

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

Université Djillali Liabès de Sidi Bel-Abbès
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil et Travaux Publics



Polycopié de cours de la matière

Matériaux de Construction 1

*Destiné aux étudiants de la 2^{ème} année Licence Filière Génie Civil
et Travaux Publics*



Elaboré par :

Dr DADOUCH Mokhtar

Année universitaire 2023 / 2024

Avant-propos

Ce polycopié de cours de matériaux de construction est conçu spécifiquement pour les étudiants de deuxième année de Licence en Génie Civil et Travaux Publics. Il a pour objectif de fournir une compréhension approfondie des divers matériaux utilisés dans le domaine de la construction, ainsi que de leurs propriétés et applications.

Dans le cadre de leurs études, les étudiants en Génie Civil et Travaux Publics sont appelés à acquérir des compétences techniques essentielles pour analyser, sélectionner et utiliser efficacement les matériaux de construction. Ce cours vise à :

- ***Fournir des connaissances fondamentales*** sur les caractéristiques des matériaux couramment utilisés dans la construction, tels que les bétons, mortiers, aciers, bois, et matériaux composites.
- ***Développer des compétences pratiques*** pour évaluer la qualité et les performances des matériaux à travers des méthodes d'essais et des techniques de contrôle.
- ***Préparer les étudiants*** à appliquer ces connaissances dans des projets de construction réels, en tenant compte des aspects économiques, environnementaux et de durabilité.

Dr. DADOUCH M

Introduction générale

La maîtrise des propriétés des matériaux est cruciale pour la conception et la fabrication d'objets techniques. Pour garantir qu'un objet technique remplisse sa fonction et résiste aux diverses contraintes auxquelles il est soumis, il est essentiel de choisir les matériaux appropriés.

Le cours "Matériaux de Construction 1" a pour objectif d'enseigner aux étudiants comment sélectionner les matériaux de construction en fonction de leurs propriétés, tout en tenant compte de la cohérence, de la sécurité, de la durabilité et des coûts. Ce cours vise également à sensibiliser à la diversité des matériaux et à leur utilisation en construction.

Ce cours est structuré en quatre chapitres, conformément au programme de la deuxième année du système LMD :

- **Chapitre 1** : Introduction générale aux matériaux de construction, comprenant leur classification et leurs propriétés fondamentales.
- **Chapitre 2** : Étude de la granularité, classification des granulats, ainsi que des caractéristiques et types de granulats.
- **Chapitre 3** : Analyse des liants aériens (comme la chaux aérienne) et des liants hydrauliques (comme les ciments Portland), en détaillant leurs constituants principaux et les différents types d'additions minérales utilisés en cimenterie ainsi que leurs contributions techniques.
- **Chapitre 4** : Exploration des compositions et des types de mortiers (mortiers à base de chaux et de ciment), de leurs principales caractéristiques, et de leurs applications pratiques sur les chantiers.

Ce cours vous guidera dans la compréhension des matériaux de construction, de leurs propriétés et de leurs applications, en vous préparant à effectuer des choix éclairés dans le domaine de la construction.

Sommaire

1	: Historique des matériaux de construction	1
1.1.	Introduction à l'historique des matériaux de construction.....	1
1.2	Les matériaux de construction dans l'Antiquité Définition :	1
1.3	Évolution des matériaux de construction au Moyen Âge.....	1
1.4	Les matériaux de construction à l'époque moderne.....	1
1.5	Avancées récentes dans les matériaux de construction	1
2	: Classification des matériaux de construction	1
2.2	Classification basée sur la nature des matériaux	1
2.3	Classification basée sur les propriétés des matériaux.....	2
Exemples :		2
1.	Classification basée sur l'utilisation des matériaux :	2
3	: Propriétés des matériaux de construction.....	2
3.2	Durabilité des matériaux de construction	3
3.3	Propriétés thermiques.....	3
3.4	Propriétés acoustiques	3
3.5	Propriétés hygrothermiques	3
3.6	Propriétés esthétiques.....	3
3.7	Les propriétés physiques	3
•	La masse volumique apparente	3
•	La masse volumique absolue	4
•	Porosité et compacité	6
•	La compacité	6
•	L'humidité :.....	6
•	Capacité d'absorption d'eau massique « Ab »	6
3.8.	Les propriétés chimiques.....	7
3.9.	Les propriétés mécaniques	7
2:	Introduction aux granulés.....	10
2.2	: Classification des granulats.....	10
2.2.2	: Classification en fonction de l'origine des granulats.....	10
B)	Granulats artificiels :	12
2.3.	Classification des granulats selon leurs grosseurs :	12
2.4)	Désignation des granulats (Texture et forme des granulats):.....	13
Granulat	d/D.....	13
2.5.	Les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats.....	14
A)-	Mesure de la propreté des graviers (l'essai d'équivalent de sable).....	14
Exemple :	15
B)-	Analyse granulométrique d'un granulat :.....	15
Illustration :	18
%Tamisât	= 100% - %Refus	19
•	Coefficients de Hazen (d'uniformité) et courbure	19

• Module de finesse	19
• Correction du module de finesse du sable.....	20
Module de finesse :	22
- La forme des granulats influence sur :	22
- L'état de surface des grains influence sur :	22
2.5.2. Caractéristiques mécaniques des granulatsA)- L'essai-Deval	23
b)- L'essai micro-Deval	24
c)- L'essai Los Angeles.....	24
Normalisation des granulats.....	25
1. Norme NF p 18-545	26
• Granulats pour bétons hydrauliques.....	26
1. Caractéristiques applicables aux gravillons	26
2. Caractéristiques applicables aux sables et graves	26
3. Caractéristiques applicables aux sables, graves et gravillons	26
• Granulats pour chaussées en béton de ciment	27
1. Caractéristiques applicables aux gravillons	27
2. Caractéristiques applicables aux sables et graves	27
3. Caractéristiques applicables aux sables, aux graves et aux gravillons.....	27
• Granulats pour bétons légers.....	28
2. Norme NF en 12620.....	28
• Essai pour déterminer les propriétés générales des granulats	29
• Essai pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats	30
• Essai pour déterminer les propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats.....	30
• Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats.....	30
3.1. Introduction aux Liants	33
3.2. Classification des Liants	33
3.3 Les Liants Aériens	34
3.3.1 Chaux Aérienne.....	34
3.3.1.1 Fabrication	34
b) Concassage, criblage et calibrage	35
c) Cuisson ou calcination	35
d) Extinction.....	37
3.3.1.2. Propriétés principales.....	38
b) Propriétés chimiques :.....	38
Formules chimiques :	38
3.3.1.3. Applications :	39
a) Applications industrielles et autres de la chaux :	39
b) Applications dans le bâtiment :	39
3.4. Les Liants Hydrauliques	40
3.4.1 Les Ciments Portland	40
3.4.1.2 Principe de fabrication du ciment Portland :	40
3.4.2. Propriétés du ciment.....	44
- Finesse de mouture (Surface spécifique) :	44

- La prise :	45
- Durcissement :	46
- Retrait :	46
- Expansion (gonflement) :	47
3.4.2.2 Propriétés mécaniques	47
3.4.2.3 Classification des ciments	48
3.4.2.4 Spécifications physiques et mécaniques	49
3.4.3 Principe de dénomination normalisée	50
3.4.3.1 Nomenclature des ciments	51
Avec:	51
CEM II /A - LL 32,5 R CE CP2 NF	52
• Travaux de maçonnerie (mortiers de joints, enduits) :	52
• Béton armé (ossatures, ouvrages d'art) :	52
• Travaux de fondation ou en souterrain, en milieu agressif :	53
• Ouvrages massifs (barrages) :	53
3.6 Ajouts cimentaires	53
3.6.1 Avantages des ajouts cimentaires	53
Avantages fonctionnels	53
Avantages économiques	54
Avantages écologiques	54
3.6.2 Classification des ajouts cimentaires	54
1. Additions de type I	54
2. Additions de type II	54
Formules chimiques principales :	57
Propriétés :	57
Applications :	57
5. Constituants Principaux et Additions	57
5.1 Constituants Principaux	57
5.2 Additions	57
1. Additions minérales :	58
2. Additions chimiques :	58
3. Additions organiques :	58
6. Synthèse et Conclusion	58
7. Bibliographie	58
2. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). "Concrete: Microstructure, Properties, and Materials." McGraw-Hill Education.	58
Les liants	59
8. Annexes	59
Type de Liant Caractéristiques Principales Applications	59
Hydrauliques	59
Annexe 2 : Schémas de Réactions Chimiques	59
4.1 Introduction :	60
4.3 Les différents types de mortiers	62
4.3.1 Mortiers fabriqués sur chantier :	62
4.3.2 Mortiers industriels :	62

4.4. Les applications des mortiers	63
4.4.2. Les chapes :	63
4.4.3. Les enduits :	64
4.4.4. Les scellements et les calages :	64
4.5 Caractéristiques principales :	65
4.5.1 Ouvrabilité :	66
Exemple :	66
D'après le tableau 4.1 : pour un étalement de 50% on a une ouvrabilité ferme.	66
4.5.3 Résistances mécaniques :	67
4.5.3.1. Mesure de la résistance à la traction par flexion :	68
4.5.3.2. Mesure de la résistance à la compression :	69
Exemple :	69
4.5.4 Retraits et gonflements :	70
Remarques importantes à prendre en compte :	70

1 : Historique des matériaux de construction

1.1. Introduction à l'historique des matériaux de construction

1.2. Définition :

L'historique des matériaux de construction fait référence à l'étude de l'évolution des matériaux utilisés dans la construction au fil du temps, depuis les premières civilisations jusqu'à nos jours.

1.2 Les matériaux de construction dans l'Antiquité

Définition :

L'utilisation des matériaux tels que la pierre, l'argile et le bois dans les civilisations antiques, telles que les Égyptiens, les Grecs et les Romains, pour la construction de structures durables et fonctionnelles.

1.3 Évolution des matériaux de construction au Moyen Âge

Définition : Les avancées dans les techniques de construction et l'utilisation de nouveaux matériaux tels que les briques, les mortiers et les charpentes en bois pendant la période du Moyen Âge, marquée par le développement de l'architecture gothique et l'utilisation de voûtes en pierre.

1.4 Les matériaux de construction à l'époque moderne

Définition : L'introduction de nouveaux matériaux de construction tels que l'acier, le béton armé et les matériaux composites, qui ont révolutionné l'industrie de la construction, permettant la réalisation de structures plus hautes, plus résistantes et plus durables.

1.5 Avancées récentes dans les matériaux de construction

Définition : Les développements les plus récents dans les matériaux de construction, tels que les matériaux à faible empreinte carbone, les matériaux intelligents et les matériaux bio-sourcés, qui visent à améliorer la durabilité, l'efficacité énergétique et les performances des structures.

2 : Classification des matériaux de construction

2.1 Importance de la classification des matériaux de construction

La classification des matériaux de construction est un processus essentiel pour regrouper les matériaux en fonction de leurs caractéristiques, de leurs propriétés et de leurs utilisations, ce qui facilite la sélection appropriée des matériaux pour chaque application spécifique.

2.2 Classification basée sur la nature des matériaux

La classification des matériaux de construction en fonction de leur composition chimique et de leur origine, en distinguant :

a) **Matériaux minéraux** : comprennent des matériaux tels que le béton, la pierre, l'argile, le sable, etc.

b) **Matériaux métalliques** : comprennent des matériaux tels que l'acier, l'aluminium, le cuivre, etc.

c) **Matériaux organiques** : comprennent des matériaux tels que le bois, les polymères, le caoutchouc, etc.

2.3 Classification basée sur les propriétés des matériaux

Cette classification regroupe les matériaux de construction en fonction de leurs caractéristiques physiques, mécaniques, thermiques, acoustiques, etc.

Exemples :

a) **Matériaux résistants** : comprennent des matériaux tels que le béton armé, l'acier, la maçonnerie renforcée, etc., qui ont une résistance mécanique élevée.

b) **Matériaux isolants** : comprennent des matériaux tels que la laine de verre, le polystyrène expansé, la mousse isolante, etc., qui ont de bonnes propriétés d'isolation thermique ou acoustique.

c) **Matériaux réfractaires** : comprennent des matériaux tels que la brique réfractaire, les matériaux à base de céramique, etc., qui peuvent résister à des températures élevées.

d) **Matériaux hygroscopiques** : comprennent des matériaux tels que le plâtre, certains types de béton, etc., qui ont la capacité d'absorber et de libérer l'humidité de l'environnement.

e) **Matériaux transparents** : comprennent des matériaux tels que le verre, le polycarbonate, etc., qui permettent le passage de la lumière.

1. Classification basée sur l'utilisation des matériaux :

- Définition : Cette classification regroupe les matériaux de construction en fonction de leur utilisation spécifique dans différents types de structures et applications.
- Exemples : a) Matériaux de structure : comprennent des matériaux tels que le béton, l'acier, le bois, etc., utilisés pour la construction de fondations, de poutres, de colonnes, etc. b) Matériaux de revêtement : comprennent des matériaux tels que les carreaux de céramique, les panneaux de bois, les plaques de plâtre, etc., utilisés pour le revêtement de murs, de sols ou de plafonds. c) Matériaux d'isolation : comprennent des matériaux tels que la laine de verre, la mousse de polyuréthane, etc., utilisés pour l'isolation thermique et acoustique des bâtiments. d) Matériaux de finition : comprennent des matériaux tels que la peinture, le plâtre, les enduits décoratifs, etc., utilisés pour améliorer l'aspect esthétique des surfaces.

Ces classifications sont essentielles pour la sélection appropriée des matériaux de construction en fonction de leurs caractéristiques et de leurs utilisations spécifiques dans les projets de génie civil.

3 : Propriétés des matériaux de construction

3.1 Résistance mécanique

La capacité d'un matériau à résister aux contraintes et aux forces appliquées sans subir de déformations excessives ou de rupture, mesurée par des propriétés telles que la résistance à la compression, la résistance à la traction, la résistance à la flexion et la résistance au cisaillement.

3.2 Durabilité des matériaux de construction

La capacité d'un matériau à maintenir ses performances et son intégrité structurelle dans des conditions environnementales spécifiques sur une période prolongée, en résistant aux agents chimiques, à la corrosion et aux intempéries.

3.3 Propriétés thermiques

Les caractéristiques d'un matériau en relation avec sa conductivité thermique, sa capacité thermique et sa dilatation thermique, qui déterminent sa réponse aux variations de température et son comportement thermique.

3.4 Propriétés acoustiques

Les caractéristiques d'un matériau liées à sa capacité à atténuer ou à transmettre les ondes sonores, mesurées par des propriétés telles que l'isolation acoustique et l'absorption acoustique.

3.5 Propriétés hygrothermiques

Les caractéristiques d'un matériau en relation avec sa perméabilité à la vapeur d'eau, son absorption d'eau et son équilibre hygroscopique, qui déterminent son comportement face à l'humidité et aux variations hygrométriques.

3.6 Propriétés esthétiques

Les caractéristiques d'un matériau en termes de couleur, de texture et de finition de surface, qui influencent son apparence visuelle et sa capacité à s'intégrer dans le contexte architectural.

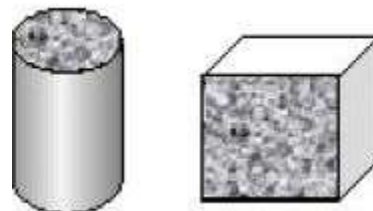
3.7 Les propriétés physiques

• La densité

La densité d'un corps est définie comme le degré de remplissage de sa masse par la matière solide. Elle se calcule en comparant la masse volumique du matériau avec celle de l'eau à une température de 20°C. Cette grandeur est exprimée sans unité spécifique.

• La masse volumique apparente

Il s'agit de la masse d'un corps par unité de volume apparent dans son état naturel, incluant les vides et les capillaires, après un traitement dans une étuve à une température de 105 ± 5 °C. Cette grandeur est exprimée en grammes par centimètre cube (gr/cm³), en kilogrammes par mètre cube (kg/m³) ou en tonnes par mètre cube (T/m³). La masse volumique d'un matériau est déterminée en utilisant la formule suivante :



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

Ou, y_{ap} : Masse volumique apparente (Kg/m^3)

M_s : masse d'un corps sèche.

V_{ap} : volume apparent.

Détermination:

Il existe plusieurs approches pour déterminer la masse volumique apparente des matériaux de construction, qui varient en fonction de leurs dimensions et de leur dispersion :

a) Pour les matériaux solides tels que les roches naturelles, le béton, le bois, etc., on peut fabriquer des échantillons de formes géométriques telles que cubiques ou cylindriques. Dans le cas de l'agrégat de grains, la masse volumique apparente peut être déterminée en utilisant un récipient de volume connu.

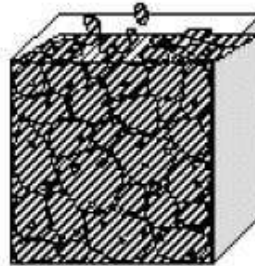
b) Pour les matériaux non cohérents, tels que les ensembles de grains comme le sable ou le gravier, la détermination de la masse volumique apparente peut être réalisée en utilisant un récipient standard de volume connu.

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

Ou, y_{ap} : Masse volumique apparente (Kg/m^3)

M_s : masse d'un corps sèche.

V_{ap} : volume apparent.



La composition granulométrique, la forme des grains, le degré de tassement et la teneur en eau des petits grains ont un impact significatif sur la masse volumique d'un ensemble de grains. La masse volumique apparente du sable ou du gravier varie de 1400 à 1650 kilogrammes par mètre cube (Kg/m^3).

• La masse volumique absolue

Est la masse d'un corps par unité de volume de matière pleine, excluant les vides et les pores, après exposition à une température de $105\text{ }^\circ\text{C}$. Elle est généralement exprimée en g/cm^3 , kg/m^3 ou T/m^3 . La méthode de détermination de la masse volumique absolue d'un matériau est illustrée dans la figure 1.1. Pour les matériaux poreux, il est nécessaire de les concasser et de les broyer jusqu'à ce que la taille des grains devienne inférieure à 0,2 mm. Cela permet d'éliminer les pores et les vides présents dans les matériaux. Ensuite, l'échantillon est placé dans un récipient contenant de l'eau pour mesurer sa masse volumique absolue.

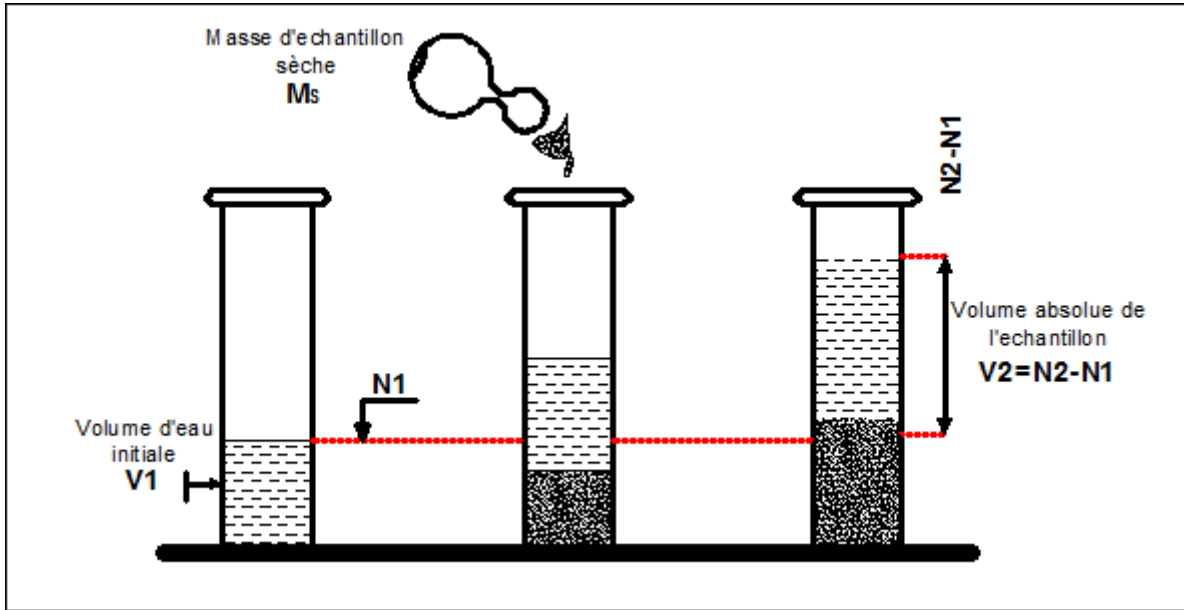


Figure 1.1 : Détermination de la masse volumique absolue d'un matériaux.

D'abord on remplit le tube gradué d'eau (N1), ensuite on verse l'échantillon sec dans le tube, le niveau d'eau va augmenter (N2). La différence entre le niveau N1 et N2 (N2 - N1) est le volume absolu de l'échantillon. La masse volumique absolue peut se calculer :

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

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

• **Porosité et compacité**

• **La porosité**

La porosité dans le domaine des matériaux de construction est définie comme la mesure des vides dans un matériau, exprimée en pourcentage du volume total, et elle caractérise la présence de pores ou cavités de petite taille pouvant contenir des fluides tels que liquides ou gaz. Cette propriété influence la capacité d'absorption d'eau, la progression de la vapeur d'eau, et le passage de l'air à travers le matériau.

$$P = \frac{V_{vide}}{V_{tota}} \times 100(\%)$$

• **La compacité**

La compacité est le rapport de la masse volumique absolue (volume des solides) d'un matériau par son volume total apparent ou en vrac. Elle est le complément de la porosité, qui est la mesure de la présence de vides dans un matériau. La compacité est une caractéristique importante des matériaux de construction, car elle

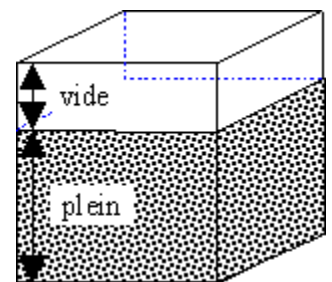


Figure 1.2 : Volume unitaire

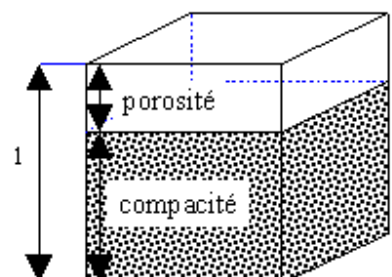


Figure 1.3 : Volume unitaire

affecte leur résistance, leur durabilité et leur performance thermique. Par exemple, un matériau plus compact aura une densité plus élevée et une meilleure résistance à la compression et à l'usure.

La compacité est exprimé comme suit :

$$c = \frac{V_{\text{solide}}}{V_{\text{totale}}} \times 100(\%)$$

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%.

• L'humidité :

L'humidité est une des propriétés importante des matériaux de construction. Elle est un indice pour déterminer la teneur en eau réelle d'un matériau. En général l'humidité est notée ω et s'exprimée en pourcentage (%). On peut déterminer l'humidité de matériaux quelconques en utilisant la formule suivante :

$$\omega = \frac{M_h}{M_h - M_s} \times 100(\%)$$

Où

M_s : la masse sèche d'échantillon (après passage à l'étuve)

M_h : la masse humide d'échantillon.

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

t d'échantillon notée H_v (%).

• Capacité d'absorption d'eau massique « Ab »

L'absorption d'eau par immersion est la différence entre la masse d'un échantillon saturé dans l'eau et sa masse à l'état sec. L'absorption d'eau se calcul comme suit :

$$Ab = \frac{M_{\text{sat}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{sec}}} \times 100$$

M_{sec} : masse sèche de l'échantillon après passage à l'étuve sous une température de 105°C.

M_{sat} : masse de l'échantillon saturé dans l'eau (Après 24 heures).

On peut déterminer le degré d'absorption par la formule suivante:

$$H_p = \frac{M_{\text{abs}} - M_s}{M_s} (\%)$$

Avec :

M_{abs} : la masse absorbante.

M_s : la masse sèche d'échantillon.

V_0 : le volume apparent du matériau.

3.8. Les propriétés chimiques

Les propriétés chimiques déterminent la stabilité chimique d'un matériau qui est un pouvoir de ce matériau en service de résister à l'action chimique des acides ou à l'action des facteurs atmosphériques comme l'humidité, température,...etc.

Les propriétés chimiques des matériaux de construction se réfèrent aux caractéristiques chimiques des matériaux qui peuvent affecter leur composition, leur réactivité et leur comportement dans différentes conditions environnementales. Ces propriétés jouent un rôle crucial dans la conception, la fabrication et la durabilité des structures et des matériaux de construction. Parmi les propriétés chimiques des matériaux de construction:

- **Réactivité chimique** : Certains matériaux de construction peuvent réagir avec des substances chimiques dans leur environnement, ce qui peut entraîner des changements de composition et de structure. Par exemple, la réaction des matériaux cimentaires avec l'eau pour former des hydrates est essentielle dans la prise et le durcissement du béton.

- **Réactivité avec l'eau et l'humidité** : Certains matériaux de construction peuvent réagir avec l'eau et l'humidité pour former des composés chimiques qui peuvent affecter leur résistance et leur durabilité. Par exemple, la réaction de l'aluminium avec l'eau peut produire de l'hydrogène gazeux, ce qui peut entraîner des problèmes de gonflement et de corrosion dans les matériaux contenant de l'aluminium.

3.9. Les propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des matériaux de construction se réfèrent à leur comportement sous l'effet de charges externes, telles que la résistance à la compression, la résistance à la traction, la résistance à la flexion, la ductilité, l'élasticité, etc. Voici quelques-unes des propriétés mécaniques importantes des matériaux de construction :

1. **Résistance à la compression** : La résistance à la compression est la capacité d'un matériau à résister à une force appliquée dans une direction axiale, compressant le matériau. Cette propriété est essentielle dans les matériaux de construction tels que le béton, la pierre et la brique.
2. **Résistance à la traction** : La résistance à la traction est la capacité d'un matériau à résister à une force appliquée dans une direction tendant à étirer le matériau. Elle est importante dans les matériaux soumis à des charges de traction, comme l'acier dans les structures en acier.
3. **Résistance à la flexion** : La résistance à la flexion est la capacité d'un matériau à résister à une charge appliquée perpendiculairement à son axe longitudinal, produisant une courbure ou une flexion. Cette propriété est cruciale dans les matériaux de construction tels que le bois, les poutres en béton armé, etc.
4. **Ductilité** : La ductilité est la capacité d'un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre lorsqu'il est soumis à des contraintes de traction. C'est une propriété importante dans

les matériaux soumis à des charges cycliques ou à des charges de choc, comme l'acier dans les structures sismiques.

5. **Module d'élasticité** : Le module d'élasticité, également connu sous le nom de module de Young, est une mesure de la rigidité d'un matériau. Il quantifie la capacité d'un matériau à se déformer élastiquement en réponse à une contrainte appliquée.

2: Introduction aux granulés

2.1 : Granularité

2.1.1 Définition : La granularité fait référence à la répartition des tailles de particules dans un matériau granulaire. Elle est essentielle car elle influence sur les propriétés mécaniques et physiques des granulats et de leurs mélanges.

Les granulats sont des matériaux pierreux de petites dimensions, issus de l'érosion naturelle ou du broyage mécanique (concassage) des roches. Ils sont supposés comme inertes et font partie complétant des mélanges de béton et de mortier. De plus, ils sont utilisés en association avec d'autres liants tels que le bitume pour la construction des couches de roulement des chaussées.

En somme, les granulats englobent tous les grains dont les tailles se présentent entre **0 et 125 mm**, pouvant être d'origine naturelle, artificielle ou provenir de matériaux recyclés.

2.2 : Classification des granulats

2.2.1 : Classification en fonction de la taille des granulats

2.2.1.1 Définition : Les granulats peuvent être classés en différentes catégories en fonction de leur taille.

2.2.1.2 Granulats fins : Ils sont composés de particules de taille inférieure à 4,75 mm. Ils contiennent le sable fin, la poussière de concassage, etc.

2.2.1.3 Granulats grossiers : Ils sont composés de particules dont la taille varie de 4,75 mm à 20 mm. Les graviers sont un exemple courant de granulats grossiers.

2.2.1.4 Granulats mixtes : Ils sont composés d'un mélange de granulats fins et grossiers, avec des tailles allant de 4,75 mm à 20 mm.

2.2.2 : Classification en fonction de l'origine des granulats

A) Granulats naturels : issus de roches meubles ou massives extraites in situ et ne subissant aucun traitement autre que mécanique.

On distingue :

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

Trois catégories de granulats roulés existent dans la nature :

- Les granulats de rivière (d'oued).
- Les granulats de mer.
- Les granulats de dunes.



Figure 2.1 : Différents type de granulats.

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

2) Granulats concassés (de carrières) : ils proviennent du concassage de roches dures (granits, porphyres, basaltes, calcaires durs...etc.). Ils sont caractérisés par un aspect anguleux à arrêtes vives.





Figure 2.2 : Granulats concassés (de carrières).

3) Les granulats recyclés: ce sont les matériaux proviennent de la démolition des ouvrages existants en béton.

B) Granulats artificiels :

Ils proviennent de la transformation thermique des roches, exemple :

- Sous-produits industriels (laitier cristallisé, de haut fourneau...);
- Granulats à haute dureté (ferreux, carborundum, réfractaires...);
- Granulats légers (l'argile/schiste/ laitier expansé ...);
- Granulats très légers (l'argile ou le schiste expansé, polymère...).

2.3. Classification des granulats selon leurs grosseurs :

Selon leurs dimensions on distingue : les sables, les graviers, les cailloux, les galets et les moellons. La classification la plus courante est donnés ci-dessous.

Tableau 2.1: Classification des granulats.

Sables	0,08 mm à 3 mm
Graviers	3 mm à 25 mm
Cailloux	25 mm à 80 mm
Galets et moellons	>80 mm

Galets : pierres roulées. Moellons : pierres concassées.

2.4) Désignation des granulats (Texture et forme des granulats):

La forme des granulats a une incidence sur la maniabilité des bétons, la forme la plus souhaitable se rapprochant de la sphère; une mauvaise forme (aiguilles, plats) nécessite une quantité d'eau plus élevée et peut provoquer les défauts d'aspect. (Voir la figure 2.3)



Figure 2.3 : La forme des granulats.

La forme d'un granulat est définie par:

- Sa longueur **L**,
- Son épaisseur **E**.
- Sa grosseur **G**.

Il est à noter que la **forme des granulats** influent sur la facilité de mise en œuvre et le compactage du matériau.

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

Granulat d/D

Granulat : sable ou gravier

d : dimension minimale des grains

D : dimension maximale des grains

Avec une tolérance de 15% d'élément $< \mathbf{d}$ et 15% d'élément $> \mathbf{D}$ si

$\mathbf{D} > 1.58 \mathbf{d}$ et une tolérance de 20% si $\mathbf{D} < 1.58 \mathbf{d}$

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

2.5. Les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats

2.5.1. Les caractéristiques physiques

A)- Mesure de la propreté des graviers (l'essai d'équivalent de sable)

Pour les sables, la propreté est contrôlée par l'essai dit “**Equivalent de sable**” (E.S.) (NF P 18-598). On ajoute 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 sur la figure 2.4.

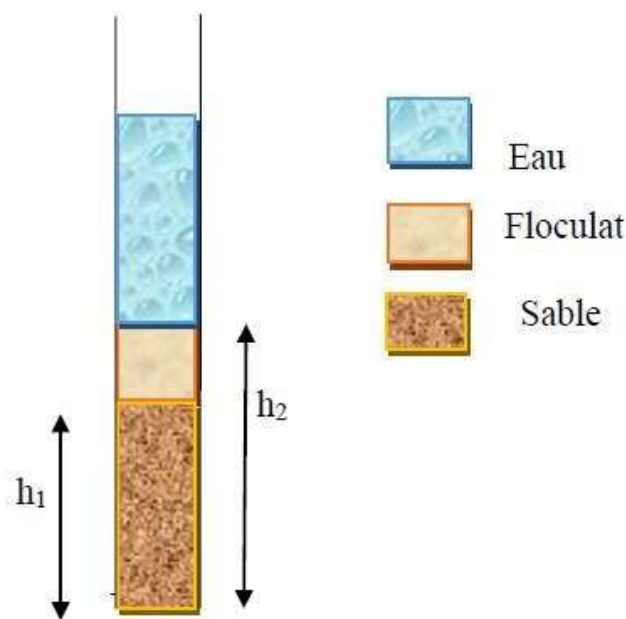


Figure 2.4 : Méthode de mesure de la propreté du sable.

$$ES = 100 \times \frac{h_1}{h_2}$$

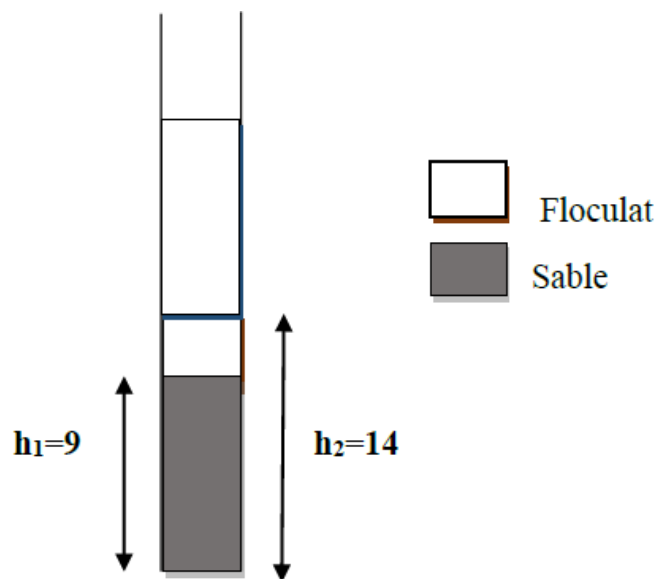
Les Valeurs préconisées par la norme (NF P 18-598) pour déterminer la nature et la qualité du sable sont illustrées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1: Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable.

Equivalent du sable (ES)	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

Exemple :



$$ES = 100 \times \frac{9}{14} = 64.28$$

Interprétation des résultats : Sable légèrement argileux; admissible pour les bétons de qualité courante.

B)- Analyse granulométrique d'un granulat :

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre 0,063 et 125mm. On appelle:

REFUS sur un tamis : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.

TAMISAT (ou passant) : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

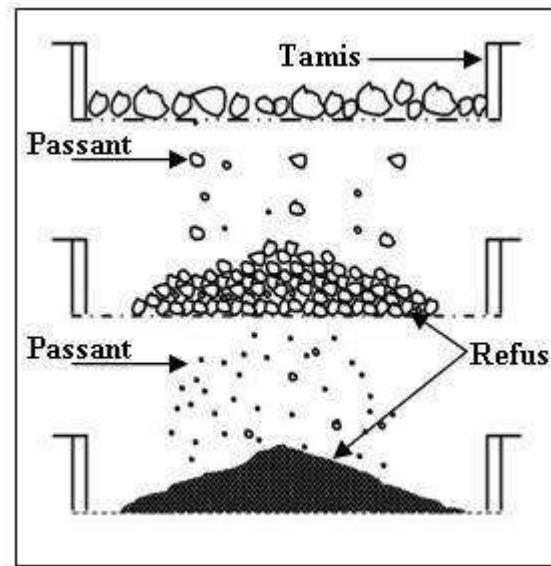


Figure 2.5 : Représentation du Refus et du Tamisât.

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

Donc on peut conclure que l'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

L'essai de l'analyse granulométrique consiste à fractionner le matériau en plusieurs classes granulaires au moyen d'une série de tamis. Les tamis ayant des mailles carrées dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres s'étalant entre 0.063 mm et 125mm suivant une progression géométrique de raison $^{10}\sqrt{10} \approx 1.259$ qui sont les suivants :

0.063 – 0.08 – 0.10 – 0.125 – 0.16 – 0.2 – 0.25 – 0.315 – 0.4 – 0.5 – 0.63 – 0.8 – 1 – 1.25 – 1.6 – 2 – 2.5 – 3.15 – 4 – 5 – 6.3 – 8 – 10 – 12.5 – 14 – 16 – 20 – 25 – 31.5 – 40 – 50 – 63 – 80 – 100 – 125.

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

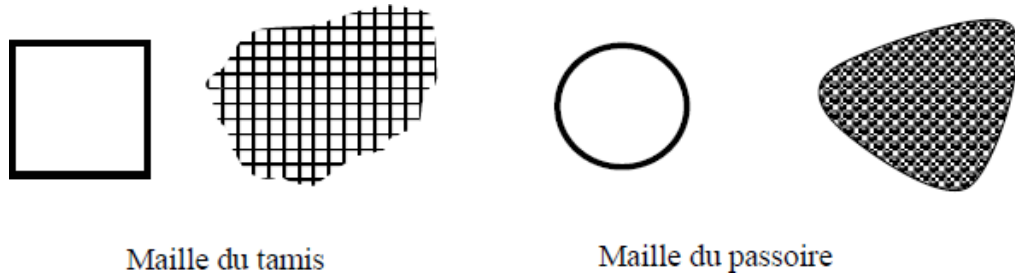


Figure 2.6 : Maille du tamis et du passoire.

Les masses des différents refus ou celles des différents tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus seront exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe d'analyse granulométrique).

En déduit ensuite les refus et les tamisât cumulés en poids (gramme) et en pourcentage comme le montre le tableau (Tableau 2.2).

NB: pour que l'essai soit valide, la somme de refus cumulé et le tamisât au dernier tamis ne doit pas différer de plus de 2 % de la masse initiale soumise à l'essai.

Tableau 2.2 : Résultats de l'analyse granulométrique

Maille des Tamis (mm) (en ordre décroissant)	Masse du refus partiel (g)	Masse du refus cumulé (g)	Refus cumulé en Pourcentage (%)	Tamisât cumulé en Pourcentage (%)

- Masse du refus cumulé (g) : R_i

- Refus cumulé en Pourcentage (%) : $\frac{R_i}{M_s} \times 100$

- Tamisât en Pourcentage (%) : $100 - \left(\frac{R_i}{M_s} \times 100\right)$

Les courbes granulométriques des différents types des granulats sont représentées sur la figure 2.7 (en abscisse les dimensions des mailles sur une échelle logarithmique, et en ordonnée les pourcentages des refus ou des tamisât cumulés sur une échelle arithmétique).

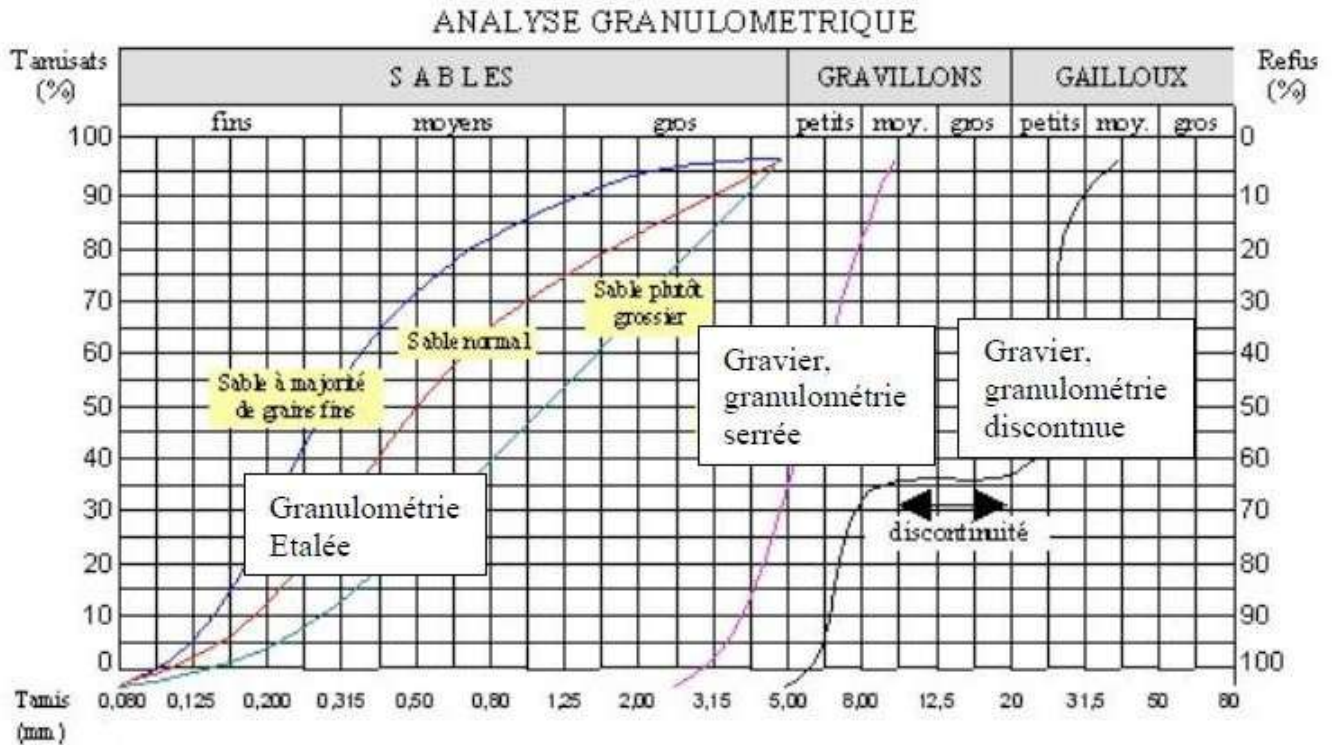


Figure 2.7 : Courbe granulométrique des différents granulats

La forme des courbes granulométriques apporte les renseignements suivants:

La plus ou moins grande proportion d'éléments fins, par exemple la courbe située au-dessus de celle du sable normal correspond à un sable à majorité de grains fins et c'est l'inverse pour celle située en dessous. En effet, ces trois sables sont des sables 0/5 mm mais les proportions de grains fins (<0,5 mm par exemple) sont pour chacun d'eux: 25%, 45% et 60%.

- La continuité ou la discontinuité de la granularité; par exemple, les courbes de sables sont continues mais la courbe du gravier 5/31,5 présente une discontinuité; en effet le palier s'étendant de 10 à 20 mm signifie que le granulat en question ne contient pas de grains compris entre 10 et 20 mm.

Illustration :

On considère un échantillon de poids P d'un granulat.

L'échantillon est mis dans le tamis supérieur d'une série de tamis classés par ordre décroissant selon la dimension des mailles (du plus grand en haut au plus petit en bas).

Après vibration de la série de tamis, les grains de l'échantillon se trouvent séparés selon leurs dimensions et chaque tamis retient une partie dite **Refus partiel du tamis**. Le **refus cumulé** (total) d'un tamis est la somme de tous les refus partiels des tamis qui se trouve au dessus.

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

$$\% \text{Refus} = \frac{\text{Poids de refus cumulé}}{\text{Poids de l'échantillon}} \times 100$$

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

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

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

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

- **Coefficients de Hazen (d'uniformité) et courbure**

- Coefficient d'uniformité ou de Hazen : $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

- Coefficient de Courbure : $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$

D10, D30, D60 représentent respectivement les diamètres des éléments correspondant à 10%, 30%, 60% de tamisât cumulé. D'après Caquot et Kérisel :

- Pour $C_u < 2$ la granulométrie est dite uniforme ou serrée.
- Pour $C_u > 2$ la granulométrie est dite étalée.
- Pour $1 < C_c < 3$ la granulométrie est dite bien graduée (continuité bien répartie).
- Pour $C_c > 3$ la granulométrie est dite mal graduée (continuité mal répartie).

- **Module de finesse**

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat. Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins.

Le module de finesse d'un sable est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés, exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 et 5 mm.

$$MF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.50 - 5\}$$

Sable un peu trop fin : MF varie de **1.80** à **2.20** (recherche de facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance),

Sable préférentiel : MF varie de **2.20** à **2.80** (ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités),

Sable un peu trop grossier : MF varie de **2.80** à **3.20** (recherche de résistance élevée mais on aura, en général, une faible ouvrabilité et des risques de ségrégation).

•Correction du module de finesse du sable

La reconstitution (correction) des sables peut se faire expérimentalement en mélangeant au sable principal le sable d'ajout en proportion croissante jusqu'à obtenir un mélange constituant un sable donnant au béton les qualités recherchées. Mais la connaissance des **MF** des **sables composants** et celui que l'on **désire obtenir** permet de résoudre le problème directement par la règle d'*Abrams*.

On pourra utiliser la règle d'Abrams :

- Un sable grossier S_1 de module de finesse MF_1
- Un sable fin S_2 de module de finesse MF_2
- Le sable de mélange S de module de finesse souhaité MF

D'où les proportions en sable S_1 et en sable S_2 seront comme suit :

$$\text{- Proportion du sable } S_1 = \frac{MF - MF_2}{MF_1 - MF_2}$$

$$\text{- Proportion du sable } S_2 = \frac{MF_1 - MF}{MF_1 - MF_2}$$

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il ya trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF).

Les résultats d'une analyse granulométrique peuvent être présentés selon l'**exemple** suivant :

Tableau 2.4 : Résultats de l'analyse granulométrique

Maille des Tamis (mm) (en ordre décroissant)	Masse du refus cumulé (g)	Refus cumulé en Pourcentage (%)	Tamisât cumulé en Pourcentage (%)
5	39	1.95	98.05
2.5	215	10.75	89.25
1.25	650	32.50	67.50
0.63	1380	69	31
0.315	1800	90	10
0.160	1910	95.50	4.50
0.08	1980	99.25	0.75
Fillers	1999	100	0.00

La courbe granulométrique du sable étudié est représentée sur la figure 2.7 (en abscisse les dimensions des mailles sur une échelle logarithmique, et en ordonnée les pourcentages des refus ou des tamisât cumulés sur une échelle arithmétique).

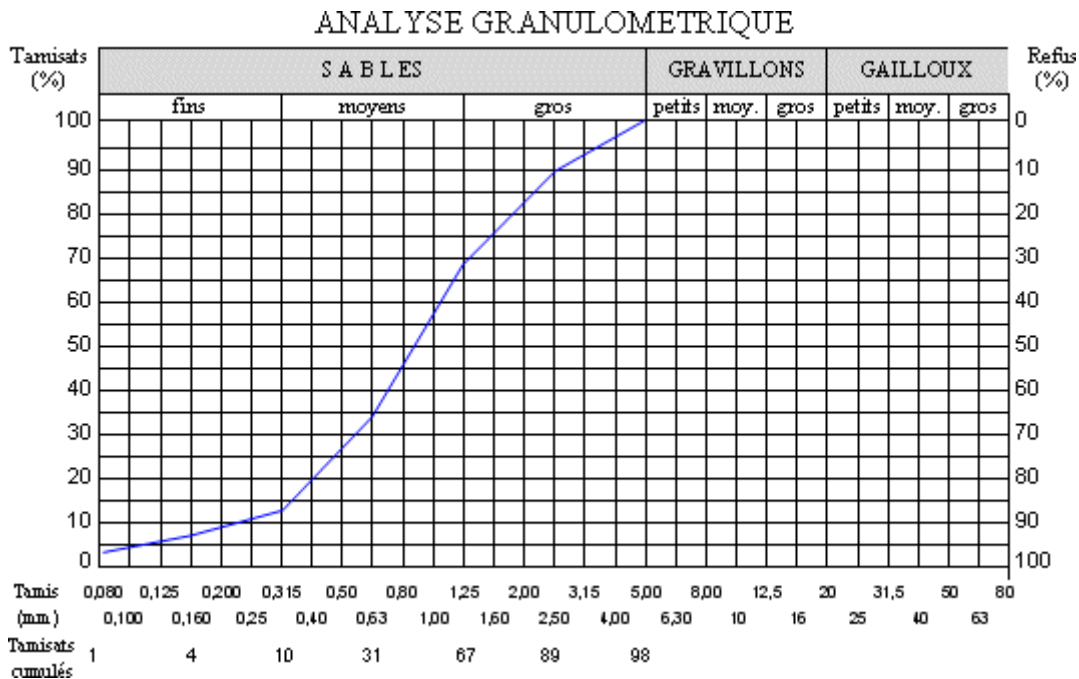


Figure 2.8 : Courbe granulométrique du sable étudié.

Module de finesse :

$$MF = \frac{1}{100} \sum (97.90 + 89.95 + 70.14 + 34.85 + 10.15 + 2.05) = 3.05$$

MF = 3.05 Donc on conclut qu'il s'agit d'un **Sable un peu trop grossier**

- **Influence du rapport G/S:** (G : % de gravillon > 5mm S: = % de sable < 5mm) Le G/S influe sur:

- **Compacité :** légèrement plus élevée pour G/S > 1.2.
- **Résistance à la compression:** meilleur pour G/S > 1.2.
- **Ouvrabilité:** un peu moins bonne pour G/S > 1.2.

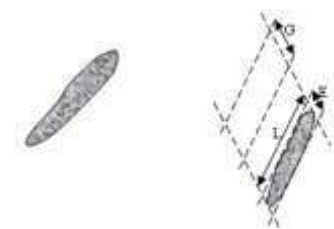
Pour les bétons courants il convient de ne pas dépasser un G/S supérieur à 1.2.

La condition essentielle pour obtenir le moins de vides possibles (meilleure compacité) dans un mélange de sable et gravillon est de: 35% de sable de 0/5 et 65% de gravillons 5/20.

- **Forme des granulats:** La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques:

- La longueur L, distance maximale de deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulat.
- L'épaisseur E, distance minimale de deux plans parallèles tangents au granulat,
- La grosseur G, dimension de la maille carrée minimale du tamis qui laisse passer le granulat.

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



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

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

Figure 2.9 : Forme d'un granulat

- **La forme des granulats influence sur :**

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

- **L'état de surface des grains influence sur :**

- La compacité du mélange.
- L'adhérence du granulat à la pâte de ciment.

La forme est d'autant meilleure qu'elle est proche d'une sphère ou d'un cube:

Cube, sphères	Trois dimensions à peu près égales (bonne compacité)
Plaquettes	Une dimension beaucoup plus petite que les deux autres (mauvaise compacité)
Aiguilles	Une dimension beaucoup plus grande que les deux autres (compacité très mauvaise)

2.5.2. Caractéristiques mécaniques des granulats

A)- L'essai-Deval

L'essai Deval a pour but de mesurer la résistance à l'attrition d'un matériau. L'attrition est reproduite dans l'essai par une combinaison de frottements réciproques et de chocs modérés. L'essai s'effectue sur tous les granulats de classe granulaire 25-50 mm, d'origine naturelle ou artificielle utilisés pour le ballast des voies ferrées. Il existe deux types d'essai : à sec ou humide. L'essai s'applique à tous les matériaux, quelle que soit la nature minéralogique, et fournit une évaluation à l'aptitude du matériau à se transformer dans la chaussée sous l'action mécanique des véhicules.

La résistance à l'attrition (écrasement) par frottements réciproques et chocs modérés du matériau s'exprime par un coefficient dit « coefficient Deval ». Ce coefficient est égal par définition, à :

$$CD = \frac{6800}{P}$$

Où

P : poids en grammes des éléments inférieurs à 1,6 mm créés dans la machine Deval.

- Si l'essai est effectué à sec, le coefficient obtenu sera appelé « coefficient Deval sec ».
- Si l'essai est effectué en présence d'eau, il sera appelé « coefficient Deval humide ». L'essai donne également des indications sur la fragilité du matériau.

b)- L'essai micro-Deval

L'essai micro- Deval permet de déterminer la résistance à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Le matériau évolue pendant l'essai par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine en rotation et sur les boulets (charge abrasive) à sec ou en présence d'eau. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les classes granulaires : 4-6.3mm; 6.3-10 mm; 10-14 mm; 25-50 mm. Pour les essais effectués sur les gravillons entre 4 et 14 mm, une charge abrasive est utilisée.

La résistance à l'usure s'exprime par le coefficient Micro-Deval qui s'écrit :

$$CMD = \frac{m}{M} \times 100(\%)$$

Ou

M : la masse du matériau soumis à l'essai.

m : la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai.



Figure 2.10 : Machine de Micro Deval.

c)- L'essai Los Angeles

L'essai (N.F. P18.573) permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Il s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des assises de chaussée, y compris les couches de roulement. Le matériau évolue pendant l'essai, d'une part par suite du choc des boulets sur le granulat (rupture fragile des éléments), d'autre part par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine et sur les boulets.

$$LA = \frac{m}{5000} \times 100(\%)$$

m : la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai.

NB : Pour un bon béton une valeur max de LA = 30 est demandée.



Figure 2.11 : Machine de Los Angeles.

<i>Coefficient LA</i>	<i>Nature de la roche</i>
<i>< 20</i>	<i>Très dure</i>
<i>20 à 25</i>	<i>Dure</i>
<i>25 à 30</i>	<i>Assez dure</i>
<i>30 à 40</i>	<i>Mis dure</i>
<i>240 à 50</i>	<i>Tendre</i>
<i>> 50</i>	<i>Très tendre</i>

Normalisation des granulats

Les granulats comme la grande majorité des matériaux de construction doivent être conformes à des normes. Les caractéristiques contrôlées dans ces normes et les niveaux de valeurs à respecter sont fonction des types d'ouvrages à réaliser et des techniques de mise en oeuvre des matériaux. Les spécifications auxquelles doivent satisfaire les granulats sont précisées dans deux principales normes de référence : NF P 18-545 et NF EN 12620 .

1. Norme NF p 18-545

La norme NF P 18-545 « Granulats : Eléments de définition, conformité et codification » définit les règles générales permettant d'effectuer les contrôles des granulats. Elle précise les spécifications auxquelles doivent répondre les granulats en fonction des divers usages possibles :

- granulats pour chaussées : couches de fondation et couches de base, couches de roulement utilisant des liants hydrocarbonés ou en béton de ciment,
- granulats pour bétons hydrauliques et mortiers,
- granulats pour voies ferrées (assises, ballast).

•Granulats pour bétons hydrauliques

La norme NF P 18-545 précise dans l'article 10 : Granulats pour bétons hydrauliques et mortiers, les spécifications (valeurs limites, valeurs spécifiées et tolérances) sur les granulats destinés à constituer des bétons.

Elles concernent les caractéristiques suivantes :

1. Caractéristiques applicables aux gravillons

- o Los Angeles : LA
- o Sensibilité au gel – dégel : G
- o Granularité et teneur en fines des gravillons : Gr
- o Aplatissement : A
- o Éléments coquilliers des gravillons d'origine marine : Cq
- o Boulettes d'argiles

2. Caractéristiques applicables aux sables et graves

- o Granularité et teneur en fines : Gr
- o Module de finesse : FM
- o Propreté : P
- o Polluants organiques

3. Caractéristiques applicables aux sables, graves et gravillons

- o Absorption d'eau

- o Impureté prohibées
- o Alkali-réaction
- o Soufre total : S
- o Sulfates solubles dans l'acide : AS
- o Chlorures

•Granulats pour chaussées en béton de ciment

La norme NF P 18-545 précise dans l'article 9, les spécifications sur les granulats destinées à réaliser des bétons de chaussées.

Les spécifications concernent les caractéristiques suivantes :

1. Caractéristiques applicables aux gravillons

- o Caractéristiques intrinsèques Micro deval
- o Los Angeles : LA et Micro deval : MDE
- o Sensibilité au gel
- o Caractéristiques de fabrication
- o Boulette d'argile

2. Caractéristiques applicables aux sables et graves

- o Friabilité des sables : FS
- o Caractéristiques de fabrication
- o Polluants organiques
- o Teneur en carbonate

3. Caractéristiques applicables aux sables, aux graves et aux gravillons

- o Absorption d'eau : WA
- o Impuretés prohibées : ImP
- o Soufre total : S
- o Sulfates solubles dans l'acide : SA
- o Chlorures

•Granulats pour bétons légers

La norme NF P 18-545 donne, dans l'article 13, les spécifications sur les granulats légers pour bétons hydrauliques et mortiers. Elles sont relatives aux caractéristiques géométriques (granularité et formes) , physiques (masse volumique et absorption d'eau) , mécaniques (résistance au gel-dégel) et chimiques.

2. Norme NF en 12620

La norme NF EN 12620 : « Granulats pour béton » définit les termes relatifs aux granulats pour béton relevant du Règlement Produits de Construction (RPC). Elle spécifie les caractéristiques des granulats et des fillers utilisés dans la fabrication des bétons qui peuvent être élaborés à partir de matériaux naturels, artificiels ou recyclés. Elle concerne en particulier les bétons conformes à la norme NF EN 206/CN, les granulats entrant dans la composition des produits préfabriqués en béton et les bétons routiers.

Elle s'applique aux granulats dont la masse volumique réelle est supérieure à 2000 kg/m³.

Elle spécifie les caractéristiques (physiques et chimiques) relatives à l'évaluation de la conformité des granulats et au système de maîtrise de la production. *Ch. 02 : Les granulats*

La norme NF EN 12620 définit pour chaque caractéristique physique ou mécanique spécifiant les granulats, des catégories de valeurs maximales dont en particulier :

- Caractéristiques géométriques

- o Granularité

- Caractéristiques géométriques

- o Forme des gravillons

- Caractéristiques physiques

- o Résistance à la fragmentation

La norme distingue des catégories des valeurs maximales du coefficient Los Angeles (par exemple catégorie LA30 si le coefficient de Los Angeles est inférieur à 30) et des catégories de valeurs maximales de résistances au choc.

- Résistance à l'usure des gravillons

Elle définit des catégories de valeurs maximales de la résistance à l'usure des gravillons en fonction des valeurs de coefficient micro deval (par exemple catégorie MDE25 si le coefficient Micro Deval est inférieur à 25).

- Résistance au polissage

Les catégories de valeurs minimales de résistance au polissage sont définies en fonction des valeurs du coefficient de polissage accéléré (par exemple CPA50 si le coefficient de polissage accéléré est supérieur à 50).

- Caractéristiques chimiques teneur en chlorures composés contenant du soufre

- o sulfates solubles dans l'acide

- o soufre total

- autres constituants

- o constituants réduisant le temps de prise et la résistance du béton

- o teneur en carbonate des sables

- o réactivité aux alcalis

3. Normes d'essais pour les granulats

•Essai pour déterminer les propriétés générales des granulats

- NF EN 932-1 Partie 1 Méthodes d'échantillonnage

- NF EN 932-2 Partie 2 Méthodes de réduction d'un échantillon en laboratoire

- NF EN 932-3 Partie 3 Procédures et terminologie pour une description Pétrographique simplifiée

- NF EN 932-5 Partie 5 Équipements communs et étalonnage

- NF EN 932-6 Partie 6 Définition de la répétabilité et de la reproductibilité

- NF EN 933-1 Partie 1 Détermination de la granularité – Analyse par tamisage

- NF EN 933-2 Partie 2 Détermination de la granularité – Tamis de contrôle

- NF EN 933-3 Partie 3 Détermination de la forme des granulats – Coefficient d'aplatissement

- NF EN 933-5 Partie 5 Détermination du pourcentage de surfaces cassées dans les gravillons

- NF EN 933-6 Partie 6 Évaluation des caractéristiques de surface – Coefficient d'écoulement des granulats

- NF EN 933-7 Partie 7 Détermination de la teneur en éléments coquilliers
- NF EN 933-8 Partie 8 Évaluation des fines – Équivalent de sable.
- NF EN 933-9 Partie 9 Évaluation des fines – Essai au bleu de méthylène
- NF EN 933-10 Partie 10 Détermination des fines – Granularité des fillers (tamisage dans un jet d'air)

•Essai pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats

- NF EN 1097-1 Partie 1 Détermination de la résistance à l'usure (Micro-Deval)
- NF EN 1097-2 Partie 2 Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation
- NF EN 1097-3 Partie 3 Méthodes pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité inter-granulaire
- NF EN 1097-4 Partie 4 Détermination de la porosité du filler sec compacté
- NF EN 1097-5 Partie 5 Détermination de la teneur en eau par séchage en étuve ventilée
- NF EN 1097-6 Partie 6 Détermination de la masse volumique réelle et de l'absorption d'eau
- NF EN 1097-7 Partie 7 Détermination de la masse volumique réelle du filler – Méthode au pycnomètre
- NF EN 933-8 Partie 8 Détermination du coefficient de polissage accéléré

•Essai pour déterminer les propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats

- NF EN 1367-1 Partie 1 Détermination de la résistance au gel / dégel
- NF EN 1367-2 Partie 2 Essai au sulfate de magnésium

•Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats

- NF EN 1744-1 Partie 1 Analyse chimique
- NF EN 1744-3 Partie 3 Essai de lixiviation dans l'eau
- FD P 18-542, Granulats naturels courants pour bétons hydrauliques – Critères de qualification des granulats vis-à-vis de l'alcali réaction
- XP P 18-566, Granulats – Analyse granulométrique, aplatissement et allongement – Essai à l'aide d'un appareil d'ombroscopie
- NF P 18-576, Mesure du coefficient de friabilité des sables

- XP P 18-580, Granulats – Mesure de la résistance au polissage accéléré des Gravillons – Méthode par projection
- XP P 18-581, Granulats – Dosage rapide des sulfates solubles dans l'eau – Méthode par spectrophotométrie
- XP P 18-594, Méthodes d'essai de réactivité aux alcalins

3.1. Introduction aux Liants

Les liants sont des éléments cruciaux dans l'industrie des matériaux de construction, jouant un rôle clé en assurant l'adhésion des particules granulaires pour former des produits robustes et cohésifs tels que le béton, le mortier et le plâtre. Cette introduction donnera un aperçu des divers types de liants, de leur importance dans la construction, et de leurs différentes applications.

Les liants, en tant que matériaux essentiels, servent à unir ou à assembler d'autres matériaux. Ils sont largement utilisés dans le secteur de la construction pour créer des structures solides et durables. On peut les classer en deux grandes catégories : les liants hydrauliques et les liants aériens.

Les liants aériens, tels que le plâtre, durcissent principalement par évaporation de l'eau. Ils sont couramment utilisés dans la construction pour la réalisation de revêtements de plâtre, d'enduits et d'autres applications similaires.

Les liants hydrauliques, comme le ciment Portland, durcissent en réaction avec l'eau, formant ainsi des produits solides. Ils sont omniprésents dans la fabrication du béton, du mortier et des enduits de ciment.

Dans la construction, les liants jouent un rôle fondamental en assurant la cohésion nécessaire pour maintenir les matériaux en place et en garantissant la durabilité et la résistance des structures. Le choix du liant approprié dépend des exigences spécifiques de chaque application, en tenant compte des conditions environnementales, de la résistance requise et des propriétés mécaniques souhaitées.

Cette introduction souligne l'importance des liants dans l'industrie de la construction et met en lumière la nécessité de sélectionner le type de liant adéquat pour assurer la qualité et la longévité des structures bâties.

3.2. Classification des Liants

Les liants peuvent être classifiés selon leur nature chimique et leur mode de durcissement. Voici les principales catégories :

1. **Liants aériens** : Ces liants durcissent principalement par absorption de l'humidité atmosphérique. Exemples : chaux aérienne.

Les liants

2. **Liants hydrauliques** : Ces liants durcissent en présence d'eau et conservent leur résistance même sous l'eau. Exemples : ciments Portland.
3. **Liants organiques** : Utilisés surtout dans les applications de revêtement, tels que les bitumes et les résines.

3.3 Les Liants Aériens

Les liants aériens sont principalement composés de chaux. Ils nécessitent le dioxyde de carbone de l'air pour leur durcissement.

3.3.1 Chaux Aérienne

La chaux grasse est l'un des premiers liants utilisés depuis des millénaires, aux côtés du plâtre et du bitume. Les Chinois, les Égyptiens et les Mayas ont construit des structures durables en utilisant des mortiers à base de chaux. Au Moyen Âge, la chaux est devenue le liant le plus couramment utilisé, souvent mélangée à des tuiles ou des briques broyées, et elle a été largement employée jusqu'au milieu du 19ème siècle. La chaux est produite en chauffant des roches calcaires (CaCO_3) ou dolomitiques (contenant à la fois CaCO_3 et MgCO_3), suivie d'une extinction avec de l'eau. Elle durcit lentement en présence de l'air, d'où son nom de chaux aérienne.

La chaux aérienne est produite par calcination du calcaire (CaCO_3) pour obtenir de la chaux vive (CaO), qui est ensuite éteinte avec de l'eau pour former de la chaux hydratée (Ca(OH)_2).



Figure 3.1: Chaux aérienne.

3.3.1.1 Fabrication

a) Extraction

Les liants

Le calcaire est extrait des carrières. Traditionnellement, cette extraction se faisait à la main, avec des outils tels que des pics et des pioches, comme illustré à la figure 3.2. De nos jours, des explosifs (tirs de mine) sont utilisés pour faciliter l'extraction de la roche. Les blocs de calcaire ainsi obtenus sont transportés par des pelles mécaniques vers des camions chargeurs, puis acheminés vers les ateliers de préparation. C'est là que débute leur transformation, comprenant des étapes de concassage, de criblage et de calibrage.



Figure 3.2: Extraction de la matière première.

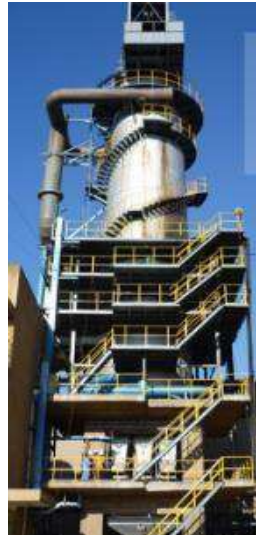
b) Concassage, criblage et calibrage

La première étape consiste à concasser les blocs de calcaire, puis à les cribler afin d'obtenir une taille de pierre adaptée au type de four utilisé pour la calcination. Les fours verticaux nécessitent des pierres dont le calibre varie de 20 à 140 mm, tandis que les fours rotatifs exigent une taille comprise entre 5 et 40 mm.

c) Cuisson ou calcination

Deux types de fours sont utilisés dans l'industrie pour la cuisson du calcaire :

- **Four vertical ou four droit** : Inspiré des fours primitifs, il prend généralement la forme d'un cylindre en acier (dimensions moyennes : diamètre de 2 m et hauteur de 8 m), tapissé intérieurement d'un matériau réfractaire capable de résister à l'abrasion et à la corrosion (voir figure 3.3). Ce type de four est équipé de ventilateurs pour le tirage et dispose d'une grille de défournement à sa base. Les améliorations récentes ont fait du four droit annulaire le choix le plus économique en termes de consommation énergétique.



• **Figure 3.3:** Four vertical ou four droit.

- **Le four rotatif**, similaire à ceux utilisés dans l'industrie du ciment (voir figure 3.4), est employé pour la production de chaux en chauffant le matériau entre 1000°C et 1300°C, selon le type de chaux à produire. Le calcaire est introduit d'un côté du four, où il passe d'abord par une zone de préchauffage avant de subir la calcination. Une fois calcinée, la chaux est refroidie avant d'être extraite.

Le processus commence par la descente lente du calcaire à travers la zone de préchauffage, ce qui permet l'évaporation de l'eau libre contenue dans la pierre, évitant ainsi l'éclatement des blocs. Ensuite, le calcaire traverse une seconde zone où il subit la calcination, une décarbonatation qui commence à partir de 900°C, entraînant la libération de CO_2 . Pour les dolomies, la décarbonatation se produit à des températures inférieures ou égales à 400°C, produisant de la magnésie (MgO). Les vapeurs d'eau générées sont évacuées avec les fumées, facilitant ainsi une décarbonatation efficace du calcaire.

La chaux vive ainsi produite continue sa descente vers une troisième zone de refroidissement, avant d'être extraite. L'arrivée d'air frais à la base du four crée un courant d'air qui traverse le four en sens inverse et intervient dans diverses étapes de la production de la chaux, notamment le refroidissement et la combustion du combustible.



Figure 3.4: Four rotatif pour la fabriquer de la chaux

d) Extinction

L'extinction est le processus qui transforme la chaux vive en chaux éteinte, accompagné d'une augmentation de volume appelée foisonnement. Ce phénomène résulte d'un changement de structure moléculaire et de la formation d'aiguilles d'hydrate de chaux. Pour une utilisation sûre, la chaux doit être entièrement hydratée afin d'éviter des gonflements destructeurs dans les ouvrages. Ce processus est réalisé en ajoutant de l'eau et peut être accompli par différentes méthodes :

- **Méthode de l'extinction spontanée** : Cette méthode consiste à exposer la chaux vive à l'humidité de l'air de manière lente et continue. L'humidité présente dans l'atmosphère joue le rôle de l'eau d'extinction.
- **Méthode par arrosage manuel** : Elle implique l'ajout précis de la quantité d'eau nécessaire à l'extinction (environ 10 à 15%). La réaction exothermique qui s'ensuit (dégagement de chaleur) peut provoquer des projections, notamment avec des blocs de chaux.
- **Méthode traditionnelle par immersion** : Cette méthode consiste à tremper les blocs de chaux vive dans l'eau, suivie d'un égouttage et d'un stockage pour permettre la poursuite de l'extinction. Cette opération est exothermique (dégageant 15500 cal/mol.g; avec une température de réaction pouvant atteindre 150 °C). L'intégration de la chaux doit se faire avec précaution en raison des risques de projections et de bouillonnements.
- **Extinction par fusion, dite extinction ordinaire** : Cette méthode consiste à ajouter la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une pâte épaisse de chaux. Il est crucial de

Les liants

contrôler soigneusement la quantité d'eau pour éviter de brûler la chaux (formation de grumeaux) ou de la noyer (consistance inappropriée). Les granulés de chaux vive sont broyés et passent par un hydrateur. L'eau introduite (environ 7 à 10%) permet non seulement l'hydratation de la chaux vive, mais aide également à évacuer la chaleur dégagée lors de la réaction (température de réaction d'environ 150 °C). Les particules non réagies, appelées grappiers (impuretés, fragments mal cuits ou surcuits), sont éliminées par tamisage. La chaux éteinte sous forme de poudre est ensuite tamisée et conditionnée en sacs de 25 ou 50 kg, ou en vrac.

3.3.1.2. Propriétés principales

a) Propriétés physiques :

- La chaux ne doit pas laisser de résidus au tamis de 800 µm, et les résidus au tamis de 80 µm doivent être inférieurs à 10 %.
- La finesse globale doit se situer entre 8000 et 20 000 cm²/g.
- La masse volumique apparente varie entre 500 et 700 kg/m³, tandis que la masse volumique absolue se situe entre 2200 et 2500 kg/m³.
- La chaux vive a une forte affinité pour l'eau, s'éteignant en s'hydratant avec un dégagement important de chaleur, absorbant environ 3 litres d'eau par kilogramme de chaux. Cette propriété est utilisée pour assécher et stabiliser les sols très humides.
- La résistance réfractaire de la chaux aérienne se situe entre 1800 et 2000 °C.
- La prise de la chaux aérienne est lente, avec un début de prise se produisant après environ 600 minutes (10 heures).
- Les chaux aériennes sont principalement utilisées dans la construction pour la préparation de mortiers et de badigeons.

b) Propriétés chimiques :

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

Formules chimiques :

- Calcination : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- Hydratation : $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$

Durcissement : La chaux hydratée réagit avec le dioxyde de carbone de l'air pour former du carbonate de calcium : $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$.

3.3.1.3.Applications :

La chaux est à la fois le liant minéral majeur de l'histoire de la construction et l'un des produits minéraux les plus couramment utilisés depuis le début de l'ère industrielle. Actuellement, ses applications dans divers contextes industriels, économiques et réglementaires en constante évolution, montrent que la chaux s'adapte en permanence pour offrir des solutions adaptées. Ses propriétés fonctionnelles sont exploitées dans de nombreux domaines tels que l'industrie, l'agriculture, l'environnement et bien d'autres.

a) Applications industrielles et autres de la chaux :

- **Environnement :** Utilisée pour le traitement des eaux.
- **Agriculture :** Améliore la qualité des sols.
- **Sidérurgie et industrie des métaux non ferreux :** Permet l'extraction de certaines impuretés.
- **Industrie chimique :** Sert à la fabrication d'agents chimiques comme la soude caustique.
- **Industries alimentaire et sucrière :** Appliquée dans divers processus de fabrication.
- **Industrie verrière :** Améliore la résistance du verre aux agressions chimiques.
- **Industrie papetière :** Utilisée pour régénérer la soude caustique lors de la fabrication de la pâte à papier.
- **Génie civil :** Traite les sols humides pour la construction de routes.

b) Applications dans le bâtiment :

Avec l'évolution des techniques et une meilleure compréhension des propriétés de la chaux, ses applications se sont largement diversifiées, démontrant ainsi son caractère multifonctionnel.

- **Restauration de bâtiments anciens et monuments historiques :** La chaux est couramment utilisée pour restaurer des constructions anciennes comme des mosquées, des palais et des remparts, car elle permet de leur redonner leur aspect d'origine. La chaux aérienne est particulièrement prisée pour améliorer l'isolation, capturer le CO_2 , et pour son caractère intemporel.
- **Mortiers de pose et de jointement :** Les mortiers à base de chaux sont excellents pour le jointoiment de maçonneries en pierres tendres, en béton cellulaire ou en

briques. Très utilisés dans la construction, ces mortiers sont peu perméables à l'eau, moins susceptibles de se fissurer et ne provoquent pas d'efflorescences.

- **Enduits intérieurs et extérieurs :** La plasticité et l'adhérence de la chaux en font un matériau de choix pour réaliser des enduits efficaces pour les surfaces intérieures et extérieures. Elle offre à la fois une protection et une esthétique. Les enduits bâtards (mélange de chaux et de ciment) sont imperméables à l'eau tout en permettant la respiration des murs, évitant ainsi les problèmes d'humidité.
- **Peintures et badigeons :** La chaux aérienne est idéale pour réaliser des badigeons qui peuvent être colorés. Les badigeons traditionnels sont confectionnés avec un lait de chaux produit à partir de chaux vive, de chaux éteinte ou de chaux en pâte.
- **Bétons isolants :** La chaux est également utilisée pour fabriquer des bétons isolants tels que le béton cellulaire, le béton silico-calcaire et le béton de chanvre.

Ces nombreuses applications illustrent l'adaptabilité et l'importance de la chaux dans diverses industries et dans la construction, soulignant son rôle indispensable depuis des siècles.

3.4. Les Liants Hydrauliques

Les liants hydrauliques, contrairement aux liants aériens, durcissent en présence d'eau et continuent de se durcir même sous l'eau.

3.4.1 Les Ciments Portland

3.4.1.1 Historique du ciment

Les Romains et les Grecs avaient déjà la connaissance de la fabrication de liants hydrauliques en combinant de la chaux éteinte avec des cendres volcaniques. La recherche sur les propriétés hydrauliques des chaux a débuté à la fin du XVIII^e siècle et a conduit, vers 1840, à la production des premiers ciments modernes. En 1817, le Français Louis Vicat découvre le principe de l'hydraulicité des chaux, lié à la proportion d'argile et à la température de cuisson. Il publie ses travaux sans les breveter. En 1840, Louis Vicat établit également les bases de l'hydraulicité des ciments Portland, en réalisant une cuisson à une température de 1450°C, permettant ainsi de produire le clinker.

Le ciment Portland est le liant hydraulique le plus couramment utilisé. Il est fabriqué à partir de matières premières naturelles telles que le calcaire et l'argile, qui sont broyées et chauffées pour former du clinker, lequel est ensuite finement broyé avec du gypse pour produire du ciment.

3.4.1.2 Principe de fabrication du ciment Portland :

Les liants

La fabrication du ciment Portland repose sur quatre méthodes différentes, principalement déterminées par les caractéristiques des matériaux utilisés :

1. Fabrication par voie humide (la plus ancienne).
2. Fabrication par voie semi-humide (dérivée de la voie humide).
3. Fabrication par voie sèche (la plus courante).
4. Fabrication par voie semi-sèche (dérivée de la voie sèche).

Le processus de fabrication du ciment comprend six étapes principales :

1. Extraction des matières premières (argile et calcaire).
2. Homogénéisation et dosage.
3. Séchage et broyage.
4. Cuisson (calcination) dans le four.
5. Refroidissement.
6. Broyage final.

Ces étapes garantissent la production de ciment Portland avec des propriétés spécifiques adaptées aux applications dans la construction et d'autres industries connexes.

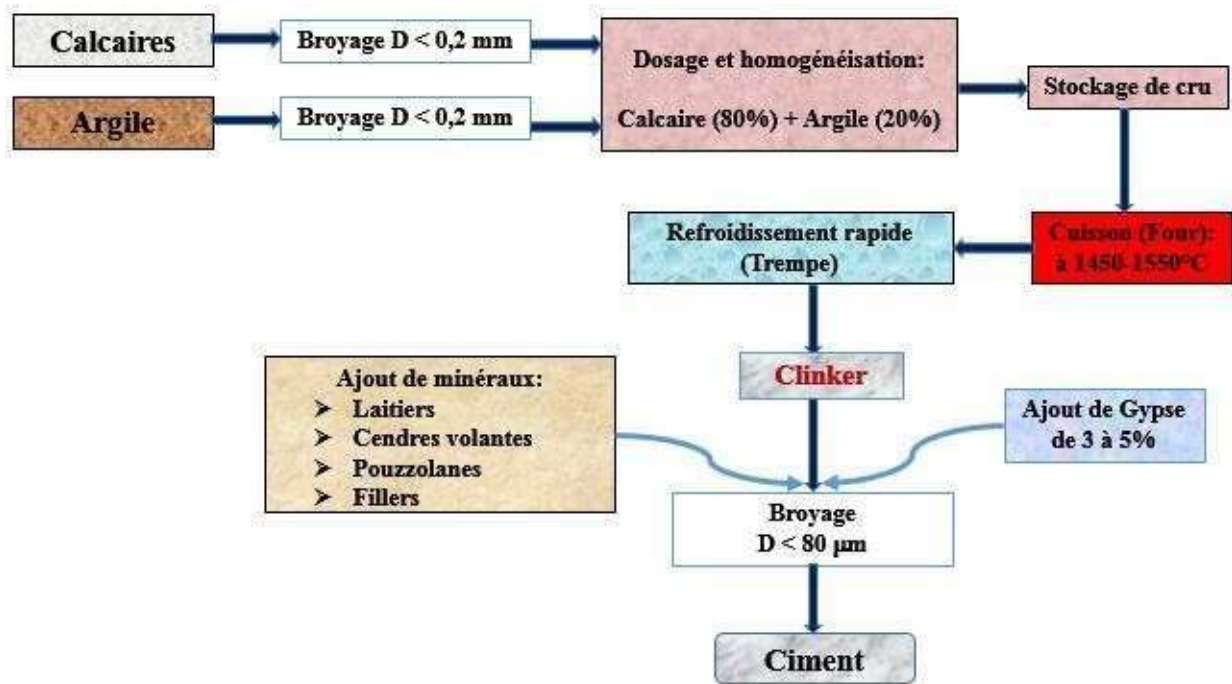


Figure 3.5: Schéma de la fabrication du ciment.

Les liants

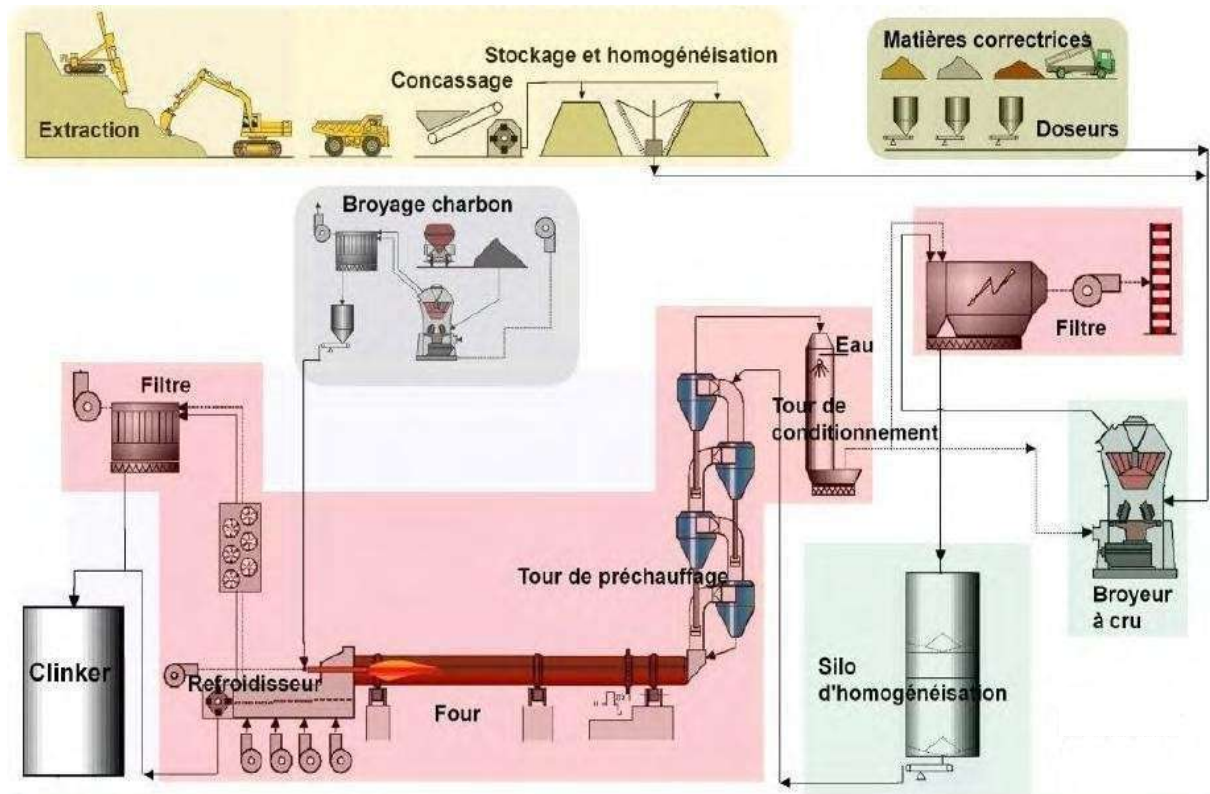


Figure 3.6: Différentes étapes de fabrication du ciment.

• **Extraction et concassage** : À cette phase, les matières premières (calcaire et argile) sont extraites de carrières à ciel ouvert naturelles (voir figure 3.6). L'extraction est réalisée en utilisant des explosifs ou des pelles mécaniques pour abattre les parois rocheuses. Les blocs de roche ainsi obtenus sont transportés et broyés en morceaux dont les dimensions maximales atteignent 50 mm. Les matières premières sont échantillonnées, dosées et mélangées de manière à maintenir une composition uniforme dans le temps. L'échantillonnage continu permet de déterminer avec précision les quantités nécessaires des différents additifs (oxyde de fer, alumine et silice) .

• **Préparation de cru** : Les grains de calcaire et d'argile sont minutieusement mélangés par broyage et délayage, respectant les proportions spécifiées, pour former un mélange très fin appelé "cru". Des ajustements de composition peuvent être réalisés en incorporant de faibles quantités d'additifs comme l'oxyde de fer. Le cru est préparé de manière automatisée sous forme de poudre (pré-homogénéisation). Ce processus permet d'obtenir un dosage précis des deux composants principaux du ciment par superposition de couches multiples. La poudre de cru est ensuite homogénéisée par fluidisation, ajustée si nécessaire, puis stockée dans des silos avant d'être introduite dans le four (voir figure 3.6).

Les liants

• **Cuisson ou calcination** : Les installations de calcination sont similaires et se composent de deux parties distinctes : un échangeur de chaleur comprenant 4 à 5 cyclones, où la poudre est introduite par le haut et progresse vers l'entrée du four. Ce dernier se réchauffe au contact des gaz chauds qui en sortent, et une partie de la poudre se décarbonate à ce stade. La seconde partie consiste en la cuisson dans un four cylindrique mesurant entre 60 et 150 mètres de longueur pour un diamètre de 4 à 5 mètres, légèrement incliné et tournant à environ 1 tour par minute (voir figure 3.8). Le cru entre dans le four à l'amont, où se termine la décarbonatation, puis avance vers la zone de clinkérisation à une température de 1450 °C. Sous l'effet de la chaleur, les composants de l'argile tels que les silicates d'alumine et d'oxyde de fer se combinent avec la chaux provenant du calcaire pour former des silicates et aluminates de chaux.

• **Broyage** : Le clinker produit est transporté vers les trémies des broyeurs où il est finement broyé et mélangé avec 3 à 5% de gypse, utilisé comme régulateur de prise. Dans certaines situations, d'autres composants tels que le laitier, la pouzzolane, les cendres volantes et les fillers calcaires peuvent être ajoutés pour produire différents types de ciment. Les compositions chimiques spécifiques du clinker sont répertoriées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Composition chimique de clinker.

Eléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₅	MgO	Na ₂ O + K ₂ O
%	62 - 67	19 - 25	2 - 9	1 - 5	0 - 3	0 - 1,5

• **Expéditions** : Les particules de ciment sont récupérées après le broyage et envoyées vers des silos de stockage. Ces silos, cylindriques, peuvent avoir une capacité atteignant jusqu'à 10 000 tonnes (voir figure 3.7).



Figure 3.7 : Les modes d'expédition du ciment.

3.4.2. Propriétés du ciment

3.4.2.1 Propriétés physiques

- Finesse de mouture (Surface spécifique) :

L'hydratation du ciment débute à la surface des grains, ce qui signifie que la superficie totale des grains détermine la quantité de matériau disponible pour l'hydratation. Ainsi, la vitesse d'hydratation dépend de la finesse des grains de ciment. Pour obtenir une hydratation rapide et une résistance élevée à court terme, une finesse importante du ciment est requise. La méthode standard pour mesurer la surface spécifique du ciment est la méthode de Blaine (voir figure 3.8).

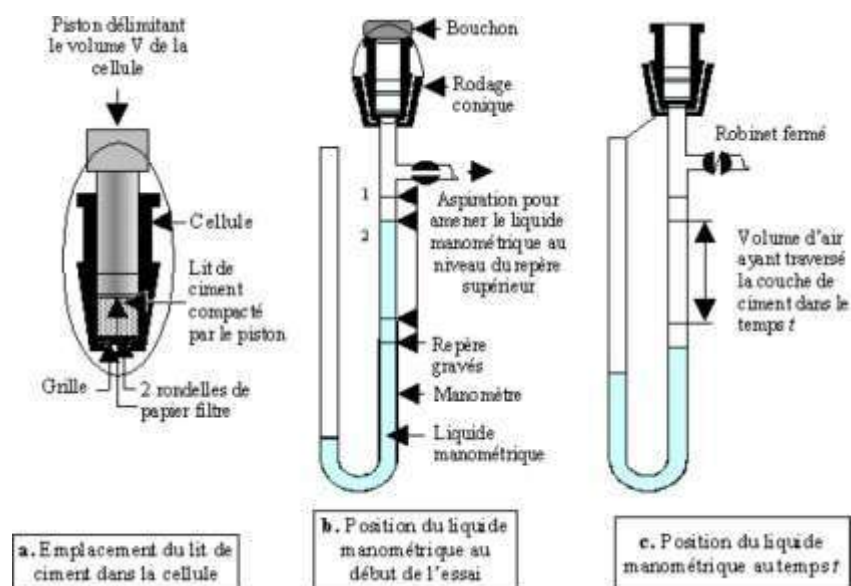


Figure 3.8 : Mesure de la surface spécifique du ciment par le perméabilimètre de Blaine.

Les liants

La finesse de mouture (ou finesse de Blaine) s'exprime en centimètres carrés par gramme (cm^2/g) et est mesurée selon la méthode de Blaine, utilisant un perméabilimètre de Blaine, conformément à la norme NF EN 196-6. La valeur typique de cette finesse se situe généralement entre 2 800 et 5 000 cm^2/g .

- **La consistance** : La consistance est le pourcentage optimal d'eau nécessaire pour obtenir une pâte de ciment ayant une consistance normale. La mesure de cette consistance se fait généralement à l'aide de l'appareil de Vicat, conformément à la norme NF EN 196-3. La figure 3.9 présente une photo de l'appareil de mesure de la consistance normale.

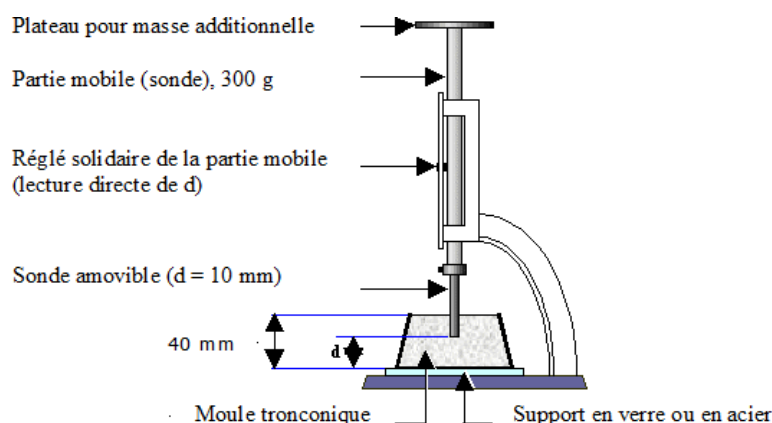


Figure 3.9 : Appareil de Vicat.

- La prise :

Ce terme décrit le processus de durcissement progressif de la pâte de ciment. La prise désigne la transition de la pâte de ciment d'un état fluide à un état solide. Le début de prise est caractérisé par une augmentation de la viscosité et une élévation de la température de la pâte de ciment. La fin de prise se définit par la conversion progressive et régulière de la pâte en un bloc rigide. Pour déterminer le temps de début et de fin de prise, on utilise couramment l'essai de "Vicat" selon la norme NF EN 196-3.

Le phénomène de prise du ciment dépend de plusieurs paramètres :

- Type de ciment utilisé,
- Finesse de mouture du ciment : plus la finesse est élevée, plus le temps de prise est court,
- Température ambiante : à zéro degré, la prise est interrompue, alors qu'une température plus élevée accélère la prise,
- Excès d'eau de gâchage : il a un effet retardateur sur la prise du ciment.

La figure 3.10 illustre l'appareil de Vicat et résume la méthode de mesure du temps de prise.

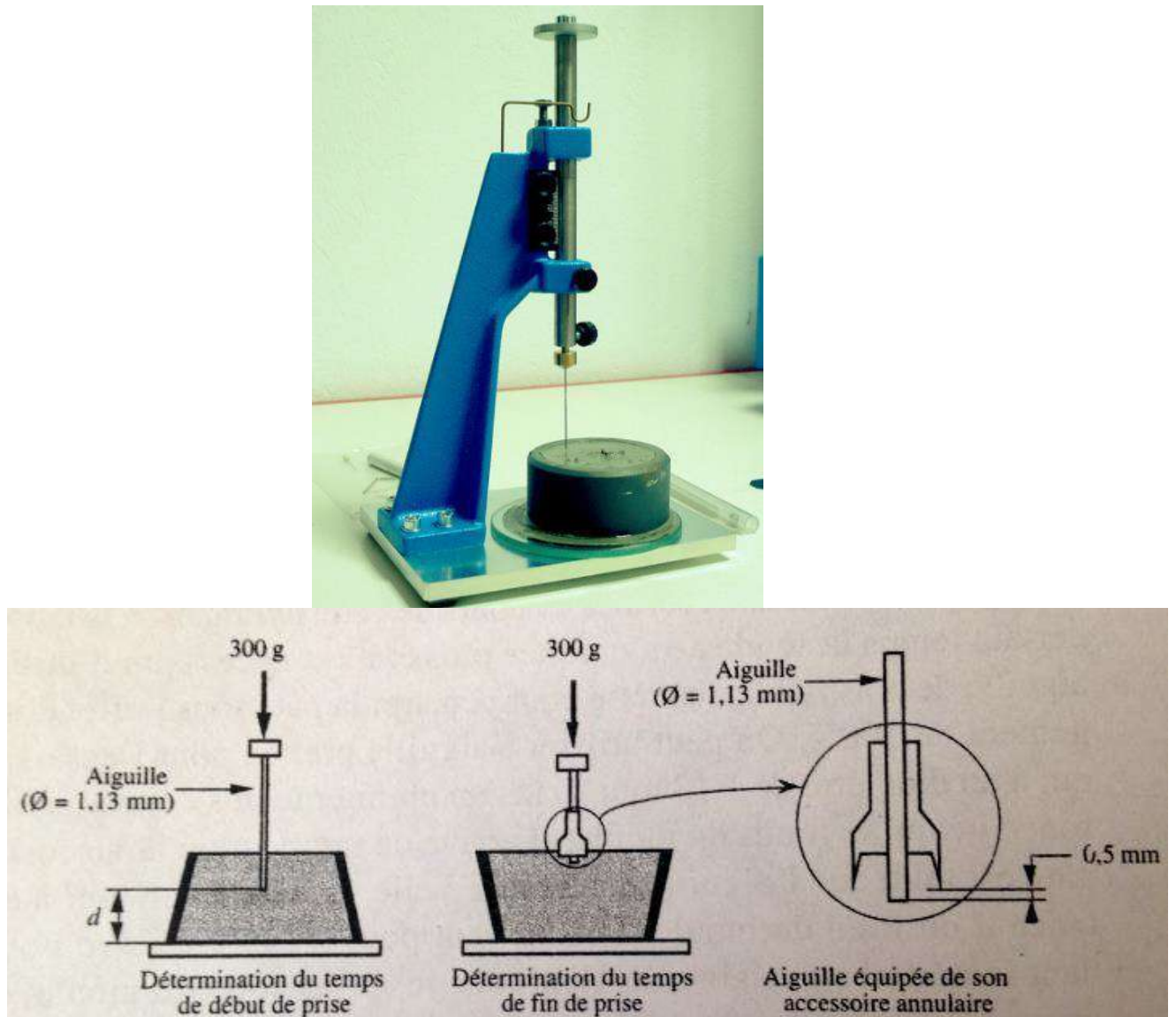


Figure 3.10 : Mesure du temps de prise du ciment par l'appareil de Vicat.

- Durcissement :

Le durcissement est la phase qui suit la prise, au cours de laquelle l'hydratation du ciment continue. Cette période peut durer plusieurs mois, pendant lesquels les résistances mécaniques du matériau continuent à croître.

- Retrait :

Le retrait désigne la réduction du volume apparent du matériau, mesurée sur des éprouvettes de mortiers standardisés de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, conservées à une température de 20°C et à une humidité relative de 80%. Il existe différents types de retrait :

Les liants

- **Retrait avant prise** : principalement dû à la perte prématurée d'une partie de l'eau de gâchage par évaporation.
- **Retrait hydraulique** : résultant de la contraction Le Chatelier, où le volume des hydrates est inférieur à celui des constituants initiaux.
- **Retrait thermique** : causé par la contraction du mortier lors de son refroidissement.

L'ampleur du retrait hydraulique dépend de nombreux facteurs, notamment :

- La nature du ciment,
- Le dosage en eau, rapport E/C,
- La propreté des sables,
- La forme et les dimensions des granulats.

- Expansion (gonflement) :

Les pâtes de ciment, les mortiers et les bétons peuvent se dilater en présence d'humidité ou d'eau. L'expansion est mesurée conformément à la norme NF EN 196-3, utilisant le même appareil que pour le retrait. Les principales causes de l'expansion sont :

- Excès de gypse,
- Excès de chaux libre (CaO),
- Excès de magnésium libre (MgO).

3.4.2.2 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques, notamment les résistances à la traction et à la compression des ciments, sont mesurées sur des éprouvettes de mortier standardisées de dimensions $4 \times 4 \times 16$ cm, testées à l'âge de 28 jours. La résistance obtenue est représentative de la performance mécanique du ciment. Les figures 3.11 (a) et (b) illustrent l'évolution des résistances des différents produits d'hydratation du ciment.

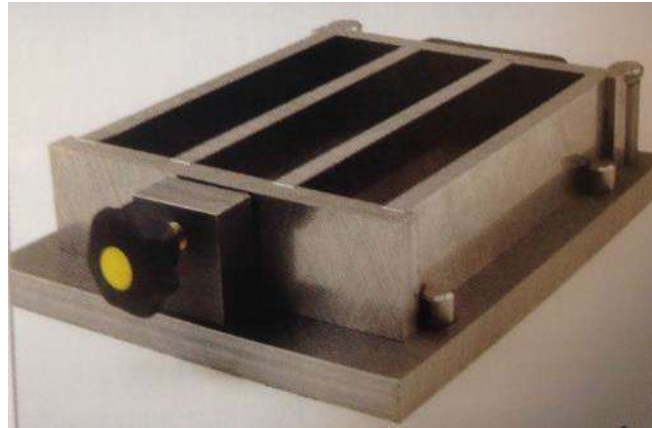


Figure. 3.11 (a): Moule prismatique 4x4x16 pour essais de compression.

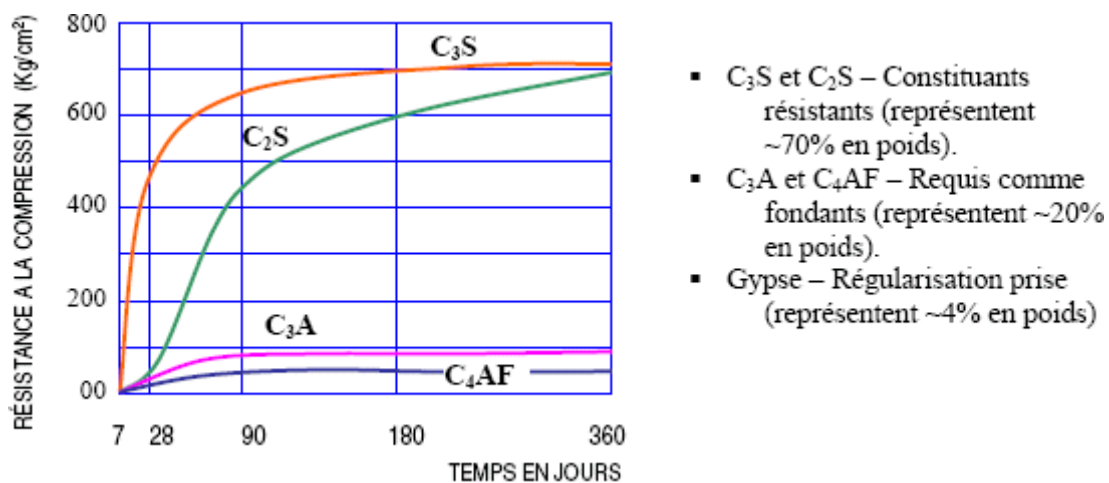


Figure. 3.11 (b): L'évolution des résistances des différents produits d'hydratation du ciment.

3.4.2.3 Classification des ciments

Selon les normes NA 442 et EN 197-1, les ciments sont classifiés en cinq catégories principales basées sur leur composition :

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

Le tableau 3.2 présente la composition spécifique de chacun de ces types de ciment.

Les liants

Tableau 3.2 : Types de ciments et leur composition.

Principaux types	Notation des 27 produits (types de ciment courant)		Composition (pourcentage en masse)										Constituants secondaires	
			Constituants principaux											
			Clinker K	Laitier de haut fourneau S	Fumée de silice D	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné T	Calcaire			
Naturelle P	Naturelle calcinée Q	Silicieuse V				Calcaire W	L	LL						
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM II	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5
	Ciment Portland composé	CEM II/A-M	80-94	←———— 6-20 —————→						—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-M	65-79	←———— 21-35 —————→						—	—	—	—	0-5
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM IV	Ciment pouzzolanique ^{c)}	CEM IV/A	65-89	—	←———— 11-35 —————→				—	—	—	—	0-5	
		CEM IV/B	45-64	—	←———— 36-55 —————→				—	—	—	—	0-5	
CEM V	Ciment composé ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	—	← 18-30 →		—	—	—	—	—	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	—	← 31-50 →		—	—	—	—	—	0-5	

3.4.2.4 Spécifications physiques et mécaniques

- **Classes de résistance** : Les ciments sont répartis en trois classes de résistance normale : 32,5 ; 42,5 ; et 52,5.
- **Sous-classes de résistance précoce** : Pour chaque classe de résistance normale, une sous-classe de résistance à court terme (R) est également définie.

Les liants

- **Normes de résistance à la compression** : Pour tous types de ciments, la résistance à la compression doit être mesurée conformément à la norme EN 196-1 et répondre aux critères établis dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Spécification physiques et mécaniques des ciments selon EN 197-1

Classe de résistance	Résistance à la compression MPa				Temps de début de prise min	Stabilité (expansion) mm
	Résistance à court terme		Résistance courante			
	2 jours	7 jours	28 jours			
32,5 N	---	= 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≥ 10
32,5 R	≥ 10,0	---				
42,5 N	≥ 10,1	---	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 R	≥ 20,0	---				
52,5 N	≥ 20,1	---	≥ 52,5	---	≥ 45	
52,5 R	≥ 30,0	---				

3.4.3 Principe de dénomination normalisée

La dénomination d'un ciment suit le principe suivant :

- 1- Type de ciment : CEM I à CEM V
- 2- Classe de ciment : A, B ou C suivant les proportions de clinker
- 3- Nombre de constituants autre que le clinker : rien = un seul constituants - M = au moins deux constituants
- 4- La nature des constituants autres que le clinker
- 5- La classe de résistance à long terme du ciment (32,5 - 45 - 52,5 MPa)
- 6- La classe de résistance à court terme du ciment : L = faible - N = normale ou ordinaire
- R = élevée
- 7- La certification CE

Les liants

8- Les spécifications complémentaires : PM = Ciment Prise Mer = pour travaux à la mer

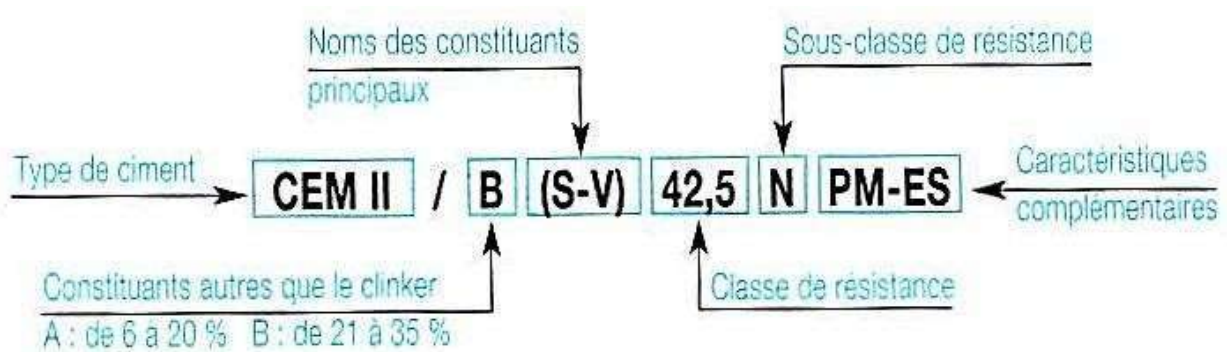
- ES = Ciment pour travaux en Eaux à haute teneur en Sulfates
- CP1 ou CP2 = Ciment à teneur en sulfures limitée pour bétons précontraints.

9- Le marquage NF

3.4.3.1 Nomenclature des ciments

La nomenclature des ciments se fait suivant deux critères principaux :

- La résistance mécanique à 28 jours
- La teneur en clinker



Avec:

- 1- Teneur en clinker (**K**), constituant principale du ciment: Plus élevée (**A**), moins élevée (**B**) ou faible (**C**).
- 2- Constituant secondaires : Laitier de haut fourneau (**S**), Calcaire (**L**, **LL**),
Fumée de silice (**D**),
Pouzzolane : Naturelle (**P**) ou naturelle calciné (**Q**), Cendres volantes : siliceuse (**V**) et calcique (**W**), Schiste calciné (**T**),
- 3- Développement de la résistance à court terme : Normale (**N**) et Rapide (**R**).
- 4- Classe de résistance à la compression à 28 jours en MPa : **32,5** , **42,5** et **52,5**.
- 5- Caractéristiques particulières (Norme EN 197-1) :

Chaleur d'hydrations modérée

(**LH**, Low Heat), Ciment

Les liants

résistant aux sulfates (**SR**).

Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates (**ES**, suivant NF P 15-319), Ciments pour travaux à la mer (**PM**),

Ciments à teneur en sulfures limités pour béton précontraint (**CP**, suivant NF P 15-318).

6- Marquage et certifications :

Conformité européenne

règlementaires (**CE**),

Marque de certification

Algérienne (**NA**)

et Marque de certification française délivrée par AFNOR (**NF**).

CEM II /A - LL 32,5 R CE CP2 NF

- CEM II : Ciment de type 2
- A : Contenant 80 à 94% de clinker
- LL : contenant 6 à 20% de fine calcaire à moins de 0,5% de carbone organique
- 32,5 : de 32,5 de résistance caractéristique à 28 jours
- R : à durcissement rapide
- CE : possède un certificat de conformité CE
- CP2 : à teneur en sulfate limitée



3.5 Choix du ciment en fonction des exigences climatiques et de la résistance aux agents agressifs

- **Travaux de maçonnerie (mortiers de joints, enduits) :**
 - Il est préférable d'opter pour des ciments à maçonner ou des mortiers bâtards mélangés à de la chaux hydraulique pour une performance optimale.
- **Béton armé (ossatures, ouvrages d'art) :**

Les liants

- Pour ces applications, les ciments portlands ordinaires sont les liants les plus adaptés, assurant une résistance structurelle adéquate.
- **Travaux de fondation ou en souterrain, en milieu agressif :**
 - Dans ces conditions, les ciments les plus recommandés sont ceux à base de laitier, les ciments ternaires et les ciments sursulfatés, qui offrent une meilleure résistance aux environnements corrosifs.
- **Ouvrages massifs (barrages) :**
 - Pour ces structures, il est conseillé d'utiliser des ciments portlands à faible chaleur d'hydratation tels que les ciments siliceux pauvres en alumine, les ciments à base de laitier, les ciments ternaires et les ciments pouzzolaniques, afin de minimiser les risques de fissuration thermique et assurer la durabilité de l'ouvrage.

3.6 Ajouts cimentaires

Les ajouts cimentaires sont des matériaux très finement granulés ajoutés principalement au ciment, parfois également au béton. Leur utilisation vise à améliorer les caractéristiques du béton ou à lui conférer des propriétés spécifiques. En général, les ajouts sont moins coûteux que le ciment Portland, ce qui permet de produire un ciment composé plus économique (voir figure 3.12).



Figure 3.12 : Ajouts cimentaire.

3.6.1 Avantages des ajouts cimentaires

Avantages fonctionnels

- Amélioration de la maniabilité et réduction de la demande en eau du béton.

- Réduction de la chaleur d'hydratation dégagée par le béton.
- Amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton.

Avantages économiques

- Le coût des ajouts minéraux issus de sous-produits industriels est souvent équivalent au coût du transport et de la manipulation.
- Réduction de la consommation d'énergie, entraînant une diminution du prix du ciment.

Avantages écologiques

- Réduction des émissions de CO₂ produites par l'industrie cimentaire.
- Valorisation des sous-produits industriels, évitant ainsi leur rejet dans la nature.

3.6.2 Classification des ajouts cimentaires

Les ajouts cimentaires sont des matériaux finement broyés, souvent incorporés au ciment ou au béton pour améliorer leurs propriétés spécifiques. Ils peuvent être classés en deux catégories principales selon la norme ENV 206 :

1. Additions de type I

Ce sont des matériaux pratiquement inertes, organiques naturels ou synthétiques soigneusement sélectionnés pour leur composition granulométrique spécifique, visant à améliorer diverses propriétés physiques du ciment Portland. Parmi ces additifs, on distingue :

- **Fillers** : Produits obtenus par le broyage de roches telles que le calcaire, le basalte, les laitiers, et les bentonites. Les fillers, caractérisés par leur granulométrie appropriée, influencent la nucléation de l'hydratation du clinker et peuvent avoir un effet liant à long terme, particulièrement pour les fillers calcaires.
- **Additions calcaires** : Composés principalement de carbonate de calcium (CaCO₃), présents dans des roches comme la calcite, l'aragonite ou la marne. Leur utilisation peut remplacer le gypse pour certaines applications, offrant des avantages vérifiés par des études telles que la teneur élevée en CaCO₃ et un faible indice d'activité.

2. Additions de type II

Ces matériaux, généralement inorganiques, sont finement broyés et possèdent des propriétés pouzzolaniques ou hydrauliques latentes. Ils sont caractérisés par une teneur élevée en

Les liants

dioxyde de silicium seul ou combiné avec de l'oxyde d'aluminium. Parmi les additifs de ce type, on trouve :

- **Cendres volantes** : Résultat de la combustion du charbon dans les centrales thermiques, les cendres volantes sont récupérées par des méthodes de séparation pneumatique et électrostatique. Elles se présentent sous forme de particules vitreuses sphériques et sont classées en deux types (Classe F et Classe C) en fonction de leur teneur en CaO, influençant leurs propriétés physico-chimiques et pouzzolaniques.



Figure 3.13 : Cendre volante

- **Fumées de silice** : Sous-produits de la fabrication du silicium ou du ferrosilicium, les fumées de silice sont caractérisées par leur haute teneur en silice (75 à 95%) et une surface spécifique élevée. Elles agissent physiquement en améliorant la compacité du béton, physico-chimiquement en réduisant la perméabilité et pouzzolaniquement en réagissant avec la chaux libérée lors de l'hydratation pour former de nouveaux hydrates.



Figure 3.14 : Fumée de silice

- **Laitiers de haut fourneau** : Produits secondaires de la fabrication de la fonte dans les usines sidérurgiques, les laitiers sont disponibles sous forme de granules ou boulettes, et leur utilisation comme additif minéral nécessite un broyage préalable. Les laitiers contribuent à l'hydratation du ciment après saturation en chaux, améliorant ainsi les propriétés mécaniques du béton à différents stades de durcissement en fonction de la taille des particules.

Les liants

- **Pouzzolanes naturelles** : D'origine volcanique ou sédimentaire, les pouzzolanes sont des roches riches en silice activées thermiquement. Elles sont utilisées dans la fabrication du ciment pour leurs propriétés pouzzolaniques qui améliorent la résistance chimique et mécanique du béton.



Figure 3.15 : Pouzzolane naturelle

- **Méta-kaolin** : Produit par la calcination de l'argile kaolinitique à haute température suivie d'un broyage fin, le méta-kaolin présente une forte pouzzolanité. Il est utilisé pour ses effets bénéfiques sur la durabilité et la résistance mécanique du béton.

Ces classifications et caractéristiques des ajouts cimentaires permettent de choisir des formulations adaptées selon les exigences spécifiques des applications, tout en offrant des solutions économiques et écologiques dans l'industrie du ciment.

- 3.5

-

-

Les liants

Formules chimiques principales :

- **Clinker** : Composé principalement de silicates de calcium (C_3S , C_2S).
- **Gypse** : $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, utilisé pour réguler la prise.

Réactions de durcissement : Les silicates de calcium réagissent avec l'eau pour former des hydrates de silicate de calcium, qui constituent le principal produit de la prise et du durcissement du ciment.

Propriétés :

- **Résistance mécanique** : Excellente résistance à la compression.
- **Durabilité** : Résistant aux agressions chimiques et aux cycles gel-dégel.
- **Flexibilité** : Utilisable pour une variété d'applications (béton, mortier, etc.).

Applications :

- Construction de bâtiments et d'infrastructures.
- Fabrication de béton préfabriqué.
- Travaux de génie civil et ouvrages hydrauliques.

5. Constituants Principaux et Additions

Les constituants principaux des liants comprennent les composants actifs qui participent au durcissement et les adjuvants qui améliorent certaines propriétés.

5.1 Constituants Principaux

1. **Clinker** : Principal composant des ciments, formé de silicates et aluminates de calcium.
2. **Gypse** : Ajouté au clinker pour réguler le temps de prise du ciment.
3. **Calcaire** : Utilisé pour ajuster la composition chimique et améliorer certaines propriétés mécaniques.

5.2 Additions

Les additions sont des matériaux ajoutés aux liants pour améliorer leurs propriétés spécifiques. Elles peuvent être classées en trois catégories :

Les liants

1. Additions minérales :

- **Cendres volantes** : Améliorent la maniabilité et la durabilité.
- **Fumée de silice** : Augmentent la résistance mécanique et réduisent la perméabilité.
- **Laitier de haut fourneau** : Améliore la résistance aux attaques chimiques.

2. Additions chimiques :

- **Plastifiants** : Augmentent la fluidité du mélange.
- **Retardateurs** : Prolongent le temps de prise.
- **Accélérateurs** : Réduisent le temps de prise.

3. Additions organiques :

- **Fibres** : Renforcent la structure et améliorent la résistance à la fissuration.
- **Polymères** : Augmentent la flexibilité et la résistance à l'usure.

6. Synthèse et Conclusion

Les liants, qu'ils soient aériens ou hydrauliques, jouent un rôle fondamental dans la construction en apportant la cohésion et la résistance nécessaires aux matériaux de construction. La compréhension des différents types de liants, de leurs propriétés et des ajouts possibles permet de choisir le liant approprié pour chaque application spécifique, garantissant ainsi la durabilité et la performance des ouvrages construits.

7. Bibliographie

1. Pellenq, R., & Roussel, N. (2010). "Cement and Concrete Research." Elsevier.
2. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). "Concrete: Microstructure, Properties, and Materials." McGraw-Hill Education.
3. Neville, A. M. (2011). "Properties of Concrete." Pearson Education.
4. Taylor, H. F. W. (1997). "Cement Chemistry." Thomas Telford Publishing.

8. Annexes

Annexe 1 : Tableaux de Classification des Liants

Type de Liant	Caractéristiques Principales	Applications
Liants Aériens	Durcissent à l'air, bonne plasticité	Mortiers, enduits, restauration de monuments
Liants Hydrauliques	Durcissent en présence d'eau, haute résistance	haute Béton, infrastructures, ouvrages hydrauliques

Annexe 2 : Schémas de Réactions Chimiques

- Chaux Aérienne** : $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
- Ciment Portland** : $2\text{Ca}_3\text{SiO}_5 + 7\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{Ca(OH)}_2$

Ce polycopié vous offre une vue détaillée sur les liants utilisés en construction, leurs classifications, propriétés et applications, permettant une meilleure compréhension et utilisation dans vos projets futurs.

4.1 Introduction :

Les mortiers sont des matériaux polyvalents largement utilisés dans divers aspects de la construction tels que le revêtement des murs, le scellement des joints, la fixation des briques et des pierres, ainsi que dans les travaux de réparation et de restauration. Composés d'un mélange de liants (chaux ou ciment), de granulats fins, d'eau et éventuellement d'additifs, les mortiers offrent une adhérence et une résistance mécanique essentielles pour l'assemblage et la consolidation des éléments de construction. Différentes compositions de mortier peuvent être obtenues en ajustant divers paramètres tels que le type et le dosage du liant, les additifs et les ajouts, ainsi que la quantité d'eau. Le choix du liant, qu'il s'agisse de ciments ou de chaux, dépend de la nature du projet et de l'environnement dans lequel il sera utilisé. Un malaxage optimal est nécessaire pour assurer un mélange homogène et uniforme.

Les mortiers peuvent être préparés de trois manières :

- Sur le chantier, en dosant et mélangeant les différents composants, y compris les adjuvants.
- Sur le chantier, à partir de mortiers industriels secs pré-dosés, où seule l'eau nécessaire est ajoutée avant utilisation.
- Livrés par des centrales, sous forme de mortiers prêts à l'emploi, ce qui évite le stockage et le mélange des constituants sur place. Le développement des mortiers industriels ces dernières années a simplifié la mise en œuvre sur les chantiers.

4.2 Composition : Les mortiers se composent traditionnellement de liants, de granulats et d'eau, éventuellement enrichis d'adjuvants :

- **Liants :** Ils peuvent être du ciment Portland, de la chaux, du ciment de maçonnerie ou des mélanges de ces matériaux. La chaux, par exemple, offre une excellente plasticité et un bon pouvoir de rétention d'eau, mais une résistance mécanique relativement faible. Les mortiers de chaux durcissent lentement par carbonatation sous l'effet du dioxyde de carbone atmosphérique, un processus ralenti par temps froid et humide.
- **Ciment de maçonnerie :** Il s'agit d'un produit déposé contenant du ciment Portland, un filler minéral inerte (comme le calcaire) et divers adjuvants tels que des agents mouillants, des hydrofuges et des entraîneurs d'air.

- **Adjuvants** : Ils améliorent la plasticité et le pouvoir de rétention d'eau des mortiers à base de ciment et de chaux. Certains mortiers de ciment de maçonnerie sont des mélanges de ciment Portland et de chaux hydratée, renforcés par des adjuvants.
- **Granulats** : Le sable est le granulat le plus couramment utilisé, favorisant principalement la compacité. Ses tailles granulométriques varient de 0,080 mm à 4 mm.
- **Eau** : Jouant un double rôle crucial, l'eau hydrate le ciment pour former un matériau cohésif et améliore l'ouvrabilité du mortier en fluidifiant la pâte. Elle est également essentielle pour la carbonatation des chaux hydrauliques, un processus favorisé par le dioxyde de carbone. L'eau utilisée doit être propre et conforme aux normes comme la NFP 18.303, de préférence de l'eau potable pour éviter l'utilisation d'eaux chargées en sels solubles tels que les sulfates, nitrates et chlorures.
- **Les adjuvants** sont utilisés dans les mortiers de maçonnerie, bien que leur emploi ne soit généralement pas recommandé. Ce sont des produits chimiques ajoutés aux bétons et mortiers en faible proportion (environ 5 % du poids du ciment) pour modifier leurs propriétés. Il existe plusieurs types d'adjuvants :
 - **Les superplastifiants**, aussi appelés réducteurs d'eau, sont couramment utilisés dans l'industrie du béton pour améliorer la maniabilité et la résistance du béton tout en réduisant la quantité d'eau nécessaire. Ils aident à prévenir la ségrégation et l'exsudation du béton, et à renforcer sa résistance au gel et au dégel.
 - **Les modificateurs de prise**, tels que les retardateurs et les accélérateurs, sont utilisés pour ajuster le temps de prise du béton frais selon les conditions climatiques ou les exigences du projet.
 - **Les hydrofuges** sont des additifs chimiques qui réduisent la perméabilité à l'eau du béton, améliorant ainsi sa résistance aux intempéries et prolongeant sa durabilité en empêchant la pénétration d'humidité et de contaminants.

Il est crucial de manipuler ces adjuvants avec précaution afin d'assurer des mortiers homogènes et exempts de ressuage d'une gâchée à l'autre.

Les ajouts, également connus sous le nom d'adjuvants minéraux ou matériaux cimentaires supplémentaires, sont des substances utilisées pour modifier les propriétés du béton frais et durci. Contrairement aux adjuvants chimiques, les ajouts sont des matériaux solides finement divisés mélangés avec le ciment, le sable et les granulats pour former du béton. Ils visent à

améliorer des aspects comme la durabilité et la résistance aux agressions environnementales. Les types d'ajouts utilisés dans les mortiers comprennent :

- Les poudres fines pouzzolaniques telles que les cendres volantes et la fumée de silice.
- Les fibres de diverses natures pour renforcer la structure et résister à la fissuration.
- Les colorants, qu'ils soient naturels ou synthétiques, pour teinter le mortier.
- Les polymères qui augmentent la flexibilité et la résistance à l'usure des mortiers.

Ces ajouts sont sélectionnés en fonction des propriétés spécifiques recherchées pour chaque projet de construction.

4.3 Les différents types de mortiers

- **Mortiers de ciment** : Les mortiers de ciment sont caractérisés par leur haute résistance, leur prise rapide et leur capacité à durcir de manière imperméable avec un dosage typique de 300 à 400 kg de ciment par mètre cube de sable.
- **Mortiers de chaux** : Moins résistants que les mortiers de ciment, les mortiers de chaux ont une prise plus lente.
- **Mortiers bâtards** : Ces mortiers utilisent un mélange de ciment et de chaux comme liant, souvent en quantités égales, bien que la proportion puisse varier en fonction des exigences spécifiques et de la qualité recherchée.

4.3.1 Mortiers fabriqués sur chantier :

Ces mortiers sont préparés avec du ciment courant CPA ou CPJ et du sable provenant directement du chantier. Le sable est généralement de nature silico-calcaire, roulé ou parfois concassé, et le mélange est effectué manuellement à l'aide d'une pelle ou d'une petite bétonnière. La régularité de ces mortiers peut varier car les sables peuvent différer d'une livraison à l'autre, mais ils doivent toujours être propres et bien granulométriquement répartis. Le dosage du sable est souvent exprimé en poids, ce qui est préférable, bien qu'il puisse également être mesuré en volume dans le cas des petits chantiers où le phénomène de foisonnement des sables doit être pris en compte.

4.3.2 Mortiers industriels :

Ce sont des mortiers préparés à partir de constituants secs soigneusement sélectionnés, conditionnés en sacs, et produits de manière régulière et contrôlée en usine. Pour les utiliser, il suffit d'ajouter la quantité d'eau appropriée, de malaxer, puis de les mettre en œuvre. Les

mortiers industriels peuvent contenir différents liants, sables, ainsi que des adjuvants et parfois des colorants. Les fabricants proposent une gamme variée de produits adaptés à divers besoins tels que les enduits, les mortiers d'imperméabilisation, les mortiers d'isolation thermique, les mortiers de jointoiment, les mortiers de réparation, et les mortiers-colle pour carrelages sur fond de plâtre ou de ciment.

4.4. Les applications des mortiers

4.4.1. Les joints de maçonnerie :

Dans la construction avec des éléments maçonnés tels que les blocs de béton, les pierres de taille ou les briques, l'assemblage se fait généralement avec un mortier qui doit répondre à des critères spécifiques. Il doit avoir des propriétés mécaniques suffisantes pour supporter les charges et une compacité adéquate pour assurer l'étanchéité. Il est souvent préférable d'utiliser des mortiers ayant un module d'élasticité modéré, ce qui leur permet de s'adapter aux variations dimensionnelles des éléments qu'ils lient sans se fissurer.

Les mortiers de joints jouent donc un rôle crucial dans la maçonnerie, en particulier dans le cas des maçonneries apparentes, et leur sélection et leur mise en œuvre doivent être soigneusement étudiées pour remplir efficacement leur fonction.



Figure 4.1. Joints de maçonnerie.

4.4.2. Les chapes :

Les chapes sont utilisées principalement pour niveler le dallage et assurer sa surface uniforme. Elles peuvent servir comme finition, souvent en y intégrant des produits spécifiques, ou comme support pour un revêtement de sol. Les chapes doivent posséder une résistance adéquate pour transmettre efficacement les charges au support.

Qu'elles soient adhérentes ou flottantes, les chapes peuvent également remplir des fonctions thermiques ou acoustiques.



Figure 4.2. Application d'enduit pour chape.

4.4.3. Les enduits :

Les enduits représentent l'un des champs d'application les plus étendus des mortiers.

Actuellement, on observe une expansion des enduits monocouches épais, ainsi que des enduits isolants qui sont encore considérés comme non conventionnels.



Figure 4.3. Application d'enduit.

4.4.4. Les scellements et les calages :

La diversité des besoins en matière de scellement et de calage a incité les fabricants de mortiers industriels à développer des produits spécifiques adaptés à chaque type de travaux : scellement des éléments de couverture, scellement des éléments de second œuvre, fixation des

mobiliers urbains, scellement des regards de visite, assemblage des éléments préfabriqués, et bien d'autres applications.



Figure 4.4. Calage d'un poteau en charpente métallique.

4.5 Caractéristiques principales :

Les caractéristiques principales des mortiers incluent :

- L'ouvrabilité
- La prise
- La résistances mécaniques
- Le retraits et gonflements, etc.

Pour évaluer ces caractéristiques, on utilise souvent comme référence le mortier 1/3 composé en poids de une partie de ciment, trois parties de sable normalisé (avec des grains entre 80 microns et 2 mm), et 0,45 partie d'eau. Ce mortier est malaxé et coulé dans des moules métalliques selon des méthodes standardisées. Divers tests sont alors réalisés sur des prismes de dimensions 4x4x16 cm en laboratoire pour mesurer les résistances mécaniques, les retraits, les gonflements, l'absorption capillaire, ainsi que la résistance au gel et aux agressions chimiques.

4.5.1 Ouvrabilité :

L'ouvrabilité d'un mortier est mesurée à l'aide d'appareils spécialisés. Parmi eux, la table à secousses est particulièrement connue : après avoir été mis en place et démoulé d'un moule tronconique, le mortier subit 15 chocs en 15 secondes. Le diamètre de la galette obtenue est mesuré, et l'étalement en pourcentage est calculé selon la formule :

$$E\% = 100 \frac{D_r - D_i}{D_i}$$

avec:

D_r = diamètre final

D_i = diamètre initial

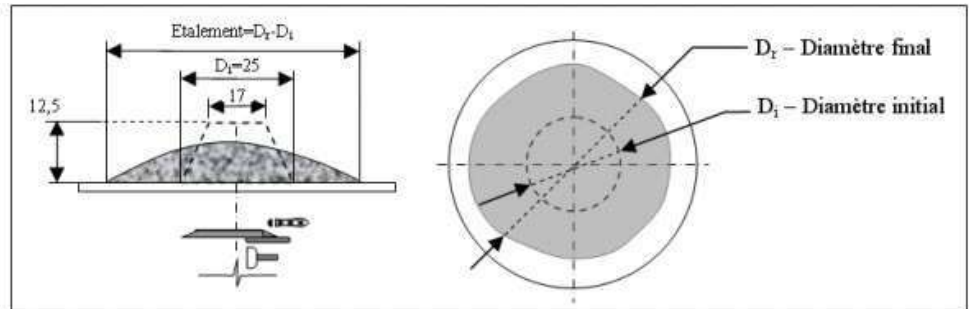


Figure 4.5 : Table à choc.

Le tableau 4.1 montre l'ouvrabilité du mortier en fonction des résultats d'étalement trouvés à l'aide de la table à chocs.

Tableau 4.1 : Ouvrabilité du mortier

Ouvrabilité	Etalement à la table(%)
Très ferme	10 - 30
Ferme	30 - 60
Normal (plastique)	60 - 80
Mou (très plastique)	80 - 100
Très mou à liquide	> 100

Exemple :

Soit un mortier normal avec un diamètre moyen après l'essai d'étalement $D_r = 15$ cm. Le moule de cône de diamètre à la base $D_i = 10$ cm.

$$E\% = \frac{D_r - D_i}{D_i} \times 100 = E\% = \frac{15 - 10}{10} \times 100 = 50\%$$

D'après le tableau 4.1 : pour un étalement de 50% on a une ouvrabilité ferme.

4.5.2 La Prise:

La prise d'un mortier est habituellement mesurée en utilisant une pâte pure de ciment à consistance normale (24 à 30 % d'eau) selon les normes en vigueur, à l'aide de l'appareil de Vicat. Pour obtenir le temps de prise, on utilise le même dispositif mais en appliquant une surcharge de 700 g sur le plateau supérieur. L'aiguille utilisée pèse 1000 g. Le début de la prise est déterminé lorsque l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond (taille des plus gros grains de sable), et la fin de la prise est marquée par l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur.

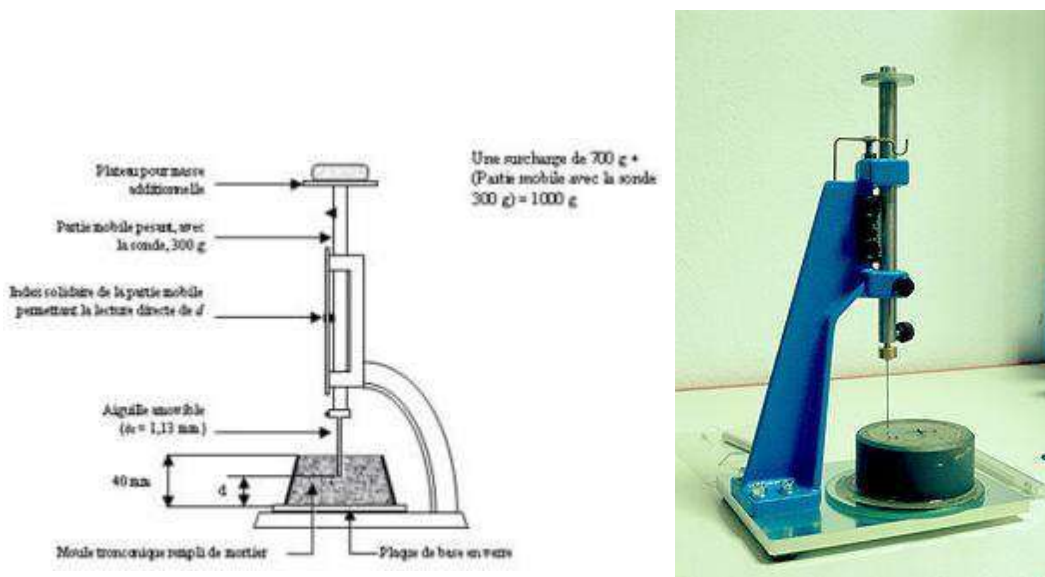


Figure 4.6. Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge.

4.5.3 Résistances mécaniques :

Les tests sont habituellement réalisés sur des éprouvettes prismatiques mesurant 4 x 4 x 16 cm, qui sont ensuite conservées dans l'eau à une température de 20 °C.

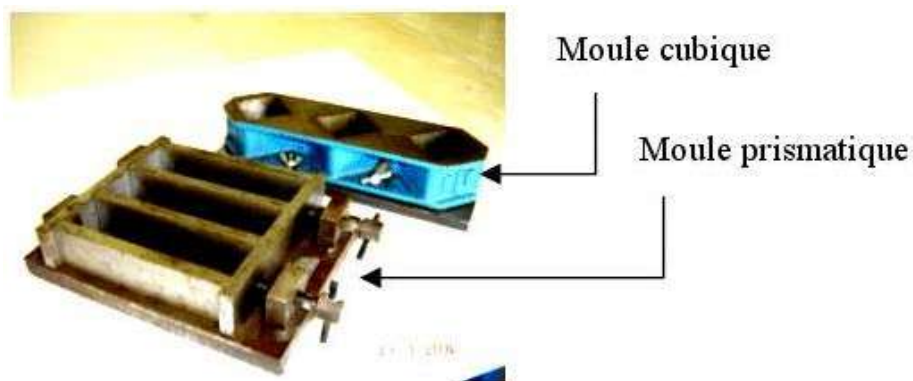


Figure 4.7 : Moule des éprouvettes de mortier.

Les éprouvettes sont soumises à des tests de résistance d'abord en traction par flexion, puis en compression. Les valeurs de résistance, que ce soit en traction par flexion ou en compression, augmentent approximativement de manière logarithmique avec le temps (entre 1 et 28 jours).

4.5.3.1. Mesure de la résistance à la traction par flexion :

La résistance à la traction par flexion des mortiers a été mesurée en utilisant des essais de flexion à trois points sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, avec une vitesse de chargement de 50 N/s .

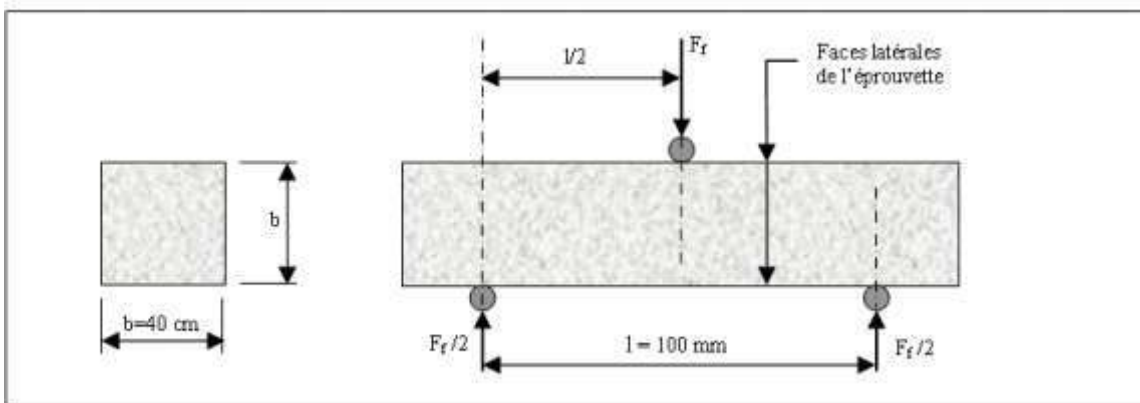


Figure 4.8 :Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

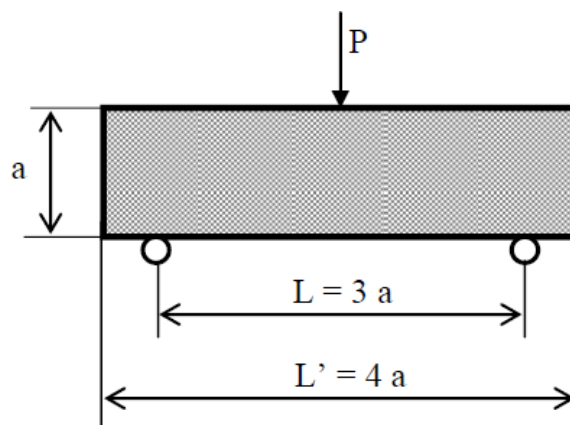


Figure 4.9 :Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

La formule de la Résistance à la Déformation Maximale (RDM) pour le calcul de la contrainte de flexion est exprimée de la manière suivante :

$$R_f = \frac{M}{I} y$$

Avec :

M : moment de flexion, $M = \frac{PL}{4}$ (L = 3a)

I : moment d'inertie de la section transversale, $I = \frac{bh^3}{12} = \frac{a^4}{12}$

Y : distance de la fibre la plus éloignée à l'axe neutre, $y = \frac{a}{2}$ d'où : $R_f = \frac{9P}{2a^2}$

Où :

R_f : est la résistance à la flexion, en newtons par millimètre carré (MPa);

a : est le côté de la section carrée du prisme, en millimètres;

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

NB : Les performances mécaniques des mortiers (similaires à celles des bétons) sont influencées par de nombreux paramètres : la nature et le dosage du ciment, le rapport eau/ciment, la granulométrie et la nature du sable, l'énergie de malaxage et les conditions de mise en œuvre, ainsi que la protection durant les premiers jours.

4.5.3.2. Mesure de la résistance à la compression :

Essai de la résistance à la compression La résistance à la compression des mortiers a été évaluée sur six demi-prismes obtenus à partir de l'essai de flexion. Ces essais ont été réalisés conformément à la norme NF EN 196-1. La contrainte de compression est calculée selon la formule suivante :

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

Avec :

F_c : Charge maximale de rupture (N).

A : l'aire de la section d'application de la force de compression (1600 mm²).

Exemple :

Déterminer la résistance à la traction et à la compression d'un ciment portland à 28 jours coulé sur une éprouvette prismatique (4×4×16) cm. Sachant que les valeurs de l'effort affiché sur le comparateur de la presse et de 2000N pour la flexion et 45000 pour la compression.

- La résistance à la traction $R_f = \frac{9P}{2a^2} = \frac{9 \times (2000)}{2 \times (40)^2} = 5.62 \text{ MPa}$

- La résistance à la compression $R = \frac{F_c}{c \cdot a} = \frac{45000}{1600} = 28.12 \text{ Mpa}$.

4.5.4 Retraits et gonflements :

Les retraits sont mesurés sur des prismes de mortier 1/3 de dimensions 4x4x16 cm, équipés de plots à leurs extrémités, puis conservés après démoulage dans une enceinte à 20 °C et à 50 % d'humidité relative. Le mortier présente un retrait plus rapide que la pâte pure, et ce retrait est de 2 à 3 fois inférieur à celui de la pâte pure contenant le même ciment.

Le gonflement des mortiers, qui peut se produire lorsqu'ils sont immergés dans l'eau, est évalué sur les mêmes éprouvettes de 4x4x16 cm conservées à 20 °C. En général, ces gonflements sont assez faibles.

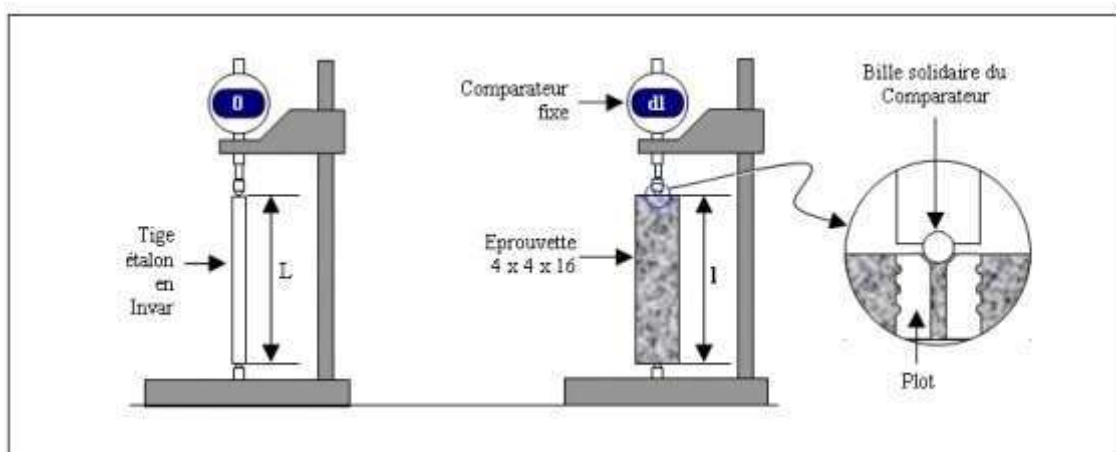


Figure 4.10 : Appareillage pour la mesure du retrait.

Remarques importantes à prendre en compte :

- Le mortier doit être utilisé immédiatement après son mélange, avant le début de sa prise.
- Tout mortier qui a commencé à durcir ou qui a séché ne peut plus être utilisé.
- Il est strictement interdit de réutiliser du mortier déjà mélangé.
- La planéité des surfaces finies ne doit pas présenter une déviation supérieure à 5 mm sur une règle de 2 mètres.

Références

1. Matériaux Volume 1, Propriétés, applications et conception : cours et exercices : Licence 3, master, écoles d'ingénieurs, Edition Dunod, 2013.
2. Adjuvants du béton, Afnor, 2012.
3. 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, Casteilla, 2009.
4. Les propriétés physico-chimiques des matériaux de construction : matière & matériaux, propriétés rhéologiques & mécaniques, sécurité & réglementation, comportement thermique, hygrosopique, acoustique et optique, Eyrolles, 2012.
5. - **Réactivité chimique.** [Référence : Neville, A. M. (2011). Properties of concrete. Pearson Education.]
- **Réactivité avec l'eau et l'humidité** : [Référence : Matar, J. M., & Habert, G. (2017). Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation. Journal of Cleaner Production, 142, 404-416.]
- 6- **Résistance à la compression** : [Référence : Neville, A. M. (2011). Properties of concrete. Pearson Education.]
- 7- **Résistance à la traction:** [Référence : Gere, J. M., & Timoshenko, S. P. (1991). Mechanics of materials. PWS-Kent Pub. Co.]
- 8- **Résistance à la flexion** : [Référence : Hibbeler, R. C. (2013). Mechanics of materials. Pearson.]
- 9- **Ductilité** : [Référence : Timoshenko, S. P., & Gere, J. M. (1972). Theory of elastic stability. McGraw-Hill.]
- 10 -**Module d'élasticité** : [Référence : Beer, F. P., & Johnston, E. R. (2009). Mechanics of materials. McGraw-Hill Higher Education.]
- 11- Neville, A. M. (2011). Properties of concrete. Pearson Education.
- 12- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2006). Concrete: Microstructure, properties, and materials. McGraw-Hill.

- 13- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). Concrete. Prentice Hall.
- 14- DELISLE J.P., ALOU F., « Matériaux de construction 1 », Lausanne, octobre 1978.
- 15- JAMAL M., BOULAIDI A., « Rapport bibliographique sur la relation entre le génie civil et la géologie : Matériaux de Construction », Université Mohammed Ier, faculté des sciences – OUJDA -, 2014.
- 15- DREUX G., FESTA J., « Nouveau guide du béton et de ses constituants » Huitième Editions Eyrolles. 1998.
- 16- Guide pratique du béton, « Concevoir et mettre en oeuvre des bétons durables ». Editeur : Holcim (Suisse) SA , 6ème Edition 2015.
- 17- BARON J. et SAUTREY R., « Le béton hydraulique », Paris, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 560 p., (1995).
- 18- COLLECTION TECHNIQUE CIMBÉTON G10, Fiches techniques, Tome1 : « Les constituants des bétons et des mortiers», Édition septembre 2005.
- 19- NEVILLE A.M., «Propriétés des bétons». Paris, Editions Eyrolles, 824 p., 2000.