d'une toile métallique définissant des trous carrés. **Le refus** est la partie retenue par le tamis. Le **tamisât ou passant** est la partie qui traverse le tamis.

• Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

• La dimension nominale des tamis est donnée par **l'ouverture** de la maille, c'est à dire par la grandeur de l'ouverture carrée. Ces dimensions sont telles qu'elles se suivent en multipliant par environ 1.25 depuis le tamis de **0.08mm jusqu'au tamis de 80mm**. Chaque tamis est désigné par un numéro **de module** (Tableau 3.2).

Tableau 3.2. : Les 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		

• 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 (figure 3.4) 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.

• Le poids des tamisats successifs permet de déterminer les pourcentages du tamisats correspondant à chacun des tamis utilisés (tableau 3.3).

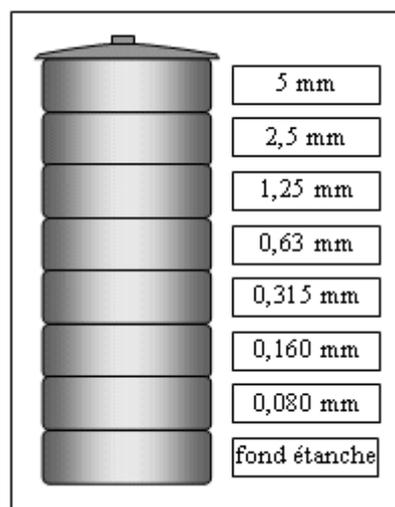


Figure 3.2 : Colonne des tamis

Tableau 3.3: Résultats d'une analyse granulométrique

Tamis en (mm)	Refus cumulés R_n en (g)	Refus cumulés En (%)	Tamisats cumulés en (%)
5	39	1,95	98,05
2,5	215	10,75	89,25
1,25	650	32,50	67,50
0,63	1380	69	31,00
0,315	1800	90	10,00
0,160	1910	95,50	4,50
0,080	1980	99,25	0,75
fillers	1999	100,00	0,00

- La courbe correspondant à ce granulat, est présentée sur la fig. 3.4

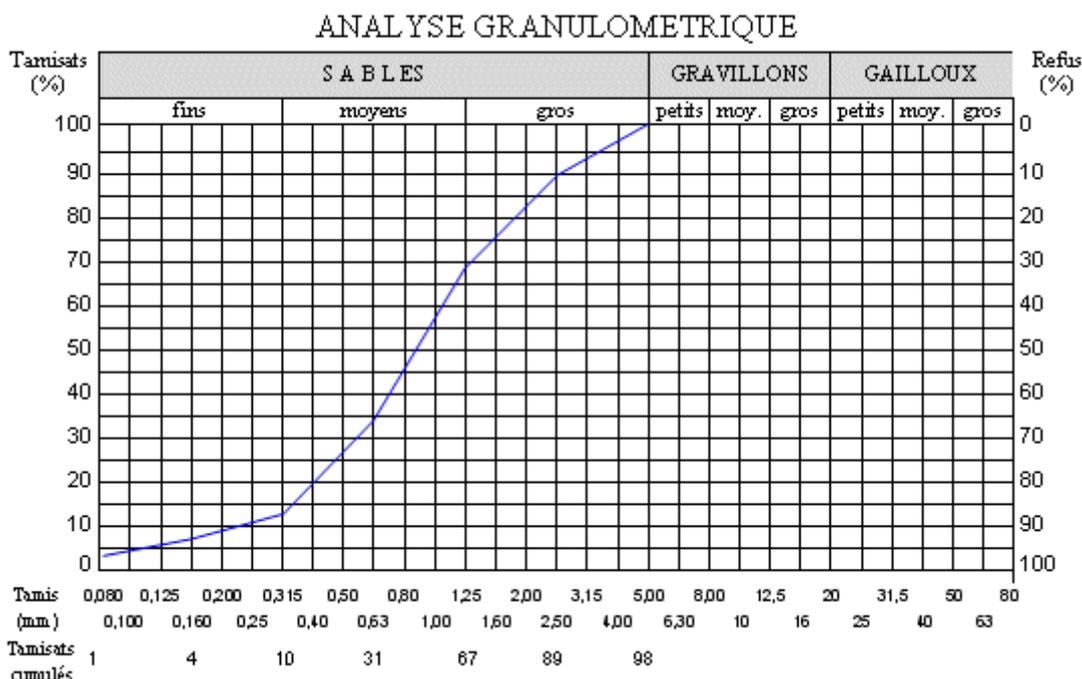


Figure 3.4 : La Courbe granulométriques

• **Module de finesse**

- Il permet d'apprécier la qualité d'éléments fins dans un granulat.
 - Le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100 de somme des refus, exprimés en pourcentage des granulats sur une série spécifiée de tamis : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 - 10 - 20 - 40 - 80 mm.
- **Un bon sable à béton** doit avoir un module de finesse M_f compris entre **2,2 et 2,8** ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

- Pour $1,8 < M_f < 2,2$ le sable est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.
- Pour $2,2 < M_f < 2,8$ le sable est à utiliser si l'on recherche une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.
- Pour $2,8 < M_f < 3,2$ le sable est à utiliser si l'on recherche des résistances élevées au détriment de l'ouvrabilité et avec des risques de ségrégation.
- Pour $M_f > 3,2$ le sable est à rejeter.

— Dans le cas de la courbe granulométrique du sable normal présenté sur la fig. 3.4, son module de finesse est égal à:

$$M_F = (95.5 + 90 + 69 + 32.5 + 10.75 + 1.95) / 100 = 2.99 \quad (2,8 < M_f < 3,2)$$

— **Applications :**

- Voici le résultat de l'analyse granulométrique d'un matériau : Masse sèche après lavage : $m_s = 2922 \text{ g}$

Tamis Ouverture en (mm)	Masse des refus cumulés (R _i) en (g)	Pourcentage refus cumulés $\frac{R_i}{M_s} \times 100$	Pourcentage cumulé de tamisats $100 - \frac{R_i}{M_s} \times 100$
20	79	2.70	97.30
12.5	539	18.44	81.56
10	1017	34.80	65.20
6.3	1956	66.94	33.06
4	2615	89.49	1.51
2.5	2888	98.83	1.17
2	2909	99.55	0.45
1	2911	99.62	0.38
0.5	2912	99.65	0.35
0.08	2913	99.69	0.31
<0.08	2918	99.86	0.14

— **Discussion des courbes granulométriques:**

- La courbe n°1 reflète une distribution dimensionnelle continue, en revanche la courbe n°2 fait apparaître une absence de grains de 3.15 à 25 mm : on dit que la granularité est discontinue.

- Contrairement à la courbe n°1 où un grand nombre de dimension granulaire est représenté (granularité étalée), la courbe n°3 indique que la majorité des grains sont compris entre 4 et 16 mm (granularité serrée).

- Voir figure 3.5

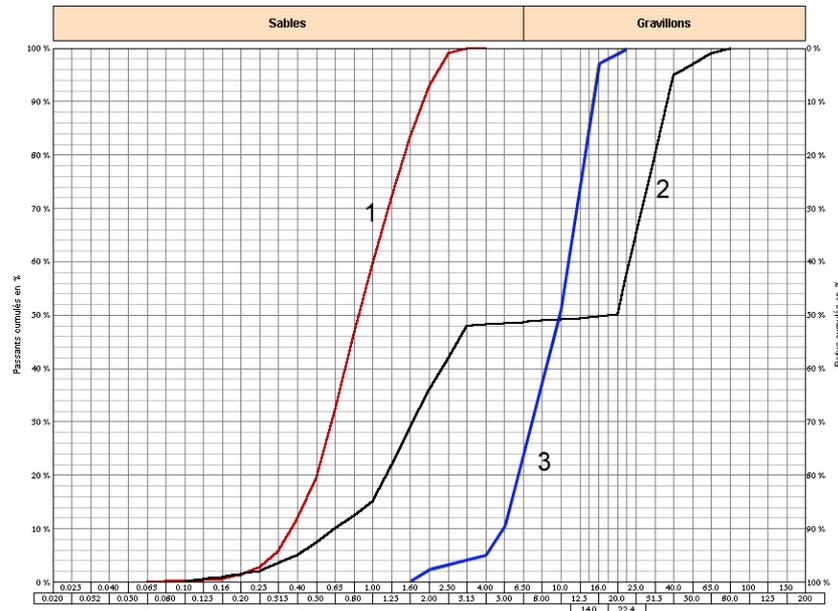


Figure 3.5 : Courbes granulométriques

3.4.1.2. Forme des gravillons (Coefficient d'aplatissement)

La forme des gravillons est déterminée par l'essai d'aplatissement (A). Le coefficient d'aplatissement caractérise la forme du granulat à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur. Plus A est élevé, plus le gravillon contient d'éléments plats. Une mauvaise forme à une incidence sur la maniabilité et favorise la ségrégation.

— La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques (figure 3.6):

- 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.

— Le coefficient d'aplatissement **A** d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondéral des éléments qui vérifient la relation:

$$\frac{G}{E} > 1,58$$

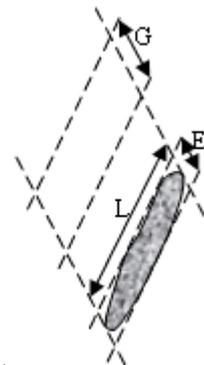


Figure 3.6 : Forme d'un granulat

— La forme des granulats influence:

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

• **L'état de surface des grains influence:**

- La compacité du mélange.
 - L'adhérence du granulat à la pâte de ciment.
- ☞ *La forme est d'autant meilleure qu'elle est proche d'une sphère ou d'un cube.*

3.4.1.3. Les masses volumiques

○ On distingue 2 types de masses volumiques (voir chapitre 1):

1. La masse volumique absolue :

$$\gamma_s = \frac{M_s}{V_s}$$

☞ La masse volumique absolue du granulat (vides entre grains exclus) est nettement plus élevée: de 2500 à 2600 kg/m³.

2. La masse volumique apparente :

$$\gamma_{app} = \frac{M_t}{V_t}$$

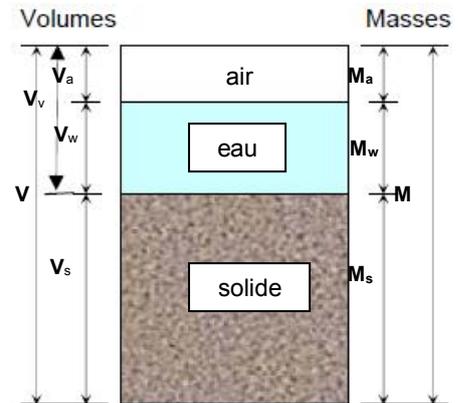
☞ Elle dépend du tassement des grains. Elle est comprise entre 1400 kg/m³ et 1600 kg/m³ pour les granulats roulés silico-calcaires.

3.4.1.4. Teneur en eau, indice des vides, porosité et compacité

- Dans les sols ainsi que dans les granulats, nous retrouvons les 3 phases de la matière.
- Ces 3 phases se modélisent comme suit :

☞ Avec :

- **V** : volume total du matériau
- **V_a** : volume d'air contenu dans le matériau
- **V_w** : volume d'eau contenu dans le matériau;
- **V_v** : volume des vides contenu dans le matériau (**V_v = V_a + V_w**);
- **V_s**: volume des grains solides contenus dans le matériau;
- **M_a** : masse de l'air contenu dans le matériau; elle est en général négligeable ;
- **M_w** : masse d'eau contenu dans le matériau;
- **M_s**: masse des grains solides contenus dans le matériau;
- **M** : masse totale du matériau (seche ou humide).



Teneur en eau	$W = \frac{M_w}{M_s} \times 100$
indice des vides	$e = \frac{V_v}{V_s}$
porosité	$n = \frac{V_v}{V} \times 100$
compacité	$C = \frac{V_s}{V} \times 100$

3.4.1.5. Foisonnement

Le foisonnement correspond à une variation de volume (figures 3.7 et 3.8). Les essais réalisés au laboratoire ont permis de constater que la masse volumique humide des granulats de faible dimension notamment des sables fins, varie avec la teneur en eau ($w\%$).

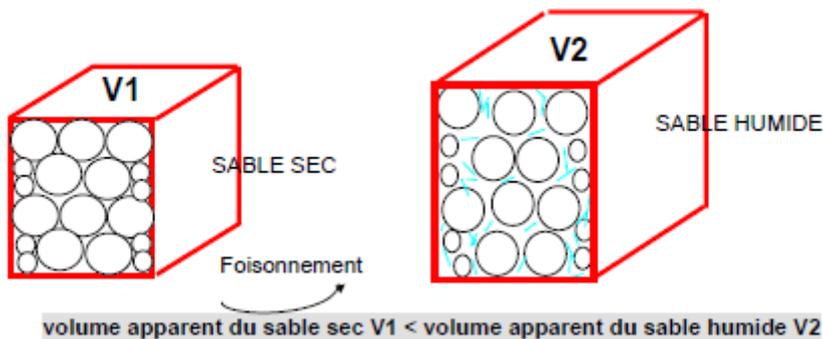


Figure 3.7 : Schémas des volumes apparents d'un échantillon de sable sec et d'un sable un peu humidifié.

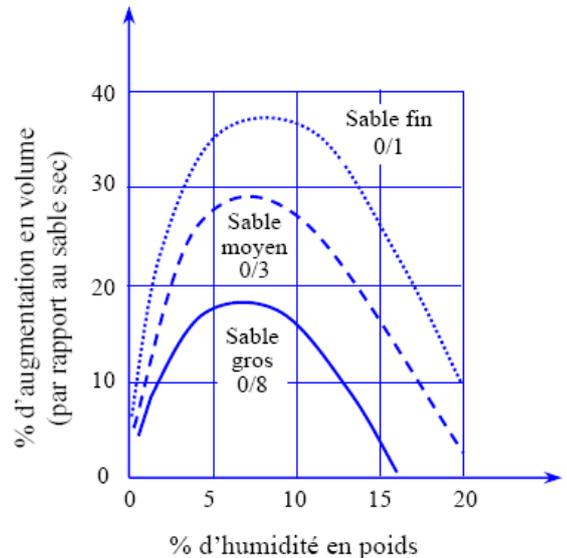


Figure 3.8 : Foisonnement du *sable* en fonction de la teneur en eau.

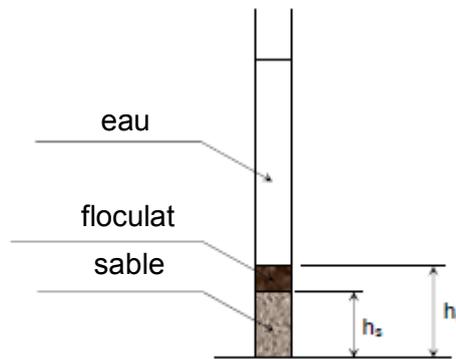
3.4.1.6. Absorption

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.

3.4.2. Caractéristiques physico-chimiques

- Les impuretés peuvent perturber l'hydratation du ciment ou entraîner des défauts d'adhérence granulats- pâte, ce qui peut avoir une incidence sur la résistance du béton. La propreté traduit l'absence d'éléments fins indésirables dans les granulats. Elle désigne essentiellement la teneur en fines argileuses, dont la valeur doit être limitée.
- Dans le cas des gravillons, elle est donnée par le pourcentage de passant au tamis de 0,5 mm (tamisage effectué sous eau).
- Dans le cas des sables, la propreté (SE) est fournie par l'essai appelé « **équivalent de sable** » (figure 3.9) qui permet de mesurer la fraction argileuse du matériau.
- L'essai consiste à séparer le sable des matières argileuses ou fines, qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage (plus la valeur de SE est grande, plus le sable est propre).
- Elle peut également être évaluée par « **l'essai au bleu de méthylène (V_B)** », plus la valeur de V_B est petite, plus les sables sont propres.



$$\text{Equivalent de sable : ES} = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

Figure 3.9 : Essai d'équivalent de sable

• Il faut souligner l'importance de la propreté des granulats sur la qualité du béton. La présence de particules argileuses est en effet défavorable, autant à la mise en oeuvre du béton qu'à ses performances finales, en abaissant l'adhérence de la pâte de ciment sur les granulats. D'autres impuretés telles que les particules organiques sont susceptibles de nuire aux qualités du béton et perturber son durcissement.

Les sels tels que les sulfates ou les sulfures, peuvent être à l'origine de phénomènes de gonflement ou de tâches. Les corps étrangers (lignites ou scories) sont à proscrire.

3.4.3. Caractéristiques chimiques

3.4.3.1. Teneur en ions chlorures

Les chlorures modifient la cinétique d'hydratation du ciment et provoquent la corrosion des armatures. La teneur en chlorure issu de l'ensemble des constituants du béton est donc limitée.

3.4.3.2. Réactivités aux alcalis

Dans des conditions défavorables (granulats contenant une fraction significative de silice soluble réactive dans un environnement riche en alcalin) et en présence d'humidité, les phénomènes d'alcaliréaction peuvent provoquer un gonflement du béton.

3.4.3.3. Teneur en soufre et en sulfates

Les granulats peuvent contenir de faibles quantités de sulfates et de sulfures sous réserve que leur teneur en soufre total S n'excède pas 0,4 % en masse. La teneur en sulfates (SO₃) doit être inférieure à 0,2 %. On la détermine si S est supérieure à 0,08 %.

Les sulfures présents dans les granulats peuvent en s'oxydant se transformer en sulfates qui risquent de générer des phénomènes de gonflement. Il faut donc limiter la teneur en soufre pour se prémunir de ce phénomène. Les sulfates peuvent perturber la prise et les actions des adjuvants d'où la nécessité de limiter leur teneur dans le béton.

3.4.4. Caractéristiques mécaniques

3.4.4.1. Résistance à l'usure des gravillons

La résistance à l'usure des granulats est déterminée par " l'essai Micro-Deval " en présence d'eau.

Cet essai consiste à reproduire dans un cylindre en rotation des phénomènes d'usure par frottements. Cette résistance est caractérisée par le coefficient Micro-Deval MDE qui représente la proportion d'éléments fins produits pendant l'essai. Plus le coefficient MDE est faible, plus la résistance à l'usure des gravillons est élevée.

3.4.4.2. Résistance à la fragmentation des gravillons

La résistance à la fragmentation est déterminée par le coefficient Los Angeles. Le principe de cet essai est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. L'essai consiste à faire tourner les granulats dans un tambour fermé contenant des boulets métalliques.

3.4.4.3. Résistance au polissage des gravillons

Cette caractéristique concerne les granulats utilisés pour la réalisation de couches de roulement. Plus le coefficient de polissage accéléré (CPA) est élevé, plus la résistance au polissage est importante.

3.4.4.4. Résistance des gravillons au gel-dégel

La vulnérabilité du granulat dans le béton à l'action du gel-dégel est fonction de sa nature, de son utilisation, des conditions climatiques et de la formulation du béton (utilisation par exemple d'air entraîné).

3.4.5. Caractéristiques esthétiques

Les granulats contribuent à la teinte des parements des bétons. Ils sont mis en valeur en fonction du traitement de surface appliqué. On utilise indifféremment en fonction des disponibilités et de l'aspect recherché des granulats roulés, concassés ou semi-concassés. Les sables et les gravillons sont disponibles dans une large variété de teintes naturelles.

La teinte des bétons ayant subi un traitement de surface (béton lavé, béton désactivé, béton bouchardé, béton poli) est liée à la couleur des gravillons et des gros grains de sable.

3.5. Le choix des granulats selon la fonction du béton

<i>Choix des granulats des bétons</i>			
<i>Nature des bétons ou de l'ouvrage</i>	<i>Nature des granulats</i>	<i>Masse volumique des bétons</i>	
<i>Bétons classiques pour chantier ou usine de préfabrication</i>	Tous granulats roulés ou concassés avec préférence pour les siliceux, les calcaires ou les silico-calcaires	2 200 à 2 400 kg/m ³	
<i>Bétons apparents, architectoniques</i>	Les mêmes mais aussi les porphyres, basaltes, granites, diorites, qui offrent une palette très riche d'aspects et de teintes	2 200 à 2 400 kg/m ³	
<i>Usages routiers</i>	Toutes origines roulés ou concassés	2 200 à 2 300 kg/m ³	
<i>Bétons légers</i>	pour structure	Argile ou schiste expansé, laitier expansé	1 500 à 1 800 kg/m ³
	semi-isolant semi-porteur	Argile expansée, pouzzolane, ponce	1 000 à 1 500 kg/m ³
	isolant	Vermiculite, liège, bois, polystyrène expansé, verre expansé	300 à 800 kg/m ³
<i>Bétons lourds</i>	Corindon, barytine, magnétite	3 000 à 5 000 kg/m ³	
<i>Bétons réfractaires</i>	Corindon, déchets de produits réfractaires, granulats spéciaux	2 200 à 2 500 kg/m ³	
<i>Bétons ou chapes pour dallages industriels (soumis à une abrasion importante)</i>	Corindon, carborundum, granulats métalliques	2 400 à 3 000 kg/m ³	

Chapitre 4

Les liants

4.1. Définition

Les liants sont des produits généralement employés sous forme de poudres fines et qui, gâchés avec l'eau en pâte plus au moins épaisse, durcissent et forment une masse dure et compacte analogue à la roche naturelle.

4.2. Classification

D'après la pétrification on classe les liants en deux sortes :

a- les liants hydrauliques :

Ce sont les matières qui peuvent durcir et se conserver pendant une longue durée résistant non seulement à l'air mais aussi à l'eau. Citons parmi ceux-ci : le ciment portland, la chaux hydraulique.

b- les liants aériens :

On appelle liants aériens les matières qui peuvent passer à l'état solide, se conserver pendant une longue durée et augmenter la résistance à l'air libre. Nommons ici: le plâtre, la chaux aérienne.

4.3. Les liants hydrauliques

4.3.1. Le ciment

4.3.1.1. Définitions

Le ciment est une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit. La réaction chimique (hydratation) entre la poudre de ciment et l'eau produit un minéral artificiel insoluble. Plus les grains de ciment sont fins, plus cette réaction s'opère rapidement. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Le ciment est un constituant de base du béton.

- Il ne faut pas confondre:

- ◆ le **ciment**, poudre commercialisée en sac ou en vrac, avant son gâchage avec l'eau (photo 4.1);
- ◆ la **pâte de ciment**, au moment du gâchage du ciment avec l'eau;

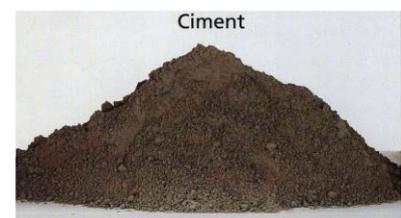


Photo 4.1 : Le ciment

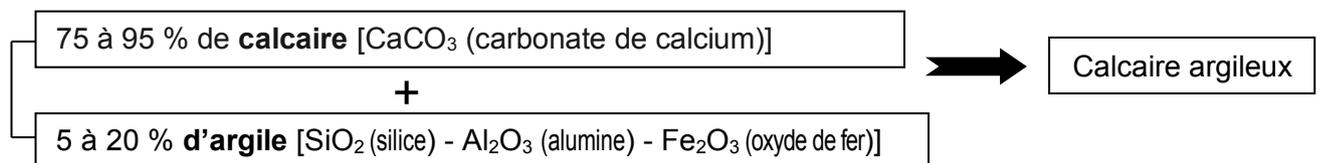
4.3.1.2 Un peu d'histoire

- Le ciment est le matériau du 20^{ème} siècle, il n'a guère plus d'une centaine d'années. L'écossais "**Aspdin**" prit un brevet d'invention en 1824, sur la fabrication d'un liant à partir d'un mélange de chaux et d'argile qu'il appela "**ciment Portland**" à cause de l'aspect présenté par ce liant durci qui rappelait celui de la pierre calcaire de **la Presqu'île de Portland**. C'est le premier ciment, père d'une longue lignée.
- Ainsi, le XX^{ème} siècle a ouvert la voie aux ciments artificiels qui prendront progressivement le pas sur les chaux.
- L'accélération sera plus manifeste à l'issue de la deuxième guerre mondiale lorsque le secteur du bâtiment produit essentiellement des logements neufs bâtis à partir d'éléments préfabriqués et, n'utilisant plus les chaux. C'est l'époque charnière où la chaux est en passe d'abandon, où son ancienneté est une marque d'archaïsme alors que les ciments améliorent performances des liants Accélèrent leur mise en oeuvre, tracent la voie d'une modernité que chaque maçon devra inévitablement emprunter.
- Le développement n'a pu s'effectuer que grâce à l'apparition de matériels nouveaux : fours rotatifs et broyeurs à boulets en particulier. Les procédés de fabrication n'ont pas cessé de se perfectionner. Pour produire une tonne de clinker, constituant de base du ciment, il fallait en 1870 : 40 heures, actuellement, il faut environ 3 minutes.

4.3.1.3 Les constituants des ciments

Matières premières

◆ Roches naturelles



◆ Sous –produits:

- déchets de fabrication de la fonte: laitier de hauts-fourneaux
- résidus des centrales thermiques : cendres volantes
- pouzzolanes obtenues artificiellement.

◆ Fillers :

Généralement inertes, obtenus par broyage fin de calcaire, basalte, laitier, cendres volantes.

Nota : on ajoute également 2 à 3 % de gypse en fin de fabrication.

4.3.1.4 La fabrication du ciment

Les différentes étapes de la fabrication du ciment sont les suivantes (figure 4.1 et figure 4.2):

a. Extraction et concassage :

Les matières premières sont extraites de carrières généralement à ciel ouvert. Les blocs obtenus sont réduits, dans des concasseurs situés généralement sur les lieux mêmes de l'extraction, en éléments d'une dimension maximale de 50 mm.

b. Préparation de la matière première:

Les grains de calcaire et d'argile sont intimement mélangés par broyage ou délayage, dans des proportions définies, en un mélange très fin, le « **cru** ». A cette occasion, des corrections de composition peuvent être effectuées en incorporant en faible proportion, bauxite, oxyde de fer. Le mélange **cru** est préparé automatiquement sous forme de granules (**voie sèche ou semi-sèche**) ou de pâte (**voie semi-humide ou humide**), en fonction de la technique de fabrication utilisée.

- **La voie sèche**

C'est de très loin la plus employée aujourd'hui. La matière première est préparée sous forme de poudre. La préhomogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des deux constituants essentiels du ciment par superposition de multiples couches.

Une station d'échantillonnage analyse régulièrement les constituants et le mélange pour en garantir la régularité. A la sortie du hall de préhomogénéisation, le mélange est très finement broyé dans des broyeurs sécheurs, qui éliminent l'humidité résiduelle et permettent d'obtenir une poudre qui présente la finesse requise ; cette poudre, le « **cru** », est une nouvelle fois homogénéisée par fluidisation.

- **La voie humide :**

Les blocs sont déversés dans un bassin de délayage (alimenté d'eau), à l'intérieur duquel tourne une herse qui effrite et divise la matière. La pâte ainsi obtenue qui est encore grossière est ensuite broyée et envoyée dans des bassins de stockage pour y être homogénéisée mécaniquement.

c. Cuisson :

Quelle que soit la technique de fabrication utilisée pour élaborer le cru, les installations de cuisson sont similaires et comportent deux parties.

- Un échangeur de chaleur comportant une série de quatre à cinq cyclones dans lesquels la poudre déversée à la partie supérieure progresse jusqu'à l'entrée du four. Elle se réchauffe au contact des gaz chauds en sortant de ce four, et se décarbonate en partie.

- Une décarbonatation plus complète peut être obtenue par l'ajout d'un foyer complémentaire situé dans le cyclone inférieur (précalcination). La poudre est ainsi portée à une température d'environ **800 °C à**

1 000 °C.

- Un four horizontal rotatif cylindrique en tôle d'acier (avec revêtement réfractaire intérieur) de 60 à 200 m de long, de 4 à 7 m de diamètre, légèrement incliné et tournant de 1 à 3 tours/minute (photo 4.2). La matière pénètre à l'amont du four où s'achève la décarbonatation, et progresse jusqu'à la zone de **clinkerisation** (environ **1450 °C**). Le temps de parcours est de l'ordre de 1 heure.

- Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile, principalement composée de silicates d'alumine et d'oxydes de fer, se combinent à la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et des aluminates de calcium (voir tableau 4.1).

4 phases cristallines principales			
Notation symbolique	Nom	Formule chimique	% en poids moyen
C ₃ S	silicate tricalcique ou alite	3 CaO, SiO ₂	62
C ₂ S	silicate bicalcique ou bélite	2 CaO, SiO ₂	22
C ₃ A	aluminat tricalcique	3 CaO, Al ₂ O ₃	8
C ₄ AF	alumino-ferrite tétracalcique	4 CaO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	8

Tableau 4.1 : La composition minéralogique du clinker



Photo 4.2: Le four rotatif

d. Broyage :

A la fin de la cuisson, la matière brusquement refroidie (70°C) se présente sous forme de granules qui constituent **le clinker** (photo 4.3). Celui-ci finement broyé avec **du gypse** (< 5 %) pour régulariser la prise donne le ciment Portland. Les autres catégories de ciment sont obtenues en ajoutant d'autres constituants tels que laitier granulé de haut fourneau, matériaux pouzzolaniques, cendres volantes, schistes calcinés, calcaire, fumées de silice, fillers.

e. Expédition :

Les grains de ciment étant récupérés à la sortie du broyeur sont expédiés vers des silos de stockage. Ces silos sont cylindriques et de capacité pouvant aller jusqu'à 10.000 tonnes.

L'expédition s'effectue selon deux modes:

- Le premier se fait en vrac, par bateaux, trains ou camions où l'extraction se fait sous le silo sur pont bascule par manches télescopiques.
- Le second se fait en sacs palettisés par camions ; l'ensachage est effectué par des ensacheuses à plusieurs becs. Les sacs ainsi remplis sont envoyés vers un atelier de palettisation qui met sur palettes les sacs de ciment.

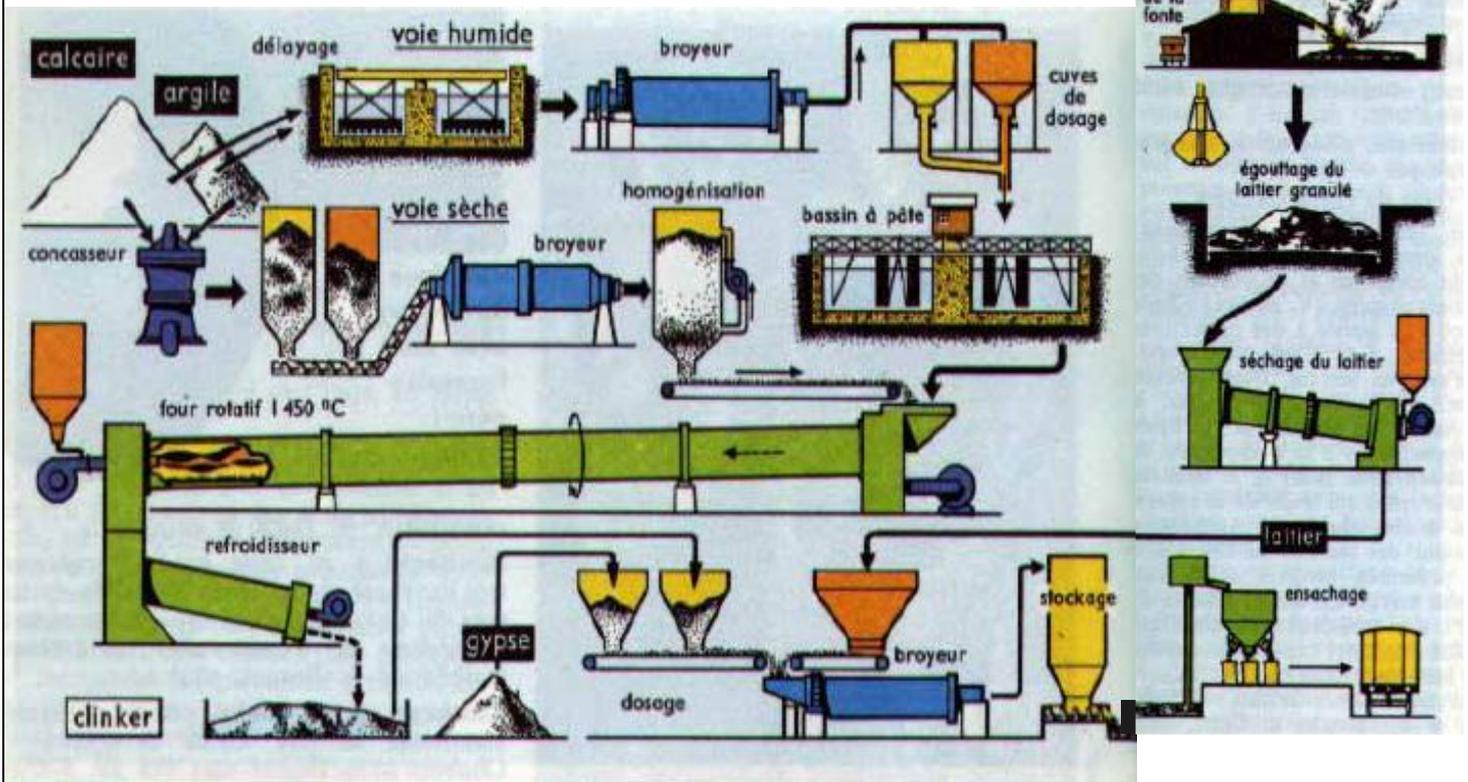


Figure 4.1: Schéma de production de ciment

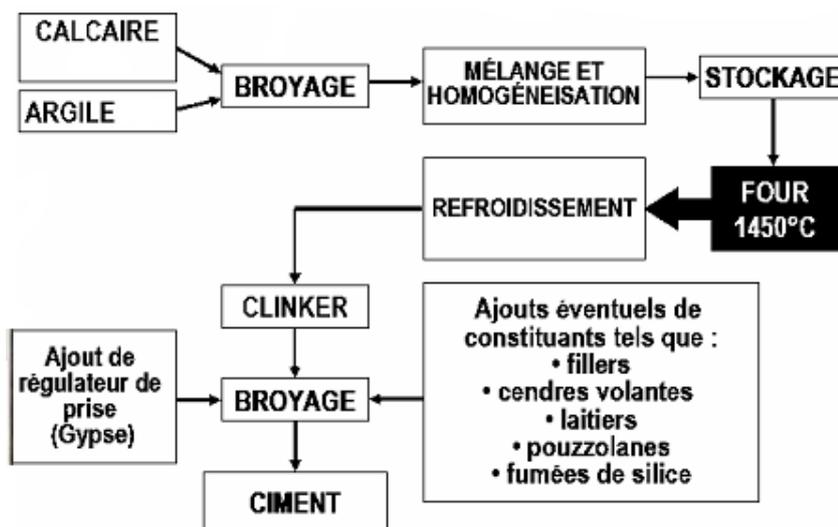


Photo 4.3 : Le clinker

Figure 4.2: Organigramme de fabrication du ciment

4.3.1.5 Hydratation, prise et durcissement :

- Les réactions qui se passent dès le début du gâchage et se poursuivent dans le temps sont extrêmement complexes.
- Le ciment Portland contient quatre constituants principaux:
 - le silicate tricalcique $3 \text{CaO}, \text{SiO}_2$ ou, par abréviation, **C₃S** ;
 - le silicate bicalcique $2 \text{CaO}, \text{SiO}_2$ ou, par abréviation, **C₂S** ;
 - l'aluminate tricalcique $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$ ou, par abréviation, **C₃A** ;
 - l'aluminoferrite tétracalcique $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ ou, par abréviation, **C₄AF**.
- Ces constituants anhydres donnent en présence d'eau, naissance à des silicates, des aluminates de calcium hydratés et de la chaux hydratée dite **Portlandite** formant un gel micro-cristallin, à l'origine du phénomène dit de « **prise** ».
- C'est le développement et la multiplication de ces micro-cristaux dans le temps qui expliquent l'augmentation des résistances mécaniques.
- Le ciment durci est une véritable « roche artificielle » qui évolue dans le temps et en fonction des conditions extérieures.
- Avant d'atteindre son stade final, l'évolution du ciment passe par trois phases successives:

1. Phase dormante

La pâte de ciment – ciment + eau – reste en apparence inchangée pendant un certain temps (de quelques minutes à plusieurs heures suivant la nature du ciment). En fait, dès le malaxage, les premières réactions se produisent, mais sont ralenties par la présence du gypse.

2. Début et fin de prise

Après une à deux heures pour la plupart des ciments, on observe une augmentation brusque de la viscosité : c'est le début de prise, qui est accompagné d'un dégagement de chaleur. La fin de prise correspond au moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un matériau rigide.

☞ **Le début de prise** des ciments les plus couramment employés se situe entre 2 et 3 heures après l'introduction de l'eau, mais certains ciments commencent leurs prises quelques minutes seulement après le gâchage.

☞ **La fin de prise** se situe en général 15 à 20 heures après le gâchage, mais peut avoir lieu au bout quelques minutes pour les ciments les plus rapides.

3. Durcissement

On a l'habitude de considérer le durcissement comme la période qui suit la prise et pendant laquelle l'hydratation du ciment se poursuit. La résistance mécanique continue à croître très longtemps, mais la résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle.

4.3.1.6 Les grandeurs caractéristiques

Le ciment se caractérise par un certain nombre de critères mesurés de façon conventionnelle, soit sur la poudre, soit sur pâte, soit sur « mortier normal » (mélange normalisé de ciment, sable et eau défini par la norme NF EN 196-1).

a. Caractéristiques de la poudre

a.1. La surface spécifique (finesse Blaine)

Elle permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique

ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment (norme NF EN 196-6). Elle s'exprime en cm^2/g . Suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2 800 et 5 000 cm^2/g .

a.2. La masse volumique apparente

Elle représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments inclus). Elle est de l'ordre de 1 000 kg/m^3 (1 kg par litre) en moyenne pour un ciment.

a.3. La masse volumique absolue

Elle représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments exclus). Elle varie de 2 900 à 3 150 kg/m^3 suivant le type de ciment.

b. Caractéristiques mesurées sur pâte ou sur « mortier norm

b.1. Le début de prise

Il est déterminé par l'instant où l'aiguille de Vicat (figure 4.3) – aiguille de 1 mm^2 de section pesant 300 g – ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de ciment (voir TP).

b.2. L'expansion

Elle se mesure suivant un procédé normalisé par la norme NF EN 196-3 et grâce aux aiguilles de **Le Chatelier**. Il permet de s'assurer de la stabilité du ciment. L'expansion ne doit pas être supérieure à 10 mm sur pâte pure pour tous les ciments (NF EN 197-1).

b.3. Le retrait

La mesure du gonflement dans l'eau et du retrait dans l'air est effectuée sur prisme de 4 x 4 x 16 cm sur « mortier normal » (norme NF P 15-433). Le retrait est limité à 0,8 mm/m ou à 1 mm/m suivant le type de ciment.

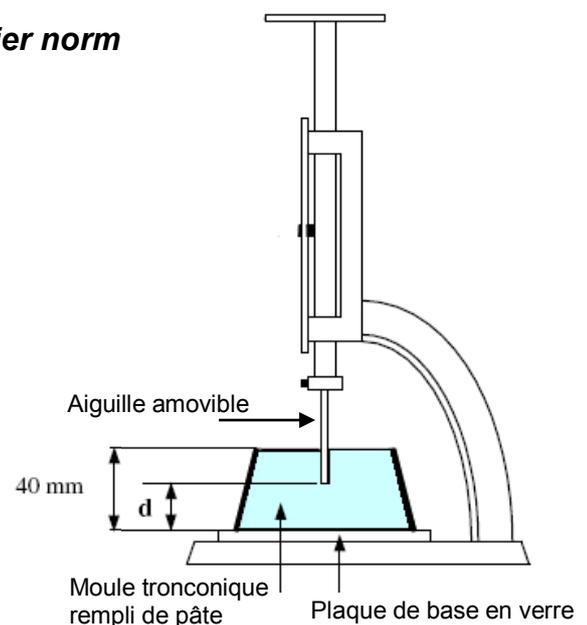


Figure 4.3 : Appareil de Vicat

b.4. Les résistances mécaniques

Mesurées sur éprouvettes 4x4x16 de mortier normal, elles caractérisent de façon conventionnelle la résistance du ciment définie par sa valeur nominale. Cette valeur est la limite inférieure de résistance en compression à 28 jours.

Nota :

Toutes les caractéristiques du ciment, en cours d'hydratation ou durci, sont sensibles à la température du mélange au moment du gâchage, puis à la température de conservation. La chaleur accélère la prise et le durcissement, le froid par contre les ralentit et peut même arrêter toute réaction.

4.3.1.6 classification des ciments

a. Classification en fonction de leur composition : norme NF P 15-301 (tableau 4.2)

	Ciment Portland	Ciment portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pouzzolanique		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CLK-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLC-CEM V/A	CLC-CEM V/B
Clinker (K)	≥ 95%	≥ 80%	≥ 65%	≥ 35%	≥ 20%	≥ 5%	≥ 65%	≥ 45%	≥ 40%	≥ 20%
Laitier (S)	*	6% ≤	21% ≤	≥ 36%	≥ 66%	≥ 81%	*	*	≥ 18%	≥ 31%
Pouzzolane (Z)	*	total	total	*	*	*	10% ≤ total	36% ≤ total	18% ≤ total	31% ≤ total
Cendres siliceuses (V)	*	≤ 20%	≤ 35%	*	*	*	≤ 35%	≤ 55%	≤ 30%	≤ 50%
Fumée de silice (D)	*	(fumée	(fumée	*	*	*	(fumée ≤ 10%)	(fumée ≤ 10%)	*	*
Cendres calciques (W)	*	de	de	*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*	silice	silice	*	*	*	*	*	*	*
Calcaires (L)	*	≤ 10%)	≤ 10%)	*	*	*	*	*	*	*
Fillers (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Tableau 4.2 : Classification en fonction de leur composition : norme NF P 15-301

- Le tableau ci-dessus indique les différents ciments et les proportions en masse de leurs

constituants. Les constituants marqués d'une étoile sont secondaires (**moins de 5 %**).

b. Classification en fonction de leur résistance (tableau 4.3):

- Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours; des sous-classes sont associées aux 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées.
- Les classes doivent respecter les spécifications indiquées dans le tableau ci-dessous. Les valeurs entre parenthèses sont des valeurs garanties lorsqu'elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées.

Classe	Résistance à la compression (MPa) norme EN 196-1			
	au jeune âge		à 28 jours	
	2 jours	7 jours	mini	maxi
32,5		(17,5)	≥ 32,5 (30)	≤ 52,5
32,5 R	≥ 13,5 (12)		≥ 32,5 (30)	≤ 52,5
42,5	≥ 12,5 (10)		≥ 42,5 (40)	≤ 62,5
42,5 R	≥ 20 (18)		≥ 42,5 (40)	≤ 62,5
52,5	≥ 20 (18)		≥ 52,5 (50)	
52,5 R	≥ 30 (28)		≥ 52,5 (50)	

Tableau 4.3 : Classification des ciments en fonction de leur résistance

4.3.1.7 Désignation normalisée des ciments :

- Les ciments sont désignés par leur type et par leur classe de résistance.
- **exemple : CPJ-CEM II/A 32,5 R**

C'est un **ciment Portland composé**, contenant de 80% à 94% de clinker et de 6% à 20% de fillers calcaires, de classe 32,5 ayant une résistance au jeune âge élevée.

4.3.1.8 Les autres types de ciment :

Ciment de laitier à la chaux : CLX (NF P 15-306)

- ◆ Ce ciment est un mélange de chaux hydrauliques et de laitier granulé de haut fourneau.
- ◆ **Ciment à maçonner** : CM (NF P 15-307), ce ciment contient les mêmes éléments actifs que le CPA mais ses résistances sont moins élevées.
- ◆ **Ciment naturel** : CN (NF P 15-308), ce ciment résulte de la mouture de roches clinkérisées, obtenues par la cuisson de calcaires marneux de composition très régulière et voisine de celle des mélanges d'argile et de calcaire servant à la fabrication du ciment Portland artificiel.

◆ **Ciment prompt naturel** : CNP (NF P 15-314)

Le ciment prompt naturel, à prise et durcissement rapides, résulte de la cuisson à température modérée d'un calcaire argileux de composition régulière, extrait de bancs homogènes, suivi d'un broyage fin.

◆ **Ciment alumineux fondu** : CA (NF P 15-315)

Le ciment alumineux fondu est un liant hydraulique qui résulte de la mouture, après cuisson jusqu'à fusion, d'un mélange composé principalement d'alumine, de chaux, d'oxydes de fer et de silice, dans des proportions telles que le ciment obtenu renferme au moins 30 % de sa masse d'alumine. Il est réfractaire.

◆ **Ciment pour travaux à la mer** : PM (NF P 15-317)

Ces ciments présentent des teneurs limitées en aluminat tricalcique qui leur permettent de conférer au béton une résistance accrue à l'agression des ions sulfate en présence des d'ions chlorure.

◆ **Ciment pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates** (XP P 15-319)

Ces ciments sont repérés dans leur appellation par les lettres **ES** recommandés pour les fondations en terrain gypseux, comme le cas CPJ-CEM II/A 42,5 ES.

4.3.1.9 Préconisation d'emploi des ciments courants (tableau 4.4)

<i>L'absence de signe dans une colonne n'interdit pas l'utilisation du ciment correspondant mais signifie que d'autres liants sont conseillés pour des raisons économiques ou techniques.</i>	32,5	42,5				42,5R			52,5			52,5R		
	CPJ	CLK	CHF	CLC	CPJ	CPA	CLK	CPJ	CPA	CHF	CPJ	CPA	CPJ	CPA
Maçonnerie	■				■			■						
Béton courant (non armé ou fondation)	■				■		■	■		■				
Béton armé (structures porteuses)		■			■			■			■		■	■
Béton armé avec décoffrage accéléré											■	■	■	■
Produits préfabriqués en béton non armé					■	■		■	■		■	■	■	■
Eléments préfabriqués en béton armé (poutres, prédalles, panneaux)						■		■			■	■	■	■
Béton précontraint						■		■				■		■
Stabilisation des sols et graves ciment	■	■			■			■						
Travaux en grandes masses	■				■	■								
Travaux en milieux agressifs (eau de mer ou eaux sulfatées, terrains gypseux) (prise mer)		■	■	■			■			■				
Travaux par temps froid												■		■

Tableau 4.4 : Guide d'utilisation des ciments courants

Tout en respectant les spécifications des normes qui fixent les conditions d'emplois d'emploi de chaque liant, il faut retenir que :

- Les CPJ-CEM II 32.5 conviennent bien pour les travaux de maçonnerie et les bétons peu sollicités.
- En fondation, si le milieu est agressif il faudra utiliser des ciments à forte teneur en laitier (CHF, CLK et CLC). (les eaux agressives attaquent les ciments à base principale de clinker).
- En élévation, il faut au contraire éviter l'emploi des ciments riches en laitier parce qu'ils sont sensibles à la dessiccation, qui durcissent moins vite que les portland et qui peuvent provoquer des efflorescences.
- Pour réaliser des bétons de masse il est préférable d'utiliser des ciments à faible chaleur d'hydratation (ex.: CPJ).
- Pour les travaux de béton armé on peut utiliser tous les ciments portland (CPA et CPJ)
- Pour les travaux de béton précontraint on utilise le ciment portland artificiel (CPA)
- Les classes R seront préférées pour les travaux exigeant des hautes résistances initiales pour permettre un décoffrage rapide par exemple.

4.3.2. Les chaux hydrauliques

4.3.2.1 Généralités

Autres fois les chaux hydrauliques sont dévisées en : chaux hydraulique naturelle et chaux hydraulique artificielle, mais actuellement le terme « chaux hydraulique artificielle » n'est plus utilisé. Il est remplacé par « ciment à maçonner».

Les chaux hydrauliques désignent plusieurs types de produits dont les définitions sont précisées ci-après.

Selon la norme **NF EN 459-1** « Chaux de construction », les chaux hydrauliques se subdivisent en:

➤ **Chaux Hydrauliques Naturelles (NHL - Natural Hydraulic lime):** chaux produites par calcination de calcaire plus ou moins argileux ou siliceux avec réduction en poudre par extinction, avec ou sans broyage. Elles ont toutes la propriété de faire prise et de durcir en présence d'eau. Le dioxyde de carbone présent dans l'air contribue également au processus de durcissement. Les NHL ne contiennent aucun ajout.

➤ **Chaux Formulées (FI- Formulated lime):** chaux ayant des propriétés hydrauliques, constituées principalement de chaux aériennes (CL) et ou de chaux hydrauliques naturelles (NHL) avec des matériaux hydrauliques et/ou pouzzolaniques ajoutés.

➤ **Chaux Hydrauliques (HI - Hydraulic lime):** la chaux hydraulique est un liant constitué de chaux et d'autres matériaux tels que le ciment, le laitier de haut fourneau, les cendres volantes, le filler calcaire ou autres matières appropriées.

Dans ce document, on va se limiter à la Chaux Hydrauliques Naturelles (NHL).

4.3.2.2 La chaux hydraulique naturelle (NHL)

4.3.2.2.1 Durcissement de la chaux hydraulique naturelle (NHL)

Le durcissement se fait en deux temps:

1. Une prise hydraulique, qui a lieu en présence de l'eau de gâchage: les silicates de la NHL s'hydratent pour former des hydrates insolubles et ainsi développer les résistances initiales qui augmentent au cours du temps.
2. Puis, une prise aérienne par réaction avec le dioxyde de carbone présent dans l'air (carbonatation: captation du (CO_2)). Elle limite le retrait et accompagne le développement de la résistance il long terme.

Ces étapes de la fabrication couplées aux phénomènes physiques et chimiques constituent le « cycle de la chaux » (voir figure ci-dessous).

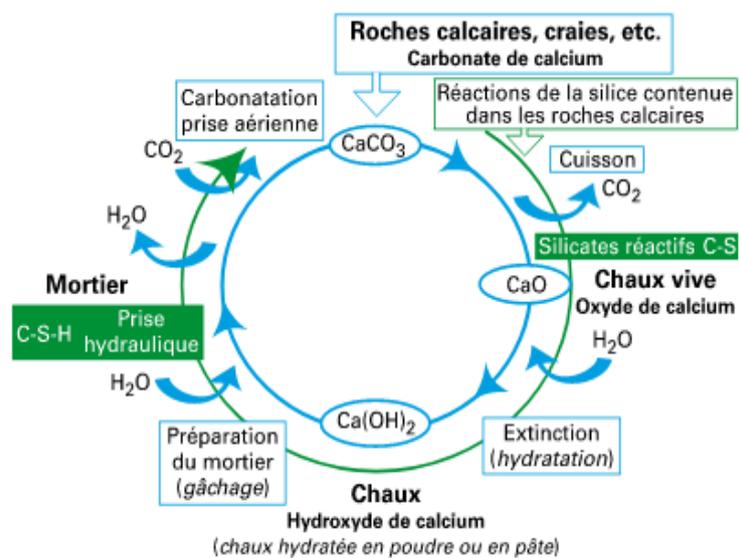


Figure 1 - Diagramme simplifié du cycle de la chaux hydraulique naturelle

Exigences normatives de la chaux hydraulique naturelle (NHL)

La norme harmonisée NF EN 459-1 définit les exigences chimiques, physiques et de durabilité de la NHL ainsi que les critères de conformité.

Les chaux NHL sont classées en fonction de leur résistance à la compression à 28 jours en laboratoire, et la norme NF EN 459-1 les groupe en trois catégories: NHL 2, NHL 3,5 et NHL 5.

- pour la NHL 2: entre 2 MPa et 7 MPa,
- pour la NHL 3,5: entre 3,5 MPa et 10 MPa,
- pour la NHL 5: entre 5 MPa et 15 MPa.

La norme NF EN 459-1 précise également d'autres exigences qui doivent être satisfaites par la chaux NHL, par exemple:

- la composition chimique (teneurs en SO_3 et en chaux libre sous forme de $Ca(OH)_2$),
- la finesse de broyage/granulométrie,
- le temps de prise initial et final.

Les exigences de durabilité concernant le choix de la NHL dépendent des applications et des conditions d'exposition. Ce choix doit être conforme aux normes ou règlements relatifs au type d'utilisation.

4.3.2.2 Propriétés des chaux hydrauliques naturelles

• Résistances et vitesses de prise

Bien loin du ciment Portland, les plus hydrauliques des chaux hydrauliques naturelles développent des résistances mécaniques modérées. Leur prise, immédiate lorsqu'elle est hydraulique (environ 1 heure d'ouvrabilité pour la NHL 5), est étalée dans le temps grâce à la chaux libre qu'elles contiennent. Ainsi, un enduit de 1 cm d'épaisseur voit sa prise, ou carbonatation, terminée à cœur, environ 6 à 8 mois après sa mise en œuvre.

Pour ces raisons, les chaux hydrauliques naturelles limitent :

- * le retrait, réduisant les fissurations et le faïençage des mortiers ;
- * les fissures propres aux liants très résistants lors des mouvements de maçonnerie ;
- * les remontées capillaires dans les murs anciens particulièrement sensibles ;
- * la détérioration des supports adjacents, toujours moins résistants.

• Perméabilité

Toutes les chaux sont perméables à la vapeur d'eau, soit 4 fois plus qu'un ciment courant mélangé à un sable. Dans le même temps, la chaux hydraulique naturelle est parfaitement imperméable à l'eau.

Elle permet de favoriser les échanges hygrothermiques à l'intérieur des murs, favorisant l'évacuation de l'humidité contenue. Cette propriété s'ajoute donc à une résistance aux eaux de pluie et de ruissellement pour une excellente protection des supports.

Par ailleurs, insoluble dans l'eau, la chaux hydraulique naturelle se révèle moins sensible que les autres chaux aux remontées de sels, en particulier dans les murs anciens qui ne possèdent pas de système d'isolation et absorbent directement l'eau du sol ou de la nappe phréatique.

• Indice de blancheur et de plasticité

Si la plasticité, appréciée par le maçon sur le chantier, reste bien complexe à caractériser en laboratoire, l'indice de blancheur ou de clarté, ainsi que la finesse des chaux hydrauliques naturelles, peuvent être mesurés.

• **Les éléments les plus blancs sont aussi, la plupart du temps, les plus fins.** Pour preuve la surface spécifique Blaine des chaux aériennes comprises entre 8 000 et 20 000, voire 40 000 cm²/g, pour les chaux en pâte, lesquelles sont parmi les liants les plus blancs et, surtout, les plus plastiques.

• La **surface spécifique Blaine d'une chaux hydraulique naturelle** est comprise entre 7 000 et 15 000 cm²/g. Elle est très malléable et, à la fois, reste facile à travailler. Ce qui n'est pas le cas des liants trop fins en poudre, eux aussi très malléables, mais plus difficiles à mettre en œuvre.

- Il existe des techniques qui permettent de mesurer l'indice de blancheur des chaux hydrauliques naturelles.

4.3.2.2.3 Fabrication

Le constituant unique de la chaux hydraulique naturelle est un calcaire comprenant 15 à 20 % de silice et d'alumine, ainsi qu'un pourcentage plus ou moins élevé de fer.

Extraction, concassage et criblage

Le calcaire est extrait en carrières souterraines, ou à ciel ouvert. Les blocs obtenus sont broyés dans des concasseurs primaires, puis criblés.

Cuisson et décarbonatation

Les fours actuels sont séparés en **3 parties distinctes**.

- **Zone d'enfournement**

La pierre est enfournée par le haut des fours. Dans cette partie, elle perd son eau et son gaz carbonique. La décarbonatation débute aux alentours de 900 °C. C'est le début du cycle de la chaux.

- **Zone de cuisson**

La pierre entre par gravitation dans la zone de cuisson centrale où la température est en moyenne de 1 100 °C, avec des pics aux alentours de 1 250 °C.

- **Zone de refroidissement**

Il s'agit, avant tout, de l'espace de défournement. Mais, c'est aussi l'endroit par lequel l'air de combustion est envoyé vers la zone de cuisson, ce qui la favorise et refroidit la pierre proche du défournement.

Broyage et hydratation

À la sortie des fours, la chaux vive obtenue est encore en roche, dont la taille varie selon la nature des fours et des matières premières. Elle est alors broyée dans des broyeurs à marteaux puis hydratée. Le processus d'hydratation (extinction) consiste à envoyer de l'eau sur la chaux vive pour l'éteindre.

4.3.2.2.3 Applications en construction

Les utilisations principales du matériau sont le bâtiment et les travaux publics.

a. Bâtiment

Si la chaux hydraulique naturelle peut intervenir à tous les stades de la maçonnerie d'un édifice, du montage aux enduits, en passant par le scellement de carrelage, les classes de résistances les prédestinent à des utilisations spécifiques :

- **NHL 2 est plutôt destinée aux travaux d'enduits ou de montage** (avec précautions), associée à des matériaux naturels ou fragilisés, tels que le chanvre, la pierre tendre, le torchis, ou encore la terre ;

- **NHL 3.5 peut couvrir tous les usages de la construction**, tels que le montage, les enduits, la couverture de tuiles, la pose de sols scellés ;
- **NHL 5 couvre tous les usages des deux précédentes chaux hydrauliques naturelles**. Elle peut également servir à la réalisation de bétons de chaux, destinés aux chais, ou encore de bétons de restauration du patrimoine (ponts anciens en pierre, maçonneries anciennes...).
- La norme européenne des chaux de construction définit également des **types de chaux hydrauliques, formulées : FL et HL**. Selon leurs destinations, ces chaux peuvent, notamment, contenir du ciment ou des adjuvants qui modifient les performances mécaniques, la rhéologie, ou encore la teinte. Ces produits sont généralement dédiés à des applications particulières, comme la mise en œuvre mécanique des enduits (machine à projeter).



Photo 4.4: a. Enduit extérieur; b. Rejointement en NHL 3,5

b. Produits de stabilisation des sols

Depuis toujours, la chaux a été employée pour stabiliser les sols,

- La chaux hydraulique naturelle est employée pure, juste mélangée à du sable pour les « calades » de galets des anciennes cités ou centres historiques.
- La mise en œuvre par épandage modifie les caractéristiques physiques et chimiques des sols en place. En zones humides, les traitements à la chaux vive précèdent parfois la mise en œuvre d'un liant hydraulique routier.
- La chaux facilite le travail des engins par temps pluvieux, ou dans les zones à humidité excessive, en baissant la teneur en eau des sols et en floculant les argiles. Elle permet donc d'améliorer la portance des sols en place, de faciliter leur travail et la pose ultérieure d'un mélange bitumineux.
- La chaux hydraulique naturelle ralentit le vieillissement des revêtements.

4.4. Les liants aériens :

4.4.1. Chaux aérienne ou grasse :

- Elle a été l'un des premiers liants utilisés (avec le plâtre et le bitume) depuis des millénaires. Au moyen âge, la chaux a été des plus employée (mélangée avec des tuiles ou des briques pilées); ainsi elle fût couramment utilisée jusqu'au milieu du 19e siècle.
- Il y avait alors en Algérie des milliers de petits fours à chaux dont il subsiste encore quelques vestiges.
- Cette chaux, obtenue par **cuisson de roches calcaires (CaCO_3)** ou dolomitiques (association de CaCO_3 et MgCO_3) suivie d'une extinction à l'eau, durcissait lentement à l'air, ce qui lui a valu son appellation couramment employée de chaux aérienne.

4.4.1. 1. Fabrication de la chaux aérienne

Elle se fait selon les étapes suivantes (figure 4.4) :

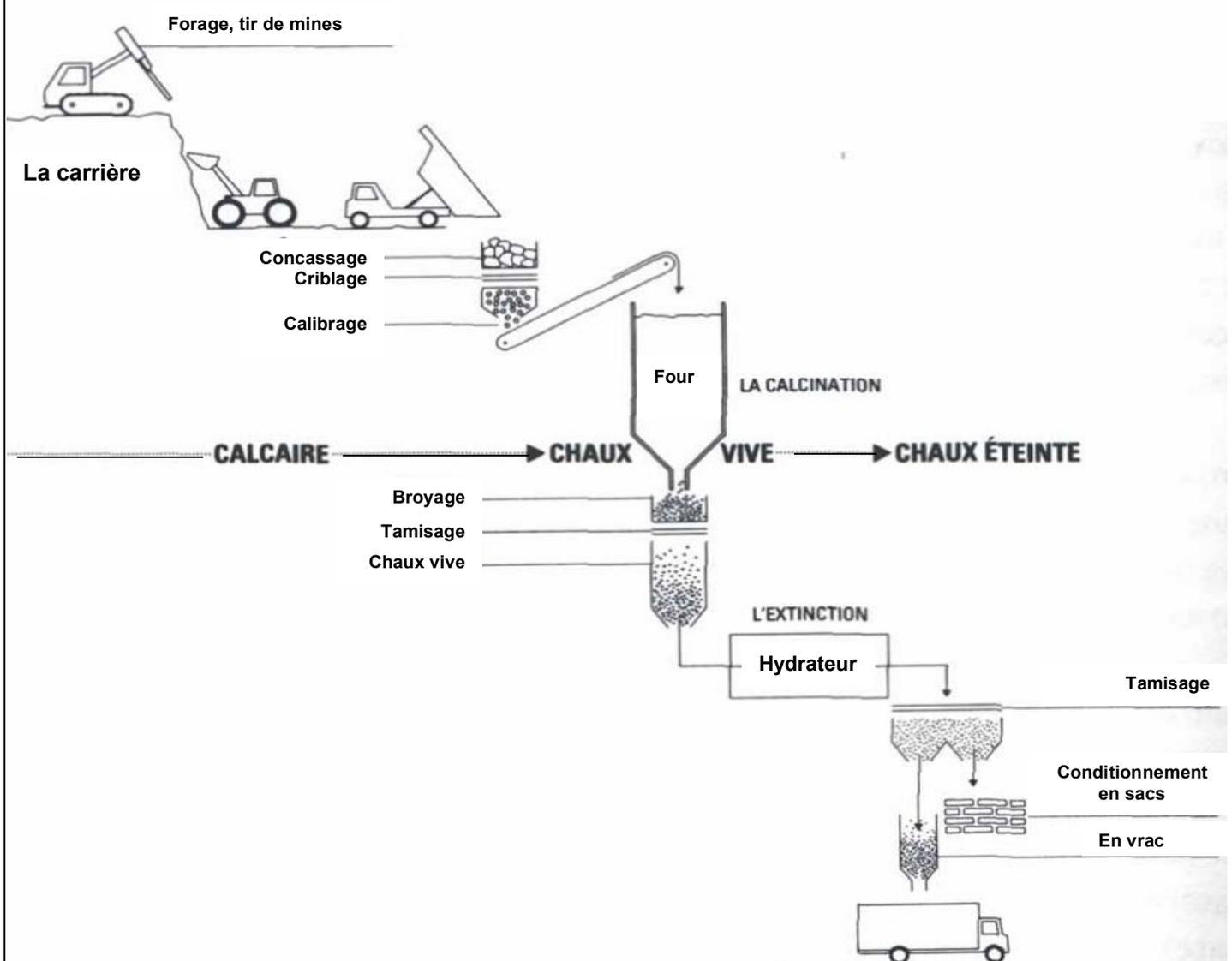


Figure 4.4: Schéma de fabrication de la chaux aérienne

a. Extraction :

Le calcaire est extrait des carrières. Traditionnellement, l'extraction se faisait par des moyens manuels (pics, pioches,...).

On a recours actuellement à l'utilisation d'explosifs (tirs de mine) pour faciliter l'extraction de la roche, Les blocs ainsi obtenus sont charriés par des pelles mécaniques et déposés dans des camions chargeurs. Ils sont acheminés vers les ateliers de préparation, où débute leur transformation (concassage, criblage et calibrage).

b. Concassage, criblage et calibrage :

La première opération consiste à concasser, puis cribler les blocs, de façon à acquérir un calibre de pierre compatible avec le type de four utilisé. Les fours verticaux requièrent une fourchette de calibre de 20 à 140 mm, contre 5 à 40 mm pour les fours rotatifs.

c. Cuisson ou calcination :

Aujourd'hui deux types de fours sont employés dans l'industrie pour la cuisson :

c.1. Four vertical ou four droit (figure 4.5):

☞ Se présente généralement sous la forme d'un cylindre en acier dim. Moy. : diam. 2m et H. 8m), chemisé intérieurement avec un matériau réfractaire, résistant à l'abrasion et à la corrosion.

- L'alimentation en calcaire se fait par le haut du four. Le choix d'un bon calibre des pierres permet une bonne circulation des flammes et une répartition homogène de la température. La pierre descend lentement en traversant d'abord une zone de préchauffage. Cette operation importante permet l'évaporation de l'eau libre contenue dans la pierre et évite l'éclatement des blocs.

- La pierre descend lentement en traversant d'abord une zone de préchauffage. Cette operation importante permet l'évaporation de l'eau libre contenue dans la pierre et évite l'éclatement des blocs.

- Puis la pierre traverse une seconde zone où elle subit la calcination. C'est une décarbonatation qui a pour effet d'entraîner la perte de "CO₂" à partir de 900°C.

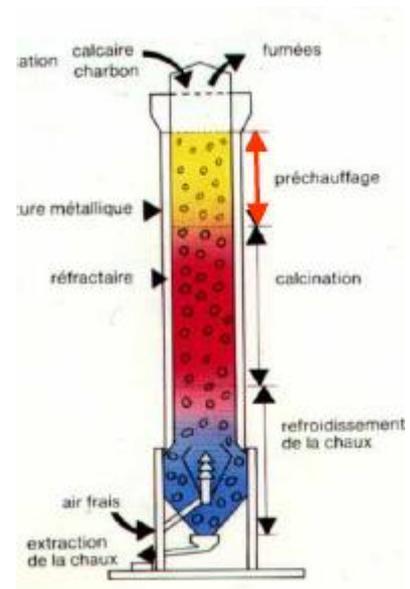


Figure 4.5 : Schéma de principe d'un four droit

☞ **La chaux vive** ainsi produite continue sa descente vers une troisième zone de refroidissement, avant d'être extraite. L'arrivée d'air frais au bas du four provoque un courant d'air qui parcourt le four en sens inverse et intervient dans les différentes étapes de fabrication de la chaux : refroidissement, combustion du combustible,...

c.2. Le four rotatif possède les caractéristiques de ceux utilisés dans l'industrie cimentière. Pour fabriquer de la chaux, il cuit le matériau entre 1000°C et 1300°C, suivant le type de chaux produite.

d. Extinction :

C'est l'opération qui permet le passage de la chaux vive à la chaux éteinte; elle s'accompagne d'une augmentation de volume : le '**foisonnement**'. Elle résulte d'un changement de structure moléculaire et de la formation d'aiguilles d'hydrate de chaux.

Au moment de son utilisation, la chaux doit être entièrement hydratée, sous peine de voir des gonflements de structures se manifester dans les ouvrages.

$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Ca(OH)}_2$ réaction exothermique

dégageant 155 Kcal/kg de CaO

☞ L'extinction est obtenue par adjonction d'eau et peut s'effectuer selon diverses méthodes :

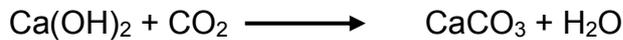
- ◆ **L'extinction spontanée** est obtenue en soumettant la chaux vive à l'action lente et continue de l'air. L'humidité présente dans l'atmosphère assure le rôle de l'eau d'extinction.
- ◆ **La méthode par arrosage manuel** consiste à apporter la juste quantité d'eau nécessaire à l'extinction (10 à 15%) . La réaction est exothermique (dégagement de chaleur) et engendre des projections dans le cas de blocs de chaux.
- ◆ **La méthode traditionnelle par immersion** comporte le trempage de blocs dans l'eau, puis l'égouttage et enfin le stockage pour laisser se poursuivre l'extinction.
 - Ces trois premiers procédés fournissent de la chaux en poudre. Les granulats de chaux vive sont broyés et passent par un hydrateur (vis sans fin aspergé d'eau). L'eau introduite (7 à 10%) permet l'hydratation de la chaux vive, mais elle aide également à l'évacuation de la chaleur dégagée lors de la réaction ($T = 150\text{ }^\circ\text{C}$).
 - Les particules qui n'ont pas réagi appelés "**grappiers**" (impuretés, surcuits, incuits,...) sont éliminées par tamisage. La chaux éteinte pulvérulente est tamisée, conditionnée en sac de 25 ou 50kg ou en vrac.

4.4.1.2. Propriétés principales :**a. Chimiques :**

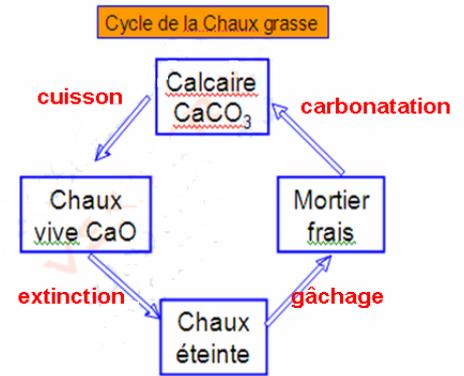
La teneur en chaux libre et magnésie (CaO et MgO) doit être supérieure à 80%. La teneur en oxyde de carbone (CO) doit rester inférieure à 5%.

b. Physiques :

- Le refus au tamis de 800 μ est nul et le refus au tamis de 80 μ doit être inférieure à 10%.
- La finesse globale doit se situer dans l'intervalle de 8.000 à 20.000 cm^2/g .
- La masse volumique apparente varie de 500 à 700 kg/m^3 et la masse volumique absolue varie de 2200 à 2500 kg/m^3 .
- La chaux vive est très avide d'eau, elle s'éteint en s'hydratant avec un fort dégagement de chaleur (absorbe pour 1kg de chaux, 3 litres d'eau). Cette propriété est utilisée pour assécher et traiter les sols très imprégnés d'eau.
- La chaux éteinte durcit en fixant le gaz carbonique de l'air pour redonner du carbonate de calcium.



- La chaux aérienne présente un indice de clarté proche de 100 (indice qui varie de 0 à 100) ,ce qui permet de révéler la coloration de l'agrégat.
- La chaux aérienne résiste bien au feu. Sa résistance réfractaire varie entre 1800 à 2000 °c.



- La chaux aérienne prend lentement. Le temps de début de prise est de 600 minutes (10heures).
- L'eau de gâchage pour l'obtention d'une pâte de chaux est de 8 à 15%.
- La chaux grasse est fortement basique, ce qui permet de neutraliser les acides du sol ou les eaux usées (produit bactéricide).
- La chaux grasse constitue un bon isolant à la fois phonique et thermique.

4.4.1.3. Utilisation dans le bâtiment :

Les chaux aériennes trouvent leurs applications les plus anciennes dans le bâtiment dans la préparation de mortiers et de badigeons.

a. Enduits :

- Ont principalement deux fonctions: protection et esthétique.
- Les mortiers de chaux présentent une grande élasticité, ce qui permet d'éviter les fissures de retrait et faïençage.
- Les mortiers de chaux, une fois durcis, ont la propriété d'être imperméable à l'eau tout en étant perméable à l'air.On dit que le mur respire.
- Le durcissement des enduits à base de chaux est lent; par conséquent, il est déconseillé de les utiliser à l'extérieur par période hivernale. Aussi, il faut protéger l'enduits frais contre le soleil et les vents violents.

b. Mortiers de pose et de jointement :

- La force de liaison d'un mortier de pose est plus importante que sa résistance à la compression.Les mortiers de chaux qui développent cette adhérence grâce à leur plasticité, sont ainsi bien adaptées à cet emploi.
- Ils sont de surcroît peu perméables à l'eau et peu fissurables. Ils ne provoquent pas d'efflorescences.
- Les mortiers de chaux constituent de très bons mortiers de jointement de maçonneries en pierres tendres, en béton cellulaire ou en briques. Ils sont également très utilisés dans les travaux de bâtiments anciens.

c. Badigeons :

- Sont obtenus en mettant la chaux éteinte en suspension dans l'eau à raison de 40 litres d'eau par sac de 25 kg. Ils sont réalisés à deux ou trois couches.

- Les badigeons sont réalisés sur des supports enduits, lissés, frottés ou décoratifs, pour donner un aspect uniforme aux couleurs et aux matériaux.
- Il peuvent avoir un effet curatif de bouchage sur des enduits microfissurés ou faïencés, et rattraper des défauts d'aspect.

d. Matériaux de construction :

La chaux intervient aussi dans la fabrication de matériaux de construction :

- Les briques silico calcaires, sont fabriquées avec un mélange intime de chaux et de sable siliceux, compacté et étuvé.
- Les Bétons cellulaires, matériaux légers et isolants.

4.4.2. Le plâtre:

• Connu depuis l'Antiquité, le plâtre est un des plus anciens matériaux de construction fabriqués par l'homme. S'il est encore employé sous sa forme traditionnelle de poudre gâchée avec de l'eau pour réaliser des enduits, c'est sous la forme d'éléments préfabriqués en usine (carreaux, dalles, plaques) que son utilisation se développe aujourd'hui pour répondre aux besoins de la construction.

• Le plâtre s'obtient par déshydratation du gypse – roche naturelle ou sousproduit de certaines industries – qui est un sulfate de calcium hydraté de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$.

• Le sulfate de calcium se rencontre dans la nature principalement sous les deux formes suivantes :

- hydraté avec deux molécules d'eau par molécule de sulfate de calcium ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) : c'est le **gypse** ;
- anhydre (CaSO_4) : c'est l'**anhydrite**.

4.4.2.1. Fabrication du plâtre

La fabrication du plâtre à partir du gypse naturel comporte les étapes suivantes (figure 4.6) :

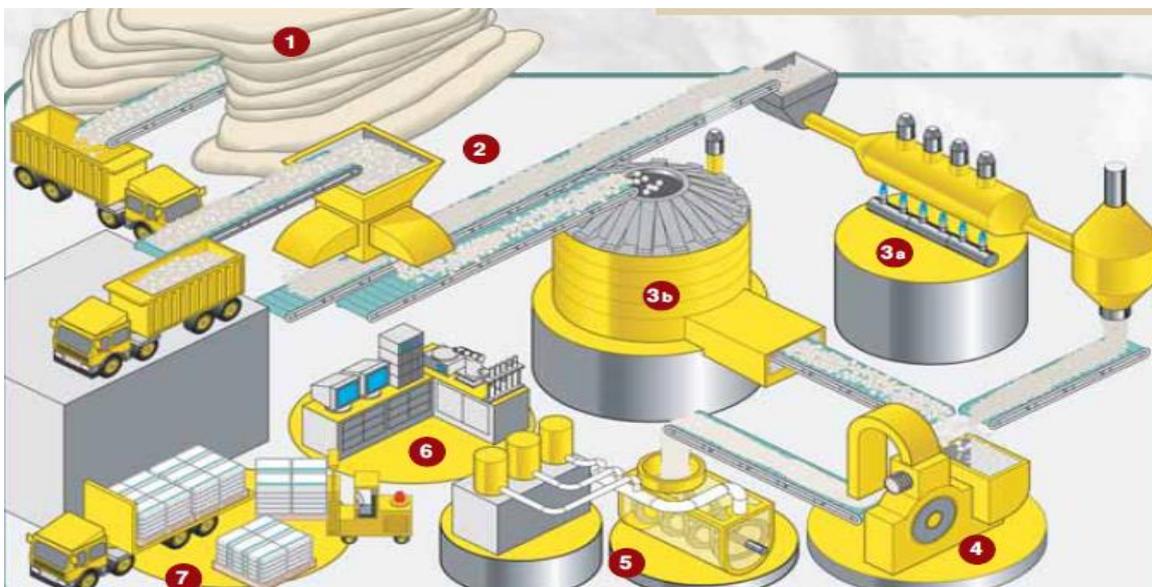


Figure 4.6 : schéma de fabrication du plâtre

1. Extraction

L'extraction du gypse naturel se pratique en carrières souterraines ou à ciel ouvert.

2. La réception du gypse et le calibrage

Avant d'être introduit dans les fours, le gypse subit un **concassage** et un **criblage** avec recyclage en fonction du procédé de cuisson. Le gypse peut éventuellement être séché dans des cylindres rotatifs avant d'être cuit.

3. La cuisson

• La cuisson permet d'obtenir par une déshydratation plus ou moins poussée du gypse, les divers éléments constitutifs du plâtre : $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O} + 3/2 \text{H}_2\text{O}$

- Il existe de nombreux appareillages de cuisson que l'on classe habituellement suivant :
 - **le mode de cuisson** : atmosphère sèche ou humide ;
 - **le type de four** : fixe, rotatif ou autre.

- Donc la cuisson se fait suivant deux voies :

3.a. Voie sèche

• Elle est pratiquée pour obtenir la plus grande partie du plâtre. Elle permet d'obtenir **le semi-hydrate β** , grâce à des températures variant entre **110 à 180°C** dans des fours discontinus à chauffage indirect. Il est composé de 94% de CaSO_4 et 6% de H_2O de cristallisation.

• **Le semi-hydrate β** est floconneux, à fissures écailleuses, est plus soluble dans l'eau avec laquelle il forme des mélanges épais mais peu résistants. Il demande une quantité d'eau de gâchage importante (70%, au lieu de 35% pour la variété α , à finesse égale) et par conséquent son temps de prise est plus long que le plâtre α .

• A partir de **180°C**, ($170 < T < 250^\circ\text{C}$) on obtient **de l'anhydrite soluble (CaSO_4 III)**, instable parce que très avide d'eau, qui, ajouté au plâtre ordinaire, en active la prise.

• Le surcuit ou anhydrite insoluble (**CaSO_4 II**), obtenu par cuisson à des températures variant entre 400 à 600°C dans des fours continus à chauffage direct. sous cet aspect, il est encore capable de faire prise en se combinant à l'eau (plâtre hydraulique), mais dans des délais longs. Inutilisable seul; on l'ajoute au semi hydrate dans une proportion de l'ordre de 30% pour la fabrication des plâtres pour enduits.

• Aux températures variant entre **600 et 900°C**, on obtient un produit inerte incapable de faire prise. Si la température de cuisson est supérieure à **1100°C**, on obtient l'anhydrite soluble (**CaSO_4 II**), à prise très lente (plusieurs heures à 15 jours et +).

• De ce fait, il reste très peu utilisé (plâtre allemand à plancher). Néanmoins son durcissement est très élevé.

• L'anhydrite fond et se dissocie quand la température de cuisson est de **1350°C**.

3.b. Voie humide

- Cuisson effectuée en milieu aqueux à une température supérieure à **100°C**, soit en autoclave sous pression (2 à 12 atmosphères), soit dans une solution saline concentrée. Ce procédé est utilisé pour obtenir le **semi-hydrate α** , qui est compact, cristallin, faiblement soluble dans l'eau avec laquelle il donne des produits fluides.
- Il fait l'objet d'une faible production (**plâtre dentaire**) et possède de fortes résistances mécaniques.

4. Le broyage

Après la cuisson, les pierres sont broyées selon 2 principes :

a - Le broyage standard

Le plâtre est réduit en particules de 200 μ grâce à un système de marteaux en rotation à l'intérieur d'un tamis (garantie d'une granulométrie maximale).

b - Le broyage/sélectage

Comme dans le broyage standard, le plâtre est broyé par des marteaux en rotation puis aspire à travers une "cage d'écureuil" en rotation. Selon son poids (donc sa taille), le grain de plâtre, soumis à 2 forces opposées (centrifuge et aspiration), traverse ou non la cage d'écureuil.

5. Le mélange et l'adjuvantation

Aux mélanges de plâtres Bêta et Alpha (dans des proportions très variables selon l'usage que l'on souhaite faire du produit final), on ajoute des adjuvants : ciment blanc, chaux aérienne, résine synthétique, modificateur de prise, etc.) ou de granulats légers. Ces derniers donneront au matériau une cinétique particulière, une expansion spécifique, une fluidité. Ceci forme une gamme variée de produits pour chaque usage particulier.

6. Le contrôle et la validation des produits

En amont (à l'extraction), l'humidité et la pureté du gypse font l'objet de contrôles périodiques. Ensuite, des échantillons sont prélevés tout au long du processus de fabrication et contrôlés par le laboratoire.

7. Le conditionnement

Le plâtre est commercialisé en vrac ou en sacs de papier aux poids standardisés 25 ou 40 kg.

4.4.2.2. Propriétés principales du plâtre

• Plâtre Gros :

- Le refus au tamis de 800 μ varie entre 5 et 20%,
- Eau de gâchage : 75 à 100%
- Temps de prise : 8 à 25 minutes,
- Consommation : 8kg/m² (5 m² / sac de 40 kg),
- Composition mortier :
 - i. 1 : 3 pondéral (sable fin 0 / 2),
 - ii. bâtard : 3 vol. plâtre, 1 vol. de chaux grasse, 2 vol. de sable lavé (0/2) et 1,5 vol. d'eau.

• **Plâtre Fin :**

- Le refus au tamis de $800\mu < 1\%$, et le refus à $200\mu = 25\%$,
- Eau de gâchage : 40 à 100%
- Temps de prise : 30 à 60 minutes
- Consommation : 8 à 12 kg/m^2 ,

- La masse volumique apparente varie entre 600 et 1300 kg/m^3
- La surface spécifique de 1500 à 8000 cm^2/g .
- La durée de la prise dépend de la nature du plâtre, de la température ambiante, de la quantité d'eau de gâchage, des adjuvants, etc. Le plâtre est caractérisé par un temps de prise court et un durcissement rapide.
- L'hydratation du plâtre est accompagnée d'une expansion de l'ordre de 0,3 à 1,5% suivant les plâtres, suivie d'un léger retrait dû à l'évaporation de l'eau (1/10e du gonflement). Cette propriété d'expansion rend le plâtre particulièrement apte aux moulages, le plâtre pénètre en force dans tous les creux du moule.
- Le plâtre est un matériau poreux. Il est éventable et perméable à la vapeur d'eau. Humide, le plâtre favorise l'apparition de moisissures; ce qui accélère sa dégradation. Il n'est pas recommandé d'utiliser le plâtre seul pour la confection des revêtements extérieurs.
- Le plâtre est un matériau incombustible. Lors d'un incendie, la plâtre (gypse) libère 18 à 20% de son eau de constitution. La face non exposée reste inférieure à $T=140^\circ\text{c}$ prévue par la réglementation . Par exemple une porte métallique non revêtue ne présente aucune résistance au feu; revêtue de 2 cm d'un enduit de plâtre, elle résiste 1h30 au feu.
- Le plâtre présente un faible coefficient de conductibilité thermique 0,4 à 0,6 $\text{kcal/m.h.}^\circ\text{c}$. C'est un bon isolant thermique et phonique.

4.4.2.3. Utilisation dans le bâtiment :

1. Enduits :

- Le plâtre mélange à la chaux grasse (10 à 15%) et au sable donne un mortier très utilisé comme enduit extérieur et intérieur (photo 4.5).
- On emploie le plâtre gros (photo 4.6) pour la première couche d'application sur les plafonds et les murs, pour les travaux de remplissage et pour les planchers.
- On utilise le plâtre fin pour la dernière couche de finition.



Photo 4.5: Enduit intérieur au plâtre



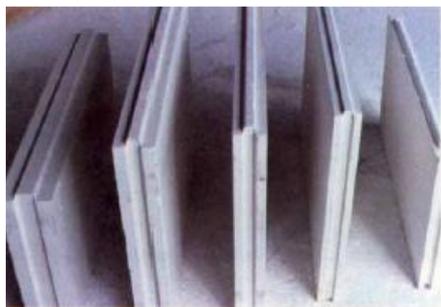
Photo 4.6: Enduit au plâtre gros

2. Matériaux de construction:

- Le plâtre peut être armé de fibres pour constituer du plâtre armé. Le staff est du plâtre armé de filasse de chanvre; il est utilisé en décoration (photo 4.7).
- Le plâtre sert à la fabrication de carreaux et plaques (sandwich de plâtre compris entre deux feuillets de carton) utilisés souvent pour cloisonner (figure 4.8).



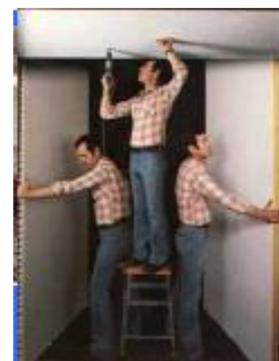
Photo 4.7 : Éléments en staff



(a)



(b)



(c)

Figure 4.7 : a. Carreaux de plâtre

b. Cloisonnement

c. Montage des plaques de plâtre

Chapitre 5

Les adjuvants

5.1. Définition et rôles des adjuvants (NORME NF EN 934-2)

- C'est un produit dont l'incorporation à faible dose (inférieure à 5% de la masse de ciment) aux bétons, mortier ou coulis lors du malaxage au avant la mise en oeuvre, provoque des modifications recherchées de telle ou telle de leur propriétés, à l'état frais ou durci.
- L'emploi d'un adjuvant ne peut entraîner une diminution de certaines caractéristiques du béton que dans les limites précisées par la norme.
- Il ne doit pas non plus altérer les caractéristiques des armatures du béton ou des aciers de précontrainte.
- Pour des raisons de commodité d'utilisation, la plupart des adjuvants se trouvent dans le commerce sous forme de liquides. Certains adjuvants existent en poudre, afin de réduire leur coût de transport (cas des chantiers à l'export). Dans ce cas il faut généralement les diluer avant l'emploi.

5.2. Fonction d'un adjuvant

5.2.1 Fonction principale

Chaque adjuvant est défini par une fonction principale et une seule caractérisée par la ou les modifications majeures qu'il apporte aux propriétés de béton mortiers ou coulis à l'état frais ou durci.

L'efficacité de la fonction principale peut varier en fonction de son dosage et des matériaux composants le béton.

5.2.2 Fonctions secondaires

Un adjuvant présente généralement une ou plusieurs fonctions secondaires qui sont souvent indépendantes de la fonction principale.

5.2.3 Effets secondaires

L'emploi d'un adjuvant peut entraîner des effets secondaires non généralement recherchés.

5.3. Désignation des adjuvants

Les adjuvants sont désignés dans l'ordre par la mention :

- De la fonction principale.
- De ou des fonctions secondaires.
- Indication de la norme si l'adjuvant bénéficie du droit d'usage.

Exemple : Réducteur d'eau - plastifiant ; NA819 ; Marque NA

5.4. Classification des adjuvants

Les adjuvants sont classés suivant leur fonction principale, on distingue trois grandes catégories d'adjuvants :

- ceux qui modifient l'ouvrabilité du béton : plastifiants-réducteurs d'eau, superplastifiants (anciennement fluidifiants) ;
 - ceux qui modifient la prise et le durcissement : accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise ;
 - ceux qui modifient certaines propriétés particulières : entraîneurs d'air, générateurs de gaz, hydrofuges de masse, colorants.
- Il faut y ajouter les produits de cure, qui ne sont pas à proprement parler des adjuvants, dont la fonction est de protéger le béton pendant son durcissement.

5.4.1 Adjuvant modifiant l'ouvrabilité du béton

Ces adjuvants modifient le comportement rhéologique des bétons, mortiers et coulis à l'état frais, avant le début de prise.

5.4.1.1 Plastifiant

A. Définitions :

Adjuvant qui, introduit dans l'eau de gâchage a pour fonction principale, à même teneur en eau de conduire à une augmentation de l'ouvrabilité d'un béton mortier ou coulis, sans en diminuer les résistances mécaniques.

B. Fonction principale :

- Augmentation de l'ouvrabilité : l'ouvrabilité du béton adjuvanté est supérieure de 50% de l'ouvrabilité du béton témoin.
- Maintien des résistances mécaniques du béton à 3 ,7 ,28 et 90 jours.

C. Domaine d'emploi

Adjuvant trouve son emploi dans l'industrie du béton manufacturé, qui exige des bétons fermes, pouvant être démoulés rapidement, dans les grands travaux de génie civil nécessitant des résistances élevées, ainsi que pour le bétonnage avec coffrages glissants.

5.4.1.2 Plastifiants réducteurs d'eau

A. Définitions :

Adjuvant qui, introduit dans l'eau de gâchage, a pour fonction principale, à même ouvrabilité de conduire à une augmentation des résistances mécaniques par une réduction de la teneur en eau d'un béton mortier ou coulis.

B. Fonction principale :

- Réduction d'eau : Valeur minimale de réduction d'eau est de 6.5%.
- Augmentation des résistances mécaniques R 3, 7, 28,90j augmentées au moins de 10%.

C. Fonctions secondaire :

- Modification du temps de prise.
- Modification du temps de durcissement.

D. Domaine d'application

- Béton préfabriqué qui exige un béton ferme pourra qui être démoulé rapidement.
- Grands ouvrages nécessitant des résistances élevées.
- Bétonnage avec coffrage glissant.

5.4.1.3 Super plastifiant fluidifiant

A. Définitions :

- Adjuvant qui, introduit dans un béton mortier ou coulis peu avant sa mise en oeuvre a pour fonction principale, à même teneur en eau de provoquer un accroissement important de l'ouvrabilité du mélange.
- Certains supers plastifiants peuvent avoir pour effet ou fonction secondaire de modifier le temps de prise ou l'évolution du durcissement ou les deux à la fois.
- L'introduction de certains supersplastifiants peut provoquer des phénomènes de ségrégations justifiant une révision de la composition de certains bétons.
- Certains supers plastifiants peuvent être utilisés comme réducteurs d'eau –plastifiant.

B. Fonction principale :

- Augmentation importante de l'ouvrabilité (figure 5.1).

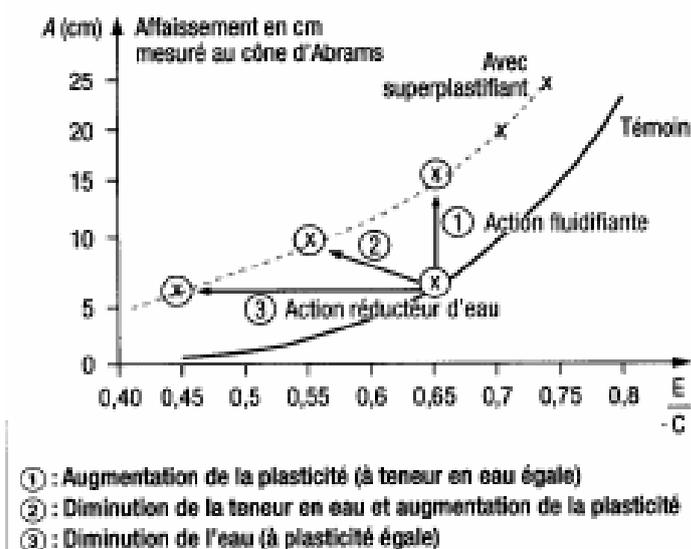


Figure 5.1: Effet du du super plastifiant fluidifiant sur le comportement du béton à l'état frais

C. Domaine d'application :

- Réalisation des fondations, dallage, radiers sols industriels... etc
- Indispensables pour les bétons de haute performance.
- Béton prêt à l'emploi surtout pompé

5.4.2 Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement

Ces adjuvants sont des produits chimiques, qui modifient les solubilités des différents constituants des ciments et surtout leur vitesse de dissolution.

5.4.2.1 Accélérateurs de prise sans chlore

A. Définitions :

- Adjuvant qui, introduit dans l'eau de gâchage a pour fonction principale de diminuer le temps de début et le temps de fin de prise du ciment dans le béton un effet secondaire peut être de modifier le développement des résistances dans le béton de prise.
- Suivant la nature des produits l'efficacité peut varier suivant la température.
- L'accélération recherchée peut souvent avoir pour contrepartie qui peut être temporaire une résistance mécanique ultérieure moins élevée que celle du témoin

B. Fonction principale :

Diminution de temps de prise

- **A 20°C** réduction de 25% par rapport au témoin
- **A 5°C** réduction de 40% par rapport au témoin

C. Domaine d'application :

Bétonnage par temps froid

- Décoffrage rapide.
- Scellements en béton armé
- Travaux de bétonnage en galerie
- Travaux sous l'eau

5.4.2.2 Accélérateurs de durcissement sans chlore

A. Définitions :

- Adjuvant qui introduit dans l'eau de gâchage a pour fonction principale d'accélérer le développement des résistances initiales du béton.
- Un effet secondaire peut être de modifier la durée de prise.
- Suivant la nature des produits l'efficacité peut varier suivant la température.
- L'accélération recherchée peut souvent avoir pour contrepartie qui peut être temporaire une résistance mécanique ultérieure moins élevée que celle du témoin

B. Fonction principale :

Augmentation des résistances mécaniques initiales ($C_3A \leq 11.5$) :

- **A 20°C** : ☞ 115% de celle du au témoin à 20°C à 1 jour
☞ 105% de celle du au témoin à 20°C à 3 jour
- **A 5°C** : ☞ 20% de celle du au témoin à 20°C à 1 jour
☞ 50% de celle du au témoin à 20°C à 3 jour

C. Domaine d'utilisation:

- Béonnage par temps froid
- Décoffrage rapide.
- Scellements en béton armé
- Travaux de bétonnage en galerie
- Travaux sous l'eau

5.4.2.3 Retardateur de prise

A. Définitions :

- Adjuvant qui introduit dans l'eau de gâchage a pour fonction principale d'augmenter le temps de début et le temps de fin de prise du ciment dans le béton.
- Les retardateurs freinent la diffusion de la chaux libérée par l'hydratation du ciment et retardent de ce fait la cristallisation.

B. Fonction principale :

Augmentation du temps de début et fin de prise de une à deux heures. Par rapport au témoin, l'augmentation du temps de début de prise est comprise entre une heure et deux heures.

C. Fonction secondaire

Un effet secondaire peut être de modifier le développement des résistances dans le béton. Au-delà de vingt-huit jours et souvent même dans un délai plus court, les résistances mécaniques sont en général augmentées par rapport au témoin.

D. Domaine d'utilisation :

- Bétonnage par temps chaud
- Bétonnage en grande masse
- Reprise de bétonnage

5.4.3 Adjuvants modifiants certaines propriétés du béton

5.4.3.1 Les entraîneurs d'air

A. Définitions :

- Ils provoquent la formation, dans les bétons, mortiers ou coulis, de micro bulles d'air (uniformément réparties dans la masse) jouant le rôle de « chambres d'expansion ». Ces micro bulles, mieux réparties que les bulles d'air naturellement contenues dans le béton (environ 30 L/m³ soit 3 %), coupent les réseaux des capillaires et limitent le développement des contraintes dues au gel de l'eau.

B. Fonction principale :

- Formation de micro bulle d'air
- Augmentation de 2% sans que la teneur totale puisse excéder 6%.
- Résistances aux cycles gel et dégel.

C. Domaine d'utilisation :

- Bétons routiers
- Béton exposé au gel dégel.

5.4.3.2 Hydrofuge de masse**A. Définitions :**

- Adjuvant qui introduit dans l'eau de gâchage a pour fonction principale de conduire à une diminution de l'absorption capillaire du béton, mortier ou coulis durcis.
- Cette diminution de l'absorption capillaire peut, associée à une bonne compacité réduire la pénétration de l'eau, et procurer au béton une bonne étanchéité.
- Leur action est très variable suivant leurs compositions, leurs dosages et les types de bétons auxquels ils sont incorporés. Les temps de prise peuvent être augmentés, l'efficacité dépend de la nature du ciment .Cependant il convient de se rappeler qu'ils ne peuvent pas rendre étanche un mauvais béton mal composé présentant des vides importants ou des hétérogénéités.

B. Fonction principale :

Réduction de l'absorption capillaire du béton.

C. Domaine d'utilisation:

- Bétons d'ouvrages hydrauliques (canaux, murs de fondations, retenues d'eau).
- Mortiers d'étanchéité (chapes, joints de maçonnerie, galeries de tunnels).

5.4.3.3 Les rétenteurs d'eau (NF EN 934-2) :**A. Définitions:**

- Ces produits ont pour fonction de réguler l'évaporation de l'eau et d'augmenter ainsi l'homogénéité et la stabilité du mélange. Le ressuage par l'action de ces stabilisants est réduit à 50%. La rhéologie du béton frais est améliorée même dans le cas de diminution du volume des fines. La diminution des résistances à 28jours par rapport à un béton témoin est de l'ordre de 20%

B. Fonction principale :

Régulariser l'évaporation de l'eau.

C. Domaine d'utilisation :

Exécution de mélanges retardés ou de mélanges à couler sous l'eau sans délavage.

5.4.3.4 Les produits de cure

A. Définitions :

- Les produits de cure ont pour effet de protéger le béton frais après sa mise en oeuvre en évitant sa dissipation par évaporation trop rapide de l'eau, celle-ci entraînerait une baisse des résistances mécaniques, la formation de fissure de retrait avec prise.
- Les produits de cure sont des produits que l'on peut pulvériser sur le béton frais, il se forme après application un film continu imperméable qu'il faut ensuite éliminer par brossage si un revêtement doit être appliqué sur le béton.

B. Domaine d'utilisation

- Bétonnage de route, Pistes, dallages planchers : tous les ouvrages pour lesquels le rapport surface/épaisseur est élevé.

5.4.4 Autres types d'adjuvants :

5.4.4.1 Générateur de gaz occlus :

Adjuvant dans la fonction principale est par réaction chimique et/ou physique pendant la mise en place d'un mortier, de provoquer la production d'un gaz occlus.

5.4.4.2 Générateur de mousse :

Adjuvant dans la fonction principale est de permettre l'incorporation ou la création de mousse dans un mortier par des moyens mécaniques.

5.4.4.3 Colorant :

Adjuvant dans la fonction principale est de colorer le béton ou le mortier dans la masse.

5.4.4.4 Raidisseur pour béton ou mortier projeté :

Adjuvant dans la fonction principale est de permettre l'adhérence et le maintien en place immédiats sans déformation du béton ou mortier dès sa projection sur le support quelle que soit l'inclinaison de celui-ci.

Chapitre 6

Les mortiers

6.1. Généralités

- Une construction est généralement réalisée par éléments (blocs de béton, briques, moellons, etc.) dont il faut assurer la liaison ou qu'il faut protéger par un revêtement. On doit alors effectuer des scellements ou divers travaux de reprise, de bouchage, etc.
- Toutes ces opérations se font à l'aide d'un liant toujours mélangé à du sable, de l'eau – et éventuellement un adjuvant – pour obtenir un « mortier », qui se distingue du béton par l'absence de gravillons.
- Des compositions multiples de mortiers peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres : liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau.
- En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables ; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement.

6.2. Les différents mortiers

6.2.1. 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 suffisant les rend pratiquement imperméables.

6.2.2. 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.

6.2.3. 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.

6.3. 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.

6.4. Les mortiers industriels secs prémélangés

- 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 oeuvre.
- Les mortiers peuvent contenir des liants et des sables variés ainsi que certains adjuvants et éventuellement des colorants.
- Les avantages présentés par ces produits sont :
 - prédosage de composition constante, garant
 - de régularité et de qualité,
 - gain de temps pour préparer le mortier,
 - chantiers plus propres.
- Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins:
 - mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié,
 - mortiers d'imperméabilisation,
 - mortier d'isolation thermique,
 - mortier de jointoiement,
 - mortier de ragréage,
 - mortier de scellement, mortier pour chapes,
 - mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment, etc.,
 - mortier de réparation.

6.5. Les mortiers frais retardés, stabilisés, prêts à l'emploi

- Depuis quelques années est apparue une nouvelle génération de mortiers livrés par les centrales de béton prêt à l'emploi : les mortiers frais retardés et stabilisés. Du fait qu'ils sont retardés, ces mortiers peuvent être livrés et stockés en quantité importante.
- On peut les utiliser dans un délai allant jusqu'à 36 h sans avoir le souci de préparer de nombreuses petites gâchées. Très maniables et homogènes, ils possèdent des résistances très largement suffisantes pour les travaux auxquels ils sont destinés : maçonnerie et jointoiement.

6.6. Caractéristiques principales

- Les caractéristiques principales des mortiers sont :
 - L'ouvrabilité;
 - La prise;

- L'adhérence au matériau mis en oeuvre
- Les résistances mécaniques;
- Les retraites et gonflements, etc.

• Pour pouvoir évaluer les caractéristiques des mortiers on prend souvent comme référence le mortier 1/3 composé en poids de: une partie de ciment et de 3 parties **de sable normalisé** dont les grains s'échelonnent de 80 microns à 2 mm et passent dans un fuseau bien déterminé (figure 6.1) et 0,45 partie d'eau

• Ce mortier est malaxé et mis en place dans des moules métalliques suivant des méthodes normalisées. On fait sur ce mortier des essais rhéologiques et éventuellement la prise et la chaleur d'hydratation. Beaucoup d'essais de laboratoires se font sur les prismes de 4 x 4 x 16 cm (résistances mécaniques, retrait, gonflement, absorption capillaire, résistances au gel et aux eaux agressives).

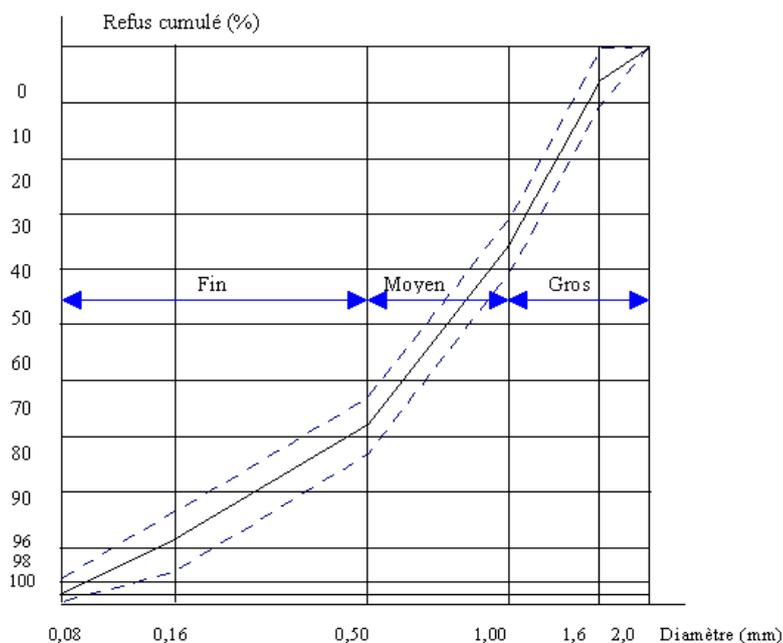


Figure 6.1 : Courbe granulométrique du *sable* normalisé selon les normes Afnor

6.7. Dosages des mortiers de chaux et de ciments

• Le rapport quantité de liant sur quantité de mortier prend le nom de "**dosage**"; celui-ci permet de classer les mortiers en plusieurs catégories :

1- Mortier normal :

• C'est un mortier qui contient en volume une partie de liant pour trois parties de sable normal. Avec ces proportions le liant remplit les vide du sable, c'est à dire que 1m³ de sable plus 1/3 de m³ de liant ne fournit qu'un **1m³ de sable + 1/3 liant (m³) = 1m³ de mortier**

2- Mortier maigre :

• Le volume de liant est inférieur au volume des vide **1m³ de sable + liant ≤ 1m³ de mortier**

3- Mortier gras :

• Le volume de liant est supérieur au volume des vide **$\frac{\text{volume de mortier}}{\text{volume de sable}} \geq 1$**

6.8 Emplois des mortiers

6.8.1. Les mortiers de maçonnerie (figure 6.2)

- On utilise des sables dont les grains les plus gros n'excèdent pas 5 mm. Le dosage le plus usuel est de 1 volume de liant (chaux hydraulique, ciment ou mélange des deux) pour 3 volumes de sable.
- La quantité d'eau, qui joue un rôle important, ne peut être fixée à priori. En règle générale, on adopte une valeur voisine de la moitié du poids de liant, qui peut néanmoins être réduite lorsqu'on utilise un plastifiant.



Figure 6.2: Réalisation d'un mur en utilisant du mortier dans les joints

6.8.2. Les mortiers pour enduits (figure 6.3)

6.8.2.1. Rôle de l'enduit

- Les enduits aux mortiers de liants hydrauliques sont utilisés aussi bien pour les travaux neufs que pour la réparation de Les enduits remplissent plusieurs rôles :
 - un rôle de protection du gros œuvre contre les intempéries ;
 - un rôle d'imperméabilisation, tout en laissant "respirer" le support ;

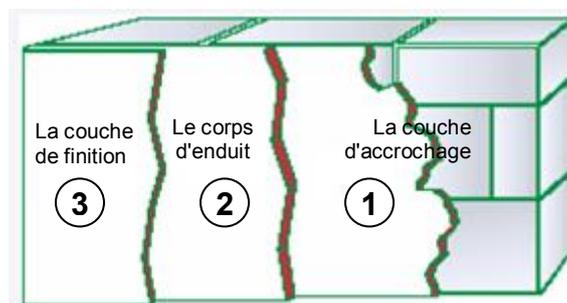


Figure 6.3: Enduit de façade sur mur en agglomérés

- un rôle esthétique (aspect, couleur).

Les enduits habillent le gros oeuvre en le protégeant. Ils constituent la finition extérieure visible de la construction.

6.8.2.2. Exécution des enduits

- Ces enduits (enduits aux mortiers de ciments, de chaux et de mélange plâtre et chaux aérienne) sont réalisés:
 - en trois couches appliquées à la main ou mécaniquement (machine à projeter) ;
 - en deux couches projetées mécaniquement (machine à projeter), les première et deuxième couches du premier cas n'en faisant plus qu'une du fait du mode de mise en oeuvre.

Première couche d'accrochage

- **Fonction** : assure l'adhérence de l'enduit au support.
- **Composition** : 500 à 600 kg de ciment par m³ de sable 0/3 mm. Le ciment de type CPA - CEM I ou CPJ – CEM. Il est de classe 32,5 ou 42,5 (la classe 52,5 et les ciments de classe R sont à éviter). Le sable doit comporter peu d'éléments fins.

Deuxième couche ou corps d'enduit

Délai d'application après réalisation de la première couche : au moins 48 heures.

- **Fonction** : imperméabilisation de la façade, planéité.
- **Mise en oeuvre** : après réhumidification de la couche d'accrochage (éviter qu'il ruisselle), application du mortier en deux passes ou plus suivant épaisseur. L'épaisseur cumulée moyenne des deux premières couches est comprise entre 15 et 20 mm avec un minimum de 10 mm en tout point.

Troisième couche ou couche de finition

Délai d'application après réalisation de la deuxième couche : 4 à 8 jours au moins, 15 jours pour obtention d'une teinte homogène ; doit être augmenté par temps froid ou en cas de forte humidité.

- **Fonction** : essentiellement esthétique, mais contribution à l'imperméabilisation d'ensemble.
- **Composition** : environ 350 kg de liant par m³ de sable sec, à adapter selon le type de liant (ciment, chaux ou mélange).

6.8.3. Les mortiers pour chapes (figure 6.4)

- Les sols en béton, qui demandent un état de surface plan, lisse et une bonne imperméabilité, sont constitués d'une chape qui est appliquée sur une première couche de béton généralement dosée à 300 kg de ciment pour 550 litres de sable sec 0/5 mm et 730 litres de gravier 5/25 mm.
- La chape aura, en pratique, de 3 à 4 cm d'épaisseur. Elle sera appliquée sur un support propre et dépoussiéré, rugueux et fortement humidifié mais ressuyé.
- Le dosage du mortier sera au minimum de 50 kg de ciment pour 140 litres de sable sec.



Figure 6.4: Mortier pour chape

6.8.4. Les mortiers pour scellements (figure 6.5)

- Pour les scellements d'équipements ou d'éléments de second oeuvre sur des supports béton ou des maçonneries, on utilise des mortiers présentant des caractéristiques particulières :
 - prise et durcissement rapides ;
 - absence de retrait.
- Il existe des produits spécifiques prêts à l'emploi ; on peut également réaliser un mortier de scellement sur le chantier en utilisant pour sa composition :
 - des ciments à forte résistance de classe 52,5 ou 42,5, en général à durcissement rapide

(classe R), ciment prompt, ciment alumineux ;

- du sable très propre (roulé de préférence) d'un diamètre maximal de 2 ou 3 mm ;
- un agent expansif ;
- des adjuvants divers (plastifiants, rétenteurs d'eau, accélérateurs, résines) ;
- éventuellement des fibres.

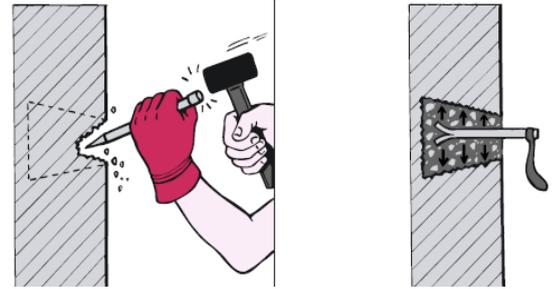


Figure 6.5: Mortier pour scellements d'équipements

- Les dosages en liant sont généralement élevés (600 à 700 kg pour 1 m³ de sable).
- Le dosage en eau doit être ajusté selon la consistance recherchée : E/C compris entre 0,4 et 0,5.

6.8.5. Les mortiers pour réaliser une chape pour carrelage

- L'épaisseur du mortier est ≥ 3 cm
- Le dosage en ciment varie entre 250 et 400 kg pour 1 m³ de sable de 0/5
- Le mortier doit être peu mouillé pour obtenir une surface régulière (planitude, aspect)

6.8.6. Mortier pour enduit étanche

- Il peut s'effectuer sur les murs de sous sol en contact avec la terre.
- **Fonction** : empêcher les infiltrations d'eau.
- **Composition** : sont préparés aux ciments de classes élevés, incorporation d'adjuvants (hydrofuges).

Chapitre 7

Le béton

7.1 Définition

- Le béton est un mélange de (tableau 7.1):
 - **pâte pure** (ciment + eau + air);
 - **granulats** (sables, gravillons et plus rarement pierres cassées);
 - **produits** d'addition éventuels (adjuvants).

Constituants	Eau	Air	Ciment	Granulats
Pourcentage en volume absolu	18 à 28	1à 6	7à 14	60à 78

Tableau 7.1 : Pourcentage en volume absolu des constituants du béton

- Le béton est préparé soit sur le chantier, soit en centrale à béton.

7.2 Composants du béton

- Voir les chapitres: 3,4 et 5.

A. Granulats

<p>naturels</p> <p>roulés (granulats de rivière) siliceux (ou,et) calcaires durs (traités en carrière) concassés</p> <p>artificiels</p>	<p>← Inertes</p> <p>← résistants à la compression</p> <p>← résistants à l'usure</p> <p>← résistants au cisaillement</p> <p>← ingélifs</p> <p>← de surface propre et adhérente</p> <p>← de faible porosité</p> <p>← de forme favorisant la mise en oeuvre et la compacité</p> <p>← de couleur suivant les effets architecturaux recherchés (béton clair)</p>
---	---

- Les classes granulaires couramment utilisées sont 0/5 pour le sable et 5,6/15 ou 5,6/20 pour les gravillons. Le choix sera fonction de l'épaisseur de l'ouvrage, de la distance entre les armatures et de l'épaisseur d'enrobage des armatures requise.

B. Le ciment

- C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide .
- Le choix du type de ciment et son dosage dépendent à la fois des performances recherchées (résistance mécanique, résistance aux agents agressifs, apparence) et de la nature des autres composants (granulométrie des granulats).

C. L'eau :

- De façon générale, l'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. Il est exclu d'employer de l'eau de mer, qui contient environ 30 g/l de chlorure de sodium, pour la fabrication de bétons armés ou précontraints.

D. Les adjuvants

- Sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités (en général moins de 3% du poids de ciment, donc moins de 0.4% du poids du béton) afin d'en améliorer certaines propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton.

E. Les additions minérales (ultrafines)

- Sont des particules de faibles dimensions qui, ajoutées en quantités de l'ordre de 10% du poids de ciment, améliorant notablement les performances et la durabilité du béton grâce à leurs propriétés physicochimiques (cendres volantes, laitier, fillers, ...). Les fumées de silice, ou microsiles, sont les plus utilisées, ce sont des oxydes de silicium à structure amorphe en forme de microsphères de diamètre de l'ordre de 10 µm.

7.3 Propriétés essentielles d'un béton

- Elles sont relatives :
 - à la mise en place du béton,
 - aux résistances mécaniques à la compression essentiellement.

7.3.1 L'ouvrabilité

- L'ouvrabilité est la propriété essentielle du béton à l'état frais, qui permet sa maniabilité en conservant son homogénéité. Sur le plan pratique, cela se traduit par la facilité :
 - de mise en oeuvre dans les coffrages;
 - d'enrobage des aciers;
 - d'obtention d'un parement brut acceptable, qu'il soit dans le plan horizontal ou vertical.
- L'ouvrabilité dépend :
 - du dosage en éléments fins,
 - du dosage en ciment,
 - de la teneur en eau, sans excès,
 - de la forme arrondie des granulats et de leur taille (gros).
- L'ouvrabilité ou maniabilité peut s'apprécier de diverses façons et en particulier par des mesures de plasticité.

Mesure de l'ouvrabilité

- Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. Nous n'en citerons que deux d'entre elles qui sont les plus couramment utilisées dans la pratique.

2. Affaissement au cône d'Abrams (figure 7.1).

- Cet essai a fait l'objet de la norme NFP 18-451, et nous n'en rappelons ci-dessous que les principes essentiels on remplit de béton un moule en tôle tronconique (D = 20 cm, d = 10 cm, h = 30 cm); le remplissage s'exécute en trois couches tassées avec une tige d'acier de 16 mm de diamètre dont l'extrémité est arrondie, à raison de 25 coups par couche; on soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement.
- Appréciation de la consistance du béton (tableau 7.2):

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance
Ferme F	0 à 4	± 1 cm
P1atique P	5 à 9	$2 \pm$ cm
Très plastique TP	10 à 15	$3 \pm$ cm
Fluide FI	16	

Tableau 7.2 : Appréciation de la consistance du béton

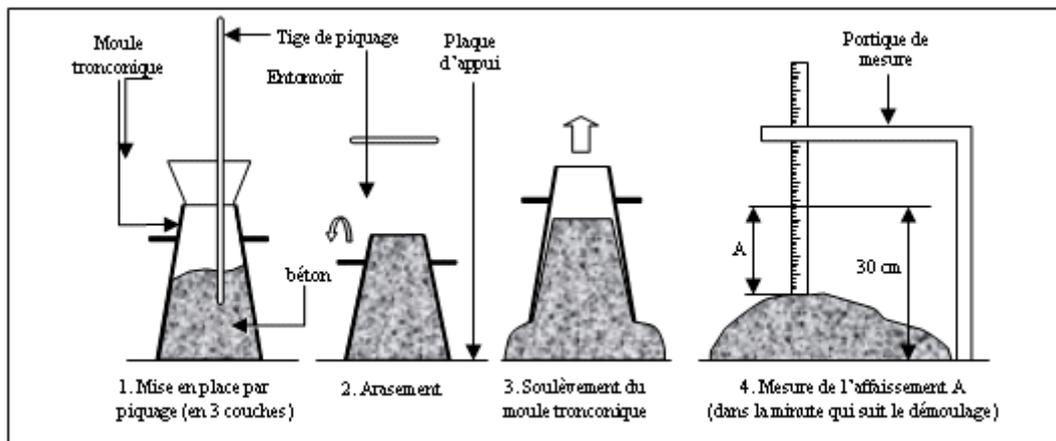


Figure 7.1: Mesure de l'affaissement du béton par le cône d'Abrams

2. Étalement à la table à secousses

- Cet essai (flow-test) est une mesure testant plus particulièrement l'aptitude du béton à s'étaler par écoulement.
- Initialement, l'essai s'exécutait sur une table à laquelle on imprimait des secousses verticales (élévation suivie d'une chute de 12 mm) à l'aide d'une came commandée par une manivelle (figure 7.2).
- On démoulait sur la table un tronc de cône de béton ($D_0 = 25$ cm; $d_0 17$ cm; $h = 12,5$ cm) et on le soumettait à une série de 15 secousses en 15 secondes; on mesurait ensuite le diamètre total D après étalement et la mesure de l'étalement E s'exprimait en pourcentage d'augmentation du diamètre de base:

$$E = \frac{D - 25}{25} \times 100$$

- En général on admettait comme valeur moyenne pour les bétons courants:
 - très ferme : 10 à 30 %
 - ferme : 30 à 50 %
 - plastique : 50 à 70%
 - très plastique : 70 à 100 %

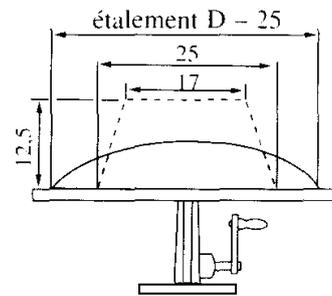


Figure 7.2: Mesure de l'étalement du béton par la table à se cousses

7.3.2 La résistance

- Il s'agit surtout de la résistance à la compression mais également à la traction.

A. Les essais et les mesures

A.1. Résistance eu compression:

- Elle est désignée par f_{cj} (résistance en compression à " j " jours). Dans le cas courant, pour l'établissement des projets, la résistance de référence est prise à **28 j**.
- Elle se mesure par compression axiale de cylindres de béton dont la hauteur est double du diamètre ($d = 15,96$ cm). La section S est de 200 cm² (figure 7.3).
- La compression se fait par le biais d'une presse hydraulique (figure 7.4).
- La résistance d'une éprouvette cylindrique de béton, de dimensions $\varnothing 16 \times 32$ (ou $\varnothing 11 \times 22$), est définie à (**j**) jours, à partir de la charge (F_r) conduisant à sa rupture :

$$f_{cj} \text{ (MPa)} = \frac{F_r}{S}$$

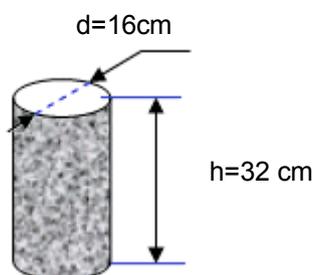


Figure 7.3 : Eprouvettes cylindriques (diamètre 16 cm, hauteur 32 cm),



Figure 7.4 : Ecrasement d'éprouvettes de béton avec une presse hydraulique

A.2. Résistance en traction:

- Elle est désignée par f_{tj} (résistance en traction à " j " jours).
- Elle peut être évaluée par (figure 7.5):

- traction directe sur les cylindres précédents en collant des têtes de traction;
- traction par fendage en écrasant un cylindre de béton placé horizontalement entre les plateaux d'une presse (essai brésilien);
- traction par flexion à l'aide d'une éprouvette prismatique de côté « n » et de longueur « 4 a » reposant sur 2 appuis horizontaux et soumise à la flexion (éprouvette de 7 cm x 7 cm x 28 cm).

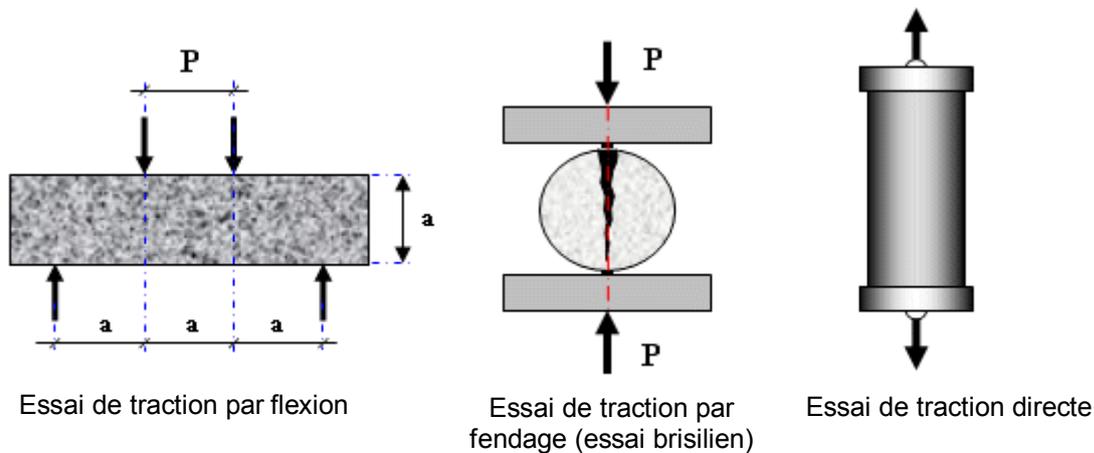


Figure 7.5 : Essais de traction du béton

Remarque : le béton résiste mal en traction. **Sa résistance à la traction est presque 13 fois moins qu'en compression .**

A.3. Essais non destructif

- Les méthodes normalisées utilisées pour évaluer la qualité du béton dans les bâtiments ou les ouvrages ne prennent en compte que des essais destructifs sur des éprouvettes coulées au même moment.
- Les principaux désavantages de ces méthodes sont les suivants : les résultats ne sont pas obtenus immédiatement, le béton des éprouvettes peut être différent de celui de l'ouvrage car la cure ou le serrage peuvent être différents, les résistances des éprouvettes dépendent également de leurs dimensions et de leurs formes.
- Plusieurs méthodes non destructives d'évaluation ont été mises au point. Ces méthodes sont basées sur le fait que certaines propriétés physiques du béton peuvent être reliées à la résistance et peuvent être mesurées par des méthodes non destructives. Ces propriétés physiques du béton comprennent la dureté (capacité de rebondissement), la capacité de transmettre les ultrasons, la capacité à résister à l'arrachement, ...
- On cite ici deux essais (voir TP)
 1. Essai slérométrique NFP 18-417,
 2. Essai d'auscultation sonore NFP 18-418.

A.4. Evolution de la résistance dans le temps

• Dans les cas courant, on considère que la résistance du béton évolue dans le temps très rapidement à court terme (entre 0 et 7 j), puis ralentie (de 7 à 28 j) pour tendre vers une asymptote horizontale à partir de 60 jours (figure 7.6). Pour la référence en temps de 28 jours prise dans les calculs, on considère que le béton a atteint, à cet âge, 90% de sa résistance à long terme.

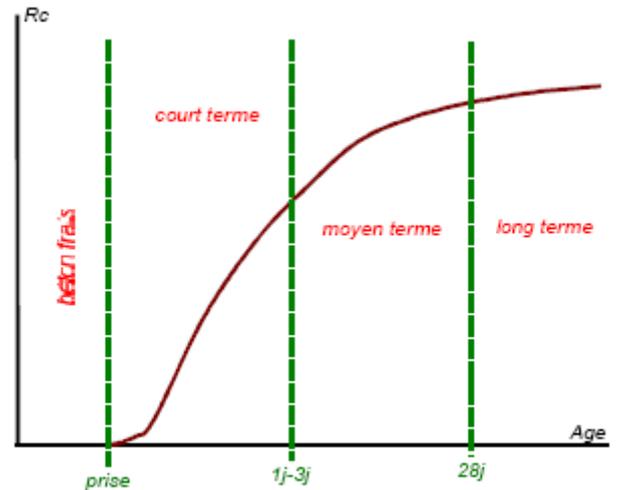


Figure 7.6 : Evolution schématique de l'évolution des résistances à la compression dans le temps

B. Les facteurs influençant la résistance

B.1. La classe du ciment (tableau 7.3)

		Valeurs garanties des résistances					
Classes		32,5	32,5R	42,5	42,5 R	52,5	52,5 R
Echéanc	2 jours	-	12	10	18	18	28
	7 jours	17.5	-	-	-	-	-
	28 jours	30	30	40	40	50	50

Tableau 7.3 : La classe du ciment

B.2. Le dosage en ciment et en eau.

• La résistance croît en même temps que le dosage en ciment **C** et elle décroît en fonction du dosage en eau **E** et c'est pourquoi on a tendance à prendre en compte le rapport **C/E** comme facteur global intervenant dans la résistance du béton. Il est également d'usage pour certains d'adopter le facteur inverse **E/C** (Figure 7.7).

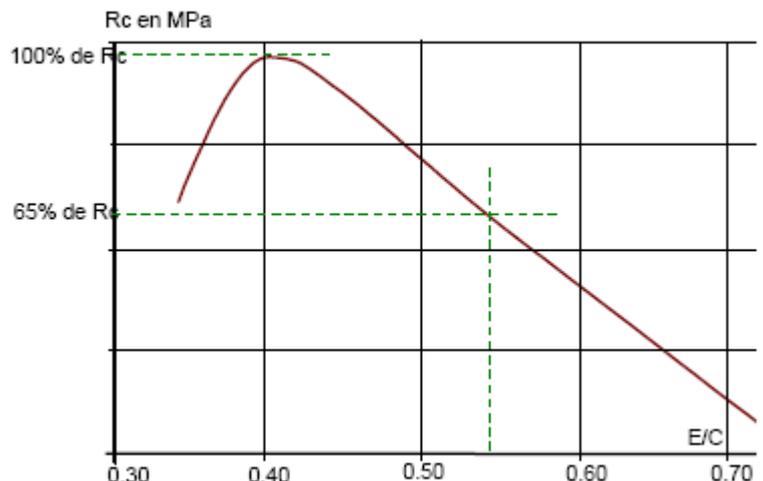


Figure 7.7 : résistance à la compression Rc sur cylindre en fonction du rapport eau/ciment (E/C)

B.3. Rapport (gravier/sable) (G/S)

- Les principales qualités des bétons en fonction de $G/S \leq 2$ sont peu influencées.
- Les appréciations concernant l'influence sur les différentes qualités des bétons sont résumées dans le tableau 7.5 récapitulant les principales qualités des bétons en fonction de leur G/S .

• Pour des raisons d'ouvrabilité, le rapport GIS ne doit pas dépasser 2,00 à 2,2.

Principales qualités	G/S élevé par rapport à G/S faible	Granularité continue par rapport à granularité discontinue
Ouvrabilité *	Un peu moins bonne si : $G/S > 2,2$	Moins bonne si : $G/S > 2,2$
Résistance à la compression	Meilleure si : $G/S > 2,2$	Légèrement supérieure
Compacité	Légèrement plus élevée si : $G/S > 2,2$	Un peu plus élevée

Tableau 7.4 : Récapitulatif des principales qualités des bétons en fonction de leur G/S .

Tableau 7.4 : Les principales qualités des bétons en fonction de leur G/S

B.4. L'influence de la vibration :

Cette influence qui favorise la compacité, est prépondérante. La résistance à la compression d'un béton croît avec sa compacité. Cette dernière ne dépasse guère 0,850 ce qui signifie qu'il reste 150 dm³ de vides remplis d'air ou d'eau dans un mètre cube de béton, bien préparé et bien vibré.

B.5. La compacité d'un béton:

Elle dépend des granulats utilisés et de la répartition granulaire d'un béton.

B.6. L'influence de la température

La chaleur accélère la prise et le durcissement des bétons. Le froid allonge la durée de la prise et peut même la stopper.

Par exemple si 10 jours de durcissement sont nécessaires à 20°C pour obtenir une résistance R, combien faudra-t-il de journées à une température moyenne de 10°C pour obtenir la même résistance:

D'après la formule de Nurse-Saul:

$$J_1 = J_0 \left(\frac{10 + t_0}{10 + t_1} \right) \quad \text{Donc} \quad J_1 \text{ jours} = 10 \left[\frac{10 + 20}{10 + 10} \right] = 15 \text{ jours.}$$

t_0 : étant la température de référence;

t_1 : étant la température rencontrée sur le chantier;

J_0 : étant le nombre de jours de référence;

J_1 : étant le nombre de jours nécessaires.

7.4. Compositions des bétons

7.4.1. Définitions

- L'étude de la composition d'un béton consiste à déterminer les quantités nécessaires en sable, gravillon, ciment et eau pour réaliser 1 m³ (1000 l) de béton mis en place.
- Presque toujours, il s'agit de rechercher deux qualités essentielles du béton :
 1. l'ouvrabilité
 2. la résistance

Mais il faudra, en fonction de l'utilisation du béton, rechercher d'autres qualités : Etanchéité, résistance au gel, parement, etc...

- La règle pratique et répandue de dosage : 350 kg de ciment, 400 l de sable et 800 l de gravillons, est très empirique car elle ne tient pas en compte:
 - de la nature des travaux;
 - des matériaux utilisés (granularité)
 - de la vibration.

d'où la nécessité d'opter pour une méthode de calcul de la composition du béton.

- Il n'existe pas une composition type, mais des méthodes de composition (**Faury, Bolomey, Valette, Deux – Gorisse** ,...). Elles sont toutes basées sur une adaptation de résultats expérimentaux.

7.4.2. Facteurs essentiels de composition

7.4.2.1. La pâte de ciment :

- Dans le béton frais, la pâte de ciment permet à la fois d'assurer la fluidité du béton et la cohésion du mélange (plasticité). Ces deux caractéristiques sont liées à la viscosité de la pâte de ciment et à sa proportion dans le mélange.
- Dans le béton durci, après la réaction d'hydratation du ciment, la pâte de ciment se transforme en un enchevêtrement de cristaux qui assure le " collage " des granulats et la résistance du béton. Cette fois, c'est la nature de la pâte qui est fondamentale (nature du ciment et quantité d'eau).

- Des expériences ont montré que :

☞ **La résistance d'un béton ne dépend que du rapport ciment/eau (C/E) et de la classe du ciment.**

- La quantité d'eau nécessaire à la réaction d'hydratation du ciment correspond à un rapport **C/E compris entre 1,5 et 2,5**. Si on réduit ce rapport, on introduit une quantité d'eau non liée assimilable à du vide. On a donc un affaiblissement de la résistance.
- **Avec un dosage en ciment C constant, l'ouvrabilité augmente quand le rapport C/E diminue.** L'augmentation de la quantité d'eau E dans le mélange diminue la viscosité de la pâte de ciment et augmente la fluidité du béton frais.

7.4.2.2. Composition granulaire :

- Il s'agit avant tout d'un problème économique : Le ciment étant le constituant le plus coûteux du béton, on a intérêt à en limiter la proportion.

- Le principe retenu est donc de déterminer une composition granulaire (rapport G/S) conduisant à un mélange laissant un minimum de vides, qui seront comblés par la pâte de ciment.
- La plupart des méthodes sont fondées sur la recherche d'une courbe granulométrique de référence conduisant à ce minimum de vides intergranulaire.

7.4.4. Exemple de composition de bétons (tableau 7.5)

Batiment d'habitation,garages et locaux annexes

a. Ouvrages en béton non armé

(dans certains cas, il est d'usage de prévoir des treillis soudés, grillages ou fibres visant à limiter les effets du retrait du béton).

	Type de béton
• Béton de propreté	1
• Dallages pour sols de garages de voitures automobiles	2
• Dallages pour sols de buanderies, salles de jeux.....	2
• Terrasses extérieures coulées sur terre-plein.....	2
• Allées de jardin pour la circulation de voitures automobiles.....	2
• Dalles préfabriquées de petites dimensions.....	3

b. Ouvrages en béton armé

	Type de béton
• Béton banché pour murs.....	3
• Longrines, semelles de fondation.....	3
• Poteaux, poutres, linteaux coulés entre coffrages.....	4
• Balcons, planchers, dalles, dalles de compression de plancher à poutrelles et hourdis.....	4
• Bassins d'agrément	4

Type de bétons	Ciments de la classe 32,5	Sable 0/5 mm		Gravillons 5/20
		humide foisonné	sec non foisonné	
Type 1	250 kg	720 l	600 l	710 l
	50 kg	145 l	120 l	140 l
Type 2	300 kg	660 l	550 l	730 l
	50 kg	110 l	90 l	120 l
Type 3	350 kg	610 l	510 l	750 l
	50 kg	90 l	75 l	105 l
Type 4	400 kg	550 l	460 l	780 l
	50 kg	70 l	60 l	95 l

Tableau 7.5 : Exemples de quelques types de béton.

7.4.4. Différentes méthodes de formulation de béton

- Méthode de Bolomey, Méthode de Fuller, Méthode Cubique, Méthode de Faury, Méthode de Joisiel, Méthode de Dreux – Gorisse, Méthode informatique : logiciel BétonlabPro du LCPC.

7.5. Différent types de bétons

1. **Bétons usuels armés ou non** : leurs résistances sont de 20 à 40 MPa.
2. **Bétons précontraints** : pour réaliser des pièces fortement sollicitées à la flexion.
3. **Bétons à Hautes Performances (BHP)** : leurs résistances sont de 60 à 100 MPa. Ils sont également plus durables, plus étanches grâce à une porosité très faible.
4. **Bétons légers** : leurs masses volumiques sont de 500 à 1800 kg/m³, ils sont destinés pour la réhabilitation, l'isolation thermique et chaque fois que le gain de poids est prépondérant pour un ouvrage.
5. **Bétons lourds** : dont les masses volumiques peuvent atteindre 6000 kg/m³ servent, entre autres, pour la protection contre les rayons radioactifs.
6. **Bétons fibrés** : ils s'agit ici de fibres en métal, verre et synthétique, ils sont destinés pour la réalisation de plaques minces ou des coques et pour améliorer la tenue à la fissuration.
7. **Bétons à caractère architectural** grâce à leurs colorations et aux nombreux traitements de surface possibles.
8. **Bétons réfractaires** : ils sont à base de ciment alumineux et s'utilisent pour résister aux températures $\geq 250^{\circ}\text{C}$ (revêtement de four).
9. **Bétons caverneux** : le béton caverneux est un mélange de gravillons sans sable, dans la proportion de 250 à 300 litres pour 50 kg de ciment. Grâce à ses vides, ce béton n'absorbe pas l'eau par capillarité. De plus, cette porosité élevée permet d'assurer une fonction de drainage.
10. **Béton de masse** : il sert à réaliser les fondations, les gros dallages, et sa résistance est recherchée par la masse, c'est-à-dire par l'épaisseur de la couche.

Chapitre 8

Le béton armé

8.1 Définition

- Le béton est un mélange dans des proportions préétablies de liant (ciment), avec des granulats (sable, gravier, pierrailles) et de l'eau.
- Le béton armé peut être défini comme l'enrobage par du béton, d'aciers disposés judicieusement. Ces aciers sont appelés **armatures**.
- On distingue les armatures longitudinales disposées suivant l'axe longitudinal de la pièce, des armatures transversales disposées dans des plans perpendiculaires à l'axe de la pièce.

8.2 Problème posé au constructeur

Il s'agit d'assurer l'équilibre de la construction sous l'effet :

- des actions des charges qui sont transmises par les éléments porteurs:
 - **actions permanentes** : poids propre de la structure (murs, poteaux, poutres, planchers.....), poids des autres éléments (couverture, cloisons, revêtements), poussée des terres,.....
 - **actions variables** : charges d'exploitation (charges concentrées ou réparties sur un plancher (meubles, personnes)), charges climatiques, action de la température
 - **actions accidentelles**: concernent les séismes, les chocs de véhicules, les chutes de blocs.
- des actions ascendantes du sol sous la fondation.

8.3 Les éléments porteurs :

Ce sont les éléments:

Horizontaux:

Exemple : les planchers qui peuvent être constitués avec:

- des poutrelles préfabriquées précontraintes;
- une dalle épaisse (18 à 25 cm d'épaisseur);
- une dalle + nervures;
- une dalle + nervures + poutres.

Verticaux ou obliques tels que:

- poteaux en béton armé.
- voiles, d'épaisseur moyenne: 18 cm, 20 cm;
- murs.

8.4. La nature des efforts dans les éléments porteurs

Prenons le cas d'une poutre (figure 8.1). La matière a tendance à s'écraser sur l'une des faces (face supérieure, par exemple) à s'étirer sur l'une des autres faces (face inférieure, par exemple).

Donc dans la poutre il y a une partie comprimée (dans notre cas, c'est la partie supérieure) et une partie tendue (dans notre cas, c'est la partie inférieure).

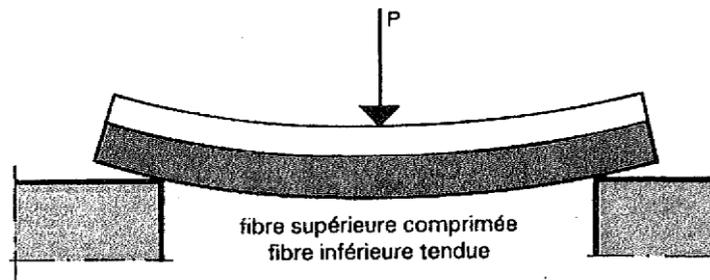


Figure 8.1 : Poutre sur appuis .

8.5. Propriétés des matériaux

BETON

- Le béton peut supporter des efforts de compression considérables, 20 à 60 MPa.
- Par contre, il résiste mal aux efforts de traction, 1,5 à 3,5 MPa.
- Dans les zones tendues, il est exposé à se rompre, aussi la règle consiste à ne pas tenir compte du béton tendu dans les calculs.

ACIER

- L'acier est aussi résistant en compression qu'en traction.
 - La charge de rupture de l'acier utilisé, le plus faible, est de l'ordre de 400 à 500 MPa.
- Nota :** Dans le cas de la compression, le béton demeure plus économique que l'acier. Les aciers sont placés dans les zones tendues.

8.6. Principe du béton armé

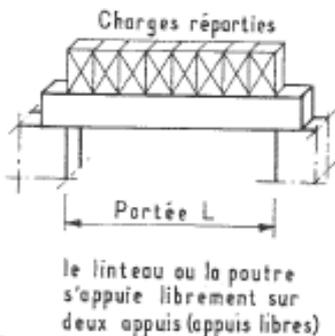
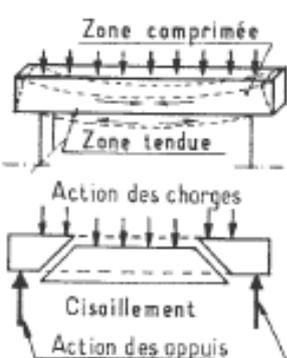
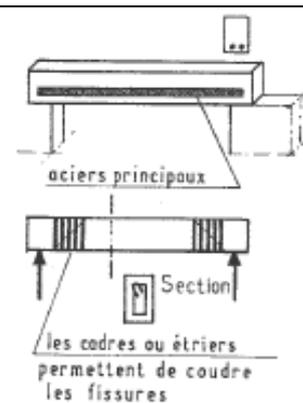
- Les principes du béton armé appliqués aux éléments de construction tels que: fondations - poteaux - poutres - planchers - balcons etc.,

Résultent:

- des caractéristiques du béton et de l'acier,
- des conditions de bon fonctionnement des ouvrages,
- des critères d'économie et de sécurité.

Critères économiques et de fonctionnement	<ul style="list-style-type: none"> - le béton équilibre surtout les efforts de compression dans les zones comprimées des ouvrages en béton armé, - l'acier équilibre surtout les efforts de traction : il sera placé dans les zones tendues.
Conditions de bon fonctionnement des ouvrages	<ul style="list-style-type: none"> - le béton et l'acier sont associés grâce à l'adhérence mutuelle des matériaux.
Critères de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> - la résistance à la traction du béton n'est pas prise en compte dans les calculs, - des coefficients de sécurité sont appliqués aux résistances possibles du béton et de l'acier.

8.7 Application

Ouvrages	Cas- d'étude	Conséquences	Position des aciers
Poutres et linteaux			
	<p><u>La poutre fléchie est soumise à la fois à:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • un effort de compression, (en haut) } dus à la flexion • un effort de traction (en bas) • <u>un cisaillement oblique dû aux actions verticales de sens contraires:</u> <ul style="list-style-type: none"> - action des appuis dirigée vers le haut } EFFORT TRANCHANT - action des charges dirigée vers le bas <p>Conclusion : Il faut: 1.des aciers principaux (armatures longitudinales) 2.des cadres ou étriers (armatures transversales) 3.des barres de montage</p> 		

8.8 Les armatures

8.8.1 Définition

- L'armature est un assemblage, par soudage ou attaches, constitué par de ronds d'acier :
 - longitudinaux appelés aciers principaux.
 - transversaux appelés cadres, étriers.
- **Exemple:** cas des poutres, linteaux (figure 8.2),

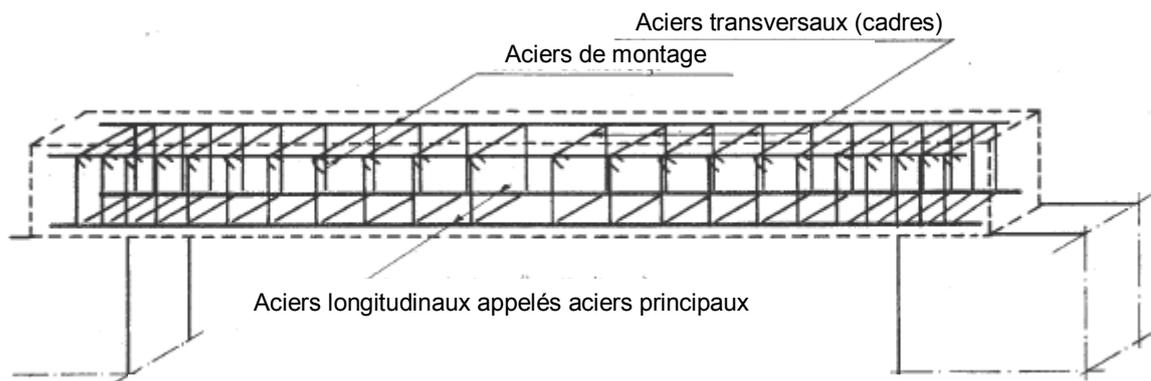


Figure 8.2 Armatures d'un linteau ou d'une poutre

8.8.2 Caractéristiques des aciers

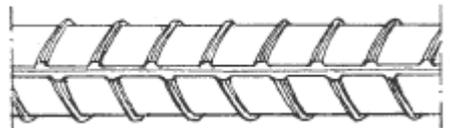
On distingue pour le béton armé en bâtiment les aciers suivant (figure 8.3):

Diamètres nominaux exprimés en millimètres

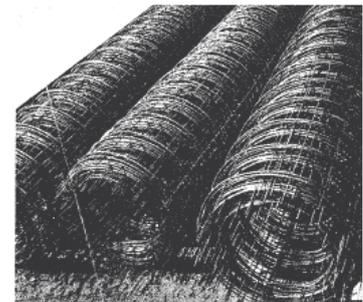
	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	7	8	9	10	12	14	16	20	25	32	40
Ronds lisses et barres H.A.							•		•		•	•	•	•	•	•	•	•
Fils tréfilés H.A.	•		•		•		•		•		•	•						
Treillis soudés	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•						



Ronds lisses (RL)



Aciers à hautes adhérence (HA)



Treillis soudés (T.S)

Figure 8.3 : Les différents types d'aciers utilisés dans les structures en béton armé .

8.8.3 Utilisation des armatures

(Voir figure 8.4)

1. Semelle continue
2. Semelle isolée
3. Poteau
4. Linteau
5. Poutre coulée en place
6. Mur
7. Chainage horizontale
8. Plancher
9. Balcon
10. Escalier
11. Corniche
12. Dallage
13. Linteau préfabriqué
14. Chainage vertical

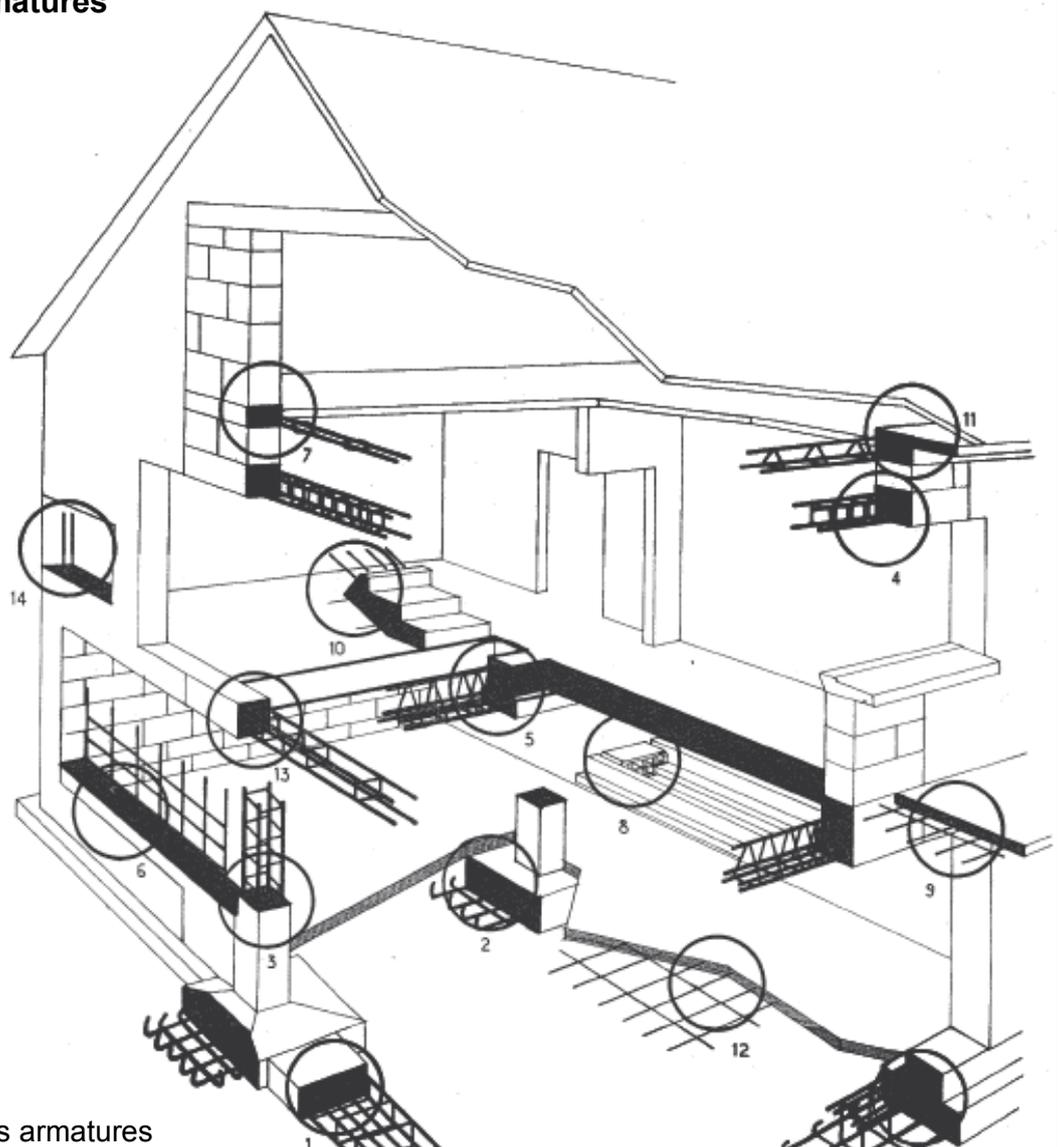


Figure 8.4 : Utilisation des armatures dans les constructions

Chapitre 9

Le béton précontraint

9.1 Définition

- Le béton précontraint est né du raisonnement suivant : le béton est aujourd'hui le matériau de construction le plus économique. Il présente une très bonne résistance à la compression, par contre, il a une très mauvaise résistance à la traction.
- Il faut donc construire en béton, mais en évitant que ce matériau soit trop tendu, et risque de se fissurer. Et pour cela, **il faut le comprimer de façon artificielle et en permanence, dans les zones où les charges extérieures développent des tractions**, de façon qu'au total le béton reste comprimé (ou assez peu tendu pour ne pas risquer de se fissurer) et donc résistant, en tous cas de charge.
- L'effort de compression volontairement développé à cet effet est appelé **l'effort de précontrainte (ou, en abrégé, la précontrainte)**. Donc notre structure est active car sollicitées par des efforts de pré-tension avant même la mise en charge.
- En 1928, son inventeur, **Eugène Freyssinet**, définissait ainsi la précontrainte.

9.2 Principe du béton précontraint

- Soit par exemple une poutre en béton armé sur deux appuis simples. Si on la soumet à une charge, elle se déforme. La section transversale, au droit de l'application de la charge se trouve comprimée à la fibre supérieure et tendue à la fibre inférieure.
- Lorsque la charge est trop forte, des fissures apparaissent à la partie inférieure de la poutre. Supprimons dans cette poutre l'armature de traction classique pour la remplacer par une gaine courbe suivant la déformée de la poutre et contenant des câbles de précontrainte. En tirant sur les câbles, on comprime la poutre. Dans la section transversale, la fibre supérieure va se tendre et la fibre inférieure se comprimer.
- Lors d'un chargement, les efforts de traction viennent alors en déduction des efforts de compression créés par la précontrainte et toutes les fibres restent comprimées (figure 9.1).
- Cette poutre préalablement comprimée supportera sans dommage les charges qui provoqueraient la rupture d'une poutre en béton armé de mêmes dimensions et portée.
- Il est possible de déterminer l'effort de précontrainte nécessaire pour que la poutre soit toujours comprimée quelles que soient les charges appliquées.

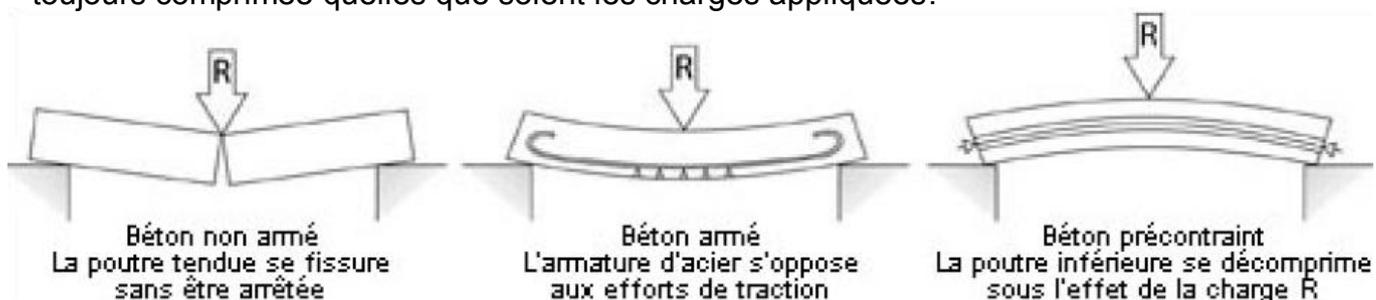


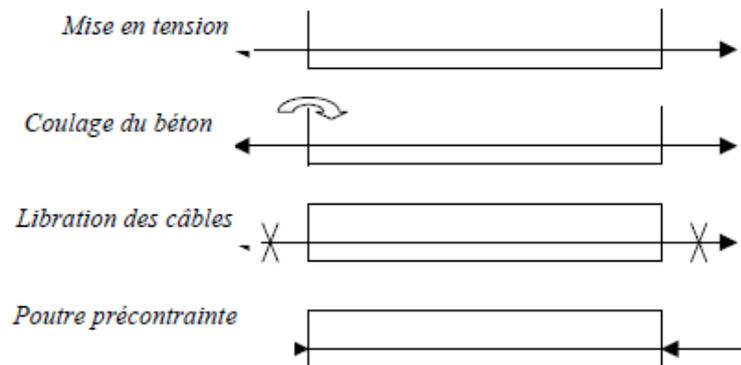
Figure 9.1 : Principe du béton précontraint**9.3 Méthodes de précontrainte**

• Pour réaliser l'opération de précontrainte, il existe deux possibilités :

1. Pré-tension: câble tendu avant le bétonnage
2. Post-tension: câble tendu après le bétonnage

9.3.1 Précontrainte par pré-tension

• Dans ce procédé, les câbles de précontrainte sont tendus entre deux massifs solidement ancrés avant le coulage du béton (figure 9.2). Cette technique est surtout employée sur les bancs de préfabrication, pour réaliser des éléments répétitifs.

**Figure 9.2** : Précontrainte par pré-tension**Etapes générales de réalisation**

- Mise en tension des câbles.
- □ Coulage du béton.
- La libération des câbles après le durcissement du béton.
- □ Par adhérence, la précontrainte de compression est transmise au béton.

D'une façon plus détaillée, la méthode de précontrainte par pré-tension suit les cycles suivants :

- nettoyage des moules ;
- mise en place d'huile de décoffrage sur les moules;
- déroulement des armatures actives et blocage aux extrémités dans des plaques ;
- mise en place des armatures passives ;
- mise en place des moules dans leur position finale;
- mise en place des déviateurs éventuels ;
- mise en tension des armatures par des vérins ;
- mise en place du béton par pont-roulant ou grue ;
- lissage de la partie supérieure ;

- vibration du béton ;
- étuvage ou chauffage du béton ;
- décoffrage ;
- dé-tension des armatures actives ;
- découpage des fils situés entre deux éléments préfabriqués ;
- manutention et stockage.

9.3.2 Précontrainte par post-tension

- Ce procédé consiste à tendre les câbles de précontrainte, après coulage et durcissement du béton, en prenant appui sur la pièce à comprimer (Figure 9.3). Cette technique est utilisée pour les ouvrages importants est, généralement, mise en ouvre sur chantier.
- La précontrainte par post tension se présente sous deux formes :
 - Une précontrainte par post-tension interne
 - Une précontrainte par post-tension externe

Étapes générales de réalisation

- Placement des gaines dans le coffrage.
- Coulage du béton.
- Après le durcissement du béton, la mise en tension des câbles.
- Le blocage se fait par différents systèmes de cales sur une zone de béton fretté.
- L'injection d'un coulis de ciment.

☞ L'injection est une opération extrêmement importante, car elle assure un double rôle:

1. La protection des armatures de précontrainte contre la corrosion.
2. L'amélioration de l'adhérence entre les armatures et les gaines.

9.4 Matériel de précontrainte

L'ensemble d'un procédé de précontrainte comprend, généralement, les éléments suivants (figure 9.3) :

a)- Dispositif d'ancrage: on distingue, principalement, deux types d'ancrage:

- Ancrage actif, situé à l'extrémité de la mise en tension.
- Ancrage passif (ancrage mort), situé à l'extrémité opposée à la mise en tension.

b)- Les coupleurs : dispositif permettant les prolongements des armatures.

c)- Matériels de mise en tension : vérins, pompes d'injection, pompe d'alimentation des vérins etc.

d)- Les accessoires : gaines, tubes d'injection etc.



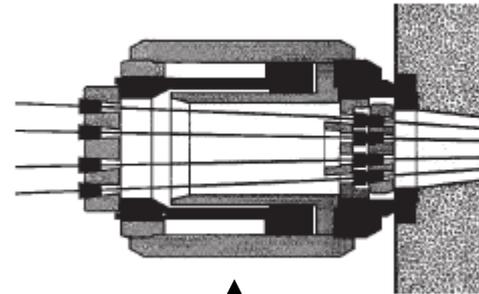
Coupleur



Ancrages actifs multi-torons



Gaines



Verin

Figure 9.3 : Materiel de précontrainte

9.5 Les domaines d'emploi de la précontrainte

9.5.1 La post-tension (figure 9.4)

- Les premières applications, qui se sont multipliées par la suite, sont les ponts à moyenne et grande portée :
- le pont haubanné de Barrios de Luna atteint une portée de 440 mètres. Plus couramment, l'allègement des âmes béton et l'emploi de la précontrainte extérieure permettent des portées variant entre 50 et 250 mètres.
- La précontrainte permet aussi la réalisation de réservoirs. Certains réservoirs à hydrocarbure atteignent 100 000 m³ ; des réservoirs d'eau et des silos, de volume plus modeste, font aussi largement appel à la précontrainte.
- Il faut encore citer les plates formes off-shore et les enceintes de réacteurs nucléaires, ainsi que l'emploi de la précontrainte extérieure dans la réparation de ponts ou de barrages.
- Dans le domaine du bâtiment, la précontrainte par post-tension, bien que moins courante, est utilisée pour des poutres de grande portée ou pour des dalles de planchers de section relativement mince par rapport à leur portée : parkings, bâtiments industriels ou commerciaux.



Le pont haubanné de Barrios de Luna. Espagne



Réservoir de gaz naturel liquéfié

Figure 9.4 : Ouvrages réalisés en béton précontraint

9.5.2 La pré-tension

- Cette technique est essentiellement utilisée pour les éléments préfabriqués standardisés, où elle se justifie par la notion de séries.
- Le bâtiment constitue le domaine d'emploi le plus courant pour ces éléments : poutres, poutrelles de planchers (Figure 9.5), prédalles, dalles alvéolées de planchers ou panneaux de bardage de grandes dimensions (10 à 15 m de longueur), pour bâtiments industriels, commerciaux ou agricoles.
- La pré-tension est également utilisée pour les poteaux de tous types (télégraphiques ou électrique clôtures, etc.) ou les traverses de chemin de fer.



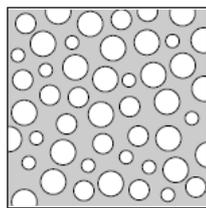
Figure 9.5 : Poutrelles précontraintes par pré-tension

Chapitre 10

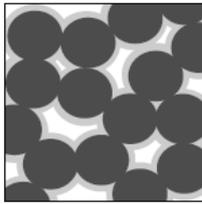
Le béton léger

10.1 Définition

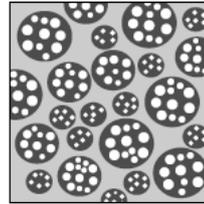
- La masse volumique des bétons fabriqués avec des granulats rigides, d'ordinaire comprise entre 2200 et 2600 kg/m³, contre 300 à 1800 kg/m³ pour les bétons légers.
- Les bétons dits légers sont obtenus par incorporation d'air. Trois types de bétons légers sont classiquement distingués selon la façon dont l'air est introduit dans le béton figure 10.1):
 1. lorsque l'air est incorporé dans la pâte de ciment, le béton est qualifié de «**béton cellulaire** »;
 2. lorsqu'il vient remplacer les granulats fins entre les gros granulats, le béton est qualifié de «**béton sans fines** » ou «**béton caverneux** »;
 3. lorsque les granulats sont eux-mêmes allégés, le béton est alors qualifié de «**béton de granulats légers** ».



Béton cellulaire



Béton caverneux



Béton de granulats légers

Figure 10.1 : Les types de bétons légers

- Les bétons légers permettent de réaliser un gain de poids pour l'ouvrage auquel ils sont destinés (béton de structure). Ils sont également utilisés pour l'isolation thermique, la conductivité variant dans le même sens que la densité.

10.2. Types des bétons légers

10.2.1 Béton de granulats légers

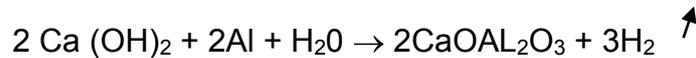
- Généralement ce béton est fabriqué avec des granulats légers naturels ou artificiels (ponce, argile, schistes et laitier expansés ou cendres volantes frittées, polystyrène expansé).
- Les bétons légers sont classés en trois classes suivant leur densités d'où trois fonctions différentes (tableau 10.1) :

Densité	Résistances à 28 jours (MPa)	Fonction
0.4 à 0.8	2 – 8	Isolation
0.8 à 1.4	8 – 20	Isolation + porteur
1.4 à 1.8	20 - 40	Porteur

Tableau 10.1 : Les classes de bétons légers selon leurs densités

10.2.2 Béton cellulaire

- Il ne s'agit pas de bétons à proprement parler mais plutôt de mortiers.
- Le mortier est en général constitué d'un mélange de ciment et d'un granulat fin (sable naturel siliceux ou sable artificiel de granulat léger). On additionne à ce mortier gâché fluide:
 - soit une matière génératrice de gaz en présence du ciment (le plus souvent de l'hydrogène). comme par exemple de la poudre d'aluminium, ce qui donne un béton-gaz, la réaction chimique étant:



– soit un produit moussant à base de savons ou de détersifs qui, en cours de malaxage, provoque une infinité de petites bulles, ce qui donne un béton mousse. Ce type de béton peut par ailleurs être fabriqué dans des centrales de béton près à l'emploi. leur utilisation allant du comblement de grands volumes du type comblement de carrières, de puits à la confection de formes isolantes sous dallage ou sous toiture par exemple.

☞ **La densité des bétons cellulaires varie, suivant les compositions, de 0,4 à 1,2 et leur conductivité thermique fonction de leur densité est comprise entre 0,16 W/m/°C pour des bétons de masse volumique de 400 kg/m³ à 0,40 W/m/°C pour une masse volumique de 1200 kg/m³.**

10.2.3 Béton caverneux

- Béton léger et très poreux en raison de la présence dans sa masse de vides dus à l'absence de sable ou d'éléments fins. Il est obtenu à partir de gros granulats (courants ou légers) humidifiés et enrobés dans une pâte de ciment, et se met en place par couches épaisses (au moins 50 cm).
- Il est utilisé comme Béton de remplissage ou pour s'opposer aux remontées capillaires.

10.3. Propriétés des bétons légers

1. Les bétons légers offrent **une densité très inférieure** à celle d'un produit classique : de 300 à 1800 kg/m³, contre 2300 kg/m³ pour un béton classique.
2. Dans la construction d'un certain nombre d'ouvrages, une réduction de poids est de nature à entraîner des économies générales. L'emploi de granulats légers permet de réaliser des bétons pour lesquels la densité peut varier de 0,5 à 2,0 mais dont la résistance en compression est d'autant plus faible que la densité est moins élevée (figure 10.2). Elle n'est que de 2 à 5 MPa pour des bétons de vermiculite de densité 0.5 en moyenne, mais elle peut atteindre 40 MPa pour des bétons d'argile ou schiste expansé de densité 1 .7 à 1 .9 réalisés avec des granulats légers de bonne qualité.
3. L'allègement des bétons est, bien entendu, leur propriété essentielle, mais il en découle un certain nombre d'autres. Le gain de poids, qui peut être plus ou moins important selon le type de béton, entraîne une diminution des sections des éléments structurels assurant la transmission des charges. La diminution de poids conduit à des économies de transport des éléments manufacturés et à des gains de productivité à la mise en oeuvre.



Bloc coffrant en béton-bois avec isolant incorporé.



Béton de polystyrène en chape isolante

Figure 10.2 Eléments réalisés en béton léger

4. La corrélation entre la masse et le coefficient de conductivité se traduit par des performances en matière d'isolation thermique, d'autant plus sensibles que la densité diminue (tableau 10.2).

Matériau	Conductivité thermique W/m² C
Béton de granulats courants	
- Béton plein (2 200 à 2 400 kg/m³)	1,75
- Béton caveux (1 700 à 2 100 kg/m³) ...	1,40
Béton de granulats légers (argile expansée)	
- Béton plein avec sable (1 400 à 1 600 kg/m³)	0,85
- Béton sans sable, avec fines (1 000 à 1 200 kg/m³)	0,46
Béton cellulaire	
- 525 à 575 kg/m³	0,20
- 425 à 475 kg/m³	0,17
- 375 à 425 kg/m³	0,16

Tableau 10.2 : les valeurs de la conductivité thermique de certains types de bétons.

5. Grâce à leur conductivité et à leur coefficient de dilatation plus faibles, les bétons légers présentent une résistance au feu meilleure que celles des bétons courants, à condition que les granulats soient d'origine minérale. A épaisseur égale, l'amélioration du degré coupe-feu est de 1/2 heure à 1 heure.

6. Du fait d'un module plus bas qui leur confère une certaine élasticité, les bétons de liège, de bois ou de polystyrène peuvent être utilisés en sous-couche de dalle flottante : ils créent une coupure efficace à la transmission des bruits de choc.

7. La structure cellulaire des bétons légers leur assure une bonne imperméabilité à l'eau, tout en favorisant les échanges de vapeur ; ce sont des matériaux résistant au gel.

10.4 Applications des bétons légers

Ces types de matériaux sont surtout employés en préfabrication en raison certaines de leurs qualités :

- **la légèreté** : diminution du poids mort, économie de main d'oeuvre, économie sur les fondations et structures portantes, réduction des coffrages et étais, manutentions plus faciles en préfabrication;

- **le pouvoir isolant** :

la même isolation thermique est donnée à 20 % près par:

- 10 cm de béton cellulaire.
- 20 cm de béton plein de granulats légers,
- 30 cm de béton caverneux.
- 60cm de béton plein classique;

- **l'aptitude à se travailler après durcissement**: certains bétons légers (bétons cellulaires, bétons de pierre ponce, de vermiculite ou perlite...) peuvent se travailler comme le bois. à la scie, au vilebrequin et supportent le clouage.

- **Bétons de structure** : pour réhabilitation de bâtiments, bâtiments neufs et ouvrages d'art.

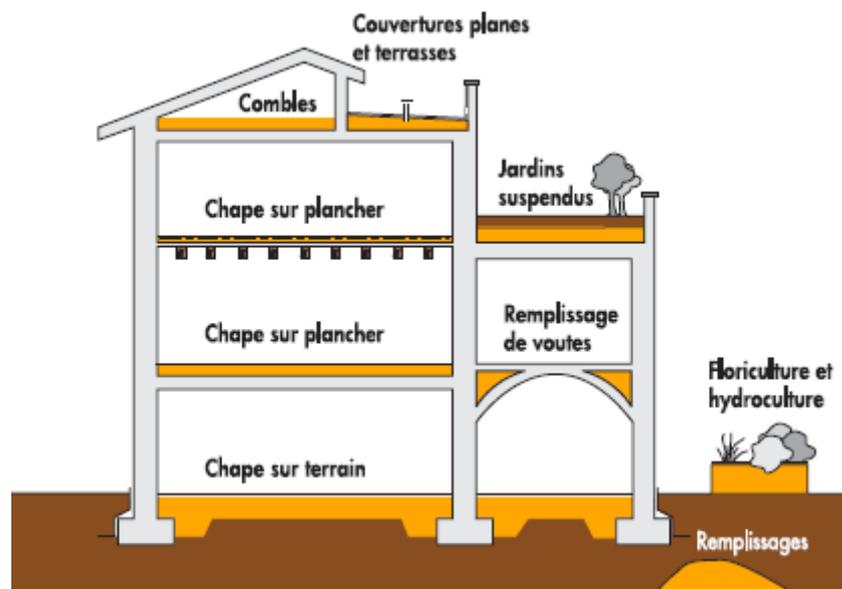


Figure 10.3 : Applications de bétons légers

Chapitre 11

Les produits céramiques

11.1. Généralités

- Les matériaux de terre cuite sont utilisés depuis plusieurs siècles dans le bâtiment. Ils se sont adaptés à l'évolution de la construction et à ses impératifs, tant dans le domaine traditionnel que dans celui dit industrialisé.
- Les caractéristiques des produits de terre cuite permettent à ceux-ci d'être employés dans toutes les parties de la construction avec efficacité. Ce sont essentiellement les briques, les tuiles, les éléments pour planchers, les conduits de fumée, les carreaux rustiques, des éléments de décoration, etc.
- Ils sont fabriqués à partir d'argiles communes devenant souvent rouges à la cuisson (sauf les argiles calcaires dont la couleur de cuisson varie du rose au jaune et au blanc).

11.2. Classification

On peut les classer selon le critère de la porosité :

- les produits poreux (se laissent rayer par l'acier) et notamment les terres cuites (briques, tuiles, bardeaux,...etc), les produits réfractaires (briques) et la faïence,
- les produits non-poreux (vitrifiés) comme les grès cérames (carreaux, tuyaux), les porcelaines et briques spéciales pour pavage.

11.3. Matières premières

- Les matières premières utilisées pour la préparation de la plupart des produits céramiques et terre cuite traditionnels sont généralement :
 1. des mélanges d'argiles (silicates d'alumine – exemple smectite, kaolinite, illite) et/ou de limons offrant la plasticité à la pâte ;
 2. du quartz, du sable, des feldspaths, du basalte, de l'andésite, du porphyre, de la chamotte, de la calcite, du schiste pour fournir la structure à la céramique (squelette), pour réduire la température de fusion lors de la cuisson (fondant) et réduire la plasticité de la pâte ;
 3. de l'eau pour adapter la plasticité de la pâte.
- Pour certains produits réfractaires, l'argile, laquelle joue un rôle de liant, est mélangée à des minéraux possédant des propriétés de résistance à la cuisson. Ces minéraux sont entre autres la bauxite calcinée, la cyanite, la corindon, du carbure de silicium et du graphite.
- Pour la production de produits poreux et de grandes capacités isolantes, des matières organiques (sciures de bois, fibres de cellulose, polystyrène,...) sont ajoutées dans la pâte.

11.4. Fabrication

• Bien que les produits céramiques et les produits traditionnels en terre cuite soient multiples, les opérations de fabrication sont similaires et se succèdent dans un ordre identique.
 • Ainsi, le schéma principal de fabrication d'un produit céramique ou en terre cuite comprend un nombre limité d'opérations présentées ci-après (figure 11.1) :

1. L'extraction des matières premières (argiles et limons)
2. La préparation de l'argile
3. Le façonnage
4. Le séchage
5. La cuisson

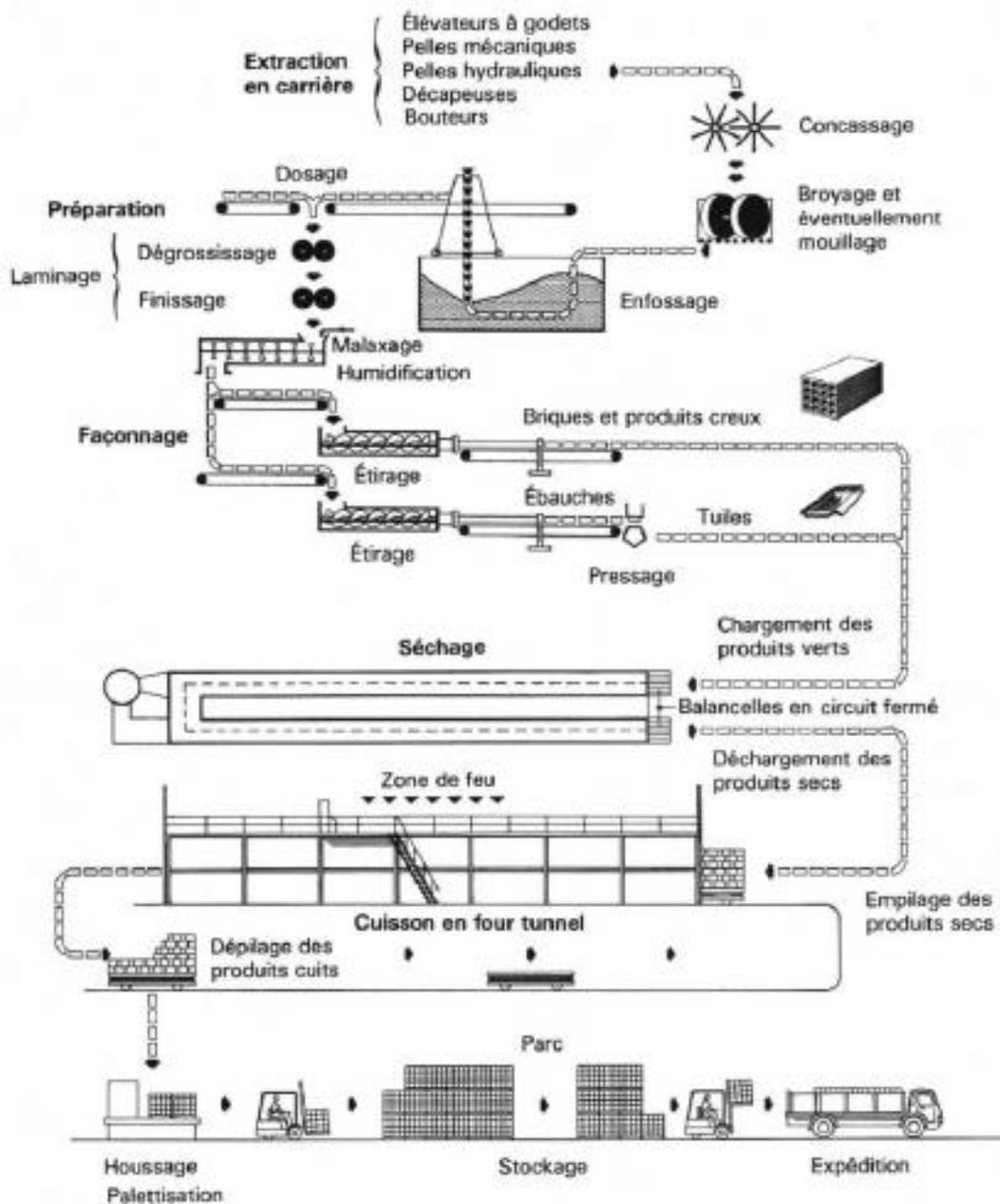


Figure 11.1 : le schéma principal de fabrication d'un produit céramique ou en terre cuite

1. L'extraction des matières premières

- L'exploitation se fait le plus souvent à ciel ouvert, les forts tonnages de terre employés nécessitent l'installation de l'usine dans la mesure du possible à proximité de la carrière.
- L'extraction suit généralement le processus suivant :
 - enlèvement de la découverte au bulldozer, à la pelle chargeuse mécanique et même à la décapeuse,
 - extraction de l'argile à l'aide d'une pelle mécanique (argile sèche) ou l'excavateur à godets ou au marteau piqueur ou encore les explosifs quand l'argile est trop dure,
 - transport de l'argile à l'usine suivant la distance et la topographie des lieux : wagonnets, téléphérique, camions, bandes transporteuses.

2. La préparation de l'argile

- Le but visé est d'obtenir une pâte plastique et homogène ou une poudre adéquate suivant le produit à façonner. Cela nécessite diverses opérations qui diffèrent quelque peu selon la terre dont on dispose et le degré de plasticité de la pâte désirée (molle, demi-ferme, ferme).

3. Le façonnage

- Une fois la pâte convenablement préparée, il faut lui donner les formes désirées, c'est à dire celles des produits finis utilisés dans la construction (figure 11.2). Cette opération s'appelle façonnage et est réalisée par deux grands types de machines :
 - les presses mécaniques ou hydrauliques,
 - les filières (deux rouleaux lamineurs débitant une nappe de pâte qu'on découpe à la longueur désirée).

Quelques types de briques de terre cuite :

- ***Briques pleines:***

Sont soit directement moulées à la presse ou à la filière. Celles passées à la filière sont moins poreuses, plus résistantes et plus régulières,

- ***Briques de parement:***

Sont façonnées par double pressage . En effet, après avoir obtenu des briques pleines à la presse ou à la filière, on les laisse sécher légèrement puis on les repasse à la presse. Ainsi leur compacité est plus grande, leurs arrêtes vives et elles même plus calibrées,

- ***Briques perforées:***

Pour alléger le produit fini et faciliter le séchage, on incorpore à la filière des noyaux qui réalisent diverses perforations dans le pain de la pâte d'argile pour obtenir ainsi des produits perforés de dimensions variables.

- ***Briques creuses:***

On comprime la pâte dans une chambre avant de la passer dans une filière; les machines employées (étireuses ou mouleuses) utilisent divers procédés pour comprimer l'argile : palettes, piston, cylindre cannelés, hélices.

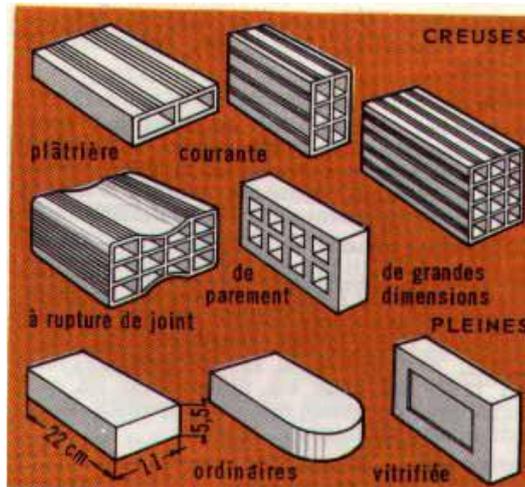


Figure 11.2 : Différent modèles de briques

• Tuiles:

Leur façonnage se fait :

- en pâte molle pour tuiles plates et canal,
- en pâte ferme pour tuiles à emboîtement.

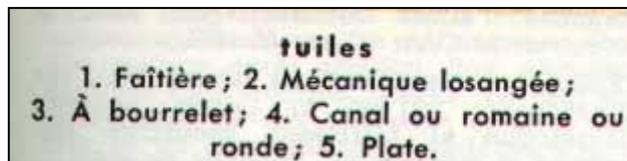
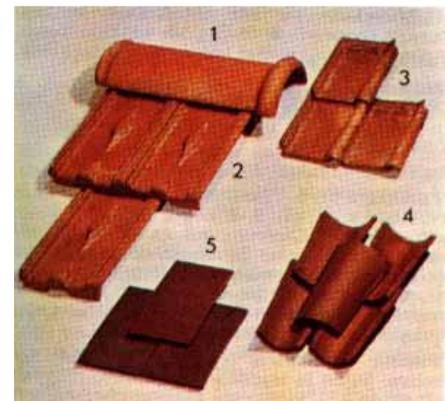


Figure 11.3 : Différentes formes de tuiles

4. Séchage (figure 11.4):

- La préparation de la pâte demandait la présence de l'eau pour la rendre facile au façonnage. Cette eau est à éliminer une fois le produit ayant pris sa forme. Le séchage a pour but d'éliminer lentement l'eau de façonnage sans déformer le produit et permettre sa manutention et son empilement dans le four.
- Cette opération est délicate car il faut interrompre le séchage au-dessous de la limite de tension que peut supporter la pâte (W_p); cette limite varie avec la nature de l'argile et la cohésion de la pâte, d'où les difficultés pour assurer un séchage homogène.
- Il y a deux procédés de séchage :

Séchage naturel:

- Il se pratique par exposition des produits dans des hangars légers à l'air libre, ceci demande de grandes aires de dessiccation et une quantité importante de main-d'oeuvre. Il est très long à réaliser et est très irrégulier. Il est actuellement abandonné.

Séchage artificiel :

- S'effectue dans des installations permettant d'assurer à la fois un chauffage progressif et une ventilation régulière.

- Le séchage est rationnel grâce au conditionnement de l'air utilisé, à l'évaporation et au réglage de l'hygrométrie de l'air et de la ventilation.

- Les installations dans lesquelles il se pratique :

- Séchoir compartimenté en chambres où la circulation longitudinale de l'air se fait en sens inverse de l'entrée des produits. L'opération dure de un à cinq jours suivant les argiles,

- Séchoir tunnel où circule un train de wagonnets portant les produits à sécher, dans le sens inverse de l'air chaud et sec récupéré des fours. Le séchage dure de six heures à trois jours. Dans les deux cas, on peut réduire notablement la durée de séchage par un brassage énergique de l'air au moyen de puissants ventilateurs (12 à 48 heures).

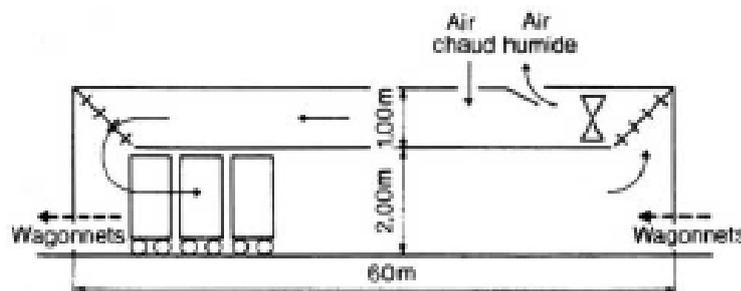


Figure 11.4 : Séchage des produits céramiques

5. La cuisson (figure 1.5)

- La cuisson permet de consolider thermiquement une céramique en un corps dense composé de grains fins et uniformes. On associe régulièrement la cuisson à une agglomération ou une densification des particules de la céramique.

- Une cuisson conventionnelle est accomplie à environ deux tiers de la température de fusion des matériaux à pression atmosphérique. Les températures de cuisson sont comprises en générale entre 800 et 1500°C.

- Voici les températures types de cuisson pour différentes production de céramique et de produits en terre.

Produits céramiques	Intervalles de températures
----------------------------	------------------------------------

- Briques de maçonnerie :	1.000°C à 1250°C
- Briques de pavage :	1.050°C à 1200°C
- Briques poreuses :	900°C à 1000°C
- Tuiles :	980°C à 1100°C
- Faïences :	1150°C à 1.250°C
- Carreaux céramiques :	1150°C à 1250°C
- Porcelaines :	1150°C à 1250°C
- Grains d'argile expanses:	1050°C à 1150°C
- Porcelaines électriques:	1300°C à 1400°C

- La cuisson des produits céramiques s'effectue selon trois stades : montée en température, palier et refroidissement.
- Elle est assurée par deux grandes familles de fours : les fours intermittents et les fours continus ou fours tunnel.

• Fours intermittents

Les fours à feu intermittent ou fours intermittents sont utilisés dans le cas de productions spéciales de petites séries. Ce sont des appareils dans lesquels l'ensemble four/produit subit un cycle thermique complet : chauffage et refroidissement.

• Fours continus ou fours tunnel

Les fours tunnels sont apparus dans la seconde moitié du XXème siècle et permettent la production massive de pièces en céramique (briques, tuiles, cuvettes, hourdis, ...).

Dans ces fours, les produits à cuire sont empilés sur des wagonnets qui traversent lentement les 3 zones : échauffement, cuisson et refroidissement.

Les brûleurs jet ou à flamme courte sont installés sur les côtés du four avec une densité plus importante en zone de cuisson.

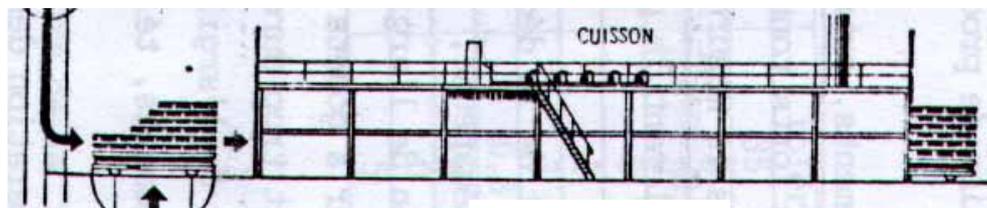


Figure 11.5: La cuisson

6. Emailage

Pour imperméabiliser les produits poreux (tuiles, briques, etc.), on pratique une deuxième cuisson qui vitrifie la glaçure (produit de traitement superficiel), produit projeté au pistolet ou par trempage dans le bain d'émail.

7. Vernissage ou flamage

Il se fait surtout sur les tuyaux de grès. On projette du sel marin dans le four, le sel se volatilise à 800 °C; ses vapeurs se condensent à la surface des produits et se décomposent vers 1200 °C pour former avec la silice un vernis (silicate de soude).

8. Engobage

Consiste à recouvrir la face vue du produit (tuile, brique de parement,... etc), d'une mince couche de coulis d'argile contenant le colorant voulu. L'opération se pratique par pulvérisation, après le séchage. Il existe des engobeurs automatiques. Après cuisson, l'engobe prend un aspect mat, alors que l'émaillage rend le produit brillant.

9. Triage et stockage

Après élimination des produits non vendables (produits voilés, fendus, incuits), les éléments subissent des contrôles :

- de qualité : l'aspect et la couleur,
- de calibrage : afin de les classer en plusieurs choix selon la destination.

Leur stockage se fait en piles de produits de même choix en nombre déterminé pour faciliter le comptage et de plus en plus sur palettes en bois en plein air ou sous hangars. On utilise des chariots élévateurs pour l'empilage et le chargement sur wagon ou camion.

11.5. Les avantages et les inconvénients des briques de construction

Les avantages

En effet la brique peut servir :

1. Comme élément:
 - a. Porteur : Rc pour les briques pleines 6 à 35 MPa
 - b. De remplissage: légèreté des briques creuses
 - c. De parement : effet décoratif
 - d. De cloison: grand format et faible épaisseur
2. Comme élément insonore
3. Comme isolant thermique
4. Pour réduire les charges
5. Pour faire obstacle à la montée de l'humidité

Les inconvénients

1. La fragilité
2. Perméable aux gaz

Chapitre 12

Les métaux ferreux

12.1 Généralités

- Le fer a fourni aux hommes dès la préhistoire ustensiles et outils, mais n'a connu son apogée qu'au siècle avant dernier, qui fut marqué par des constructions tel que la Tour Eiffel.
- Malgré l'apparition du béton, fer, fonte et acier demeurent des matériaux modernes de la construction.
- Nous trouvons ces matériaux :

1. Sous forme de matériaux ouvrés :

- ossatures métalliques enrobées de béton: poutrelles diverses;
- barres d'aciers pour armé le béton : béton armé, béton précontraint;
- menuiserie métalliques, persiennes;
- tuyaux et plaque de fonte, tuyaux d'acier pour canalisations;
- serrurerie de fer forgé;
- ferrures diverses, clous, feuillards, etc.

2. Sous forme d'outillage et de matériel de chantier :

- petit outillage en acier dur;
- pelles, pioches, brouettes, échafaudages, coffrages;
- gros matériel : grues, bétonnières, engins de terrassements, etc.

- En raison de son altérabilité et sa faible résistance mécanique, le fer n'est plus utilisé industriellement.
- Les métaux les plus utilisés dans la construction sont **la fonte et l'acier** puisqu'ils présentent les **avantages** suivants : haute résistance, plasticité, conductibilité thermique élevée, assemblage par soudage. En revanche, ces matériaux présentent aussi des **inconvenients** à savoir : corrosion en présence d'eau et déformation sensible avec l'augmentation de la température.

12.2 Minerais

- Le fer n'existe pas à l'état pur : il faut traiter les minerais extraits du sol et il sont très variés.
- Ces minerais sont un mélange naturel :
 - ☞ d'oxydes de fer :
 - magnétite Fe_3O_4 ,
 - hématite Fe_2O_3 ,
 - hématite brune $2 \text{Fe}_2\text{O}_3, 3 \text{H}_2\text{O}$,
 - Sidérose FeCO_3 .
 - ☞ la gangue : partie minérale sous forme de silice, d'alumine, de calcaire, ...etc.

12.3 Classification des métaux ferreux

Selon la teneur en carbone, les métaux ferreux se subdivisent en deux groupes :

1. **les fontes** : le pourcentage de carbone est compris entre 1.7 % et 6.67 %
2. **les aciers** : le pourcentage de carbone < 1.7 %

12.4 La fonte

- Ce métal est obtenu à partir de matières premières naturelles qui sont les minerais de fer. Les fontes sont constituées par un métal de dureté variable, de couleur blanche, truitée ou grise, suivant la teneur de carbone qui fait varier les propriétés des fontes.
- Leur grande coulabilité permet d'obtenir des pièces de fonderie aux formes complexes. Le pourcentage élevé de carbone (entre 2 et 4%) rend les pièces assez fragiles, et les bruts sont inadaptés aux déformations à froid (forgeage, laminage,...) et difficilement soudables.

Processus d'élaboration :

- L'élaboration de la fonte se fait dans le haut-Fourneau (figure 12.1 et figure 12.2), la charge introduite dans le gueulard se compose de minerai de fer, de coke métallurgique et d'un fondant.
- Sous l'action de leur propre poids, ils descendent peu à peu en se réchauffant jusqu'à la fusion. Le métal fondu composé de la fonte et du laitier s'écoule dans le creuset. Par suite d'une différence sensible entre les masses spécifiques de la fonte et du laitier; ce dernier s'accumule à la surface de la fonte, il est évacué à travers le trou de coulée du laitier situé plus haut que celui de la fonte.

-

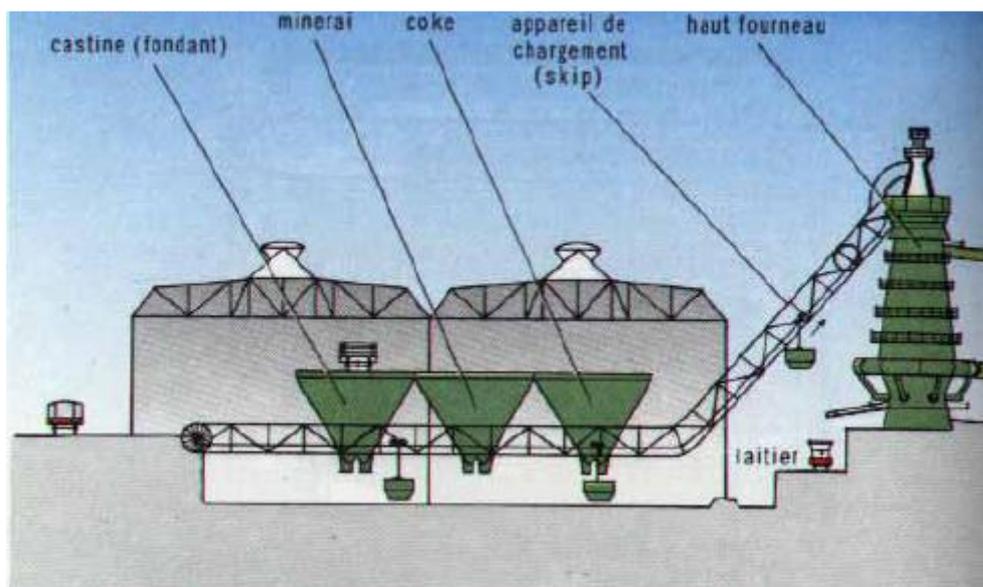


Figure 11.5: Installation d'ensemble d'un haut fourneau

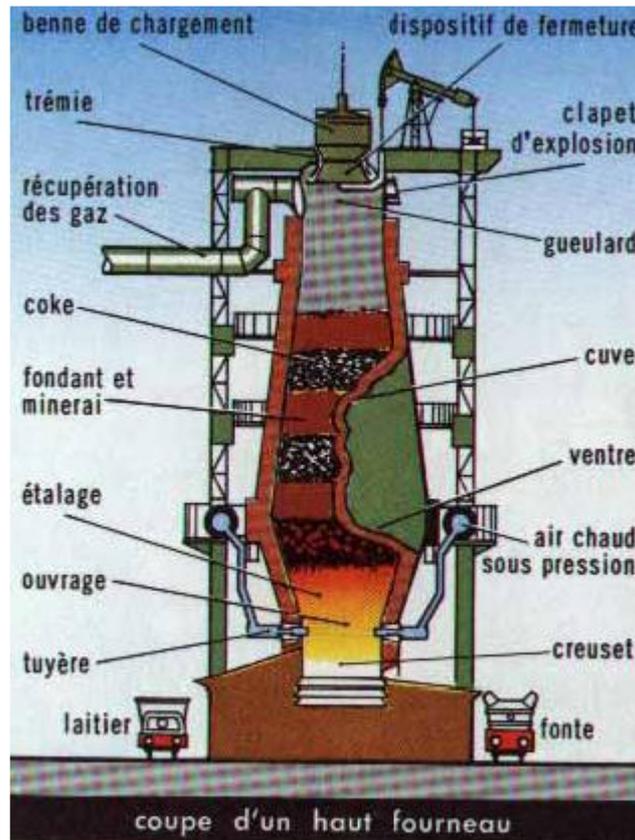


Figure 12.2: Coupe d'un haut fourneau

- La fonte du haut-fourneau est divisée suivant la destination en trois groupes : Fonte d'affinage, Fonte de moulage, Alliage ferrométallique.
- Plus de 80% de la production totale est composée de la fonte blanche d'affinage, essentiellement employée pour la fabrication de l'acier (le fer est à l'état de Cémentite Fe_3C).
- La fonte de moulage grise est employée pour l'obtention de pièces comme les radiateurs de chauffage, des plaques de cheminées,....
- Les alliages ferro-métalliques et la fonte de moulage constituent près de 20%.
- Les alliages ferro-métalliques qui contiennent un taux important de silicium et de manganèse, ils sont utilisés pour améliorer la qualité de l'acier dans des alliages spécifiques.

Utilisations :

- La fonte grise trouve essentiellement son emploi dans la construction, spécialement pour la fabrication des pièces travaillant à la compression (gabots, poteaux); ainsi que pour les produits sanitaires (tubes, radiateurs de chauffage) (figure 12. 3).
- Le laitier de haut-fourneau est une matière très utilisée dans l'industrie des matériaux de construction (M.D.C) : liants, pierres artificielles, matériaux d'isolation thermique (pierre ponce de laitier, laine de laitier).

- Le gaz du gueulard de haut-fourneau est employé en qualité de combustible pour l'usine métallurgique.
- Les alliages ferro-métalliques sont utilisés comme additions dans la production de l'acier pour améliorer sa qualité.

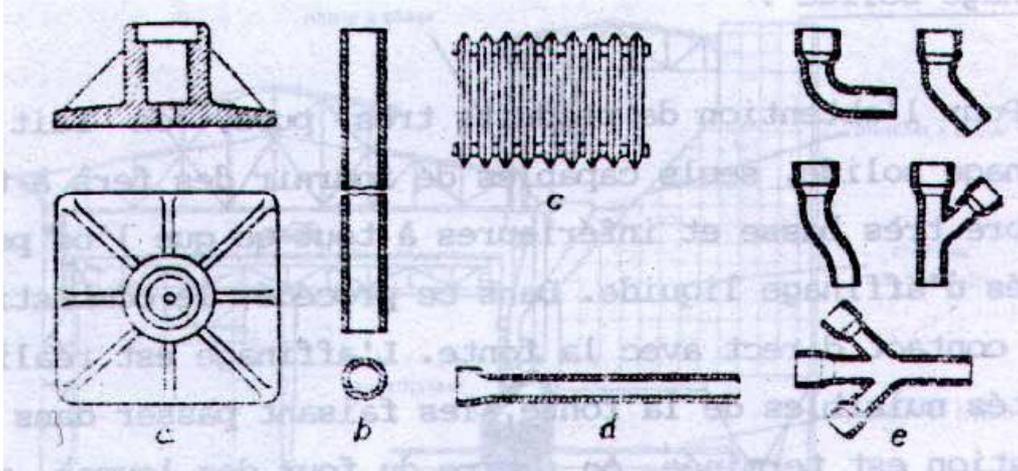


Figure 12.3: Eléments de construction en fonte.

- a- semelle d'appui des poteaux,
- b- poteaux,
- c- radiateurs de chauffage,
- d- tuyaux,
- e- pièces de raccord pour les tubes

12.5 L'acier

Elaboration :

- L'acier (% C < 1,8) est obtenu en décarburant la fonte (% C = 2÷4), et éliminant le plus possible le soufre et le phosphore tout en modifiant la teneur des autres éléments (Si, Mn).
- Les procédés pratiques d'élaboration de l'acier sont :
 - l'affinage liquide, qui fournit la quasi-totalité de l'acier employé, le métal restant liquide à la fin de l'opération,
 - l'affinage solide, qui donne un produit à l'état pâteux à la fin de l'opération.

1. Affinage liquide :

Affinage par l'air aux convertisseurs Bessmer et Thomas

- La fonte liquide arrivant du mélangeur est versée dans le convertisseur, à travers lequel on souffle un intense courant d'air qui brûle les impuretés de la fonte. Cette combustion dégage en même temps la chaleur nécessaire pour élever la température du bain depuis celle de la fonte en fusion (1200 °C) jusqu'à celle de l'acier (1600 °C).

- Le convertisseur Thomas diffère de Bessmer par son revêtement réfractaire, qui est basique (chaux) au lieu d'être acide comme dans le Bessmer (silice). Le procédé acide ou Bessmer, permet de traiter les fontes non phosphoreuses riches en silice (1,5 à 2%). Le procédé basique ou Thomas, permet de traiter les fontes phosphoreuses (1,7 à 2%) avec peu de silice (0,4 à 0,6%). La durée du traitement varie entre 15 et 30 minutes.

Affinage au four Electrique

- Ce procédé (figure 12.4) permet d'obtenir un affinage très poussé du métal, il est réservé à l'élaboration d'acier de qualité.
- Le chauffage est assuré par un arc électrique jaillissant entre des électrodes de carbone et les matières placées dans le four.
- Ce procédé utilise à côté de la fonte liquide, des déchets de métallurgie appelés riblons.

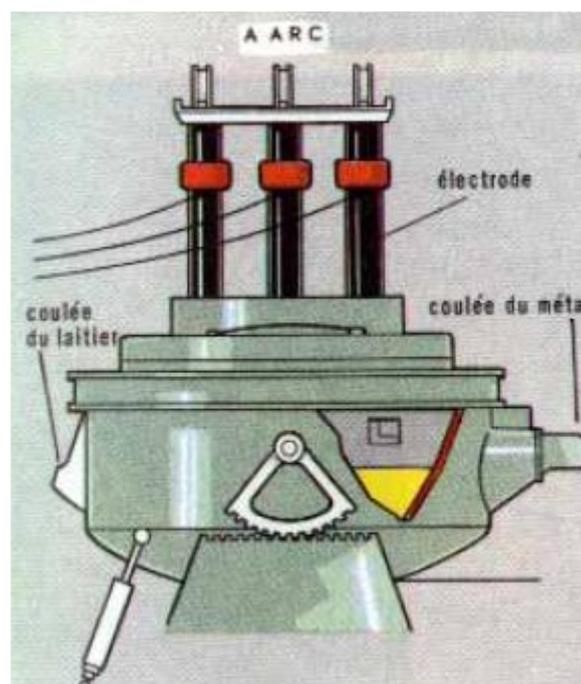


Figure 12.4: Four électrique

2. Affinage solide :

- Capables de fournir des fers à teneur en soufre et phosphore très basse et inférieures à tout ce que l'on peut obtenir par les procédés d'affinage liquide.
- Dans ce procédé, le combustible (charbon de bois) est en contact direct avec la fonte. L'affinage est réalisée par oxydation des impuretés nuisibles de la fonte, les faisant passer dans le laitier.
- Lorsque l'opération est terminée, on retire du four des loupes spongieuses de métal contenant de nombreuses scories. Ces loupes sont singlées pour éliminer le maximum de scories.

Classification des aciers selon leur composition :

- D'après la composition chimique, les aciers sont divisés en acier au carbone et aciers alliés.

Acier au carbone

- contiennent du carbone en proportion croissante, du magnésium en proportion supérieure au carbone et des traces de phosphore de silicium et de soufre.

Acier alliés

- Sa composition est variable suivant l'emploi. Les éléments alliés sont en proportion variant généralement entre 0 et 5% (tableau 12.1).

Éléments alliés	Ratio (%)	Observations
carbone	0,2 ÷ 0,7	
Magnésium	0,1 ÷ 0,7 2 ÷ 4 (aciers spéciaux)	ressorts tôles de transfo.
Magnésium	0,3 ÷ 0,8 12 ÷ 14 (aciers très durs)	voies ferrées
S, P, Cu, Ni, Cr, V, Molybdène	< 0,1	---

Tableau 12.1: Composition des aciers alliés

- Les propriétés mécaniques des aciers au carbone sont moindres que les aciers alliés (tableau 12.2).

Nature de l'acier	Résistance à la traction (MPa)	Allongement (%)
Acier de carbone	400-900	5-30
Acier allié	700-1000	9-13

Tableau 12.2: Les propriétés mécaniques des aciers au carbone et les aciers alliés**Utilisation :**

- L'acier est transformé après sa production, en éléments de natures variées, nous citons :
 - différents profilés généralement utilisés dans la construction métallique, la voie ferrée, les palplanches,...etc (figure 12.5),
 - armatures pour béton armé et béton précontraint : lisse, ondulé, treillis, ...etc (figure 12.6).

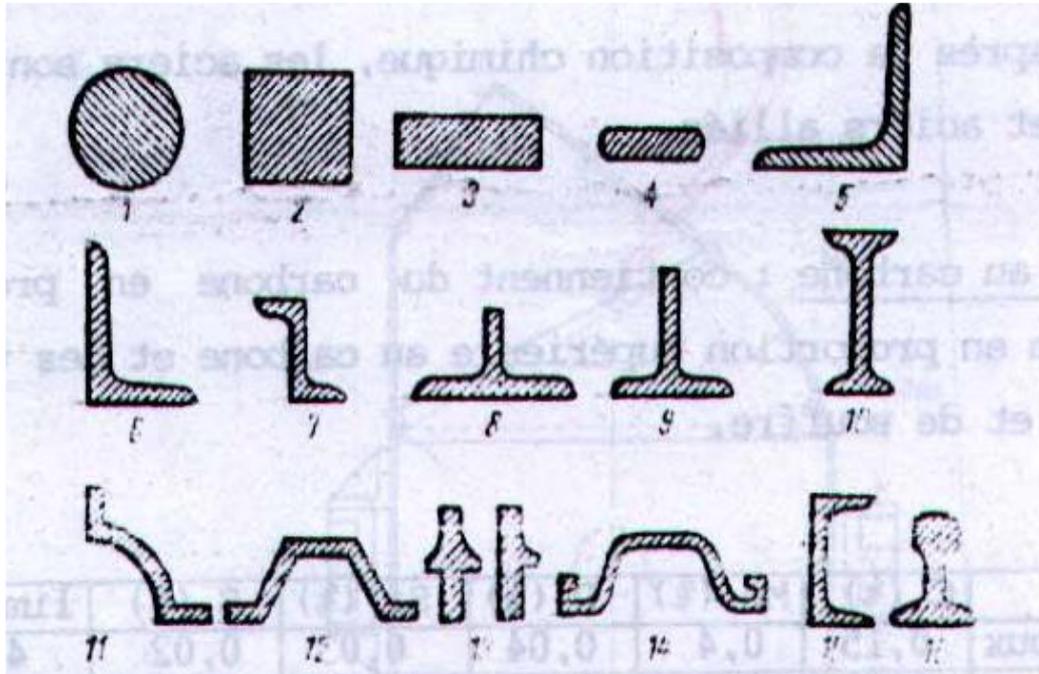


Figure 12.5: différents profilés en acier : 1- rond, 2- carré, 3- plat, 4- barres, 5- cornières: égales, 6- inégales, 7- profils: en Z, 8 & 9- en T, 10- en double T, 11- de colonne, 12- d'auge, 13- de fenêtre, 14- de palplanche, 15- en U, 16- rail.

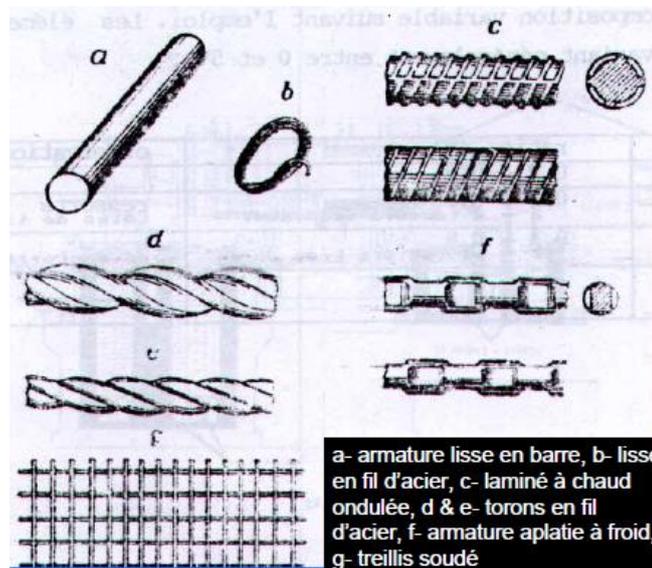


Figure 12.6: Acier pour armatures pour béton armé et béton précontraint.

- La transformation est obtenue par voie d'étirage, la tige passe au travers d'un trou conique et se trouve sertie. La traction de la tige est effectuée avec des efforts supérieurs à la limite de fluidité de l'acier et la tige s'allonge.
- Quand aux armatures, on procède à une torsion à froid pour les onduler; cette torsion se fait autour de leurs axes longitudinaux.

- L'acier riche en carbone trouve son utilisation non seulement dans la marine mais aussi dans les ouvrages de navigation (écluses, barrages). Contrairement à la fonte, il travaille à la traction et aux chocs (engrenages, matériel de dragage, godets, ...etc).

12.6 Propriétés générales des métaux ferreux

1. **La ténacité** : résistance opposée aux déformations (traction, compression, flexion)
2. **L'élasticité** : faculté de reprendre sensiblement la forme primitive après déformation passagère
3. **la dureté** : résistance au frottement, à l'usinage (en relation avec la ténacité).
4. **La fragilité** : propriété de ne pas résister au choc : acier trempé, la fonte.
5. **La résilience** : l'inverse de fragilité, c'est-à-dire la résistance au choc.
6. **La malléabilité** : facilité de déformation au marteau, à chaud, à froid, décroît avec la teneur en C.
7. **La durabilité** : faculté de pouvoir être étiré en fil, barre, lames, etc.
8. **La fusibilité**: propriété de fusibilité .Elle croit avec la teneur en C – Intérêt pour fonderie.

Chapitre 13

Les métaux non ferreux

13.1 Généralités

- Un matériau métallique est dit non ferreux quand le fer ne constitue pas un élément important dans sa composition.
- Il existe un grand nombre de métaux dont l'élément principal n'est pas le fer, mais seulement quelques-uns sont employés dans des applications techniques. Les métaux non ferreux ont les propriétés communes de ne pas être attirés par un aimant et de résister à la corrosion.
- Les métaux non ferreux ont pris une place importante dans le bâtiment comme élément non porteurs ou autoportants.
- Il s'agit des métaux usuels suivant :
 - L'aluminium
 - Le cuivre
 - Le zinc
 - Le plomb

13.2 L'aluminium

13.2.1 Procédé de transformation

- La transformation de l'aluminium s'effectue en deux étapes principales :
 1. fabrication de l'alumine;
 2. transformation de l'aluminium par électrolyse.
- La fabrication de l'alumine se fait à partir d'un minerai appelé bauxite. On concasse le minerai et on le sèche à 700 °C, puis on additionne de la soude caustique et on mélange le tout. Plusieurs réactions chimiques ont lieu avant et après la décantation et la dilution du mélange. On procède ensuite à la filtration, au lavage, puis à la calcination à 1300 °C, ce qui, par réaction chimique, donne l'alumine.
- La transformation de l'alumine se compare à celle des aciers dans le four à arcs électriques. L'alumine fondue à haute température (1000 °C) par le courant des électrodes est décomposée en aluminium et en oxygène. L'oxygène est consommé par les anodes et dégage du monoxyde de carbone (CO). Finalement, on recueille l'aluminium périodiquement pour en faire des lingots ou des pièces directement moulées.

13.2.2 Propriétés générales

- L'aluminium est un métal blanc tirant légèrement sur le bleu, dont on obtient facilement un beau fini poli.
- Il est léger (trois fois plus que le fer) et très malléable, sa densité (à 20°C) : $2,7 \text{ g/cm}^3$.
- L'aluminium vient au second rang des métaux les plus employés après l'acier. Il est robuste, facile à usiner, souvent économique.
- Il résiste à la corrosion. Tout comme l'acier inoxydable, dès l'instant où l'aluminium est exposé à l'air, sa surface se recouvre d'une pellicule transparente qui le protège contre toute forme de corrosion.
- L'aluminium n'est pas magnétique, il est bon conducteur de chaleur et d'électricité.
- Température de fusion : 660°C.
- Point d'ébullition : 2060°C.
- Chaleur spécifique :
 - ◆ A 20°C : 0,214 cal/g°C
 - ◆ A 100°C : 0,223 cal/g°C
 - ◆ A 500°C : 0,266 cal/g°C
- Conductibilité thermique : (c'est un excellent conducteur de chaleur)
 - ◆ A 0°C : 0,50 cal/cm.s°C.
 - ◆ A 100°C : 0,51 cal/cm.s°C.
 - ◆ A 200°C : 0,52 cal/cm.s°C.
- Résistivité à l'état pur $2,63.10^{-8} \Omega.m$.
- Allongement linéaire : 20 à 100°C : $24.10^{-6} /^\circ\text{C}$ et jusqu'à 600°C : $28,5.10^{-6} /^\circ\text{C}$.
- Conductibilité électrique : (65% de celle du cuivre pour l'aluminium pur à 99,5 %). La conductibilité électrique de l'aluminium diminue lorsque les impuretés augmentent.
- L'aluminium pur est très bien déformable à froid et à chaud, il est donc très ductile.
- Les propriétés mécaniques de l'aluminium (99,6 %) coulé sont :
 - ◆ R (résistance à la traction) = 70 à 100 N/mm².
 - ◆ E (module d'élasticité) = 67500 N/mm².

13.2.3 Formes marchandes des produits finis (figure 13.1)

- l'aluminium laminé en feuilles (tôles et bandes)



Tôle



Bande



Profilés



Tubes en recuit



Les complexes
bitume-aluminium

Figure 13.1: Formes marchandes des produits finis en aluminium.

13.3 Le cuivre

- Le cuivre n'est plus présent à l'état natif. Il est exploité à partir de minerai sulfurés (80% de la production mondiale) ou de minerai oxydé.
- A la surface du globe, les minerais de cuivre se présentent généralement sous deux formes :
 - Les minerais sulfurés: la chalcoppyrite CuFeS_2 , la chalcosine Cu_2S , la covelline CuS , la bornite Cu_5FeS_4 .
 - Les minerais oxides: malachite $\text{Cu}_2\text{CO}_3 (\text{OH})_2$, azurite $\text{Cu}_3 (\text{CO}_3)_2 (\text{OH})_2$, cuprite Cu_2O (rouge), mélaconite CuO (noir), diophtase $\text{CuO}_3 \text{H}_2\text{O}$.
- Le type de minerai définit le processus à suivre pour l'obtention de cuivre pur :
 - Pyrométallurgie pour les minerais sulfurés
 - Hydrométallurgie pour les minerais oxydés
- La teneur en cuivre des minerais exploités peut être faible, inférieure à 1%. Ils sont exploités à ciel ouvert ou en galeries souterraines et sont concentrés sur place

13.3.1 Propriétés du cuivre

- Apparence : de couleur jaune rouge
- Masse volumique : $8,92 \text{ Kg/dm}^3$
- Point de fusion : 1084°C
- Coefficient de dilatation : $1,7\text{mm/ m pour } 100^\circ\text{C}$
- Résistivité à 20°C $\rho = 1,724 \text{ microhm.cm}$ (Cu électrolytique)
- Le meilleur conducteur de la chaleur et de l'électricité après l'argent.
- $E = 120\,000 \text{ Mpa}$ (Cu/a1)
- Résistance à la traction : 230 Mpa à l'état laminé recuit, 450 Mpa à l'état écroui
- Résistance à la corrosion : bonne tenue à la corrosion atmosphérique ; à chaud formation d'une couche noire d'oxyde de cuivre CuO .

- Très ductile, très malléable et plastique.
- Au contact de l'air humide, le cuivre se recouvre d'une couche superficielle d'hydrocarbonate de cuivre ou vert de gris, patine qui protège d'une altération plus profonde.
- Les acides chlorhydrique et sulfurique n'attaquent pas le cuivre à froid, mais forment avec l'oxyde de cuivre des chlorures et des sulfures de cuivre ; ils sont utilisés comme décapants, avant étamage par exemple.

13.3.2 Utilisation du cuivre (figure 13.2)

- Le cuivre à l'état pur est utilisé pour fabriquer des fils électriques, de l'appareillage de communication.
- Le cuivre intervient aussi dans la fabrication d'un grand nombre d'appareils de chaufferie industriels de tuyauteries, de gouttières, chéneaux, descentes d'eau et toitures de luxe (Opéra de Paris, château de Frontenac de Québec).
- Soumis aux intempéries lorsqu'il est utilisé en toiture, le cuivre prend dans un premier temps une couleur brun foncé, puis une patine vert clair très adhérente, qui le protège de toute oxydation ultérieure.
- Il est surtout utilisé pour la fabrication d'alliages importants tels que les laitons (cuivre+zinc) et les bronzes (cuivre+étain), etc. Il intervient également comme métal d'addition en faible quantité dans les aciers pour obtenir des aciers inoxydables.

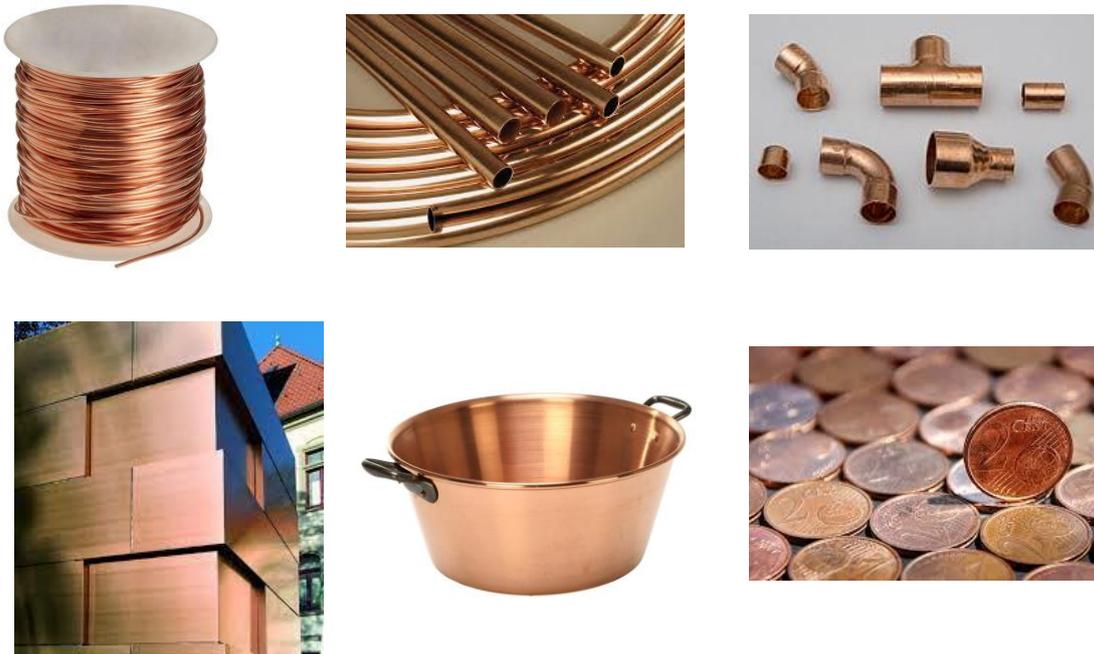


Figure 13.2: Utilisation du cuivre.

13.4 Le zinc

- La teneur en zinc de l'écorce terrestre est de 0,08%, soit 80 g de métal par tonne.
- On trouve le zinc sous forme de sulfure ZnS , appelé blende.
- La blende est associée à une gangue constituée par de la calcite $CaCO_3$ et de la dolomie $MgCO_3$.

- Le zinc est de plus très souvent associé à d'autres métaux, en particulier le plomb Pb et le cadmium Cd.
- La teneur du minerai brut en zinc varie de 4% à 20%. Il y a un peu plus de 300 mines dans le monde, la plus grande étant située en Alaska (la teneur du minerai en zinc y est de 17%).

13.4.1 Propriétés du zinc

- La température de fusion du zinc est de 420 °C. La température de fusion peu élevée du zinc en fait un matériau apte au moulage sous pression (dans des moules métalliques permanents).
- Ce matériau a une bonne résistance à la corrosion et il peut être plaqué.
- Les propriétés mécaniques du zinc sont médiocres.

13.4.2 Utilisation du zinc en Bâtiment

- Les feuilles de zinc sont utilisées pour la couverture (comme le cas de la France);
- Le zinc est aussi utilisé pour les gouttières et accessoires d'évacuation d'eaux pluviales.
- 50 % de la production du zinc sert à la galvanisation et à d'autres éléments de protections (peinture riche en zinc).
- On utilise particulièrement la galvanisation à chaud pour protéger l'acier contre la corrosion.



Figure 13. 3: Utilisation du zinc.

Les références

1. Georges Dreux, Jean Festa, Nouveau guide du béton et de ses constituants, Edition Eyrolles.
2. Fouad Ghomari, Cours de Science Des Matériaux De Construction, Université de Tlemcen.
3. Heneri Renaud, Constructeur bâtiment. Technologie (tome 1), Edition Foucher.
4. Heneri Renaud, Ouvrages en béton armé. - Technologie du Bâtiment, Gros oeuvre, édition 2003, Éditeur Foucher.
5. R. Dupain , R. Lanchon , J-C. Saint -Rroman, Granulats, sols, ciments et bétons, Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire. Edition 2009, Éditeur Casteilla.
6. Matériaux de terre cuite Lucien ALVISET article [C 905] technique de l'ingénieur.
7. Komar A., Matériaux et éléments de construction, Edit. Mir, Moscou, Russie, 539 p.
8. Venuat M. (1976), La pratique des ciments et des bétons, Edit. du Moniteur des T.P.B, 630 p.
9. Robert Chaussin. «Béton précontraint ». Technique de l'ingénieur, C2-360, (1992)
10. Daniel Daligan, plâtre. Techniques de l'ingénieur » Vol C910.
11. Xavier Guillot, Emmanuelle Roque, Chaux hydrauliques. Techniques de l'ingénieur Vol C924.