

1 LES MORTIERS

1.1 Généralités :

Le **mortier** est un matériau composite, obtenu par mélange homogène d'une matière inerte (sable) avec une matière active (liant), le tout gâché avec certaine quantité d'eau. Le mortier pouvant satisfaire à une variété d'exigences dans le domaine de la construction. Toutefois, il n'existe pas de mortier universel, convenant à toutes les situations. Le Concepteur ne pourra choisir le mélange convenant le mieux pour un projet donné que s'il a une bonne connaissance des matériaux qui entrent dans la composition du mortier et de leurs propriétés.

Le concepteur ne pourra choisir le mélange convenant le mieux pour un projet donné que s'il a une bonne connaissance des matériaux qui entrent dans la composition du mortier et de leurs propriétés.

1.2 Définition

Le mortier est un matériau de construction obtenu par mélange de liant, de sable et d'eau, éventuellement des adjuvants, réalisé dans des proportions bien définies de manière à obtenir une pâte de plasticité convenable pour la mise en œuvre.

Il sert à lier les différents éléments de construction tels que des briques, des pierres, des blocs de béton (parpaings)... ou à exécuter des revêtements et des enduits de façade.



Mortier (sable et ciment)

1.3 Composants du mortier

Les composants principaux des mortiers sont : le sable, de liant et d'eau. Le liant le plus courant depuis le début du 20^e siècle est le ciment Portland, mais l'ancien mortier de chaux liante est toujours utilisé dans certaines nouvelles constructions.



Dans un mortier, le liant peut être du ciment, de la chaux ou un mélange des deux.

1.3.1 Le sable

Le choix de la granulométrie du sable est en fonction des travaux à réaliser, pour des travaux de maçonnerie, on emploie souvent des sables 0/5 mm ; Cependant pour des travaux de briquetage ou d'enduits, le sable est plus fin 0,5 et 2 mm.

Le rôle du sable dans un mortier est de:

- diviser la masse du liant pour permettre la prise (liant aérien).
- abaisser le prix de revient du mortier.
- diminuer le retrait et ses conséquences (les fissurations) du fait que le sable est incompressible que le retrait se trouve amoindri.

1.3.2 Le liant :

Quel qu'il soit, le liant employé doit être de bonne qualité. Son choix pour la confection d'un mortier est très important. Il peut-être du ciment portland, du ciment de maçonnerie, de la chaux.

Le ciment de maçonnerie : est un produit déposé contenant du ciment portland et un filler minéral inerte (calcaire) et des adjuvants tels que des agents mouillants, des agents hydrofuges et des entraîneurs d'air.

La chaux : qui est le composant traditionnel du mortier, possède une plasticité et un pouvoir de rétention d'eau excellent, mais sa résistance mécanique est faible et sa cure est lente. La cure des mortiers de chaux s'effectue lentement par carbonatation sous l'effet du gaz carbonique de l'air ; ce processus peut être fortement ralenti par temps froid et humide.

1.3.3 L'eau :

Le choix de l'eau de gâchage a aussi une grande importance car elle remplit un double rôle : elle sert à hydrater le ciment et ce qui est plus important, elle contribue à son ouvrabilité.

Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale. L'eau devrait être propre et ne pas contenir de produits nocifs tels que des acides, des alcalis ou des matières organiques. Lorsqu'elle est potable, on peut l'utiliser.

1.3.4 Les adjuvants :

Les adjuvants sont employés pour les mortiers de maçonnerie et dans certains cas leur emploi est certainement avantageux. Cependant, leur emploi n'est généralement pas recommandé. Ils donnent la plasticité et le pouvoir de rétention d'eau que confère la chaux aux mortiers de ciment et chaux. Certains ciments de maçonnerie sont des mélanges de ciment portland et de chaux hydratée, avec en plus des adjuvants.

1.4 Fonctions d'un mortier

La fonction principale d'un mortier est de liasonner les éléments de maçonnerie de manière à ce qu'ils constituent un seul bloc. Par ailleurs, le mortier sépare les éléments et remplit toutes les fentes et fissures en formant une surface de contact homogène. Le rejointoiement doit permettre de renforcer les propriétés structurales des éléments et en même temps empêcher la pénétration de la pluie. Ceci exige une adhérence complète. Si elle est réalisée, le mur aura une durabilité suffisante pour résister aux éléments.

Les mortiers sont des éléments indispensables à toute construction. Il peut être utile pour la plupart des travaux de construction et de rénovation en maçonnerie. :

- ☛ Lier des briques ou des pierres entre elles,
- ☛ Effectuer l'enduit d'un mur,
- ☛ Sceller des éléments,

1.5 Emplois des mortiers :

Le hourdage de maçonnerie :

La construction réalisée en éléments maçonnés (blocs de béton, pierre de taille, briques), nécessite leur assemblage avec un mortier qui doit présenter des caractéristiques mécaniques suffisantes pour assurer la transmission des charges et une compacité suffisante pour être étanche



Les enduits :

Ce domaine d'application constitue l'un des plus vastes débouchés des mortiers. A côté des enduits traditionnels en trois couches, se développent aujourd'hui des enduits monocouches épais, ainsi que des enduits isolants.



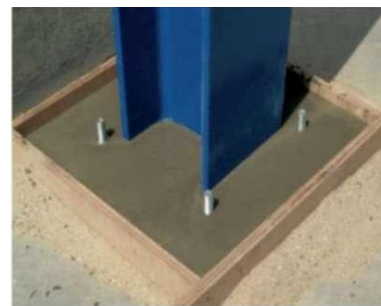
Les chapes :

Les chapes ont pour fonction d'assurer la mise à niveau du dallage et la régularité de sa surface. Les chapes peuvent constituer la finition. Elles peuvent aussi constituer le support d'un revêtement de sol



Les scellements et les calages :

La multiplicité des problèmes de scellement et de calage a conduit les producteurs de mortiers industriels à mettre au point des produits spécifiques adaptés aux travaux à réaliser : scellements d'éléments de couverture, d'éléments de second œuvre, de mobiliers urbains, de regards de visite



1.6 Différents mortiers en fonction du type de liant

Les types de mortiers sont choisis selon l'application. Il existe de multiples types de mortiers avec différentes propriétés et applications, plus ou moins adaptés en fonction des usages. Les mortiers les plus fréquemment utilisés sur les chantiers sont :

1.6.1 Les mortiers de ciment :

Le mortier-ciment est le produit le plus basique qui soit, indispensable pour construire un mur et lier les pierres ou briques entre elles. Il s'agit d'un mélange classique de ciment, de sable et d'eau.

Le mortier de ciment est très résistant et étanche à l'eau mais sujet à la fissuration : convient pour l'assemblage de blocs béton, Pour les jointements et les scellements, on peut envisager de se passer de sable.

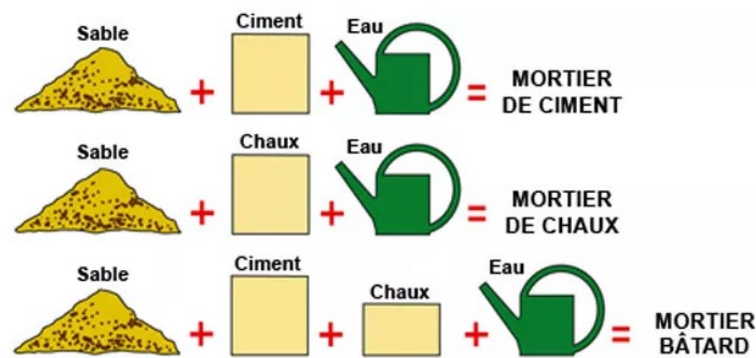
1.6.2 Les mortiers de chaux :

C'est un type de mortier où la chaux (chaux grasse ou chaux hydraulique) est utilisée comme liant et le sable est utilisé comme granulat fin. Ce mélange est couramment utilisé pour enduire les murs intérieurs et extérieurs.

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment, surtout lorsque la chaux est calcique. Il a de la souplesse mais il a moins d'imperméabilité que le ciment.

1.6.3 Les mortiers bâtards :

Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Le ciment lui procure de la résistance, tandis que la chaux lui apporte de la souplesse. L'usage de ces deux liants donne un mortier résistant, une prise plus rapide grâce au ciment, suffisamment gras et onctueux grâce à la chaux. Le tout lui procure une facilité de prise en main. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales ; mais on mettra une quantité plus ou moins grande de l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.



Types de mortiers

1.7 Les différents mortiers en fonction de l'usage

1.7.1 Le mortier-ciment

Ce matériau sera utile pour toutes les constructions classiques (murs, chapes, etc.), qui ne nécessitent pas l'usage d'un mortier spécifique. L'avantage du ciment est qu'il profite d'une excellente résistance à la compression. Il durcit également plus vite que la plupart des autres solutions.

Les dosages courants sont de l'ordre de : 300 à 400 kg de ciment pour 1 m³ de sable. De plus un dosage en ciment insuffisant les rend pratiquement imperméables.

1.7.2 Le mortier hydrofuge

Comme son nom l'indique, le mortier hydrofuge est un mortier résistant à l'eau, qui permet d'éviter les problèmes d'humidité sur une surface. Il permet de :

- ✓ Boucher des fissures,
- ✓ Enduire un mur,
- ✓ Réaliser des chapes.

On l'utilise avant tout dans les lieux humides (salle de bain, extérieur, etc.) ou encore pour concevoir des réalisations étanches, comme un bassin de piscine.

1.7.3 Le mortier réfractaire

Le mortier réfractaire est un mortier résistant aux hautes températures. Selon les préparations, il peut généralement résister à des températures de 900° ou moins.

En toute logique, il est uniquement utilisé pour les constructions qui sont exposées à ce type de températures, à savoir pour le montage et le jointement des :

- ✓ Foyers de cheminée,
- ✓ Des barbecues maçonnés.

Ce matériau protège ainsi les joints et la structure des constructions exposées aux flammes et à la chaleur. Il n'est cependant jamais utilisé sur des constructions qui n'en ont pas besoin ?

1.7.4 Le mortier de chaux

La chaux est l'un des liants les plus utilisés dans les anciennes constructions. À tel point qu'on utilise encore fréquemment des mortiers à la chaux.

Il faut dire que ce type de mortier permet au mur de mieux respirer et dispose également de capacités hydrofuges (idéales pour les pièces humides).

L'usage de chaux dans un mortier permet généralement une application plus facile, grâce à un temps de séchage un peu plus long. Ces mortiers sont cependant plus complexes à doser que le ciment.

1.7.5 Le mortier bâtard

Le mortier dits "bâtard" est un mortier qui utilise à la fois deux types de liants différents (ciment + chaux ou deux ciments différents), généralement, à parts égales.

Un mortier bâtardé (à base de chaux) permet de tirer parti des avantages des deux liants. Plus adhérent et plastique que le ciment pur, il résiste mieux à la fissuration : le bon compromis pour la brique de terre cuite, la pierre mi-tendre.

1.7.6 Le mortier-colle ou ciment-colle

Il s'agit, comme son nom l'indique, d'un mortier adhésif, qui permet de coller un revêtement contre un mur ou un sol.

Ce matériau est utilisé pour coller des plaquettes de parement, des carrelages muraux ou au sol, ou encore des dalles. Selon le mortier-colle choisi, l'utilisation peut se faire en intérieur et/ou en extérieur.

1.8 Types de mortiers en fonction de dosage de liant

1.8.1 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 vides du sable, c'est à dire que 1 m³ de sable plus 1/3 de m³ de liant ne fournit qu'un m³ de mortier.

$$1 \text{ m}^3 \text{ de sable} + 1/3 \text{ liant (m}^3\text{)} = 1 \text{ m}^3 \text{ de mortier.}$$

1.8.2 Mortier maigre :

Le volume de liant est inférieur au volume des vides.

$$1 \text{ m}^3 \text{ de sable} + 1/4 \text{ liant (m}^3\text{)} < 1 \text{ m}^3 \text{ de mortier.}$$

1.8.3 Mortier gras :

Le volume de liant est supérieur au volume des vides.

$$\text{Volume de mortier} > 1 \text{ volume de sable}$$

1.9 Formulation (fabrication) des mortiers:

Les proportions de liant et de sable dépendent en grande partie de la qualité et la résistance du mortier mise en œuvre. L'eau, bien qu'en quantité limitée, joue également un rôle

déterminant dans la bonne tenue du mortier . Le rapport quantité de liant sur quantité du mortier prend le nom de "dosage".

Le dosage du mortier peut varier sensiblement en fonction de l'utilisation et du type de mortier à réaliser. Il est une opération qui doit être faite avec précision car la résistance finale de l'ouvrage en étant très dépendante. Il ne peut alors être question d'en changer les données soit volontairement pour des raisons d'économies soit involontairement par négligence.

Il existe deux façons de formuler le mortier.

1.9.1 Dosage en volume :

Les quantités des composantes des mortiers sont déterminées et ajustées en volume. Le mortier se dose de manière générale de façon assez simple :

1 volume de ciment, 2 à 4 volumes de sable pour 1/2 de volume d'eau.

Exemples :

- Mortier normalisé : **un volume de ciment, 3 volumes de sable normalisé pour 1/2 de volume d'eau. (S/C = 3 et E/C = 0,5).**
- Mortier de chaux grasse : Un volume de chaux pour deux volumes de sable. (S/C = 2).
- Mortier de maçonnerie (hourdage) : Un volume de liant, trois volumes de sable et un tiers d'eau. (S/C = 3 et E/C = 0,3).

<i>Type de travaux</i>	<i>Volume de sable pour 50 kg de liant</i>
Mur ou muret en moellon	110 litres
Muret non porteur en brique	140 litres
Mur porteur en brique	100 à 125 litres
Mur en brique creuse	140 litres
Mur en parpaing	140 litres

1.9.2 Dosage en poids :

Le dosage en poids d'un mortier est le poids de liant inclus dans un mètre cube de mortier fini. Selon les masses volumiques, la quantité de mélange et de matériaux qui le composent nous donnera des résultats différents en matière de construction.

Le dosage du mortier pour un sac de ciment					
Utilisation	Ciment	Chaux	Sable fin Granulométrie : type 0,2 mm Densité : 1,5/m ³	Sable à maçonner Granulométrie : type 0,5 mm Densité : 1,5/m ³	Eau Environ
Assemblage de parpaings Ex : Parpaings 20x20x50 cm pour 7 m ²	50 Kg			250 Kg soit 167 litres	25 L
Assemblage de briques Ex : Briques 6x11x22 cm pour 7 m ² avec mortier bâtard	25 Kg	25 Kg	200 Kg soit 135 litres	50 Kg soit 34 litres	25 L
Chape sur sol béton	50 Kg			200 Kg soit 135 litres	25 L
Enduit de façades traditionnel pour 20 m ² Première couche gobetis 3 à 5 mm	50 Kg		150 Kg soit 100 litres		25 L
Enduit bâtard Deuxième couche corps d'enduit 15 à 20 mm	50+50 Kg	50 Kg		690 Kg soit 460 litres	75 L
Troisième couche finition 5 à 7 mm	20 Kg	20 Kg	175 Kg soit 117 litres		10 L
1 m³ Mortier de joint pour pierres	50 Kg		66 Kg soit 44 litres		25 L
Mortier de joint pour briques	25 Kg	25 Kg	66 Kg soit 44 litres		25 L

Mélanger à sec puis tamiser avant l'ajout d'eau afin d'obtenir des joints malléables

1.10 Caractéristiques des mortiers

D'après leurs propriétés, les mortiers se subdivisent en deux catégories: les mortiers plastiques et les mortiers durcis.

1.10.1 Mortier à l'état frais « état plastique »

La propriété la plus importante du mortier plastique est son ouvrabilité. On peut la définir comme la propriété du mortier à s'étaler à la truelle pour colmater toutes les fentes et fissures de l'élément de maçonnerie. En réalité, c'est une combinaison de plusieurs propriétés, comprenant la plasticité, la compacité et la cohérence.

Bien que la classe des sables et la proportion des matériaux jouent un rôle important, c'est la teneur en eau qui détermine les valeurs finales de l'ouvrabilité du mortier.

1.10.1.1 Mesure de l'ouvrabilité du mortier

L'essai **d'étalement** est réalisé sur une table mobile comportant un plateau plan relié par charnières à une base rigide. Un moule en forme de tronc de cône de diamètre à la base (D_0) posé au centre du plateau.

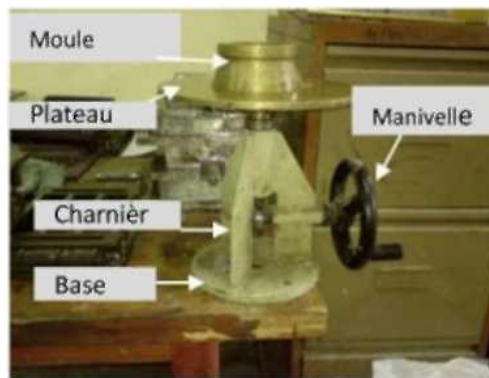


Table à choc (secousse)

Le moule et le plateau sont préalablement huilés. Le cône est rempli par une quantité de mortier par couches successives, chaque couche est compactée par piquage à l'aide d'une tige. On remonte verticalement le moule sans mouvement latéral et on laisse le mortier s'étaler sur la plaque métallique. En utilisant la manivelle, on applique 15 cycles de chute. Chaque cycle dure entre 1 et 3 secondes. La hauteur de chute du plateau mobile est de 15 mm.



a) Remplissage du moule

***b) Application des coups
et étalement***

c) Mesure des diamètres

Etapas de mesure l'étalement d'un mortier.

On mesure les différents diamètres (D_i) qu'occupe le mortier étalé sur la table, et on calcule l'étalement comme suit :

$$\text{étalement} = \frac{D_m - D_0}{D_0} \times 100$$

Avec :

D_m : Diamètre moyen du mortier étalé.

D_0 : Diamètre de la base du moule tronconique.

L'ouvrabilité (plasticité) du mortier est en fonction des résultats d'étalement trouvés à l'aide de la table à chocs.

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

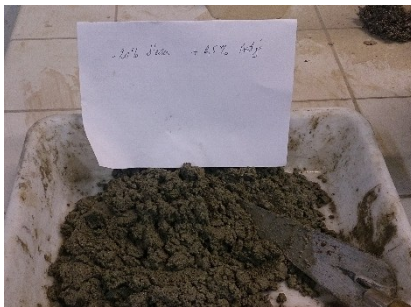
Exemple :

Soit un mortier normal avec un diamètre moyen après l'essai d'étalement $D_m = 15$ cm.

Le moule de cône de diamètre à la base $D_0 = 10$ cm.

$$\text{étalement}(\%) = \frac{D_m - D_0}{D_0} \times 100 = \frac{15 - 10}{10} \times 100 = 50\%$$

D'après le tableau et pour un étalement de 50% on aura une ouvrabilité ferme.

**V.1.1 Mortier à l'état durci**

Le mortier durci possède un certain nombre de propriétés de résistance mécanique d'importance majeure.

La solidité du rejointoiement entre le mortier et l'élément est très importante, ainsi que la bonne ouvrabilité et un bon pouvoir de rétention d'eau donnent au rejointoiement une force maximale et par le fait même ces qualités sont plus importantes que la résistance du mortier à la compression.

La résistance à la flexion est également importante, parce qu'elle détermine la capacité d'un mortier à résister à la fissuration. Les mortiers devraient toujours avoir moins de résistance que les éléments de maçonnerie pour que les fissures se produisent dans les joints, où elles peuvent être facilement colmatées.

Les résistances du mortier sont mesurées sur des éprouvettes fabriquées à partir des moules normalisées de différentes **dimensions** et **matériaux** (plastique ou, métal).

Essai de la résistance à la compression

La résistance à la compression du mortier est déterminée par des essais directs selon la norme NF EN 196-1. Il y a deux types de résistance : la résistance mesurée sur **cylindres** (5/10 cm²) et la résistance mesurée sur demi-prismes obtenus dans l'essai de flexion **cubes** (04x04x04 cm³). Elle est exprimée en MPa ou en N/mm².

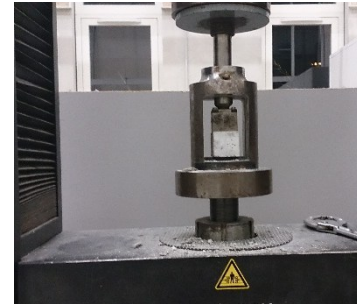
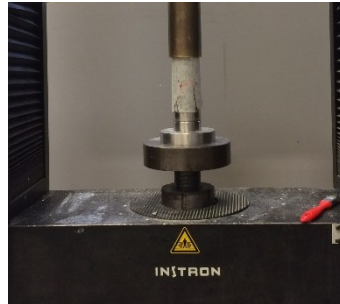
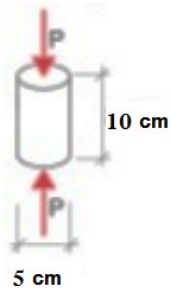
La contrainte de compression est donnée par la formule suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{A} \text{ en (MPa)}$$

Avec :

F_c : Charge maximale de rupture (en N).

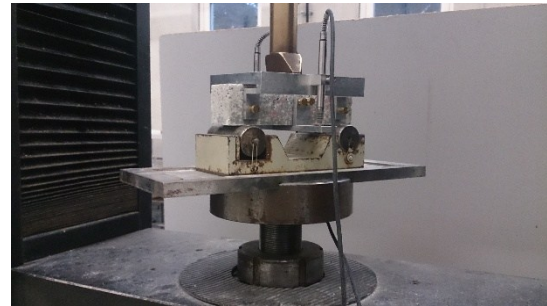
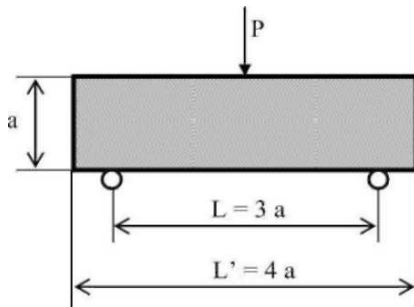
A : Aire de la section en mm^2 ($\pi \cdot r^2 = 1963,5 \text{ mm}^2$). ou ($40 \times 40 = 1600 \text{ mm}^2$).



Essai de compression simple sur cylindre 5 x 10 cm² et sur cube 4x4x4 m³.

1.10.1.2 Essai de la résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion des mortiers a été évaluée par des essais de flexion 3 points effectués sur des éprouvettes prismatiques 4x4x 16 cm³, avec une vitesse de chargement de 50 N/s.



Essai de flexion sur éprouvette 4x4x16cm³.

La formule de calcul de la contrainte de flexion est donnée comme suit :

$$R_f = \frac{9P}{2a^2}$$

Avec :

R_f : Résistance à la flexion, en newtons par millimètre carré ($\frac{N}{\text{mm}^2} = \text{MPa}$);

a : est le côté de la section carrée du prisme ($a=40 \text{ mm}$), en millimètres ;

P : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons (N).

Exemple :

Déterminer la résistance à la traction et à la compression d'un ciment portland à 28 jours coulé sur une éprouvette prismatique (4x4x16 cm³). Sachant que les valeurs de l'effort affiché sur le comparateur de la presse et de 2000 N pour la flexion et 45000 N pour la compression.

- La résistance à la traction

$$R_f = \frac{9P}{2a^2} = \frac{9(2000)}{2 \times (40)^2} = 5.62 \text{ MPa}$$

- La résistance à la compression

$$R_c = \frac{F_c}{A} = \frac{45000}{1600} = 28.12 \text{ MPa}$$

1.10.2 Méthodes de préparation des mortiers

Préparation manuelle

Il faut tout d'abord, avec la pelle, mélanger à sec le sable et liant aussi parfaitement que possible et former ensuite au milieu du mélange une cuvette qui recevra l'eau de gâchage. La masse est humectée progressivement puis malaxée à l'aide d'un robot à mortier.

Cependant il faut savoir :

- ✓ Que le mélange à sec doit être fait soigneusement pour que le liant soit parfaitement réparti dans toute la masse du sable.
- ✓ Que l'eau doit être versée en plusieurs fois, d'abord pour la commodité et la qualité du mélange, ensuite parce qu'il est facile d'ajouter un peu d'eau alors qu'on ne peut pas en enlever.



Préparation mécanique :

La fabrication des mortiers se fait à l'aide des engins appelés bétonnières. Avec certains modèles, le mélange doit être fait à sec, en partie avant l'introduction dans le tambour mélangeur où il est mouillé convenablement. D'autres font elles-mêmes le mélange complet : on introduit soit directement dans le tombeur, soit dans une benne, l'ensemble des éléments constitutifs du mortier.

L'opération ne dure que quelques minutes, elle est beaucoup plus rapide et moins pénible qu'à la main.



1.11 Conclusion et recommandations

Pour tous les types de mortier, il est rappelé et recommandé de suivre les préconisations d'usage de leur fabricant (quantité d'eau de gâchage, temps de malaxage et d'attente, épaisseur et technique de mise en œuvre, éléments 'compatibles', conditions climatiques de mise en œuvre, usage selon le type, etc. ...) basées sur les considérations évoquées. Le choix du mortier, à effectuer notamment en fonction des spécificités de l'élément de maçonnerie (type, forme, caractéristiques), peut contribuer à l'aspect esthétique et aux performances mécaniques et thermiques de la maçonnerie par le biais de ses caractéristiques (résistance à la compression, adhérence à l'élément de maçonnerie, densité), mais aussi de son épaisseur mise en œuvre.

1.12 Normes :

NF EN 998-2 Décembre 2016, Mortiers de montage des éléments de maçonnerie : Définitions et spécifications des mortiers pour maçonnerie - Partie 2 : mortiers de montage des éléments de maçonnerie.

La présente Norme européenne spécifie les exigences applicables aux mortiers industriels (de montage, jointoiment et rebouchage) utilisés dans les murs, poteaux et cloisons en maçonnerie (par exemple, maçonnerie apparente ou à enduire, structures de maçonnerie porteuse ou non, destinées aux bâtiments et ouvrages de génie civil).

Chapitre III: Le ciment.

1. Définitions

Le ciment est un liant hydraulique c'est-à-dire : il est capable de faire prise, de durcir et de développer des résistances à l'air comme dans l'eau.

Le béton est un géomatériau composite, composé essentiellement de ciment + eau + granulats.

Une Pâte = Ciment + Eau.

Un mortier = Ciment + Eau + Sable.

Un Béton = Ciment + Eau + Sable + Gravier.

2. Fabrication du ciment

Le ciment est fabriqué à partir de calcaire et d'argile : 80 % + 20 % respectivement.

Le ciment est fabriqué (*par voie sèche*) selon le processus suivant (*figure 1*):

- Extraction de matière première de la carrière ;
- Concassage primaire de la matière première ;
- Concassage secondaire de la matière première en taille plus petite ;
- Broyage de la matière concassée.
- Dosage et homogénéisation de la farine crue (*matière broyée*) ;
- Phase de préchauffage de la farine crue (*et précalcination*) à **850° C**, puis la cuisson dans un four rotatif incliné à une température généralement de **1450° C**. le produit sortant du four s'appelle le **clinker**;
- Broyage du mélange : clinker + gypse ($\approx 5\%$) + ajouts éventuels.
- Le produit fini (*ciment*) est prêt alors pour être expédié en sacs en vrac.

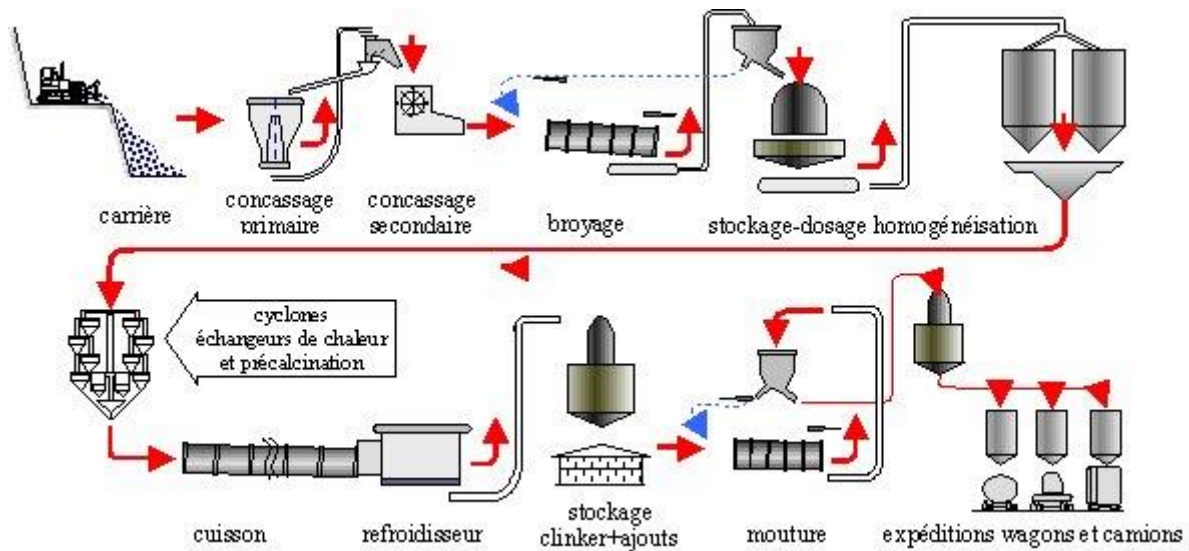


Figure 1- Méthode de fabrication de ciment par voie sèche.

Les ajouts minéraux dans le ciment ont pour but d'améliorer les propriétés physico-mécaniques du ciment, et ça résistance aux agressions chimiques.

Tableau 1- Les principaux ajouts et leurs effets.

Constituant ajouté		Effets principaux du constituant ajouté au clinker
S	Laitier granulé de haut fourneau	Diminue la réactivité à court terme. Diminue les retraits Montée en résistance moins rapide Adapté aux ouvrages en contact avec le sol
P	Pouzzolane naturelle	Diminue la réactivité à court terme et ses effets Complète l'hydratation en consommant la portlandite
Q	Pouzzolane calcinée	Diminue la réactivité à court terme et ses effets Complète l'hydratation en consommant la portlandite
V	Cendre volante siliceuse	Apporte une résistance complémentaire à long terme Améliore la durabilité en diminuant la perméabilité Améliore l'ouvrabilité. Teinte en noir le béton
W	Cendre volante calique	Améliore l'ouvrabilité. Teinte en noir le béton
T	Schiste calciné	Diminue la réactivité à court terme et ses effets Complète l'hydratation en consommant la portlandite
L et LL	Calcaire broyé	Accélère la cinétique d'hydratation à très court terme (2 à 7 jours). Complète le squelette granulaire
M	Mélange de constituants	Associe les effets des différents constituants Diminue le prix du ciment. Couleur et propriétés variables

3. Propriétés physico-mécaniques du ciment.

a- La prise

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

b- Le durcissement

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

c- La finesse de mouture (*surface spécifique de Blaine*)

Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en cm^2/g . Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3000 à 3500 cm^2/g .

Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes, par contre plus le ciment est sensible et plus le retrait est important.

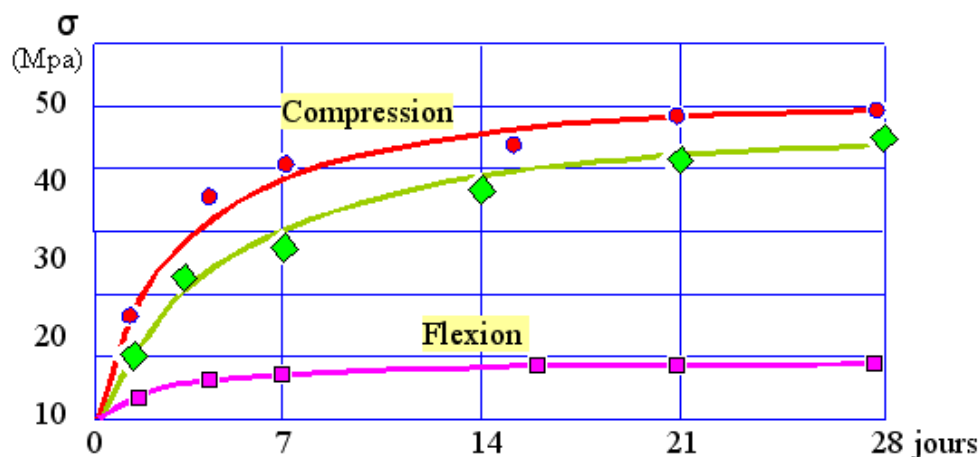


Figure 2- Résistance mécanique du mortier normal.

d- La résistance à la compression

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortier dit "normal", à 28 jours d'âges en traction et en compression des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm (figure 2). La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en MPa.

Le mortier utilisé est réalisé conformément à la norme EN 196-1. Le sable utilisé est un sable appelé: "sable normalisé".

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

4. Les minéraux de Bogue

Au cours de l'hydratation du ciment, quatre (04) minéraux principaux se forment par combinaison des la chaux, la silice, l'alumines, et l'oxyde de fer. C'est minéraux sont le C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF .

Le pourcentage de ces minéraux est calculé selon les formules suivantes de Bogue (d'où vient leur nom):

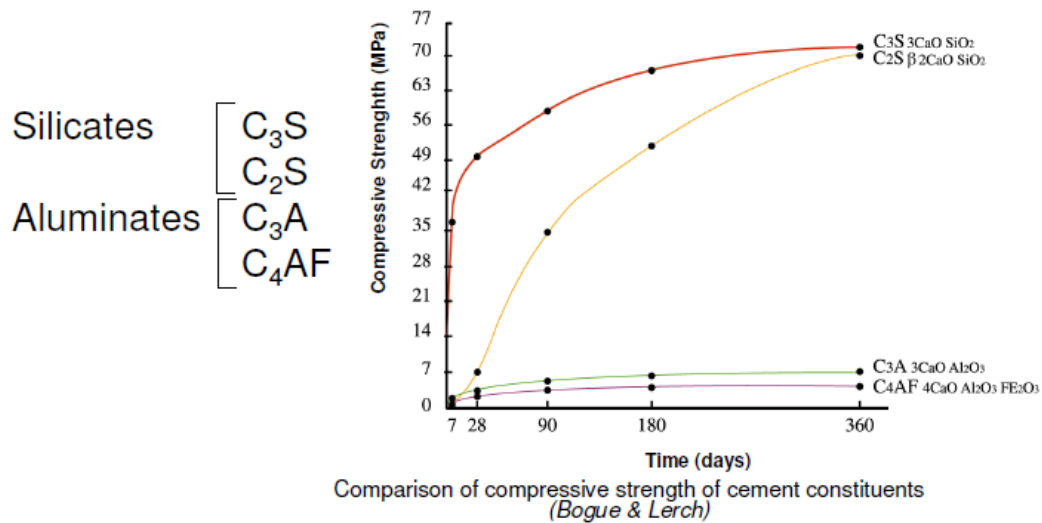
$$C_3S = 4,0710 \text{ CaO} - 7,6024 \text{ SiO}_2 - 6,7187 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,4297 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$C_2S = - 3,0710 \text{ CaO} + 8,6024 \text{ SiO}_2 + 5,0683 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 1,0785 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$C_3A = 2,6504 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,6920 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$C_4AF = 3,0432 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

L'élément chimique le plus important pour le développement de la résistance mécanique du ciment est le C_3S (figure 3).



→ C_3S = the most interesting phase

Figure 3 – Comparaison de la résistance à la compression des constituants du ciment.

5. Les différents ciments

Les ciments peuvent être classés en cinq grandes familles et vingt-sept variantes principales (voir la norme (en)EN-197-1-2000) pour plus de détails :

- **Ciment Portland** (noté CEM I)
- **Ciment Portland composé** (noté CEM II)
- **Ciments de hauts fourneaux** (noté CEM III)
- **Ciments pouzzolaniques** (noté CEM IV)
- **Ciments au laitier et aux cendres** ou **ciment composé** (noté CEM V)
- **Ciment blanc** (différent des précédents par sa composition chimique et la méthode de fabrication).