

Dr. Abdelghani MERDAS • • •

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS – SÉTIF 1

FACULTÉ DE TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

Cours de Matériaux de construction I

2^{ème} ANNÉE GÉNIE CIVIL (LMD) -2021-

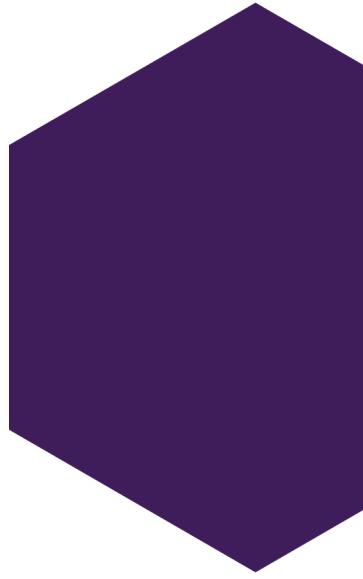
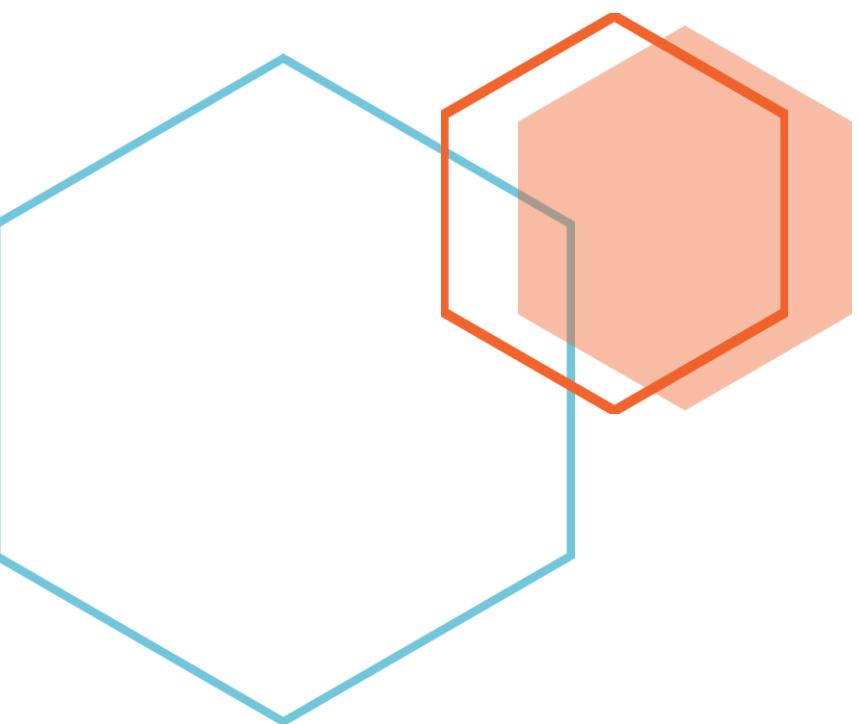


• • •

3^{ème} ANNÉE LMD

GÉNIE CIVIL

-2021-



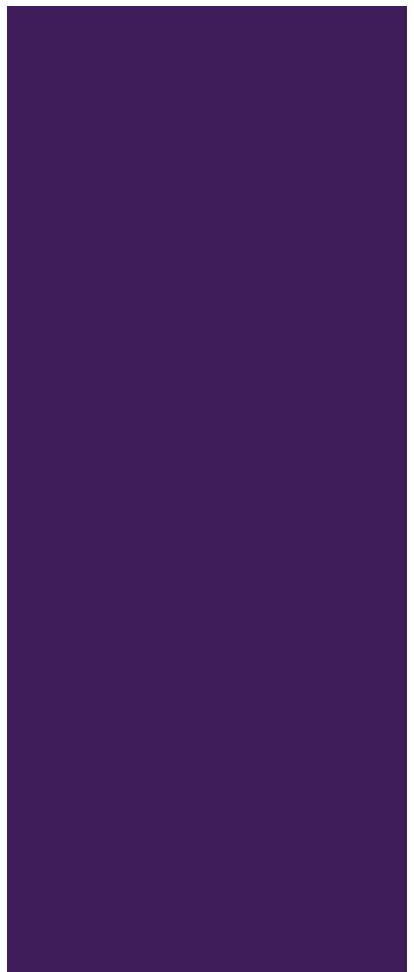
• • •

[Cours de Matériaux de Construction I]

2^{ème} ANNÉE LMD -2021-

Dr. Abdelghani
MERDAS • • •

• • •



• • •

Avant-propos

. Ce document s'adresse aux étudiants de la 2^{eme} année spécialité génie civil système LMD, il regroupe les chapitres recommandés dans le programme officiel du module matériaux de construction I. Le contenu de ce polycopié et le classement chronologique des chapitres sont conformes avec le programme officiel. L'objectif de ces cours est de réviser et approfondir les connaissances de la science des matériaux et les propriétés des principaux matériaux utilisés en génie civil ainsi de comprendre et maîtriser la nature du comportement des différents matériaux couramment utilisés dans la construction des ouvrages de génie civil. Le contenu fera l'objet de descriptions générales sur les notions de base de la science des matériaux, permettant ainsi à l'étudiant d'acquérir une vision d'ensemble de leur comportement et portera essentiellement sur l'approfondissement des connaissances de matériaux couramment utilisés en construction et en réhabilitation

Dr. A. MERDAS

Introduction générale

CHAPITRE I :

**INTRODUCTION GÉNÉRALE SUR
MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION**

CHAPITRE I :	6
INTRODUCTION GÉNÉRALE SUR MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION	6
I. INTRODUCTION	8
II. HISTORIQUE	8
III. CLASSIFICATION	9
II.1. Matières premières, matériaux et produits	10
II.2 Choix des matériaux de construction	10
Fonctions principales de la construction	10
Comportements intrinsèques du matériau.....	11
La qualité visée	11
Les facteurs économiques	11
IV. PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION	11
IV.1. Les propriétés physiques.....	11
1) La masse volumique apparente.....	12
2) La masse volumique absolue	13
3) La porosité et compacité (les granulats)	15
4) L'humidité (teneur en eau)	16
5) L'absorption de l'eau	16
6) Degré de Saturation	17
L'eau et les matériaux pierreux (Divers états de l'eau dans un matériau poreux).....	18
L'eau dans les granulats destinés à la confection des bétons.....	18
7) Hygroscopicité	18
8) La perméabilité	19
9) Résistance au gel.....	19
10) Conductibilité thermique	19
11) Capacité calorifique	19
12) Résistance au feu	20

13) La réfractarité	20
14) Stabilité thermique.....	20
15) Imperméabilité aux radiations nucléaires	20
16) La durabilité.....	20
IV.2 Les propriétés mécaniques.....	21
1) La déformation :	21
a) Déformation élastique.....	21
b) Déformation plastique	22
c) Le fluage et la relaxation.....	22
2) La résistance	23
a) Méthode destructif	26
b) Méthode Non destructif	26

I. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons présenter, en premier lieu, les caractéristiques physico-mécaniques des matériaux de construction. Et en deuxième lieu, la fonction des matériaux dans la construction, les propriétés et les sollicitations qui orientent le choix des matériaux, les bases de leur technologie pour sa bonne utilisation et les aspects de leurs comportements mécaniques tout en discutant quelques aspects économiques et de durabilité (diagnostic, pathologies auscultation et réhabilitation)

II. HISTORIQUE

Auparavant, le bâtiment utilisait les ressources locales telles que la terre, la pierre, le bois, par la suite, les ciments, le plâtre et la brique... Le paysage était façonné par une construction selon les conditions géologiques et topographiques, les techniques de construction et les bâtis étaient adaptés à la ressource, au paysage et au climat de chaque région. Tout en utilisant des matériaux dont ils disposaient localement pour gérer une économie locale pour des besoins locaux. Aujourd’hui, on observe une énorme variété de matériaux innovants et émergents. Des matériaux plus modernes sont récemment arrivés sur le marché grâce aux investissements et à la recherche constante dans les technologies inauguratrices. Un matériau de construction moderne

et idéal offre une résistance structurale stable tout en réduisant l'empreinte écologique de la maison. Bien-sûr, il doit pouvoir s'adapter également aux aléas de la météo et aux conditions du terrain.

III. CLASSIFICATION

En sciences des matériaux, il est possible de classer les matériaux en trois grandes familles, les céramiques, les métaux et les polymères. On peut ajouter à ces trois familles une quatrième catégorie, si en mélangeant deux types ou plus de ces matériaux, ce qu'on appelle les matériaux composites, voire la figure I.1.

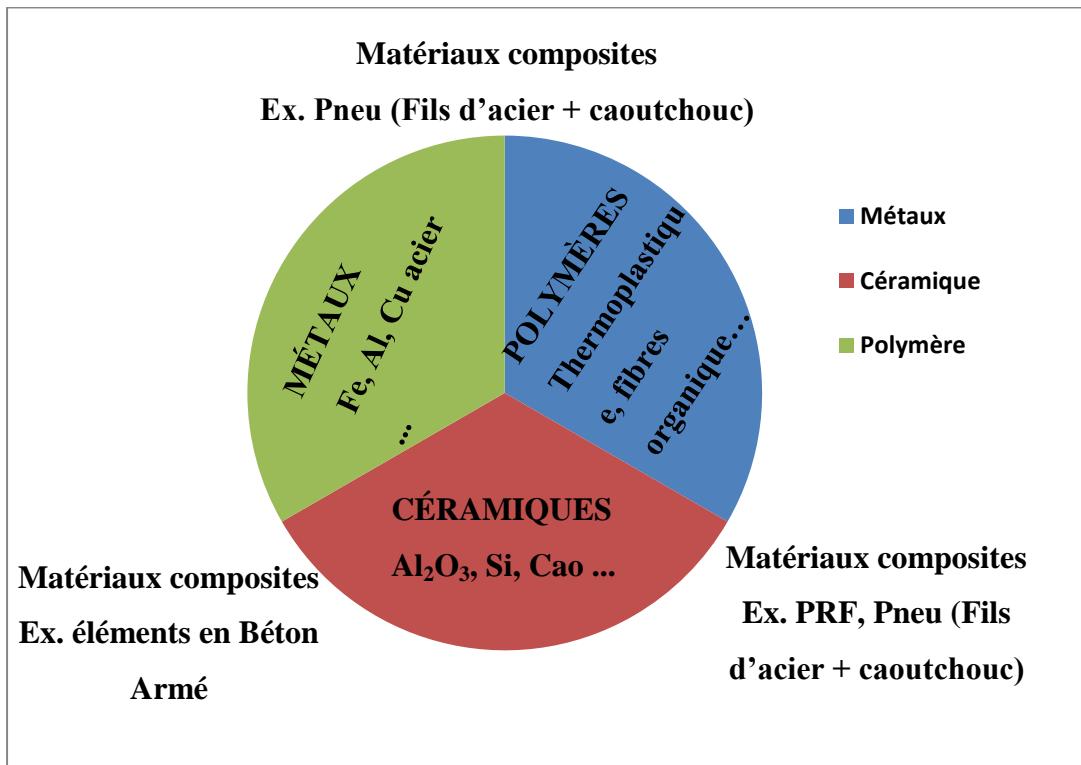


Figure I.1 Familles des matériaux selon la nature

On peut également classer les matériaux selon leur utilisation en deux familles, les matériaux de résistance mécanique et les matériaux de confort. La première catégorie est destinée à utiliser dans la construction des éléments structuraux porteurs (qui participent à la résistance mécanique de la construction) Exemples : pierre, béton, terres cuites, bois, acier, sable, gravier, ciment,...etc.

La deuxième catégorie est destinée beaucoup plus à la protection et au confort des usagers appelée les matériaux de confort (qui n'ont pas d'effets importants sur la résistance mécanique

mais sont nécessaires pour l'exploitation, la protection et le confort des utilisateurs dans la construction) Exemples : verre, plâtre, enduits, briques creuses, peinture, bitume, produits d'étanchéité,...etc.

II.1. Matières premières, matériaux et produits

Matières premières : matière utilisés généralement dans la fabrication des matériaux de construction, Exemples : argiles roches calcaire kaolin feldspath....

Matériaux : Matériaux utilisés après transformation et pendant la construction. Exemples : ciment, granulats, bitume, acier,...etc.

Produits : ce sont les éléments structuraux fabriqués à partir des matériaux résultants de la transformation de la matière première. Exemples :

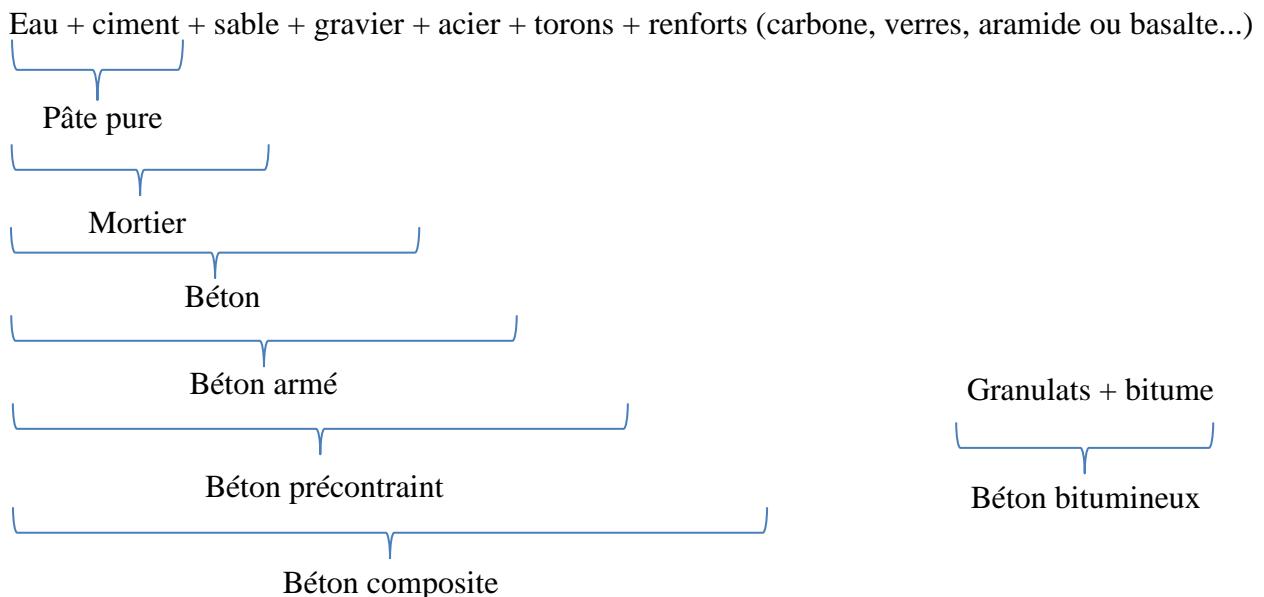


Figure I.2 Produits résultants du mélange des différents matériaux

II.2 Choix des matériaux de construction

Le choix des matériaux pour une construction donnée n'est pas arbitraire, il est en fonction du choix du matériau le plus adapté aux applications envisagées.

Les critères de choix des matériaux doivent tenir compte, entre autres, les principaux facteurs suivants :

Fonctions principales de la construction

Selon les modes de mise en charge, et des conditions générales d'utilisation.

Comportements intrinsèques du matériau

Sa résistance à la rupture, à l'usure, à la corrosion, conductibilité, ...etc.

La qualité visée

Selon la résistance mécanique demandée et le confort souhaité, isolation phonique ou thermique, étanchéité...etc.

Les facteurs économiques

Prix du revient des diverses solutions possibles, coût, disponibilité, transport, coût de mise en place...etc.

IV. PROPRIÉTÉS DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Les différentes gammes de matériau a fait apparaître une relation de l'homme avec son domicile, avec la lumière et la nature. Pour pouvoir utiliser intelligemment les matériaux de construction il est indispensable de connaitre leurs propriétés. Les propriétés principales des matériaux de construction peuvent être généralement classées en plusieurs familles tels que :

- **Propriétés physiques** : la dimension ; la densité ; la masse volumique, la porosité, la couleur, etc..,
- **Propriétés mécaniques** : la résistance en compression, en traction, en torsion etc..
- **Propriétés chimiques** : PH ; l'alcalinité, teneur en sulfate ; teneur en chlorure ; teneur en matière organique etc..
- **Propriétés physico-chimiques** : l'absorption, la perméabilité, le retrait et le gonflement etc..
- **Propriétés thermiques** : la dilatation, la conductivité thermique, la résistance et comportement au feu, etc..

IV.1. Les propriétés physiques

Plusieurs propriétés physiques sont possible tels que : Propriétés liées à la masse et au volume. Masse spécifique, masse volumique, la porosité et la densité. Propriétés liées à l'eau. Humidité, perméabilité, degré d'absorption d'eau, variation de dimension en fonction de la teneur en eau. Propriétés thermiques. Résistance et comportement au feu, chaleur spécifique et coefficient d'expansion thermique.

Les propriétés physiques sont les propriétés intrinsèques du matériau. Un matériau est constitué d'une, deux ou de trois phases de la matière. On peut trouver du solide, du liquide et/ou du gaz ou une combinaison des trois matières. Les matériaux courant de génie civil sont en majorité solides. Des vides peuvent exister et sont remplis soit d'un liquide (eau en général) ou d'un gaz

(air en général). La masse ou le poids du gaz est négligeable ($M_g = W_g = 0$) devant celui du liquide ou du solide. voir la figure I.3 ci-dessous.

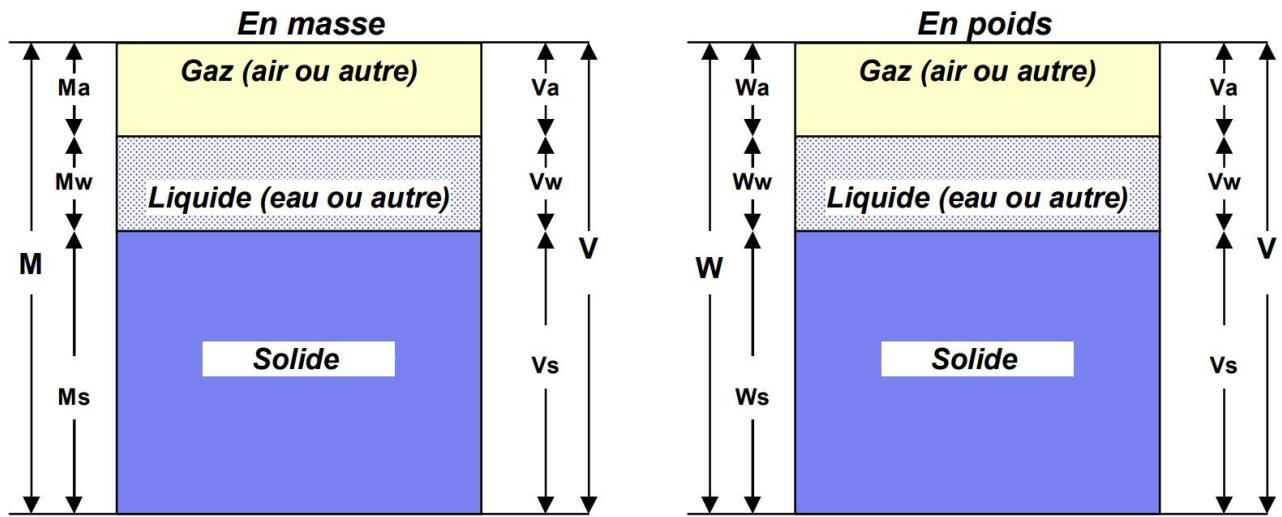


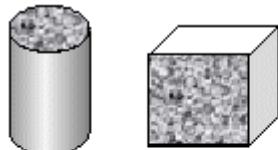
Figure I.3 Propriétés physiques, différents phases de la matière

1) La masse volumique apparente

Définition : C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel, après passage à l'étuve à $105 \pm 5^\circ\text{C}$, notée γ_{ap} et exprimée en (gr/cm^3 ; kg/m^3 ; T/m^3).

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

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



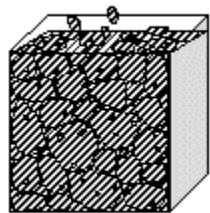
$$\gamma_{ap} = \frac{M_s}{V_{ap}}$$

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

M_s – Masse d'un corps sèche.

V_{ap} – Volume apparent.

ii) Pour les matériaux incohérents (ensemble de grains – sable ou gravier). La détermination de la masse volumique apparente peut se faire en utilisant un récipient standard (de volume connu).



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

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

M_s – Masse d'un corps sèche.

V_{ap} – Volume apparent.

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

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

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

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

M_s - Masse sèche d'échantillon (g)

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

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

g_p – Masse de la paraffine ayant enrobé de l'échantillon et γ_p – masse volumique absolue de paraffine.

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

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

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

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

2) La masse volumique absolue

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

Détermination : Si les matériaux étudiés sont poreux, on doit les concasser et les broyer jusqu'à ce que la dimension des grains de matériaux (l'échantillon) devienne inférieure à 0,2 mm. Ceci afin d'éliminer les pores et les vides existants dans les matériaux. Ensuite, on verse l'échantillon dans un récipient, qui contient de l'eau pour pouvoir déterminer la masse volumique absolue (Voir la figure I.3)

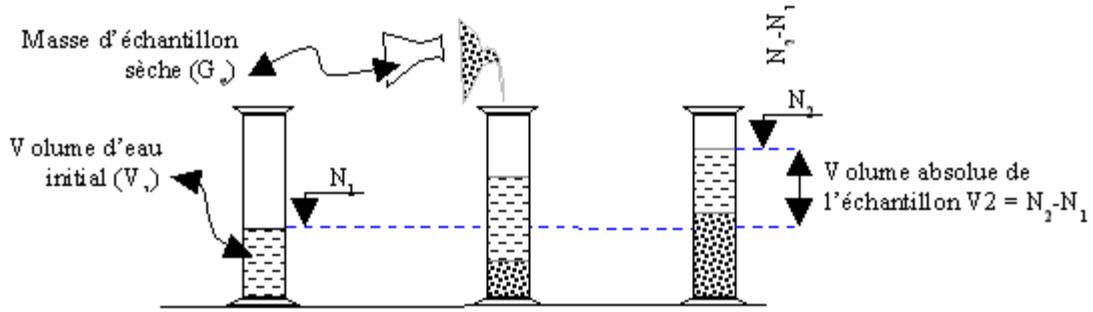


Figure I.4 étapes de détermination de la masse volumique absolue

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

$$\gamma_{ab} = \frac{M_s}{N_2 - N_1}$$

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

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

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

Le tableau suivant donne un aperçu des masses volumiques des matériaux usuels du Génie Civil.

Tableau I.1 : Masses volumiques absolue et apparente de quelques matériaux

Matériau	Masse volumique absolue ρ_s (kg/m ³)	Masse volumique apparente ρ (kg/m ³)
Acier	7850	7850
Aluminium	2700	2700

Cuivre	8850	8850
Fonte	7250	7250
Grès	2500	2500
Caoutchouc	1300	1300
Marbre, granit	2800	2800
Calcaire	2500 à 2700	
Gravier		1400 à 1700
Ciment	2900 à 3100	1000 à 1100
Sable	2600 à 2700	1500 à 1900
PVC	1350	1350
Tuile cuite	2300	
Verre	2500	2500

Remarque : si $\rho_s > \rho$, cela indique une présence de vides dans le matériau.

3) La porosité et compacité (les granulats)

- **Porosité:**

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

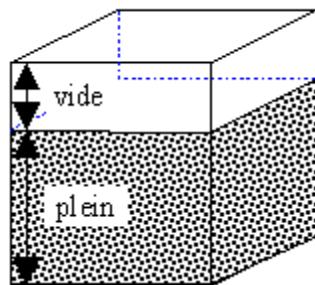


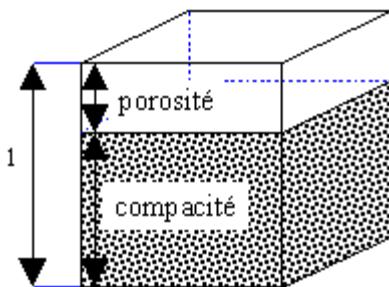
Figure I.5 volume quelconque

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

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

- **Compacité :**

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

**Figure I.6** volume unitaire

Ou volume des pleins par unité de volume apparent.

$$C = \frac{\text{volume solide}}{\text{volume total}}$$

La porosité et la compacité sont liées par relation:

$$p+c=1$$

Porosité et compacité :

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

$$p + c = \frac{\text{volume vide}}{\text{volume total}} + \frac{\text{volume solide}}{\text{volume total}} = 1$$

4) L'humidité (teneur en eau)

L'humidité est une des propriétés importantes des matériaux de construction. Elle est un indice pour déterminer la teneur en eau réelle des matériaux au moment de l'expérience.

En général l'humidité est notée W et s'exprime en pourcentage (%). On peut déterminer l'humidité de matériaux quelconques en utilisant la formule suivante :

$$W = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100\%$$

Où

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

m_w – est la masse de l'eau.

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

5) L'absorption de l'eau

L'absorption de l'eau du matériau est la capacité de conserver des échantillons quand ils sont immergés au sein de l'eau à température de 20,5 °C et à la pression atmosphérique. A cette condition l'eau peut pénétrer dans la plupart des vides interstitiels 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.

$$w_m = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100\% \text{ en pourcentage}$$

Ou

$$w_V = \frac{m_2 - m_1}{V} \cdot 100\% \text{ en kg/m}^3$$

m_2 – est la masse du matériau saturé

m_1 – est la masse du matériau sec.

V – est le volume naturel du matériau.

Le rapport entre la résistance à la compression d'un matériau saturé R_{sat} à la résistance à la compression à l'état sec R_{sec} s'appelle le coefficient de ramollissement.

$$Kram = \frac{R_{sat}}{R_{sec}}$$

Il caractérise la résistance à l'eau des matériaux, exemples :

Argile → Kram= 0

Métaux et verre → Kram= 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. Il joue un grand rôle dans les phénomènes de destruction des matériaux poreux par le gel. En se transformant en gel, l'eau augmente de 9% en volume environ.

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

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

- Immerger les échantillons dans l'eau.

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

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

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

où

Sr – est le degré de saturation (%)

Vw – est le volume de l'eau.

Vv – est le volume des vides.

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

On distingue trois grandes catégories d'eau :

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

Ces distinctions ne sont pas toujours absolument claires. Par exemple, dans le gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et dans le plâtre $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$, l'eau intervient dans l'édifice cristallin, mais tout en conservant son identité. Dans un spectre infrarouge du gypse et du plâtre, il apparaît les bandes anhydrite CaSO_4 et eau H_2O juxtaposées. On parle d'eau d'hydratation ou de cristallisation. Par contre, dans la réaction $\text{MgO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg(OH)}_2$, l'eau se combine chimiquement en perdant son identité.

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

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

7) Hygroscopicité

C'est la capacité du matériau à absorber les vapeurs d'eau, elle dépend de la température de l'aire, de son humidité, du type, du % et des dimensions des pores ainsi que de la nature du matériau. Plus les pores augmentent plus l'hygroscopicité croît.

- Matériaux hydrophiles → Attirent énergétiquement par leurs surfaces les molécules d'eau.

- Matériaux hydrofuge → repoussent l'eau

8) La perméabilité

C'est la capacité du matériau à laisser passer l'eau sans pression, elle est caractérisée par la quantité d'eau passant pendant une heure à pression constante par $1m^2$ de surface du matériau. La majorité des matériaux denses, tels que l'acier, le verre le bitume et les plastiques sont étanches à l'eau.

9) Résistance au gel

C'est le pouvoir d'un matériau saturé d'eau de supporter la congélation et le dégel alternatifs sans aucun signe de destruction ni perte sensible de résistance. Le degré de résistance au gel est établit en déterminant le coefficient de résistance au gel d'après la formule :

$$K_{Rg} = \frac{R_{Rg}}{Rsat}$$

Avec : R_{Rg} : Résistance à la compression du matériau après l'essai de gel ;

$Rsat$: Résistance à la compression du matériau saturé d'eau ;

Pour les matériaux résistant au gel K_{Rg} doit être supérieure à 0,75.

10) Conductibilité thermique

C'est la capacité du matériau de laisser passer la chaleur à travers son épaisseur. Elle est caractérisée par le coefficient de conductibilité thermique, égale à la quantité de chaleur traversant un échantillon de $1m$ d'épaisseur, de $1m^2$ de surface pendant une heure.

Elle dépend de la structuration du matériau, de sa nature et de la porosité.

Plus les pores augmentent, plus le coefficient augmentent (Pores communicants).

11) Capacité calorifique

C'est la capacité d'absorber la chaleur, elle est caractérisée par la chaleur spécifique ; qui est la quantité de chaleur dépensée pour éléver de $1^\circ C$ la température de 1 kg du matériau. La chaleur spécifique est déterminée par :

$$C = \frac{Q}{m(t_2 - t_1)} \text{ en J/kg.}^\circ\text{C}$$

Q : Qtité de chaleur dépensée pour éléver la chaleur de t₁ à t₂. en joule (J)

m : masse du matériau.

t₁, t₂, température du matériau avant et après chauffage.

12) Résistance au feu

C'est le pouvoir d'un matériau de résister à l'action des hautes températures sans perte de capacité portante (résistance et déformation). Tous les matériaux de construction sont divisés en matériaux incombustibles, peu combustible et combustible. Parmi les mes matériaux qui ne se consument pas (incombustible) on a : les minéraux naturels, artificiel et les métaux. Certains soutiennent le feu le plus violent sans se fissurer ni se déformer, exemple, la brique et l'argile ; les autres, tel l'acier subissent des déformations importantes.

13) La réfractarité

C'est le pouvoir d'un matériau de résister à l'action continue des hautes températures sans se déformer ou se fondre.

- Matériau réfractaire → t° ≥ 1580 °C
- Matériau peu fusible → t° de 1530 à 1580 °C
- Matériau fusible → t° ≤ 1530 °C

14) Stabilité thermique

C'est le pouvoir de résister à un certain nombre de cycles de variation calorifique brusque sans se détruire. Plus la dilatation croie, plus la stabilité thermique augmente. Le verre et le granite, par exemple, sont thermiquement instables.

15) Imperméabilité aux radiations nucléaires

C'est la capacité de stopper les rayons γ et les flux de neutrons ; certains ouvrage d'industrie atomiques sont appelées à remplir des fonctions de protection biologique ;

- Flux de neutrons : stoppés par les matériaux contenant une grande Qtité d'eau.
- Les rayons γ : stoppés par les matériaux de masse spécifiques élevée (plomb, béton, béton très lourd, béton + bore, cadmium ou lithium).

16) La durabilité

C'est le pouvoir d'un matériau en service de résister à l'action des facteurs atmosphériques et autres.

IV.2 Les propriétés mécaniques

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

Les matériaux de construction doivent :

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

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

1) La déformation :

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

a) Déformation élastique

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

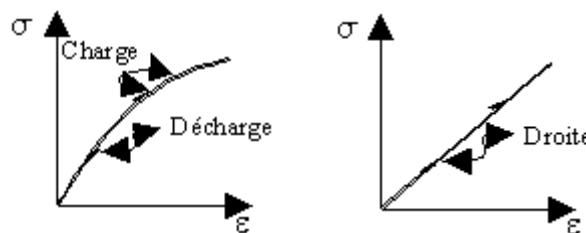


Figure I.7 comportement d'un matériau élastique (*contraint – déformation*)

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

b) Déformation plastique

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

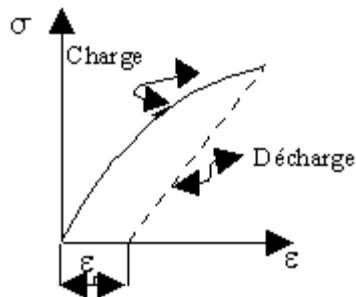


Figure I.8 comportement d'un matériau plastique (*constraint – déformation*)

c) Le fluage et la relaxation

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

Le fluage peut se manifester de deux façons:

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

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

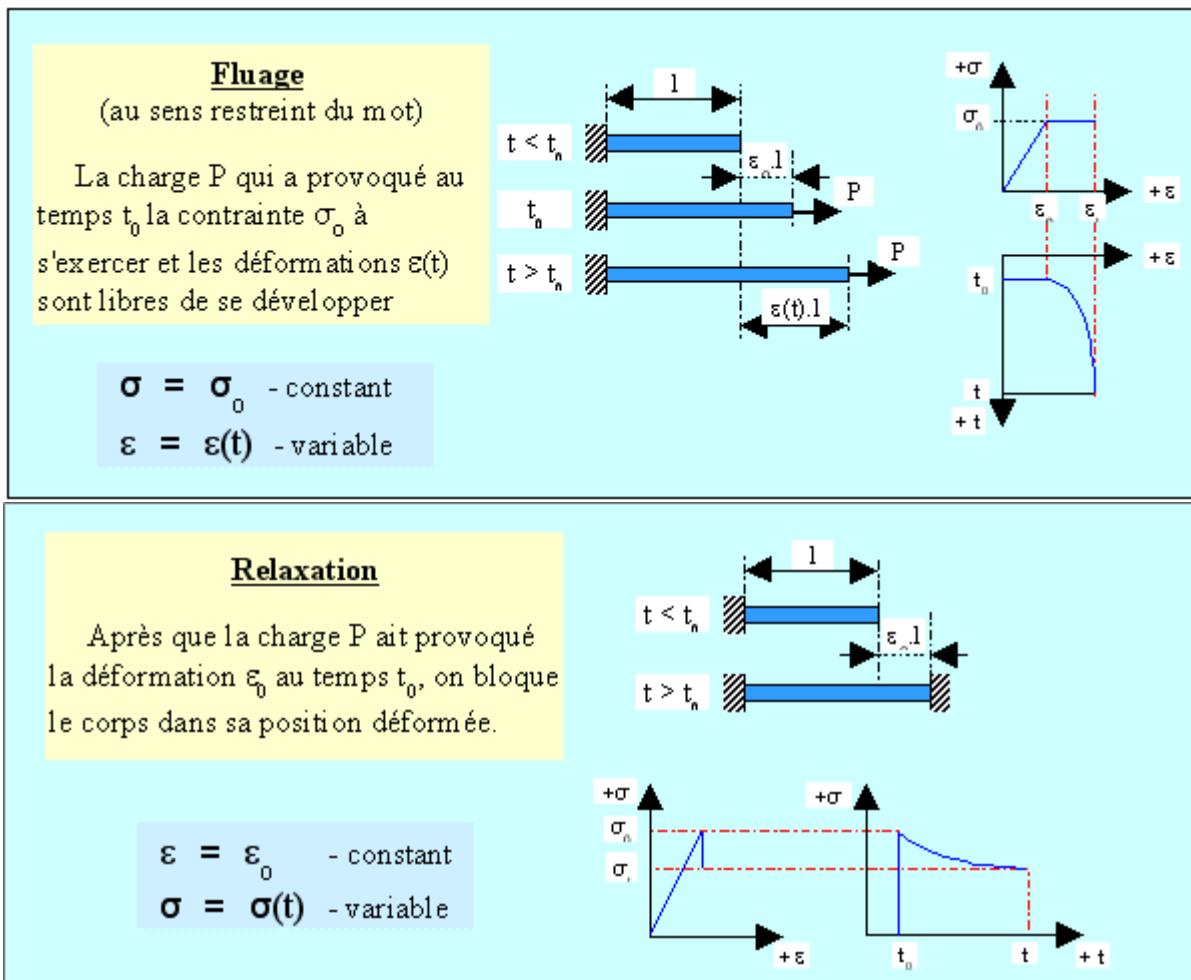


Figure I.9 schéma récapitulatif du comportement des matériaux (*fluage et relaxation*)

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

-Fluage proprement dit = Fluage sous charge constante.

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

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

c) 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.

2) La résistance

La résistance des matériaux est un des cours de la formation des ingénieurs en génie civil. Dans ce cours on apprend de façon plus détaillée les calculs du comportement des matériaux, mais

dans le cours de "Matériaux de construction" on va montrer seulement la résistance en compression et en traction.

Tableau I.2 : Schéma et méthode de détermination de la résistance à la compression selon les matériaux possibles

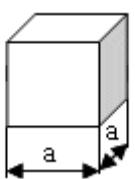
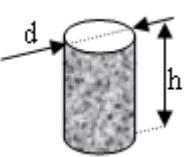
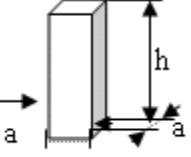
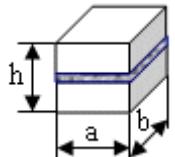
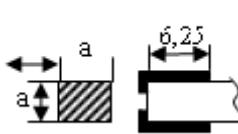
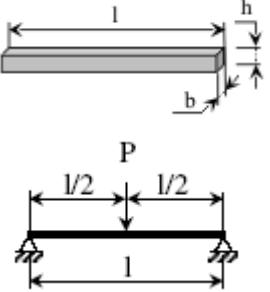
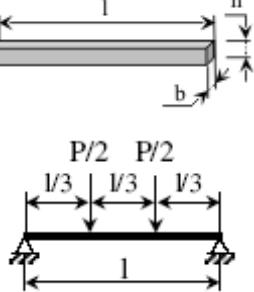
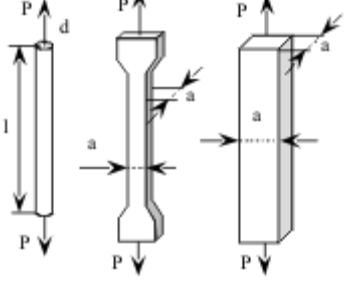
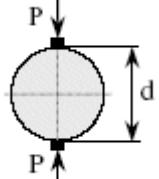
Échantillon	Schéma	Formule de calcul	Matériaux testés	Dimension des échantillons (cm)
Cube		$R = \frac{P}{a^2}$	Béton Mortier Roche naturelle	15x15x15 7,07x7,07x7,07 10x10x10 15x15x15 20x20x20
Cylindre		$R = \frac{4P}{\pi d^2}$	Béton Mortier Roche naturelle	d=15 ; h=30 d=h= 5; 7; 10; 15
Prisme		$R_{pr} = \frac{P}{a^2}$	Béton Bois	a=10; 15; 20 h=40; 60; 80 a=2; h=3
Échantillons assemblés		$R = \frac{P}{S}$	Brique	a=12; b=12,3; h=14
Moitié d'échantillon de Mortier		$R = \frac{P}{S}$	Ciment	a=4; S=25 cm²

Tableau I.3 : Schéma et méthode de détermination de la résistance à la flexion selon les matériaux possibles

Échantillon	Schéma	Formule de calcul	Matériaux testés	Dimension des échantillons (cm)
Essai de traction par flexion				
Prismatique Brique		$R_f = \frac{3Pl}{2bh^2}$	Ciment Brique	4x4x16 15x15x15
Prismatique		$R_{pf} = \frac{4l}{bh^2}$	Béton Bois	15x15x60 2x2x30
Essai de résistance en traction pure				
Cylindrique Prismatique		$R_t = \frac{4P}{\pi d^2}$ $R_t = \frac{P}{a^2}$	Béton Armature	5x5x50 10x10x80 $d_0=1$; $l_0=5$; $l \geq 10$
Cylindrique		$R_{tf} = \frac{P}{\pi dl}$	Béton	$d=15$; $l=30$ $d=16$; $l=32$

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

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

Il existe deux méthodes pour déterminer la résistance des matériaux : Méthode «Destructif » et méthode «Non destructif».

a) *Méthode destructif*

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

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

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

b) *Méthode Non destructif*

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 :

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

L'utilisation de l'auscultation sonique : Le principe de l'essai consiste à mesurer la vitesse du son à l'intérieur d'un matériau comme le béton par exemple. Cette vitesse est d'autant plus élevée lorsque le béton est plus résistant ; cela permet d'avoir un ordre de grandeur de la résistance atteinte par un béton à un âge donné.

Les granulats

CHAPITRE II :

LES GRANULATS

Chapitre IV : Les granulats

CHAPITRE II :	28
LES GRANULATS.....	28
II.1) Introduction	30
II.2) Classification des granulats selon la provenance	31
II.2.1 Granulats naturels.....	31
Les granulats de rivière (d'oued).	31
Les granulats de mer.	31
Les granulats de dunes.	31
II.2.2 Granulats concassés (de carrières)	31
II.3) Classification des granulats selon la grosseur	32
II.4) Désignation des granulats	32
II.5) Analyse granulométrique d'un granulat.....	33
II.5.1 Objectif	33
II.5.2 Illustration	34
II.5.3 Exemple de tracé d'une courbe granulométrique.....	35
II.6) Propriétés importantes des granulats intervenants dans la composition des bétons	37
II.6.1 Courbe granulométrie.....	37
II.6.2 Masse volumique apparente	37
II.6.3 Teneur en eau	38
II.6.4 Propreté des granulats	38
II.6.5 Le coefficient d'aplatissement	39
II.6.6 La forme des granulats influence :	39
II.6.7 L'état de surface des grains influence :.....	39
II.6.8 Caractéristiques mécaniques	39

CHAPITRE II : Les granulats

II.1) Introduction

Les granulats sont le constituant de base de la majorité des travaux de Génie Civil. Il est donc important de maîtriser l'ensemble de leurs propriétés (et influences); tant du point de vue de leurs élaborations, que de leurs utilisations (mise en œuvre); et ce, afin de maîtriser le coût tout en respectant les critères de qualité.

La nature et les gisements conditionnent les propriétés intrinsèques (résistance, porosité, etc..) des granulats. Par contre, les caractéristiques géométriques (granularité, forme, etc ...) et de propreté sont fonction du processus d'élaboration. Pour fabriquer des produits de qualités requises, les producteurs de granulats utilisent souvent des installations de plus en plus complexes, faisant appel à des technologies bien maîtrisées (fragmentation, séparation gravitaire, lavage,... etc.).

On appelle granulats des matériaux pierreux de petites dimensions, produits par l'érosion ou le broyage mécanique (concassage) des roches. Ce sont des matériaux inertes entrant dans la composition des bétons et mortiers. Ils constituent le squelette du béton et ils représentent, environ 80 % du poids total du béton. Ils sont constitués de Sables (Gros et Fin) et de gravier. Cependant, les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité pour qu'ils soient utilisés dans le béton. Il y a deux Intérêts d'utiliser des granulats dans le béton : le 1^{er} économique : Diminution de la quantité de liant (ciment et addition) ; et le 2^{eme} technique : Limitent les variations dimensionnelles dans le béton (les granulats sont plus rigide que la pâte de ciment)

Le granulat étant un matériau lourd, le coût de transport est relativement élevé par rapport à sa propre valeur. Les sites de production sont donc naturellement implantés à proximité des lieux de consommation. Aujourd'hui en Algérie de nombreux projets dans la construction génèrent une forte consommation de granulats. -1 million de logements -4 500 km de projets autoroutiers -6 000 km de projets ferroviaires -Nombreux ouvrages hydrauliques, -13 usines de dessalement, - La grande mosquée d'Alger et la mosquée d'Oran. L'estimation des besoins en granulat en 2014 vers 300 millions de tonnes/an ->Estimation des besoins en sable : 150 millions de tonnes/an.

En fonction des systèmes de contrôles mis en place par les producteurs, les granulats peuvent désormais même faire l'objet d'une certification (marque NF-Granulats) basé sur la norme XP P 18-545 (février 2004) au même titre que n'importe quel produit manufacturé.

II.2) Classification des granulats selon la provenance

II.2.1 Granulats naturels

Granulats roulés : ils sont les résultats de la désagrégation des roches par l'eau, le vent ou le gel. Ainsi ils se sont formés des dépôts sédimentaires de grains de grosseur allant du sable fin aux gros blocs, de natures minéralogiques différentes.

Trois catégories de granulats roulés existent dans la nature :

Les granulats de rivière (d'oued).

Les granulats de mer.

Les granulats de dunes.

N.B. : Les granulats roulés se caractérisent par leur aspect de grains arrondis et polis.



Figure II.1 différents types de granulats selon leurs natures

II.2.2 Granulats concassés (de carrières)

Ils proviennent du concassage de roches dures (granits, porphyres, basaltes, calcaires durs...etc.). Ils sont caractérisés par un aspect anguleux à arêtes vives.



Figure II.2 granulats concassés (artificiels)

Les granulats artificiels proviennent également de la transformation thermique des roches (exemple : laitier du haut fourneau) ou de démolition d'ouvrages.

II.3) Classification des granulats selon la grosseur

Selon leurs dimensions on distingue : les sables, les graviers, les cailloux, les galets et les moellons. Les dimensions soulignées sont celles de la série de base préconisée par la norme européenne (NF EN 933-2).

On distingue les familles de granulats suivantes :

- fillers 0/D où $D < 2$ mm avec au moins 70 % de passant à 0,063 mm ;
- sablons 0/D où $D < 1$ mm avec moins de 70 % de passant à 0,063 mm ;
- sables 0/D où $1 < D < 6,3$ mm ;
- graves 0/D où $D > 6,3$ mm ;
- gravillons d/D où $d > \text{let } D < 125$ mm ;
- ballasts d/D où $d > 25$ mm et $D < 50$ mm.

II.4) Désignation des granulats

Les granulats sont souvent désignés en fonction de leur plus petite et leur plus grande dimension comme suit :

Granulat

Granulat : sable ou gravier

d : dimension minimale des grains

D : dimension maximale des grains

Avec une tolérance de 15% d'élément $< d$ et 15% d'élément $> D$ si

$D > 1.58d$ et une tolérance de 20% si $D < 1.58d$

Exemples : granulats rencontrés en pratique : sable 0/3, gravier 3/8, gravier 8/15, gravier 15/25.

II.5) Analyse granulométrique d'un granulat

II.5.1 Objectif

Les propriétés physiques et mécaniques du béton dépendent de beaucoup de facteurs. Ci-dessous une figure qui présente la compacité d'un mélange de grains fins et de grains grossiers.

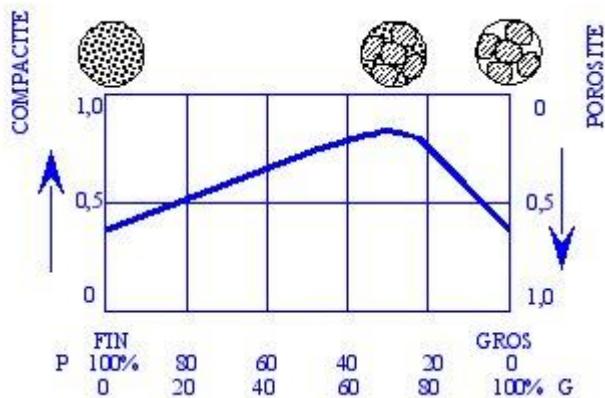


Figure II.3 Compacité et porosité d'un mélange de grains fins et de grains grossiers

Généralement on souhaite obtenir un béton résistant, étanche et durable. Pour atteindre cet objectif, il faut:

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

Par ailleurs :

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

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

Elle consiste à séparer les grains composant un granulat en classes selon leurs dimensions à l'aide d'une série de tamis, puis déterminer les pourcentages en poids des différentes classes dans le granulat.

II.5.2 Illustration

On considère un échantillon de poids P d'un granulat. L'échantillon est mis dans le tamis supérieur d'une série de tamis classés par ordre décroissant selon la dimension des mailles (du plus grand en haut au plus petit en bas). Après vibration de la série de tamis, les grains de l'échantillon se trouvent séparés selon leurs dimensions et chaque tamis retient une partie dite Refus partiel du tamis. Le refus cumulé (total) d'un tamis est la somme de tous les refus partiels des tamis qui se trouve au-dessus.

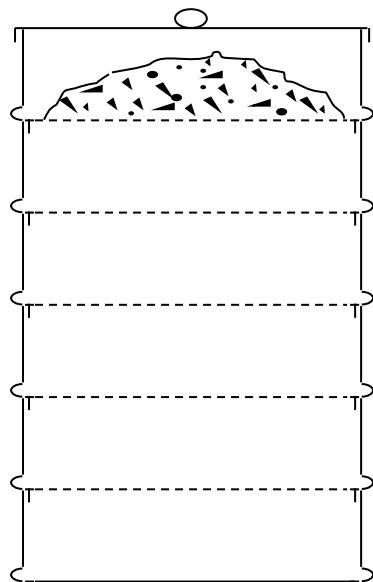


Figure II.4 série de tamis classés par ordre décroissant

La proportion (en %) du refus cumulé d'un tamis rapportée au poids total s'exprime :

$$\% \text{Refus} = \frac{\text{Poids_refus_cumulé}}{\text{Poids_echantillon}} \times 100$$

Le complément à 100% du refus cumulé est le Tamisât du tamis en considération.

$$\% \text{Tamisât} = 100\% - \% \text{Refus}$$

La courbe granulométrique est la représentation graphique du %Tamisât en fonction de la dimension de la maille du tamis. Afin de prendre en compte la grande variation des dimensions des grains dans granulat, la dimension de la maille du tamis est représentée sur une échelle logarithmique.

Ainsi la courbe granulométrique est : %Tamisât = f (log(d)), avec d : dimension de la maille du tamis.

Série de tamis utilisée dans l'essai granulométrique normalisé en (mm) :

0.08 ; 0.100 ; 0.125 ; 0.160 ; 0.200 ; 0.250 ; 0.315 ; 0.40 ; 0.50 ; 0.63 ; 0.80 ; 1.00 ; 1.25 ; 1.60 ; 2.00 ; 2.50 ; 3.15 ; 4.00 ; 5.00 ; 6.30 ; 8.00 ; 10.00 ; 12.50 ; 16.00 ; 20.00 ; 25.00 ; 31.50 ; 40.00 ; 50.00 ; 63.00 ; 80.00.

Le choix des tamis à utiliser dépend des dimensions du granulat à essayer. Pour un sable par exemple, on peut prendre la série : 0.08 ;..... ; 5.00.

II.5.3 Exemple de tracé d'une courbe granulométrique

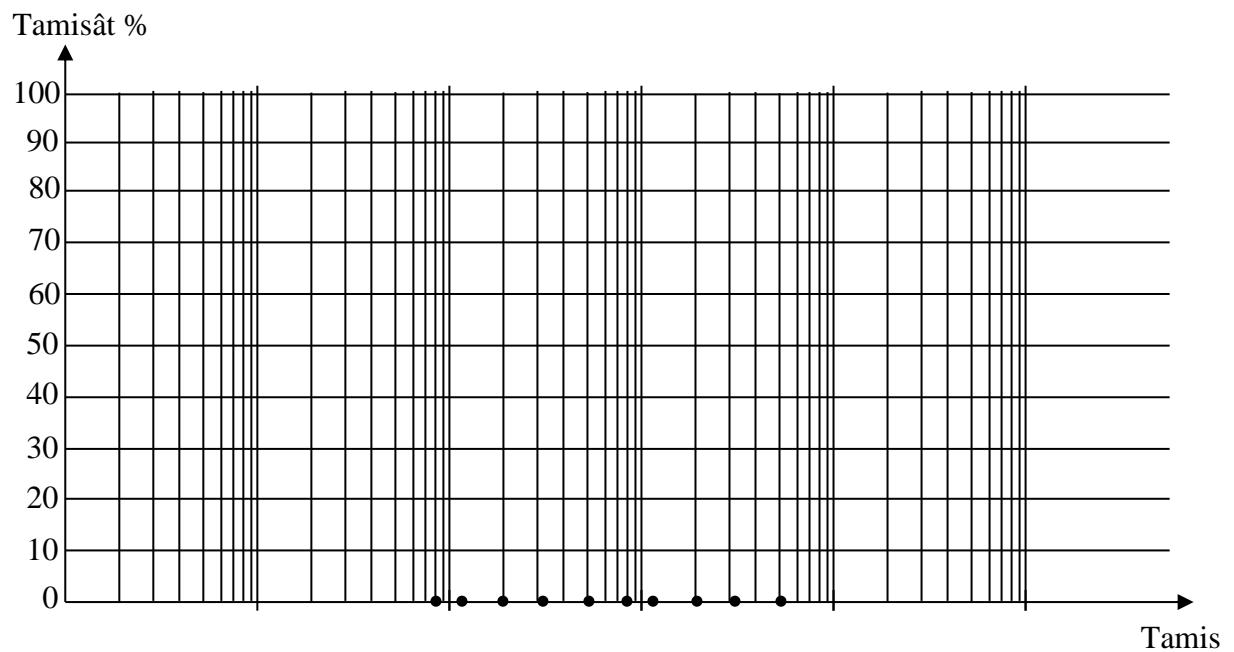
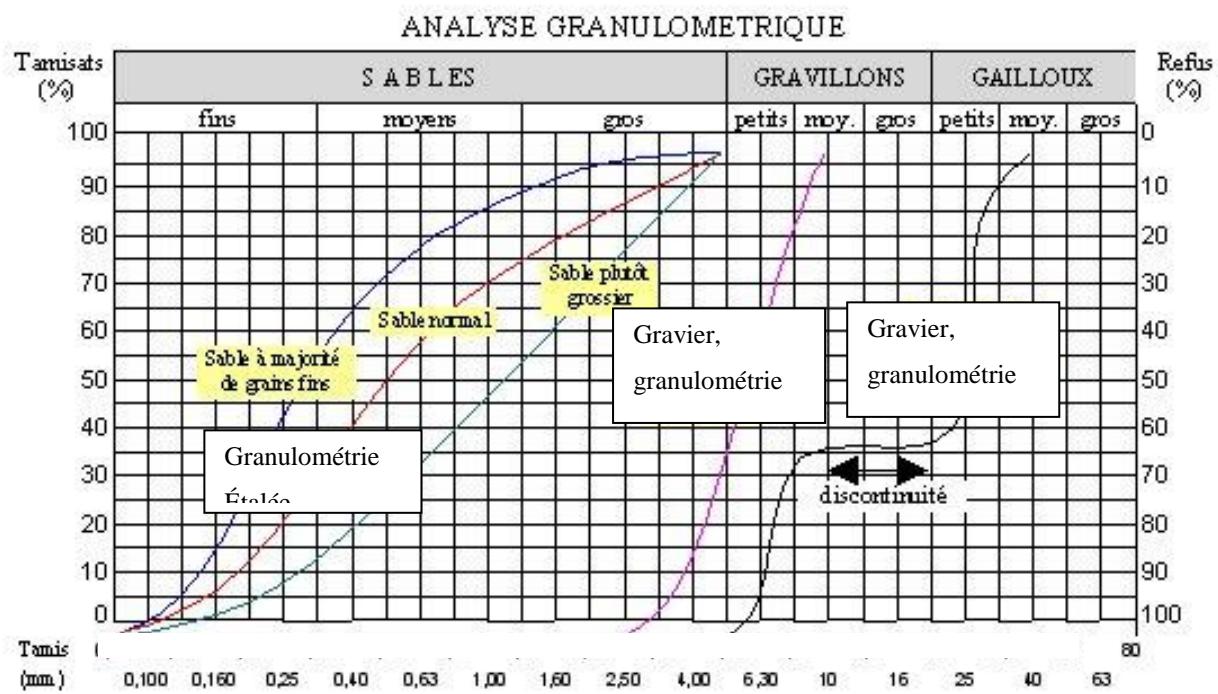
Soit à effectuer l'essai granulométrique sur un sable. Prenons un échantillon du sable pesant 1000 grs. Au regard des dimensions du sable on utilisera la série de tamis :

0.08 ; 0.125 ; 0.200 ; 0.315 ; 0.50 ; 0.80 ; 1.25 ; 2.00 ; 3.15 et 5.00mm.

Les refus partiels dans les différents tamis sont donnés sur le tableau suivant. Tracer la courbe granulométrique du granulat.

Tableau II.1 résultats d'un essai granulométrique

Tamis maille (mm)	Refus partiel (grs)	Refus cumulé (grs)	% Refus cumulé	% Tamisat
5.00	0			
3.15	10			
2.00	90			
1.25	100			
0.80	150			
0.50	150			
0.315	180			
0.200	120			
0.125	120			
0.08	80			

**Figure II.5** courbe logarithmique**Figure II.6** Quelques propriétés de la granulométrie tirées de courbes granulométriques

II.6) Propriétés importantes des granulats intervenants dans la composition des bétons

La composition d'un béton est décrite par une formule montrant les quantités relatives des différents composants qui en interviennent.

Exemple : pour 1 m³ de béton on prend :

- 350 kg de ciment
- 1100 kg de gravier
- 550 kg de sable
- 190 Litre d'eau

Dans la recherche d'une formule pour béton, on doit tenir compte que :

- Les granulats sont moins chers que les ciments (les liants en général).
- Les granulats sont souvent plus résistants que la pâte de ciment.
- Les granulats (matériau inerte) augmentent la stabilité dimensionnelle du béton (retrait, fluage).

Par conséquent, dans le composé béton, Il faut augmenter au maximum la quantité de granulats relativement à la quantité de ciment, en respectant toutefois les conditions suivantes :

Les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité (résistance mécanique).

La quantité de pâte liante doit être suffisante pour lier tous les grains et remplir les vides.

Les granulats doivent contenir différentes dimensions afin de minimiser les vides intergranulaires. Toutefois il faut essayer d'augmenter la proportion des gros granulats pour minimiser la surface spécifique du mélange granulats et par conséquent utiliser le minimum de la quantité de ciment.

II.6.1 Courbe granulométrie

C'est l'outil de base qui permet le choix de la composition d'un béton performant ayant les caractéristiques citées en haut.

II.6.2 Masse volumique apparente

Les quantités des granulats intervenant dans une composition de béton, sont données en terme de masses (masses de granulats secs).

En pratique dans la fabrication, on compose le béton très souvent en mesurant des volumes au lieux de masses (exemple : 1 brouette, 2 brouettes...etc). Il est ainsi important de connaître la masse volumique apparente des granulats :

$$\rho_{apparente} = \frac{M}{V_{apparent}}$$

M : masse d'un échantillon de granulat
de volume apparent $V_{apparent}$

Remarque : Cette méthode de composition en volume présente des erreurs certaines à cause du foisonnement. En effet, La masse volumique apparente peut changer beaucoup pour un même granulat en fonction de sa compacité (foisonnement).

II.6.3 Teneur en eau

La teneur en eau d'un granulat est le rapport du poids d'eau contenu au poids des grains composant le granulat

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

E = Poids d'eau dans le matériau.

P_s = Poids du matériau sec.

P_h = Poids matériau humide

Si W est exprimé en % :

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

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

II.6.4 Propreté des granulats

Les granulats employés pour le béton peuvent contenir des impuretés (argile, matières organiques...etc) qui perturbent l'hydratation du ciment et entraînent une mauvaise adhérence entre les granulats et la pâte. Ceci se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on les frotte entre les mains. Le degré de propreté est déterminé à l'aide de l'essai d'équivalent de sable. Les granulats qui ne sont pas propres doivent être lavés avant l'utilisation.

II.6.5 Le coefficient d'aplatissement

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

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

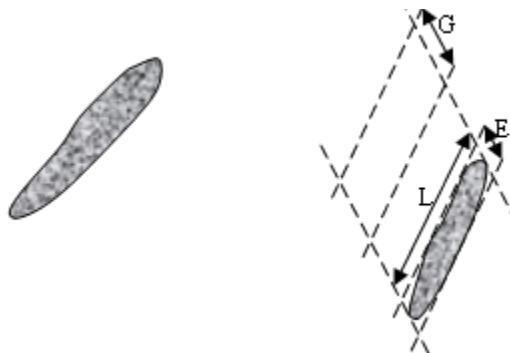


Figure II.6 : forme et dimensions d'un granulat

Dans les mêmes conditions $L \leq G \leq E$, on peut déterminer aussi :

- l'indice d'allongement $\beta = \frac{G}{L} \leq 1$
- l'indice d'aplatissement $\alpha = \frac{E}{G} \leq 1$

II.6.6 La forme des granulats influence :

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

II.6.7 L'état de surface des grains influence :

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

II.6.8 Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques des granulats sont déterminées par des essais tentant de reproduire certaines sollicitations propres à des usages spécifiques des granulats, par exemple le degré d'usure pour les granulats utilisés pour les bétons routiers. C'est un essai dont le principe est de reproduire, dans un cylindre en rotation, des phénomènes d'usure. Les modalités de cet essai font l'objet de la norme NF P 18-572. L'essai **Micro Deval** : Le principe de cet essai est la détermination de la résistance à la

fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. Il fait l'objet de la norme NF P 18-573. Le coefficient **Los Angeles** calculé à partir du passage au tamis de 1,6 mm, mesuré en fin d'essai, caractérise le granulat. Pour les granulats susceptibles d'être soumis aux effets du gel, on peut mesurer le coefficient Los Angeles après une série de 25 cycles gel/dégel (-25 °C, +25 °C) et le comparer au coefficient de référence.

Les liants

Sommaire

Chapitre I : Les liants minéraux

I	Introduction	44
II	Classification des liants	44
	II.1. les liants organiques.....	45
	Les liants hydrocarbonés : bitumes, goudrons ;	45
	Les résines et surtout les polymères :.....	45
	Les huiles sont employées pour leur pouvoir siccatif : huile de lin, ...etc.....	45
	II.2. Les liants minéraux.....	45
III	Les Chaux.....	46
	III.1. Chaux aérienne	47
	III.1.1. Historique	47
	III.1.2. Réaction chimique.....	48
	III.2. CHAUX VIVE	49
	III.3. Fabrication de la chaux vive.....	50
	III.3.1. Types de fours	50
	III.3.1.1 Les fours droits modernes pour la production de grandes quantités de chaux vive	51
	III.3.1.2 Le four PFR rectangulaire pour une production jusqu'à 400 tonnes de chaux vive par jour	51
	III.3.1.3 Le four PFR circulaires pour une production jusqu'à 800 tonnes de chaux vive par jour	53
	III.3.1.4 Le four PFR à fine granulométrie.....	55
	III.3.1.5 Le Four HPS pour la production de la chaux vive à basse réactivité	57
	III.2. Chaux éteinte	57
	III.2.1. Fabrication de la chaux éteinte	58
	Extincteur de pâte.....	58
	Extincteur de suspension.....	58
	III.2.2. Utilisation	60
	III.3. Chaux Hydraulique	61
	III.3.1. Historique de la chaux hydraulique.....	61
	III.3.2 Réactions chimiques.....	61
	III.3.3. Utilisation et stockage	62
	III.4 Le plâtre :	62
	III.4.1. Historique du plâtre	62
	III.4.2. Réactions chimiques.....	63
	III.4.3. Procédé de fabrication :.....	64

III.4.4. Propriétés importantes :.....	64
III.4.5. Utilisation :	64
IV Les ciments.....	66
IV.1. Introduction	66
IV.2. Principe de fabrication ciment portland	66
IV.3. Fabrication par voie humide.....	67
IV.4. Fabrication par voie sèche.....	68
IV.5. Constituants principaux et additions	71
IV.5.1. Constituants du clinker.....	71
IV.5.2 Les autres constituants des ciments.....	72
IV.5.2.1. Calcaires :.....	72
IV.5.2.2. Laitier granulé de haut fourneau :	72
IV.5.2.3. Cendres volantes (V ou W) :	72
IV.5.2.4. Schistes calcinés :.....	73
IV.5.2.5. Fumée de silice :	73
IV.5.2.6. Fillers :	73
IV.6. Les principales catégories de ciment.....	73
IV.6.1 Classification des ciments en fonction de leur composition	73
IV.6.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale	74
IV.7. Hydratation du ciment portland	77
IV.7.1. Chronologie de l'hydratation	77
IV.7.2. Hydratation des C3S (Alite) et C2S (Bélite).....	77
IV.7.3. Hydratation du C3A (Célite 2) et effet du gypse (sulfate de calcium).....	78
IV.7.4. Hydratation du C4AF (Célite 1).....	78
3.2. Produits d'hydratation	78

CHAPITRE III Les Liants Minéraux

I Introduction

Un liant est un produit qui sert à agglomérer une masse solide, des particules solides sous forme de poudre ou de granulats. Les liants rentrent dans la fabrication des bétons, des mortiers et même des peintures, des colles, des mastics...etc. Si l'on fournit à un liant la quantité d'eau voulue, on déclenche des réactions chimiques exothermiques (dégagement de chaleur) dénommées hydratation. Remarquons tout d'abord que ces phénomènes se produisent entre un liquide, l'eau et un solide, le grain du liant. On comprend facilement que l'hydratation est d'autant plus rapide et plus complète que la surface des grains solides est grande (l'importance de la finesse du liant). On peut admettre que le siège des différentes réactions se trouve aux surfaces de contact entre le liquide et le solide. L'hydratation ne gagne que très lentement l'intérieur des grains de liant. Extérieurement, l'hydratation se manifeste par deux phénomènes principaux : La prise et le durcissement.

La prise : Les molécules hydratées en surface forment un réseau suffisamment dense pour que le mélange perde sa plasticité et cesse d'être ouvrable.

Le durcissement : C'est le phénomène qui suit la prise. Après s'être figée, la pâte de ciment va se solidifier au fil du temps. Le durcissement intéresse le développement même de toutes les caractéristiques requises par le rôle final dévolu aux mortiers et bétons.

La durée de chacune de ces phases dépend de la nature du liant et de nombreux autres facteurs parmi lesquels on trouve toujours la finesse de mouture.

II Classification des liants

Selon leur composition, les liants peuvent être classés en deux grandes familles : les liants organiques et les liants minéraux ;

- Les liants minéraux sont généralement obtenus par traitement à haute température de matière minérale, et font prise en présence d'eau. Le carbone ne s'y rencontre que sous la forme oxydée de CO₂ (carbonate).

- Les liants organiques sont synthétisés par des organismes vivants, ou par la science de l'homme, au départ de matière minérale ou de matière organique préexistante. Leur mode de prise est complexe, et le carbone s'y rencontre principalement sous la liaison $\equiv\text{C}-\text{H}$.

II.1. les liants organiques

Les liants hydrocarbonés : bitumes, goudrons ;

Les résines et surtout les polymères :

Les huiles sont employées pour leur pouvoir siccatif : huile de lin, ...etc.

II.2. Les liants minéraux

Les liants minéraux sont des poudres finement broyées résultant de transformation de roches. Mélangées à l'eau, ces poudres forment une pâte plastique qui durcie avec le temps suite à des réactions chimiques. L'argile ou la terre argileuse est disponible à l'état naturel et est employé dans des mortiers de terre ou des bétons de terre. D'autres sont obtenu par calcination. D'après Louis Vicat, la chaux, la silice, l'alumine, et la magnésie sont les principes essentiels dont se composent les gangues qui lient les matériaux employés dans les constructions. Ces principes élémentaires qui combinés en proportions diverses constituent les composés connus dans l'art de bâtir sous les noms de chaux hydrauliques, ciments, et pouzzolanes composées qui concourent à la formation par voie humide des gangues qui lient les agrégats appelés mortiers et bétons. Dans ces gangues la silice joue le rôle d'acide et engendre des silicates dont les autres principes ensemble ou séparément deviennent les bases. La chaux, la silice, l'alumine et la magnésie ne se présentent pas isolées et à l'état chimique dans la nature.

L'art consiste donc à tirer une partie des produits naturels entrent en proportions considérables pour arriver le plus économiquement possible au but recherché ; ces produits sont d'une part les pierres calcaires pures ou argileuses ou magnésiennes et de l'autre les argiles, les sables et les *substances plutoniques* ou *neptuniennes* résultant tantôt des déjections volcaniques tantôt de la décomposition spontanée et séculaire de certaines roches.

Selon leur mode de durcissement, les liants obtenus par calcination peuvent être classés en deux familles :

- les liants aériens : durcissement à l'air dû à une réaction de carbonatation : (Exemples : plâtre, chaux aérienne, liants magnésiens.) ;

- les liants hydrauliques : durcissement en milieux humides ou dans l'eau dû à une réaction d'hydratation de silicates ou d'aluminates : (Exemples : chaux hydraulique, ciment prompt, ciments Portland, laitiers...etc.)

III Les Chaux

Elles résultent de la cuisson de roches calcaires à une température environ 1000°C.

Les roches calcaires naturelles contiennent souvent des impuretés en particulier argileuses, selon le degré de pureté des calcaires utilisés on peut avoir de la chaux aérienne ou hydraulique.

La chaux est un oxyde de calcium de formule brute CaO. Il s'agit d'une espèce minérale naturelle rare, de maille cubique (ou isométrique), qu'il est possible d'observer en petites masses blanches avec les éjectas transformés à haute température.

Mais le terme désigne surtout une matière sèche alcaline ou fortement basique, facilement poudreuse et hydrophile, de couleur blanche ou blanchâtre, obtenue par calcination du calcaire, fabriquée autrefois artisanalement dans un four à chaux, puis industriellement dans divers fours modernes

D'un point de vue chimique, la matière fabriquée par l'industrie, est un oxyde de calcium avec plus ou moins d'oxyde de magnésium et des impuretés à base de carbonates et d'hydroxydes de calcium ou magnésium, d'argiles, de divers silico-aluminates, etc. Ainsi la désignation usuelle et traditionnelle de la matière chaux peut englober différents corps chimiques proches de ce premier produit. On les distingue dans le langage courant, par exemple, selon leurs utilisations anciennes et spécifiques dans la construction ou le bâtiment :

La chaux vive est le produit direct de la thermolyse ou calcination du calcaire, principalement de l'oxyde de calcium (CaO) ; c'est la matière basique qui permet par chauffage de rendre caustique la soude ou carbonate de sodium des anciens chimistes ;

La chaux éteinte est obtenue après la réaction complète de la chaux vive avec de l'eau et un séchage rigoureux. Cette base, hydroxyde caustique peu corrosif, très peu soluble dans l'eau, est constituée d'hydroxyde de calcium, Ca(OH)₂. D'un point de vue minéralogique, il s'agit de l'espèce minérale naturelle nommée « portlandite » ;

Les chaux aériennes se répartissent en : chaux grasses*, obtenues à partir de calcaires très purs ou contenant de 0,1 à 1 % d'argile et chaux maigres*, obtenues à partir de calcaires contenant de 2 à 8 % d'argile. Composant de base de mortier, qualifié pour sa prise lente au gaz carbonique de l'air, car elle réagit avec le CO₂ de l'air ;

La chaux hydraulique, liant de chaux du commerce, proche d'un ciment de chaux qui durcit à l'eau, contient en plus des silicates et des aluminates, car elle est fabriquée à partir de calcaires argileux. Elle est appelée « hydraulique » pour sa première prise : elle durcit en présence d'eau vive avant d'être plus ou moins lentement renforcée à l'air par carbonatation ;

La chaux désigne aussi le matériau final de chaulage, la matière ou liant « ayant fait prise » après utilisation. Bien que ce ne soit que le liant, on parle d'un mur à la chaux, mais chimiquement la chaux en question est majoritairement redevenue du calcaire (principalement du carbonate de calcium). Il existe aussi la chaux dolomitique ou chaux magnésienne, elle aussi utilisée depuis des siècles, à base de dolomie ou de calcaire magnésien.

Remarque :

*La dénomination chaux grasse/chaux maigre est venue de ce que les chaux maigres augmentent peu de volume lorsqu'on les réduit à l'état de pâte tandis que les chaux grasses donnent un volume plus important, on dit qu'elles foisonnent beaucoup plus. De même les chaux grasses forment avec la même quantité de sable un mortier plus gras que lorsqu'on emploie des chaux maigres.

Pendant longtemps on a appelé « chaux maigres » celles qui avaient la propriété de durcir dans l'eau et « chaux grasses » celles qui n'avaient pas cette propriété. La distinction, chaux aérienne/chaux hydraulique est venue du fait que certaines chaux maigres ne sont pas hydrauliques².

À partir de 5 % d'argile, on parle de calcaire argileux. Au-delà de 20 % d'argile, les calcaires argileux sont impropre à la confection de la chaux. À partir de 35 %, la roche devient tendre et friable, c'est une marne. À partir de 50 %, la marne devient plastique. Avec 65 % d'argile, elle devient une argile calcaire. Les argiles calcaires, impropre à la confection des chaux mêmes hydrauliques, seront employées calcinées et broyées, dans les ciments naturels (le ciment prompt, improprement appelé ciment romain, ainsi que les premiers ciments Portland), ou dans la préparation du clinker pour les ciments artificiels (dits « ciments Portland »).

III.1. Chaux aérienne

III.1.1. Historique

La chaux est apparue dans le courant du 2^{eme} millénaire avant notre ère. Elle est obtenue par la cuisson entre 850°C et 1000°C de roche calcaire pure ou de coquillages marins. Il est intéressant de noter que le verbe « calciner », qui signifie brûler à haute température a précisément pour origine étymologique le terme latin « calx, calcis » désignant la chaux.

La chaux « vive » obtenue par « calcination » est « éteinte » par adjonction d'eau, et fournit « La chaux hydratée » ou « La chaux aérienne ». La chaux hydratée ne peut faire prise qu'au contact de l'air, en réagissant avec le gaz carbonique ambiant (d'où son nom de « chaux aérienne »).

En un premier temps, la chaux sert surtout à la confection d'enduit. Elle entre avec le plâtre et la poudre de marbre, dans la composition des stucs, que les architectes grecs utilisaient dès le 7e siècle avant J.-C. pour couvrir l'aspect rude des murs construits en pierre calcaire ou en tuf. Ces murs étaient montés en blocs de pierre ajustés sans mortier, ou en pierres ébauchées, liées par un mortier fait de terre et d'argile.

Ce sont les Romains qui, dès le 2e siècle avant notre ère, vont développer l'usage du mortier de chaux et répandre la technique dans toutes les régions de l'empire. Ils ont systématisé l'usage du mortier pour assurer les joints des appareils de brique ou de pierre. La technique est toujours en usage aujourd'hui.

La porosité du mortier est donc un facteur essentiel, à contrôler lors de la mise en œuvre. Les praticiens insistent sur les justes proportions à respecter : trois volumes de sable fin pour un volume de chaux, ou cinq pour deux, selon la qualité du sable.

III.1.2. Réaction chimique

La chaux aérienne s'obtient à partir de roches calcaires contenant au plus 10% d'impuretés argileuses.

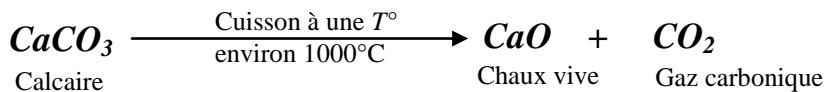


Figure III.1 : Pierres de calcaires et Morceaux de la chaux vive

La chaux vive (Oxyde de Calcium) est avide d'humidité. Elle réagit au contact de l'eau avec un fort dégagement de chaleur puis se transforme en une poudre blanche appelée chaux éteinte.



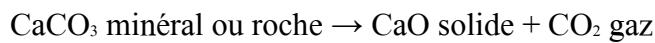
Figure III.2 : Morceaux de chaux vive aspergés à l'eau et Poudre de la chaux éteinte

III.2. CHAUX VIVE

L'oxyde de calcium (CaO, chaux vive) est obtenu par calcination au-delà de 900 °C des minéraux calcite ou aragonite ou à défaut des roches calcaires ou craies qu'ils contribuent à former avec d'autres minéraux et impuretés. La « pierre à chaux » désigne communément la matière cuite dans le four.

À noter qu'il existe des calcaires magnésiens ou dolomies avec lesquels de la chaux magnésienne ou dolomitique recelant un mélange (CaO , MgO) de chaux et de périclase (MgO avec des traces de Fe) est fabriquée.

La calcination du calcaire est accompagnée d'un fort dégagement du gaz CO₂. Cette réaction s'accompagne aussi d'une perte massique pouvant atteindre 45 % et volumique jusqu'à 15 %, correspondant à la perte en CO₂ selon le schéma :



III.3. Fabrication de la chaux vive

La cuisson d'une pierre calcaire de grande pureté s'effectue dans des fours entre 900 et 1000 °C; à la fin de ce cycle, la pierre est défournée, refroidie, calibrée et expédiée soit sous forme de chaux vive soit sous forme d'hydrate, en roche ou poudre.

III.3.1. Types de fours

Il existe deux types de fours, les fours droits et les fours rotatifs :

Les fours droits anciens, typiques d'un procédé par lots, étaient conçus pour l'empilement successif de couches de coke et de pierres à chaux. Ils n'avaient au mieux qu'une capacité de quelques dizaines de tonnes. Les fours droits aux combustibles liquides type fuel, ou gazeux type gaz naturel, permettent un meilleur rendement thermique par récupération de chaleur et développent des capacités exceptionnelles pour un procédé toujours discontinu, soit 150 à 500 tonnes par jour ;

Actuellement les fours verticaux qui représentent le type de four le plus répandu dans le monde, sont constitués d'une enveloppe cylindrique en acier garnie intérieurement de revêtements réfractaires. Leur hauteur atteint couramment 30 mètres pour un diamètre de 7 m. Les fours droits produisent jusqu'à 800 tonnes de chaux vive par jour.

Les pierres calcaires d'une granulométrie comprise entre 40 et 120 mm, sont introduites au sommet du four. Le combustible qui en assure la calcination est soit mélangé au calcaire si il est solide, soit introduit par des lances au niveau du ventre du four dans le cas de combustibles gazeux ou liquides.

Un courant d'air frais est propulsé au niveau inférieur du four ; dans la partie haute le calcaire est préchauffé et descend lentement pour être calciné dans la partie médiane où a lieu la décarbonatation à une température de l'ordre de 900 °C. Dans la partie basse, la chaux produite est refroidie au contact de l'air frais soufflé.

Les fours à cycles alternés associent deux fours verticaux fonctionnant alternativement. Le combustible qui peut être gazeux, liquide ou solide est introduit alternativement à chaque cycle sur chaque four, ainsi que l'air nécessaire à la combustion. Les flux ainsi inversés à chaque cycle favorisent l'homogénéisation de la cuisson de la pierre et la régularité de la qualité.

Plus performants, ils permettent d'optimiser le rendement énergétique de la fabrication et de produire de plus grandes. La chaux est alors extraite et déversée sur des bandes transporteuses ou directement dans des camions ou des wagons.

III.3.1.1 Les fours droits modernes pour la production de grandes quantités de chaux vive

Le four à échange de chaleur et à courant parallèle ou four à flux parallèle régénératif (PFR) dispose de deux cuves reliées par un carreau de liaison. Les deux cuves fonctionnent ensemble : dans l'une, le produit est calciné, dans l'autre, la pierre est préchauffée. Dans la cuve de calcination, le calcaire est décarbonaté et transformé en chaux selon le procédé du courant parallèle. Les gaz chauds de cette cuve passent ensuite à travers le carreau dans l'autre cuve et y préchauffent à contre-courant le calcaire dans la partie supérieure. A intervalles réguliers, le sens du courant des gaz est inversé, ce qui permet le préchauffage régénératif du calcaire, (la pierre dans la zone de préchauffage du four se comportant en échangeur de chaleur), et l'utilisation optimale de la chaleur des gaz du four.

Le principe de la calcination à courant parallèle est idéal pour la fabrication de chaux vive à haute réactivité. Ce four permet de produire jusqu'à 800 tonnes de chaux vive par jour. Les combustibles utilisés pour la calcination peuvent être gazeux, liquides ou solides finement broyés et combinés de différentes façons.

Tableau III.1. Types de fours pour la production de la chaux vive

TYPES DE FOUR	FOUR PFR RECTANGULAIRE	FOUR PFR CIRCULAIRE	FOUR A FINE GRANULOMÉTRIE
TYPE DE FOUR	E1 – E6	R1 – R5	F1 – F3
CAPACITÉ (tonnes par jour)	100 – 400	300 – 800	200 – 400
CALIBRE DE LA MATIÈRE PREMIÈRE (mm)	30 – 120	30 – 160	15 – 40
CONSOMMATION CALORIFIQUE (kJ/kg) (kcal/kg)	3390 – 3650 810 – 870	3390 – 3650 810 – 870	3310 – 3560 790 – 850
PRODUIT PRINCIPAL	Chaux vive à haute réactivité	Chaux vive à haute réactivité	Chaux vive à haute réactivité

III.3.1.2 Le four PFR rectangulaire pour une production jusqu'à 400 tonnes de chaux vive par jour

C'est le modèle le plus économique et le plus simple du four PFR: deux cuves à section rectangulaire ou hexagonale sont disposées l'une à côté de l'autre. A travers le carreau de liaison, les gaz de combustion passent d'une cuve à l'autre. La section rectangulaire facilite la

fabrication du four, puisqu'elle impose moins de contraintes au niveau de la structure métallique et des réfractaires. Ce four simple et économique est utilisé en général pour des débits jusqu'à 400 tonnes de chaux vive par jour.

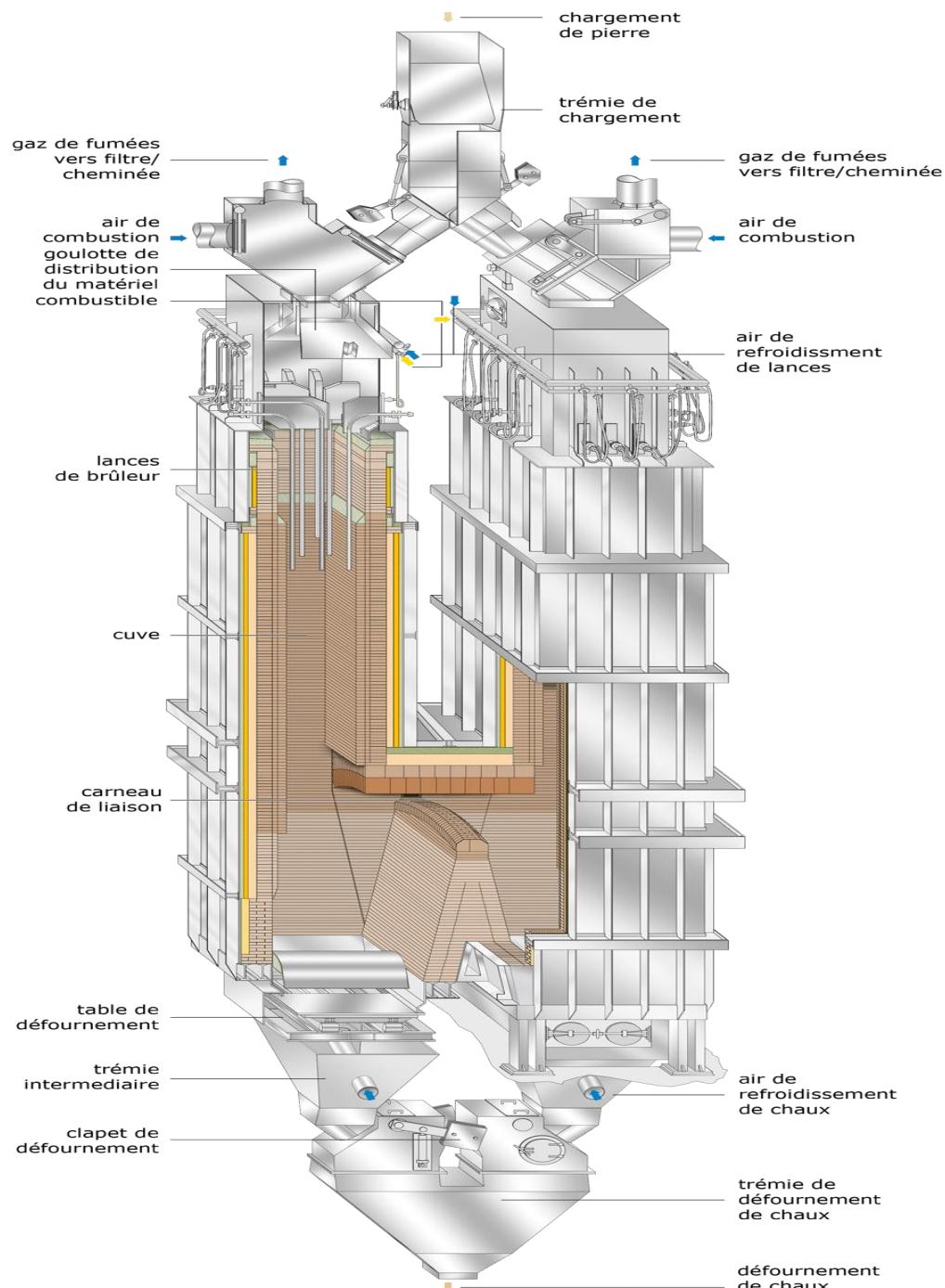


Figure III.3. Schéma d'un four PFR rectangulaire

III.3.1.3 Le four PFR circulaires pour une production jusqu'à 800 tonnes de chaux vive par jour

Pour la calcination de quantités importantes (300 à 800 tonnes) par jour, les fours circulaires disposent d'une section de cuve circulaire et de carnaux de gaz circonférentiels dans lesquels sont collectés les gaz de combustion de la cuve de calcination avant de passer via le carneau dans la cuve de préchauffage. Ici, les gaz chauds circulent également par des carnaux périphériques sur toute la circonférence de la cuve. La section de cuve circulaire et la distribution des gaz sur toute la circonférence des cuves assurent une distribution homogène de la chaleur dans ces grands fours, ce qui est indispensable pour produire une chaux d'excellente qualité.

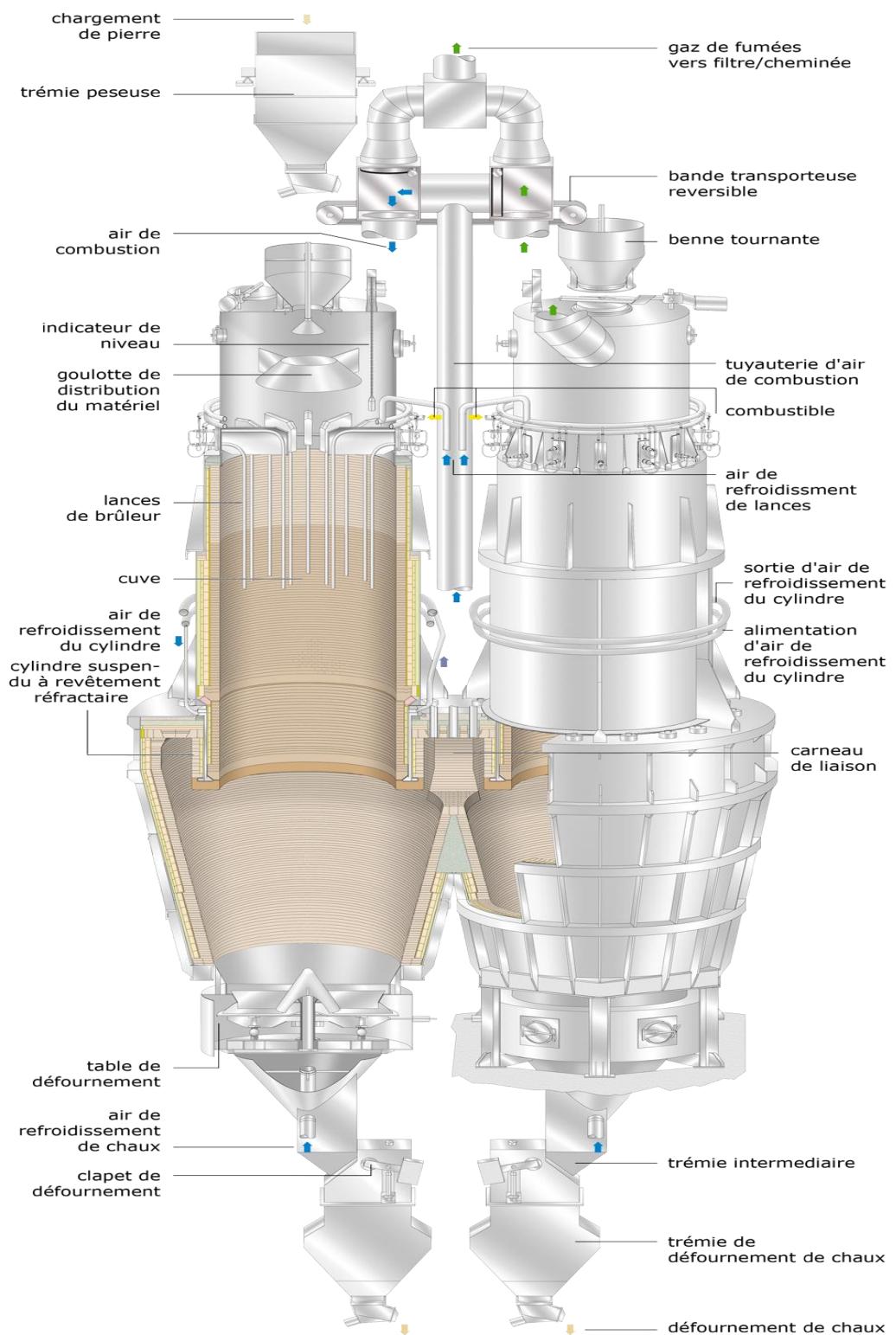
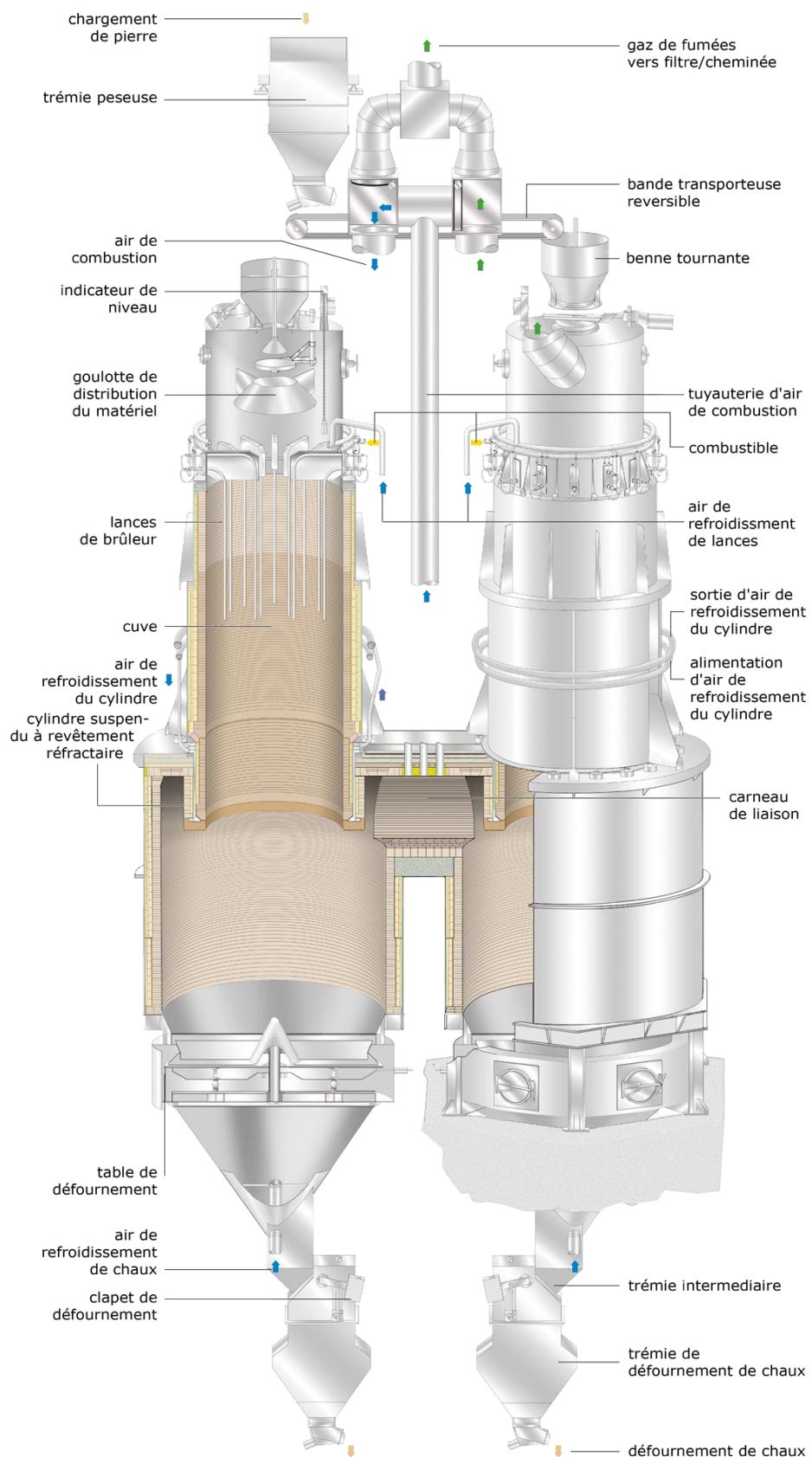


Figure III.4. Schéma d'un four PFR circulaire

III.3.1.4 Le four PFR à fine granulométrie

La géométrie et le chargement particuliers en pierres de ce four assurent une distribution optimale de la chaleur durant la calcination de la matière à fine granulométrie. Ce type de four utilise le principe du four PFR : la calcination du calcaire dans une cuve, le préchauffage des pierres dans l'autre. Comparé aux fours rotatifs, la consommation calorifique de ce four est sensiblement plus basse. Depuis 1989, année de lancement des fours à fine granulométrie.

**Figure III.5.** Schéma d'un four PFR à fine granulométrie

III.3.1.5 Le Four HPS pour la production de la chaux vive à basse réactivité

La chaux vive à basse réactivité est utilisée pour la production de briques silico-calcaires, de briques et blocs de béton cellulaire. Avant sa construction, il n'existe aucun four vertical vraiment approprié pour la production de chaux vive à basse réactivité. Le four HPS (High Performance Shaft Kiln) produit de façon constante de la chaux vive à basse réactivité de la meilleure qualité avec un rendement énergétique optimal.

Les caractéristiques particulières du four HPS sont :

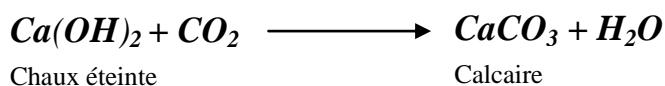
- Utilisation de brûleurs latéraux refroidis qui pénètrent dans la matière et sont réglables.
 - Ajustement précis des températures de service pour obtenir les différents niveaux de réactivité.
 - Production spécifique maximale ramenée à la section de la cuve, et de ce fait, construction très compacte.

Tableau III.2. Données techniques du four HPS

FOUR HPS – DONNÉES TECHNIQUES	
TYPE DE FOUR	H1 – H5
CAPACITÉ (tonnes par jour)	100 – 300
CALIBRE DE LA MATIÈRE PREMIÈRE (mm)	10 – 80
CONSOMMATION CALORIFIQUE (kJ/kg) (kcal/kg)	4100 – 4610 980 – 1100
PRODUIT PRINCIPAL	Chaux à basse réactivité

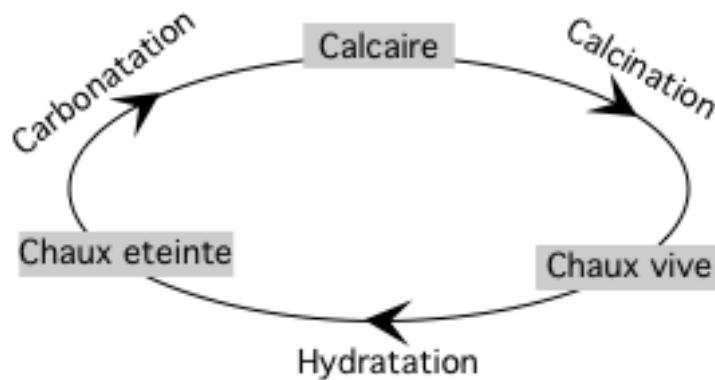
III.2. Chaux éteinte

En présence du gaz carbonique, la chaux éteinte peut faire une carbonatation et redevenir un calcaire, voir la réaction chique suivante :



Ainsi la chaux ne peut durcir qu'en contact avec l'air (gaz carbonique).

Cycle de la chaux

**Figure III.3 : Cycle de la chaux**

III.2.1. Fabrication de la chaux éteinte

L'hydroxyde (chaux éteinte) est obtenu par addition d'eau à la chaux vive dans des hydrateurs de 8 à 20 t/h. La quantité d'eau ajoutée est ajustée de façon à obtenir la chaux éteinte sous forme d'une poudre sèche. Par tonne de CaO, il faut 0,3 m³ d'eau pour l'hydratation et par ailleurs, de 0,3 à 0,4 m³ est évacué en vapeur. La température atteinte est de 110 °C.



La réactivité chimique du lait de chaux liée à la finesse de la suspension est fonction de la température d'extinction. Celle-ci doit être la plus élevée possible, avec donc un apport d'eau minimal.

Pratiquement, deux types de préparation sont utilisés :

Extincteur de pâte (avec énergie de mélange élevée) : trois à quatre parties d'eau sont mélangées à une partie de chaux, l'élévation de température est maximale et le temps d'extinction est court. L'apport d'eau est fonction de la viscosité de la pâte (couple du malaxeur) et/ou de la température ;

Extincteur de suspension : la concentration recherchée en Ca(OH)₂ du lait de chaux est comprise entre 50 et 200 g · L⁻¹ ; le capteur de température agit, en sécurité, sur l'arrivée de chaux. Ce type d'installation ([Figure III.4](#)), bien qu'ayant un rendement moindre, est plus simple et plus facile à automatiser, ce qui réduit les contraintes d'exploitation, de sécurité et d'entretien.

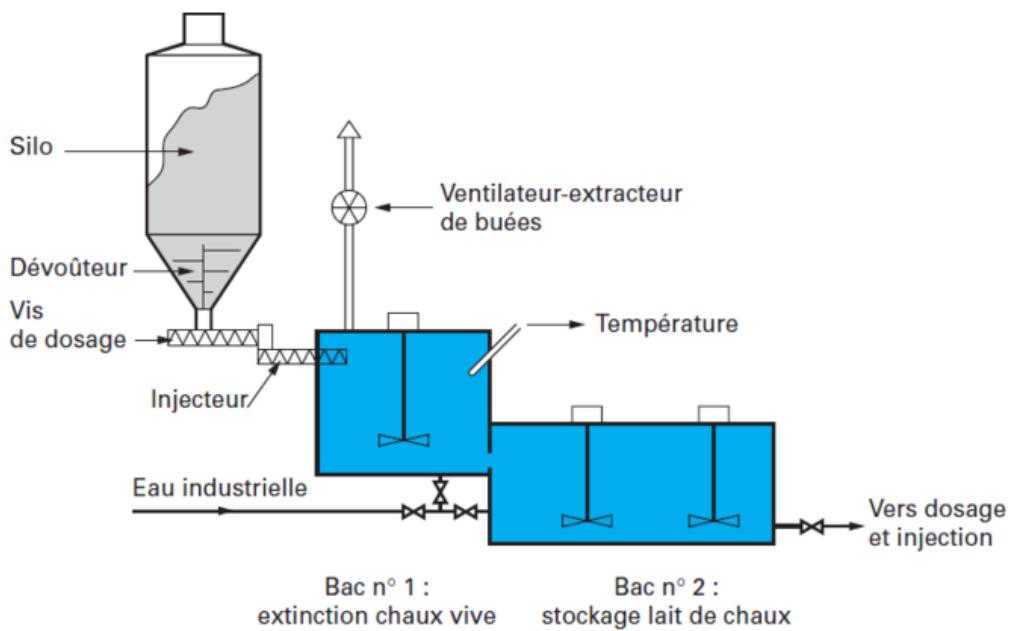


Figure III. 4. Schéma d'installation de préparation de lait de chaux à partir de la chaux vive

N.B. Il est important de noter qu'il ne faut jamais arrêter les agitateurs dans les bacs n° 1 et 2 contenant encore du lait de chaux sinon il y a un grand risque de sédimentation de la chaux avec prise en masse.

L'eau de chaux (solution saturée de chaux). Son titre, qui dépend de la température de dissolution, est d'environ 220 °F de TAC à 20 °C. Ceci correspond à une concentration en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de $220 \times 7,4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, soit $1,6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. L'eau de chaux est préparée à partir de lait de chaux dans un appareil appelé saturateur, qui assure à la fois : la mise en solution de la chaux ; l'élimination des impuretés et des boues de carbonates.

Il existe deux types de saturateurs, le saturateur statique et le saturateur à turbine :

Le **saturateur statique** permet d'obtenir une solution saturée de chaux, en faisant passer de l'eau à travers un lit de chaux, pendant un temps de contact suffisant pour permettre la saturation de cette eau.

Le lait de chaux est préparé en discontinu. Il est injecté par gravité ou par pompage à la partie inférieure du saturateur après qu'on ait, au préalable, baissé le niveau dans ce dernier et évacué les boues de carbonate et les impuretés par la vidange. Cette recharge en lait de chaux s'effectue en général toutes les 24 heures. Après un temps de décantation, l'eau à saturer arrive lentement à la partie inférieure de l'appareil et l'eau saturée est reprise en surface. Le saturateur peut débiter, sous forme d'eau de chaux saturée, 1,3 à 1,6 kg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, par heure et par mètre carré de surface.

le **saturateur à turbine** ([Figure III.5](#)) permet d'obtenir, pour une même surface, un débit d'eau de chaux plus élevé que celui du saturateur statique, soit 3,2 à 4 kg de Ca(OH)₂, par heure et par mètre carré de surface. Le lait de chaux est préparé en continu ou en discontinu, mais distribué obligatoirement en continu. Il est injecté par gravité ou par pompage dans la tuyère de recyclage des boues ou dans la tuyauterie d'arrivée d'eau de dissolution.

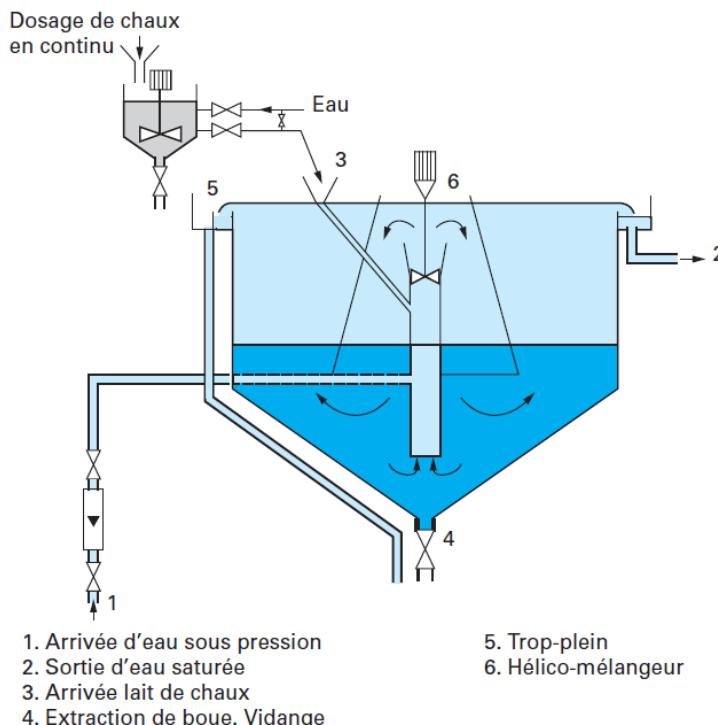


Figure III.5. Schéma d'un saturateur avec turbine

Le recyclage est effectué par hélicomélangeur (7) placé à la partie haute de la tuyère dans laquelle arrive également l'eau à saturer (1) et où s'effectue le mélange intime eau + lait de chaux + boues de carbonates. L'appareil fonctionne avec un lit de boues dont le niveau est réglé par le seuil des concentrateurs où se déversent ces boues.

L'extraction de ces dernières s'effectue habituellement par les tuyauteries des concentrateurs (5) et exceptionnellement par la vidange (4) (boues lourdes).

III.2.2. Utilisation

La chaux aérienne n'est ainsi pas utilisée comme liant. Cependant elle peut être utilisée comme composant additif à certains matériaux de construction (mortiers, bétons, enduits, peintures...etc.), afin d'améliorer certaines de leurs propriétés. Dans la construction routière, on utilise parfois la chaux vive mouluue pour :

Assèchement : La chaux vive est épandue sur les sols humides afin de diminuer leur teneur en eau et faciliter ainsi le travail des engins de terrassement.

Stabilisation : La chaux vive, mélangée aux sols argileux, se combine chimiquement avec ces derniers. L'argile passe alors d'une consistance plastique à une consistance grenue, stable et très peu sensible à l'eau.

Stockage : La chaux vive doit être stockée dans des dépôts ou sacs hermétiques. La chaux éteinte est moins sensible mais elle doit être stockée dans des dépôts ou sacs fermés.

III.3. Chaux Hydraulique

III.3.1. Historique de la chaux hydraulique

Il est apparu très tôt que des adjonctions permettaient d'améliorer la prise et la stabilité du mortier de chaux, en particuliers de la rendre insensible à l'action de l'eau. L'enduit, assurant l'étanchéité des citernes construites à Jérusalem au 10e siècle avant notre ère, est fait de la chaux hydraulique.

Dans l'île grecque de Santorin, on ajoutait au mélange chaux-sable une quantité de poudre volcanique qui conférait au mortier la propriété d'être stable à l'eau, et de durcir partiellement sans apport de gaz carbonique. Cette caractéristique appelée « hydraulicité », peut être obtenue au départ d'autres matériaux, notamment la brique ou la tuile pilée.

Les Romains ont pratiqué à grande échelle l'adjonction à la chaux d'argile cuite et surtout de pouzzolane. La plus grande stabilité à l'eau des matières ainsi obtenues est due à une réaction plus ou moins lente entre la chaux et la silice colloïdale et l'alumine contenues dans les produits mentionnés, avec formation d'hydrosilicates et d'hydro alumates dont la nature est comparable à celle des produits qu'on obtient par hydratation des liants hydrauliques modernes.

La chaux hydraulique s'obtient à partir de roches calcaires contenant 10% à 20% d'impuretés argileuses (calcaires marneux).

III.3.2 Réactions chimiques

Au cours de la cuisson du calcaire marneux certaines molécules CaO s'allie avec les oxydes SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , contenus dans les minéraux d'argiles en formant les silicates $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, les alumates $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ et les ferrites $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ de calcium, qui durcissent à l'air comme dans l'eau. Le reste de molécules CaO s'éteint comme pour la chaux aérienne. En conséquence plus la quantité de CaO est grande la chaux est moins apte de durcir sous l'eau. Pour caractériser la capacité du durcissement hydraulique (sous l'eau) du liant on utilise habituellement le module hydraulique :

$$m = \frac{\% CaO}{\%(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3)}$$

Selon la valeur de m les liants sont classés comme suit :

$1,7 \leq m \leq 9$: Chaux hydraulique.

$1,1 \leq m \leq 1,7$: Ciment romain.

$m \geq 9$: Chaux aérienne.

La chaux hydraulique gâchée à l'eau, après durcissement à l'eau continue à durcir à l'air par carbonatation des molécules $Ca(OH)_2$ sous l'action du CO_2 qui s'infiltra dans la masse après évaporation de l'eau de gâchage.

Plus la chaux hydraulique est fine plus la prise et le durcissement sont accélérés et plus la résistance est élevée.

III.3.3. Utilisation et stockage

La chaux hydraulique est utilisée comme un liant dans la construction à la place ou avec du ciment. Comme pour la chaux aérienne la chaux hydraulique doit être stockée dans des endroits secs en dépôts ou sacs fermés.

III.4 Le plâtre :

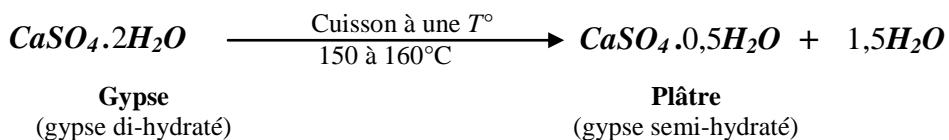
III.4.1. Historique du plâtre

Les Égyptiens ont probablement été les premiers à utiliser le plâtre, obtenu par la cuisson du gypse à 120°C. Ils s'en sont notamment servi pour le jointement des blocs de parement en marbre de la pyramide de Chéops (2600 av. J.-C.).

La température de cuisson exceptionnellement basse explique sans doute la découverte du plâtre comme liant. Le plâtre a été mis en œuvre sans discontinuer de l'antiquité à nos jours, essentiellement comme enduit intérieur ou extérieur (plâtre-chaux), mais aussi, en France, à partir du 17eme siècle, comme mortier pour monter les maçonneries de pierre où les voûtes de briques. Le marbre artificiel développé au 18eme siècle en Allemagne (stucmarmor) et en Italie (scagliola) est fait de plâtre, de colorants et de colle animale.

On appelle plâtre de construction un liant hydraulique composé principalement de gypse semi-hydraté ($CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$) qui s'obtient en chauffant le gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) à une température de 150 à 160°. La réaction chimique qui se produit est ainsi

III.4.2. Réactions chimiques



Le **gypse** naturel est habituellement appelé *pierre à plâtre*.



Figure III.6. Gypse & plâtre

Gâchée à l'eau, la poudre de plâtre ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) s'hydrate par adjonction de 1,5 molécule d'eau pour redevenir gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Les particules de gypse s'accumulent et adhèrent les unes aux autres en provoquant un épaississement et une prise de la pâte, ce qui donne à la fin un bloc solide. Laissée à l'air libre, un durcissement supplémentaire s'effectue par dessèchement et une cristallisation plus complète ce qui conduit à la formation d'une pierre à plâtre.

Le durcissement du plâtre peut être accéléré par séchage mais à une température 65° pour éviter le retour à la déshydratation du plâtre.

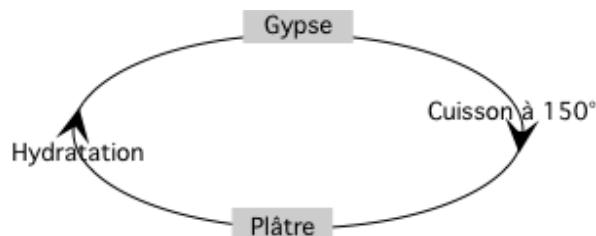


Figure III.7. Cycle du plâtre

III.4.3. Procédé de fabrication :

La fabrication du plâtre à partir de la pierre à plâtre comprend 3 étapes essentielles: le broyage, la mouture et le traitement thermique (déshydratation). Il existe plusieurs procédés pour la fabrication du plâtre de construction ; dans lesquels la mouture se fait soit avant la cuisson, après la cuisson ou en même temps que la cuisson. Cependant l'étape broyage doit être faite en premier afin d'accélérer la déshydratation. Les dimensions des grains de gypse préparé pour la cuisson doivent être au plus 40mm.

Le broyage est souvent effectué dans un broyeur à boulets ; c'est un cylindre horizontal rotatif contenant des boulets en acier. L'étape de broyage est précédée par un concassage pour réduire les dimensions des gros morceaux de gypse afin qu'ils puissent être introduits dans le broyeur. La qualité du plâtre de construction est particulièrement liée à la finesse de mouture qui est caractérisée par le refus du tamis de maille 0,2mm.

III.4.4. Propriétés importantes :

- Le plâtre de construction est un liant de prise et de durcissement rapides. Il est courant que la prise commence à partir d'environ 4mn et se termine à environ 30mn. Les temps de début de et de fin de prise peuvent être modifiés en ajoutant des adjuvants retardateurs de prise.
- Le plâtre durci est un bon isolant thermique ; il est poreux et légers (la porosité du plâtre durci peut atteindre jusqu'à 40%).
- Le plâtre se dégrade rapidement en endroits trop humides.
- Le plâtre oxyde fortement les métaux ferreux.
- Le plâtre résiste bien au feu s'il est utilisé avec ajouts qui maintiennent sa forme une fois déshydraté sous l'effet du feu, les ajouts couramment utilisés dans ce cas sont l'amidon et la silicone.

III.4.5. Utilisation :

Le plâtre est essentiellement employé comme revêtement intérieur des murs ou pour la fabrication d'éléments préfabriqués en y ajoutant des fibres végétales, de verre ou d'autres matériaux. Des exemples courants d'éléments préfabriqués sont: les plaques de cloisons (séparation à l'intérieur de maisons), de plaques de faux plafonds et les éléments décoratifs; rosaces, baguette...etc.

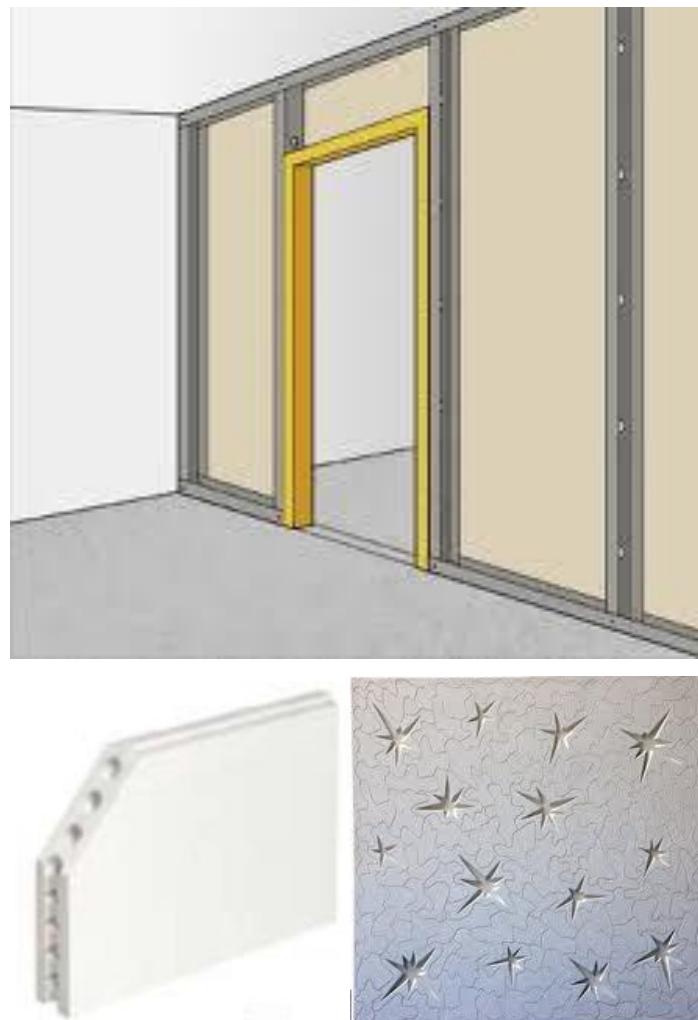


Figure III.8. Quelques éléments fabriqués du plâtre

Dans le bâtiment : matériau de finition des parois intérieures et des plafonds. Montage des galandages en briques de terre cuite (parois minces non porteuses)

Plaques au plâtre : Les plaques de plâtre sont constituées de deux plaques de carton qui prennent en sandwich du plâtre. Finition des parois intérieures, plafond, hourdage des cloisons. Préfabrication de panneaux, moins sensibles à l'action de l'eau Protection contre le feu : 6 cm = entrave la propagation du feu ; 8 et 10 cm = résistant au feu

Carreaux de plâtre. Attention : * ne pas utiliser pour des murs portants * si les blocs sont susceptibles d'entrer à de multiples reprises en contact avec l'humidité : prendre des précautions (utiliser des blocs appropriés)

Chape liquide à l'anhydrite (anhydrite + sable 0-3mm + adjuvant et fluidifiants)

- Pose sans joints de dilatation,
- Surface lisse et horizontale destinée à recevoir tous les revêtements de sol usuels.

IV Les ciments

IV.1. Introduction

Le terme « ciment » est issu du latin coementum qui signifie mortier, liant des maçonneries. Ce sens étymologique a donc été à peu près conservé ; « Portland » nom donné par le détenteur du brevet d'invention du ciment Joseph Aspdin en 1824. Parmi tous les liants minéraux, le ciment portland est le liant qui occupe la première place par sa production et son utilisation.

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

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

IV.2. Principe de fabrication ciment portland

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

- Préparation du cru
- Caisson
- Broyage et conditionnement

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

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

Le composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3), et l'oxyde de fer (Fe_2O_3). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Les matériaux se trouvent dans la nature

sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier Fe_2O_3 , l'oxyde ferrique.

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

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

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

IV.3. Fabrication par voie humide

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

IV.4. Fabrication par voie sèche

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

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

Les fours sont constitués de deux parties :

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

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

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

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

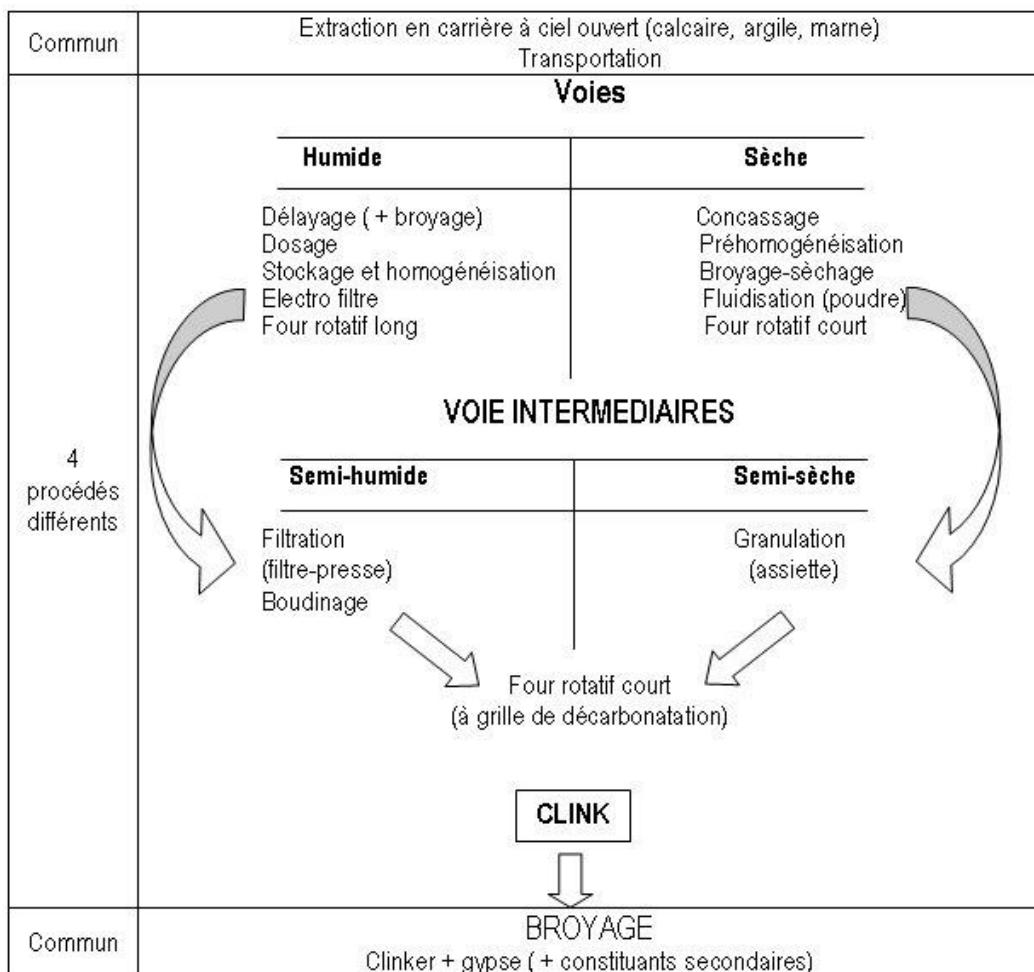


Figure III.9. Schéma récapitulatif des quatre méthodes de fabrication du ciment

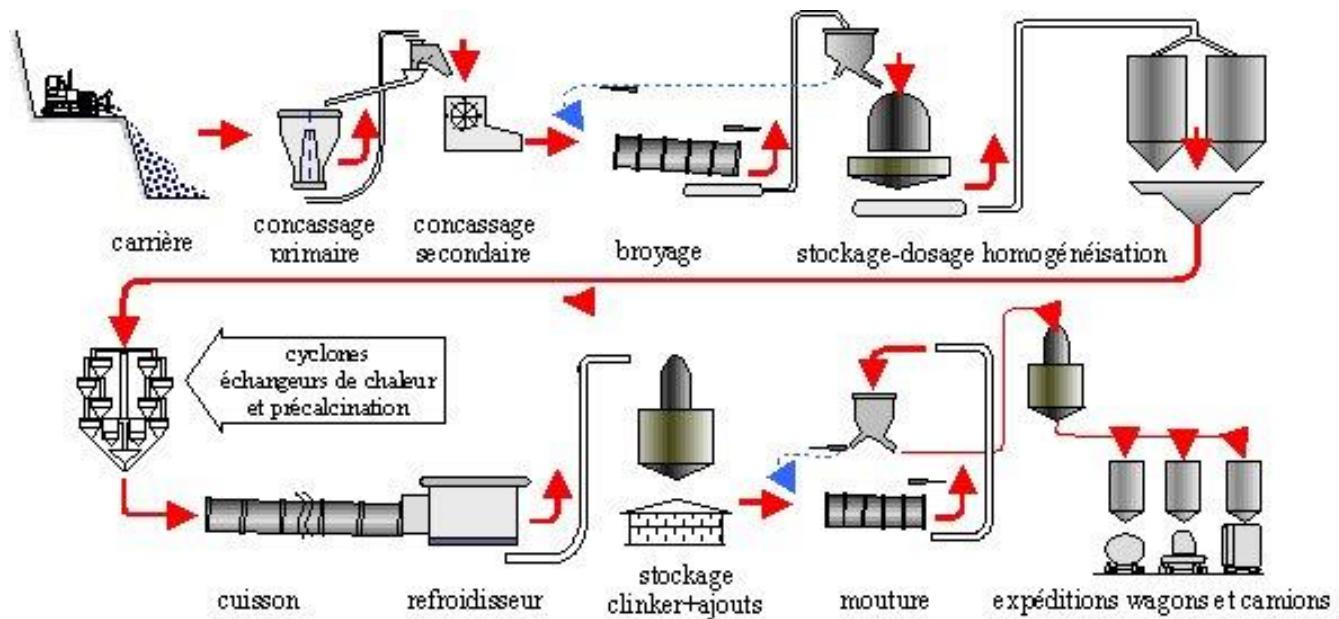


Figure III.10. Schéma de fabrication du ciment par voie sèche

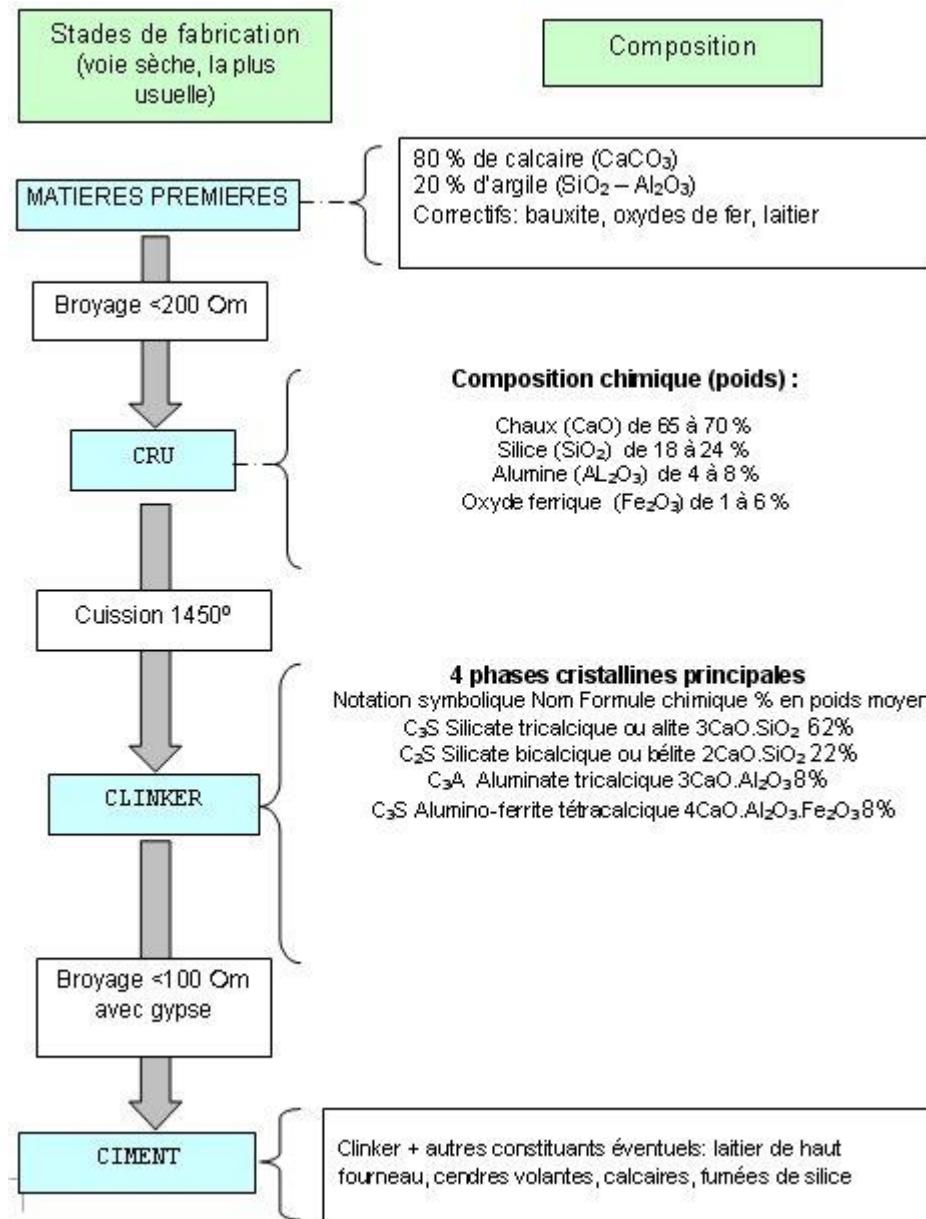


Figure III.11. Organigramme de fabrication du ciment

IV.5. Constituants principaux et additions

IV.5.1. Constituants du clinker

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

- Le silicate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S) (50-70% du clinker).
- Le silicate bicalcique $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S) (10-30% du clinker).
- L'aluminate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) (2-15% du clinker).

- L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tetracalique)

$$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ (C4AF) (5-15% du clinker).}$$

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

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

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

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

IV.5.2 Les autres constituants des ciments

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

Les constituants les plus utilisés sont:

IV.5.2.1. Calcaires :

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

IV.5.2.2. Laitier granulé de haut fourneau :

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

IV.5.2.3. Cendres volantes (V ou W) :

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

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

IV.5.2.4. Schistes calcinés :

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

IV.5.2.5. Fumée de silice :

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

IV.5.2.6. Fillers :

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

IV.6. Les principales catégories de ciment.

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

IV.6.1 Classification des ciments en fonction de leur composition

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

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

La proportion (en masse) des différents constituants est indiquée dans le tableau I.2. Les constituants marqués d'une étoile (*) sont considérés comme constituants secondaires pour le type de ciment concerné ; leur total ne doit pas dépasser 5%. (Les fillers sont considérés comme des constituants secondaires).

IV.6.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale

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

Tableau III. 3. Limite des classes et sous classes de résistances (nouvelle norme AFNOR)

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

Tableau III.4. Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition

	Cim. Port- land	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pozzolanique		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% ≤94%	/65% ≤79%	/35% ≤64%	/20% ≤34%	/5% ≤19%	/65% ≤90%	/45% ≤64%	/40% ≤64%	/20% ≤39%
Laitier (S)	*	6%≤ total ≤20%	21%≤ total ≤35%	/36% ≤65%	/66% ≤80%	/81% ≤95%	*	*	/18% ≤30%	/31% ≤50%
Pouzzolanes (Z)	*			*	*	*	10%≤ total ≤35%	36%≤ total ≤55% (fumée ≤10%)	18%≤ total ≤30%	31%≤ total ≤50%
Cendre siliceuses (V)	*			*	*	*				
Fumée de silice (D)	*			*	*	*			*	*
Cendres calciques (W)	*			*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*			*	*	*	*	*	*	*
Calcaires (L)	*		≤10%)	*	*	*	*	*	*	*
Fillers (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Tableau III.5. Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe

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

IV.7. Hydratation du ciment portland

Chimiquement, le terme hydratation regroupe la totalité des réactions qui se produisent quand un ciment anhydre se trouve en contact avec l'eau. Ces réactions sont généralement complexes, elles aboutissent à l'apparition des nouveaux composés appelés ***Les Hydrates***. La prise du ciment est le processus d'évolution du système *anhydre* vers un mélange consistant *de phases hydratées* permettant le développement des propriétés mécaniques de la matrice toutes les phases anhydres du ciment vont réagir, suivant des vitesses différentes, pour former différents types d'hydrates tels que : Portlandite, Silicate de Calcium hydraté, Ettringite Monosulfoaluminate de calcium hydraté AFm, Aluminate dicalcique hydraté, Hydrogrenat, Aluminate titracalcique hydraté...

IV.7.1. Chronologie de l'hydratation

Lors de la mise en contact eau-ciment, la réaction d'hydratation débute. Elle peut se dissocier en différentes phases successives, dont la plus connue est celle où se succèdent les périodes de gâchage, dormante, de pré-prise, d'accélération (ou de prise) et de durcissement. On peut décomposer l'hydratation en 3 phases successives : - La dissolution des constituants de ciment. - La formation de solutions saturées par rapport aux différents hydrates. - La précipitation et la cristallisation de ces hydrates dans les vides inters granulaires.

IV.7.2. Hydratation des C3S (Alite) et C2S (Bélite)

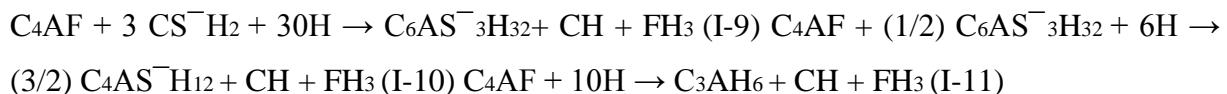
La réaction d'hydratation de l'alite se décompose en trois phases : $\text{Ca}_3\text{SiO}_5 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{Ca}^{2+} + \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-} + 4\text{OH}^-$ (I-1) $x\text{Ca}^{2+} + \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-} + 2(x-1)\text{OH}^- + (y-x)\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CxSHy}$ (I-2) $\text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$ (I-3) Dès que le C3S est en suspension, il se dissout selon l'équation (I-1). Après diffusion des ions, la solution devient saturée puis sursaturée pour former des CxSHy de stœchiométries variables notées généralement C-S-H selon l'équation (I.2). Du fait de la continuité d'augmentation en ions de calcium et d'hydroxydes, l'équation (I-3) décrit la précipitation de ceux-ci sous forme de Portlandite. La réaction complète peut se résumer selon l'équation (I-4) $2\text{C}_3\text{S} + 7\text{H} \rightarrow \text{C}_3\text{S}_2\text{H}_4 + 3\text{CH}$ (I-4) La réaction des C2S et ses produits d'hydratation sont similaires à ceux cités pour les C3S. Par ailleurs et contrairement à l'Alite, l'hydratation de la Bélite est généralement plus lente et la Portlandite résultante est plus faible. La réaction complète s'écrit selon l'équation suivante : $2\text{C}_2\text{S} + 5\text{H} \rightarrow \text{C}_3\text{S}_2\text{H}_4 + \text{CH}$ (I-5)

IV.7.3. Hydratation du C3A (Célite 2) et effet du gypse (sulfate de calcium)

Du fait qu'il est très réactif, l'hydratation du C3A s'effectue très rapidement en présence d'eau pour former des phases hydratées intermédiaires (C2AH8, C4AH19, C4AH13) ou encore appelées AFm ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-mono}$). Ces phases évoluent ensuite, sous l'effet d'une température minimale de 30 °C, et disparaissent au profit d'une phase plus stable (Hydrogrenat : C3AH6) à une vitesse qui dépend de la température, du rapport liquide/solide d'hydratation, de la taille des grains et de la concentration en CO₂.

IV.7.4. Hydratation du C4AF (Célite 1)

Il est courant de comparer les réactions d'hydratation du C4AF à celles du C₃A. Les compositions chimiques des produits formés sont en effet semblables, à l'exception des aluminoferrites substitués aux aluminates. Les réactions sont cependant plus lentes dans le cas du C4AF et libèrent moins de chaleur. La réactivité du C4AF dépend de sa proportion en fer, une augmentation de celle-ci se traduisant par un ralentissement de l'hydratation du C4AF. La fraction de fer qui n'a pas réagi au terme des deux réactions initiales (équations I-9 et I-10) se retrouve sous la forme d'hydroxyde de fer amorphe (FH₃), il y a alors également formation de Portlandite et d'ettringite (équation I-11).



3.2. Produits d'hydratation

Après l'hydratation d'un ciment, les produits les plus importants sont le gel des silicates de calcium hydratés et la Portlandite. Les quantités de C-S-H et de Ca(OH)₂ formées dépendent essentiellement du rapport E/C et du temps de réaction. En moyenne, une pâte de ciment hydratée contient de 50 à 70% de C-S-H et de 25 à 27% de Ca(OH)₂ de la masse du ciment. L'hydratation peut générer également jusqu'à 15% de sulfoaluminates AFt et AFm et jusqu'à 14% d'eau libre et des vides. L'hydratation du ciment peut produire aussi d'autres phases à des teneurs plus inférieures.

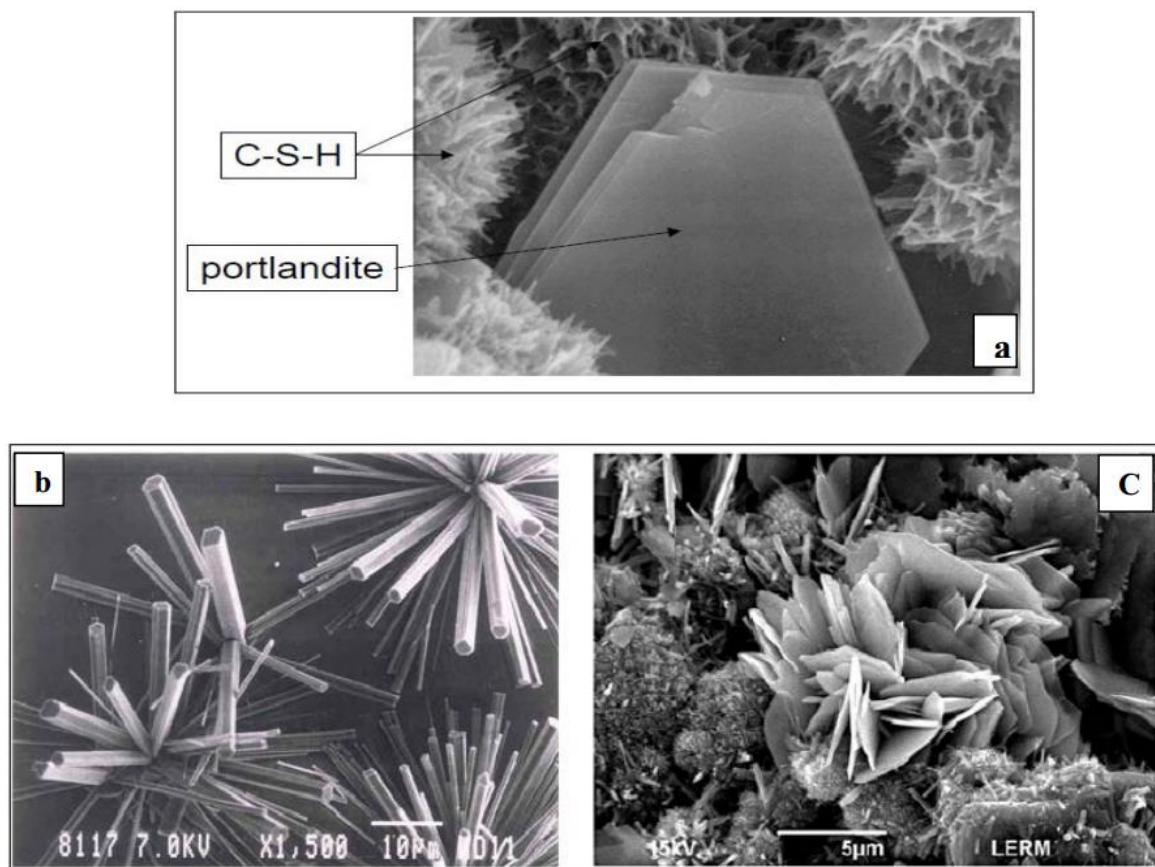


Figure III.12. Produits d'hydratation observés au MEB : a) C-S-H et CH, b) Ettringite, c) AFm.

Les mortiers

Chapitre IV :

LES MORTIERS

Table des matières

Chapitre IV :	81
I. Introduction	84
I.1.Définition	84
II. Composition des mortiers	85
II.1.Les liants.....	85
II.2.Les sables.....	86
II.3.Les adjuvants	87
II.4.Les ajouts	87
II.5. dosage de mortier.....	87
III. Propriétés des mortiers	88
III.1. Les mortiers selon leurs propriétés.....	88
III.2. propriétés du mortier dues aux matériaux	89
IV. Types de mortiers	92
IV.1.Les mortiers de ciment	92
IV.2.Les mortiers de chaux	93
IV.3.Les mortiers bâtards	93
IV.4. Les mortiers fabriqués sur chantier	94
IV.5.Les mortier industriel	94
IV.6.Les mortiers frais retardés, stabilisés, prêts à l'emploi	95
IV.7. Les mortiers de fibres.....	95
V. Emplois des mortiers	95
V.1. Les joints de maçonnerie	95
V.2. Les enduits.....	96
V.3. Les chapes	97
V.4. Les scellements et les calages	97
VI. Préparation des mortiers normaux	98
VI.1. Définition du mortier normal	98
VI.2. Principe	98
VI.3. Matériel utilisé	98
VI.4. Préparation du matériau	99
VI.5. Mode opératoire	99
VII. Les Caractéristiques des mortiers	99
VII.1. L'ouvrabilité	99
VII.2. La prise	101
VII.3. Le gonflement	101
VII.4.Résistances mécaniques.....	102
VII.5. Retrait	103

VII.5.1. Les facteurs agissant sur l'amplitude de retrait	103
VII.5.2. Différents types de retrait	105

I. Introduction

Une construction est généralement réalisée par l'assemblage de différents éléments (blocs de béton, briques, éléments en béton préfabriqué, 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. Le mortier est un mélange de liant – chaux ou ciment –, de sable, d'eau et éventuellement d'adjuvants.

I.1.Définition

Le mortier est le mélange à consistance de pâte ou de boue, d'un liant et d'agrégats avec de l'eau. Il est utilisé en maçonnerie comme élément de liaison, de scellement ou comme enduit. Techniquement parlant, c'est une colle.

Les professionnels du bâtiment qui utilisent le mortier sont le maçon, le couvreur, le carreleur et le tailleur de pierre. Jadis, la fonction était dévolue au gâcheur de mortier, qui le gâchait, c'est-à-dire le mélangeait.

Ce mélange pâteux sert notamment à lier entre eux les matériaux de construction. Ses proportions sont différentes de celles du béton et il ne comporte pas de gravier.

En général, le mortier doit être produit avec peu d'eau : en général 20 kg de mélange pour environ 4 L d'eau

Le mortier est un des matériaux de construction, qui contient un liant, qui peut être la chaux ou le ciment; de l'eau; du sable; des adjuvants et éventuellement des additions. On peut également trouver des polymères dans la composition de certains mortiers. Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure.

La fonction principale d'un mortier est de liaisonner 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 rejoignement 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. Un mortier de ciment ou d'autre liant a donc pour but de :

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

La durée de malaxage doit être optimum, afin d'obtenir un mélange homogène et régulier.

Les mortiers peuvent être :

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

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



Figure.IV.1. mortier en cours de préparation

II. Composition des mortiers

II.1.Les liants

Généralement, on peut utiliser :

- les ciments normalisés (gris ou blanc) ;

- les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt, ..) ;
- les liants à maçonner ;
- les chaux hydrauliques naturelles ;
- les chaux éteintes

II.2.Les sables

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

Ils peuvent être :

- naturels et roulés (de rivières, de sablières, ..), de nature siliceuse ou silico-calcaire ;
- naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites. Ils sont anguleux et durs.
- spéciaux (lourds, réfractaires, légers):
 - sable de laitier;
 - sable d'oxydes de fer, de chromite;
 - corindon ;
 - sable de briques concassées;
 - liège torréfié;
 - polystyrène expansé;
 - vermiculite, perlite.

Certains sables sont à éviter, notamment les “sables à lapin”, généralement très fins, les sables crus qui manquent de fines et les sables de dunes ou de mer qui contiennent des sels néfastes pour les constituants des ciments, par contre ils doivent être propres.

Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers est :

- extra-fins : jusqu'à 0,8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire) ;
- fins : jusqu'à 1,6 mm ;
- moyens : jusqu'à 3,15 mm ;
- gros : jusqu'à 5 mm.

II.3.Les adjuvants

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

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

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

II.4.Les ajouts

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

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

II.5. dosage de mortier

Ces dosages sont indicatifs, en volume et non en poids.

➤ **Mortier de montage ou à maçonner** (assemblage des blocs et pierres) :

1 vol. de ciment ou de chaux + 2 à 3 vol. de sable + 1/3 vol. d'eau.

➤ **Le dosage en eau dépend de l'utilisation du mortier**

Un enduit à projeter doit être beaucoup plus liquide qu'un mortier d'assemblage de Parpaings.

Un mortier trop sec manque d'homogénéité et il est difficile à utiliser (ne colle pas). Un mortier trop humide sèche mal et il est difficile à appliquer en épaisseur (coule).

Tableau IV.1 Dosage du mortier pour un sac de ciment

Le dosage du mortier pour un sac de ciment		CIMENT	CHAUX	Sable fin Granulométrie : type 0,2 mm Densité : 1,57/m³	Sable à maçonner Granulométrie : type 0,5 mm Densité : 1,57/m³	Eau Environ
Utilisation		Ciment	Chaux			
Assemblage de parpaings Ex : Parpaings 20x20x50 cm pour 7 m²		50 Kg			250 Kg soit 167 litres	25 L
Assemblage de briques Ex : Briques 6x11x22 cm pour 7 m² avec mortier bâtarde		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 m² <u>Première couche</u> gobetis 3 à 5 mm		50 Kg		150 Kg soit 100 litres		25 L
<u>Deuxième couche</u> corps d'enduit 15 à 20 mm	Enduit bâtarde	50+50 Kg	50 Kg		690 Kg soit 460 litres	75 L
<u>Troisième couche</u> 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
1 m³		Mortier de joint pour briques	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						

III. Propriétés des mortiers

III.1. Les mortiers selon leurs propriétés

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

III.1.1. Mortier 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. L'ouvrabilité ne se mesure pas avec précision en laboratoire mais le maçon peut l'évaluer en observant le comportement du mortier lorsqu'il l'étale avec sa truelle. L'ouvrabilité est due à l'effet de « roulement à billes » résultant de la lubrification des granulats par le lait de ciment. Bien que la classe des granulats

et la proportion des matériaux jouent un rôle important, c'est la teneur en eau qui détermine les valeurs finales du retrait et le maçon peut la contrôler à la mise en œuvre. La capacité d'un mortier à garder une certaine ouvrabilité sous l'influence de la succion des blocs dépend de son pouvoir de rétention d'eau mesuré lors d'essais en laboratoire. Une bonne ouvrabilité et un bon pouvoir de rétention d'eau sont essentiels à une qualité maximale du rejoints.

III.1.2. Mortier durci

Le mortier durci possède un certain nombre de propriétés de résistance mécanique d'importance majeure. La solidité du rejoints entre le mortier et l'élément est très importante. Quant à l'ouvrabilité, il n'existe pas de méthode sûre pour la mesurer et par conséquent les mortiers sont évalués d'après les valeurs de résistance à la compression d'éprouvettes cubiques soumises à des conditions de moulage et de cure plus proche de celles que l'on rencontre avec le béton qu'avec le mortier. La méthode d'essai est simple, les résultats sont reproductibles, et au cours des années les ingénieurs en maçonnerie ont appris à établir le lien entre la résistance à la compression et les propriétés de maçonnerie recherchées. La solidité du rejoints, la bonne ouvrabilité et un bon pouvoir de rétention d'eau donnent au rejoints 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.

III.2. propriétés du mortier dues aux matériaux

Par définition, les mortiers contiennent des liants, des granulats et de l'eau ; des adjuvants ou des colorants peuvent aussi être ajoutés. Les éléments de maçonnerie feront aussi l'objet de documentation, puisqu'il est essentiel, dans la composition du mortier, de tenir compte de l'effet de la maçonnerie sur les propriétés des mortiers.

III. 2.1. Liants

Le liant peut être du ciment portland, de la chaux ou du ciment de maçonnerie, ou un des divers mélanges de ces matériaux. Ces trois sortes de liants doivent satisfaire aux normes respectives de l'AFNOR.

III.2.1.1. Le ciment portland

Donne au mortier de maçonnerie sa résistance mécanique, en particulier sa résistance initiale, qui est indispensable à une époque où la vitesse de construction est telle que l'on exige qu'un mur puisse supporter une charge importante le lendemain même de sa construction. Les mortiers de ciment portland manquent de plasticité, ont un faible pouvoir de rétention d'eau et sont malaisés à travailler.

III.2.1.2. 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 chaux grasse, obtenue par extinction de la chaux vive et en la laissant vieillir, est le produit de qualité que l'on devrait utiliser, mais le vieillissement prend beaucoup de temps et le travail de la chaux grasse est très salissant. C'est pourquoi il est plus pratique d'utiliser la chaux hydratée sèche. 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.

III.2.1.3. Le ciment de maçonnerie

C'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. Les adjuvants 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.

III.2.1.4. Granulats

Le sable est le granule employé le plus fréquemment. Il est inerte et sert tout d'abord à accroître la compacité. Ses limites granulométriques sont entre 0,080 mm et 4 mm. Malheureusement, la plupart des granulats sont choisis pour des raisons de coût et de disponibilité, et il est bien connu qu'en Afrique un grand nombre des granulats employés ne sont pas conformes aux exigences granulométriques puisqu'ils contiennent en général trop d'éléments fins. Il peut y avoir une certaine variation granulométrique sans que les propriétés du mortier soient fortement altérées, mais la qualité du mortier serait certainement améliorée si on choisissait le granulat avec plus de soin.

III.2.1.5. Eau

L'eau remplit un double rôle : elle sert à hydrater le ciment, et, ce qui est plus important, elle contribue à son ouvrabilité. Il convient de noter que les exigences relatives à l'eau de gâchage diffèrent beaucoup pour les mortiers et le béton. Dans le cas du béton un faible rapport eau-ciment est préférable. 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.

III.2.1.6. Adjuvants

De nombreux 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. Une bonne composition du mélange, l'utilisation de matériaux de qualité et une bonne technique permettent habituellement d'obtenir une maçonnerie solide. Une mauvaise composition, l'utilisation de matériaux de qualité inférieure et une technique défectueuse ne peuvent pas être corrigées par l'emploi d'adjuvants.

III.2.1.7. Colorants

On peut donner de la couleur au mortier par des granulats ou des pigments minéraux. Ces derniers devraient avoir la composition d'oxydes minéraux et ne pas représenter plus de 6 % du poids du ciment portland. Le noir de carbone ne devrait pas représenter plus de 2 %. On doit soigneusement choisir les pigments et ne pas en employer plus qu'il n'en faut pour obtenir la couleur désirée. Pour que la couleur ne varie pas beaucoup d'un lot à l'autre il est conseillé d'acheter des liants auxquels des colorants ont été ajoutés en usine et de gâcher de grandes quantités de mortier.



Figure.IV.2. Mortiers colorés

IV. Types de mortiers

Dans les travaux publics on utilise différents types de mortier, selon les performances souhaitées, on utilise des formulations variées, notamment en ce qui concerne les liants.

IV.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 les rend pratiquement imperméables.

Les dosages courants sont de l'ordre de 300 à 400 kg de ciment pour 1 m³ de sable.



Figure.IV.3. Crépiage en mortier de ciment.

IV.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, surtout lorsque la chaux est calcique.



Figure.IV.4. joints descellement en mortier à base de chaux.

IV.3.Les mortiers bâtards

Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux. Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. 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.

Plus grande plasticité → plus de chaux

Plus grande résistance → plus de ciment

Les sables utilisés sont généralement siliceux ou silico-calcaires ; leur granulométrie est de préférence continue. Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants selon la caractéristique recherchée : Plastifiants, entraîneurs d'air, retardateurs de prise, hydrofuges. L'incorporation de fibres de verre ou de polypropylène permet d'obtenir des mortiers présentant une cohésion supérieure et moins fissurables.



Figure.IV.5. réalisation de l'étanchéité d'une toiture par un mortier bâtard.

IV.4. Les 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.

IV.5.Les mortier industriel

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

Les mortiers peuvent contenir des liants et des sables variés ainsi que certains adjuvants et éventuellement des colorants. 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 jointolement,
- mortier de râgrageage,
- mortier de scellement, mortier pour chapes,
- mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment, etc.,
- mortier de réparation.

Comme la plupart des produits industriels, ces mortiers font l'objet de contrôles à tous les stades de leur élaboration, ce qui constitue pour l'utilisateur une sécurité. Les avantages présentés par ces produits sont :

- un prédosage de composition constante, garant de régularité et de qualité ;
- un gain de temps pour préparer le mortier ;
- des chantiers plus propres.

IV.6.Les mortiers frais retardés, stabilisés, prêts à l'emploi

Les mortiers frais retardés et stabilisés sont élaborés et livrés par des centrales, comme le béton prêt à l'emploi. Du fait qu'ils sont retardés, ces mortiers peuvent être livrés et stockés en quantité importante sur le chantier. On peut les utiliser dans un délai allant jusqu'à 36 heures.

IV.7. Les mortiers de fibres

L'incorporation de fibres de verre ou de polypropylène permet d'obtenir des mortiers présentant une cohésion supérieure et moins fissurables. Ce sont soit des mortiers pré-mélangés, livrés en sac, soit des mortiers prêts à l'emploi, livrés par certaines centrales.

V. Emplois des mortiers

V.1. Les joints 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.

On a généralement intérêt à utiliser des mortiers ne présentant pas un module d'élasticité trop élevé, de façon à pouvoir s'adapter aux variations dimensionnelles des éléments qu'il liaisonne sans fissurer. Les mortiers de joints constituent donc un maillon important de la

maçonnerie, qui doit être bien étudié et bien mis en œuvre pour assurer la fonction qui lui est dévolue. C'est notamment le cas de la maçonnerie apparente.

La norme XP P 10-202 - 1 (DTU 20) « Maçonnerie, béton armé, plâtre » fournit des indications sur les dosages préconisés pour les mortiers de jointoiement, ainsi que les préconisations pour leur mise en œuvre.



Figure.IV.5. Les mortiers de joints.

V.2. Les enduits

Ce domaine d'application constitue l'un des plus vastes débouchés des mortiers. À côté des enduits traditionnels en trois couches décrits dans la norme NF P 15-201-1 et 2 (DTU 26.1), se développent aujourd'hui des enduits monocouches épais, ainsi que des enduits isolants.



Figure.IV.6. enduit mural en mortier de chaux.

V.3. 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 chapes doivent présenter une résistance suffisante pour assurer la transmission des charges au support, et parfois résister à l'abrasion ou au poinçonnement (sols industriels). Adhérente ou flottante, la chape peut également avoir une fonction thermique ou acoustique. Ces ouvrages sont décrits dans la norme P 14-201 « DTU 26.2. Travaux de bâtiment. Chapes et dalles à base de liants hydrauliques».

**Figure.IV.7.** Les chapes en mortier de ciment

V.4. 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 et assemblage d'éléments préfabriqués...



Figure.IV.8. mortiers industriels à mettre au point des produits spécifiques : scellements d'éléments de couverture.

VI. Préparation des mortiers normaux

VI.1. Définition du mortier normal

Le mortier normal est un mortier qui sert à définir certaines caractéristiques des ciments et notamment la résistance à la compression. Ce mortier est réalisé conformément à la norme EN 196-1. Le mortier normal est le mélange d'éléments secs avec un rapport E/C = 0,5.

VI.2. Principe

L'essai consiste à préparer un mortier normal à l'aide d'un sable normalisé. Ce sable est conditionné en sac plastique en dose de 1350 ± 5 g.

VI.3. Matériel utilisé

- a)- Un malaxeur à deux vitesses : lente et rapide,
- b)- un jeu de tamis de : 0,063 – 0,08 – 0,100 – 0,125 – 0,160 – 0,200 – 0,25 – 0,315 – 0,40 – 0,50, 0,63 – 0,80 – 1,00 – 1,25 -1,6 – 2,00 mm, dans le cas où l'on désire reconstituer le sable normalisé,
- c)- une balance précise au gramme, de portée au moins égale à 10 kg,

- d)- des bacs.

VI.4. Préparation du matériau

Il est recommandé d'utiliser les doses de sable normalisé. Dans le cas où ce dernier n'est pas disponible, il est possible de le reconstituer en laboratoire. Il faudra tamiser à sec un sable en utilisant à cet effet une colonne de tamis normalisée et reconstituer le sable normalisé en s'assurant que sa courbe granulométrique.

VI.5. Mode opératoire

- Mélanger le sable normalisé avec le ciment à tester et l'eau dans les proportions suivantes : 450 ± 2 g de ciment, 1350 ± 5 g de sable normalisé et 225 ± 1 g d'eau.
- Avant d'être utilisé pour l'identification de caractéristiques physique et/ou mécanique, ce mortier est malaxé pendant 4 minutes.
- Introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur ; y verser ensuite le ciment ; aussitôt après, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.
- Après 30 s de malaxage introduire régulièrement le sable pendant les 30s suivantes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.
- Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes enlever au moyen d'une raclette tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
- Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.
- Le mortier prêt, le verser dans des moules prismatiques 4x4x16 cm. La mise en place est réalisée par vibration.

VII. Les Caractéristiques des mortiers

Les caractéristiques principales des mortiers sont : L'ouvrabilité, la prise, le gonflement la masse volumique apparente, absolue, la porosité, la compacité, la résistance mécaniques et le retrait.

VII.1. L'ouvrabilité

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

VII.1.1. Table à secousses

Après le démoulage du mortier, ce dernier reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue. L'étalement en % est donné par la formule :

$$E\% = 100 * D_r - D_i / D_i$$

Avec :

- D_r : diamètre final
- D_i : diamètre initial

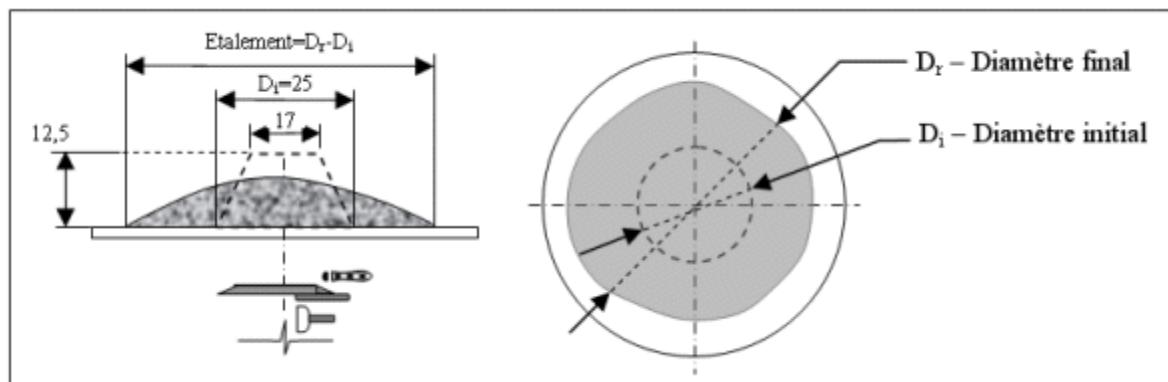


Figure.IV.9. Table à secousses.

VII.1.2. Maniabilimètre du LCPC

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

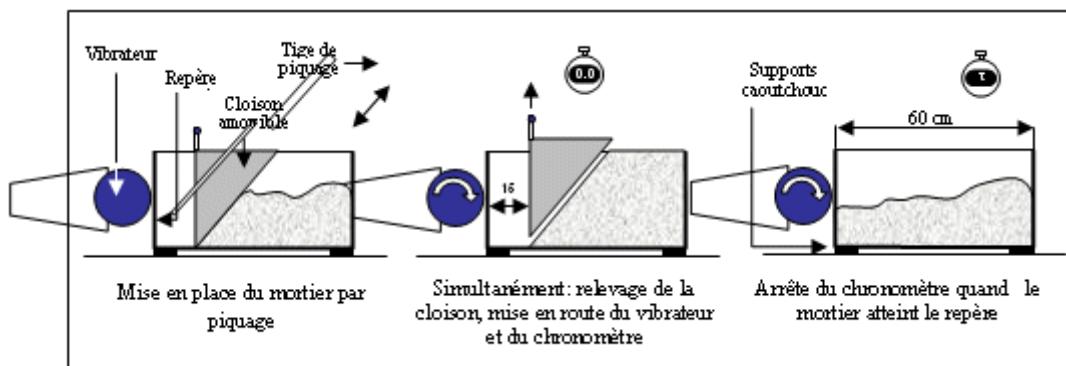


Figure.IV.10. Principe de fonctionnement du maniabilimètre.

VII.1.3. Le cône

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

VII.2. La prise

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

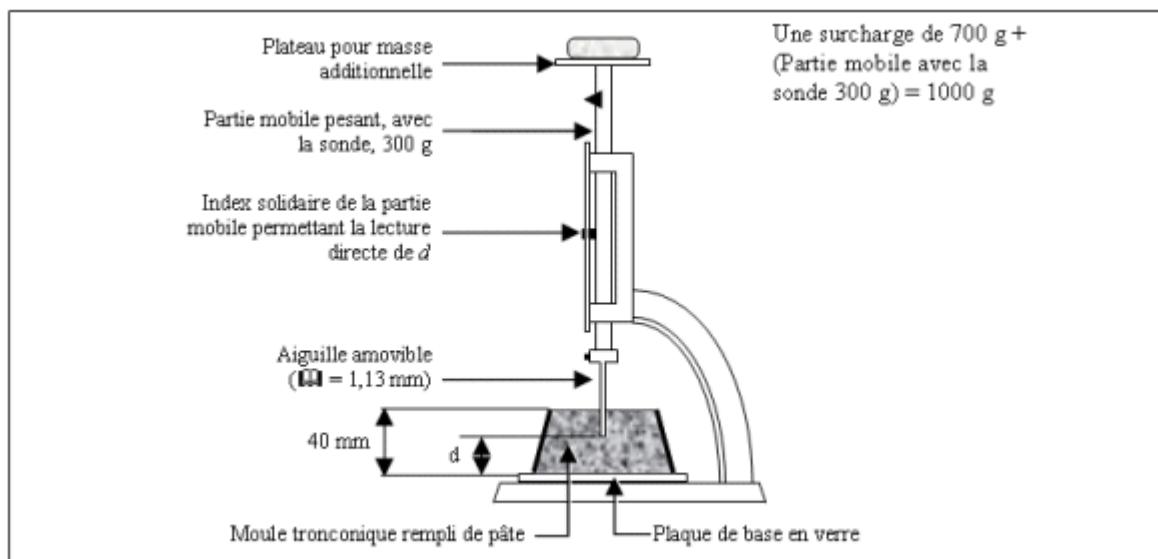


Figure.IV.11. L'appareil de Vicat

VII.3. Le gonflement

Le gonflement des mortiers (qui se produisent lorsqu'ils sont conservés dans l'eau) se mesure sur les mêmes éprouvettes de 4x4x16cm conservées dans l'eau à 20°C. Ils sont en général assez faibles (cas de ciment stable ayant une expansion aux aiguilles de le Chatelier inférieure sur pâte pure à 10mm).

Les autres caractéristiques telles que la masse volumique apparente, absolue, la porosité et la compacité ont été discutées dans section IV du premier chapitre.

VII.4.Résistances mécaniques

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4x4x16cm conservés dans l'eau à 20 °C. Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression.

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

Les résistances des mortiers dépendent de très nombreux facteurs :

- Nature et dosage en ciment. Rapport E/C.
- Granulométrie et nature du sable.
- Énergie de malaxage et mise en œuvre.

Protection des premiers jours.

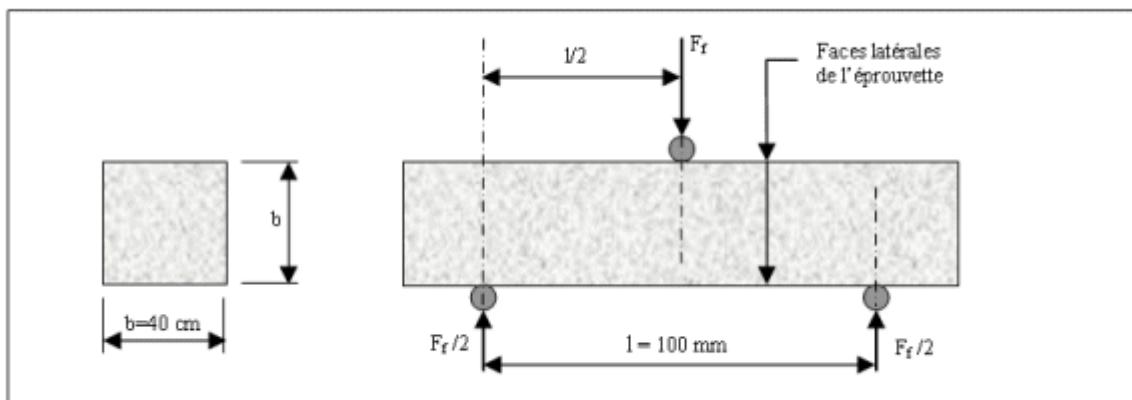


Figure.IV.12 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

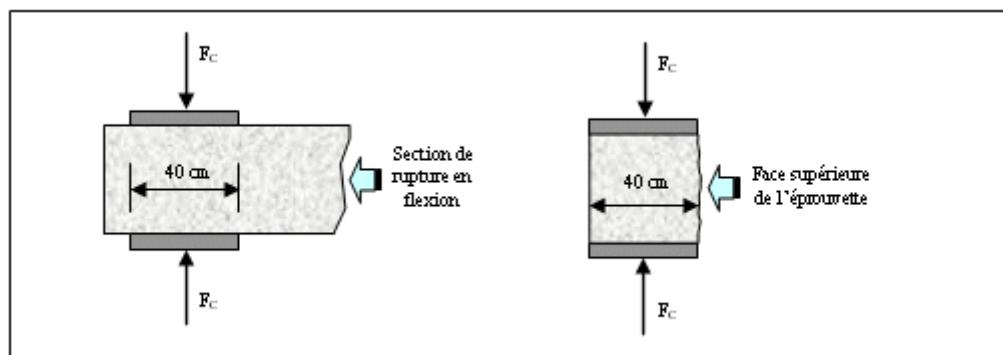


Figure.IV.13. Dispositif des essais en compression sur mortiers.

VII.5. Retrait

Dès la fin de sa mise en œuvre, le mortier est soumis à des déformations, même en absence de charges.

C'est un matériau en évolution avec le temps ; en effet ses propriétés se modifient au cours de son existence suivant l'état de l'atmosphère, la température et les charges appliquées. Il sera le siège de transformations diverses.

En l'absence de toute charge, les mortiers en général subissent des déformations plus ou moins importantes quand leur contenu en eau ou l'humidité du milieu environnant varient. Pour les mortiers conservés à l'air, on observe une diminution des dimensions initiales. Cette variation est due principalement à l'évaporation de l'eau contenue dans les gels. Ce phénomène porte le nom de retrait.

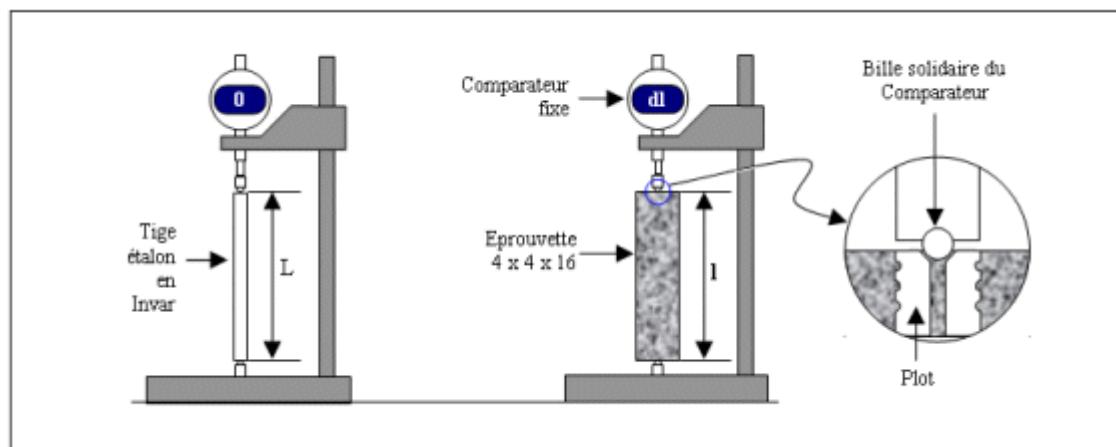


Figure.IV.14. Appareillage pour mesurer le retrait.

VII.5.1. Les facteurs agissant sur l'amplitude de retrait

Tout paramètre influant sur le bilan de l'eau dans le mortier, influera sur son retrait puisque ce dernier est lié, en grande partie, aux migrations d'eau. Ces facteurs qui agissent sont :

- Le dosage en ciment : le retrait augmente avec le dosage en ciment.
- La quantité d'eau de gâchage.
- Les vides d'air : l'évaporation de l'eau est facilitée par une forte perméabilité du mortier.
- La finesse de mouture du ciment : cela nécessite une plus grande quantité d'eau de mouillage.

- La présence d'éléments fins : proviennent en général de l'emploi d'agrégats argileux ou d'Agrégats de broyage non dépoussiérés.
- Nature du ciment : facteur de toute première importance. Les ciments à forte proportion de Laitier conduisent à des valeurs de retrait plus élevées (cas d'une conservation dans l'air).
- Hygrométrie de l'ambiance : le retrait croît quand l'humidité relative diminue

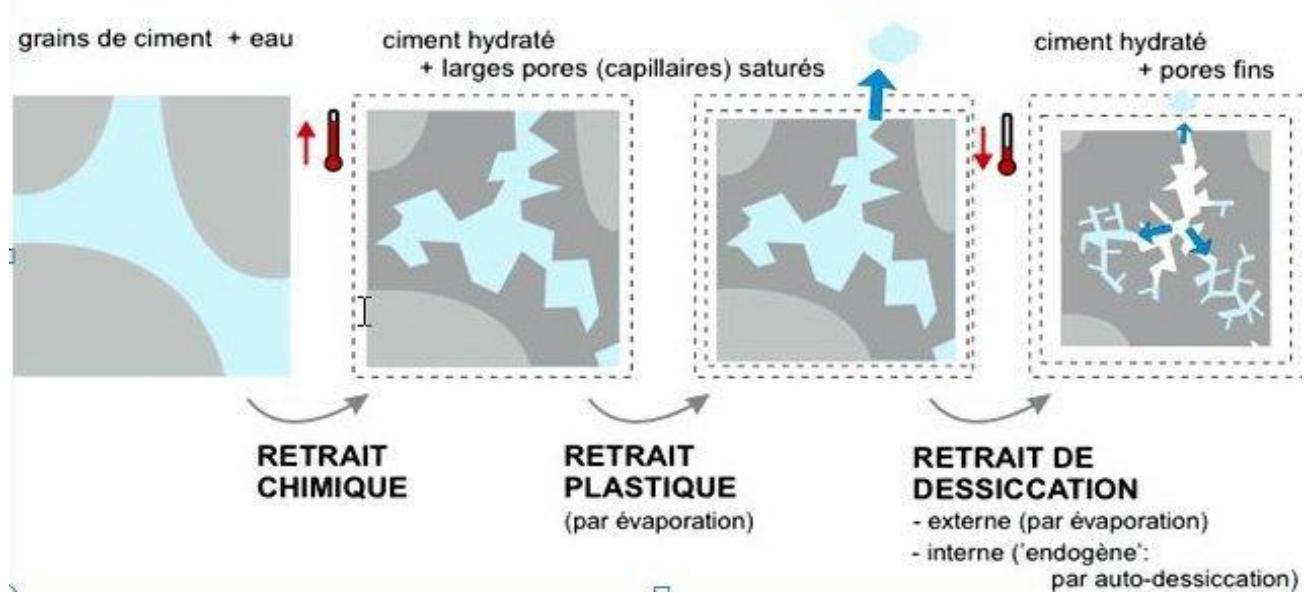


Figure.IV.15 Phénomène de retrait.

VII.5.2. Différents types de retrait

À partir de la prise du mortier, le retrait est le raccourcissement spontané du matériau non chargé. Le retrait peut être divisé en plusieurs types présentés dans Figure.IV.12.

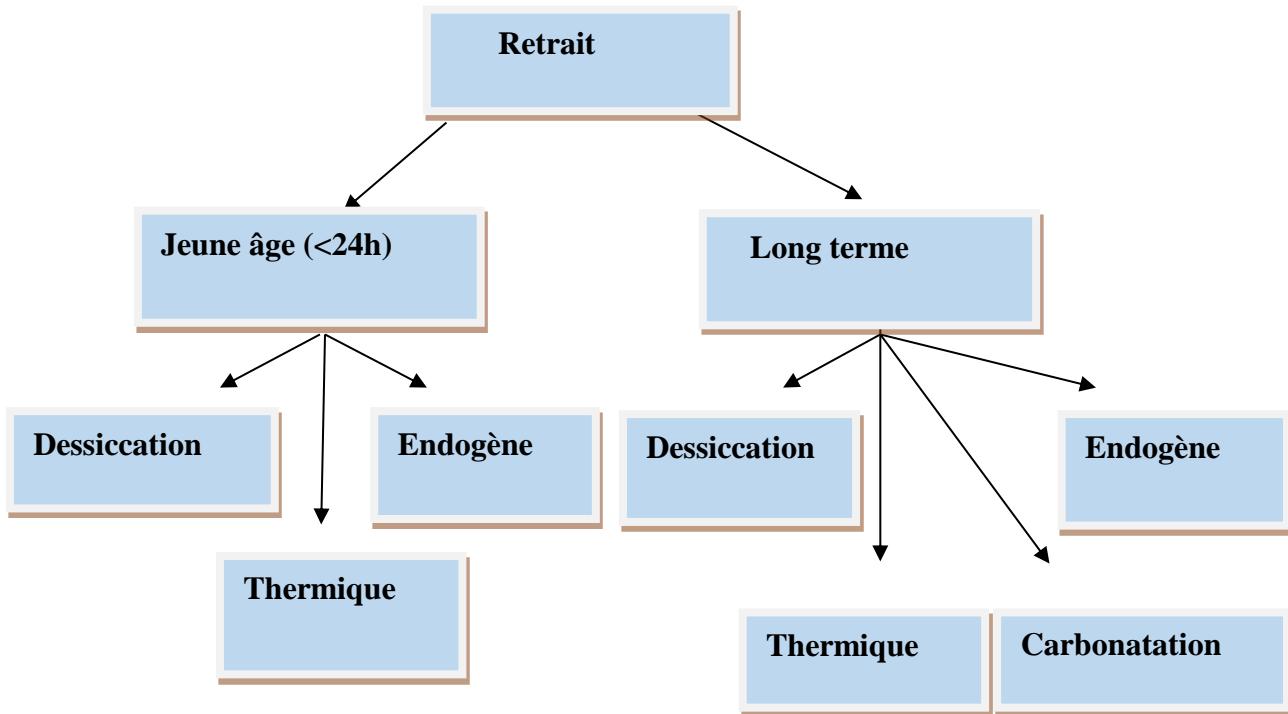


Figure.IV.16. Différents types de retrait.

a-Retrait d'autodéification (ou deuxième retrait)

La réaction du ciment et de l'eau s'accompagne, dans la pâte de ciment durcie, d'une dessiccation sans départ d'eau vers l'extérieur. Cette auto dessiccation peut provoquer un retrait tout comme la dessiccation proprement dite. Il est induit par la contraction Le Chatelier et par l'hydratation. La contraction Le Chatelier provient du fait que le volume des produits hydratés est inférieur à la somme des volumes de ciment anhydre et de l'eau consommée.

b-Retrait endogène

Il représente la somme du retrait d'autodéification et de la contraction Le Chatelier mais ces deux effets ne sont pas entièrement dissociables.

c-Retrait thermique après prise

La prise du ciment s'accompagne d'un dégagement de chaleur et, dans les zones massives ou isolées thermiquement, d'un échauffement du mortier. Après la prise, ce

dégagement de chaleur ralentit et le mortier durcit. Le retrait thermique après prise est la contraction du mortier due à ce refroidissement.

d-Retrait de dessiccation

Il est dû au déséquilibre hygrométrique entre la pâte de ciment et le milieu ambiant essentiellement lié au départ de l'eau du mortier par évaporation.

e-Retrait de carbonatation

Il est provoqué par la réaction de la portlandite avec le CO₂ présent dans l'air ambiant:



Il en résulte la formation de carbonate de calcium et d'eau. Cette transformation s'accompagne d'une légère diminution de volume. Cette réaction est fonction de l'humidité relative.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] : AFNOR ., Granulats Détermination du coefficient de friabilité des sables, Norme française P 18-576, France ,1990. 5P
- [2] : AFNOR ., Granulats Détermination du coefficient d'écoulement des sables, Norme française P 18-564, France ,1990.5P.
- [3] : AFNOR.,Granulat , Analyse granulométrique par tamisage ,Norme française NF P 18-560, France , 1990. 9P.
- [4] : AFNOR .,Granulats : Définitions, conformité, spécifications , Norme française XP P 18-540, France , 1997. 36P.
- [5] : AFNOR ., Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats : Partie 8 évaluation des fines - équivalent de sable , Norme française NF EN 933-8, France , 1999. 14P.
- [6] : AFNOR ., Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats :Partie 8 qualification des fines - essai au bleu de méthylène, Norme française NF EN 933-9, France, 1999. 12P.
- [7] : AYADI Walidabdelghani ., GUENOUNE Abedlmalek ., Valorisation des sables locaux dans la formulation de béton ordinaire, mémoire de mastère2 , spécialité :Sciences des matériaux-pour la construction durable, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES , algerie, 2016. 85p.
- [8] : AZZOUZ Hocine .,Etude des bétons à base des sables de dune, mémoire de magister , Spécialité: Génie civil Option : Matériaux, Université Mohamed Khider , Biskra, 2009.79 p .
- [9] : BALHACHMI Sarra et BERRAFA Fatouma Imane ., La valorisation de sable de dune (sable de naama) durabilité et comportement mécanique , mémoire de mastère2 , Spécialité : Travaux publics, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib, AinT'émouchent , Algérie, 2017.
- [10]: Ballivy G ., Rouis J., Breton D., Use of Cement Residual Kiln Dust as Landfill Liner, Cement Industry Solutions to Waste Management LT168, Canadian Portland Cement Association , Toronto , Ontario, Canada, 1992. 99p.
- [11]: BOUALI Khaled ., Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires, mémoire de magister , spécialité: Génie des Matériaux ,Option Physique et Mécanique des Matériaux UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES ,2014.

[12] : CHEVALIER Philippe ., Jean-Christophe Van den Schrieck ., Le sable naturel en région wallonne, rapport technique, Fédération de l'industrie extractive FEDIEX, Belgique, 2011.

[13]: Djoual Selma ., Lakhal Selma., Valorisation et caractérisation d'un sable local dans la fabrication du ciment , mémoire de master 2 ,Spécialité : Matériaux en génie civil Université, UNIVERSITE FERHAT ABBAS -SETIF, 2019.78p.

[14] : DURANTHON Francis ., DEWEVER Patrick ., Voyage d'un grain de sable, 1^{er}edition , EDP Sciences, France, 2015.95p.

[15]: GCI712, Durabilité et réparation du béton, cours des Matériaux, département Génie civil, Université de Sherbrooke Canada, 2009.27p.

[16] :GUERMITI LAID ., BENTEBBA Mohammed Tahar., contribution à l'amélioration certaines caractéristiques du béton de structure a base de sable de dune corrigé et renforcé par des fibres métalliques, mémoire de magister, université kasdi merbah Ouargla, 2013. 108p.

[17] : LAZAR Khaled ., Caractérisation et valorisation du sable du grand erg oriental ,Thèse de magistère, Université des sciences et de la technologie Houari-Boumédiène U.S.T.H.B, Alger, Algerie , 2012.

[18]: MESBAH Hamza ., DALI Amer., Caractérisation et valorisation de la poussière de four à ciment (CKD)dans les matériaux à base de ciment , mémoire de master, Spécialité : Matériaux en génie civil ,Université UNIVERSITE FERHAT ABBAS -SETIF, 2019.101p.

[19] : MESSAOUDENE AMEL ., REFICE OUMELKHEIR ., étude de l'effet de l'addition de sable de dune sur les propriétés des mortiers à base de sable alluvionnaire, mémoire master2, Spécialité :Génie Civil Option : Conception et Calcul des Structures en Génie Civil ,Université Ziane Achour Djelfa,2014.

[20] : Mounir Bellem ., Valorisation des déchets plastiques pour l'amélioration des performances mécaniques des mortiers , mémoire de master2, Spécialité:Génie Civil , université de M'sila , 2013.

[21]: NICOT PIERRE., Interactions mortier-support : éléments déterminants des performances et de l'adhérence d'un mortier , thèse doctorat, Université Toulouse III , 2008.

[22] : PERON Alphonse ., Essai d'une description géologique de l'Algérie : pour servir de guide aux géologues dans l'Afrique Française ,G Masson éditeur 1883, France. 202p.

[23] : POINOT T., Alexandre Govin ., influence des hydroxypropylguars sur les propriétés des mortiers du ciment à l'état frais, thèse de Doctorat, l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, France , 2014.

[24] : REZIG Salima .,Optimisation de la formulation du béton de sable dans le cadre de valorisation des matériaux locaux ,Thèse magistère , Spécialité : Génie Civil Option : MODELISATION DES MATERIAUX ET STRUCTURES, Université Mohamed Khider , Biskra, Algérie, 2012.117p.

[25] : ROBITAILLE Vincent ., TREMBLAY Denis ., Mécanique des sols théorie et pratique,1^{er}edition, modulo, canada , 1997. 680p.

[26] : SOPHIE Housson ., Étude physique chimique et mécanique des interactions ciment filler Application aux mortiers, thèse de doctorat, Spécialité: Génie des procédés, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, France ,1991. 159p.

[27] : SOUILMI Samiha ., BEN MOUSSA Imane ., Etude des caractéristiques physico-chimiques du sable des dunes (cas sites d'Adrar) ,mémoire de master2, Spécialité : Matériaux en Génie Civil ,Université Ahmed Draïa -Adrar, 2019 .86p.

[28] : WILLIAM D ., CALLISTER JR., Science et génie des matériaux, modolu Editeur, 2001. 684 p.

[29] : Zile Marie ., Durosier Richard Bonneville : LE CIMENT - LES MORTIERS ET LES BETONS . [pdf] (16/03/2011) , disponible sur : <https://fr.scribd.com/doc/50850498/Ciments-Mortiers-Betons>.

Annexes

NOTE D'INFORMATION



Sommaire

INTRODUCTION

1 | PRÉSENTATION DE LA NORME NFEN459 "CHAUX DE CONSTRUCTION"

- 1.1. Structure de la norme
- 1.2. Différence entre la chaux aérienne et la chaux ayant des propriétés hydrauliques
- 1.3. Domaines d'application

2 | CHAUX POUR LE GÉNIE CIVIL EN FRANCE

- 2.1. Origine des spécifications de la chaux
- 2.2. Particularités de la norme NFEN459-1:2012
- 2.3. Spécifications proposées
- 2.4. Conséquences pour les normes et les documents techniques existants et en cours de révisions

3 | RECOMMANDATIONS POUR LA PRESCRIPTION ET LE CONTRÔLE DES FOURNITURES

- 3.1. Recommandation pour la prescription
- 3.2. Contrôle à la réception

BIBLIOGRAPHIE

Norme NF EN 459 : Chaux de construction

L'objectif de cette note d'information est de présenter la norme NF EN 459-1:2012 "Chaux de construction", entrée en application le 1^{er} juin 2012, et de donner des recommandations relatives à son utilisation dans le domaine du génie civil au sens large du terme (travaux d'infrastructures, terrassements, chaussées, etc.).

Cette note souligne l'obligation de respecter la partie harmonisée de la norme, concrétisée par le marquage CE et la délivrance d'une déclaration de performance (DoP), avant mise des produits sur le marché européen.

Cette norme remplace la norme NF P 98-101 "Assises de chaussées - Chaux aérienne calcique pour sols et routes – Spécifications" de juillet 1991.

Introduction

La norme NF EN 459 "Chaux de construction", est une norme produit. Elle est la transposition française de la norme européenne EN 459 "Building lime", publiée par le Comité Européen de Normalisation (CEN) et élaborée par le Comité Technique 51 (CEN/TC 51) : Ciments et chaux de construction.

La version précédente, publiée en 2001, tenait compte du mandat M/114 imposant l'harmonisation de la norme, autrement dit la conformité aux exigences de la Directive Produits de Construction, elle-même remplacée depuis par le Règlement Produits de Construction (RPC). Ce changement a eu lieu en juillet 2013 et a conduit au décalage de la parution de la présente note pour être pris en compte. Le RPC est accompagné d'un système d'attestation de conformité et d'un marquage CE obligatoire de niveau 2+ pour la mise sur le marché européen des produits concernés.

La version de 2001 a fait l'objet d'une révision dont les trois parties (NF EN 459-1, NF EN 459-2 et NF EN 459-3), publiées entre 2010 et 2011, sont applicables depuis le 1^{er} juin 2012. La partie harmonisée, l'annexe ZA, est d'application obligatoire avant mise sur le marché. Leur contenu est décrit dans la suite du document.

1

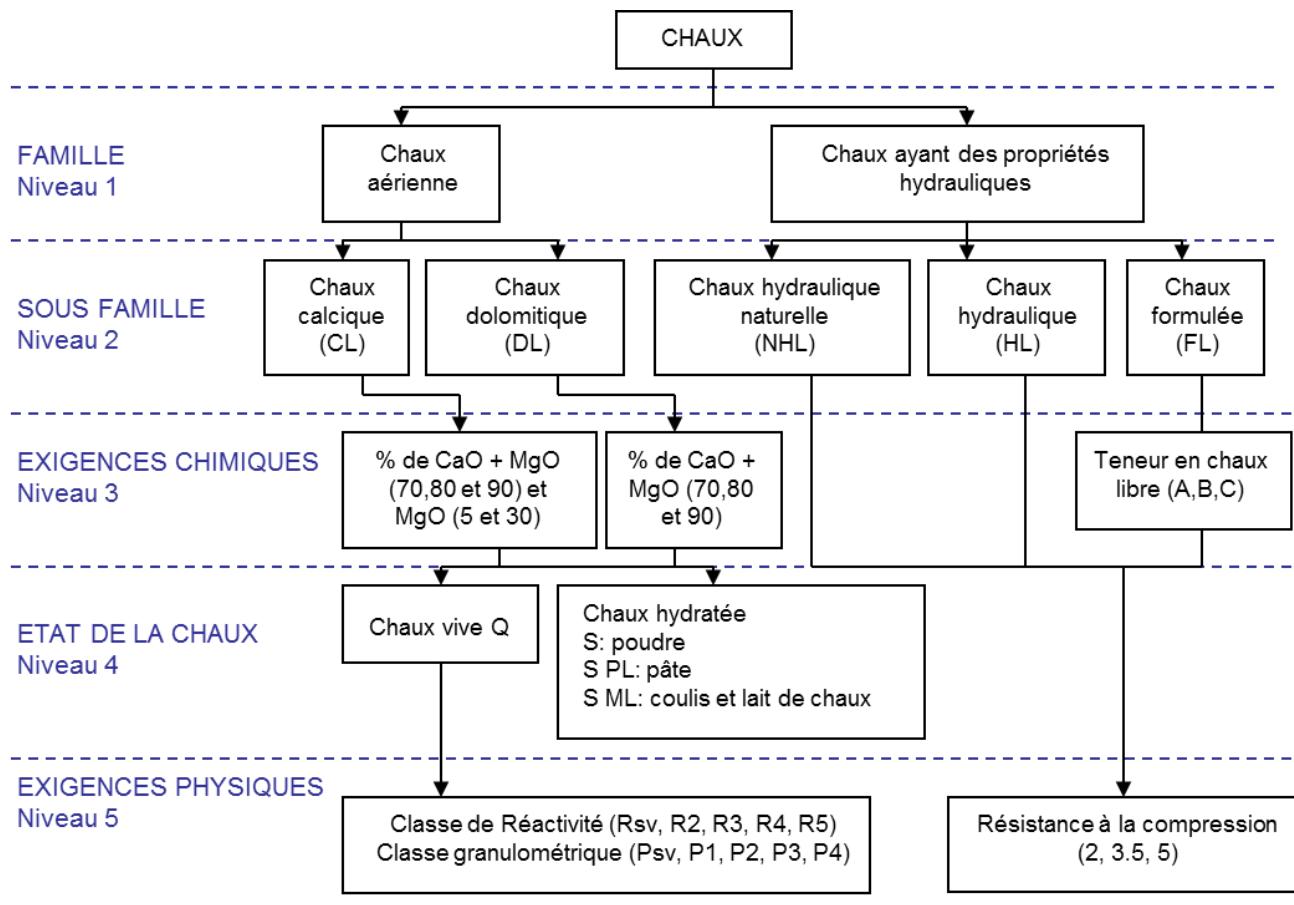
Présentation de la norme NF EN 459 "Chaux de construction"

1.1 | Structure de la norme

La norme NF EN 459 comporte 3 parties qui sont dépendantes les unes des autres :

- [NF EN 459-1:2012 "Chaux de construction - Partie 1 : Définitions, spécifications et critères de conformité"](#) : Il s'agit d'une norme "produit" qui définit les deux familles de chaux de construction : les chaux aériennes et les chaux ayant des propriétés hydrauliques. Ces deux familles sont destinées au domaine de la construction : bâtiment et génie civil, y compris les travaux d'infrastructures, de terrassement et de chaussées.

Figure 1 : Classification de la chaux proposée par la norme NF EN 459-1



- [NF EN 459-2:2012 "Chaux de construction - Partie 2: Méthodes d'essai"](#) : Cette partie traite des modes opératoires des essais permettant de mesurer les caractéristiques des produits.
- [NF EN 459-3:2012 "Chaux de construction - Partie 3 : Evaluation de la conformité"](#) : Cette partie spécifie les règles à appliquer pour l'évaluation de la conformité des chaux de construction aux exigences de la norme produit NF EN 459-1:2012. Elle fournit les règles techniques régissant le contrôle de production en usine et décrit les actions à entreprendre en cas de non-conformité.

1.2 | Différence entre la chaux aérienne et la chaux ayant des propriétés hydrauliques

La partie 1 de la norme fait la distinction entre les deux familles de chaux : les chaux aériennes (NF EN 459-1, cf. paragraphe 4) et les chaux ayant des propriétés hydrauliques (NF EN 459-1, cf. paragraphe 5).

Ces deux paragraphes sont précédés de définitions dont les principales sont rappelées ci-après :

- **Chaux** : oxyde et/ou hydroxyde de calcium et oxyde et/ou hydroxyde de calcium et de magnésium produits par la décomposition thermique (calcination) de carbonate de calcium d'origine naturelle (par exemple : calcaire, craie, coquilles) ou de carbonate de calcium et de magnésium d'origine naturelle (par exemple : calcaire dolomitique, dolomie).
- **Chaux aérienne** : chaux qui se combine et durcit avec le dioxyde de carbone présent dans l'air. Les chaux aériennes n'ont pas de propriété hydraulique. Elles sont divisées en deux sous-familles, la chaux calcique (CL) et la chaux dolomitique (DL). La chaux aérienne peut se trouver sous deux états :
 - Soit de la chaux vive CaO, désignée par Q
 - Soit de la chaux hydratée - aussi appelée chaux éteinte - Ca(OH)₂, désignée par S, S PL ou S ML
- **Chaux ayant des propriétés hydrauliques** : chaux de construction constituées principalement d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂), mais aussi de silicates de calcium et d'aluminates de calcium. Ces chaux ont la propriété de faire prise et de durcir lorsqu'elles sont mélangées à l'eau et/ou sous l'eau. La réaction avec le dioxyde de carbone présent dans l'air contribue au durcissement. Les chaux ayant des propriétés hydrauliques sont divisées en trois sous-familles, la chaux hydraulique naturelle (NHL), la chaux formulée (FL) et la chaux hydraulique (HL).

♦ Glossaire anglais - français :

Q : *Quick Lime*, chaux vive en anglais

S : *Slaked Lime*, chaux éteinte ou hydratée en anglais, sous forme de poudre

S PL : *Putty Lime*, Chaux en pâte en anglais sous forme de pâte

S ML : *Milk of Lime*, lait de chaux en anglais, sous forme de coulis ou lait de chaux

NHL : *Natural Hydraulic Lime*, chaux hydraulique naturelle en anglais

FL : *Formulated Lime*, chaux formulée en anglais

HL : *Hydraulic Lime*, chaux hydraulique en anglais

1.3 | Domaines d'application

Les chaux aériennes et les chaux ayant des propriétés hydrauliques sont destinées au domaine de la construction en général (bâtiment et génie civil). Cependant, leurs caractéristiques, leurs propriétés, et donc leur domaine d'application, diffèrent d'une famille à l'autre.

- **Dans le domaine du bâtiment :** les chaux aériennes, sous forme hydratée, et les chaux ayant des propriétés hydrauliques sont principalement utilisées dans la confection de mortiers, enduits et badigeons ainsi que dans la fabrication du béton de chanvre. Les chaux aériennes calciques sous forme vive entrent dans la composition du béton cellulaire et des briques silico-calcaires.

- **Dans le domaine du génie civil,** les chaux aériennes, principalement calciques à l'état vive, sont utilisées pour le traitement des sols et des matériaux (recyclage, valorisation, réemploi). La chaux aérienne calcique, sous forme vive ou hydratée, est utilisée comme composant, et éventuellement activateur, dans des liants à base de ciments, laitiers, cendres volantes, etc.

- La chaux aérienne calcique sous forme hydratée entre dans la composition des mortiers techniques (mortiers d'injection, mortiers de bourrage de tunnels, etc.).

- **Dans le domaine des enrobés bitumineux :** la chaux aérienne calcique, sous forme hydratée peut être utilisée comme additif multifonctionnel dans les enrobés bitumineux.

- Les laits de chaux calciques, trouvent une application en protection des couches d'accrochages. Ces dernières, répandues avant la pose de l'enrobé bitumineux, restent fragiles vis-à-vis de la circulation des engins de chantier. Les laits de chaux les protègent contre l'arrachement des roues et des chenilles d'engins.

2

Chaux pour le génie civil en France

2.1 | Origine des spécifications de la chaux figurant dans la norme NF P 98-101 à laquelle se substitue la norme NF EN 459-1:2012

En France, l'usage de la chaux pour le génie civil s'est développé à partir du début des années 60, principalement dans le domaine du traitement des sols. C'est à cette époque qu'ont été formulées les premières spécifications relatives à la chaux, reprises ensuite dans la norme française *NF P 98-101 : Chaux aériennes calciques pour sols et routes*.

Par sécurité, cette norme écarte les chaux dolomitiques par crainte de gonflements provoqués par l'oxyde de magnésium (MgO) dont l'hydratation lente s'accompagne d'une augmentation de volume différée pouvant occasionner des désordres.

A titre indicatif, les spécifications relatives à la chaux vive figées par la norme NF P 98-101 se résument à :

- Chaux libre $\geq 80\%$
- $MgO \leq 8\%$
- Granulométrie : 0/2 mm
- Réactivité : $t_{60} < 25$ minutes

2.2 | Particularités de la norme NF EN 459-1:2012

La norme NF EN 459-1 définit les produits, les spécifications et les critères de conformité de tous les types de chaux de construction.

La norme NF EN 459-1 couvre donc une gamme importante de types de chaux ayant des propriétés d'usage spécifiques et distinctes. Il est donc essentiel de préciser le type de chaux de construction lorsqu'il est fait référence à cette norme.

Par exemple, en ce qui concerne la chaux aérienne calcique, le choix doit se porter sur un des trois types de chaux dont les exigences chimiques sont résumées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Exigences chimiques de la chaux calcique

Type de chaux calcique	Valeurs données en pourcentage en masse %				
	CaO + MgO	MgO	CO ₂	SO ₃	Chaux libre
CL 90	≥ 90	≤ 5	≤ 4	≤ 2	≥ 80
CL 80	≥ 80	≤ 5	≤ 7	≤ 2	≥ 65
CL 70	≥ 70	≤ 5	≤ 12	≤ 2	≥ 55

La teneur en chaux libre - autrement dit la part de la chaux qui réagit - figure explicitement parmi les caractéristiques chimiques. Ce n'était pas le cas dans la version précédente de la norme qui n'indiquait que la teneur en (CaO + MgO) totale, c'est-à-dire la somme de la chaux libre et de la chaux combinée (sous forme de carbonate ou autres impuretés résiduelles), engendrant ainsi une confusion sur la composition réelle des produits.

Dans le cas de la chaux vive, il faut aussi préciser la réactivité (Tableau 2) et la granulométrie (Tableau 3) qui dépend du degré de broyage.

Dans la pratique, c'est donc essentiellement la chaux aérienne calcique (sous forme vive (CaO), ou hydratée ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) selon les besoins) qui est utilisée. Les spécifications portent sur la teneur en chaux libre (c'est-à-dire la proportion de chaux réactive sous la forme CaO ou $\text{Ca}(\text{OH})_2$), la granulométrie, et pour la chaux vive, la réactivité, t_{60} . Cette dernière indique le temps mis par une suspension de 150 g de chaux vive dans 600 ml d'eau à 20 °C pour atteindre 60 °C dans des conditions contrôlées. La réactivité peut être exprimée aussi à 50 °C (t_{50}) ou à 40 °C (t_{40}).

A noter : dans le cas particulier de sols secs, il peut être utilisé des laits de chaux en traitement au moyen de dispositifs dédiés.

Tableau 2 : Classe de réactivité (R) de la chaux vive

Type de chaux calcique	Réactivité (temps en min), selon 6.6 de la norme NF EN 459-2:2010				
	R5	R4	R3	R2	RSV
CL 90	$t_{60} < 10$	$t_{60} < 25$	-	-	Autre valeur spécifiée ou absence d'exigence
CL 80	$t_{60} < 10$	$t_{60} < 25$	$T_{50} < 25$	-	
CL 70	-	-	-	$t_{40} < 25$	

Tableau 3 : Classe granulométrique (P) de la chaux vive

Ouverture du tamis	Répartition granulométrique (fraction de la masse passant en % selon l'article 6 de la norme NF EN 459-2:2010)				
	P4	P3	P2	P1	PSV
10 mm	100				Autre valeur spécifiée ou absence d'exigence
5 mm	≥ 95	100	100		
2 mm	-	≥ 95	≥ 95	100	
0,2 mm	-	-	≥ 70	≥ 95	
0,09 mm	-	≥ 30	≥ 50	≥ 85	

2.3 | Spécifications proposées

Afin de conserver les référentiels précédemment établis à partir de la norme NF P 98-101 de 1991, il est proposé de reconduire le type de chaux correspondant aux mêmes spécifications.

↳ **Dans le cas de la chaux vive**, il s'agit, selon la désignation de la norme NF EN 459-1:2012, du produit suivant :

[EN 459-1 CL 90-Q de réactivité R4, de granulométrie P2 : EN 459-1 CL 90-Q \(R4,P2\)](#)

Les valeurs de réactivité et de granulométrie sont à considérer au sens minimum requis :

- R4 : une chaux plus réactive comme une R5 peut convenir
- P2 : les granulométries plus fines comme P1 peuvent convenir.

Il est également proposé, afin de tenir compte des évolutions techniques récentes et sous réserve d'apporter la preuve de sa performance, le produit suivant :

[EN 459-1 CL 80-Q de réactivité R4, de granulométrie P2 : EN 459-1 CL 80-Q \(R4,P2\)](#)

Les valeurs de réactivité et de granulométrie sont à considérer au sens minimum requis :

- R4 : une chaux plus réactive comme une R5 peut convenir
- P2 : les granulométries plus fines comme P1 peuvent convenir

↳ **Dans le cas de la chaux hydratée en poudre**, il s'agit du produit suivant :

[EN 459-1 CL 90-S](#)

A noter qu'il n'y a pas d'indication de classe de réactivité car la chaux est déjà hydratée et pas d'indication de classe granulométrique car, du fait du mode de fabrication, les chaux aériennes calciques hydratées en poudre sont toutes de granulométrie inférieure à 0,09 mm.

↳ **Dans le cas de lait de chaux**, il s'agit du produit suivant :

[EN 459-1 CL 90-S ML](#)

Ces produits sont proposés sur la base :

- des pratiques qui se sont développées dans le domaine du traitement des sols à la chaux vive d'une part et de la modification des enrobés bitumineux à la chaux hydratée
- des capacités actuelles des unités de production de l'industrie chaufournière.

Toutefois, certaines applications particulières pourront faire appel à d'autres types et classes de chaux sous réserve de la vérification de l'obtention des performances requises.

2.4 | Conséquences pour les normes et les documents techniques existants et en cours de révision

La norme NF EN 459 doit apparaître à chaque spécification d'usage de la chaux dans les documents d'application : normes, guides.

↳ **Les guides existants :** Guide Traitement des Sols (GTS), Guide des Terrassements et Remblais (GTR), guides régionaux, et de prescription : Cahier des Clauses techniques générales (CCTG), et Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP) compte tenu de leur antériorité pourront être amendés au fur et à mesure de leur révision.

Les normes d'application faisant spécifiquement référence à la chaux sont :

- La série des normes NF EN 14227 qui fixent les spécifications concernant les mélanges granulaires et les sols traités au ciment, au laitier, à la cendre volante, au liant hydraulique routier et à la chaux dans le domaine des chaussées¹.
- La série des normes relatives au traitement des sols pour remblais et couches de forme².
- La série des normes relatives aux enrobés bitumineux (NF EN 13108-1 à 7) et aux granulats pour enrobés bitumineux (NF EN 13043)

Les documents de prescription sont principalement les fascicules des CCTG. Les modifications seront apportées au fur et à mesure des révisions. Dans cette attente, cette note d'information permet d'adapter les CCTP.

¹ Le Comité Technique CEN/TC227 (Matériaux de Chaussées) a engagé les travaux de révision de la série en intégrant les nouvelles dispositions de la norme NF EN 459. Les versions révisées seront disponibles à partir de 2014.

² Le Comité Technique CEN/TC396 (Terrassements), a engagé les travaux de rédaction de normes qui intègrent les nouvelles dispositions de la norme NF EN 459. Ces normes seront publiées à partir de 2015.



Recommandations pour la prescription et le contrôle des fournitures

3.1 | Recommandation pour la prescription

Conformément aux indications précédentes, il est recommandé de libellé les prescriptions relatives à la chaux de la façon suivante :

3.1.1 | Pour la chaux vive

- La chaux vive est de type **EN 459-1 CL 90-Q (R4, P2)**, conformément à la norme NF EN 459-1, et est marquée CE.
- Une copie de la Déclaration des Performances est remise par le producteur à la commande, soit sous format papier, soit par voie électronique.

3.1.2 | Pour la chaux hydratée

- La chaux hydratée est de type **NF EN 459-1 CL 90-S**, conformément à la norme NF EN 459-1, et est marquée CE.
- Une copie de la Déclaration des Performances est remise par le producteur à la commande, soit sous format papier, soit par voie électronique.

Dans le cas des enrobés bitumineux, deux modes d'introduction sont possibles :

- La chaux hydratée est directement incorporée dans la centrale d'enrobage via un silo dédié, auquel cas elle relève bien de la norme NF EN 459-1,
- La chaux hydratée est mélangée à un filler calcaire dans une installation industrielle spécifique. Elle est alors introduite sous forme de filler additif (également appelé filler mixte ou filler actif) dans la centrale d'enrobage. Le filler additif relève de la norme NF EN 13043, et sa teneur en chaux hydratée fixe alors sa dénomination (Ka_{10} , Ka_{20} , Ka_{25} ou $Ka_{Déclaré}$).

3.1.3 | Pour le lait de chaux

- Le lait de chaux est de type **NF EN 459-1 CL 90-S ML**, conformément à la norme NF EN 459-1, et est marquée CE.
- Une copie de la Déclaration des Performances est remise par le producteur à la commande, soit sous format papier, soit par voie électronique.

3.2 | Contrôle à la réception

Le contrôle à la réception porte sur la vérification de la déclaration de performance. A défaut, il faut pouvoir vérifier:

- la **présence du marquage CE** sur l'emballage ou, dans le cas de conditionnement en vrac, sur le bulletin de livraison portant la désignation du produit et faisant référence à la déclaration des performances,
- dans le cas de la chaux vive, la **réactivité de la chaux** selon la norme NF EN 459-2 : Méthodes d'essais.

Les échantillons conservatoires doivent être placés dans des contenants étanches à l'eau et à l'air pour éviter toute hydratation ou carbonatation. Ces deux réactions sont en effet susceptibles de modifier les caractéristiques intrinsèques de la chaux.

Bibliographie

NF EN 459-1:2012 - Chaux de construction - Partie 1 : définitions, spécifications, et critères de conformité.

NF EN 459-2:2012 - Chaux de construction - Partie 2 : Méthodes d'essai.

NF EN 459-3:2012 - Chaux de construction - Partie 3 : Evaluation de la conformité.

NF EN 13043:2003 - Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et d'autres zones de circulation

SETRA-LCPC (2000) - Guide technique - *Réalisation des remblais et des couches de forme Fascicule 1 : principes généraux et Fascicule 2 : annexes technique (GTR)*.

SETRA-LCPC (2000) - Guide technique - *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des remblais et des couches de forme (GTS)*.

SETRA-LCPC (2007) - Guide technique - *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des assises de chaussées (GTS - Chaussées)*.

SETRA (2007) - Guide Technique - *Conception et réalisation des terrassements* ; Fascicule 1 : Etude et exécution des travaux ; Fascicule 2 : *Organisation des contrôles* ; Fascicule 3 : méthodes d'essais (GTR).

Technique de l'ingénieur (2010) - *Chaux aérienne - Contexte, fabrication, domaines applicatifs* (Référence C923)

Technique de l'ingénieur (2011) - *Chaux aérienne - Applications en Génie Civil* (Référence C5445)

Technique de l'ingénieur (2007) - *Traitement des matériaux* (Référence C5362)

Règlement (UE) no 305/2011 du Parlement européen et du Conseil du 9 mars 2011 établissant des conditions harmonisées de commercialisation pour les produits de construction et abrogeant la directive 89/106/CEE du Conseil.

EuLA (2012) - *La chaux hydratée : Un additif reconnu pour des enrobés bitumineux plus durables : revue critique de la littérature*.

Note d'information rédigée par les membres du Comité Méthodologie de l'IDRRIM.

Remerciements : Les membres de la Commission TP de l'Association Up'Chaux, Anthony Matynia (Cerema, Direction Technique Infrastructures de transports et matériaux), Ludovic Miard (Cerema, Direction territoriale Centre-Est).

Avertissement : La présente note est destinée à donner une information rapide. La contrepartie de cette rapidité est le risque d'erreur et de non exhaustivité. Ce document ne peut en aucun cas engager la responsabilité ni des auteurs, ni de l'Institut Des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité.



Institut Des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité

Membres : ADF - ADCF - ADSTD - AFGC - AITF - AMF - AFPGA - ASCQUER - ASFA - ATEC ITS France
ATR - ATTF - Cerema - CETU - CF-AIPCR - CINOV Infrastructures et Environnement - CISMA -
CNFPT CTMNC - CTPL - DGAC/STAC - DSCR - Ecole des Ponts Paris-Tech - EGF-BTP - ENTPE - ESITC
Cachan ESTP - Fntp - GART - GPB - IFSTTAR - IMGC - MEDDE [DGITM, DIT, DIR] - IREX - Office des
Asphaltes - Ordre des Géomètres Experts - RFF - SER - SFIC - SNBPE - SPECBEA - SPTF - STRRES
SYNTEC Ingénierie - TDIE - UNPG - USIRF - UPC

IDRRIM - 9 rue de Berri – 75008 Paris

- Association loi 1901 -

Téléphone : 01.44.13.31.30 – Télécopie : 01.44.13.32.98

E-mail : idrrim@idrrim.com

Disponible en téléchargement sur

www.idrrim.com

**مواصفة جزائرية
NORME ALGERIENNE**

N° édition : 1
Date : 2006

ICS : **91.100.10**

CHAUX DE CONSTRUCTION

**DÉFINITIONS, SPÉCIFICATIONS ET CRITÈRES DE
CONFORMITÉ**

Nombre de pages : 18

Edition et diffusion : 

5, 7 Rue Abou Hamou Moussa- Alger
Tél : 021 64.19.08 Fax : 021 64.17.61
E-mail : ianor@ianor.org
Vente@ianor.org
Cinfo@ianor.org

**Institut Algérien
de Normalisation**

AVANT PROPOS

La présente norme a été adoptée comme norme Algérienne par les membres du comité technique national n° 37: « **Liants – Bétons - Granulats** » conformément à la résolution du procès-verbal de réunion n° 07 du 26/11/2005.

Le contenu technique de la présente norme est équivalent à la **EN 459-1** (2002).

La liste des membres ayant participé à l'adoption de la présente norme est la suivante:

NOM	PRENOM	ORGANISME	STATUT - CTN
BOUCHEFA	Ouahiba	CGS	Président du comité
BENHAMIDA	Radja	IANOR	Secrétaire du comité
ISKER	Leila	ENHYD	Membre du comité
BENMEZAÏ	Yamina	ENHYD	Membre du comité
AINALOUENE	Larbi	CEE	Membre du comité
ZEMITH	Sabri	ACC M'sila	Membre du comité
BELARIBI	Mohamed Tarek	CTC - Est	Membre du comité
SITAYEB	Saïd	COSIDER - TP	Membre du comité
GUEFROUDJ	Cid	SCAEK	Membre du comité
BOUKACEM	Mohamed	ERCO	Membre du comité
LEGHEDDAR	Saïd	LTPE - Constantine	Membre du comité
BOUZEKRI	Layachi	LTPE - Béjaïa	Membre du comité
BOUBEKEUR	Amar	ENG - Constantine	Membre du comité
AÏT BELKACEM	Grazyna	ENG - Alger	Membre du comité
BELOUCHRANI	Saliha	IANOR	Membre du comité

SOMMAIRE

1. Objet et domaine d'application	4
2. Références	4
3. Termes et définitions	4
4. Types de chaux de construction	6
4.1 Classification	6
4.2 Désignation normalisée	6
4.3 Exigences chimiques	7
4.4 Exigences portant sur la résistance mécanique normalisée et autres propriétés physiques	8
4.5 Exigences de durabilité	9
5. Critères de conformité	9
5.1 Exigences générales	9
5.2 Exigences de conformité	9
Annexe A (Informatif) Représentation schématique des types de chaux et des domaines d'application	12
Annexe B (Normatif) Méthodes d'évaluation statistique applicables à la résistance mécanique et aux propriétés chimiques et physiques	13
Annexe C (Informatif) Autres propriétés de la chaux de construction	18

1. Objet et domaine d'application

La présente norme s'applique aux chaux de construction utilisées comme liants, pour préparer des mortiers pour maçonneries, enduits intérieurs et extérieurs, ainsi que pour fabriquer d'autres produits de construction.

Elle donne une définition des différents types de chaux de construction ainsi que leur classification. Elle prescrit également des exigences concernant leurs propriétés chimiques et physiques, celles-ci étant fonction du type de chaux de construction, et spécifie les critères de conformité.

Les modalités de livraison ou autres conditions contractuelles faisant normalement partie des documents échangés entre fournisseur et acheteur de la chaux, n'entrent pas dans le cadre de la présente norme.

Note : Des exigences supplémentaires sont nécessaires dans des applications spéciales, génie civil, par exemple.

2. Références

NA 234	Méthodes d'essais des ciments - Détermination des résistances mécaniques.
NA 230	Méthodes d'essais des ciments - Détermination du temps de prise et de la stabilité.
NA 254	Méthodes d'essais des ciments - Méthodes de prélèvement et d'échantillonnage du ciment.
NA 5012	Chaux de construction - Méthodes d'essai.
NA 5013	Chaux de construction - Évaluation de la conformité.
NA 5042	Méthodes d'essais des ciments - Analyse chimique des ciments.

3. Termes et définitions

Pour les besoins de la présente norme, les définitions suivantes s'appliquent (pour toute autre information, voir l'annexe A (informative)).

3.1 Chaux

Terme générique désignant toutes les formes physiques et chimiques dans lesquelles peuvent apparaître l'oxyde de calcium et de magnésium (CaO et MgO) et/ou l'hydroxyde de calcium et/ou de magnésium (Ca(OH)_2 et Mg(OH)_2).

3.2 Chaux de construction

Chaux utilisées dans la construction de bâtiments et en génie civil. Elles comprennent tous les types cités dans le Tableau 1.

3.3 Chaux aériennes

Chaux constituées principalement d'oxyde ou d'hydroxyde de calcium qui durcissent lentement à l'air sous l'effet du dioxyde de carbone présent dans l'air. En général, elles ne durcissent pas sous l'eau, car elles n'ont pas de propriétés hydrauliques. Elles peuvent être soit des chaux vives (3.4) soit des chaux hydratées (3.5).

3.4 Chaux vives, Q

Chaux aériennes constituées principalement d'oxyde de calcium et de magnésium produits par la calcination de calcaire et/ou de dolomie. Les chaux vives ont une réaction exothermique au contact de l'eau. Les chaux vives se présentent sous différents états granulaires, allant de la roche à des matériaux finement pulvérisés. Elles incluent les chaux calciques (3.6) et dolomitiques (3.7).

3.5 Chaux hydratées, S

Chaux aériennes, calciques ou dolomitiques résultant de l'extinction contrôlée des chaux vives. Elles sont produites sous forme de poudre sèche, de pâte ou de coulis (lait de chaux).

3.6 Chaux calciques, CL

Chaux constituées principalement d'oxyde de calcium ou d'hydroxyde de calcium, sans matériaux pouzzolaniques ou hydrauliques ajoutés.

Note : Les chaux de coquillages sont des chaux calciques hydratées produites par la calcination de coquilles suivie d'une extinction. Les chaux de carbure sont des chaux calciques hydratées qui sont un produit dérivé de la fabrication d'acétylène à partir de carbure de calcium.

3.7 Chaux dolomitiques, DL

Chaux constituées principalement d'oxydes ou d'hydroxydes de calcium et de magnésium, sans matériaux pouzzolaniques ou hydrauliques ajoutés.

3.8 Chaux dolomitiques semi-hydratées

Chaux dolomitiques hydratées constituées principalement d'hydroxyde de calcium et d'oxyde de magnésium.

3.9 Chaux dolomitiques totalement hydratées

Chaux dolomitiques hydratées constituées principalement d'hydroxyde de calcium et d'hydroxyde de magnésium.

3.10 Chaux hydrauliques naturelles, NHL**3.10.1 Chaux hydrauliques naturelles**

Chaux produites par la calcination de calcaires plus ou moins argileux ou siliceux avec réduction en poudre par extinction, avec ou sans broyage. Toutes les NHL ont 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.

3.10.2 Chaux hydrauliques naturelles avec matériaux ajoutés, Z

Voir 3.10.1, NHL. Certains produits spéciaux, qui peuvent contenir des matériaux hydrauliques ou pouzzolaniques adaptés rajoutés, jusqu'à 20 % en masse, sont désignés de plus par la lettre «Z».

3.11 Chaux hydrauliques, HL

Chaux principalement constituées d'hydroxydes de calcium, de silicates de calcium et d'aluminates de calcium produites par mélange des constituants appropriés. Elles ont 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.

4. Types de chaux de construction**4.1 Classification**

Les chaux aériennes doivent être classées en fonction de leur teneur en (CaO + MgO), et les chaux hydrauliques, en fonction de leur résistance à la compression, comme indiqué dans le Tableau 1 (voir annexe A).

Tableau 1 : Types de chaux de construction^{a)}

Désignation	Notation
Chaux calcique 90	CL 90
Chaux calcique 80	CL 80
Chaux calcique 70	CL 70
Chaux dolomitiques 85	DL 85
Chaux dolomitiques 80	DL 80
Chaux hydraulique 2	HL 2
Chaux hydraulique 3,5	HL 3,5
Chaux hydraulique 5	HL 5
Chaux hydraulique naturelle 2	NHL 2
Chaux hydraulique naturelle 3,5	NHL 3,5
Chaux hydraulique naturelle 5	NHL 5
a) : En outre, les chaux aériennes sont classées selon la forme distribuée : chaux vive (Q) ou chaux hydratée (S). Dans le cas particulier de chaux dolomitiques hydratées, le degré d'hydratation est identifié comme suit : S1 : semi-hydratée ; S2 : totalement hydratée.	

Cette classification fait référence aux exigences minimales de chaque type (voir Tableaux 2 et 3). La conformité à ces exigences est évaluée au moyen d'un contrôle statistique de la qualité décrit à l'article 5 de la présente norme.

4.2 Désignation normalisée

Les chaux de construction doivent être identifiées par leur type spécifié dans le Tableau 1. De plus, les chaux aériennes doivent aussi être identifiées selon la forme distribuée (chaux vive ou chaux hydratée, voir exemples ci-dessous).

Exemple 1 : La chaux calcique 90 sous forme de chaux vive est identifiée par :
NA 5011 CL 90-Q

Exemple 2 : La chaux calcique 80 sous forme de chaux hydratée (éteinte) est identifiée par :
NA 5011 CL 80-S

NA 5011

Exemple 3 : La chaux dolomitique 85 sous forme de chaux semi-hydratée est identifiée par :
NA 5011 DL 85-S1

Exemple 4 : La chaux hydraulique 5 est identifiée par :
NA 5011 HL 5

Exemple 5 : La chaux hydraulique naturelle 3,5 contenant des pouzzolanes ajoutées, est identifiée par :

NA 5011 NHL 3,5-Z

4.3 Exigences chimiques

La composition de la chaux de construction, déterminée selon la norme NA 5012, doit être conforme aux valeurs du Tableau 2. Tous les types de chaux cités dans le Tableau 2 peuvent contenir des adjuvants en faibles quantités pour améliorer la fabrication ou les propriétés de la chaux de construction. Quand ces teneurs dépassent 0,1 %, la quantité réelle et le type doivent être déclarés.

Tableau 2 : Exigences chimiques pour la chaux ^{a)}

	Type de chaux	CaO + MgO	MgO	CO ₂	SO ₃	Chaux libre
1	CL 90	≥90	≤5 ^{c)}	≤4	≤2	—
2	CL 80	≥80	≤5 ^{c)}	≤7	≤2	—
3	CL 70	≥70	≤5	≤12	≤2	—
4	DL 85	≥85	≥30	≤7	≤2	—
5	DL 80	≥80	≥5	≤7	≤2	—
6	HL 2	—	—	—	≤3 ^{b)}	≥8
7	HL 3,5	—	—	—	≤3 ^{b)}	≥6
8	HL 5	—	—	—	≤3 ^{b)}	≥3
9	NHL 2	—	—	—	≤3 ^{b)}	≥15
10	NHL 3,5	—	—	—	≤3 ^{a) b)}	≥9
11	NHL 5	—	—	—	≤3 ^{b)}	≥3

Note : Les valeurs s'appliquent à tous les types de chaux. Pour la chaux vive, ces valeurs correspondent au produit fini ; pour tous les autres types de chaux (chaux hydratées, chaux en pâte et chaux hydrauliques) les valeurs sont fondées sur le produit exempt d'eau libre et d'eau liée.

a) Les valeurs du tableau sont exprimées en pourcentage en masse.

b) Une teneur en SO₃ supérieure à 3 % et inférieure à 7 % est admise, à condition que la stabilité soit confirmée après 28 jours de conservation dans l'eau, selon un essai donné dans la NA 5042.

c) Une teneur en MgO jusqu'à 7 % est admise, à condition que la stabilité soit confirmée selon l'essai donné dans la NA 5012.

NA 5011

4.4 Exigences portant sur la résistance mécanique normalisée et autres propriétés physiques

4.4.1 Exigences portant sur la résistance mécanique normalisée des chaux hydrauliques

Les résistances normalisées des types de chaux hydrauliques et de chaux hydrauliques naturelles sont les résistances à la compression déterminées à 28 jours selon la norme NA 5012, les valeurs obtenues devant être celles indiquées au Tableau 3.

Tableau 3 : Résistance à la compression des chaux hydrauliques et des chaux hydrauliques naturelles

Type de chaux de construction	Résistance à la compression MPa	
	7 jours	28 jours
HL 2 et NHL 2	—	≥2 à ≤7
HL 3,5 et NHL 3,5	—	≥3,5 à ≤10
HL 5 et NHL 5	≥2	≥5 à ≤15 ^{a)}

a) Si HL 5 et NHL 5 ont une masse volumique apparente inférieure à 0,90 kg/dm³, la résistance peut aller jusqu'à 20 MPa.

Note : On sait que la résistance à la compression des mortiers contenant des liants à base de chaux augmente également lentement sous l'effet de la carbonatation.

4.4.2 Autres propriétés physiques des chaux vives et des chaux hydratées

Lorsqu'elles sont déterminées selon la norme NA 5012, les propriétés physiques des chaux de construction des Tableaux 4 et 5 doivent être conformes aux valeurs indiquées dans ces tableaux.

Tableau 4 : Exigences physiques de la chaux vive

	Type de chaux de construction	Stabilité après extinction ^{a)} selon 5.3.3 de la NA 5012 ^{b)}	Rendement selon 5.9 de la NA 5012 ^{b)} dm ³ / Kg
1	CL 90		
2	CL 80	Satisfait à l'essai	≥ 26
3	CL 70		
4	DL 85	Satisfait à l'essai	-
5	DL 80	Satisfait à l'essai	-

a) Extinction selon les instructions du fabricant de chaux.
b) Ces exigences s'appliquent aux chaux de construction pour les mortiers à maçonner et les enduits intérieur et extérieur.

4.4.3 Autres propriétés

D'autres propriétés, également déterminées conformément à la NA 5012, peuvent être soumises soit à des exigences dans des normes d'exécution traitant de l'utilisation des chaux, soit à des requêtes provenant des utilisateurs. Ces propriétés sont présentées dans l'annexe C, informative.

4.5 Exigences de durabilité

Dans de nombreuses applications, en particulier, dans des conditions environnementales sévères, le choix des chaux de construction influence la durabilité du mortier et des autres produits de construction, par exemple, leur résistance au gel et aux substances chimiques.

Le choix de la chaux de construction effectué à partir de la présente norme, en particulier le type et la classe de résistance selon les différentes applications et classes d'exposition, doit se conformer aux normes et/ ou règlements appropriés pour les mortiers et autres produits de construction, en vigueur sur le lieu d'utilisation.

5. Critères de conformité

5.1 Exigences générales

La conformité de la chaux à la présente norme doit être évaluée en continu sur la base d'essais sur des échantillons ponctuels. Les propriétés, les méthodes d'essai et les fréquences minimales des essais, pour chaque type et classification de chaux de construction, détaillés dans le Tableau 1, pour l'autocontrôle effectué par le fabricant, sont spécifiées dans le Tableau 6.

Pour la déclaration de conformité par le fabricant, la conformité de la chaux à la présente norme doit être évaluée sur la base du système spécifié dans la NA 5013.

5.2 Exigences de conformité

L'échantillonnage doit avoir lieu aux points de distribution de la chaux de construction.

La conformité de la chaux de construction avec les exigences relatives aux propriétés chimiques, physiques et de résistance mécanique de la présente norme, est garantie, si les exigences des Tableaux 2 à 5 sont satisfaites. Les exigences des Tableaux 2, 3, 4 et 5 doivent être considérées comme valeurs absolues.

La procédure d'évaluation dépend de la fréquence des essais pendant la période de contrôle de 12 mois. Si le nombre d'échantillons est d'au moins un par semaine, l'évaluation peut être statistique (valeurs caractéristiques) (voir annexe B).

L'évaluation statistique est normalement réalisée par attributs (voir Tableaux 6 et B.4). Si les données sont normalement réparties, l'évaluation peut être effectuée par mesures (voir Tableaux 6 et B.3).

Note : La présente norme ne traite pas du contrôle de réception à la livraison.

NA 5011

Tableau 5 : Exigences physiques pour la chaux calcique hydratée, la chaux dolomitique hydratée, la chaux en pâte, la chaux hydraulique et la chaux hydraulique naturelle⁷⁾

	Type de chaux de construction	Finesse ^{j)} selon la NA 5012, 5.2 (pourcentage refus en masse)	Eau libre ^{a)} selon NA 5012, en 5.11	Stabilité ^{b) d)}			Essai pour les mortiers ^{e)f)}		Temps de prise	
				Chaux de construction autres que chaux en pâte et chaux dolomitiques hydratées ^{c)}		chaux en pâte et chaux dolomitique hydratée	Pénétration selon NA 5012, en 5.5	Teneur en air selon NA 5012, en 5.7	Initial	Final ^{h)}
				Méthode de référence selon NA 5012, en 5.3.2.1 mm	Variante selon NA 5012, en 5.3.2.2 mm	Méthode selon NA 5012, en 5.3.3 mm			Selon NA 5012, en 5.4 h	
1 2 3 4 5	CL 90 CL 80 CL 70 DL 85 DL 80	≤ 7	≤ 2	≤ 2	≤ 20	Satisfait à l'essai	< 10 et < 50	≤ 12	-	
					-					
6 7 8 9 10 11	HL 2 HL 3,5 HL 5 NHL 2 NHL 3,5 NHL 5	≤ 15	≤ 5	≤ 2	≤ 20	-	< 10 et < 50	≤ 20	> 1	≤ 15

a) Pour les chaux en pâte, la teneur en eau libre est $\leq 70\%$ et $\geq 45\%$.

b) Voir la NA 5012, en 5.3.

c) Pour les chaux hydrauliques et les chaux hydrauliques naturelles ayant une teneur en $\text{SO}_3 > 3\%$ et $\leq 7\%$, la stabilité est testée en outre selon la NA 5012, en 5.3.2.3.

d) Les chaux calciques hydratées, les chaux calciques en pâte et les chaux dolomitiques hydratées renfermant des grains d'un diamètre $> 0,2\text{ mm}$ doivent, en outre, être stables lorsqu'elles sont essayées selon la NA 5012, en 5.3.4.

e) Avec un mortier normalisé, conformément au 5.5.1 de la NA 5012.

f) Ne s'applique pas aux chaux en pâte.

g) Les exigences en matière de finesse et de teneur en eau libre s'appliquent aux chaux quelle que soit l'application envisagée. Les exigences en matière de stabilité, de pénétration, de teneur en air et de temps de prise ne s'appliquent qu'aux chaux de construction pour mortiers à maçonner et enduits intérieur et extérieur.

h) Ne s'applique pas à HL 2 et NHL 2.

NA 5011

Tableau 6 : Propriétés, méthodes d'essai et fréquences minimales d'essai^{a)} pour les essais d'autocontrôle effectués par le fabricant

Propriété	Type de chaux de construction ^{b)}	Méthode d'essai à utiliser ^{c)}	Fréquence minimale d'essais réalisés par le fabricant			
			Essais d'autocontrôle			
			Normal ^{d)} (voir 5.2)	Essais initiaux de type ^{k)}	Contrôle par mesures ^{g)}	Contrôle par attributs ^{h)}
1	2	3	4	5	6	7
Résistance à 7 jours	HL 5N NHL 5	NA 5012	2/mois	2/semaine		X
Résistance à 28 jours	Toutes HL et NHL	NA 5012	2/mois	2/semaine	X	
Finesse	Chaux hydratées Toutes HL et NHL	NA 5012	1/jour	2/jour		X
Stabilité	Chaux vives ^{e)} Chaux hydratées HL 2 ; HL 3,5 NHL 2 ; NHL 3,5	NA 5012	1/jour ^{f)}	2/jour		X
	Chaux en pâte HL 5 ; NHL 5	NA 5012	1/semaine	2/semaine		X
Temps de prise	Toutes HL et NHL	NA 230	1/mois	2/mois		X
Pénétration/ Besoin en eau	Toutes HL et NHL	NA 5012	1/mois ^{g)}	2/mois ^{h)}		X
CaO + MgO, MgO	Chaux vives Chaux hydratées Chaux en pâte	NA 5012	1/mois	1/mois		X
CO ₂	Chaux vives Chaux hydratées Chaux en pâte	NA 5012	1/semaine	2/semaine		X
SO ₃	Chaux vives Chaux hydratées Chaux en pâte	NA 5042	1/mois	2/mois		X
	Toutes HL et NHL	NA 5042	1/mois	2/mois		X
Chaux libre	Toutes HL	NA 5012	1/mois	2/mois		X
	Toutes NHL	NA 5012	1/semaine	2/semaine		X
Eau libre	Chaux hydratées Chaux en pâte Toutes HL ; NHL	NA 5012	1/mois	2/mois		X
Teneur en air	Toutes HL et NHL	NA 5012	1/semaine	2/semaine		X
Rendement	Chaux vives ⁱ⁾	NA 5012	2/ans	1/mois		X

a) Les méthodes utilisées pour prélever et préparer les échantillons doivent être conformes à la NA 5012. Des essais peuvent être effectués à tout moment entre la production et la distribution. Le producteur doit veiller au respect des exigences au moment de la distribution.

b) Voir article 3 et Tableau 1.

c) Lorsque la partie concernée de la NA 230 ou NA 5042 et de la NA 5012 l'autorise, d'autres méthodes peuvent être utilisées, à condition qu'elles donnent des résultats équivalents à ceux obtenus à l'aide des méthodes de référence.

d) La période de contrôle pour l'évaluation de la conformité est de 12 mois.

e) Après extinction (voir Tableau 5, note de bas de Tableau g).

f) Si 30 résultats d'essais consécutifs sont inférieurs à 10 % de la valeur requise, la fréquence d'essais peut être réduite à un toutes les deux semaines. Si un résultat quelconque est supérieur à 10 % de la valeur requise, revenir aux essais quotidiens.

g) Si les données ne sont pas réparties normalement, l'évaluation doit être effectuée par attributs.

h) Si le nombre d'échantillons prélevés pendant la période de contrôle est d'au moins un par semaine, l'évaluation peut être réalisée par mesures.

i) Pour les chaux sans additifs, seuls des essais initiaux sont nécessaires.

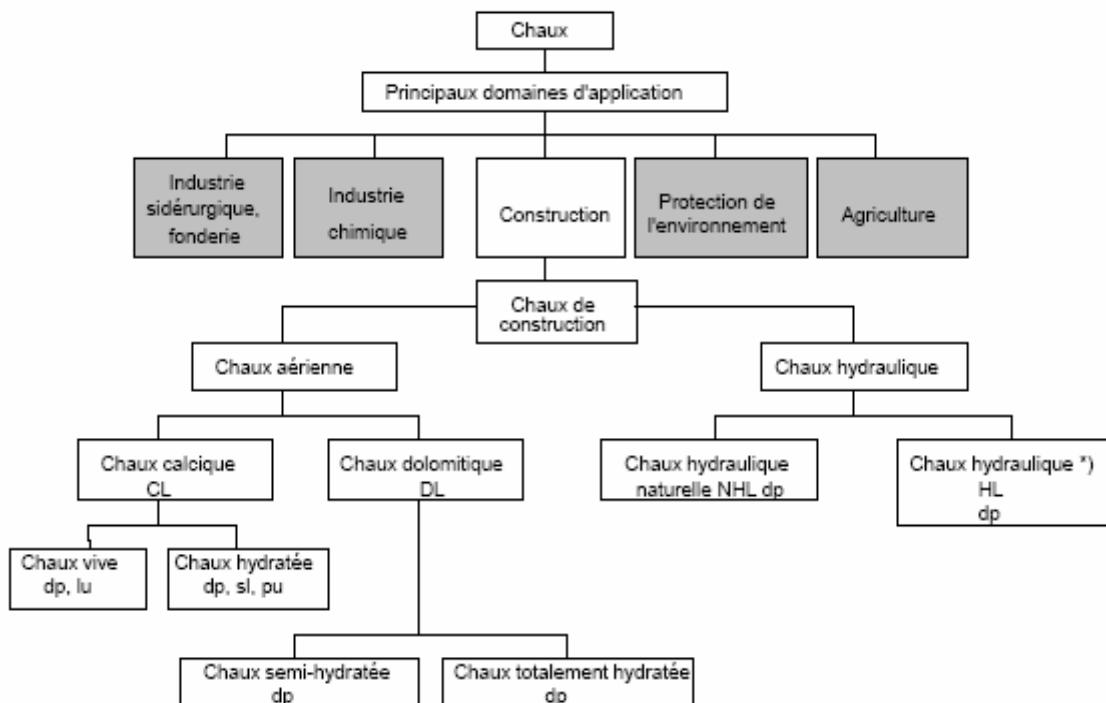
k) Voir la NA 5013.

l) Ne s'applique pas aux chaux dolomitiques.

Annexe A

(Informative)

Représentation schématique des types de chaux et des domaines d'application



Légende

Distribuée sous forme de :

dp : poudre sèche

sl : coulis (lait de chaux)

lu : roche

pu : pâte



Couvert par la présente norme

Non couvert par la présente norme

*) Dans certains pays, on l'appelle chaux hydraulique artificielle.

Annexe B

(Normative)

Méthodes d'évaluation statistique applicables à la résistance mécanique et aux propriétés chimiques et physiques**B.1 Termes et définitions****B.1.1 Probabilité admissible d'acceptation CR**

Pour un plan d'échantillonnage donné, la probabilité admissible d'acceptation de la chaux de construction avec une valeur caractéristique à l'extérieur de la valeur caractéristique spécifiée.

B.1.2 Plan d'échantillonnage

Plan spécifique qui stipule la(les) taille(s) des échantillons (statistiques) à utiliser, le percentile P_k , et la probabilité admissible d'acceptation CR.

B.1.3 Valeur caractéristique

Valeur d'une propriété requise à l'extérieur de laquelle se situe un pourcentage spécifié, le percentile P_k , de toutes les valeurs de la population.

B.1.4 Valeur caractéristique spécifiée

Valeur caractéristique d'une propriété chimique, physique ou de la résistance mécanique qui, dans le cas d'une limite supérieure, ne doit pas être dépassée, ou qui, dans le cas d'une limite inférieure, doit être au moins atteinte.

B.1.5 Valeur limite pour résultat unique

Valeur d'une propriété chimique, physique ou de la résistance mécanique qui, pour un résultat d'essai unique, dans le cas d'une limite supérieure, ne doit pas être dépassée, ou qui, dans le cas d'une limite inférieure, doit être au moins atteinte.

B.1.6 Échantillon ponctuel

Échantillon prélevé en même temps et dans un seul et même lieu, relativement aux essais prévus. Il peut être obtenu en combinant un ou plusieurs incrémentés consécutifs immédiatement (voir la NA 254).

B.1.7 Essais d'autocontrôle

Essais effectués en continu par le fabricant d'échantillons ponctuels de chaux de construction prélevés au(x) point(s) de distribution de l'usine/dépôt.

B.1.8 Période de contrôle

Période de production et d'expédition identifiée pour l'évaluation des résultats d'essais d'autocontrôle.

B.2 Critères statistiques de conformité**B.2.1 Généralités**

La conformité doit être formulée en termes statistiques sur la base :

- Des valeurs caractéristiques spécifiées pour les propriétés chimiques et physiques ainsi que pour la résistance mécanique, comme spécifié dans l'article 4 de la présente norme ;

NA 5011

- Du percentile P_k à partir duquel la valeur caractéristique a été spécifiée, comme indiqué dans le Tableau B.1 ;
- De la probabilité admissible d'acceptation CR , comme indiqué au Tableau B.1.

Tableau B.1 : Valeurs requises P_k et CR

	Exigences de résistance mécanique		Exigences physiques et chimiques
	Résistance à 7 jours et à 28 jours (limite inférieure)	Résistance à 28 jours (limite supérieure)	
Percentile P_k sur lequel la définition de la valeur caractéristique est fondée	5 %		10 %
Probabilité admissible d'acceptation CR	5 %		

Note : L'évaluation de la conformité par une méthode fondée sur un nombre fini de résultats d'essai, ne peut que donner une valeur approximative du pourcentage de résultats de la population étudiée s'écartant de la valeur caractéristique. Plus l'effectif de l'échantillon est important (nombre de résultats d'essais), meilleure est l'approximation. La probabilité d'acceptation CR choisie conditionne le degré d'approximation du plan d'échantillonnage.

La conformité aux exigences de la présente norme doit être vérifiée par mesures ou par attributs, comme décrit en B.2.2 et B.2.3 et spécifié dans le Tableau 6. La période de contrôle doit durer 12 mois.

B.2.2 Contrôle par mesures

Ce contrôle part de l'hypothèse que les résultats d'essais suivent une distribution normale. La conformité est vérifiée si les inégalités suivantes (B.1) et (B.2) sont satisfaites :

$$\bar{X} - k_A s \geq L \quad \dots \text{ (B.1)}$$

Et

$$\bar{X} - k_A s \leq U \quad \dots \text{ (B.2)}$$

Où :

- \bar{X} est la moyenne arithmétique de l'ensemble des résultats d'essai d'autocontrôle obtenus au cours de la période de contrôle ;
- s est l'écart-type sur l'ensemble des résultats d'essais d'autocontrôle obtenus au cours de la période de contrôle ;
- k_A est la constante d'acceptabilité ;
- L est la limite inférieure spécifiée donnée dans les Tableaux 2, 3, 4 et 5, et dont il est question à l'article 4 ;
- U est la limite supérieure spécifiée donnée dans les Tableaux 2, 3, 4 et 5, et dont il est question à l'article 4.

La constante d'acceptabilité k_A est fonction du percentile P_k sur lequel la valeur caractéristique est fondée, de la probabilité admissible d'acceptation CR et du nombre n de résultats d'essais. Les valeurs de k_A sont énumérées dans le Tableau B.2 ci-après.

Tableau B.2 : Constante d'acceptabilité k_A

k_A ^{a)}		
Nombre de résultats d'essai n	pour $P_k = 5\%$ (résistance inférieure)	pour $P_k = 10\%$ (autres propriétés)
20 à 21	2,40	1,93
22 à 23	2,35	1,89
24 à 25	2,31	1,85
26 à 27	2,27	1,82
28 à 29	2,24	1,80
30 à 34	2,22	1,78
35 à 39	2,17	1,73
40 à 44	2,13	1,70
45 à 49	2,09	1,67
50 à 59	2,07	1,65
60 à 69	2,02	1,61
70 à 79	1,99	1,58
80 à 89	1,97	1,56
90 à 99	1,94	1,54
100 à 149	1,93	1,53
150 à 199	1,87	1,48
200 à 299	1,84	1,45
300 à 399	1,80	1,42
> 400	1,78	1,40

Note : Les valeurs données dans ce tableau sont valables pour $CR = 5\%$.

a) Il est également possible d'utiliser les valeurs de k_A valables pour des valeurs intermédiaires de n .

B.2.3 Contrôle par attributs

Le nombre c_D de résultats de contrôle s'écartant de la valeur caractéristique doit être déterminé et comparé à un nombre acceptable c_A , calculé à partir du nombre n de résultats d'essai d'autocontrôle et du percentile P_k spécifié dans le Tableau B.1.

La conformité est vérifiée lorsque l'inégalité suivante (B.3) est satisfaite :

$$c_D \leq c_A \quad \dots \text{ (B.3)}$$

Les valeurs de c_A sont fonction du percentile P_k ayant servi de base à la définition de la valeur caractéristique, de la probabilité admissible d'acceptation CR et du nombre n de résultats d'essai. Les valeurs de c_A figurent dans le Tableau B.3.

Tableau B.3 : Valeurs de c_A

Nombre de résultats d'essai n^a	Valeurs de c_A correspondant à $P_k = 10\%$
20 à 39	0
40 à 54	1
55 à 69	2
70 à 84	3
85 à 99	4
100 à 109	5

Note : Les valeurs données dans ce tableau sont valables pour $CR = 5\%$.

a) Si le nombre de résultats d'essai n est inférieur à 20 (P_k étant égal à 10 %), on ne peut pas utiliser un critère statistique de conformité. Cependant, un critère $c_A = 0$ doit être utilisé dans le cas où $n < 20$.

B.3 Critères de conformité applicables à chacun des résultats

Outre les critères statistiques de conformité, la conformité des résultats d'essai aux exigences de la présente norme implique que l'on doit vérifier que chacun des résultats d'essai respecte les valeurs limites singulières spécifiées et données dans le Tableau B.4.

Tableau B.4 : Valeurs limites applicables à chacun des résultats

Propriété	Chaux de construction	Valeurs limites
(CaO + MgO) (% en masse)	CL 90 CL 80, DL 80	85 75
Limite inférieure	CL 70 DL 85	65 80
(MgO) (% en masse)	CL 90, CL 80, CL 70	7
Limite supérieure	DL 85	27
Limite inférieure	DL 80	4
(CO ₂) (% en masse)	CL 90	6
Limite supérieure	CL 80, DL 85, DL 80	9
	CL 70	14

NA 5011

Tableau B.4 : Valeurs limites applicables à chacun des résultats (fin)

Propriété	Chaux de construction	Valeurs limites
(SO ₃) (% en masse) Limite supérieure	CL 90, CL 80, CL 70, DL 85, DL 80 HL 2, HL 3,5, HL 5, NHL 2, NHL 3,5, NHL 5	2,5 3,5
Chaux libre (% en masse) Limite inférieure	HL 2 HL 3,5 HL 5 NHL 2 NHL 3,5 NHL 5	7 5,2 2,5 13 8 2,5
Eau libre (% en masse) Limite supérieure	CL 90, CL 80, CL 70, DL 85, DL 80 HL 2, HL 3,5, NHL 2, NHL 3,5, HL 5, NHL 5	2,5 2,5 2,5
Résistance à 7 jours (MPa) Limite inférieure	HL 5, NHL 5	1,5
Résistance à 28 jours (MPa) Limite inférieure	HL 2, NHL 2 HL 3,5, NHL 3,5 HL 5, NHL 5	1,5 2,7 4,0
Résistance à 28 jours (MPa) Limite supérieure	HL 2, NHL 2 HL 3,5, NHL 3,5 HL 5, NHL 5	10 14 20
Finesse		
Refus (% en masse) 0,09 mm	CL, DL HL, NHL	9 17
Limite supérieure 0,2 mm	CL, DL HL, NHL	4 7
Teneur en air (% en volume) Limite supérieure	CL 90, CL 80, CL 70, DL 85, DL 80 HL 2, HL 3,5, HL 5, NHL 2, NHL 3,5, NHL 5	15 23
Valeur de pénétration (en millimètres) Limite supérieure	Pour toutes les chaux de construction	55
Limite inférieure	Pour toutes les chaux de construction	8
Stabilité (en millimètres) Limite supérieure	Pour toutes les chaux de construction autres que la chaux vive, la chaux en pâte, la chaux dolomitique et la chaux dolomitique hydratée : - méthode de référence (5.3.2.1 de NA 5012) - autre méthode (5.3.2.2 de NA 5012)	2 20
Temps de prise Limite inférieure — initiale (en minutes) — finale (en heures)	HL 2, HL 3,5, HL 5, NHL 2, NHL 3,5, NHL 5 HL 3,5, HL 5, NHL 3,5, NHL 5	50 16

Annexe C
(Informative)
Autres propriétés de la chaux de construction

Des exigences complémentaires à celles données en 4.4 de la présente norme peuvent être soumises, soit à des exigences dans des normes d'exécution traitant de l'utilisation des chaux, soit à des requêtes provenant des utilisateurs. Ces autres propriétés sont les suivantes :

- a) Réactivité (chaux vive) ;
 - b) Demande en eau (essai de mortiers) ;
 - c) Rétention d'eau (essai de mortiers) ;
 - d) Masse volumique apparente en kilogrammes par décimètre cube
- | | | |
|-------------------|------------|---|
| (CL 70/80/90 | 0,3 à 0,6) | Ces valeurs concernent les chaux hydratées. |
| (DL 80/85 | 0,4 à 0,6) | Ces valeurs concernent les chaux hydratées. |
| (HL 2 ; NHL | 0,4 à 0,8) | |
| (HL 3,5 ; NHL 3,5 | 0,5 à 0,9) | |
| (HL 5 ; NHL 5 | 0,6 à 1,0) | |
- e) Finesse (chaux vive) ;
 - f) Blancheur (essai à définir entre le fournisseur et l'acheteur).

Si la conformité de la chaux de construction avec ces exigences complémentaires est évaluée en permanence sur la base d'échantillons ponctuels, les propriétés à soumettre aux essais, les méthodes d'essai et les fréquences minimales d'essais de chaux de construction pour les essais d'autocontrôle à effectuer par le fabricant, doivent être telles que spécifiées dans le Tableau C.1.

Tableau C.1 : Propriétés, méthodes d'essai et fréquences minimales d'essais^{a)} pour les essais d'autocontrôle à effectuer par le fabricant

Propriété	Type de chaux de construction ^{b)}	Méthode d'essai à utiliser ^{c)}	Fréquence minimale d'essais à effectuer par le fabricant			
			Essais d'autocontrôle			
			Situation courante ^{d)} (voir 5.2)	Essai de type initial ^{g)}	Contrôle par mesures ^{e)}	Contrôle par attributs ^{f)}
1	2	3	4	5	6	7
Masse volumique apparente	Chaux hydratées	NA 5012	1/mois	2/mois		X
	Toutes HL et NHL	NA 5012	1/semaine	2/semaine		X
Rétention d'eau	Toutes HL et NHL	NA 5012	2/an	1/mois		X
Réactivité	Chaux vive	NA 5012	1/semaine	2/semaine		X

a) Les méthodes utilisées pour prélever et préparer les échantillons doivent être conformes à la NA 5012. Les essais peuvent être effectués à tout moment entre la production et la distribution. Le producteur doit veiller au respect des exigences au moment de la distribution.
b) Voir article 3 et Tableau 1.
c) Lorsque la norme concernée de la NA 230 ou la NA 5042 et de la NA 5012 le permet, d'autres méthodes peuvent être utilisées, à condition qu'elles donnent des résultats équivalents à ceux obtenus par les méthodes de référence.
d) La période de contrôle pour l'évaluation de la conformité est de 12 mois.
e) Si les données ne sont pas réparties normalement, l'évaluation doit être effectuée par attributs.
f) Si le nombre d'échantillons prélevés pendant la période de contrôle est d'au moins un par semaine, l'évaluation peut être réalisée par mesures.
g) Voir NA 5013.