



République Algérienne
Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la
Recherche Scientifique

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية
الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Université des Sciences et de
la Technologie
d'Oran - Mohamed Boudiaf-
Faculté d'Architecture et de
Génie Civil
Département d'Hydraulique

جامعة العلوم والتكنولوجيا
لوهران - محمد بوضياف -
كلية الهندسة المدنية والمعمارية
قسم الري

Polycopié pédagogique

MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Niveau LMD – Licence 3 (L3)

Elaboré par : Mr. SIRAT Abdelkader

Année Universitaire
2024/2025.

Préface

Le support de cours est conforme au programme officiel du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique. Il est destiné aux étudiants de troisième année LMD (6 semestres) spécialisés en hydraulique dans le domaine des sciences et technologies. Le support vise à fournir aux étudiants des informations sur les différents matériaux de construction et les domaines dans lesquels ils sont utilisés.

Il est divisé en quatre chapitres conformément au programme d'études. Le chapitre I présente une vue d'ensemble, la classification et les propriétés des matériaux de construction. Le chapitre suivant décrit la classification, les propriétés et les différents types de granulats sur la base d'une étude détaillée. Le chapitre III traite des liants aériens (chaux aérienne) et hydrauliques (ciment Portland) et de leurs principaux composants, ainsi que des différents types d'additifs minéraux utilisés dans les cimenteries et de leurs avantages techniques. Enfin, le chapitre IV aborde la composition et les types de mortiers (mortiers de chaux et mortiers de ciment), leurs principales caractéristiques et leur utilisation sur chantier.

Semestre: 6
 Unité d'enseignement: UEF 3.2.1
 Matière 3: Matériaux de construction
 VHS: 22h30 (Cours: 1h30)
 Crédits: 2
 Coefficient: 1

Objectifs de l'enseignement :

L'étudiant sera en mesure de caractériser les paramètres physico-mécaniques des matériaux de construction.

Connaissances préalables recommandées :

Mécanique des sols, béton.

Contenu de la matière :

Chapitre 1. Généralités (3 Semaines)
 Historique des matériaux de construction, Classification des matériaux de construction, Propriétés des matériaux de construction.

Chapitre 2. Les granulats (3 Semaines)
 Granularité, Classification des granulats, Caractéristiques des granulats, Différents types de granulats.

Chapitre 3. Les liants (4 Semaines)
 Classification, Les liants aériens (chaux aérienne), Les liants hydrauliques (les ciments portland), Constituants principaux et additions.

Chapitre 4. Les mortiers (5 Semaines)
 Composition, Les différents types de mortiers (mortier de chaux, mortier de ciment), Caractéristiques principales.

Mode d'évaluation:

Examen: 100%.

Références bibliographiques:

1. "Matériaux Volume 1, Propriétés, applications et conception : cours et exercices : Licence, master, écoles d'ingénieurs", Edition Dunod, 2013.
2. Afnor, "Adjuvants du béton", , 2012.
3. Castilla, "Granulats, sols, ciments et bétons : caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire : terminale STI génie civil, BTS bâtiment, BTS travaux publics, DUT génie civil, master pro géosciences génie civil, écoles d'ingénieurs", 2009.
4. "Les propriétés physico-chimiques des matériaux de construction: matière & matériaux, propriétés rhéologiques & mécaniques, sécurité & règlement".

Sommaire

Préface	1
Chapitre I : Généralités sur les matériaux de construction	6
I.1.Introduction	6
I.2.Historique	6
I.3.Définitions	6
I.4.Critères de choix d'un matériau de construction	7
I.5.Classification des matériaux de construction	7
I.5.1. Classification scientifique	8
I.5.2. Matériaux de base et produits :	8
I.5.3.Classification pratique	8
I.6.Propriétés des Matériaux de construction	8
Chapitre II : Les granulats	10
II.1. Définition	10
II.2. Classification des granulats	10
II.3. Techniques de fabrication des granulats	11
II.4. Domaine d'utilisation de granulats	14
II.5. Caractéristiques principales des granulats	14
II.5.1. Analyse granulométrique et sédimentométrie (NF P 94-056 – 057)	14
II.5.2. Module de finesse (Mf) (NFP 18-540 et EN 12620)	19
II.5.3. Masse volumique	21
II.5.3.1.Masse volumique apparente (ρ_{app}) du sable (EN 1097-6)	21
II.5.3.2.Masse volumique absolue (ρ_{ab}) (Masse spécifique)	23
II.5.3.3. Masse volumique des matériaux de forme irrégulière (ρ_{app})	24
II.5.3.4. Différence entre Masse volumique apparente et Masse volumique absolue	25
II.5.3.5. Densité absolue (D_{ab})	25
II.5.3.6. Densité apparente (D_{app})	25
II.5.3.7.Les facteurs qui influent sur la densité du gravier	26
II.5.3.8.Les facteurs qui influent sur la densité du sable	27
II.6. Propreté des granulats	27
II.6.1. Détermination du pourcentage d'impureté dans les graviers	28
II.6.2. Détermination du pourcentage d'impureté dans le sable	28
II.7. Valeur du Bleu de Méthylène (VBS)	30
II.8. La porosité et la compacité	30
II.9. La capacité d'absorption de l'eau	32
II.10. Teneur en eau	32
II.11. Le foisonnement	33
II.11.1. Les différents coefficients de foisonnement en terrassement	33
II.11.2. Le volume du matériau foisonné	34
II.12. Caractéristiques géométriques des granulats	35
Chapitre III : Les liants	36
III.1. Introduction	36
III.2. Processus d'hydratation du ciment	36

III.3. Classification des liants	37
III.4. Les liants aériens	38
III.4.1. La Chaux aérienne	38
III.4.2. Définition	38
III.4.2.1. La chaux vive (Oxyde de Calcium)	38
III.4.2.2. Chaux éteinte (La chaux aérienne)	38
III.4.2.3. La chaux hydraulique	39
III.4.3. Réaction chimique	39
III.4.4. Utilisation de la chaux	40
III.4.5. Chaux Hydraulique	41
III.4.5.1. Le module hydraulique	41
III.4.5.2. Classification de la chaux selon l'indice d'hydraulicité 'i'	42
III.4.5.3. Utilisation et stockage	42
III.5. Les liants hydrauliques	43
III.5.1. Les ciments	43
III.5.2. Classification de ciment selon l'indice d'hydraulicité 'i'	43
III.6. La fabrication des ciments courants	44
III.7. Notations cimentières pour les 4 éléments majeurs constitutifs	47
III.7.1. Fabrication par voie humide	48
III.7.2. Fabrication par voie sèche	49
III.8. Constituants principaux et additions	51
III.8.1. Constituants du clinker	51
III.8.2. La composition du ciment	54
III.9. Les principales catégories de ciment	54
III.9.1. Classification des ciments	54
III.9.2. Les propriétés mécaniques : classification des ciments	55
Chapitre IV : Le mortier	57
IV.1. Introduction	57
IV.2. Définition	57
IV.3. Classification des mortiers	57
IV.4. Les propriétés physiques et mécaniques des mortiers	58
IV.5. Propriétés des mortiers	58
IV.5.1. La résistance mécanique	59
IV.5.2. Fluidité d'une pâte de mortier	59
IV.5.3. Le pouvoir de retenir de l'eau (Hydrophilic)	60
IV.5.4. Composition des mortiers	60
IV.5.4.1. Les liants	61
IV.5.4.2. Les sables	61
IV.5.4.3. Les adjuvants	62
IV.5.4.4. Les ajouts	62
IV.6. Les différents types de mortiers	63
IV.6.1. Les mortiers de ciment	63
IV.6.2. Les mortiers de chaux	63
IV.6.3. Les mortiers bâtards	63
IV.6.4. Les mortiers fabriqués sur chantier	63
IV.6.5. Mortier industriel	63
IV.7. Caractéristiques principales des mortiers	64
IV.7.1. Ouvrabilité	65
IV.7.2. Prise	66

IV.7.3. Résistances mécaniques	67
IV.7.4. Retraits et gonflements	69
Conclusion générale	70
Références bibliographiques	71

Chapitre I : Généralités sur les matériaux de construction

I.1.Introduction

La technologie des matériaux traite des domaines d'application de la science des matériaux dans la construction, c'est-à-dire la sélection des matériaux, la détermination de leurs propriétés, la connaissance de leurs propriétés, les techniques de mise en œuvre, les méthodes d'essai, le développement de nouveaux matériaux ou systèmes de matériaux.

L'utilisation des matériaux pose la question du choix du matériau le mieux adapté aux applications envisagées. Les critères de choix des matériaux doivent porter sur trois critères principaux : [1]

- Les fonctions principales de la construction, c'est-à-dire de mise en charge, des températures et des conditions minimales d'utilisation ;
- Le comportement intrinsèque du matériau : résistance à la rupture, à l'usure, à la corrosion, conductibilité thermique, etc ;
- Le prix de revient des diverses solutions possibles.

I.2.Historique

La réussite d'un projet de construction dépend d'un facteur essentiel : les bons matériaux. L'évolution humaine et notre niveau de vie ont été influencés par notre choix de matériaux dans la construction des bâtiments. En fait, la plupart des matériaux utilisés aujourd'hui l'étaient il y a 400 ans.

Récemment, des matériaux plus modernes sont apparus sur le marché grâce à des investissements continus et à la recherche de technologies avancées. Sans ces matériaux, on pourrait se demander où en seraient nos infrastructures aujourd'hui sans oublier nos futures habitations.

Les matériaux de construction modernes et idéaux offrent une durabilité structurelle constante tout en réduisant l'empreinte écologique de la maison. De plus, il doit être capable de s'adapter aux conditions météorologiques et terrains fluctuantes.

I.3.Définitions

Les matériaux de construction regroupent tous les matériaux entrant dans la construction de structures en béton armé et métalliques et largement utilisés dans les travaux publics (routes, ponts, aéroports, etc.). Avant d'utiliser un matériau de

construction, il est important de connaître ces différentes propriétés pour prévenir son comportement.

I.4. Critères de choix d'un matériau de construction

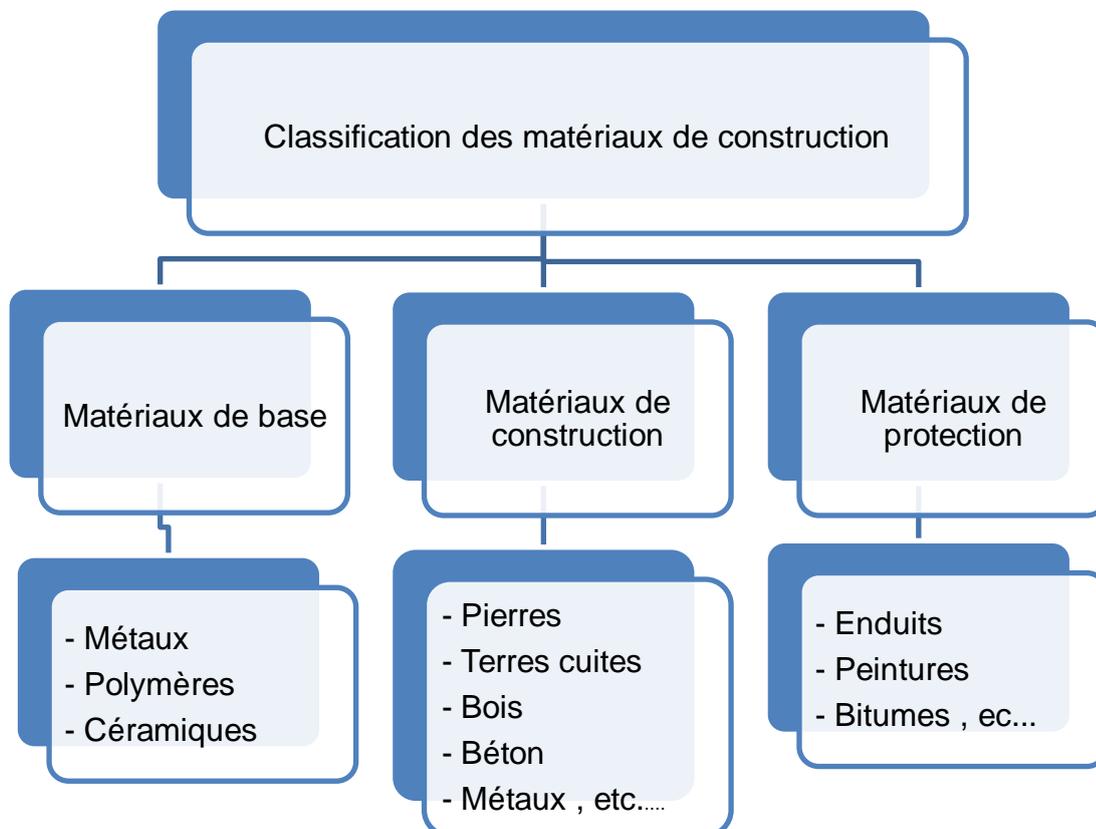
- Cahier des charges :

Description et forme du projet : Objectifs et Contraintes

- Conditions d'utilisation :
- Environnement (Milieu chimique, Température) ;
- Durée de vie.
- Caractéristiques et propriétés des matériaux
- Propriétés intrinsèques du matériau ;
- Propriétés physico-chimiques et mécaniques ;
- Procédé : Elaboration, mise en œuvre ;
- Disponibilité et coût.

I.5. Classification des matériaux de construction

Les matériaux de construction se répartissent en trois catégories bien connues :



I.5.1. Classification scientifique

En science des matériaux, les matériaux sont classés selon leur composition et leur structure comme suit :

- Métaux et alliages
- Polymère
- Céramique

I.5.2. Matériaux de base et produits :

- Matériaux de base (matière première) : Pierre, Métaux ; Bois, Argiles, Calcaire, ...etc
- Matériaux produits (composites) : le ciment, alliages, béton, brique etc...

I.5.3. Classification pratique

Dans la construction, les matériaux sont classés selon leur utilisation et leurs principales propriétés comme suit :

- **Matériaux résistants** : Matériau ayant la capacité de résister à des charges (poids propre, surcharge, tremblement de terre). Les matériaux les plus couramment utilisés sont la pierre, la terre cuite, le bois, le béton et le métal..
- **Matériaux de protection** : Matériau dont les propriétés recouvrent le principal matériau de construction et qui ont des propriétés qui les protègent des actions extérieures telles que : Exemples : enduits, peintures, bitume, etc.

I.6. Propriétés des Matériaux de construction

On définit la propriété d'un matériau comme la mesure de son comportement, c'est-à-dire sa réaction à une sollicitation au cours d'un essai. On peut distinguer trois catégories de propriétés :[1]

Les propriétés mécaniques, qui reflètent le comportement des matériaux déformés par des systèmes de forces ;

- Les propriétés physiques, qui mesurent le comportement des matériaux soumis à l'action de la température, des champs électriques ou magnétiques, ou de la lumière ;

- Les propriétés chimiques, qui caractérisent le comportement des matériaux soumis à un environnement plus ou moins agressif.

Les propriétés des matériaux de construction déterminent leur champ d'application. Ce n'est qu'en évaluant avec précision la qualité des matériaux, leurs propriétés les plus importantes, que nous pouvons construire des bâtiments solides, durables, hautement économiques et techniques.

Chapitre II : Les granulats

II.1. Définition

On appelle « granulats » tout matériau inerte (sables, graviers ou cailloux) provenant de l'érosion des roches ou de leur concassage et qui entre dans la composition de mortiers et de bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125 mm dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage. [2]

Un granulats, en fonction de sa nature et de son origine, peut-être : Naturel, Artificiel ou Recyclé.

- Les granulats naturels : provenant de roches meubles ou massifs extraites directement sur site, sans subir d'autres traitements que mécanique ;
- Les granulats artificiels : issus de la transformation thermique de roches, de minéraux ou de sous-produit industriels (laitiers, ...)
- Les granulats recyclés : ce sont les matériaux qui proviennent de la démolition des ouvrages existants en béton. [3]

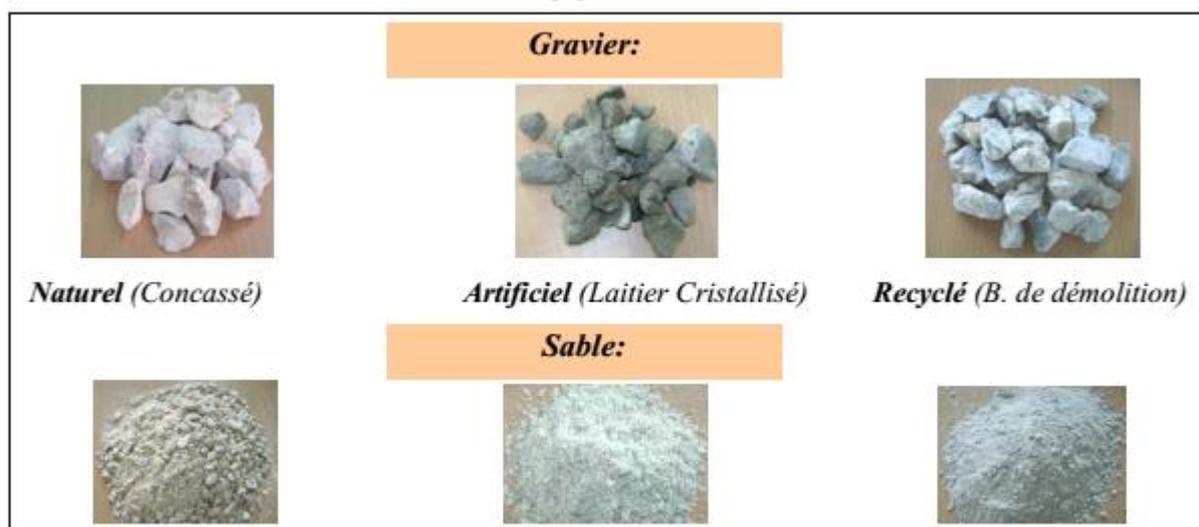


Figure II. 1 : Photographies des différents types de granulats

II.2. Classification des granulats

Et du fait qu'il existe cinq classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrés, on a selon la norme NFP18-101 : [4] les fines ($0/D$ avec $D \leq 0,08$ mm) ;

- les sables ($0/D$ avec $D \leq 6,3$ mm) ;

- les gravillons (d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm) ;
- les cailloux (d/D avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm) ;
- les graves (d/D avec $d \geq 6,3$ mm et $D \leq 80$ mm).

II.3. Techniques de fabrication des granulats

Les procédés de fabrication diffèrent selon l'origine des granulats :

- **Extraction de la matière première** : La matière première est extraite en utilisant l'abattage à l'explosif pour les roches dures, tandis que la pelle mécanique est utilisée pour les roches moins dures (granulats concassés).



Figure II. 2 : Extraction de la matière première

- **Concassage** :
 - ✚ Opération primordiale (granulats concassés), et moins intéressante (granulats alluvionnaires).
 - ✚ Les concasseuses à mâchoires sont des machines primaires à simple fonction, équipées d'un système oscillant. Débit en fonction du matériau : jusqu'à 15 tonnes par heure.



Figure II. 3 : Présentation du procédé de Concassage

- **Criblage :**

- ✚ Criblage se fait sur tamis (granulats concassés) mais il s'effectue sous l'eau (granulats alluvionnaires).
- ✚ Le cribleur -laveur sépare les plus gros éléments du reste de la roche. Ces éléments les plus gros vont être subi un 2^{ème} concassage.



Figure II. 4 : Présentation du procédé de Criblage des graviers

• **Stockage avant expédition :**

- ✚ Stockage à l'air libre (en vrac ou en sacs).
- ✚ Stockage en silos



Figure II. 5 : Présentation de procédé de Stockage avant expédition

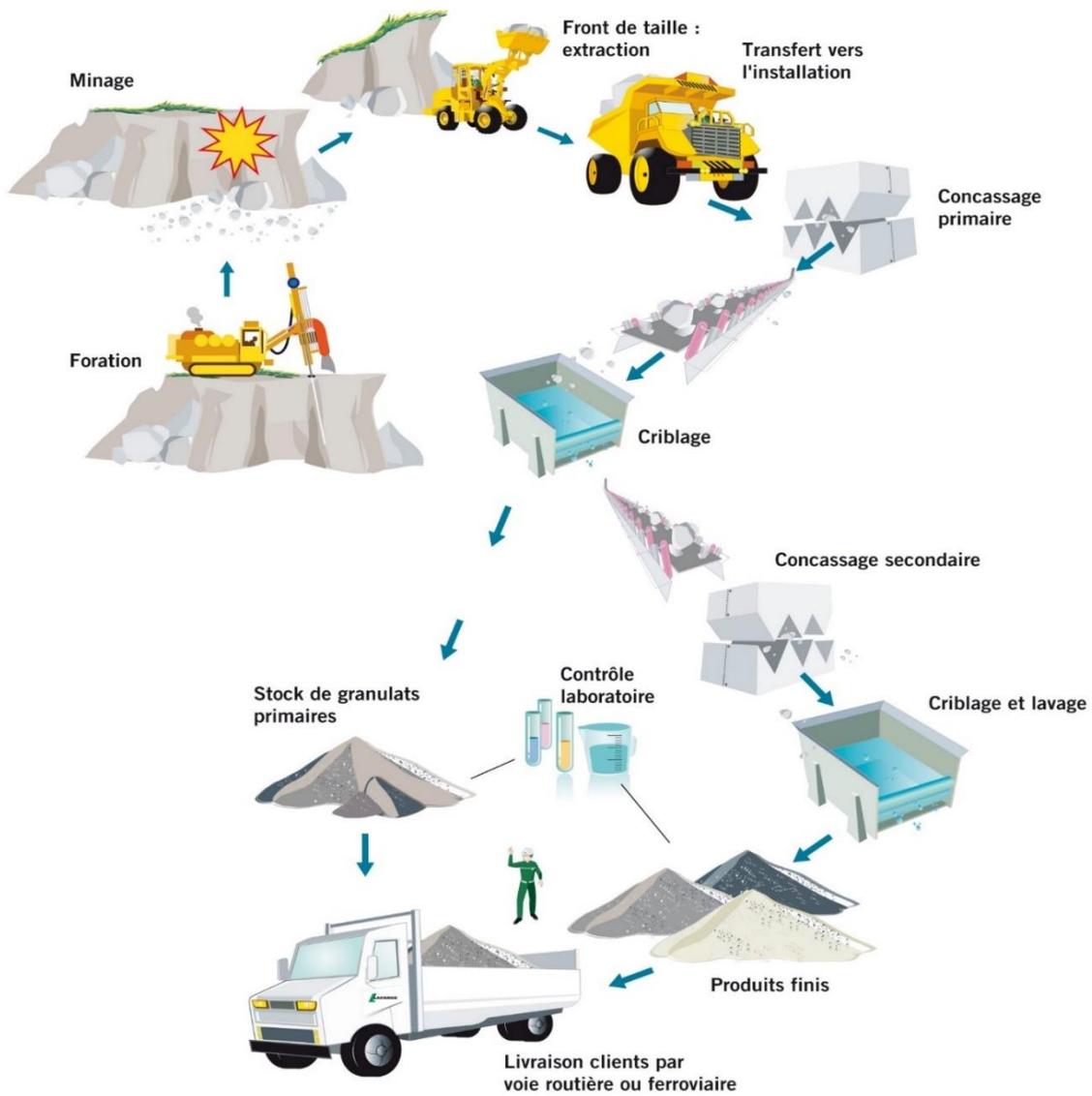


Figure II. 6 : Fabrication des granulats en roche massive

II.4. Domaine d'utilisation de granulats

Les granulats sont utilisés dans la construction d'ouvrages d'art, de routes et de bâtiments. Ils peuvent être utilisés :

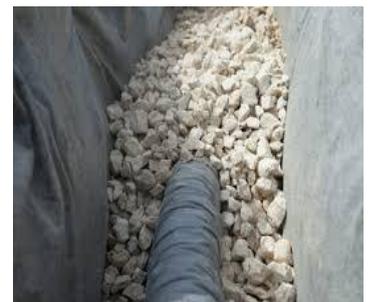
- Directement sans liant : ballast de voies ferrées, couches de forme des structures routières remblais ;
- Solidarisés avec un liant : le ciment pour le béton et les mortiers, le bitume pour les enrobés.



Ballast de voies ferrées



Couche de fondation



Drainage



Liant ciment = Béton



Liant Bitum = Enrobé

Figure II.7 : Différents domaines d'utilisation des granulats avec et sans liant

II.5. Caractéristiques principales des granulats

II.5.1. Analyse granulométrique et sédimentométrique (NF P 94-056 – 057)

L'analyse granulométrique est une technique permettant de mesurer la distribution granulométrique au sein d'un matériau et est couramment utilisée pour les sols, les sédiments et les agrégats. Cette analyse suit des critères spécifiques pour garantir des résultats fiables et comparables. Les normes couramment utilisées en France pour l'analyse granulométrique sont fixées par l'Association française de normalisation (AFNOR).

Les principales étapes de l'analyse granulométrique selon la norme française sont :

Normes et Références

- NF P 94-056-057 : Analyse granulométrique des sols - Méthode de tamisage.
- NF P 18-560 : Granulats - Essai de tamisage.
- NF EN 933-1 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la distribution granulométrique - Méthode par tamisage.

- **Matériel et Préparation**

1. Échantillon : Prélever un échantillon représentatif du matériau à analyser. Le poids de l'échantillon dépend de la taille maximale des particules et de la norme spécifique utilisée.
2. Tamis : Utiliser une série de tamis normalisés avec des ouvertures de mailles décroissantes (par exemple, 20 mm, 10 mm, 5 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, etc.).

A. Procédure

1. Séchage de l'échantillon : Sécher l'échantillon à une température de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ jusqu'à ce que le poids soit constant. Cela permet d'éliminer toute l'humidité présente dans le matériau.
2. Pesée initiale : Peser l'échantillon sec avec une précision adaptée.
3. Tamisage : Placer les tamis les uns au-dessus des autres, du plus grand au plus petit, et verser l'échantillon sur le tamis supérieur. Secouer les tamis manuellement ou à l'aide d'un appareil de tamisage mécanique pendant un temps déterminé par la norme.
4. Pesée des fractions : Après le tamisage, peser la quantité de matériau retenue sur chaque tamis et celle passant à travers le plus petit tamis.

B. Calculs et Résultats

1. Distribution granulométrique : Calculer la proportion en pourcentage de la masse de matériau retenue sur chaque tamis par rapport à la masse totale de l'échantillon initial.
2. Courbe granulométrique : Tracer la courbe granulométrique en représentant sur un graphique les pourcentages cumulés de matière passant (ou retenue) en fonction de la taille des tamis.

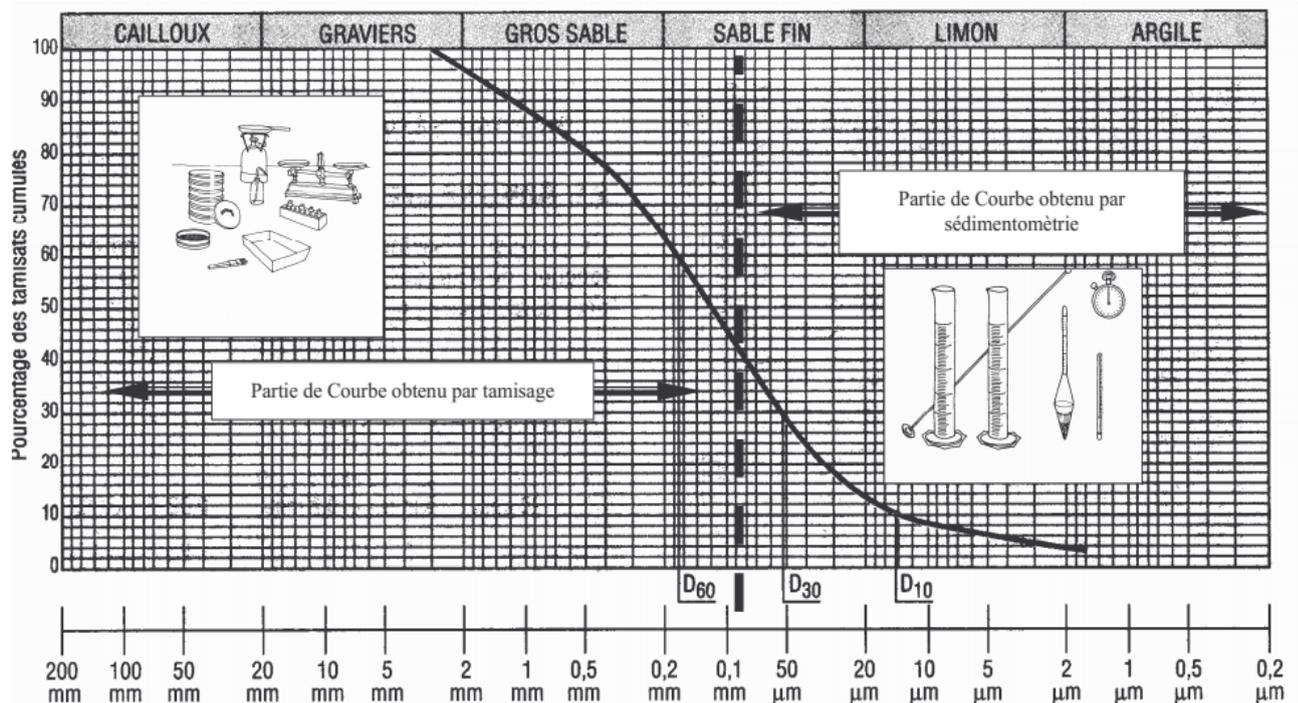


Figure II. 8 : Modèle d'une courbe granulométrique

La figure II.8, présente une courbe granulométrique, un graphique utilisé pour étudier la distribution et la répartition des tailles des particules dans un sol. L'analyse technique de cette courbe repose sur deux axes principaux :

- Abscisses : Taille des particules (mm et µm), divisée en catégories : cailloux, graviers, sables (gros et fins), limon, argile.
- Ordonnées : Pourcentage cumulé de particules passant un tamis (0-100 %).
- En ce qui concerne la partie du graphe on distingue deux procédés :
 - Tamisage : Particules grossières (cailloux, graviers, sable) analysées mécaniquement.
 - Sédimentométrie : Particules fines (limon, argile) analysées avec des éprouvettes et chronomètre.
- Pour le sol étudié, l'analyse de la nature révèle une transition progressive entre particules grossières et fines, caractérisant un sol mixte bien gradué. Ces propriétés sont utiles en géotechnique pour évaluer la perméabilité, la stabilité et la compacité. Les coefficients d'uniformité (C_u) et de courbure (C_c) offrent une caractérisation précise.

- Les paramètres clés de ce graphe est : D10, D30, D60 indiquent la finesse et la granulométrie dominante.

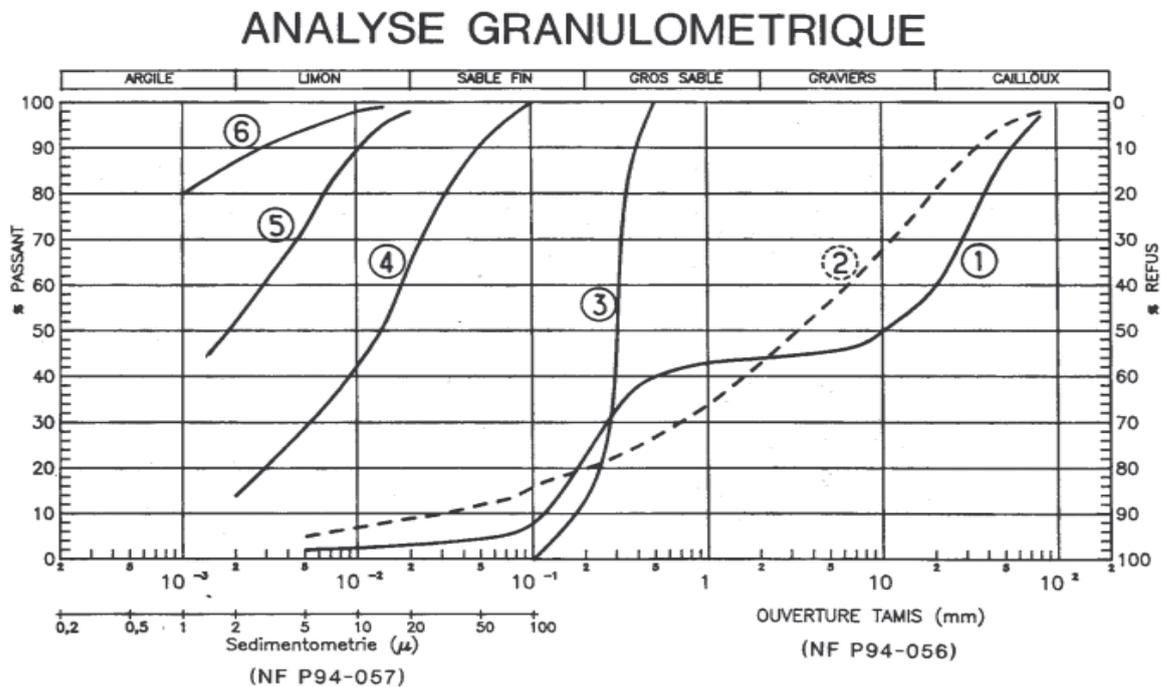


Figure II.9 : Modèle d'une courbe granulométrique

La figure II.9, illustre une courbe granulométrique, mettant en évidence la distribution des dimensions des particules dans différents échantillons de sol. L'examen et l'interprétation approfondie de ce graphique se centrent sur les points suivants, à savoir :

○ **Axe des abscisses :**

- La taille des particules est exprimée en deux unités :
 - À gauche : en micromètres (μm) pour les particules fines (sédimentométrie, NF P94-057).
 - À droite : en millimètres (mm) pour les particules grossières (tamisage, NF P94-056).
- La plage de tailles est subdivisée en catégories granulométriques (argile, limon, sable fin, gros sable, graviers, et cailloux).

○ **Axe des ordonnées :**

- Pourcentage cumulé de particules passant (% Passant).
- À droite, l'échelle indique le pourcentage de refus (% Retenus).

En ce qui concerne les courbes et légendes indiquées dans le graphique :

- Les courbes numérotées (1 à 6) représentent différents échantillons de sols.

- Les variations entre les courbes montrent les différences dans les distributions granulométriques des échantillons.

Observations sur les courbes :

- **Courbe 1 et 2 :**
 - Ces courbes correspondent à des sols grossiers avec une forte proportion de graviers et de cailloux.
 - La pente est faible, ce qui indique une granulométrie peu variée (sols uniformes).
- **Courbe 3 et 4 :**
 - Ces courbes montrent des sols riches en sables (gros sable et sable fin).
 - La transition est plus douce, indiquant une granulométrie plus étalée.
- **Courbe 5 et 6 :**
 - Ces courbes représentent des sols fins composés principalement de limon et d'argile.
 - La pente est plus raide dans la zone des particules fines, suggérant une granulométrie homogène pour ces fractions.

Méthodes utilisées :

- Les particules grossières ($> 80 \mu\text{m}$) sont analysées par tamisage mécanique (NF P94-056).
- Les particules fines ($< 80 \mu\text{m}$) sont analysées par sédimentométrie (NF P94-057).

Commentaire**Caractéristiques des sols :**

- Les courbes montrent une large variété de sols allant des sols grossiers (graviers et cailloux) aux sols très fins (limon et argile).
- Les sols associés aux courbes 1 et 2 pourraient être utilisés pour des applications nécessitant une bonne stabilité mécanique, comme les remblais ou les couches de fondation.
- Les sols associés aux courbes 5 et 6 sont moins drainants et pourraient être adaptés à des applications où une faible perméabilité est souhaitée, comme les barrières d'étanchéité.

Granulométrie uniforme et étalée :

- Les courbes avec une pente raide (ex. 5, 6) indiquent une granulométrie uniforme.
- Les courbes avec une pente douce (ex. 3, 4) révèlent une granulométrie étalée, adaptée pour des mélanges bien gradués.

Applications pratiques :

- Les sols granulaires (1, 2, 3, 4) sont idéaux pour les constructions nécessitant un bon drainage et une forte résistance au cisaillement.
- Les sols fins (5, 6) nécessiteraient une stabilisation ou un traitement chimique pour être utilisés dans des applications structurales.

Recommandations :

- Pour des applications géotechniques précises, les paramètres granulométriques tels que le coefficient d'uniformité (C_u) et le coefficient de courbure (C_c) doivent être calculés pour chaque courbe.

II.5.2. Module de finesse (M_f) (NFP 18-540 et EN 12620)

Le module de finesse est une mesure de la finesse ou de la distribution granulométrique d'un matériau granulaire, comme le sable. En génie civil et en construction, il est couramment utilisé pour évaluer la qualité du sable utilisé dans le béton.

Le module de finesse est calculé en tamisant une quantité de sable à travers une série de tamis normalisés et en additionnant les pourcentages cumulés de matériau retenu sur chacun de ces tamis, puis en divisant cette somme par la relation de la formule II.1 :

$$M_f = \frac{\text{cumul des pourcentages retenus}}{100} \dots \dots \dots \text{(II.1)}$$

Selon la norme :

- **Française (NFP 18-540)**

$$M_f = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 - 5\} \dots \dots \dots \text{(II.2)}$$

- **Norme Européenne (EN 12620)**

Cependant la Norme Européenne (EN 12620) adaptée ici donne le (M_f) comme suit :

$$M_f = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{0.125 - 0.25 - 0.50 - 1 - 2 - 4\} \dots \dots \dots \text{ (II.3)}$$

Ainsi, les courbes granulométriques obtenues et leurs pentes moyennes permettent de caractériser le degré d'uniformité de la taille des éléments minéraux du sol. D'où la définition de deux caractéristiques. Il s'agit du rapport de Hazen ou coefficient d'uniformité de Hazen (C_u) et le coefficient de classement (C_c). [5]

Lorsque le module de finesse M_f est compris entre :

- $1,8 \leq M_f \leq 2,2$: le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau. Le sable est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.
- $2, < M_f \leq 2,8$: le sable est à utiliser si l'on recherche une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités. *C'est Un bon sable.*
- $2, < M_f \leq 3,2$: le sable manque de fin et le béton y perd de l'ouvrabilité. Le sable est à utiliser si l'on recherche des résistances élevées au détriment de l'ouvrabilité et avec des risques de ségrégation.
- $M_f > 3,2$: le sable est à rejeter.

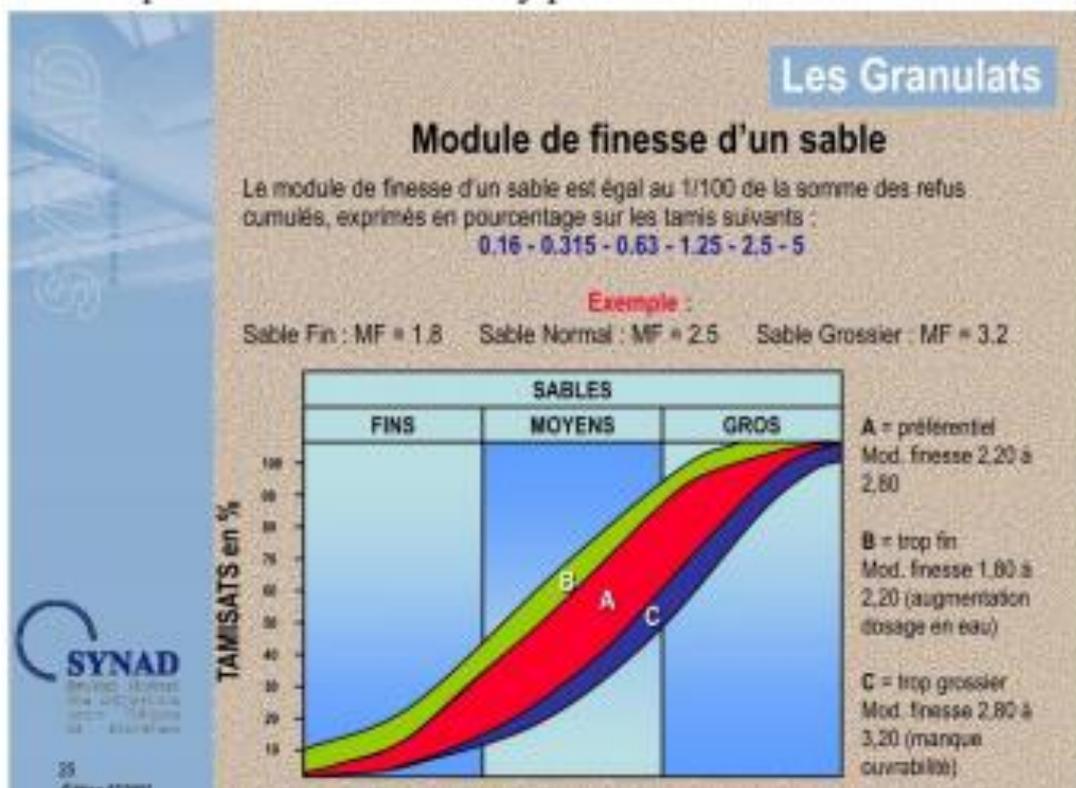


Figure II.10 : Présentation des modules de finesse des sables

- Exemple : Correction du module de finesse du sable

Si plusieurs sables sont disponibles, il est possible d'utiliser la règle d'Abrams afin d'avoir un module de finesse optimal $M_{f_{opt}} = 2,5$ (Normalement comprise entre 2.2 et 2.8 : recommandé pour avoir un bon béton. En supposant par exemple que deux sables seront mélangés : un sable S_1 de module de finesse $M_{f_1} = 4.02$ et un sable fin S_2 de module de finesse $M_{f_2} = 2.16$ afin d'obtenir un « nouveau » sable de module de finesse $M_{f_{opt}} = 2.5$.

Les proportions des deux sables devront être calculés selon les relations des formules II.4 et II.5 :

$$\text{Proportion du sable S1} = \frac{M_{f_{opt}} - M_{f_2}}{M_{f_1} - M_{f_{opt}}} \dots \dots \dots \text{(II. 4)}$$

$$\text{Proportion du sable S2} = \frac{M_{f_1} - M_{f_{opt}}}{M_{f_1} - M_{f_2}} \dots \dots \dots \text{(II. 5)}$$

$$\text{Soit } S_2 = \frac{(4,02-2,5)}{(4,02-2,16)} = 0,82, \text{ donc } 82\% \text{ de sable } S_2 \text{ et } 18\% \text{ du sable } S_1.$$

II.5.3. Masse volumique

II.5.3.1. Masse volumique apparente (ρ_{app}) du sable (EN 1097-6)

La masse volumique apparente (ou densité apparente) du sable est une mesure qui permet de déterminer la densité du matériau en vrac, c'est-à-dire la masse du sable par unité de volume, y compris les vides entre les grains. La norme EN 1097-6 spécifie la méthode de détermination de la masse volumique apparente des granulats

Cet essai est un peu délicat car il y a une influence du tassement, donc il faut refaire l'essai plusieurs fois. Faire la moyenne des valeurs obtenues. A cet effet, plus le nombre des essais est important plus le résultat obtenu est fiable (la moyenne calculée des résultats devient plus représentative). Il s'agit de prendre le sable des deux mains en formant un entonnoir. Placer les mains à dix centimètres environ du bac de mesure. Faire tomber le sable, ni trop vite, ni trop lentement, jusqu'à débordement du matériau du bac. Araser à la règle et peser le contenu. Refaire l'essai trois fois et prendre comme masse volumique apparente du sable la moyenne de trois valeurs.

A. Détermination de la Masse Volumique Apparente du Sable selon EN 1097-6

Matériel nécessaire :

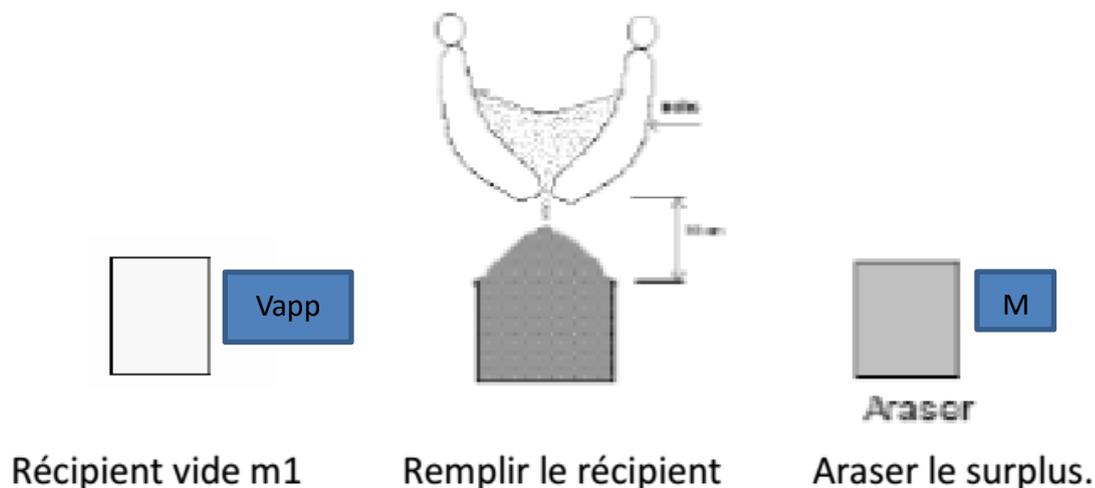


Figure II.11 : La méthode de Calcul de la masse volumique apparente

II.5.3.2. Masse volumique absolue (ρ_{ab}) (Masse spécifique)

La masse volumique absolue (ou masse spécifique) d'un matériau est la masse par unité de volume des particules solides, excluant les vides entre les grains. Elle constitue une propriété essentielle pour divers calculs dans le domaine de la construction et du génie civil.

- Détermination de la Masse Volumique Absolue du Sable

Matériel nécessaire :

- Pycnomètre (ou fiole volumétrique),
- Balance de précision,
- Thermostat pour maintenir une température constante,
- Eau distillée ou un autre liquide de densité connue,
- Sable sec à tester.

Procédure :

1. Préparation du sable :

- Sécher le sable à 110 ± 5 °C jusqu'à l'obtention d'une masse constante.
- Laisser refroidir le sable à température ambiante.

2. Remplissage du pycnomètre :

- Remplir partiellement le pycnomètre avec de l'eau distillée jusqu'à un repère spécifique.
- Peser le pycnomètre rempli d'eau et noter la masse (m_1).

3. Ajout du sable dans le pycnomètre :

- Introduire une masse connue de sable sec (m_2) dans le pycnomètre.
- Compléter le remplissage avec de l'eau distillée jusqu'au repère.
- Éliminer les bulles d'air en agitant doucement ou en utilisant un vide partiel.
- Peser le pycnomètre contenant le sable et l'eau et noter la masse (m_3).

4. Calculs :

- Volume du pycnomètre (V_{pyc}) est connu.
- Masse de l'eau dans le pycnomètre rempli d'eau ($m_4 = m_1$ - masse du pycnomètre vide).
- Masse de l'eau dans le pycnomètre avec sable et eau ($m_5 = m_3 - m_2$ - masse du pycnomètre vide).

La différence de masse d'eau déplacée par le sable donne le volume du sable selon la relation de la formule II.8 :

$$V_{sable} = V_{pyc} - \frac{m_5}{\rho_{eau}} \dots \dots \dots (II.8)$$

La masse volumique absolue est obtenue par la relation de la formule II.9:

$$\rho_{abs} = \frac{m_2}{V_{esable}} \dots \dots \dots (II.9)$$

II.5.3.3. Masse volumique des matériaux de forme irrégulière (ρ_{app})

La masse volumique apparente des matériaux à forme géométrique irrégulière (pierres, roches, etc.) possédant cette forme peut être calculée de la façon suivante :

L'échantillon à étudier doit être recouvert de paraffine afin d'être protégé contre la pénétration de l'eau. Ensuite, nous procéderons à leur pesée dans l'eau.

Pour déterminer la masse volumique des matériaux de ce type, nous devons faire les pesées suivantes :

- M_S : Masse sèche d'échantillon (g) ;
- M_{S+P} : Masse sèche d'échantillon après avoir enrober une paraffine (graisse) (g).
- $M_{(S+P)L}$: Masse sèche d'échantillon après avoir enrobé de paraffine et pesé dans l'eau (g).
- M_P : Masse de la paraffine ayant enrobé de l'échantillon
- ρ_{par} : masse volumique absolue de paraffine.

Le calcul de la masse volumique apparente s'effectue par la relation de la formule II.10

$$\rho_{abs} = \frac{M_S}{\frac{(M_{S+P} - M_{(S+P)L})}{1} - \frac{g_p}{\gamma_p}} \dots \dots \dots (II.10)$$

- $\frac{g_p}{\gamma_p}$: Volume de la paraffine
- $(M_{S+P} - M_{(S+P)L})$: la poussée d'Archimède
- $\frac{(M_{S+P} - M_{(S+P)L})}{1}$: volume apparent de l'échantillon absorbé par la paraffine

II.5.3.4. Différence entre Masse volumique apparente et Masse volumique absolue

La masse volumique apparente et la masse volumique absolue s'expriment en poids /volume comme en g/cm³. La masse volumique apparente est en rapport avec le volume réel, le volume interstitiel et celui des pores alors que la masse volumétrique absolue est en rapport avec le volume réel diminué du volume des pores, le volume interstitiel n'existant plus, les matériaux broyés supprimant le volume des pores ainsi que celui des interstices

II.5.3.5. Densité absolue (D_{ab})

La densité absolue se calcule par la relation de la formule II.11

$$D_{ab} = \frac{\text{Masse spécifique de matériau}}{\text{Masse volumique de l'eau}} \dots \dots \dots (II.11)$$

II.5.3.6. Densité apparente (D_{app})

La densité absolue se calcule par la relation de la formule II.12

$$D_{app} = \frac{\text{Masse volumique}}{\text{Masse volumique de l'eau}} \dots \dots \dots (II.12)$$

Exemple :

Une caisse de volume totale $V = 1 \text{ m}^3$ est pleine de gravier dont la masse nette est de 1520 Kg ; les grains constituants occupent un volume réel $V_0 = 0.600 \text{ m}^3$ (volume de la matière pleine).

- Le volume des vides entre les grains est calculé par la relation suivante :

$$V_V = V - V_0$$

$$V_V = 1 - 0.600 = 0.400 \text{ m}^3$$

$$V_V = 0.400 \text{ m}^3$$

- La masse volumique de ce granulat est de 1520 Kg/ m^3

$$\rho_{ab} = \frac{M}{V_{abs}} = \frac{1520}{1} = 1520 \text{ kg/m}^3$$

- Sa masse spécifique est :

$$\rho_{ab} = \frac{M}{V_{abs}} = \frac{1520}{0.400} = 2550 \text{ kg/m}^3$$

- Sa densité apparente (D_{app}) est :

$$D_{app} = \frac{\text{Masse volumique}}{\text{Masse spécifique}} = \frac{1520}{1000} = 1.52$$

- Sa densité absolue est :

$$D_{ab} = \frac{\text{Masse spécifique de matériau}}{\text{masse d'un égale volume}} = \frac{2550}{1000} = 2.55$$

II.5.3.7. Les facteurs qui influent sur la densité du gravier

La densité apparente d'un gravier (et plus généralement d'un granulat) dépend de plusieurs facteurs :

- De sa nature : selon la nature de la roche et la densité des minéraux, la masse des gravillons est variable. Par exemple, la densité d'un calcaire sera inférieure à la densité d'une diorite.
- De sa forme : un gravier constitué de granulats de forme sphérique ou cubique aura une densité apparente plus élevée qu'un gravier constitué de granulats de forme plate, allongée ou en aiguille (toutes choses étant égales par ailleurs).

- De sa granularité : un gravier de granularité étendue présentera très peu de vide entre ses granulats (les plus petits granulats venants combler les vides entre les plus gros). Sa densité apparente sera alors plus élevée qu'un gravier d'étendue granulaire limitée. Par exemple un gravier 4/16 aura une densité apparente plus élevée qu'un gravier 4/8 de même nature.
- De son taux d'humidité : la densité apparente d'un gravier sec est plus faible que la densité apparente d'un gravier humide.
- De son taux de compactage : un gravier tassé dans un sac ou un big bag a une densité apparente plus élevée qu'un gravier non tassé en vrac.

II.5.3.8. Les facteurs qui influent sur la densité du sable

La densité du sable est influencée par divers paramètres. En voici quelques exemples :

- La nature de la roche : les grains peuvent peser plus ou moins lourd, Ainsi le quartz pèse $\sim 2.65 \text{ g/cm}^3$ tandis que l'aragonite pèse $\sim 2.9 \text{ g/cm}^3$
- Le taux d'humidité : le sable peut être sec pèse moins lourd que le sable mouillé
Exemple : sable sec $\sim 1,6$ tonnes contre $\sim 1,9$ à 2 tonnes/ m^3 pour un sable mouillé
- Le compactage : un sable compacté (dans un sac ou autre) est plus lourd qu'un sable non compacté. Exemple : sable non compacté $1,4$ tonnes / m^3 et sable compacté $\sim 1,7$ tonnes / m^3
- La granulométrie : la matrice granulaire (variété de grains) peut influencer sur le poids du sable.

De petits matériaux peuvent occuper l'espace entre les grains, au lieu du vide. Cela augmente le poids.

II.6. Propreté des granulats

Les impuretés peuvent perturber l'hydratation du ciment ou entraîner des défauts d'adhérence granulats-pâte, ce qui peut avoir une incidence sur la résistance du béton. La propreté traduit l'absence d'éléments fins indésirables dans les granulats. Elle désigne essentiellement la teneur en fines argileuses, dont la valeur doit être limitée

II.6.1. Détermination du pourcentage d'impureté dans les graviers

La propreté des graviers est déterminée à partir de l'essai de propreté superficielle NF P 18 - 591, l'essai est effectué par lavage d'une quantité de gravier ($200 D < M < 600 D$) sur le tamis $0,5 \text{ mm}$ et en déduire la différence de masse après séchage. Elle est déterminée d'après la formule suivante II.13 :

$$I_{mp} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \cdot 100(\%) \dots \dots \dots (II. 13)$$

- M_1 : la masse de l'échantillon à l'état initial, séché en (g):
- M_2 : la masse de l'échantillon après lavage, séché à 105°C . en (g).

Cet essai est normalisé et fourni une valeur numérique prenant en compte directement de la propreté du gravier. La présente norme fixe la valeur 2% qui est le seuil de propreté acceptable du gravier, donc $I_{mp} \leq 2\%$.

II.6.2. Détermination du pourcentage d'impureté dans le sable

(Essai de l'équivalent de sable : NF EN933-8) [4]

Les impuretés peuvent compromettre l'hydratation du ciment et causer des problèmes d'adhérence entre les granulats et l'adhésif, impactant la résistance du béton. Pour assurer la propreté, il est important de limiter les fines particules d'argile dans les agrégats. Le pourcentage de passant au tamis de $0,5 \text{ mm}$ est utilisé pour les graviers, et un essai "équivalent sable" est réalisé pour le sable afin de déterminer sa pureté.

Pour les sables, la propreté est contrôlée par l'essai dit "Equivalent de sable" (E.S.) (NF P 18-598). On agite une certaine quantité de sable dans une solution lavante (cette solution contient 111 g de chlorure de calcium anhydre, 480 g de glycérine et 12 g de formaldéhyde pour 40 litres d'eau). On détermine la propreté d'un sable en utilisant la méthode présentée par la figure ci-dessous.

$$ES = \frac{h_1}{h_2} \cdot 100 (\%) \dots \dots \dots (II. 14)$$

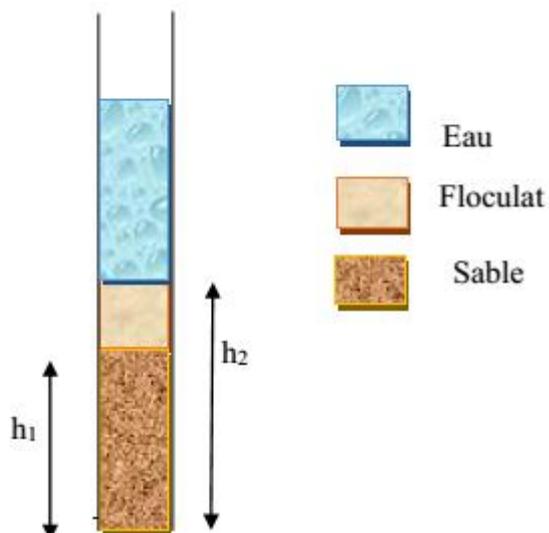


Figure II.12 : Essai de l'équivalent de sable (NF EN933-8)

- h_1 : la hauteur totale y compris le flocculat (fines en suspension) en (cm).
- h_2 : la hauteur du dépôt de sable visible en (cm).

La valeur de ES doit selon les cas être supérieure à 60 (ESP)

Les Valeurs préconisées par la norme (NF P 18-598) pour déterminer la nature et la qualité du sable sont illustrées dans le tableau II.1.ci-dessous :

Tableau II.1 : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable [6]

Equivalent	Nature	Qualité du sable
$ES < 60$	Sable argileux	Risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité
$60 \leq ES < 70$	Sable légèrement argileux	De propreté admissible pour le béton de qualité
$70 \leq ES < 80$	Sable propre	Convenant parfaitement pour les bétons de qualité
$ES > 80$	Sable très propre	Risque d'entraîner un défaut de plasticité

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

La compacité est le rapport du volume solide au volume total de la matière.

$$c = \frac{V_{solide}}{V_{total}} \times 100(\%) \dots \dots \dots (II.17)$$

La porosité et la compacité sont liées par la relation suivante : $p + c = 1$ La porosité et la compacité sont souvent exprimées en pourcentage (%). La somme des deux est alors égale à 100%.

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

La compacité est donnée par la relation suivante :

$$C = 1 - P \dots \dots \dots (II.18)$$

A. à l'état lâche :

$$C = 1 - P_L \dots \dots \dots (II.19)$$

B. à l'état compacte :

$$C = 1 - P_C \dots \dots \dots (II.20)$$

Pour les granulats courants on peut admettre que la compacité en vrac est de l'ordre de 0.7 à 0.6 pour les sables et de 0.65 à 0.55 pour les graviers

Exemple :

Supposant que l'on soit présence d'un granulats alvéolaire (argile expansive par exemple). Si la masse nette d' 1m^3 de ce granulats (non tassé) est de 460 k, on dira que sa masse volumique est de $460\text{kg}/\text{m}^3$ et sa densité apparente est 0.46. Si les grains occupent dans ce m^3 un volume réel de 525 l (non compris les vides entre eux)

1. La masse volumique par grain est $460 / 0.525 = 880 \text{ kg}/\text{m}^3$
2. La densité absolue est de 0.88 Si dans un grain de volume des pores ou alvéoles est de 65%,
3. La compacité d'un grain sera : $c = 1 - 0.65 = 0.35$ (rapport du volume de matière pleine ou volume totale du grain).
4. La densité absolue de la matière argileuse constituant le grain sera : $0.88/0.35 = 2.52$;
c'est approximativement la masse spécifique pleine (argile) non compris pores et alvéoles.

Il est admis pour les bétons d'ouvrages d'art de résistance $f_{28} \geq 36\text{MPa}$ ou pour les bétons de bâtiments, dont $f_{28} \geq 60\text{MPa}$, $G \leq 20$.

II.9. La capacité d'absorption de l'eau

Est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau. Elle se caractérise par la quantité d'eau absorbée par un matériau sec entièrement immergé et s'exprime en pour cent de la masse (capacité d'absorption massique) ou du volume (capacité d'absorption volumique) d'un matériau sec, Il est déterminé selon la norme NF EN 1097-6, et calculé selon la formule suivante : [7] .

$$Ab (\%) = \frac{M_h - M_s}{M_s} \cdot 100 \dots \dots \dots (II.21)$$

- M_h : La masse du matériau à l'état de saturation en eau en (g).
- M_s : La masse du matériau à l'état sec et séché à 105 ± 5 °C en (g).

Plus la capacité d'absorption d'eau du granulat est élevée, plus la capacité d'absorption d'eau du matériau est élevée.

II.10. Teneur en eau

Sur chantier, la teneur en eau est diffère d'un matériau à autre, et ceci est dû aux taux d'humidité existant et la nature des matériaux.

La teneur en eau est donnée par la relation suivante :

$$W (\%) = \frac{M_h - M_s}{M_s} \cdot 100 = \frac{M_e}{M_s} \cdot 100 \dots \dots \dots (II.22)$$

- M_e : Masse d'eau contenue dans le matériau ;
- M_s : Masse du matériau à l'état sec ;
- M_h : Masse du matériau à l'état humide.

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.11. Le foisonnement

Le foisonnement des terres lors d'un terrassement équivaut à une augmentation de volume des matériaux après excavation. Donc le foisonnement est un phénomène d'augmentation de volume. Cette augmentation se produit lorsqu'on réalise un terrassement ou une tranchée en retirant (excavant) les matériaux du sol.

Le volume initial de sol en place (V_0) est inférieur au volume de sol obtenu après excavation. C'est ce volume final qu'on appelle volume foisonné (V_f).

L'augmentation de volume entre V_0 et V_f s'explique par l'apparition de vide partiel provoquée par la décompression des matériaux.

L'augmentation de volume est variable et peut dépendre de paramètres extérieurs comme l'humidité du sol. On retient que cette augmentation se calcule en fonction du matériau excavé, et peut varier de 10 à 40 % du volume initial en place.

II.11.1. Les différents coefficients de foisonnement en terrassement

Selon la nature du matériau ou du sol, le coefficient de foisonnement en terrassement est différent. Voici quelques coefficients de foisonnement utilisés :

Tableau II.2 : Les différents coefficients de foisonnement en terrassement [8]

Matériaux	Coefficient de foisonnement (C_f)
Terre végétale	1.42
Pierres concassées, grès	1.67
Ciment	3
Argile, sable argileux	1.25
Gravier	1.12
Tourbe	1.18
Sable	1.12
Terre sèche	1.25
Granit fragmentée	1.64
Enrobés	1.09
Moellons	1.6

Ces coefficients peuvent légèrement varier si le matériau est mouillé ou sec. Attention, ces coefficients de foisonnement correspondent à un volume et non au poids des matériaux.

Lors de travaux de terrassement, tenir compte du phénomène de foisonnement est indispensable en particulier si les matériaux excavés sont déplacés ou évacués, et nécessitent pour cela la mise en place de rotation de camions.

Afin d'évaluer correctement les volumes foisonnés on recherche dans le tableau suivant le coefficient de foisonnement du matériau (sol) terrassé, pour en multiplier le volume en place

II.11.2. Le volume du matériau foisonné

Lorsque la pelleteuse vient creuser pour évacuer ce volume en place (V_p), on lui applique l'un des coefficients de foisonnement (C_f) pour connaître le volume foisonné (V_f). Pour le calcul le volume de terre à transporter on utilise la formule suivante :

$$V_f = V_p \times C_f. \dots \dots \dots (II. 23)$$

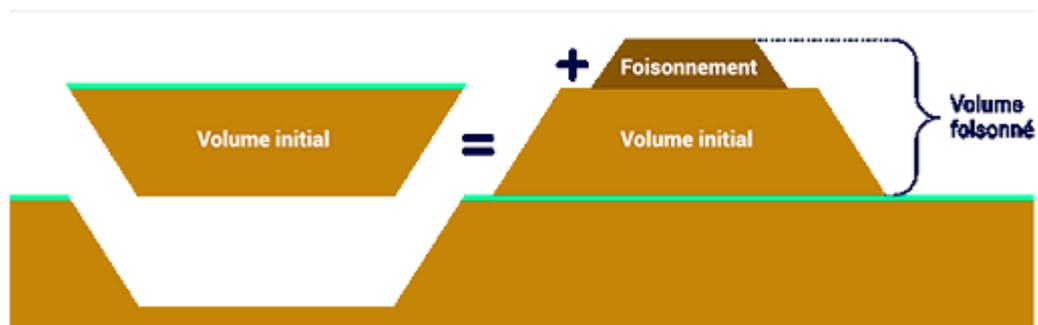


Figure II.13 : Schéma explicatif montrant le volume de foisonnement estimé Lors des travaux de terrassement

Exemple de calcul avec le coefficient de foisonnement :

Vous avez $5 m^3$ de terre à évacuer en pierres concassées, le volume foisonné sera de 5×1.67 soit $8.35 m^3$. Vous devez donc louer ou faire appel à un camion pouvant transporter au minimum $8.35 m^3$ (et non pas $5 m^3$).

Autres termes que vous pourrez entendre lors d'un terrassement :

1. Le volume compacté : le volume de terre foisonné est compacté par un engin,
 - Le coefficient de foisonnement résiduel : c'est le rapport entre le volume de terre compactée et le volume de terre en place,
 - Le coefficient de compactage : c'est le rapport entre le volume de terre compactée et le volume de terre foisonnée.

II.12. Caractéristiques géométriques des granulats

Les caractéristiques de fabrication sont liées aux procédés d'exploitation et de production des granulats telles que, en particulier :

- La granularité : arrondies ou anguleux ;
- La forme : sphérique, cubiques, aplatis ou allongés.

Chapitre III : Les liants

III.1. Introduction

Un liant, dans le cas du béton ou du mortier, est utilisé pour agglomérer des particules solides. Il réagit avec l'eau, provoquant une réaction chimique appelée hydratation, qui libère de la chaleur. Plus les particules du liant sont fines, plus l'hydratation est rapide et complète.

Cette réaction se produit principalement à la surface des particules, avec une progression lente vers l'intérieur. L'hydratation se manifeste également par la prise et le durcissement du matériau.

III.2. Processus d'hydratation du ciment

Au contact de l'eau, le ciment subit une réaction d'hydratation, entraînant deux phénomènes principaux qui se manifestent à l'extérieur. : [1]

- **la prise** qui consiste en la perte progressive de la consistance du ciment gâché d'eau. La prise renseigne sur le laps de temps théoriquement disponible entre le moment de l'addition d'eau et la mise en place du béton. En d'autres termes, c'est le temps ouvrable ;
- **le durcissement** est le phénomène qui prolonge la prise. Après s'être figée, la pâte à ciment va durcir au fil du temps. Le durcissement intéresse le développement même de toutes les caractéristiques requises pour le rôle final dévolu au matériau.

L'hydratation du ciment consiste essentiellement en la formation de silicates de calcium hydratés se présentant sous forme de lamelles dont la longueur est de l'ordre de $1/100 \mu\text{m}$ et dont l'épaisseur n'excède guère celle de quelques molécules. Ces lamelles se regroupent en feuillets, rouleaux ou gerbes et forment le gel de tobermorite, considéré comme responsable des propriétés essentielles de la pâte de ciment durcie.

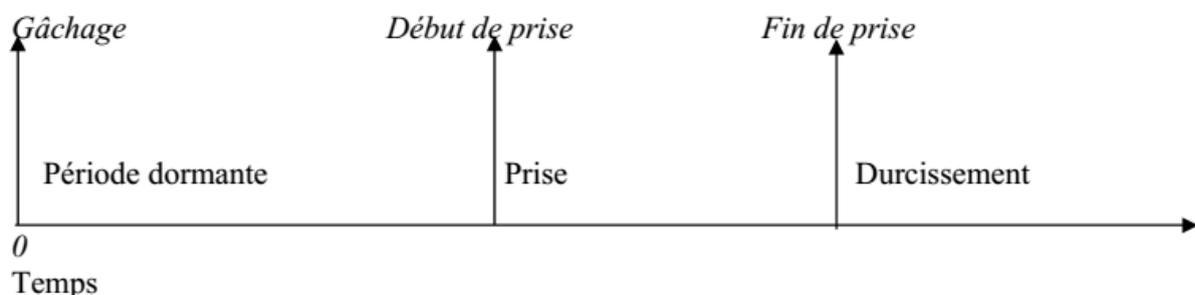


Figure III.1 : Périodes de début de prise et de fin de prise

III.3. Classification des liants

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

- **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.

- **Les liants minéraux**

Les liants minéraux sont subdivisés en deux catégories :

- Les liants hydrauliques sont ceux qui peuvent durcir et se conserver aussi bien dans l'eau qu'à l'air libre (ex : les ciments naturels et artificiels).
- Les liants aériens : On appelle liants aériens les matières qui peuvent passer à l'état pierreux , se conserver pendant une longue durée et augmenter de résistance à l'air libre (ex : la chaux aérienne , plâtre) .En présence d'une humidité élevée les liants aériens perdent partiellement voire complètement leur résistance mécanique ce qui limite leur domaine d'utilisation.

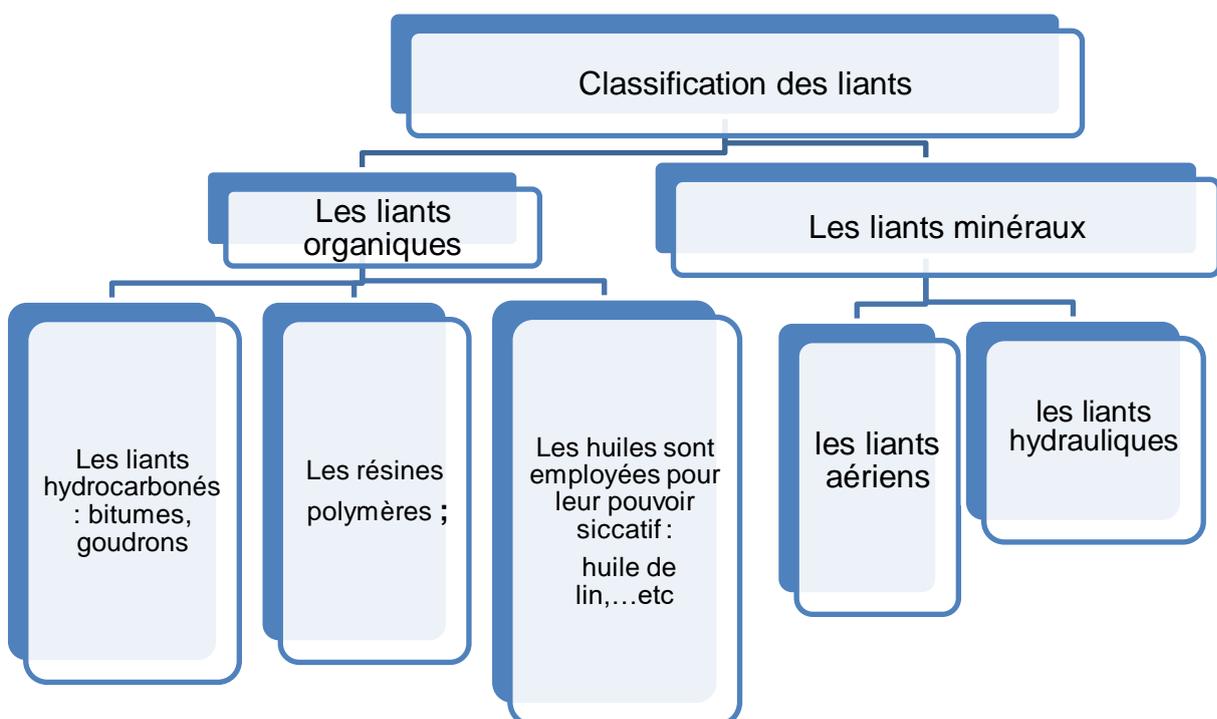


Figure III.2 : Classification des liants : "organiques et minéraux"

III.4. Les liants aériens

III.4.1. La Chaux aérienne

Elle résulte 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.

III.4.2. Définition

La chaux est le produit de la cuisson d'un calcaire, suivi d'une extinction à l'eau. La chaux est le nom donné à une matière obtenue par combustion de calcaire et utilisée depuis l'antiquité. C'est chimiquement un oxyde de calcium avec plus ou moins d'oxyde de magnésium, mais la désignation usuelle de chaux peut englober différents états chimiques de ce produit. On les distingue :

III.4.2.1. La chaux vive (Oxyde de Calcium)

Est le produit direct de la combustion du calcaire, essentiellement de l'oxyde de calcium (CaO).

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. 3 : Morceaux de chaux vive humectés d'eau et poudre de chaux.

III.4.2.2. Chaux éteinte (La chaux aérienne)

Est obtenue par la réaction de la chaux vive avec de l'eau. Elle est constituée en particulier d'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 et on l'a dit aérienne car elle agit avec le CO_2 de l'air. En présence du gaz carbonique, la chaux éteinte peut faire une

carbonatation et redevenir un calcaire, voir la réaction chimique suivante :



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

III.4.2.3. La chaux hydraulique

Est constituée en plus de silicate et d'aluminate car elle provient à l'origine de calcaire moins pur. Elle est désignée hydraulique parce qu'elle durcit en présence d'eau.

III.4.3. Réaction chimique

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



Figure III.4 : **Pierres de calcaires et Morceaux de chaux vive**

En Conclusion le Cycle de la chaux est représenté sous la forme suivante :

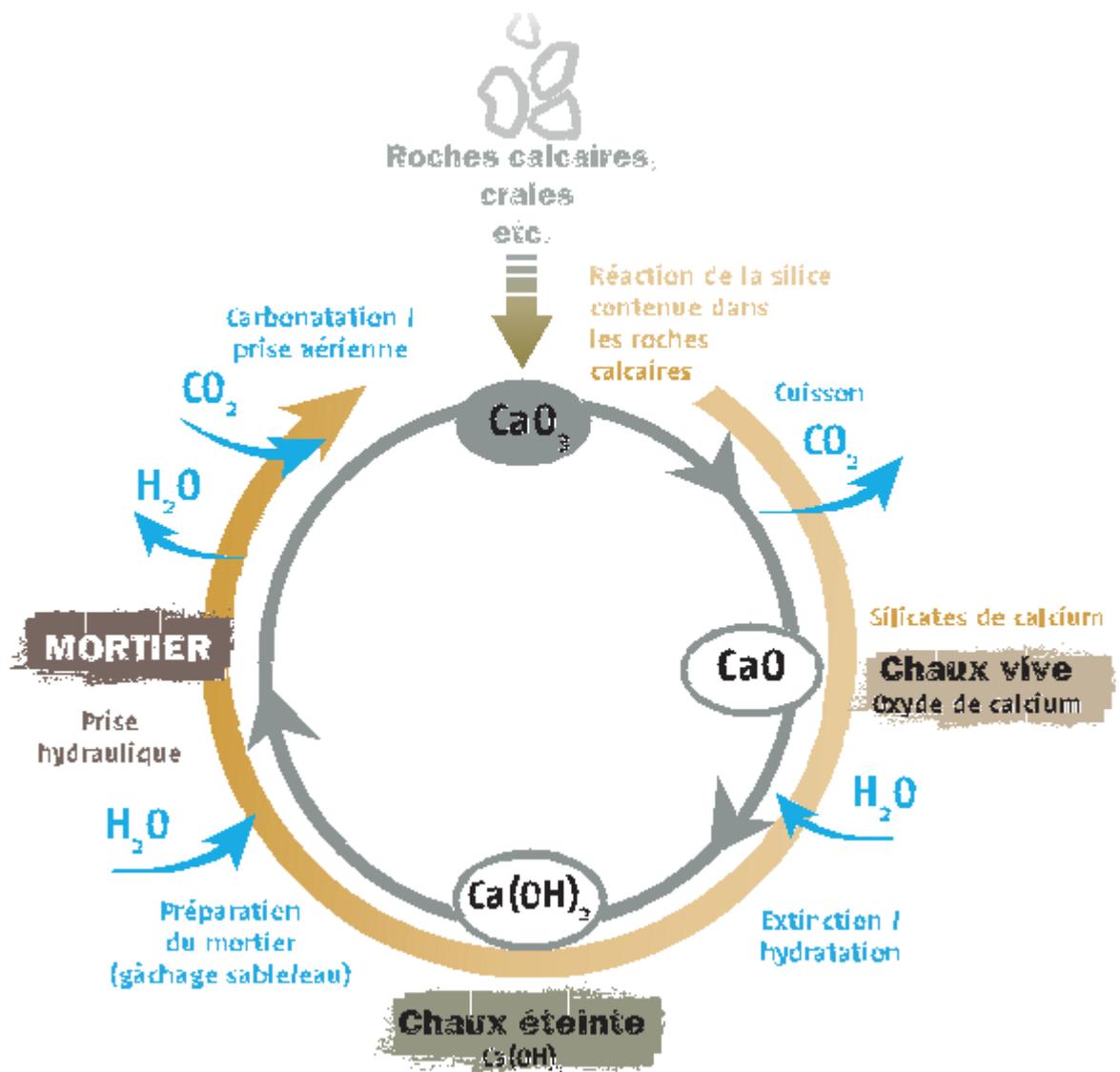


Figure III.5 : Cycle de la chaux.

III.4.4. Utilisation de la chaux

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 :

- 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.4.5. Chaux Hydraulique

III.4.5.1. Le module hydraulique

Lors de la cuisson du calcaire marneux, certaines molécules de CaO réagissent avec les oxydes présents dans les minéraux argileux (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3), formant ainsi des silicates ($\text{CaO}.\text{SiO}_2$), des aluminates ($\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$) et des ferrites de calcium ($\text{CaO}.\text{Fe}_2\text{O}_3$). Ces composés ont la particularité de durcir aussi bien à l'air qu'en présence d'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 :

$$m = \frac{\% \text{CaO}}{\% (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)} \dots\dots\dots (\text{III.1})$$

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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 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.

Exemple :

Elément en (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	P.F
Chaux	21.08	6.13	3.10	61.45	1.2	0.11	1.54	0.23	4.44

$$m = \frac{\%CaO}{\%(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3)} = \frac{61.45}{21.08 + 6.13 + 3.10} = 2.03$$

Selon la valeur de $m = 2.03$, la valeur est comprise entre 1.7 et 9 et suite à la classification des liants selon module hydraulique, notre liant est de type : Chaux hydraulique.

III.4.5.2. Classification de la chaux selon l'indice d'hydraulicité 'i'

La chaux prend un caractère si la matière première contient une quantité suffisante de silice. Elle alors contenir aussi de l'alumine et de l'oxyde de fer .L'argile étant un mélange de silice et d'alumine, on peut dire que les chaux hydrauliques sont constituées avec du calcaire et de l'argile .Louis VICAT en 1820 a défini un indice 'i' d'argilosité ; qui correspond au rapport des masses argileuses sur la masse de matière de chaux vive : [6]

$$i = \frac{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}{CaO + MgO} \dots\dots\dots(III.2)$$

Tableau III.1 : Indice d'hydraulicité et prise de différentes chaux hydrauliques 'i'[8][1]

Type de chaux	% d'argile	Indice de Vicat I	Durée de prise sous l'eau (jours)	Désignation
Aérienne	0 ~ 5	0 - 0.1	-	Chaux
Faiblement hydraulique	5 – 8	0.1 -0.16	15 - 30	Chaux moyenne
Moyennement hydraulique	8 – 14	0.16 - 0.30	10 - 15	
Hydraulique	14 – 19	0.30 - 0.40	2 - 4	
Eminemment hydraulique	19 – 22	0.40 - 0.50	< 2	Chaux maigre

Exemple :

Élément en (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P.F
Chaux	21.08	6.13	3.10	61.45	1.2	0.11	1.54	0.23	4.44

$$i = \frac{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}{CaO + MgO} = \frac{21.08 + 6.13 + 3.10}{61.45 + 1.2} = 0.48$$

Suivant la valeur de l'indice d'hydraulicité : $i = 0.48$, le type de la chaux est Eminemment hydraulique avec une durée de prise inférieure à 2 jours.

III.4.5.3. 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.5. Les liants hydrauliques

III.5.1. Les ciments

Le ciment est un liant hydraulique obtenu par cuisson à 1450 °C du mélange de calcaire et d'argile. Il se présente sous la forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau. Il forme ainsi une pâte qui fait prise et qui durcit progressivement même sous l'eau. C'est un constituant de base du béton. Il existe une très grande variété de ciments qui présente chacun des qualités et des usages particuliers (environ 50 types de ciments).

Les ciments courants sont élaborés à partir d'un mélange d'environ 80% de calcaire et 20% d'argile, mélange qui est progressivement chauffé à une température voisine de 1450°C, puis brusquement refroidi. Au cours de ces opérations, s'enchaînent plusieurs réactions chimiques. Il en résulte le clinker qui, mélangé avec du gypse et éventuellement avec d'autres produits, puis finement broyé, donne le ciment.

III.5.2. Classification de ciment selon l'indice d'hydraulicité 'i'

Le type d'un ciment est caractérisé par son indice d'hydraulicité (I), appelé aussi «indice de Vicat». Il est défini par le rapport de la fraction acide du ciment à la fraction basique [10]:

$$I = \frac{\text{Fraction Acide}}{\text{Fraction Basique}} = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}} \dots\dots\dots(\text{III.3})$$

La résistance chimique des ciments est d'autant meilleure que leur indice est plus élevé.

- pour $I < 0,5$: le ciment est dit basique (Portland),
- pour $I > 0,5$: le ciment est dit acide (riche en laitier),
- pour $I = 1$: le ciment est dit neutre (conventionnellement)

Actuellement on préconise les règles suivantes :

$$1.40 < \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} < 1.45$$

$$0.45 < \frac{Al_2O_3}{SiO_2} < 0.50$$

Exemple :

Élément en (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P.F
Chaux	21.08	6.13	3.10	61.45	1.2	0.11	1.54	0.23	4.44

$$I = \frac{\text{Fraction Acide}}{\text{Fraction Basique}} = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{CaO + MgO} = \frac{21.08 + 6.13}{61.45 + 1.2} = 0.43$$

III.6. La fabrication des ciments courants

Le constituant principal des ciments est le clinker, qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion respective moyenne de 80 %/20 %. Les différentes étapes de la fabrication sont décrites ci-après.

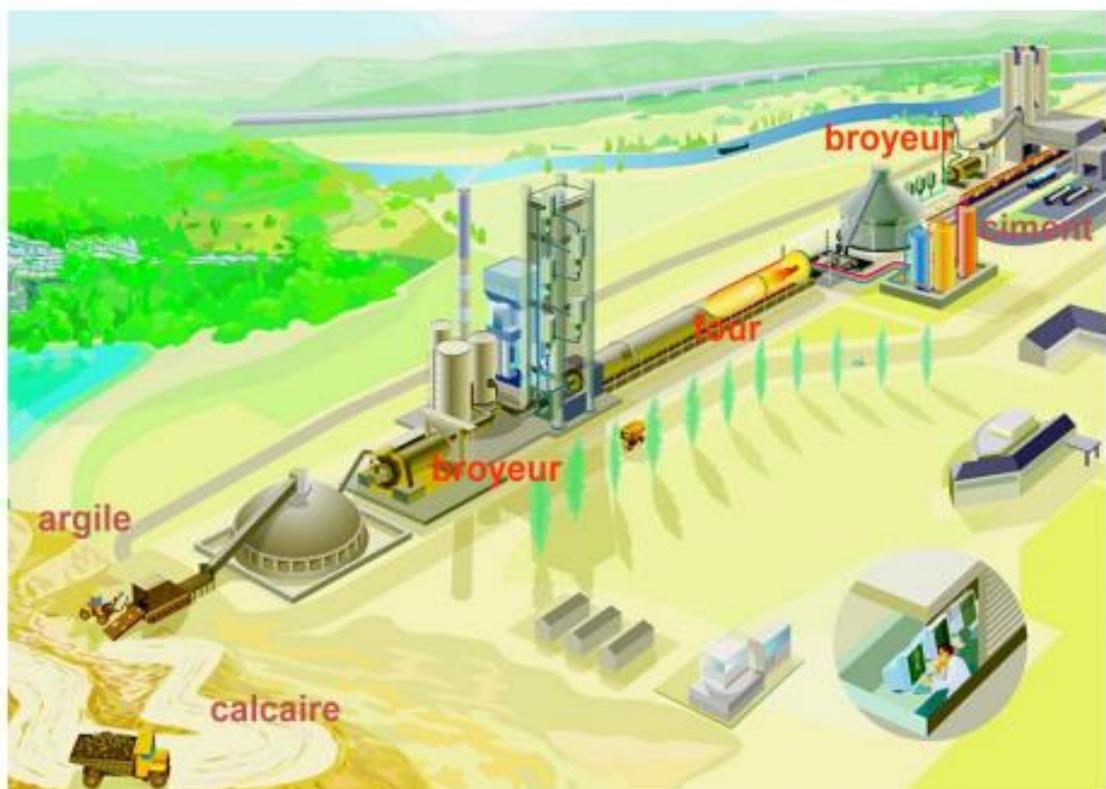


Figure III.6 : Le four de fabrication de ciment

- Extraction et concassage

Les matières premières sont extraites de carrières généralement à ciel ouvert. Les blocs obtenus sont réduits, dans des concasseurs situés généralement sur les lieux mêmes de l'extraction, en éléments d'une dimension maximale de 150 mm.

- **Préparation de la matière première**

Les grains de calcaire et d'argile sont intimement mélangés par broyage, dans des proportions définies, en un mélange très fin, le « cru ». À ce niveau, des corrections de composition peuvent être effectuées en incorporant, en faible proportion, de la bauxite, de l'oxyde de fer, etc. Le mélange cru est préparé automatiquement en fonction de la technique de fabrication utilisée.

- **La voie sèche**

La matière première est préparée sous forme de poudre. La pré-homogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des constituants essentiels du ciment, par superposition de multiples couches. Une station d'échantillonnage analyse régulièrement les constituants et le mélange pour en garantir la régularité. À la sortie du hall de pré-homogénéisation, le mélange est très finement broyé dans des broyeurs sécheurs, qui éliminent l'humidité résiduelle et permettent d'obtenir une poudre qui présente la finesse requise ; cette poudre, le « cru », est une nouvelle fois homogénéisée par fluidisation.

- **Le cru**

La préparation du cru par voie sèche, est la plus utilisée en France. Elle comporte les phases suivantes :

- Pré-homogénéisation : cette phase qui a pour but de réaliser un mélange préliminaire, consiste à déposer les matériaux constitutifs du cru en couches successives, de faible épaisseur, formant le « tas de pré-homogénéisation ».
- Broyage-séchage : repris à l'aide d'une roue-pelle, le mélange précédent est envoyé à la station de broyage afin d'être séché et broyé en une poudre de grains inférieurs à 160 microns.
- Séparation : cette phase consiste à renvoyer au broyeur les particules insuffisamment broyées et à récupérer les fines contenues dans les gaz.

- Homogénéisation : c'est au cours de cette phase que grâce à un brassage pneumatique ou mécanique vigoureux, peut être obtenu un produit parfaitement homogène, de caractéristiques chimiques uniformes, apte à être cuit et donner une bonne qualité du ciment.

- **La cuisson**

Le cru est ensuite cuit dans un four rotatif légèrement incliné dont les dimensions sont de l'ordre de 5m de diamètre et de 80 à 100m de longueur.

Le cru est introduit dans un four pour y être cuit à une température comprise entre 1400 et 1500°C. La cuisson, qui génère des émissions de CO₂, permet la transformation du cru en clinker.

Le cycle du traitement comporte les phases suivantes :

- Le préchauffage qui s'effectue dans un échangeur de chaleur situé à l'amont du four (tour de préchauffage), les gaz chauds provenant du four y brassant la farine à contre-courant ;
- La décomposition des argiles qui se situe au-dessus de 500°C ;
- La décarbonatation des calcaires qui s'effectue à 950°C dans la partie médiane du four dont les températures sont comprises entre 550 et 1000°C ;
- La formation du clinker ou clinkérisation à 1450°C qui s'effectue en partie aval du four près du brûleur (zone de clinkérisation).

A la fin de la cuisson, le clinker se présente sous la forme de granules de la taille d'un pois ou d'une noix

A. Le refroidissement

Cette opération a pour but d'abaisser la température du clinker qui est de l'ordre de 1200 à 1450°C à la sortie du four à environ 50/250°C suivant les types de refroidisseurs.

B. Le broyage

Le broyage est réalisé en continu dans des broyeurs alimentés à partir des stocks de clinker et des différents constituants et ajouts.

Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granules de clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout de gypse (dont le rôle est de réguler la prise), ainsi qu'à

celui des éventuels autres constituants (filler calcaire, laitier, cendres...), ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés.

c. Stockage, ensachage et expédition

A partir de la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché (sac de 25 kg ou 35 kg) soit expédié en vrac.

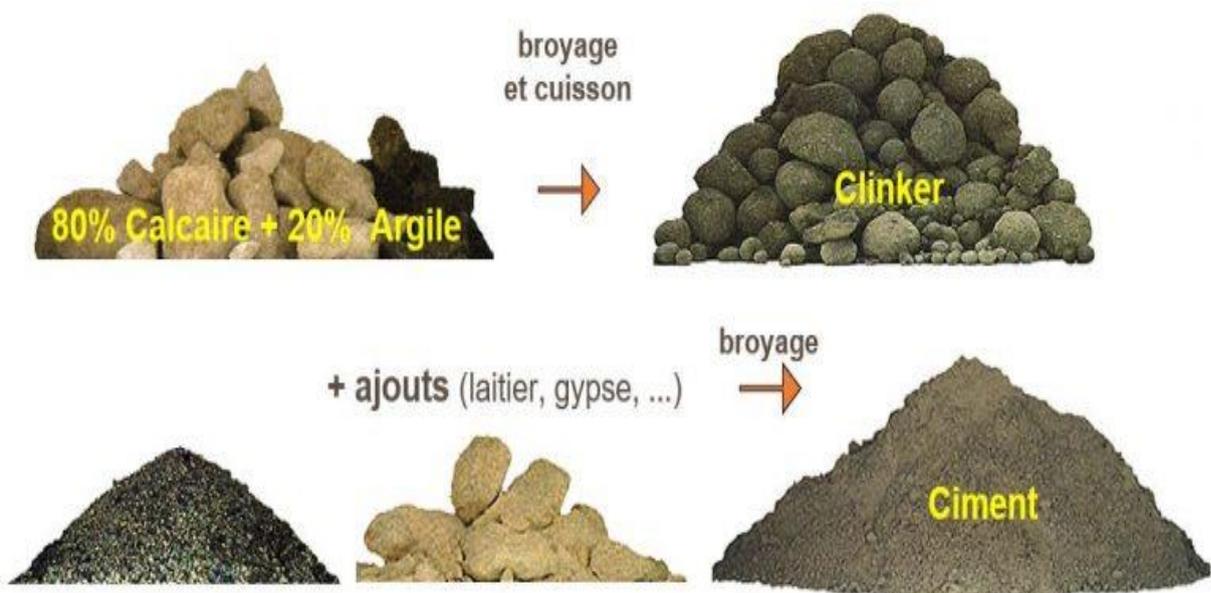


Figure III.7 : Etape de fabrication du ciment : Du Calcaire et de l'Argile au Produit Final
Le titre

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

- Préparation du cru ;
- Cuisson ;
- Broyage et conditionnement

III.7. Notations cimentières pour les 4 éléments majeurs constitutifs

Minéralogiquement parlant, le ciment est fait essentiellement à partir de quatre constituants :

Tableau III.2 : Notations cimentières

Nom	Symbole chimique	Notation cimentaire
Oxyde de calcium ou Chaux vive	CaO	C
Oxyde de silice ou Silice	SiO ₂	S
Oxyde d'aluminium ou aluminat	Al ₂ O ₃	A
Oxyde de fer ou Ferrite	Fe ₂ O ₃	F

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 ciment est composé de silicates et d'aluminates de calcium obtenus en combinant la chaux avec la silice, l'alumine et l'oxyde de fer. Les roches calcaires fournissent la chaux, tandis que les argiles fournissent l'alumine, la silice et l'oxyde de fer, notamment l'oxyde ferrique.

Le ciment est fabriqué à partir de calcaires et d'argiles extraites des carrières, qui sont ensuite concassés et homogénéisés. Ensuite, le mélange est chauffé à haute température dans un four, ce qui permet l'obtention du clinker. Le processus de chauffage entraîne la libération d'eau et de gaz carbonique, réagissant avec le calcium pour former différents composants du ciment. Une partie du CaO se combine avec l'Al₂O₃ et le Fe₂O₃ pour former une masse liquide, tandis que le SiO₂ et le CaO restant réagissent pour former des silicates bicalciques et tricalciques.

III.7.1. Fabrication par voie humide

La voie la plus ancienne et la plus simple de fabrication du ciment consiste en un mélange fin de calcaire, d'argile et d'eau pour former une pâte liquide. Cette pâte est brassée énergiquement dans de grands bassins, puis stockée et homogénéisée dans d'autres bassins. Des analyses chimiques sont effectuées pour contrôler la composition de la pâte avant la cuisson. Ensuite, la pâte est envoyée dans un four rotatif chauffé par une flamme intérieure. Le four comprend plusieurs zones, dont les 3 principales sont :

- Zone de séchage.

- Zone de décarbonatation.
- Zone de clinkerisation.

La partie supérieure du four est revêtue de chaînes marines pour améliorer les échanges caloriques entre la pâte et les parties chaudes du four. Le clinker chaud (environ 600-1200 °C) passe ensuite dans des refroidisseurs (à grille, à ballonnets) qui ont une influence sur les propriétés du clinker. Après cela, le clinker doit être broyé finement avec du gypse (environ 5%) pour régulariser la prise. Le broyage est une opération coûteuse en raison de la dureté du clinker et du rendement énergétique des broyeurs. Les broyeurs à boulets sont utilisés et le ciment atteint une température élevée (160°C), nécessitant un arrosage extérieur. Selon la méthode de broyage (circuit ouvert ou circuit fermé), le clinker est réduit en poudre et le gypse est ajouté pour réguler les propriétés du ciment portland. Enfin, le ciment est refroidi à environ 65 °C avant d'être stocké dans des silos.

III.7.2. Fabrication par voie sèche

Les ciments sont principalement composés de calcaire (environ 80%) et d'argile (environ 20%). Parfois, d'autres matériaux comme la bauxite ou l'oxyde de fer sont ajoutés pour compléter le mélange. Le processus de fabrication se fait en broyant finement la poudre, puis en la chauffant dans un four rotatif. Les gaz chauds permettent à la poudre de perdre son gaz carbonique et son eau. Cependant, la méthode de fabrication par voie sèche présente des défis techniques, tels que la séparation de l'argile et du calcaire, qui peut être évitée 50

grâce à des systèmes de séparation de particules. De plus, des réglementations strictes obligent les fabricants à installer des dépoussiéreurs pour filtrer l'air et gérer les poussières.

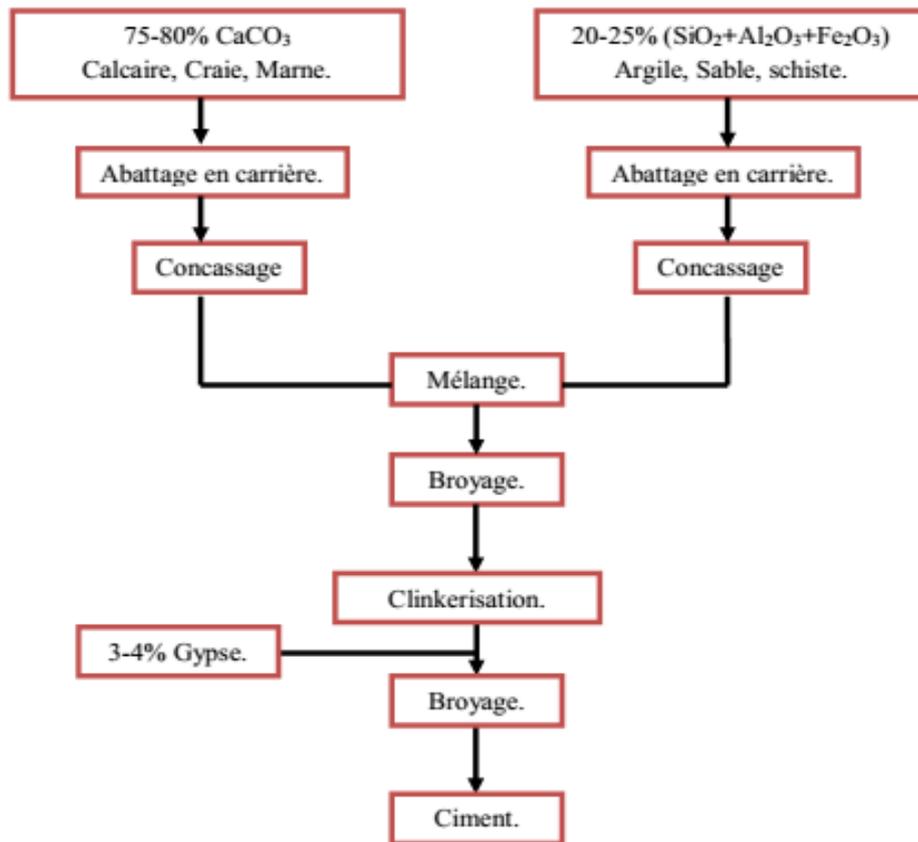


Figure III .7 : Fabrication du ciment.

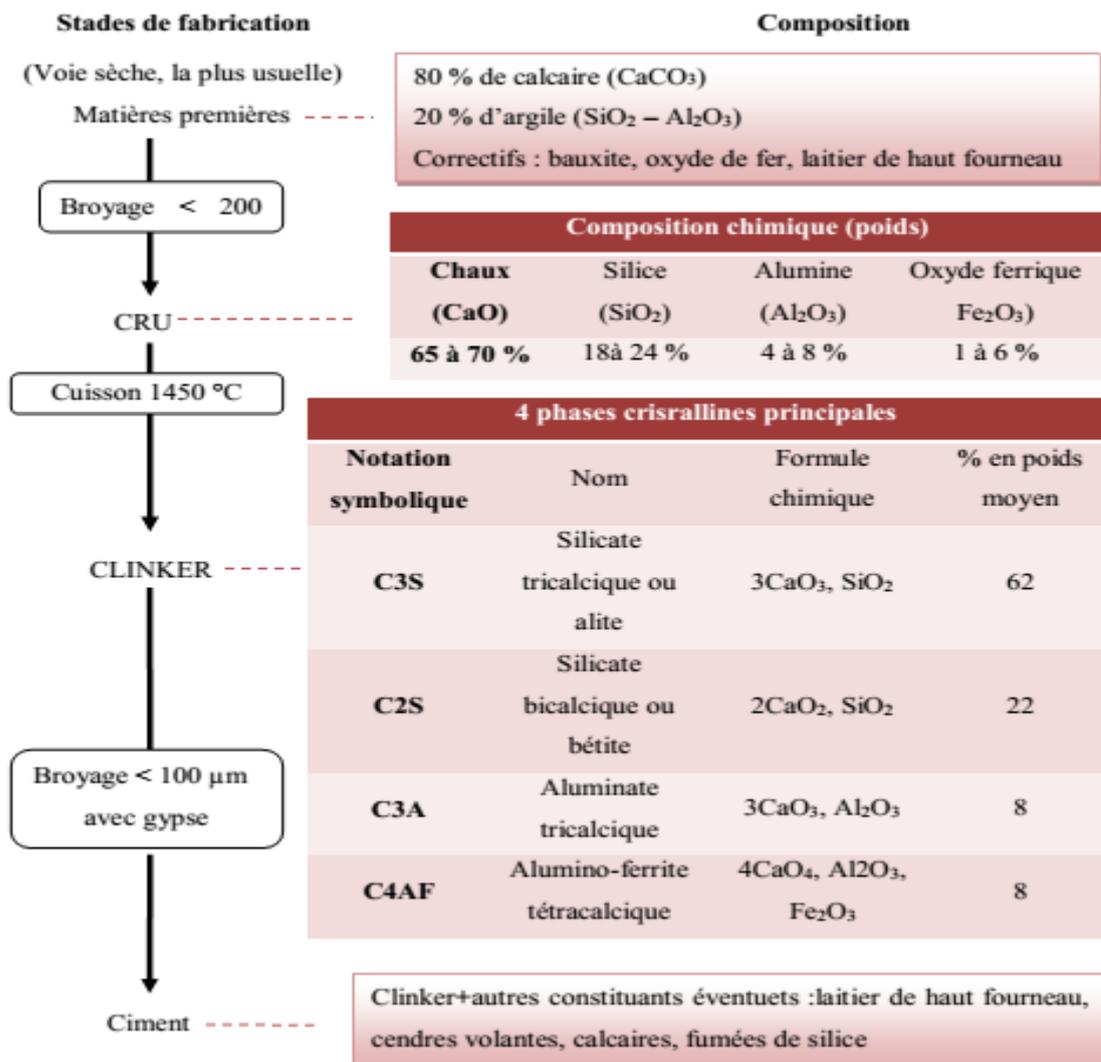


Figure III.8 : Organigramme de fabrication du ciment. [4]

III.8. Constituants principaux et additions

III.8.1. Constituants du clinker

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

- Le silicate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C₃S) (50-70% du clinker).
- Le silicate bicalcique $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C₂S) (10-30% du clinker).
- L'aluminate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C₃A) (2-15% du clinker).
- L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tétracalcique $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (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 qualité finale est évaluée par des modules et des indices, c'est-à-dire des valeurs calculées à partir de la composition. [11]

On définit par exemple :

A. Module de saturation de Kühl : L'indice de saturation de Kühl

$$\text{LSF} = \frac{\text{CaO}}{2.8.\text{SiO}_2 + 1.1.\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.7.\text{Fe}_2\text{O}_3} \dots\dots\dots(\text{III.4})$$

Avec $0.85 < \text{LSF} < 1$

- Module silicique (MS ou SR) :

Le module silicique de Kühl est compris entre 1.5 et 5. Une valeur élevée correspond à une valeur élevée de silice au détriment des agents fondants. Une valeur faible provoque un croûtage excessif dans la zone de clinkérisation et nuit à la bonne marche du four.

$$\text{MS} = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \dots\dots\dots(\text{III.5})$$

Avec $2.3 < \text{MS} < 3$

- Module alumino-ferreux (AF ou AR) :

-

Le module alumino-ferrique de Kühl est compris entre 1.5 et 2.5

$$\text{AF} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} \dots\dots\dots(\text{III.6})$$

Avec $0.8 < \text{MAF} < 2$

- Indice d'hydraulicité de Vicat :

$$\text{HI} = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}} \dots\dots\dots(\text{III.7})$$

Les composants sont exprimés en moles et non en pour-cent. L'indice d'hydraulicité de Vicat est compris entre 0.4 et 0.5.

- Facteur de saturation de Lea Parker

$$\text{LSF} = \frac{\text{CaO}}{2.8.\text{SiO}_2 + 1.18.\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65.\text{Fe}_2\text{O}_3} \dots\dots\dots (\text{III.8})$$

Le facteur de saturation de Lea et Parker est compris entre 0.85 et 1.0. Il se présente aussi sous la forme $\text{LSF} = 100 \times \text{CaO} / (2.8 \times \text{SiO}_2 + 1.18 \times \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65 \times \text{Fe}_2\text{O}_3)$. (I.12)
Il est alors compris entre 85 et 100.

Ce module exprime le rapport entre la chaux présente dans le mélange et la quantité de chaux qui peut être liée dans le clinker. Le standard de chaux permet de connaître le comportement du mélange à la cuisson et de prévoir la qualité du ciment. Plus le standard de chaux est élevé, plus les résistances du ciment le seront aussi, et plus la cuisson sera difficile et nécessitera un accroissement de la consommation calorifique nécessaire à la cuisson. Par ailleurs, un standard en chaux élevé influe négativement sur la stabilité de volume du ciment hydraté (teneur en chaux libre).

Tableau III.3 : Critères chimiques de composition du clinker

Inférieur ou égal	Plage de variation acceptable			Supérieur ou égal
Résistances initiales faibles	1.5	Module hydrauliques	2.5	Stabilité de volume gonflement
Diminution de la température de clinkérisation Prise et durcissement rapide Favorise le croûtage	1.5	Module silicique	3.5	Cuisson difficile par manque de fondant Prise durcissement lent Diminution du croûtage dans le four
Faible chaleur d'hydratation Ciment sans C'A	1.5	Module aluminoferrique	2.5	Prise rapide Ciment alumineux
Faible dégagement de chaleur	0.85	Indice de saturation	0.95	Résistances initiales élevées Hautes résistances finales

III.8.2. La composition du ciment

Les constituants du ciment se répartissent comme suit :

- Le clinker Portland : Le principal constituant des ciments est le clinker. Il est constitué de silicates de calcium (C_3S et C_2S) et d'aluminates de calcium (C_3A et C_4AF).
- Les autres constituants : L'ajout d'autres constituants permet d'obtenir les différents types de ciments. Ce sont essentiellement du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, des calcaires, des fumées de silice, des fillers, du sulfate de calcium (gypse).

Lorsque leur teneur en masse excède 5% ce sont des constituants principaux, sinon ils sont appelés constituants secondaires.

III.9. Les principales catégories de ciment

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

III.9.1. Classification des ciments

La norme NF EN 197-1 définit 27 ciments courants regroupés en cinq types selon leur composition.

- CEM I Ciment Portland
- CEM II Ciment Portland composé
- CEM III Ciment de haut fourneau
- CEM IV Ciment pouzzolanique
- CEM V Ciment composé

Tableau III.4 : La notation des ciments selon la norme NF EN 197-1[12]

Type de ciment	Nombre de ciments	Clinker K %	Autres constituants principaux %	Constituants secondaires %
CEM I	1	95 à 100	0	0 à 5
CEM II	19	65 à 94	6 à 35 S/D/P/Q/V/W/T/L/LL	0 à 5
CEM III	3	5 à 64	LAITIER : 36 à 95	0 à 5
CEM IV	2	45 à 89	D/P/Q/V/W : 11 à 55	0 à 5
CEM V	2	20 à 64	S/P/Q/V : 28 à 80	0 à 5

- K : Clinker
- S : Laitier de haut fourneau
- D : Fumée de silice
- P : Pouzzolanes naturelles
- Q : Pouzzolanes naturelles calcinées
- V : Cendres volantes siliceuses
- W : Cendres volantes calciques
- T : Schiste calcinée
- L et LL : Calcaire

III.9.2. Les propriétés mécaniques : classification des ciments

Les ciments sont répartis en quatre classes en fonction de leur résistance à la compression mesurée en MPa à 28 jours sur une éprouvette de mortier normalisée. On distingue les classes 35, 45, 55, HP (haute performance). De plus, des sous classes sont définis pour désigner des ciments dont les résistances aux jeunes âges (2 jours) sont élevées.

Tableau III.5 : Classes des ciments selon la résistance à la compression [13]

Classe	Résistance à la compression (MPa)	
	à 2 jours	à 28 Jours
35	-	$25 < R < 45$
45	-	$35 < R < 55$
45 R (Rapide)	>15	$35 < R < 55$
55	-	$45 < R < 65$
55 R (Rapide)	>22.5	$45 < R < 65$
HP	-	$55 < R$
HPR(Rapide)	27	$55 < R$

Chapitre IV : Le mortier

IV.1. Introduction

Les mortiers constituent la principale catégorie de matériaux employés pour exécuter les fondations et les murs en agglomérés. Le mortier lie les agglomérés pour former une structure robuste, monolithe et durable. Les mortiers sont également l'une des catégories de matériaux de revêtement qu'on emploie sur les surfaces extérieures et intérieures des murs (enduits). Enfin, les mortiers sont très employés pour fabriquer les pierres artificielles à base de liants. [14].

IV.2. Définition

On appelle mortier, le mélange durci d'un liant, d'un agrégat sin (sable) et d'eau.

D'après sa composition un mortier n'est autre chose qu'un béton à grains fins ; il est donc soumis aux mêmes lois que les bétons. Parmi la grande variété des mortiers, certains d'entre eux ont beaucoup de traits communs. Ceci permet de subdiviser tous les mortiers en groupes.

IV.3. Classification des mortiers

Parmi la grande variété des mortiers, certains d'entre eux ont beaucoup de traits communs. Ceci permet de subdiviser tous les mortiers en groupes. A la base de cette classification on retrouve les indices principaux suivants : masse volumique, nature du liant, destination et propriétés physiques et mécaniques des mortiers.[7]

D'après la masse volumique à l'état sec les mortiers sont divisés en :

- Mortiers lourds à masse volumique de 1500 kg/m^3 et plus ; pour la préparation de ces mortiers on utilise des sables lourds quartzeux et autres ;
- Mortiers légers, à masse volumique inférieure à 1500 kg/m^3 , dont les agrégats sont des sables poreux et légers de pierre ponce, de tufs, laitiers, céramiste et autres fins agrégats légers. [7]

A. D'après la nature du liant, les mortiers sont :

- Mortiers de ciments, préparés aux portlands ou ses variétés ;
- Mortiers de chaux, où une chaux aérienne ou hydraulique est employée en qualité de liant ;

- Mortiers de plâtre préparés à base de liants gypseux, à savoir les plâtres et les liants d'anhydrite ;
- Mortiers mixtes obtenus en utilisant les liants de ciment à la chaux et ciment à l'argile.

Le choix de l'espèce du liant est fait suivant la destination du mortier, les exigences requises, les conditions de température et d'humidité pendant le durcissement et les conditions d'exploitation du bâtiment. [7]

B. D'après la destination des mortiers : La destination des mortiers se subdivisent en :

- Mortiers de maçonnerie, pour la pose des murs en pierres ou en gros éléments ;
- Mortiers de finissage, pour les enduits, pour la confection des éléments d'architecture, pour porter les couches décoratives sur les blocs et panneaux de murs
- Mortiers spéciaux possédant quelques propriétés très accusées ou propriétés particulières (acoustique, de tamponnage, de protection contre les rayons X, etc.) ; ils ne sont que rarement employés.

IV.4. Les propriétés physiques et mécaniques des mortiers

Les propriétés physiques et mécaniques est faite suivant deux indices prépondérants : résistance mécanique et non-gélivité qui caractérise la longévité du mortier. D'après la résistance à la rupture par compression (en kgf/cm²) les mortiers se subdivisent en 9 classes de résistance, de 4 à 300. D'après le degré de non-gélivité, en cycles gel-dégel, les mortiers se subdivisent en 9 classes Rg de 10 à 300.

IV.5. Propriétés des mortiers

Les propriétés principales d'une pâte de mortier sont la fluidité, la maniabilité et l'hydrophile et celles des mortiers eux-mêmes, la résistance mécanique et la longévité

La classification générale des mortiers d'après les propriétés physique et mécanique est faite suivant les indices prépondérants : [1]

IV.5.1. La résistance mécanique

De même que pour les bétons, la résistance mécanique d'un mortier après durcissement dépend de deux facteurs principaux : l'activité du ciment et le rapport eau /ciment (E/C). Cette dépendance s'exprime par la formule empirique suivante

$$R_m = 0.25R_c \left(\frac{C}{E} - 0.4 \right) \text{ en kgf/cm}^2 \dots\dots\dots (IV - 1)$$

- R_m étant la résistance limite à la compression du mortier à l'âge de 28 jours, en kg/cm^2 ;
- R_c étant l'activité du ciment en kgf/cm^2 ;
- C/E , le rapport de la quantité de ciment à la quantité d'eau.

La résistance des mortiers dépend aussi de la consommation du ciment et de la qualité du sable, ce que l'on voit de l'expression suivante :

$$R_m = KR_c(C - 0.05) + 4 \text{ en kgf/cm}^2 \dots\dots\dots (IV - 2)$$

K : est un coefficient valable pour le sable fin de 0,5 à 0,7 ; pour le sable moyen, il est de 0,8 et pour le sable grossier, il est de 1,0 ;

C : est la consommation du ciment en t/m^3 de sable.

La résistance des mortiers mixtes dépend également des adjuvants introduits finement broyés. Toute composition du mortier à ciment a une valeur optimale d'adjuvant permettant d'obtenir la mieux maniable et donnant un mortier le plus résistant.

IV.5.2. Fluidité d'une pâte de mortier

La fluidité d'une pâte de mortier est le pouvoir que possède cette pâte de se répandre sous son propre poids ou sous l'effet de forces extérieures. [14]



Fig. IV. 1 : Appareil de test de fluidité

IV.5.3. Le pouvoir de retenir de l'eau (Hydrophilic)

Le pouvoir de retenir de l'eau est caractérisé par la propriété de la pâte de ne pas se stratifier pendant le transport et de conserver assez d'eau dans la couche fine sur une base poreuse. Une pâte de mortier à l'hydrophilie basse se stratifie au cours de transport et lorsqu'on la pose sur une surface poreuse (briques d'argile, bétons, bois), elle lui restitue rapidement l'eau. La dessiccation du mortier peut être si importante qu'il n'y aura plus suffisamment d'eau pour le durcissement du mortier qui ne pourra pas atteindre la résistance requise. [14]

Le pouvoir de retenir de l'eau peut être augmenté par introduction des plastifiants minéraux et organiques.

IV.5.4. Composition des mortiers

Le mortier est un des matériaux de construction, qui contient du ciment ; de l'eau ; du sable ; des adjuvants et éventuellement des additions. Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure. [10].

Les mortiers sont constitués par des mélanges de :

- Liant (ciment ou chaux)

- Eau
- Sable
- Adjuvants

IV.5.4.1. 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.

IV.5.4.2. 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 : [15]

- 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.

IV.5.4.3.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.

IV.5.4.4.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.

IV.6. Les différents types de mortiers

Dans les travaux publics on utilise différents types de mortier :

IV.6.1. 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.

IV.6.2. 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.

IV.6.3. Les mortiers bâtards

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

IV.6.4. 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.6.5. 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 jointoiement,
- Mortier de ragréage,
- Mortier de scellement, mortier pour chapes,
- Mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment, etc.,
- Mortier de réparation.

IV.7. Caractéristiques principales des mortiers

Les caractéristiques principales des mortiers sont :

- Ouvrabilité ;
- Prise ;
- résistances mécaniques ;
- Retraits et gonflements, etc.

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

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

IV.7.1. Ouvrabilité

L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils. Les plus connus sont : [16]

a) La table à secousses :

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

$$E (\%) = \frac{D_r - D_i}{D_i} \cdot 100 \dots \dots \dots (IV - 3)$$

avec D_r = diamètre final et D_i = diamètre initial.

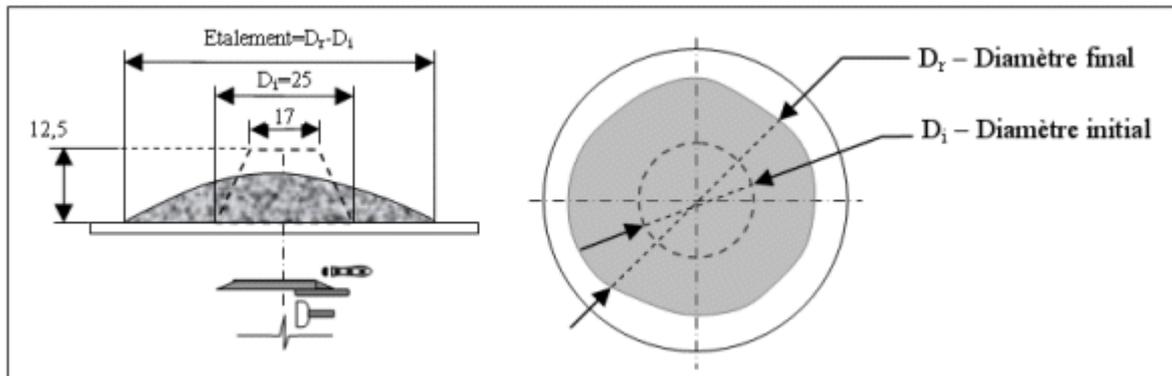


Fig. IV. 2 : Table à secousses pour mortier

b) Le maniabilimètre du LCPC :

L'essai consiste à caractériser la consistance par la mesure du temps d'écoulement d'un béton ou d'un mortier soumis à une vibration. Le béton ou le mortier est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison. Avec l'appareil B, il est mis en place par piquage en quatre couches ; avec l'appareil A, il est rempli sans tassement, à l'aide d'une pelle de terrassier. Après remplissage, il faut aplanir la surface libre à la règle. La mise en marche du vibreur (50 Hz) est provoquée par le retrait de la cloison. Au même instant le chronomètre est déclenché. On mesure la durée d'écoulement du matériau pour atteindre un repère donné [17].

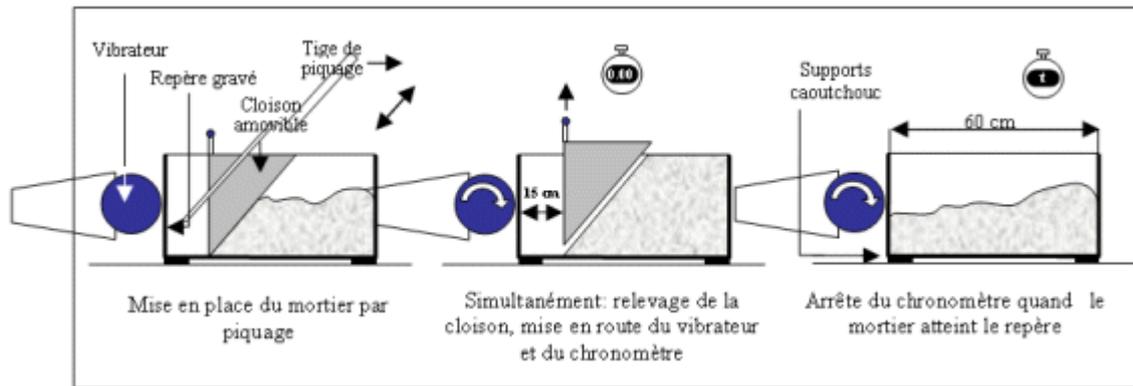


Fig. IV. 3 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre B

Le tableau ci-dessous donne les plages des valeurs correspondant aux différents types de béton.

Tableau IV.1 La classification DES mortiers selon l'essai du maniabilimètre

Classe de consistance	Durées t (en s)
Ferme	$t \geq 40$
Plastique	$20 < t \leq 30$
Très plastique	$10 < t \leq 20$
Fluide	$t \leq 10$

c) Le cône :

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

IV.7.2. Prise

Le début de prise correspond au moment où l'on constate une augmentation brusque de la viscosité de la pâte avec échauffement ; il est déterminé à l'aide de l'aiguille de Vicat (Essai normalisé NF 15431), il correspond au moment où cette dernière ne s'enfonce plus complètement jusqu'à fond de la coupelle mais s'en arrête à $4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.

La fin de prise correspond au moment où la pâte est devenue un bloc rigide ; bien que la détermination de la fin de prise ne soit que rarement demandé, sa détermination est faite sur la même coupelle que celle utilisée pour la recherche du début de prise, mais qui est retournée ; la fin de prise correspondant au moment où l'aiguille ne pénètre plus que 0.5 mm dans la pâte.

Le temps de début de prise peuvent varier de quelques minutes pour prompts, à plusieurs heures pour les ciments à prise lente .Pour la plupart des ciments courants, le début de prise à 20 °C se situe entre 2 et 5 heures. [17]

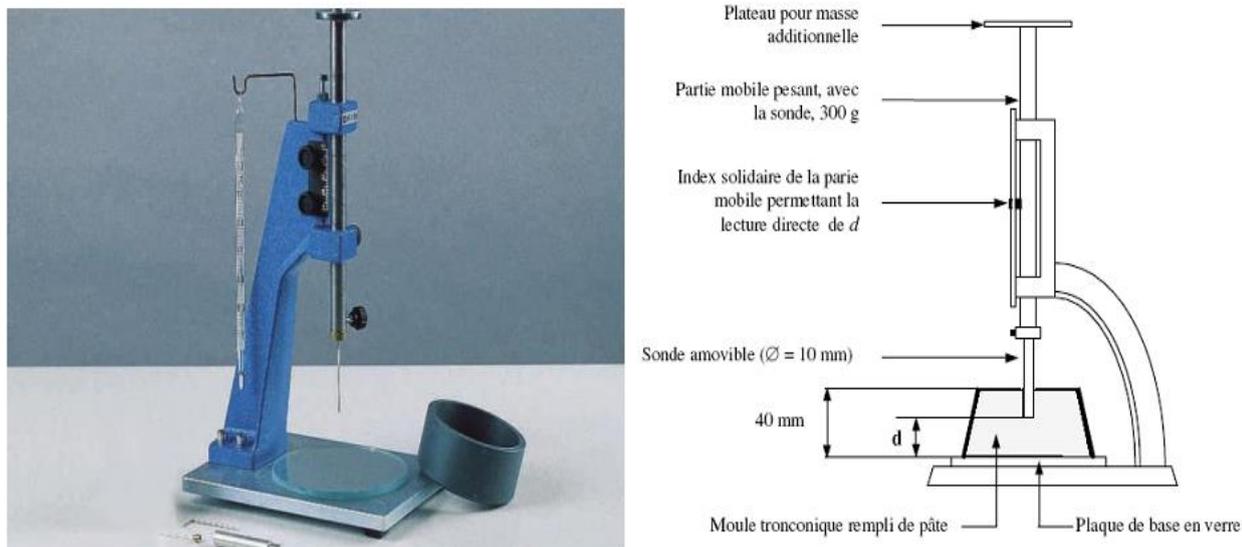


Fig. IV. 4 : Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge

- Si $(d) = 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$, on dit que la consistance de la pâte étudiée est normalisée, (Consistance normalisée).
- Si (d) n'atteint pas cette valeur (c.à.d. $d > 7\text{ mm}$ ou $d < 5\text{mm}$), il convient de refaire l'essai avec une valeur différente du rapport E/C jusqu'à atteindre la valeur recherchée de la consistance.

IV.7.3. Résistances mécaniques

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

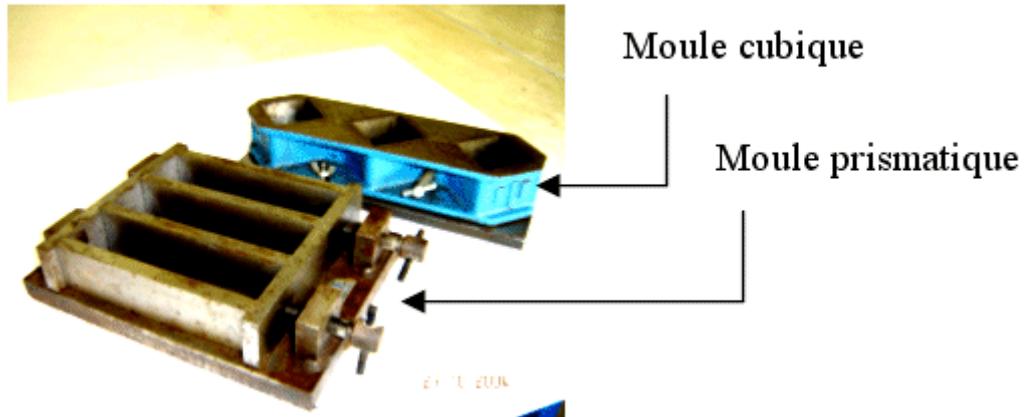


Fig. IV. 5 : Moule pour coulage des éprouvettes de mortier

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

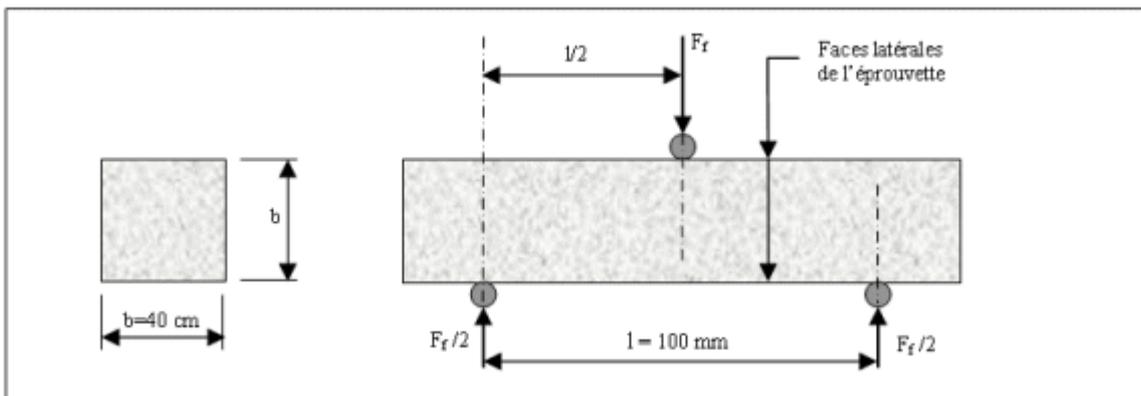


Fig. IV. 6 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

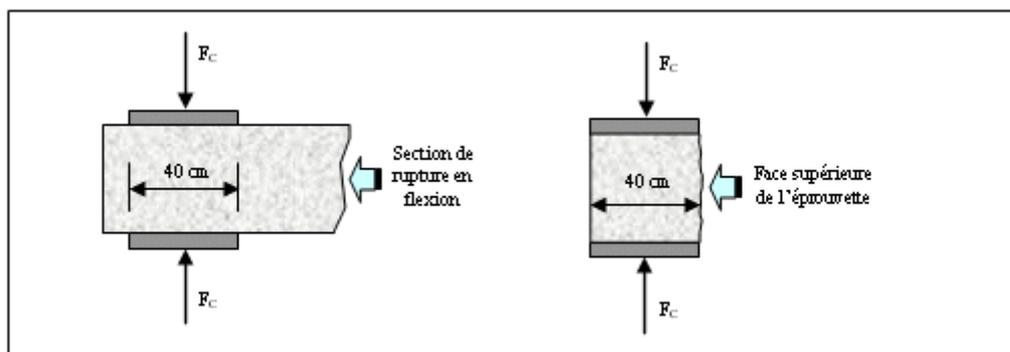


Fig. IV. 7 : Dispositif de rupture en compression.

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

- Nature et dosage en ciment ;
- Rapport C/E ;
- Granulométrie et nature du sable ;
- Energie de malaxage et mise en œuvre ;
- Protection les tous premiers jours.

IV.7.4. Retraits et gonflements

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

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

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

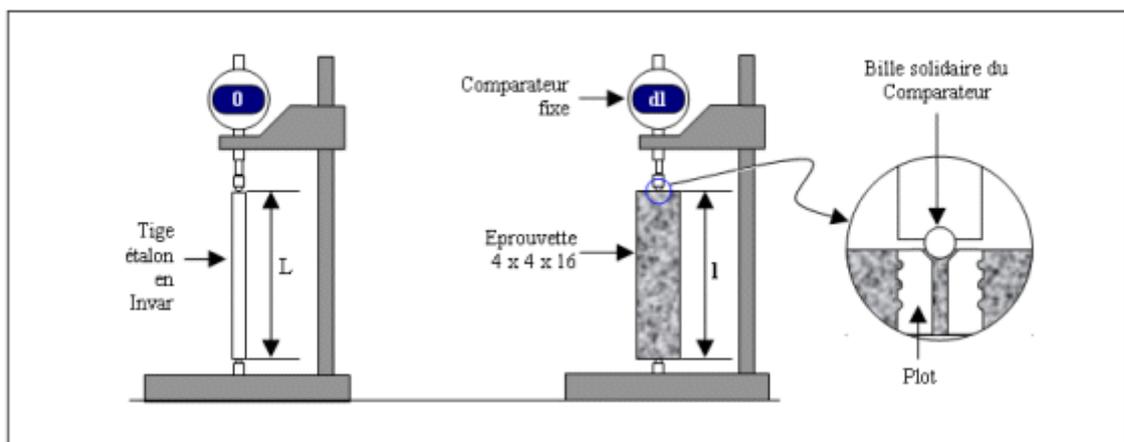


Fig. IV. 8 : Appareillage pour la mesure du retrait

Conclusion générale

Les matériaux de construction jouent un rôle fondamental dans le secteur de génie civil et des travaux publics, leur choix et leur utilisation influençant directement sur la qualité, la durabilité et la performance.

Dans ce polycopié de cours, nous avons abordé plusieurs aspects essentiels de ces matériaux. Une vue d'ensemble des matériaux a permis de mettre en lumière leur diversité et leurs caractéristiques fondamentales. Ensuite, l'étude des granulats a souligné leur importance en tant que constituants de base, offrant solidité et structure aux mélanges.

Nous avons ensuite examiné les liants, tels que le ciment et la chaux, qui jouent un rôle clé dans l'adhésion et la cohésion des matériaux. Enfin, les mortiers ont été analysés comme des composés essentiels, offrant à la fois liaison et finition dans la construction.

L'interdépendance de ces matériaux et l'importance de leur sélection en fonction des contraintes techniques, économiques et environnementales sont mises en avant dans les chapitres. Comprendre leurs propriétés, leurs méthodes de fabrication et leurs domaines d'application est essentiel pour concevoir des structures solides, économiques et durables.

La maîtrise des matériaux de construction, qu'il s'agisse de granulats, de liants ou de mortiers, est une compétence essentielle pour tout professionnel du bâtiment, garantissant ainsi la réussite des projets dans le respect des exigences durables et technologiques.

L'interdépendance de ces matériaux et l'importance de leur sélection en fonction des contraintes techniques, économiques et environnementales sont mises en avant dans les chapitres. Comprendre leurs propriétés, leurs méthodes de fabrication et leurs domaines d'application est essentiel pour concevoir des structures solides, économiques et durables.

Références bibliographiques

- [1]. Courard, L. (2012). *Matériaux de construction*. Polycopié de cours, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, France.
- [2]. Olivier, E. (1975). *Technologie des matériaux de construction* (Tome 1, 5e éd.). Paris.
- [3]. Maillot, R. (2001). *Mémento technique des granulats*. Les Presses de l'École des Mines, Paris (166 p.).
- [4]. Lozach, D. (2005). *Les constituants des bétons et des mortiers*. École française du béton, Collection technique, Centre d'information sur le ciment et ses applications (CIMBÉTON).
- [5]. SlidePlayer. (sd). *Propriétés des matériaux de construction*. Récupéré de : <https://slideplayer.fr/slide/1213556/>
- [6]. Dreux, G. (1964). Contribution à l'étude de l'influence de la propreté du sable sur les qualités du béton. *Annales ITBT*, 11, 198, juin.
- [7]. Komar, A. (1978). *Matériaux et éléments de construction* (3e éd.). MIR, Moscou.
- [8]. M-Habitat. (sd). *Coefficient de foisonnement en terrassement*. Récupéré de : https://www.m-habitat.fr/preparer-son-projet/terrassement-par-etape/coefficient-de-foisonnement-en-terrassement-4141_A
- [9]. Lemaitre, C. (2012). *Les propriétés physico-chimiques des matériaux de construction : Matière & matériaux, propriétés rhéologiques & mécaniques, sécurité & règlement*. Éditions Eyrolles.
- [10]. Dreux, G. et Festa, J. (1995). *Nouveau guide du béton* (7e éd.). Éditions Eyrolles, Paris.
- [11]. Spencer, CH (1990). *Matériaux pour ciment : Mémento roches et minéraux industriels*. Service géologique National, Département Géologique (BRGM).
- [12]. InfoCiments. (sd). *Norme béton NF EN 197-1 : Composition des ciments courants*. Récupéré de : <https://www.infociments.fr/norme-beton-nf-en-197-1-composition-des-ciments-courants>
- [13]. Gorisse, F. (1978). *Essais et contrôle des bétons*. Éditions Eyrolles, Paris.
- [14]. Vorobiev, V. (1967). *Matériaux de construction*. Éditions MIR, Moscou.
- [15]. Bessa, A., Philippe, JB, & Gallias, JL (2004). Évaluation de la contribution liée des ajouts minéraux à la porosité, à la résistance en compression et à la durabilité des mortiers. *22^e Rencontres universitaires de Génie Civil*, Université de Cergy-Pontoise, France (8 p.).

- [16]. Baron, J., & Ollivier, JP (1999). *Les bétons : Bases et données pour leur formulation*. Éditions Eyrolles.
- [17]. Dreux, G. et Festa, J. (1995). *Nouveau guide du béton : Composants et propriétés, composition et posologie, fabrication, transport et mise en œuvre, contrôle et normalisation*.