

République Algérienne Démocratiques et Populaire
Ministère de l'Enseignements Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbas
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة جيلالي ليايس - سيديلعباس
كلية التكنولوجيا
قسم الهندسة الميكانيكية

Polycopié pédagogique

Binders and Concretes

Cours

« Liants et Bétons »

Cours destiné aux étudiants :

Filière : Génie Mécanique

Option : Génie des Matériaux

Parcours : Licence

Semestre : S5

Unité d'enseignement : UEF 3.1.2

Cours présenté par :

Dr. REFFAS Sid Ahmed

Année universitaire 2024/2025

Avant - propos

Le présent document est destiné aux étudiants de la formation de licence (LMD) filière Génie des matériaux, dans le cadre du programme officiel. L'objectif attendu de ce cours, est que l'étudiant doit avoir toutes les informations des classes des matériaux qui sont les liants et les bétons. Ce sont des matériaux de construction utilisés en quantités gigantesques à l'échelle du globe et de Comprendre les mécanismes de prise et de durcissement des liants, Maîtriser les propriétés des bétons et leurs formulations, Ainsi Analyser les performances et limites de ces matériaux.

Ce cours est crucial pour les futurs ingénieurs en génie des matériaux, car les liants et les bétons représentent l'un des secteurs les plus stratégiques de l'industrie mondiale.

Sommaire

| | | |
|-------------|--|----|
| I. | Introduction : | I |
| I. 1. | Classification Des Matériaux De Construction : | I |
| I. 1. 1. | Les Métaux | I |
| I. 1. 2. | Les Polymères | I |
| I. 1. 3. | Les Céramiques | 2 |
| I. 2. | Propriétés Des Matériaux De Construction | 2 |
| I. 2. 1. | Propriétés Physiques | 2 |
| I. 2. 2. | La Dimension | 2 |
| I. 2. 3. | La Densité | 2 |
| I. 2. 4. | La Masse Volumique | 3 |
| I. 2. 5. | La porosité | 4 |
| I. 2. 6. | L'humidité | 4 |
| I. 2. 7. | Poids Spécifique | 4 |
| I. 3. | Les Propriétés Chimiques | 4 |
| I. 3. 1. | Acidité | 4 |
| I. 3. 2. | Basicité | 5 |
| I. 4. | Les Propriétés Mécaniques | 5 |
| I. 5. | Propriétés Thermiques | 5 |
| I. 5. 1. | Dilatation Thermique | 5 |
| I. 5. 2. | La Conductibilité Thermique | 5 |
| | Chapitre I : Les liants aériens. | 6 |
| I. 1. | Introduction | 6 |
| I. 2. | Définition Du Plâtre | 6 |
| I. 2. 1. | Caractérisation De Gypse | 7 |
| I. 2. 2. | Structure Cristalline De Gypse Naturel | 8 |
| I. 3. | Les Anhydrites | 8 |
| I. 3. 1. | Définition De Semi-Hydrates | 9 |
| I. 3. 1. 1. | Le Semi-Hydrate B | 9 |
| I. 3. 1. 2. | Le Semi-Hydrate A | 9 |
| I. 4. | Propriétés Chimiques Et Physiques De Plâtre Semi Hydrate | 10 |
| I. 4. 1. | Les Semi-Hydrates | 10 |
| I. 4. 2. | Le Semi-Hydrate B | 10 |
| I. 5. | Procédés De Fabrication De Plâtre | 11 |
| I. 5. 1. | Fabrication Du Plâtre | 11 |
| I. 5. 1. 1. | L'extraction | 11 |
| I. 5. 1. 2. | Concassage-Calibrage | 11 |
| I. 5. 1. 3. | Concasseurs A Mâchoire | 12 |
| I. 5. 1. 4. | La Cuisson | 12 |
| I. 5. 1. 5. | Le Broyage | 13 |
| I. 5. 1. 6. | Conditionnements Et La Logistique | 13 |
| I. 5. 1. 7. | Le Contrôle Et La Validation Des Produits | 14 |

| | | |
|-------------|--|----|
| 1. 6. | La Chaux | 14 |
| 1. 6. 1. | Chaux Aérienne | 14 |
| 1. 6. 1. 1. | Historique | 14 |
| 1. 6. 1. 2. | Réaction Chimique | 15 |
| 1. 6. 2. | Utilisation | 16 |
| 1. 6. 3. | Chaux Hydraulique | 16 |
| 1. 6. 3. 1. | Réactions Chimiques | 17 |
| 1. 6. 3. 2. | Utilisation Et Stockage | 17 |
| | Chapitre 2 : La Chimie Des Ciments. | 18 |
| 2. 1. | Définition Du Ciment | 18 |
| 2. 2. | Fabrication Du Ciment | 18 |
| 2. 2. 1. | Extraction Et Préparation Des Matières Premières | 18 |
| 2. 2. 2. | Phase De Pré Homogénéisation | 18 |
| 2. 2. 3. | Séchage Et Broyage | 19 |
| 2. 2. 4. | Cuisson | 19 |
| 2. 2. 5. | Refroidissement Du Clinker | 19 |
| 2. 2. 6. | Broyage | 19 |
| 2. 3. | Les Types Des Ciments | 20 |
| 2. 4. | Le Ciment Portland | 20 |
| 2. 4. 1. | Principe De Fabrication Ciment Portland | 20 |
| 2. 4. 1. 1. | Fabrication Par Voie Humide | 21 |
| 2. 4. 1. 2. | Fabrication Par Voie Sèche | 22 |
| 2. 5. | Caractéristiques Physiques D'un Ciment | 24 |
| 2. 6. | Hydratation Du Ciment | 24 |
| 2. 6. 1. | Hydratation Des Silicates | 25 |
| 2. 6. 2. | Hydratation Des Aluminates | 25 |
| 2. 6. 3. | Evolution De La Microstructure | 27 |
| | Chapitre 3 : Le Béton. | 28 |
| 3. 1. | Définition Et Constituants Du Béton | 28 |
| 3. 2. | Essai Sur Les Bétons | 28 |
| 3. 2. 1. | Les Essais Sur Béton Durci | 29 |
| 3. 2. 2. | Des Essais Sur Béton Frais | 29 |
| 3. 3. | Classification Des Bétons | 30 |
| 3. 4. | Les Composants Du Béton | 30 |
| 3. 4. 1. | Les Granulats | 30 |
| 3. 4. 1. 1. | Types Des Granulats | 30 |
| 3. 5. | Le Durcissement | 32 |
| 3. 6. | Le Retrait | 32 |
| 3. 7. | Résistance A La Compression | 33 |
| 3. 8. | CONCLUSION | 34 |
| | Références | 35 |

1. **Introduction** :

En sciences des matériaux, il est possible de classer les matériaux de base en trois catégories, mais dans la construction, il est devenu courant de distinguer les matériaux selon les domaines d'emploi et les caractéristiques principales. Les propriétés principales des matériaux de construction peuvent être généralement divisées en plusieurs groupes telles que :

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

La découverte de nouveaux matériaux a permis de véritables révolutions dans l'histoire des technologies. Les grandes périodes de la préhistoire sont d'ailleurs définies par les matériaux maîtrisés, âge de pierre, âge de bronze, âge de fer.

Cela montre l'importance des matériaux dans la vie des gens. Aujourd'hui le nombre des matériaux nouveaux est en constante augmentation.

On considère comme matériaux de construction tous les éléments utilisés pour la construction d'ouvrages en béton armé ou en métal, qui sont couramment employés dans le secteur des travaux publics (routes, ponts, aéroports, etc.).

1.1. **Classification des matériaux de construction** :

En sciences des matériaux, selon la nature de liaisons moléculaire, il est possible de classer les matériaux de base en trois catégories :

1.1.1. **Les métaux (liaisons métalliques)** :

Exemples : aciers, aluminium, métaux purs ou alliages. Type de liaison métallique.

+ **Propriétés spécifiques** :

- ✓ Conduction de chaleur et électricité.
- ✓ Températures de fusion et de vaporisation en général élevées.
- ✓ Propriétés élastiques élevées.
- ✓ Possibilité d'augmenter la résistance (durcissement structural).
- ✓ Denses, sensibles à la corrosion et à la fatigue.

1.1.2. **Les polymères (liaisons covalentes Liaisons faibles, solides organiques)** :

Macromolécules à squelette covalent, exemple : $(CH_2-CH_2)_n$. Type de liaison : Van der Waals (liaison faible) :

+ **Propriétés spécifiques** :

- ✓ Deux températures spécifiques ;
- ✓ Transition vitreuse et dégradation ;
- ✓ Faibles propriétés élastiques ;

- ✓ Résistants à l'usure et à la corrosion.

+ Catégories :

- ✓ Thermoplastiques (polystyrène, polyéthylène, PVC) ;
- ✓ Thermodurcissables (Résines, mousses) ;
- ✓ Elastomères (Caoutchouc, silicone).

1.1.3. Les céramiques (liaisons ioniques, solides inorganiques) :

Verres, béton, alumine, diamant, carbures, roches, briques, porcelaine. Type de liaison ionique ou covalente (très énergétiques)

+ Propriétés spécifiques :

- ✓ Tenue en température ;
- ✓ Excellentes propriétés élastiques ;
- ✓ Fragiles, peu ductiles, peu tenaces ;
- ✓ Résistants à l'usure et à la corrosion ;
- ✓ Prix élevé pour les céramiques techniques.

Tab.1 : Ordre de grandeurs de propriétés selon la famille de matériau.

| Propriété | Métaux | Céramique | Polymères |
|---|--|---------------------------------------|---|
| Densité (Kg/m ³) | 8000 | 4000 | 1000 |
| Dilatation thermique (1/K) | 10 ⁻⁶ /100x10 ⁻⁶ | 10 ⁻⁶ /20x10 ⁻⁶ | 50x10 ⁻⁶ /500x10 ⁻⁶ |
| Capacité calorifique Cp (J/Kg.K) | 100/1000 | 500/1000 | 1000/3000 |
| Conductivité thermique K (W/(m.K)) | 10/500 | 0.1/20 | 0.1/20 |
| Température de fusion ou de transition vitreuse T=(K) | 250/3700 | 1000/4000 | 350/600 |
| Module d'élasticité | 20/400 | 100/500 | 10 ⁻³ /10 |
| Coefficient de poisson | 0.25/0.35 | 0.2/0.3 | 0.3/0.5 |
| Contrainte a rupture [MPa]- Compression | 100/3500 | 50/5000 | 10/350 |
| Contrainte a rupture [MPa]- Traction | 100/3500 | 10/4000 | 10/150 |
| Dureté | Moyenne | Haute | Basse |
| Usinabilité (Qualité de ce qui est usinable) | Bonne | Très Mauvaise | Très Bonne |
| Résistance a l'impact | Bonne | Mauvaise | Très Mauvaise |
| Résistance au fluage thermique | Haute | Très Faible | Très Faible |
| Résistance à la corrosion | Moyenne | Excellente | Bonne |

1.2. Propriétés des matériaux de construction :

1.2.1. Propriétés physiques :

1.2.2. **La dimension** : Grandeur physique qui correspond à l'espace (distance, surface, volume ou angle).

1.2.3. La densité :

➤ *Densité particulière* :

Définie par une unité, c'est la densité d'une grandeur correspond au rapport statique d'une population donnée sur un élément d'espace (longueur, surface ou un volume).

Exemple : population 100 personnes par km².

Pour une masse d'une substance : On entend sous densité (kg/m³) la masse de l'unité de la substance, en m³.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

Tab.2 : Densité pour certains matériaux de construction.

| Matériaux | Densité (Kg/m ³) |
|-----------------|------------------------------|
| Acier | 7800 à 7900 |
| Ciment portland | 2900 à 3100 |
| Granit | 2700 à 2800 |
| Sable | 2600 à 2800 |
| Verre | 2500 à 3000 |
| Calcaire | 2400 à 2600 |
| Bois | 1500 |

➤ *Densité d'un corps (sans dimension)* :

Exprimée par nombre sans dimension, la masse expérimentale directe de la masse volumique s'appuie toujours sur une pesée hydrostatique avec comme référence une masse d'eau utilisé.

$$d = \frac{\rho(\text{substance})}{\rho(\text{eau})} \quad (2)$$

1.2.4. La masse volumique :

On entend par masse volumique (kg/m³) la masse de l'unité de volume du matériau à l'état naturel (pore et vide y compris) (figure1).

$$\delta_0 = \frac{m_1}{V_1} \quad (3)$$

M₁ : la masse du matériau en kg.

V₁ : Volume en m³.

La masse volumique d'un matériau peut être différente en fonction de la porosité et de la cavitation.

a- Masse volumique apparente :

Les matériaux pulvérulents (sables, graviers, ciment) se caractérisent par leur masse volumique apparente. Dans le volume de ces matériaux sont inclus non seulement les pores des grains séparés, mais également les vides entre les grains ;

b- Masse volumique réel :

C'est le rapport entre la masse de matériau et le volume réel des grains (le volume des grains et le volume des pores fermés y compris) ;

c- Masse volumique absolue (la masse volumique de la matière) :

Pour l'obtenir, il faut broyer très finement le matériau et mesurer la masse volumique réelle de la poudre obtenue (sans les pores ni les vides inter-granulaires).

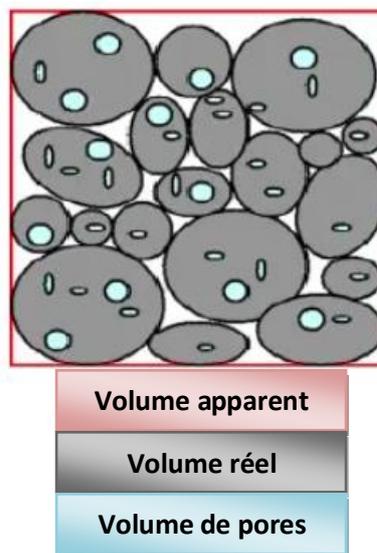


Fig. 1 : Définition des volumes.

1.2.5. La porosité : On entend sous porosité (en %) d'un matériau le degré de remplissage de son volume par les pores.

$$P = \frac{(1-\delta_0)}{\rho} * 100\% \quad (4)$$

Avec :

δ_0 : la masse volumique de matériau en kg/m^3 et ρ : la densité du matériau en kg/m^3 .

Les pores sont des petites alvéoles dans le matériau remplis d'air ou d'eau. Les pores peuvent être ouverts ou fermés et de petite ou grandes dimensions. En fonction de la porosité il est possible de juger des autres propriétés du matériau, telles que : Masse volumique, résistance, capacité d'absorption d'eau, conductibilité thermique, durabilité.

NB : aussi c'est le rapport entre le volume de vides V_v et le volume total V_t d'un corps donné :

$$P = \frac{V_v}{V_t} \quad (5)$$

1.2.6. L'humidité (la 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 :

$$W = \frac{m_h - m_s}{m_s} * 100\% \quad (6)$$

Où :

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

m_h : est la masse humide d'échantillon.

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

1.2.7. Poids spécifique :

(Le poids spécifique est un cas particulier d'une densité volumique de force.) Le poids spécifique ou poids volumique est le poids par unité de volume d'un matériau. (Le poids = la masse * accélération).

$$\delta = \rho g \text{ (N/m}^3\text{)} \quad (7)$$

ρ : la densité kg/m^3 .

g : l'accélération de la chute libre en m/s^2 .

1.3. Les propriétés chimiques :**1.3.1. Acidité :**

Un acide est un composé chimique, soit minéral, soit organique, accepteur au sens large de doublets électroniques, et généralement défini par des réactions-types dans différents solvants, en particulier en libérant l'ion hydronium dans le solvant eau. La pâte de ciment fortement alcaline (valeur PH env. 12.5) offre une excellente résistance aux bases. Seules des bases très fortes (hydroxyde de sodium ou potasse caustique, > 20 %) attaquent l'alumine de la pâte de ciment et les granulats.

1.3.2. Basicité (Alcalinité) :

Une base est un produit chimique qui, à l'inverse d'un acide, est capable de capturer un ou plusieurs protons ou, réciproquement, de fournir des électrons. Un milieu riche en bases est dit basique ou alcalin.

1.4. Les propriétés mécaniques :

Les propriétés mécaniques des matériaux sont caractérisées par la capacité de résister à toute sollicitation extérieure (compression, traction, flexion, fluage etc.). Elle est définie

par la contrainte maximale de rupture d'un matériau sous un chargement extérieur (force, poids.....).

1.5. Propriétés thermiques :

1.5.1. Dilatation thermique :

La dilatation thermique est l'expansion à pression constante du volume d'un corps occasionné par son réchauffement, généralement imperceptible. On peut calculer pour tous les matériaux isotropes la variation de longueur et donc de volume en fonction de la variation de température.

1.5.2. La conductibilité thermique :

Elle est la capacité d'un matériau de laisser passer la chaleur à travers son épaisseur. Elle est appréciée au moyen du coefficient de conductibilité thermique égal à la quantité de chaleur traversant un échantillon du matériau de 1 m d'épaisseur et de 1 m² de surface pendant 1 heure.

Tab.3 : Coefficient de conductibilité thermique pour certains matériaux.

| Matériaux | Coefficient de conductibilité thermique (W*m.°C) |
|--------------------------------|---|
| Acier | 58 |
| Granit | 2.9 à 3.3 |
| Béton lourd | 1 à 1.6 |
| Eau | 0.59 |
| Béton léger | 0.35 à 0.8 |
| Béton pour isolation thermique | 0.08 à 0.3 |
| Verre cellulaire | 0.06 à 0.08 |

La conductibilité thermique est une de grande importance pour mes matériaux utilisés dans la construction des murs et des planchers des édifices chauffés, pour l'isolement des réfrigérateurs et différents sources thermiques.

CHAPITRE 1 : LES LIANTS AÉRIENS.

1.1. 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.

1.2. Définition du plâtre :

Le plâtre est un sulfate de calcium hémihydraté, de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ qui fait prise lorsqu'on le dissout dans l'eau suivant un processus de recristallisation. En effet sa solubilité dans l'eau conduit à la formation du dihydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$, peu soluble, et qui précipite.

Le plâtre est fabriqué à partir du gypse par chauffage entre 150° et 170°C dans un four ou dans un autoclave selon la réaction :



Par la modicité de la température de chauffage, la déshydratation relativement facile fut utilisée dès 9 000 ans avant notre ère puisqu'on trouve des traces de plâtre de cette date en Anatolie. Les Égyptiens l'utilisaient comme revêtements et comme joints pour les monuments dont la grande pyramide de Gizeh, où les blocs sont liés par des mélanges de plâtre, chaux et poudre de marbre. Les romains l'utilisent aussi largement comme revêtements intérieur et extérieur et comme joints. Après la disparition de l'Empire romain, le plâtre, comme le ciment, tombe un peu dans l'oubli. Par contre, la civilisation

arabe réinvente son usage et en fait des motifs de décoration délicatement ciselés en arabesques et revêtements ouvragés pour les mosquées, palais et raids.

Les formes du plâtre dans la nature :

- L'anhydrite, assez rare, ou sulfate du calcium anhydre répondant à la formule chimique Ca SO_4 ;
- Le gypse, très répandant, ou sulfate du calcium à deux molécules d'eau, répondant à la formule chimique $\text{Ca, SO}_4, 2 \text{ H}_2\text{O}$.

Le Gypse constitue la matière première du plâtre qu'on le nomme le : « di-hydrate de sulfate de calcium ». Déshydraté par une cuisson au four et se transforme en plâtre ou héli-hydrate de sulfate de calcium (figure2).

Il existe deux grandes catégories de Gypses qui sont : Les Gypses naturels et Les Gypses synthétiques.

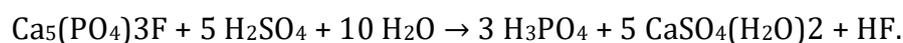
- **Le gypse naturel** : Le gypse appartient à la famille des évaporites qui sont des roches sédimentaires les plus solubles dans l'eau. On considère généralement que le gypse résulte de l'évaporation de l'eau des lagunes marines sursaturées. Les gisements les plus importants datent de l'ère secondaire ou tertiaire. Le gypse est présent en quantités relativement importantes dans la nature. Il existe de nombreux gisements dans le monde : en France, au Mexique, en Espagne etc... Le gypse se cristallise dans le système monoclinique. À l'échelle moléculaire, il présente une structure feuilletée dans laquelle alterne une couche d'eau et deux couches de sulfate de calcium. Les principales variétés que l'on rencontre dans la nature sont :

A) Sous forme macro cristallisée : le Gypse lamellaire, le fer de lance et le gypse lenticulaire ;

B) Sous forme micro cristallisée : l'albâtre, le gypse fibreux, le gypse saccharoïde et le gypse éolien. Le Gypse exploité dans l'industrie plâtrier est une roche cristallisée à grains généralement fin (gypse saccharoïde). Il est rarement pur à cause des impuretés en nombre et proportion variables d'une carrière à l'autre qui sont argile, calcaire, silice, dolomite, anhydrite, etc...

- **Gypse de synthèse** : Le Gypse de synthèse est le produit essentiel d'une réaction chimique industrielle. Sa production est limitée à cause des impuretés ainsi que pour des raisons techniques et économiques. En effet, pour l'élimination de ces derniers produits au cours de ce type nécessite des traitements chimiques, les principales sources de Gypse chimique sont :

1) La fabrication de l'acide phosphorique (phosphogypse) : par attaque du phosphate naturel.



2) La fabrication d'autres acides minéraux : (acide borique, brogypse, acide fluorhydrique, fluor Gypse) ou organique, organo-Gypse (acide citrique, tartrique, etc...) $\text{CaF}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{HF} + \text{CaSO}_4$.

3) La fabrication de l'oxyde de titane (TiO_2) : conduit également à une production de Gypse appelé titan gypse.

4) La désulfuration des gaz et fumées : l'oxydation de l'anhydride sulfureux SO_2 (anhydride sulfurique) puis sa réaction avec de la chaux.



Rose de sable



Gypse saccharoïde

Fig. 2 : Différents systèmes de cristallisation de gypse.

1.2.1 Caractérisation de gypse :

Le gypse est amorphe et sa densité varie de 2,31 à 2,33. [1] Il est sous forme cristalline dans les variétés granulaires (saccharoïdes) ou molles (albâtre), dans les grands cristaux prismatiques (pieds à baïonnette ou tique), en cristaux laminaires ou fibreux.

1.2.2. Structure cristalline de gypse naturel :

Le gypse ou sulfate de calcium di-hydraté ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) cristallise dans le système monoclinique [2].

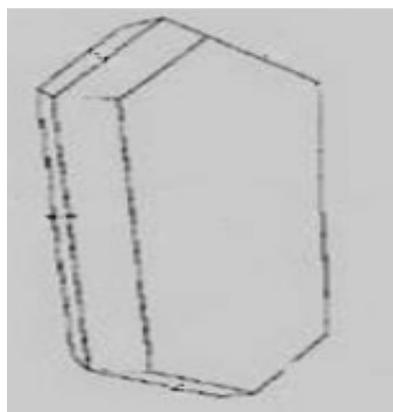


Fig. 3 : Morphologie du cristal de gypse.

Les éléments constituant la structure du gypse sont les suivants : des ions SO_4 formant des tétraèdres dont l'atome central est le soufre et les sommets des atomes d'oxygène ; des atomes de calcium, chaque atome est relié à huit atomes d'oxygène dont deux appartiennent à des molécules d'eau, chacune étant liée à deux atomes d'oxygène de

deux tétraèdres SO_4 différents et à un atome de calcium. Le gypse présente une structure feuilletée en couches parallèles dans laquelle alternent une couche d'eau et deux couches de sulfate CaSO_4 . Chaque couche de sulfate est constituée de chaînes $\text{Ca-SO}_4\text{-Ca-SO}_4$. Chaque molécule d'eau présente deux types de liaisons avec les couches de sulfate. D'une part une liaison avec son propre feuillet, d'autre part une liaison faible avec le feuillet adjacent.

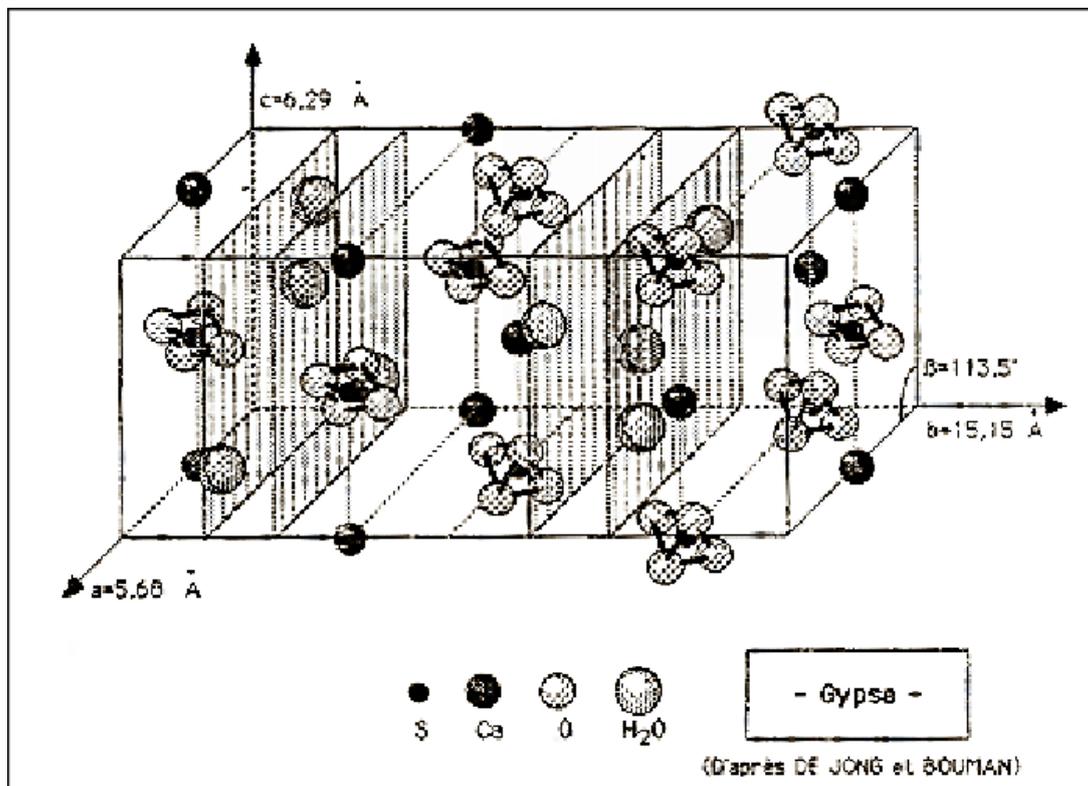


Fig. 4 : Structure cristalline du gypse.

En effet la structure de gypse présente au-dessus (Figure 4) montre bien qu'elle avait des molécules d'eau dans sa structure, ce qui conduit par cuisson du gypse à des changements de structure par déshydratation avec l'apparition de plusieurs variétés structurales et on obtient également le plâtre.

1.3. Les anhydrites :

L'anhydrite naturelle de formule chimique CaSO_4 se rencontre dans les formations gypseuses et salifères, ou dans certains gîtes métallifères. On considère qu'elle s'est formée, comme le gypse, par évaporation de l'eau de mer, mais elle peut également résulter d'une déshydratation lente du gypse sous l'effet d'une pression importante lors de plissements géologiques [3]. L'anhydrite est aussi obtenue à des températures élevées lors de la cuisson du gypse selon la température de cuisson du gypse, on peut obtenir les anhydrites I, II ou III qui présentent des structures cristallographiques différentes.

L'anhydrite III est la première forme allotropique obtenue à 200 °C. Elle est soluble dans l'eau et se réhydrate très rapidement en semi hydrate au contact de l'eau en phase vapeur, au cours d'une réaction appelée réversion.



L'anhydrite III de structure hexagonale se transforme en anhydrite II de structure orthorhombique vers 220 °C pour le semi hydrate α et vers 350 °C pour le semi hydrate β . L'anhydrite II est une espèce stable thermodynamiquement qui se réhydrate lentement au contact de l'eau liquide. À 1230 °C, l'anhydrite II se transforme en anhydrite I de structure cubique qui ne se réhydrate que très difficilement. L'anhydrite I est instable à température ambiante et se décompose à 1250 °C. La réaction d'hydratation du plâtre autrement dit la prise du plâtre la première étude de la prise du plâtre est due à LAVOISIER en 1768. Dès cette époque, LAVOISIER parle d'un processus de cristallisation il explique que si après avoir enlevé au gypse son eau par le feu, on la lui rend, il la reprend avec avidité, il se fait une cristallisation subite et irrégulière, et les petits cristaux qui se forment se confondant les uns avec les autres, il en résulte une masse très dure. [4]

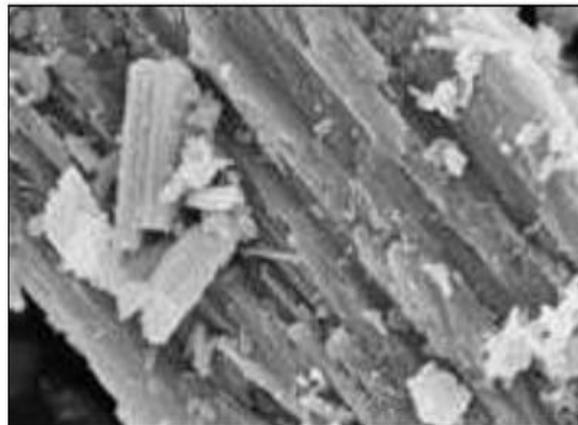


Fig. 5 : Photo prise au MEB de forme d'hémi hydrate β (5 μ m).

1.3.1. Définition de semi-hydrates :

Les semi-hydrates (ou les demi-hydrates) sont obtenus au début de l'opération de déshydratation du gypse. La teneur en eau variée de 0,15 à 0,66 %. La température selon la réaction suivante varie entre 50 °C à 160 °C $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O} + 3/2 \text{H}_2\text{O}$ On trouve deux types des semi-hydrates α et β . [5]

1.3.1.1. Le Semi-hydrate β :

Les plâtres β sont obtenus dans des fours à pression atmosphérique et ils ressemblent à des plâtres de construction ou préfabrication. Un bon four de cuisson de plâtre β nous permettra d'obtenir une grande régularité de cuisson du plâtre avec une composition aussi proche que possible qui est de 100 % de semi-hydrate afin d'un temps de prise long qui est de l'ordre de 15 à 17 mn (suivant la qualité de la pierre).

1.3.1.2. Le Semi-hydrate α :

Les plâtres α sont obtenus dans des autoclaves. La cuisson du gypse sous la pression qui est en générale aux alentours de 6 à 9 bars. On obtient alors des plâtres durs, très liquide est c'est dû au gain de gypse cuit sous pression qui n'est pas explosé et sa surface de contact avec l'eau est faible). Ces types de plâtres sont utilisés en tant que plâtre de modelage pour la décoration et la réalisation d'objets d'arts (statues...).

Les plâtres α ont des caractéristiques de résistance mécaniques élevées grâce à des taux de gâchage (Eau/plâtre) très faible de 0,25 à 0,5 d'eau pour 1 de plâtre.

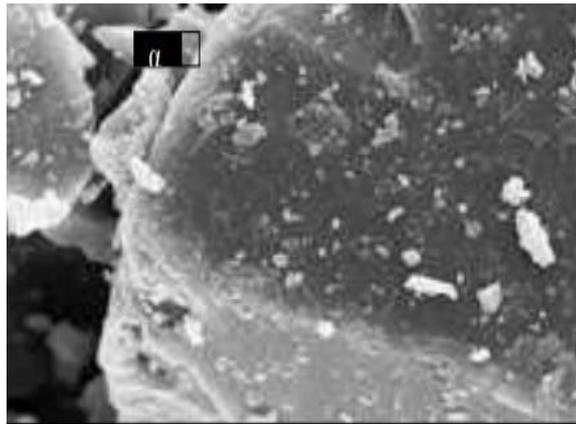


Fig. 6 : Photo prise au MEB de forme d'hémi hydrate β (5 μ m).

1.4. Propriétés chimiques et physiques de plâtre semi hydrate :

1.4.1. Les semi-hydrates :

Les semi- hydrates α sont compacts et ils ont une forme cristalline. Leurs solubilités dans l'eau est inférieure à celle du composé β . Leurs contacts avec l'eau donne un mélange fluide. C'est un constituant de très haute qualité, utilisé en particulier, comme plâtre dentaire. Ils possèdent une grande résistance mécanique. Leurs temps de prise est inférieur à celle des semi hydrate β . [6]

1.4.2. Les semi-hydrates β :

Ils sont floconneux et ils présentent des fissures écailleuses. Leurs solubilités dans l'eau est supérieur à celle des composés α . La combinaison avec de l'eau donne un mélange plus épais. Ils nécessitent une grande quantité d'eau pour le gâchage. Leurs temps de pris est plus long. Ils possèdent une faible résistance mécanique (10 fois moins que les semi hydrate α). Ils sont considérés comme des constituants essentiels de plâtre préfabriqué [7].

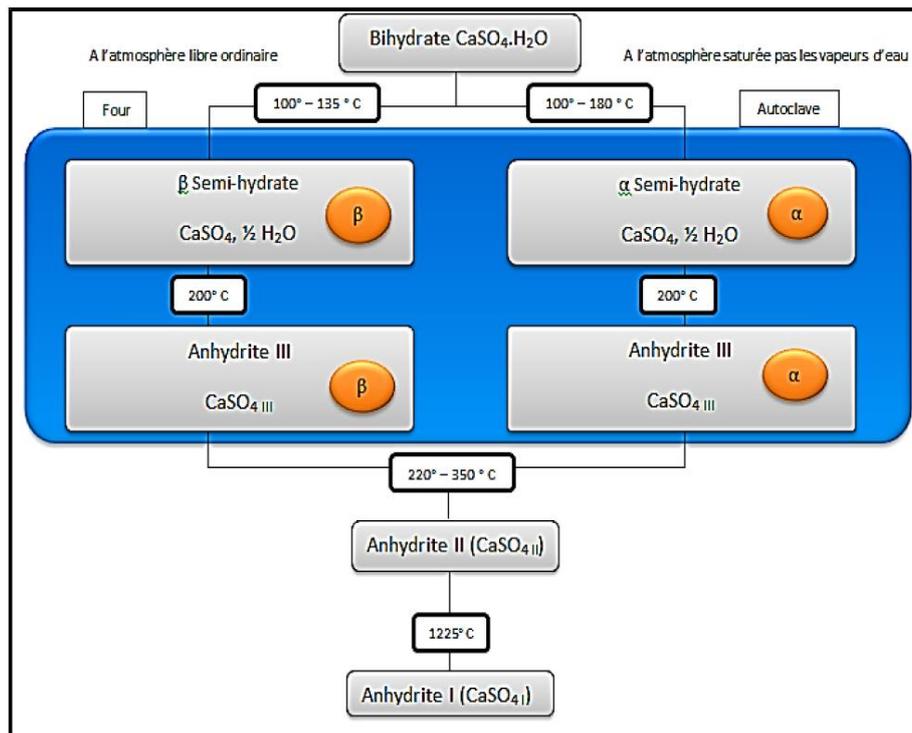


Fig. 7 : Schéma de la déshydratation.

Tab.4 : Caractéristiques des semi-hydrates α et β .

| Les caractéristiques | Semi-hydrate β | Semi-hydrate α |
|---|----------------------|-----------------------|
| Masse volumique Cm3/g | 2.76 | 2.63 |
| Teneur en eau (%) | 6.2 | 6.2 |
| Masse moléculaire | 145.15 | 145.15 |
| Volume moléculaire (g) | 52.4 | 55.2 |
| Temps de prise (min) | 15 à 20 | 25 0 35 |
| Expansion (mm/m) | 2.8 | 1.8 |
| Resistance à la traction (sec) MPa | 6.5 | 1.3 |
| Système cristallin | Rhomboédrique | Rhomboédrique |
| Solubilité dans l'eau à 20 °C (en g de CaSO4 pour 100 CM) | 0.36 | 0.74 |
| Chaleur d'hydratation à 258 Cal/mol de gr | Vois humide 4100 | Vois humide 4600 |
| Solubilité dans l'eau à 3 °C, 9/100 ml | 0.825 | 1.005 |
| Cristallisation | Compacte | Spongieuse |
| Surface spécifique | Faible | Elevée |
| Gâchage saturation | Fort | Faible |

1.5. Procédés de fabrication de plâtre :

1.5.1. Fabrication du plâtre :

1.5.1.1. L'extraction :

Le plâtre provient du Gypse, qui est un minéral essentiel composé de sulfate de calcium hydraté. Il peut être extrait à ciel ouvert ou en carrière souterraine. L'usine de « entreprise plâtre dérivés » extrait à ciel ouvert, c'est la carrière de (DAYFAL) qui fournit le gypse très réputé pour sa pureté, sa blancheur, sa régularité de teneur en humidité et les qualités indispensables à la production des plâtres de spécialité...(figure 8).



Fig. 8 : Extraction du gypse à ciel ouvert.

1.5.1.2. Concassage-calibrage :

Le concassage a pour but de réduire le Gypse extrait de la carrière en produits plus fins. Généralement, après un concassage, il ne subsiste plus de blocs dont la dimension est supérieure à 100mm. Ce Gypse transporté dans des camions par exemple, et peut être envoyé en usine pour le traitement ultérieur (figure 9).



Fig. 9 : Concassage du gypse.

Il existe plusieurs types de concasseurs sur le marché et peuvent traiter jusqu'à (1 200 à 1 300 t/h).

Les différents types de concasseurs utilisés dans l'industrie dans le cadre de notre étude.

1.5.1.3. Concasseurs à mâchoire :

Les blocs sont écrasés entre 2 mâchoires cannelées, l'une fixe, l'autre animée d'un mouvement alternatif.

a) Concasseurs à cylindre dentes : Les deux cylindres tournent en sens inverses. Leur but est de calculer les rendements.

b) Concasseur a cylindre unique et mâchoire : Le Gypse est écrasé par un cylindre denté tournant devant une mâchoire fixe, bien adapté au traitement d'un matériau humide.

c) Concasseur à percussion (à marteaux) : Un cylindre à marteau fixe tourne à grande vitesse et projette ainsi les blocs contre les enclumes.

1.5.1.4. La Cuisson :

a) Déshydratation du gypse :

Le Gypse en général contient 20,93% d'eau dont 5,20% sont fortement combinés et correspondent à $\frac{1}{2}$ H₂O, tandis que 15,73% sont faiblement combinés et correspondent à $\frac{3}{2}$ H₂O.

La déshydratation du Gypse est la base de la fabrication des plâtres. Il est connu que suivant les conditions dans lesquelles s'opèrent.

Les caractéristiques des plâtres obtenus seront différentes.

La déshydratation des Gypses est donc en fonction de la température, de la durée de cuisson, de la nature du Gypse et de la granulométrie mais également d'autres paramètres comme la pression de vapeur d'eau.



Fig. 10 : Four cuisson du gypse.

b) La cuisson du plâtre beta :

Après un premier broyage, la poudre fine calibrée est cuite à raison de (5-15) t/ h, dans le four qui opère une cuisson indirecte du Gypse placé dans une virole en rotation au-dessus de brûleurs à fioul.

Chaque type de Gypse a sa propre cuisson à différentes températures et le facteur de prise déterminant le temps dont les températures sont les suivantes :

| Types de gypse | Température |
|----------------------------|--------------|
| Gypse de moulage | 220 °C |
| Gypse de construction | 350 - 450 °C |
| Gypse d'extra fin de prise | 220 - 250 °C |

c) La cuisson du plâtre alpha :

On dépose les pierres de Gypse précédemment triées, dans des paniers que l'on descend ensuite dans des autoclaves (sorte de "Cocotte-Minute"). La cuisson s'effectue à une pression pouvant aller jusqu'à 10 bars. Les caractéristiques du plâtre ainsi obtenu permettent un gâchage avec peu d'eau (5 à 6 fois moins qu'avec du plâtre Beta) pour un matériau offrant alors des résistances mécaniques beaucoup plus élevées.

1.5.1.5. Le broyage :

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

1.5.1.6. Conditionnements et la logistique :

L'usine dispose de plusieurs silos repartis sur différents postes de chargement en vrac qui permettent une logistique en flux tendu.

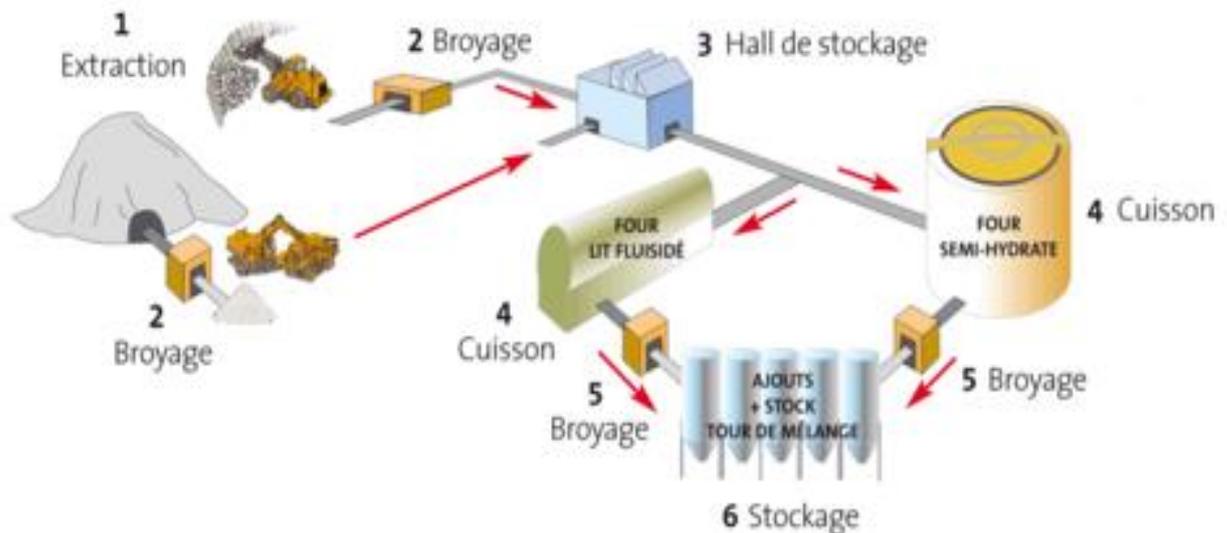


Fig. 11 : Etapes de fabrication du plâtre simplifié.

1.5.1.7. Le contrôle et la validation des produits :

En amont (à l'extraction) l'état et la pureté du Gypse font l'objet de contrôles périodiques des échantillons de Gypse comme un long processus et contrôlent la qualité du laboratoire par exemple il faut vérifier que la pureté, le temps de prise et la granulométrie de produits, ou encore qu'il soit facile à utiliser. Ces contrôles permettent la validation définitive des produits finis ainsi que le pilotage des paramètres de conduite de cuisson, de broyage et de mélange. Ils sont garants de la qualité plâtres mis en vente [8].

1.6. La 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.

1.6.1. Chaux aérienne :

1.6.1.1. Historique :

La chaux est apparue dans le courant du 2eme 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 7^{ème} 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 2^e 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.

1.6.1.2. Réaction chimique :

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

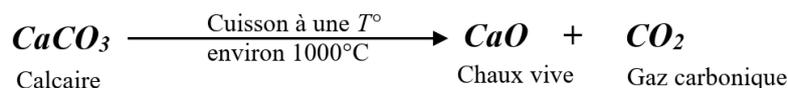


Fig. 12 : Pierres de calcaires et Morceaux de la chaux vive.

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.

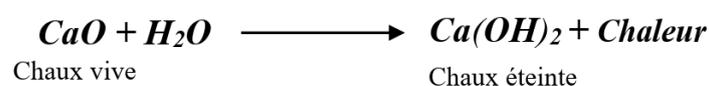




Fig. 13 : Morceaux de chaux vive aspergés à l'eau et Poudre de la chaux éteinte.

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

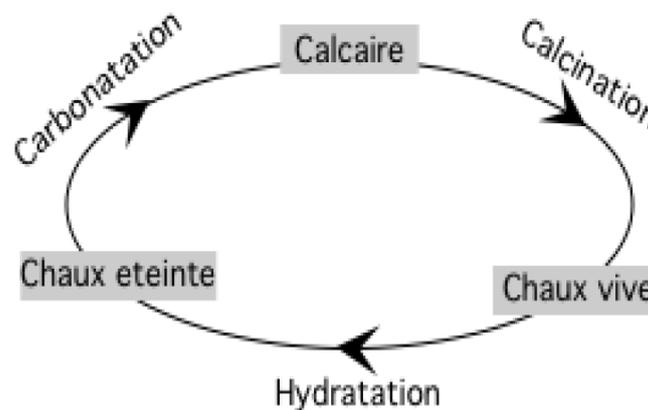
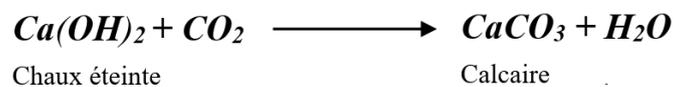


Fig. 14 : Cycle de la chaux.

1.6.2. 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 moulue pour :

a) 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 ;

b) 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 ;

c) 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.

1.6.3. Chaux Hydraulique :

Il est apparu très tôt que des adjonctions permettaient d'améliorer la prise et la stabilité du mortier de chaux, en particulier de la rendre insensible à l'action de l'eau. L'enduit, assurant l'étanchéité des citernes construites à Jérusalem au 10^e 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'hydroaluminates 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).

1.6.3.1. Réactions chimiques :

Au cours de la cuisson du calcaire marneux certaines molécules CaO s'allie avec les oxydes SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, contenus dans les minéraux d'argiles en formant les silicates CaO.SiO₂, les aluminates CaO.ferrites CaO.Fe₂O₃ 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 :

$$m = \frac{\%CaO}{\%(SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3)} \quad (8)$$

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

1,7 ≤ m ≤ 9 : Chaux hydraulique.

1,1 ≤ m ≤ 1,7 : Ciment romain.

m ≥ 9 : Chaux aérienne.

La chaux hydraulique gâchée à l'eau, après durcissement à l'eau continue a durcir à l'air par carbonatation des molécules $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sous l'action du CO_2 qui s'infiltré 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.

1.6.3.2. 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.

CHAPITRE 2 : LA CHIMIE DES CIMENTS.

2.1. Définition du ciment :

Le ciment est un liant, une matière pulvérulente, formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte homogène et plastique, capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées appelées « agrégat » ou « granulat » [9].

C'est une gangue hydraulique durcissant rapidement et atteignant en peu de jours son maximum de résistance. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Son emploi le plus fréquent est sous forme de poudre, mélangée à de l'eau, pour agréger du sable fin, des graviers, pour produire du mortier, ou encore du béton.

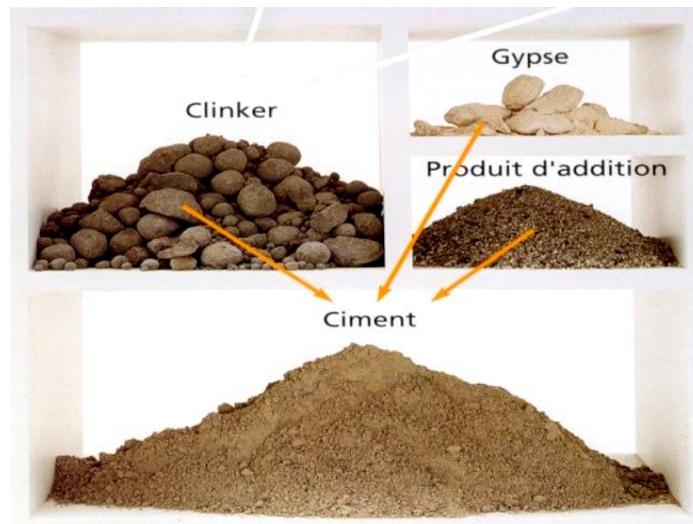


Fig. 15 : Les composés du ciment.

2.2. Fabrication du ciment :

Le ciment courant ou portland, est obtenu à partir du calcaire (CaCO_3) et de l'argile (constitué de silicates en général d'aluminium : SiO_2 et Al_2O_3), se mélange homogène est dite le cru.

La combinaison de se mélange (le cru) chauffés à très haute température à 1450°C , elle donne le clinker, composant principal du ciment.

La fabrication du ciment se distingue en six étapes principales :

2.2.1. Extraction et préparation des matières premières :

Prélever les matières premières (le calcaire et l'argile). Sont extraites des parois rocheuses par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique à partir de carrières. Les roches sont acheminées par des camions ou des bandes transporteuses vers un atelier de concassage.

2.2.2. Phase de pré homogénéisation :

Rare sont les carrières homogènes c'est-à-dire la même teneur de calcaire sur l'ensemble du gisement. Pour cette raison on procède à l'harmonisation qualitative de la matière obtenue. Cette homogénéisation permet d'avoir une stabilité de la cuisson.

Cette opération peut être réalisée : soit dans un hall où on obtient le mélange homogène en disposant la matière en couches horizontales superposées, puis en la reprenant verticalement à l'aide d'une roue-pelle ; soit dans un silo vertical par brassage par air comprimé.

2.2.3. Séchage et broyage :

Le séchage et le broyage sont l'étape visant à favoriser les réactions chimiques ultérieures. Les matières premières sont séchées et broyées (par des broyeurs à boulets ou verticaux à meules) très finement, les dimensions des particules à l'ordre du micron.

2.2.4. Cuisson :

Le cru va suivre différentes étapes de transformation lors de sa lente progression dans le four, vers la partie basse, à la rencontre de la flamme. La température nécessaire à la clinkérisation est de l'ordre de 1 450 °C. Il y a plusieurs sources pour alimenter cette chaleur.

À la sortie du four, le clinker doit être refroidi, broyé et l'entreposé dans des silos.

2.2.5. Refroidissement du clinker :

Après la sortie du clinker de four, la température est de l'ordre de 1400 °C. En utilise des refroidisseurs pour abaisser à environ 50 à 250 °C, le refroidissement après la cuisson du clinker dans cette très haute température joue un rôle important sur la forme et la réactivité des constituants du clinker. Et a également une incidence sur la qualité du ciment. La vitesse de refroidissement, particulièrement à partir de hautes températures, affecte donc la texture de cristallisation des composés du clinker, et par là même, leur réactivité.

Un refroidissement trop lent pouvant amener la libération de chaux libre et la transformation du C₃S en C₂S qui entraîne une baisse des résistances.

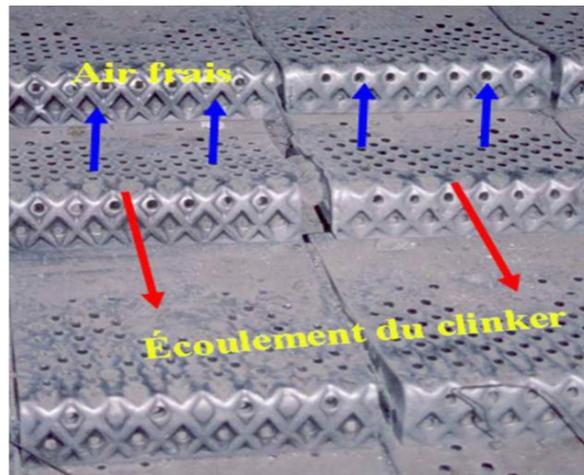


Fig. 16 : Refroidisseur à grilles.

2.2.6. Broyage :

Le but de broyage est, première le clinker est finiment broyé en poudre, deuxième pour l'ajout du gypse de 3 à 5 % (dont le rôle est de clinker le réguler le phénomène de prise), on obtient le ciment portland. Et les autres ajouts cimentaires (laitier de haut-fourneau, cendres volantes, pouzzolanes...), qui donnée les différentes catégories des ciments normalisés.

Il y a quatre méthodes de broyage du ciment sont : humide, semi humide, semi-sèche et sèche, qui est la voie la plus employée aujourd'hui.

2.3. Les types des ciments :

Les ciments peuvent être classés en cinq grandes familles et 27 variantes principales (voir la norme (en)EN-197-1-2000) pour plus de détails :

- **Ciment Portland** ou artificiel (noté CEM I) ;
- **Ciment Portland composé** (noté CEM II) ;
- **Ciments de hauts fourneaux** (noté CEM III) ;
- **Ciments pouzzolaniques** (noté CEM IV) ;
- **Ciments au laitier et aux cendres** ou **ciment composé** (noté CEM V).

Tab. 5 : Désignation des différents types de ciment.

| | Cim. Portland | Cim. Portland composé | | Cim. de haut fourneau | | | Cim. pozzalannique | | Cim. au laitier et aux cendres | |
|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------|---------------|----------------------|----------------------|--------------------------------|----------------------|
| | CPA-CEM I | CPJ-CEM II/A | CPJ-CEM II/B | CHF-CEM III/A | CHF-CEM III/B | CHF-CEM III/C | CPZ-CEM IV/B | CPZ-CEM IV/B | CLC-CEM V/A | CLC-CEM V/A |
| Clinker (K) | | | | | | | | | | |
| Laitier (S) | 95% | 80% ≤94% | 65% ≤79% | 35% ≤64% | 20% ≤34% | 5% ≤19% | 65% ≤90% | 45% ≤64% | 40% ≤64% | 20% ≤39% |
| Pouzzolanes (Z) | * | 6%≤ | 21%≤ | 36% ≤65% | 66% ≤80% | 81% ≤95% | * | * | 18% ≤30% | 31% ≤50% |
| Cendre siliceuse (V) | * | Total | Total | * | * | * | 10% total ≤35% | 10% total ≤55% | 18% total ≤30% | 31% total ≤50% |
| Fumée de silice (D) | * | ≤20% | ≤35% | * | * | * | (Fumée ≤10%) | (Fumée ≤10%) | | * |
| Cendres calciques (W) | * | (Fumée de silice | (Fumée de silice | * | * | * | * | * | * | * |
| Schistes (T) | * | ≤10%) | ≤10%) | * | * | * | * | * | * | * |
| Calcaires (L) | * | | | * | * | * | * | * | * | * |
| Fillers (F) | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |

2.4. Le ciment Portland :

Est un ciment artificiel obtenu par la cuisson proche de l'état de fusion pâteuse de 1450 °C des chaux limites mélangées intimement (calcaires contenant de 20 à 25 % d'argile) et longtemps appelées chaux brûlées, ou de roches calcaires et de roches argileuses soigneusement dosées. C'est l'appellation courante des ciments lents. La dénomination de Portland vient des fabriques de Portland au Royaume-Uni, où le ciment avait la même couleur que les pierres de cette région.

2.4.1. 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 (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃), et l'oxyde de fer (Fe₂O₃). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Les matériaux se trouvent

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

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

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

Le mélange est porté à $1450\text{-}1550\text{ }^\circ\text{C}$, température de fusion. Le liquide ainsi obtenu permet l'obtention des différentes réactions. On suppose que les composants du ciment sont formés de la façon suivante : une partie de CaO est 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.

2.4.1.1. 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 les quels tourne un manège de herses.

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

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

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

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

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

De toutes façons, quel que soit la méthode de fabrication, à la sortie du four, on a un même clinker qui est encore chaud d'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.

2.4.1.2. 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 aérogليسeur.

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 pré-homogénéisation puis d'une homogénéisation.

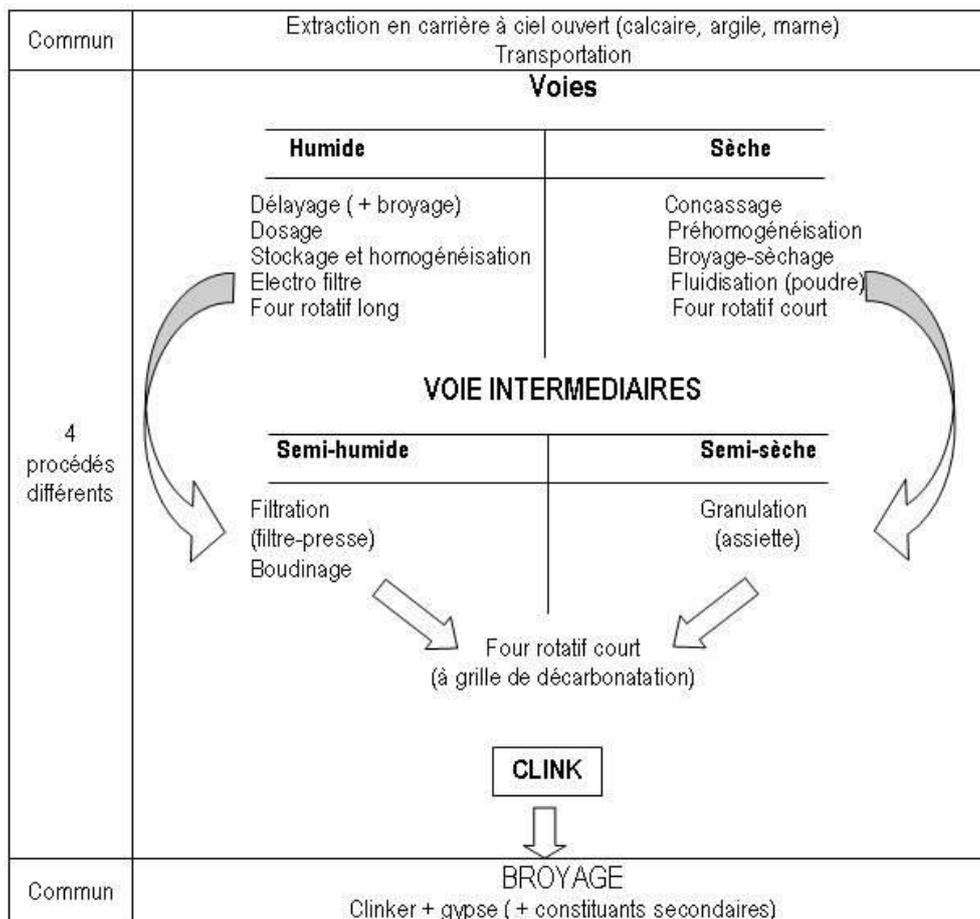


Fig. 17 : : Schéma récapitulatif des quatre méthodes de fabrication du ciment.

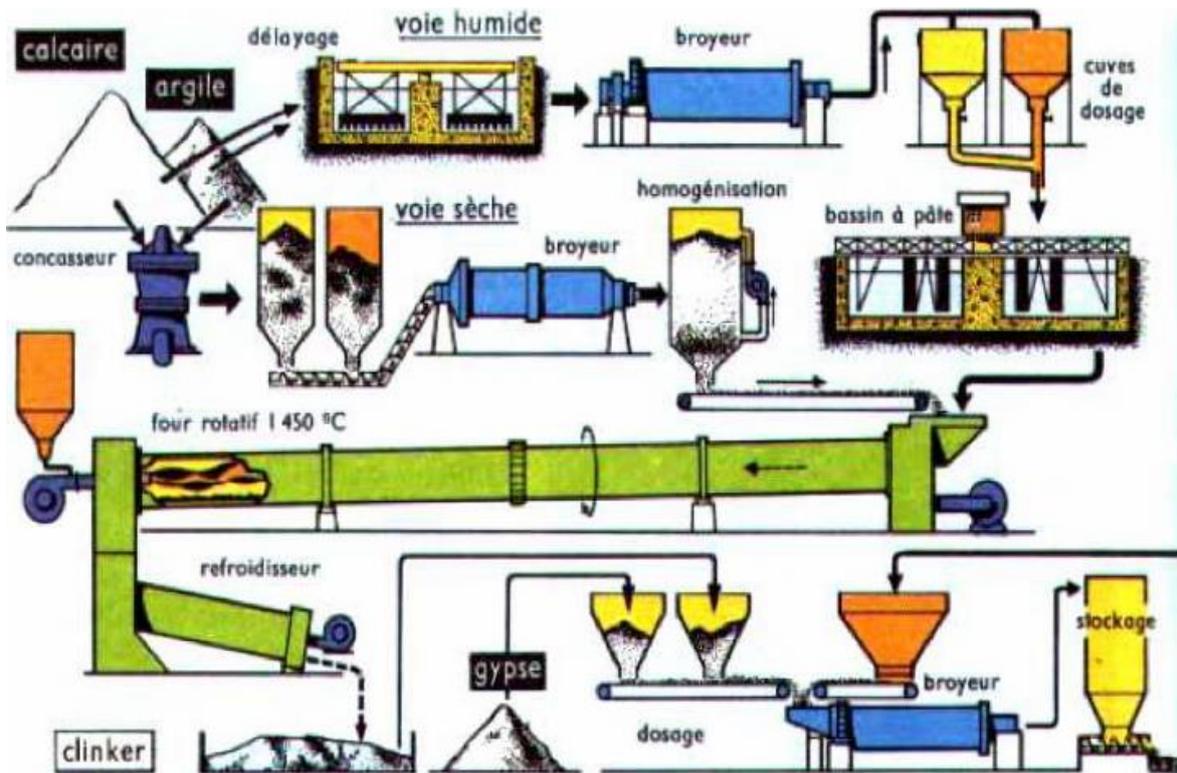


Fig. 18 : schéma de fabrication du ciment par voie sèche.

2.5. Caractéristiques physiques d'un ciment :

- ✓ **La surface spécifique** : est le rapport entre l'aire développée des grains, à leur masse : elle varie en général de 2700 à 3500 cm²/g. (Jusqu'à 7000 cm²/g pour le ciment prompt).
- ✓ **Le poids volumique** : est le rapport de la masse d'un ensemble de grains à leur volume réel. $2900 < r_s < 3200$ kg/m³.
- ✓ **La densité apparente** : est le rapport à g_w , poids volumique de l'eau, du poids volumique apparent (vides en grains compris) du ciment en sac.

Le ciment va jouer un rôle très important dans l'obtention des caractéristiques d'un béton dans les domaines de :

- **La rhéologie (béton frais) temps:** 0 (gâchage) à quelques heures (mise en place)
- **La résistance mécanique (béton durci):** temps: quelques heures (décoffrage) à 28 jours ($R_{caractéristique}$)
- **La durabilité (béton durci) temps :** >> 10 ans (durée de vie de l'ouvrage)
- **Les exemples qui suivent** montrent dans quelle mesure ces caractéristiques sont influencées par le type de ciment.

2.6. Hydratation du ciment :

L'hydratation d'un ciment portland peut se décrire comme la résultante de :

- ✓ L'hydratation des silicates, qui ne met en jeu que C_3S , C_2S et l'eau (H),
- ✓ Et l'hydratation des aluminates, qui met en jeu C_3A , C_4AF , l'eau (H) et le gypse (CSH_2).

Ces 2 hydratations se déroulent simultanément mais pas indépendamment l'une de l'autre, du fait de couplages chimiques et thermiques.

2.6.1. Hydratation des silicates :

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques (Ca_3SiO_5) et les silicates bicalciques (Ca_2SiO_4) se dissolvent sous forme d'ions qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite ($Ca(OH)_2$). Ces réactions sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation. Dans le cas du C_2S , la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de Portlandite formée est plus faible (figure 19).

Les C-S-H sont des composés non cristallins. Ils ont les caractéristiques d'un gel et possèdent une composition variable, leur formule générale est la suivante : $(CaO)_x(SiO_4)_y(H_2O)_z$ avec $0.6 < x/y < 2$ et $1 < z < 4$. Leur composition moyenne est proche de $(CaO)_{1.7}(SiO_4)(H_2O)_4$. L'enchevêtrement du gel C-S-H donne sa solidité au ciment : les C-S-H se développent à la surface des grains de ciment non hydratés et comblent progressivement les interstices capillaires entre les grains. Au bout de quelques heures, la couche d'hydrates qui enrobe les grains de ciment devient assez épaisse pour ralentir la diffusion des ions et de l'eau vers les composants anhydres du système. L'hydratation ralentit de plus en plus, mais peut se poursuivre pendant des mois voire des années.

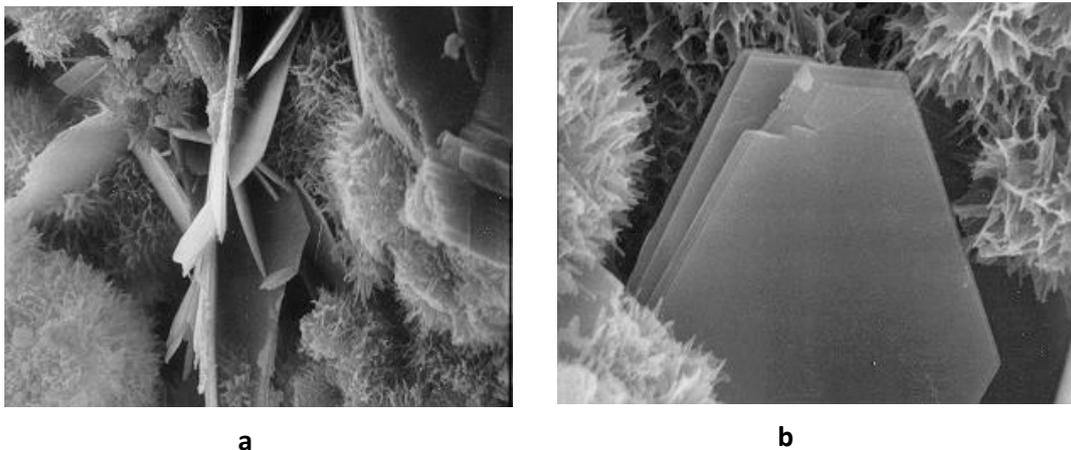


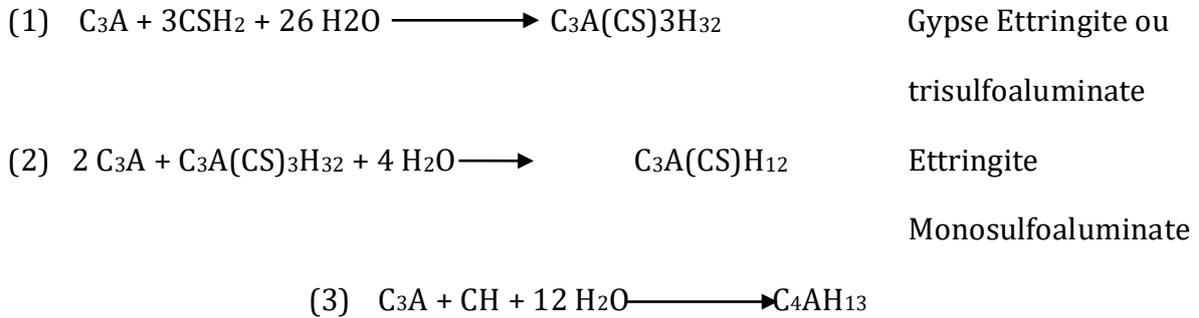
Fig. 19 : Pâte de ciment à 7 j :

a) Fibres d'hydratation des silicates (MEB 1100 x),

b) cristaux de portlandite (MEB 7000 x).

2.6.2. Hydratation des aluminates :

L'hydratation des aluminates, du C₃A en particulier, obéit à la séquence de réactions suivantes, dans l'ordre 1, 2, 3 :



L'effet régulateur de prise du gypse est lié au fait que :

La réaction (2) ne démarre que quand tout le gypse est consommé dans la réaction (1).

Et la réaction (3) ne démarre que quand l'ettringite est consommée dans la réaction (2).

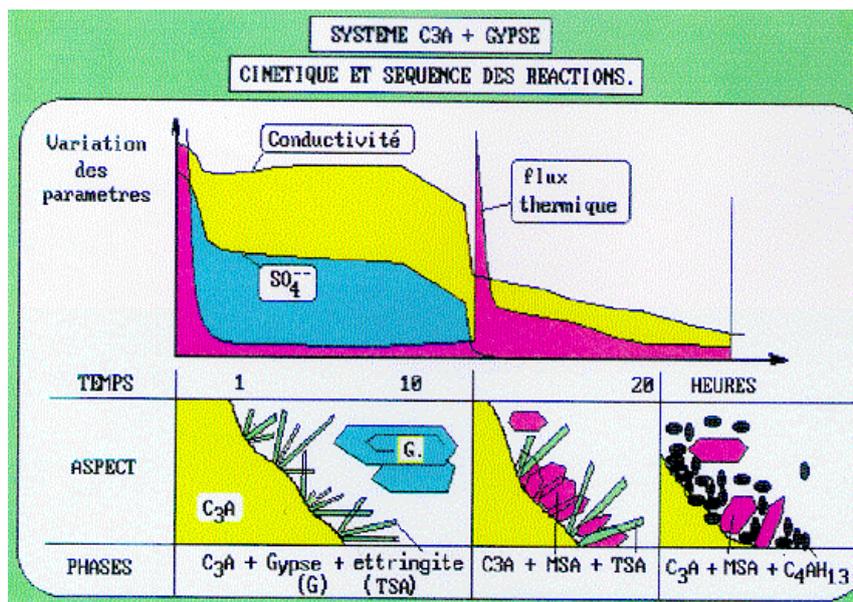


Fig. 20 : Hydratation des aluminates.

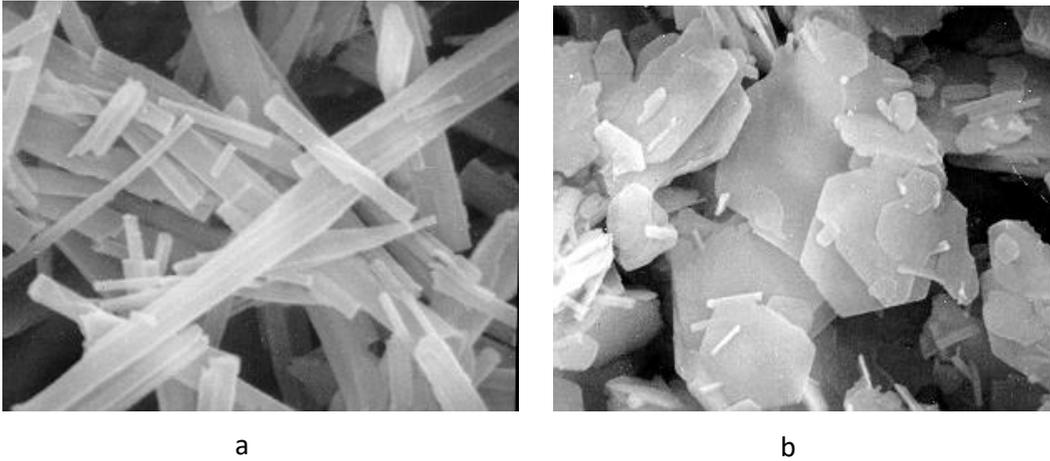
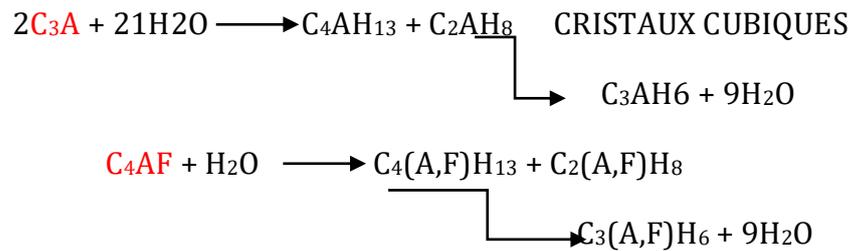


Fig. 21 : Phase de formation a) Aiguilles d’ettringite (MEB 10000x)
 b) Cristaux hexagonaux de mono sulfo aluminates (MEB 8000 x)

- **En l’absence de sulfate de calcium**, l’hydratation conduit rapidement à la formation de cristaux dont la morphologie est défavorable à une bonne rhéologie de la pâte :

CRISTAUX HEXAGONAUX METASTABLES



Tab. 6 : Régulation de la prise.

| | | REGULATION DE LA PRISE | | | |
|--------------------|--|------------------------|-----|-----|--------------------------------------|
| | | Temps d’hydratation | | | |
| Réactivité clinker | Disponibilité des sulfates en solution | 10 min | 1 h | 3 h | |
| | | Hydratation → | | | |
| Faible | Faible | | | | CSH ettringite |
| Haute | Haute | | | | C ₄ AH ₁₃ |
| Haute | Faible | | | | CaSO ₄ ·2H ₂ O |

2.6.3. Evolution de la microstructure :

La microstructure évolue moins vite et le béton devient plus poreux. La chaleur d'hydratation dégagée s'accumule dans les constructions massives et peut être à l'origine d'un retrait thermique. La vitesse de développement de la chaleur joue un rôle déterminant.

L'évolution de la microstructure du durcissement du ciment est présentée par la figure 22 :

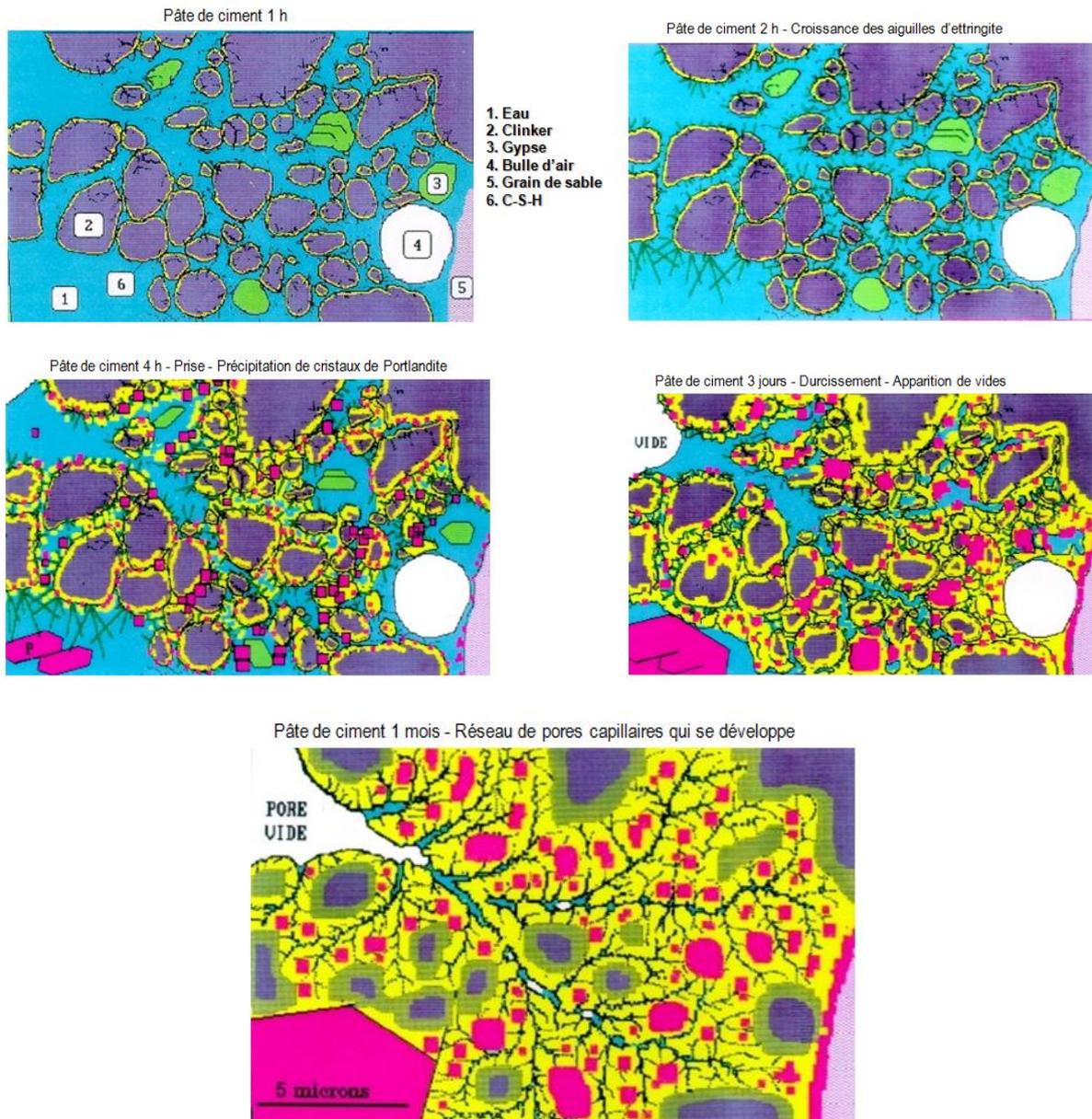


Fig. 22 : L'évolution de la microstructure du durcissement du ciment.

CHAPITRE 3 :

LE BÉTON.

3.1. Définition et constituants du béton :

Le béton est constitué de ciment, d'eau, de sable et de granulats, malaxés pour obtenir un mélange homogène. Les masses volumiques des composants vont de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m³. Les dimensions des grains vont du micron à plusieurs centimètres. La pâte de ciment est la matrice qui amalgame les inclusions que sont les granulats. Un béton contient :

- Eau : 14 à 22 % en volume ou 5 à 9 % en masse ;
- Ciment : 7 à 14 % en volume ou 9 à 18 % en masse ;
- Granulats : 60 à 78 % en volume ou 63 à 85 % en masse.

La composition d'un béton, pour une structure déterminée, tient compte des résistances mécaniques recherchées, de l'agressivité de l'environnement, des formes architecturales.

La réaction chimique qui permet au béton de ciment de faire prise est assez lente : occupe 75 % de la résistance mécanique finale au bout de 7 jours. La vitesse de durcissement du béton peut cependant être affectée par la nature du ciment utilisé et par la température du matériau lors de son durcissement. La valeur prise comme référence dans les calculs de résistance est celle obtenue à 28 jours (80 % de la résistance finale). Le délai de 28 jours a été choisi afin de pouvoir contrôler la résistance 4 semaines après avoir coulé le béton.

Il est possible de modifier la vitesse de prise en incorporant au béton frais des adjuvants (additifs) ou en utilisant un ciment rapide (ciment Vicat). Il existe d'autres types d'adjuvants qui permettent de modifier certaines propriétés physico-chimiques des bétons. On peut, par exemple, augmenter la fluidité du béton pour faciliter sa mise en œuvre en utilisant des plastifiants, ou maîtriser la quantité d'air incluse avec un entraîneur d'air.

3.2. Essai sur les bétons :

Les résistances mécaniques en compression obtenues classiquement sur éprouvettes cylindrique 16×32 cm, sont de l'ordre de :

- BFC : bétonnage fabriqué sur chantier : 25 à 35 MPa, peut parfois atteindre 50 MPa ;

- BPE : béton prêt à l'emploi, bétonnage soigné en usine (préfabrication) : 40 à 60 MPa ;
- BHP : béton hautes performances : jusqu'à 200 MPa ;
- BUHP : béton ultra hautes performances, en laboratoire : 500 MPa.

La résistance en traction est moindre avec des valeurs de l'ordre 2,1 à 2,7 MPa pour un béton de type BFC.

La conductivité thermique couramment utilisée est de $1,75 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, à mi-chemin entre les matériaux métalliques et le bois.

3.2.1. Les essais sur béton durci :

- Résistance en traction par fendage (NF EN 12390-6) ;
- Résistance à la compression d'éprouvettes cylindriques ou cubiques (NF EN 12390-3) ;
- Masse volumique du béton durci (NF EN 12390-7) ;
- Résistance à la flexion des éprouvettes (NF EN 12390-5) ;
- Essai de retrait sur prisme maintenu en conditions normalisées (NF P18-427) ;
- Mesure d'absorption d'eau sur une éprouvette (ASTM C642-90) ;
- Détermination du module d'élasticité statique sur une éprouvette (ISO 6784) ;
- Détermination du dosage en fibres métalliques ;
- Mesure de porosité sur une éprouvette (Recommandation TEGG/CE/86- 079B et Recommandation AFREM) ;
- Détermination de l'indice de rebondissement à l'aide d'un scléromètre (NF EN 12504-2) ;
- Recherche en dosage en ciment par la silice soluble.



Fig. 23 : Essai de compression sur une éprouvette cylindrique du béton.

3.2.2. Des essais sur béton frais :

- Détermination de la masse volumique du béton frais (NF EN 12350-6) ;
- Teneur en air : Méthode de la compressibilité (NF EN 12350-7) ;
- Détermination de la consistance du béton frais : Essai d'affaissement (NF EN 12350-2) ;
- Flow test ou mesure d'étalement à la table à chocs (NF EN 12350-5) ;
- Analyse granulométrique du béton frais et détermination de la teneur en eau ;
- Détermination du dosage en fibres métalliques ;

3.3. Classification des bétons :

Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories. En général le béton peut être classé en quatre groupes, selon sa masse volumique ρ :

- Béton très lourd : $\rho > 2\ 500\ \text{kg/m}^3$;
- Béton lourd (béton courant) : ρ entre 1 800 et 2 500 kg/m^3 ;
- Béton léger : $\rho = 500$ à 1 800 kg/m^3 ;
- Béton très léger : $\rho < 500\ \text{kg/m}^3$.

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

- Béton de ciment ;
- Béton silicate (Chaux) ;
- Béton de gypse (gypse) ;
- Béton asphalte.

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

- Les bétons courants sont les plus utilisés, aussi bien dans le bâtiment qu'en travaux publics. Ils présentent une masse volumique de 2 300 kg/m^3 environ. Ils peuvent être armés ou non, et lorsqu'ils sont très sollicités en flexion, précontraints ;
- Les bétons lourds, dont les masses volumiques peuvent atteindre 6 000 kg/m^3 servent, entre autres, pour la protection contre les rayons radioactifs ;
- Les bétons de granulats légers, dont la résistance peut être élevée, sont employés dans le bâtiment, pour les plates- formes offshore ou les ponts.

3.4. Les composants du béton :

3.4.1. Les granulats :

Définition : On appelle granulats un ensemble de grains destinés à être agglomérés par un liant et à former un agrégat.

3.4.1.1 Types des granulats :

- Les granulats utilisés pour le béton sont soit d'origine naturelle, soit artificiels.
- Les granulats naturels : Origine minéralogique.

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

➤ **Granulats roulés et granulats de carrières :**

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

- Les granulats alluvionnaires, dits roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion.
- Les granulats de carrière sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires.

Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage

➤ **Les granulats artificiels :**

- **Sous-produits industriels, concassés ou non :**

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

La masse volumique apparente est supérieure à 1250 kg/m³ pour le laitier cristallisé concassé, 800 kg/m³ pour le granulé.

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

Granulats allégés par expansion ou frittage.

Les plus usuels sont l'argile ou le schiste expansé et le laitier expansé. D'une masse volumique variable entre 400 et 800 kg/m³ selon le type et la granularité, ils permettent de réaliser aussi bien des bétons de structure que des bétons présentant une bonne isolation thermique. Les grains de poids intéressants puisque les bétons réalisés ont une masse volumique comprise entre 1200 et 2000 kg/m³.

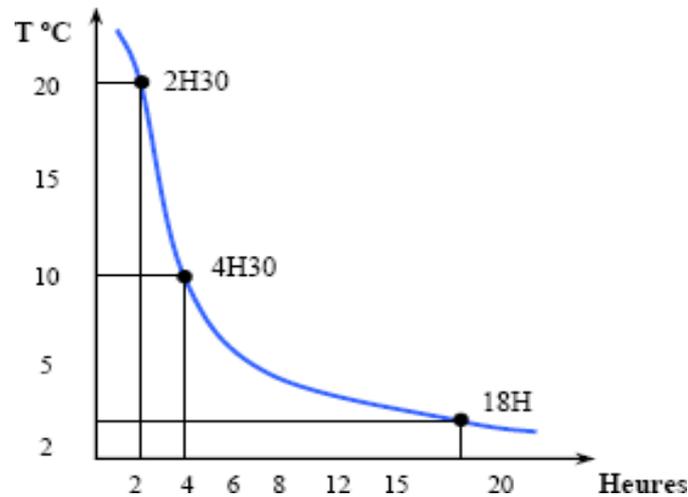


Fig. 24 : Evolution du temps de prise en fonction de la température.

3.5. Le durcissement :

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

3.6. Le retrait :

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

En fait il existe plusieurs types de retrait :

- Le retrait avant prise dû essentiellement à la perte prématurée d'une partie de l'eau de gâchage par évaporation et dont l'amplitude est de 2 à 4 mm/m pour les bétons ;
- Le retrait hydraulique, est de l'ordre de 0,2 à 0,4 mm/m pour les bétons. Dans le cas de béton à faible rapport E/C, est fait par (consommation de l'eau de gâchage pour hydratation) est fonction de : la nature du ciment, le dosage en eau, la propreté des sables, la forme et la dimension des granulats ;
- Le retrait thermique, qui est dû à la contraction du béton lors de son refroidissement. L'importance du retrait hydraulique ;
- Le dosage en eau qui se traduit par le rapport Eau/Ciment (E/C) est un paramètre déterminant vis-à-vis de la porosité, de la résistance et donc de la durabilité du béton. Plus le rapport E/C est faible plus ces propriétés sont favorisées. En règle générale le rapport E/C est compris entre 0,4 et 0,6.

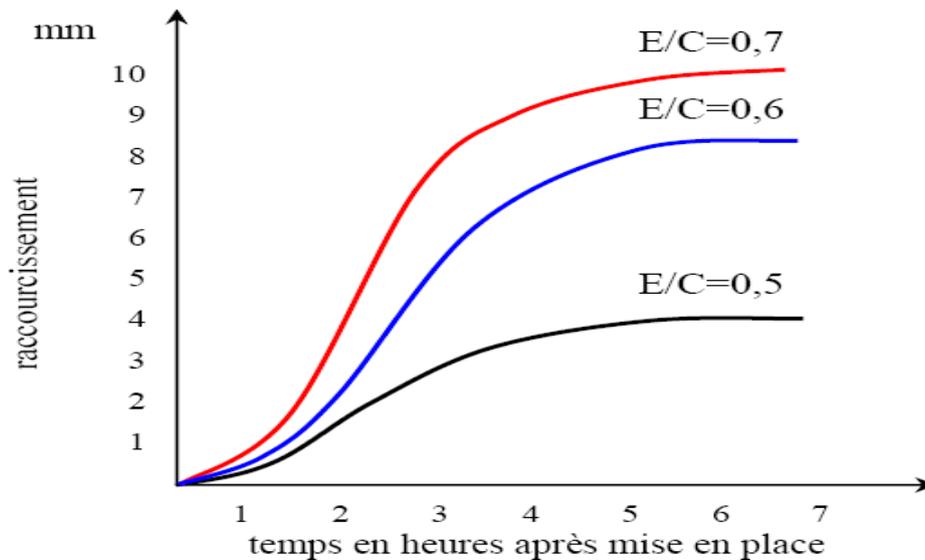


Fig. 25 : Influence du E/C sur le retrait plastique des mortiers.

3.7. Résistance à la compression :

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

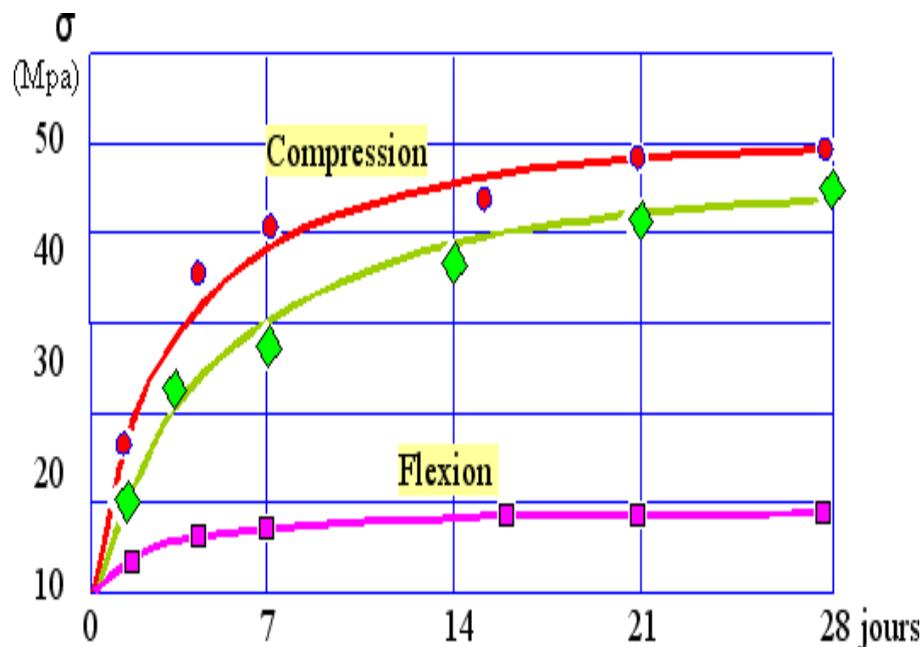


Fig. 26 : Résistance du mortier normal.

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

3.8. CONCLUSION :

Ciments et bétons sont des matériaux complexes et évolutifs en fonction du temps. Ils sont aussi poreux et peuvent se transformer dans les milieux agressifs, chimiques ou physiques. L'apparition de nouveaux constituants peut entraîner une perte des performances du matériau dans les constructions.

Diminuer la porosité capillaire par l'emploi d'adjuvants organiques fluidifiants, réduisant la quantité d'eau à utiliser, optimiser le spectre granulaire à l'aide de particules fines comme la fumée de silice, traiter thermiquement des mélanges ciment + quartz broyé sont autant de procédés utilisés dans l'élaboration de nouveaux matériaux à hautes performances, les B.H.P., B.T.H.P. et B.P.R.

Le béton était souvent considéré par les mécaniciens comme un réseau diphasique constitué d'une matrice homogène, plus faible que le squelette rigide formé par les granulats. Cette position a évolué grâce à la collaboration récente entre les spécialistes de la science des matériaux, de la mécanique, de l'ingénierie. Des modèles mathématiques de comportement à long terme du béton, prenant en compte les données physico-chimiques du matériau sont en cours.

Références :

- [1] P. Marteau « Memento roches et minéraux industriels –Gypse et anhydrite-» rapport BRGM R37772, Orléans cedex 2- France, 06/1993.
- [2] l'école polytechnique, 08/12/2006. Hamouda Jaffel « Caractérisation multi-échelles de matériaux poreux en évolution : cas du plâtre » Thèse de doctorat.
- [3] Frederic Charpentier, Michel Fontaine, Jean Fouin, VirgineStelmach « le plâtre matériau noble » Rapport de concours de la Diren –ile-de –France, 2000, N0 138.
- [4] E. Karmazin, « Cinétique et mécanisme d'hydratation des sulfates de calcium semi hydratés – Etude par calorimétrie en régime isotherme », Thèse, INSA. Université de Lyon I, 1978.
- [5] A. L. Lavoisier « Extrait de deux mémoires sur le gypse lus a l'académie royale des sciences » Mémoires de Lavoisier, [http : //www.lavoisier.cnrs.fr/vol.3,1765, pah\\$ge.106-125](http://www.lavoisier.cnrs.fr/vol.3,1765,pah$ge.106-125)
- [6] W. Michaelis, « the hardening process of hydraulic cements, cement & Engineering News, 1907.
- [7] E. Karmazin, « Cinétique et mécanisme d'hydratation des sulfates de calcium semi hydratés – études par calorimétrie en régime isotherme ».
- [8] Secret de fabrication du plâtre – le plâtre industriel – L'entrevues – numéro 23 – page 13.
- [9] La norme NF P 15-301 de 1994 donne la définition suivante : « Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. »