



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi –Tébessa –
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE



Polycopié de Cours

Matière : Matériaux de Construction 01

Spécialité : Génie civil et Travaux public

Niveau : 2^{eme} Année

Réaliser par : Dr. ABDERRAHMANI Sifeddine

Année universitaire : 2025/2026

INTRODUCTION

Le présent polycopié intitulé «**Matériaux de Construction 01** », qui s'adresse aux étudiants de **deuxième année ST filière de génie civil et travaux public**.

Le polycopié est rédigé de manière simplifiée avec des notions afin que l'étudiant puisse assimiler le contenu du cours.

Le polycopié est rédigé en respectant le programme élaboré par le ministère Algérien de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique, il est composé de quatre chapitres.

Le contenu du premier chapitre concerne une introduction générale sur les matériaux de construction, la classification et propriétés des matériaux de construction.

Le chapitre suivant est basé sur les granulats : Définition et rôle des granulats pour les mortiers et les bétons, Les type de granulats, Texture et forme des granulats et Les caractéristiques des granulats. Au chapitre 3ème on s'intéresse à l'étude des liants aériens (chaux aérienne) et les liants hydrauliques (les ciments portland) avec leurs constituants principaux et aussi on a abordé les différents types d'additions minérales employées en cimenterie et leurs apports techniques. Enfin, en 4ème chapitre, on aborde la composition, les différents types de mortiers (mortier de chaux, mortier de ciment), les caractéristiques principales, l'emploi dans les chantiers, Types de mortiers en fonction de dosage de liant, propriétés et méthodes de préparation des mortiers.

SOMMAIRE

Chapitre 1

Généralités et Propriétés des matériaux de construction

1.1	Définitions	1
1.2	Choix des matériaux de construction	1
1.2.1	Type de construction	1
1.2.2	Contraintes environnementales	2
1.2.3	Budget	2
1.2.4	Esthétique	2
1.2.5	Durabilité	2
1.2.6	Impact environnemental	2
1.2.7	Performances	2
1.3	Classification des matériaux de construction	2
1.3.1	Classification selon l'origine	3
1.3.2	Classification selon la composition	4
1.3.3	Classification selon les propriétés	4
1.3.3	Classification selon la réaction au feu	5
1.4	Propriétés de matériaux	6
1.4.1	Propriétés physiques	6
1.4.1.1	La densité	6
1.4.1.2	La masse volumique apparente	7
1.4.1.3	La masse volumique absolue	7
1.4.1.4	Porosité et compacité	8
1.4.1.5	1.4.1.5 L'humidité	9
1.4.1.6	Capacité d'absorption d'eau massique « Ab »	9

1.4.2	Les propriétés chimiques	10
1.4.3	Les propriétés mécaniques	10
1.4.4	Les Propriétés thermiques	14
1.5	Informations complémentaires sur les matériaux de construction	16
1.5.1	Propriétés acoustiques	16
1.5.2	Durabilité et vieillissement	17
1.5.3	Matériaux écologiques et innovants	17
1.5.4	Normes et réglementation	17

Chapitre 2

Caractéristiques des granulats

2.1	Définition et rôle des granulats pour les mortiers et les bétons	19
2.1.1	Définition	19
2.1.2	Les dimensions nominales des granulats	19
2.1.3	Définition des termes	20
	2.1.3.1 Classes granulaire	20
	2.1.3.2 Granulat élémentaire	20
	2.1.3.3 Granulat composé	20
2.2	Les types de granulats	20
2.2.1	Les granulats naturels	20
	2.2.1.1 Les granulats alluvionnaires	21
	2.2.2.2 Les granulats concassés	22
2.2.2	Les granulats artificiels	24
2.3	Texture et forme des granulats	26
2.4	Les caractéristiques des granulats	27
2.4.1	Les caractéristiques physiques des granulats	27

2.4.1.1	La masse volumique	27
2.4.1.2	La compacité	27
2.4.1.3	La teneur en eau	28
2.4.1.4	La porosité	28
2.4.1.5	propreté des granulats	28
2.4.2	Les caractéristiques mécaniques des granulats	29
2.4.2.1	L'essai Los Angeles	29
2.4.2.2	L'essai-Deval	31
2.4.2.3	L'essai micro-Deval	32
2.4.3	Les Caractéristiques géométriques des granulats	32

Chapitre 3

Les liants

3.1	Introduction	38
3.2	Liants aériens (Chaux grasse)	38
3.2.1	Fabrication	39
3.2.2	Propriétés principales de la chaux grasse	42
3.2.3	Utilisation de la chaux grasse dans le bâtiment	43
3.3	Liants hydraulique (ciment portland)	44
3.3.1	Définition	44
3.3.2	Bref historique du ciment	44
3.3.3	Fabrication du ciment	45
3.3.4	Ajouts cimentaire	48
3.3.4.1	Avantages des ajouts cimentaires	49
3.3.4.2	Classification et Caractéristiques des ajouts cimentaires	49
3.3.5	Types de ciments en fonction de leur composition	51

3.3.5.1	Ciment portland CPA-CEM I	51
3.3.5.2	Ciment portland composé C.P.J-CEM II	52
3.3.5.3	Ciment de haut fourneau CHF-CEM III	52
3.3.5.4	Ciment pouzzolanique CPZ-CEM IV	53
3.3.5.5	Ciment au laitier et aux cendres CLC-CEM V	53
3.3.5.6	Autre types de ciment	54
3.3.5.7	Critères de choix du ciment	54
3.3.6	Propriétés du ciment	56
3.3.6.1	Propriétés physiques	56
3.3.6.2	Propriétés mécaniques	57
3.3.7	Classification des ciments en fonction de leur résistance nominale	57

Chapitre 4

LES MORTIERS

4.1	Définition	59
4.2	Composition	59
4.3	Les différents types de mortiers	62
4.3.1	Les mortiers de ciment	62
4.3.2	Les mortiers de chaux	62
4.3.3	Les mortiers bâtards	63
4.3.4	Mortiers fabriqués sur chantier	64
4.3.5	Mortier industriel	64
4.4	Les emplois des mortiers	64
4.4.1	Les joints de maçonnerie	64
4.4.2	Les enduits	65

4.4.3	Les chapes	66
4.4.4	Les scellements et les calages	66
4.5	Types de mortiers en fonction de dosage de liant	67
4.5.1	Mortier normal	67
4.5.2	Mortier maigre	67
4.5.3	Mortier gras	67
4.6	Formulation (fabrication) des mortiers	68
4.6.1	Dosage en volume	68
4.6.2	Dosage en poids	68
4.7	Propriétés	69
4.7.1	Mortier plastique	69
4.7.2	Mortier durci	72
4.8	Méthodes de préparation des mortiers	74
4.8.1	Préparation manuelle	74
4.8.2	Préparation mécanique	75

Chapitre 1 :

Généralités et Propriétés des matériaux de construction

1.1 Définitions

On appelle matériaux de construction tous les éléments employés pour la réalisation des structures en béton armé ou en métal, qui sont fréquemment utilisés dans l'univers des travaux publics (routes, ponts, aérodromes... etc.).



Figure 1.1 : Matériaux de construction

1.2 Choix des matériaux de construction

Le choix des matériaux de construction est une phase déterminante dans tout projet de bâtiment. Cela dépend de divers éléments, dont la nature de la construction, les restrictions environnementales, le budget et les goûts esthétiques. Il est crucial d'évaluer les points forts et les points faibles de chaque matériau pour effectuer une sélection judicieuse et appropriée à vos exigences.

Facteurs à considérer pour le choix des matériaux :

1.2.1 Type de construction

Maison individuelle

Les matériaux courants sont le parpaing, la brique, le bois, et le béton cellulaire.

Immeuble collectif

Le béton, l'acier, et les blocs de béton sont souvent utilisés.

Bâtiment industriel

L'acier, le béton précontraint, et les matériaux composites sont privilégiés pour leur résistance et leur durabilité.

1.2.2 Contraintes environnementales**Région**

Dans les zones sismiques, on privilégiera des matériaux légers et souples comme le bois ou le béton cellulaire. Dans les zones soumises à des intempéries, on optera pour des matériaux résistants à l'humidité et aux variations de température.

Climat

Dans les régions froides, l'isolation thermique est primordiale, tandis que dans les régions chaudes, la ventilation et la fraîcheur sont essentielles.

1.2.3 Budget

Les matériaux de construction ont des prix variables. Il est important de définir un budget précis et de choisir des matériaux adaptés à vos moyens financiers.

1.2.4 Esthétique

Les matériaux ont des aspects visuels différents. Il est important de choisir des matériaux qui s'intègrent harmonieusement au paysage et qui plaisent à vos goûts.

1.2.5 Durabilité

Certains matériaux sont plus durables que d'autres. Il est important de choisir des matériaux qui résisteront au temps et aux agressions extérieures.

1.2.6 Impact environnemental

Le choix de matériaux écologiques et durables est de plus en plus important. On peut opter pour des matériaux recyclés, recyclables, ou issus de sources renouvelables.

1.2.7 Performances

Les matériaux ont des propriétés mécaniques, thermiques, acoustiques, et esthétiques différentes. Il faut choisir des matériaux qui répondent aux exigences spécifiques du projet.

1.3 Classification des matériaux de construction

Les matériaux de construction peuvent être classés selon plusieurs critères, notamment leur origine (naturels ou synthétiques), leur composition (métalliques, organiques, minéraux, composites), leurs propriétés (résistance, isolation, étanchéité) et leur réaction au feu.

1.3.1 Classification selon l'origine

Matériaux naturels : Issus de la nature, comme le bois, la pierre, l'argile, le sable.



Figure 1.2 : Matériaux naturels

Matériaux synthétiques : Produits artificiels, comme les plastiques (PVC, polyéthylène), les résines, les métaux.



Figure 1.3 : Matériaux synthétiques

1.3.2 Classification selon la composition

Matériaux métalliques

Métaux ou alliages de métaux (acier, aluminium, cuivre).

Propriétés : bonne conductivité thermique et électrique, résistance mécanique élevée, malléabilité.

Usages : construction (poutres en acier), transport (carrosseries en aluminium), câbles électriques (cuivre).

Matériaux organiques

D'origine végétale ou animale (bois, laine, cuir) ou synthétiques (plastiques).

Propriétés : légers, souvent isolants thermiques et électriques, biodégradables (naturels) ou résistants à la corrosion (plastiques).

Usages : meubles et charpentes (bois), vêtements (laine, cuir), emballages et objets quotidiens (plastiques).

Matériaux minéraux

Céramiques (briques, tuiles), verre, béton.

Propriétés : grande dureté, résistance à la chaleur et à la corrosion, mais fragiles à la traction.

Usages : construction (briques, béton), vitrages et bouteilles (verre), revêtements (céramiques).

Matériaux composites

Combinaison de deux ou plusieurs matériaux (béton armé, matériaux composites à fibres).

Propriétés : réunissent les avantages de chaque matériau, grande résistance et légèreté.

Usages : aéronautique (fibre de carbone), sports (raquettes, skis), bâtiment (béton armé).

1.3.3 Classification selon les propriétés

Résistance mécanique

Capacité à supporter des contraintes (tension, compression, flexion) sans se déformer ou se rompre. Elle détermine la solidité et la durée de vie d'un matériau.

Isolation thermique

Capacité à réduire les échanges de chaleur entre deux milieux, garantissant le confort thermique et une meilleure efficacité énergétique.

Isolation phonique

Capacité à atténuer le bruit et à limiter la propagation des sons d'un espace à un autre.

Étanchéité

Résistance à l'infiltration d'eau, d'air ou de poussière, offrant une protection contre les agressions extérieures.

Durabilité

Aptitude à résister au vieillissement, à la corrosion et aux agressions climatiques ou chimiques au fil du temps.

Légèreté

Avantage lié à la faible densité, facilitant la manipulation, le transport et réduisant les charges dans la construction et l'industrie.

Conductivité électrique

Capacité d'un matériau à laisser passer ou à bloquer le courant électrique, selon qu'il est conducteur ou isolant.

Facilité de mise en œuvre

Simplicité de fabrication, d'assemblage, de découpe ou de recyclage, influençant directement les coûts et les usages possibles.

1.3.4 Classification selon la réaction au feu**Incombustibles**

Ne brûlent pas, même exposés directement au feu.

Exemples : pierre, brique, béton, acier, verre.

Combustibles

Brûlent plus ou moins facilement selon leur nature et leur traitement.

Exemples : bois, plastique, textiles.

Classes de réaction au feu (selon la norme européenne EN 13501-1)

A1 : Incombustible (aucune contribution au feu).

A2 : Contribution très limitée.

B : Faible contribution au feu.

C : Contribution moyenne.

D : Contribution significative.

E : Contribution élevée, inflammables facilement.

F : Non classé (pas de performance garantie).

1.4 Propriétés de matériaux

Les propriétés principales des matériaux peuvent être divisées en plusieurs groupes tels que :

1.4.1 Propriétés physiques

Qui évaluent le comportement des matériaux sous l'influence de la température, de l'humidité (la densité, la masse volumique, la porosité, l'absorption, la perméabilité, le retrait (le gonflement), etc.).

1.4.1.1 La densité

La densité se définit comme le niveau de remplissage de la masse d'un objet par la matière solide. Elle est déterminée en divisant la densité de ce matériau par celle de l'eau à une température de 20°C. Elle est formulée sans mention d'unité.

- Densité absolue : est le rapport de la masse volumique absolue à la masse d'un égal volume d'eau, c'est un rapport sans dimension :

$$D_{ab} = \frac{\gamma_{ab}}{1000}$$

- Densité apparente relative à la masse volumique apparente :

$$D_{ap} = \frac{\gamma_{ap}}{1000}$$

1.4.1.2 La masse volumique apparente

Il s'agit de la masse d'un matériau par unité de volume apparent dans son état naturel (incluant les vides et les capillaires). Elle est formulée en (gr/cm^3 ; kg/m^3 ; T/m^3).

La formule ci-dessous permet de calculer la densité d'un matériau :

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

Ou :

M_s : Masse d'un corps sèche.

V_{ap} : Volume apparente



Figure 1.4 : Mesure de La masse volumique apparente

1.4.1.3 La masse volumique absolue

Il s'agit de la masse d'un objet par unité de volume pur de matière (volume occupé uniquement par la matière, sans considérer les vides et les pores). Elle est exprimée en (g/cm^3 , kg/m^3 ou T/m^3). La méthode de calcul de la masse volumique absolue d'une substance est décrite dans la figure 1.5.

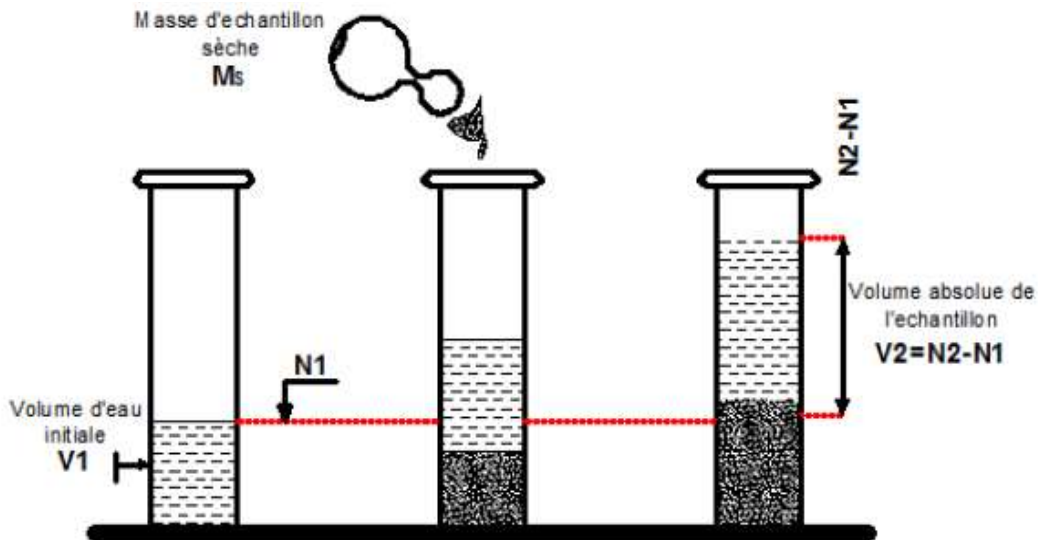


Figure 1.5 : Mesure de la masse volumique absolue.

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

1.4.1.4 Porosité et compacité

La porosité représente le quotient du volume vide sur le volume total de la substance.

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

La compacité représente le quotient du volume solide sur le volume total de la substance.

$$C = \frac{V_{solide}}{V_{total}} \times 100(\%)$$

La relation entre la porosité et la compacité est formulée comme suit : $P+C=1$

On exprime fréquemment la porosité et la compacité en pourcentage (%). Ainsi, leur total est de 100%.

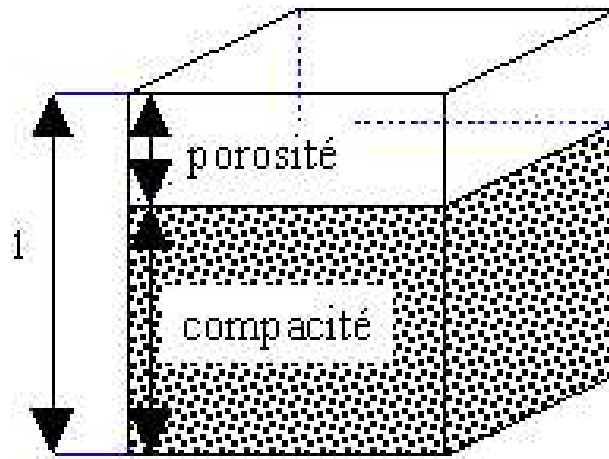


Figure 1.6 : La relation entre la porosité et la compacité

1.4.1.5 L'humidité

L'humidité est l'une des caractéristiques essentielles des matériaux de construction. Il s'agit de la quantité réelle d'eau présente dans un matériau qui se trouve dans les pores. Habituellement, l'humidité est indiquée par la lettre W et mesurée en pourcentage (%). On peut évaluer l'humidité de divers matériaux en se servant de la formule ci-après :

$$W = \frac{G_h - G_s}{G_s} \times 100$$

Où

G_s : La masse sèche d'échantillon (après passage à l'étuve)

G_h : La masse humide d'échantillon.

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

L'aptitude à l'absorption d'eau en masse (Ab) représente la quantité d'eau qu'un matériau est capable d'absorber en fonction de sa masse sèche. Elle est exprimée en pourcentage et reflète la différence de masse entre le matériau saturé et le matériau sec, divisée par la masse du matériau à l'état sec. Ce critère est essentiel pour évaluer la longévité et le rendement d'un matériau, notamment dans le domaine de la construction.

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

Avec :

- M_{sec} : Masse du matériau à l'état sec.
- M_{sat} : Masse du matériau à l'état saturé



Figure 1.7 : Capacité d'absorption d'eau massique

1.4.2 Les propriétés chimiques

Les caractéristiques chimiques définissent la stabilité chimique d'un matériau, c'est-à-dire sa capacité à résister aux effets chimiques des acides ou aux influences atmosphériques telles que l'humidité, la température, etc.

1.4.3 Les propriétés mécaniques

Les caractéristiques mécaniques d'un matériau déterminent sa réaction face à des forces ou des contraintes. Parmi elles, on retrouve la ténacité, la dureté, la rigidité, l'aptitude à la déformation, l'élasticité et la résilience, entre autres. Ces attributs sont essentiels pour choisir et utiliser les matériaux dans différentes applications, y compris en ingénierie.

Principales propriétés mécaniques :

Résistance

Capacité du matériau à résister à des contraintes, comme la traction ou la compression.

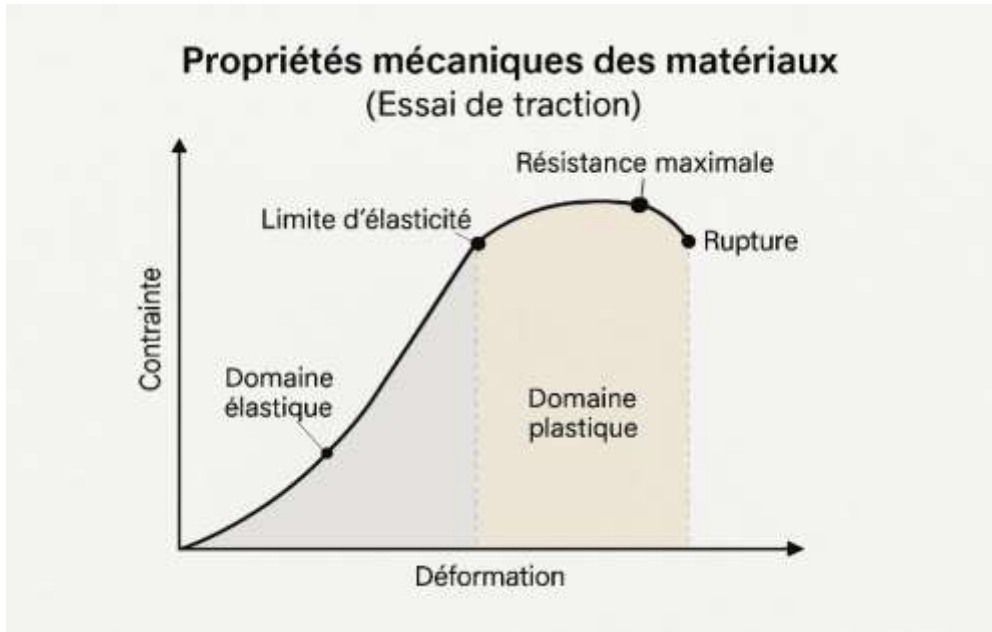


Figure 1.8 : Essai de traction

Dureté

Résistance du matériau à la pénétration ou au rayement.

Essai de dureté Vickers

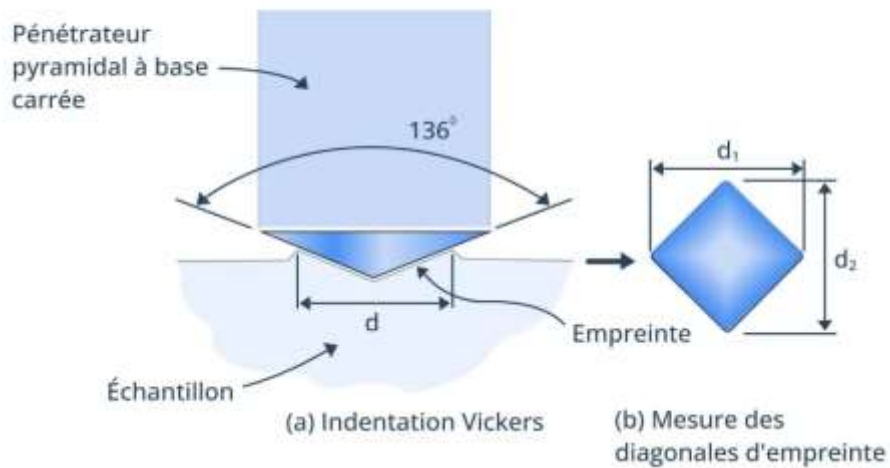


Figure 1.9 : Essai de dureté

Rigidité

Capacité du matériau à résister à la déformation sous contrainte.

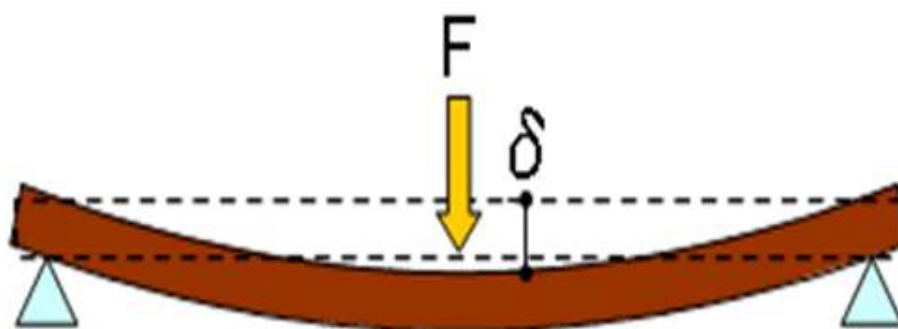


Figure 1.10 : Rigidité

Ductilité

Capacité du matériau à se déformer sans se rompre, généralement par étirement.

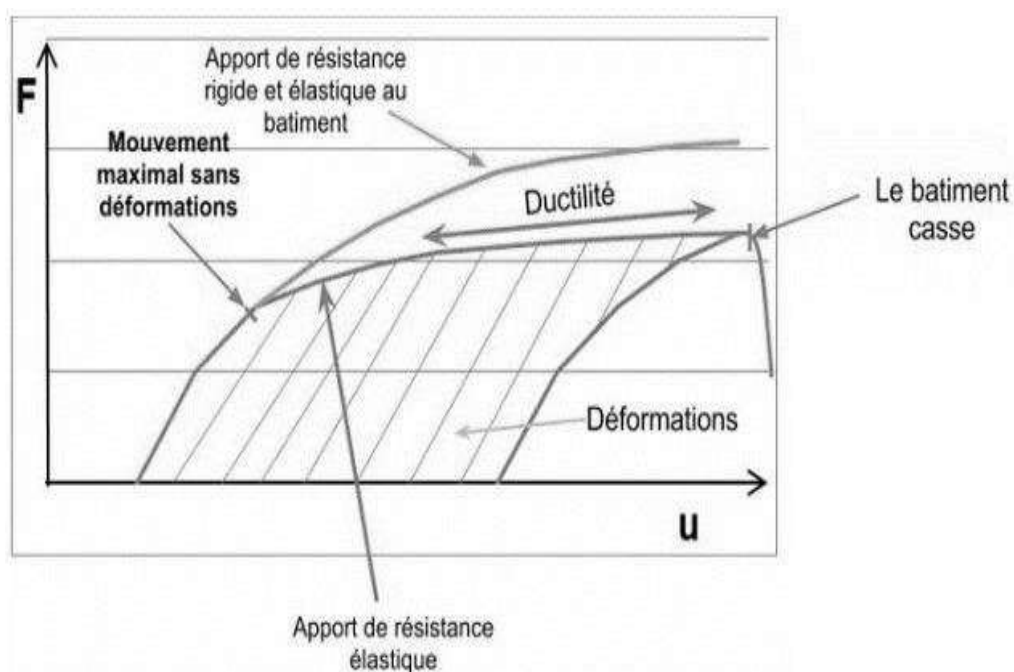


Figure 1.11 : Ductilité

Elasticité

Capacité du matériau à retrouver sa forme initiale après déformation.

L'élasticité est un coefficient qui s'obtient par la formule suivante :

$$E D P = \frac{\frac{\Delta D}{D}}{\frac{\Delta P}{P}}$$

Exemple : Le demande d'un produit augmente de 10% lorsque son prix baisse de 5%. L'élasticité prix de ce produit est donc de $+10\% / -5\% = -2$

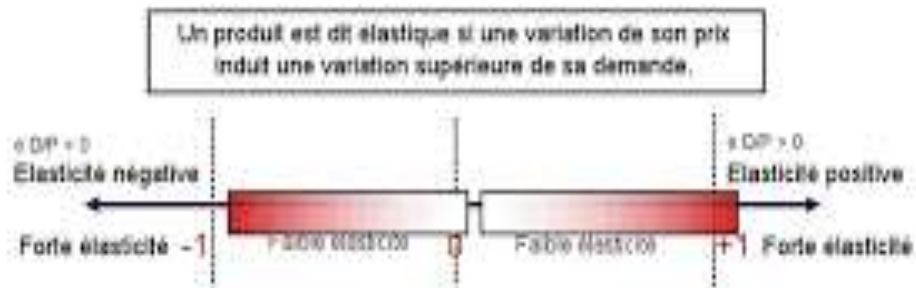


Figure 1.12 : Elasticité

Résilience

Capacité du matériau à résister aux chocs et à se déformer sans se rompre.

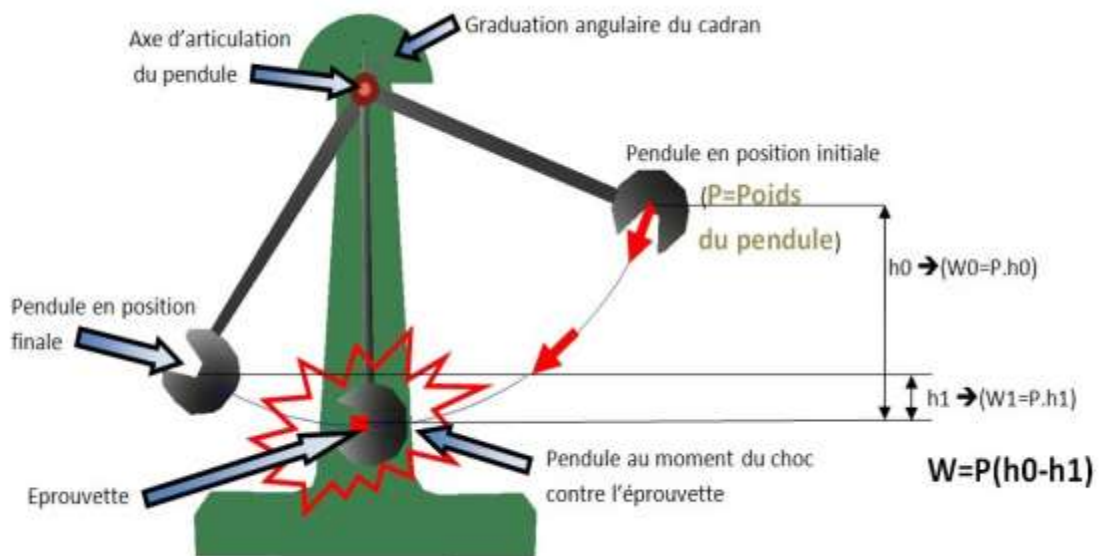


Figure 1.13 : Résilience

Ténacité

Résistance du matériau à la propagation de fissures.



Figure 1.15 : Ténacité

1.4.4 Les Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques d'un matériau définissent sa réaction à la chaleur, y compris sa capacité à transmettre, retenir et se dilater lors de variations de température. Ces caractéristiques sont cruciales pour une multitude d'applications, de l'isolation thermique à la création de pièces électroniques.

Voici une liste de certaines des propriétés thermiques majeures :

Conductivité

thermique

Il s'agit de la faculté d'un matériau à conduire la chaleur. Un matériau doté d'une grande conductivité thermique (telle que le métal) facilite la transmission de la chaleur, alors qu'un matériau à faible conductivité thermique (comme le bois) sert d'isolant.

* Symbole : λ

* Unité : Watt par mètre-kelvin (W/m·K)

* Exemple : Le cuivre (~400 W/m·K) conduit très bien la chaleur, tandis que la laine de verre (~0,04 W/m·K) est un isolant efficace.

Chaleur spécifique

Il s'agit de la quantité de chaleur requise pour augmenter la température d'une masse unitaire d'un matériau d'un degré Celsius.

* Symbole : c

* Unité : Joule par kilogramme-kelvin (J/kg·K)

* Exemple : L'eau ($\sim 4186 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$) possède une chaleur spécifique élevée, ce qui en fait un excellent accumulateur de chaleur.

Dilatation thermique

C'est la propension d'un matériau à modifier son volume lorsqu'il est soumis à un changement de température.

* Symbole : α (coefficient de dilatation linéaire)

* Unité : K^{-1}

* Exemple : L'acier ($\sim 12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) se dilate lorsqu'il chauffe, un facteur important dans la conception des ponts et des rails.

Capacité thermique massique

Il s'agit de la faculté d'un matériau à emmagasiner de l'énergie sous forme de chaleur.

* Relation : $C = m \cdot c$

* Unité : Joule par kelvin (J/K)

* Exemple : Un objet en fonte peut stocker beaucoup de chaleur avant de se refroidir.

Résistivité thermique

Il s'agit de l'antithèse de la conductivité thermique, représentant l'aptitude d'un matériau à résister au passage de la chaleur.

* Formule : $R = e/\lambda$ (épaisseur / conductivité)

* Unité : $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

* Exemple : Les murs isolants sont classés par leur résistance thermique R : plus R est grand, meilleure est l'isolation.

Effusivité thermique

Ce terme désigne la rapidité avec laquelle un matériau absorbe ou émet de la chaleur lorsqu'il est en contact avec une source thermique.

Formule : $e = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}$

Unité : $(\text{J} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$

Exemple : Le carrelage semble plus froid que le bois car il absorbe plus vite la chaleur de la peau

La connaissance des caractéristiques thermiques est essentielle dans divers secteurs comme l'ingénierie, la construction, l'aéronautique et l'agroalimentaire, puisqu'elle facilite la création de systèmes performants et sécurisés. Par exemple, dans le domaine de la construction, on fait appel à des matériaux isolants afin de réduire les déperditions thermiques. À l'inverse, dans l'industrie électronique, on recourt à des matériaux dissipateurs de chaleur pour prévenir la surchauffe des composants.

Pour faire court, les propriétés thermiques sont des attributs essentiels des matériaux qui conditionnent leur réaction à la chaleur, et par conséquent, influencent leur déploiement dans différentes applications.

1.5 Informations complémentaires sur les matériaux de construction

1.5.1 Propriétés acoustiques

Les propriétés acoustiques des matériaux de construction définissent leur capacité à absorber, réfléchir ou transmettre le son. Elles jouent un rôle essentiel dans la conception des bâtiments, car elles influencent directement le confort sonore des occupants.

Isolation phonique : permet de limiter la propagation des bruits aériens (voix, musique) ainsi que des bruits d'impact (chocs, pas).

Absorption acoustique : capacité à réduire la réverbération et l'écho dans les espaces clos, ce qui améliore la qualité sonore et l'intelligibilité de la parole.

Réflexion acoustique : certains matériaux comme le béton, le verre ou le métal réfléchissent fortement les sons et peuvent générer des effets d'écho.

Transmission sonore : dépend de la densité, de l'épaisseur et de la structure interne du matériau, influençant la quantité de son qui le traverse.

Exemples de matériaux :

Matériaux absorbants : laine de roche, laine de verre, panneaux de fibres de bois, mousses acoustiques.

Matériaux isolants : béton lourd, briques creuses, cloisons doubles avec vide d'air.

Matériaux réfléchissants : béton, verre, métal, utilisés dans certaines salles pour amplifier ou diffuser le son.

Domaines d'application

Logements collectifs : réduire la transmission des bruits entre appartements.

Studios d'enregistrement : maîtriser totalement l'acoustique interne.

Salles de spectacle et auditoriums : équilibre entre absorption et réflexion pour une qualité sonore optimale.

Espaces de bureaux ouverts : limiter le bruit ambiant pour favoriser la concentration.

1.5.2 Durabilité et vieillissement

La durabilité des matériaux désigne leur capacité à résister aux agressions du temps et de l'environnement. Les principaux phénomènes de vieillissement sont :

- Résistance au gel/dégel.
- Résistance à la corrosion (acier, béton armé).
- Vieillissement sous l'action des UV et des intempéries. La prise en compte de ces facteurs est cruciale pour garantir la longévité des ouvrages.

1.5.3 Matériaux écologiques et innovants

Avec l'évolution des normes environnementales, l'utilisation de matériaux durables et écologiques est de plus en plus privilégiée :

- Matériaux biosourcés (chanvre, liège, bambou).
- Bétons écologiques (béton bas carbone, béton recyclé).
- Matériaux intelligents : béton auto-cicatrisant, matériaux à mémoire de forme. Ces innovations visent à réduire l'empreinte carbone et à améliorer la performance énergétique des bâtiments.

1.5.4 Normes et réglementation

Les matériaux de construction doivent répondre à des normes de sécurité, de performance et de durabilité. Quelques références principales :

- Normes européennes (EN).
- Normes internationales (ISO).

- Classes de performance énergétique et environnementale (HQE, LEED, BREEAM).

Le respect de ces normes garantit la qualité et la fiabilité des ouvrages.

1.5.5 Tableaux récapitulatifs

Pour faciliter la comparaison des matériaux, on peut établir des tableaux synthétiques regroupant :

- Masse volumique, résistance mécanique, durabilité.
- Coût relatif des matériaux.
- Impact environnemental. Ces tableaux permettent de choisir rapidement le matériau le plus adapté selon les contraintes du projet.

Chapitre 02 :

Caractéristiques des granulats

2.1 Définition et rôle des granulats pour les mortiers et les bétons

2.1.1 Définition

Les granulats désignent les particules de sol dont la taille varie de 0,08 mm à 80 mm. Les fillers, farines ou fines se trouvent en dessous de 0,08 mm, tandis que les moellons ou galets sont au-dessus de 80 mm.

- Les granulats sont des constituants inertes qui participent à la fabrication des mortiers et bétons, servant de base structurante.
- Les granulats, en général, sont moins susceptibles de se déformer que la matrice de ciment. Ils renforcent la sturdiness de la matrice en contrant l'expansion des microfissures générées dans la pâte de ciment par le processus de rétraction.
- Les résistances mécaniques des mortiers et bétons sont conditionnées par les caractéristiques de ces liaisons qui se produisent à l'interface entre le granulat et la pâte de ciment.

2.1.2 Les dimensions nominales des granulats

Représente la longueur du côté formé par les trous des tamis. Ces dimensions nominales (**d ou D, en mm**) sont normalisées comme ensuite :

**0,080 0,100 0,125 0,160 0,200 0,250 0,315 0,400 0,500 0,630 0,800 1,000 1,250 1,600
2,000 2,500 3,150 4,000 5,000 6,300 8,000 10,00 12,50 16,00 20,00 25,00 31,50 40,00
50,00 63,00 80,00**

- Selon la norme NFP 18.101, la classification habituelle des granulats basée sur leurs dimensions nominales est précisée, et les catégories suivantes peuvent être observées :

APPELATION		MAILLE DES TAMIS
Fillers, farines ou fines		< 0,08 mm
Sables	- Fins	0,08 à 0,31
	- Moyens	0,31 à 1,25
	- Gros	1,25 à 5,00
Gravillons	- Fins	5,00 à 8,00
	- Moyens	8,00 à 12,50
	- Gros	12,50 à 20,00

Cailloux	- Fins	20,00 à 31,50
	- Moyens	31,50 à 50,00
	- Gros	50,00 à 80,00
Moellons et galets		> 80 mm

2.1.3 Définition des termes

2.1.3.1 Classes granulaire

Un granulat est défini, sur le plan granulaire, par sa classe d/D ; ce qui implique que (d) représente la dimension minimale et (D) la dimension maximale des grains (par exemple : 20/40 mm).

2.1.3.2 Granulat élémentaire

est un agrégat complètement arrêté par le tamis D(i) ; et qui traverse intégralement le tamis D(i+1) ; où D(i) et D(i+1) représentent des dimensions nominales successives.

2.1.3.3 Granulat composé

Il s'agit d'un mélange de plusieurs granulats élémentaires distincts, tous les granulats commerciaux sont classés comme des granulats composés.

2.1.3.4 Granulat tout-venant

C'est un granulat brut, obtenu directement du concassage ou de l'extraction, sans tri préalable par classes granulaires précises. Il contient donc un ensemble hétérogène de grains de différentes dimensions, allant des plus fins aux plus grossiers. Ce type de granulat est souvent utilisé pour les couches de fondation ou les remblais, mais n'est pas recommandé pour les bétons de qualité nécessitant une composition granulaire contrôlée.

2.2 Les type de granulats

2.2.1 Les granulats naturels

- Proviennent de roches meubles ou compactes extraites sur place et n'ayant subi aucun traitement autre que mécanique.
- Indépendant de leur origine minéralogique on classe les granulats naturels en deux catégories : - les granulats alluvionnaires ; - les granulats concassées.

2.2.1.1 Les granulats alluvionnaires

Les gravillons roulés, d'origine sédimentaire, ont acquis leur forme grâce à l'érosion. On peut distinguer les catégories suivantes parmi ce genre de granulats :

Les granulats de rivière

Ils sont issus de la séparation naturelle de différentes roches telles que : granites, gneiss, grès, etc. Les portions molles de ces roches se sont érodées, tandis que les parties plus résistantes ont subi une usure graduelle sous l'effet du courant. Ce phénomène entraîne une sélection naturelle des particules, en éliminant les plus fines. Ces granulats présentent généralement une bonne propreté, une forme arrondie et une surface relativement lisse, ce qui améliore la maniabilité du béton mais peut parfois réduire l'adhérence avec la pâte cimentaire. Leur granulométrie doit souvent être complétée pour obtenir un béton équilibré.

Les granulats de carrière

Ils proviennent du concassage de gisements rocheux ou de dépôts alluviaux. Ils présentent un taux de fines supérieur à celui des granulats de rivière, ainsi qu'une forme plus anguleuse. Cette angularité favorise une meilleure adhérence avec le ciment, mais peut réduire la maniabilité du béton. Ils offrent une grande diversité granulométrique et sont très utilisés dans le béton armé et le béton précontraint.

Les granulats de dunes

Constitués principalement de particules très fines, souvent siliceuses, transportées et déposées par le vent. Ils présentent une granulométrie uniforme, une forte teneur en fines et une forme arrondie. Leur utilisation est généralement déconseillée dans le béton structurel, sauf après un traitement (lavage, mélange avec d'autres granulats) pour corriger leur courbe granulométrique et améliorer leur compacité. Ils sont parfois employés dans la fabrication de mortiers ou comme matériau de remplissage.

Les granulats de mer

Issus du dragage marin, ils doivent impérativement être lavés pour éliminer les sels et les coquilles marines. La présence de chlorures et de sulfates peut provoquer la corrosion des armatures et des efflorescences en surface des ouvrages. Après un traitement adéquat, ils peuvent être intégrés dans le béton, notamment dans les régions côtières où les autres sources de granulats sont limitées.



Figure 2.1 : Granulats alluvionnaires

2.2.1.2 Les granulats concassés

Ils sont issus du processus de concassage, ce qui leur confère une forme angulaire. Ils sont issus de roches saines, solides, densément compactes, résistantes au gel et indestructibles. En raison du processus de concassage, ils renferment un plus grand nombre d'éléments fins que les granulats roulés, nécessitant donc davantage d'eau pour le gâchage. On peut distinguer les catégories suivantes parmi ce type de granulats :

Les basaltes

Roches éruptives très dures et denses, offrant une excellente résistance mécanique et une bonne durabilité. Ils conviennent très bien pour les bétons soumis à des fortes charges. Leur faible porosité réduit l'absorption d'eau.

Les calcaires

Susceptibles d'être attaqués par les acides. Les calcaires durs produisent d'excellents granulats concassés, mais ils ne sont pas adaptés pour les bétons dans des environnements agressifs (industriels ou marins). Certains calcaires tendres peuvent augmenter la porosité du béton.

Les granites

Roches cristallines très résistantes mais qui peuvent se dégrader par altération au fil du temps (action de l'eau, gel-dégel). Toutefois, les pierres solides, saines et non fissurées fournissent de bons granulats pour le béton, particulièrement dans les zones sèches.

Les grès

Les grès poreux et friables sont à éviter car ils se désagrègent facilement. Seuls les grès durs et compacts donnent de bons granulats. Leur texture influence l'adhérence avec la pâte de ciment.

Les marbres

Fournissent de très bons granulats esthétiques et résistants, souvent utilisés pour des bétons décoratifs (bétons polis, terrazzo). Cependant, leur coût élevé limite leur usage courant.

Les quartzs

Constitués de silice cristallisée, ils donnent des granulats extrêmement durs, résistants à l'usure et aux agents chimiques. Utilisés surtout dans des bétons spéciaux ou industriels.

Les porphyres

Fournissent un matériau dur et compact, surtout sous forme de gravier. Très adaptés aux bétons de haute résistance et aux chaussées.

Les gneiss

Roches métamorphiques offrant de bons granulats si elles ne sont pas trop fissurées. Leur utilisation dépend de leur degré de cohésion.

Les pouzzolanes

Roches volcaniques légères et poreuses. Elles peuvent être utilisées comme granulats légers pour alléger le béton ou comme ajout pouzzolanique dans le ciment, améliorant la durabilité et la résistance aux agents chimiques.

Les schistes

Fragiles et feuilletés, ils ne conviennent généralement pas à la fabrication du béton car ils se désagrègent facilement.



Figure 2.2 : Granulats de carrière

2.2.2 Les granulats artificiels

Qui proviennent de la transformation thermique des roches, de minerais, des sous-produits industriels (laitiers, ...).

- Le laitier

(Ou scorie de haut fourneau, résidu issu de la fusion des métaux) broyé et le laitier granulaire produit par un refroidissement à l'eau. Pour le laitier concassé, la densité apparente dépasse 1250 kg/m^3 , tandis que pour le laitier granulé, elle est d'environ 800 kg/m^3 . On utilise souvent ces granulats pour la fabrication de bétons routiers ou réfractaires, conformément aux normes : NFP 18.302 et NPF 18.306.

-Les cendrées et cendres volantes

Proviennent de chaudières industrielles à charbon. Elles sont utilisées comme additions minérales dans les bétons et les ciments. Leur incorporation améliore la maniabilité, réduit la chaleur d'hydratation et augmente la durabilité du béton, notamment sa résistance aux attaques chimiques (sulfates).

-Les briquillons

Issus du broyage de terre cuite, comme les vieilles briques provenant de démolition. En plus d'être un matériau recyclé, ils permettent de valoriser les déchets de démolition. Ils sont souvent employés comme granulats secondaires dans les bétons non structurels ou pour des couches de fondation routière. Leur utilisation contribue à une démarche de construction durable et d'économie circulaire.

- Les granulats lourds

Sont fabriqués à l'échelle industrielle et possèdent des caractéristiques de haute qualité. Ces granulats sont spécialement conçus pour certaines applications ou bien il s'agit de granulats très durs destinés à augmenter la résistance à l'usure des revêtements industriels. On les nomme : la barytine, la magnétite, la limonite, la pyrite de fer et les résidus ferreux tels que l'acier et la fonte, qui possèdent des densités variant de 4000 à 7000 kg/m³.

- Les granulats allégés

Ces granulats légers sont rendus plus légers par expansion ou frittage, et ils possèdent des propriétés très intéressantes en termes de résistance, d'isolation et de poids. Les matériaux usuels sont l'argile ou le schiste expansé et le laitier expansé, conformes aux normes : NFP 18.309 et 18.307. La densité de leur masse peut varier de 400 à 800 kg/m³ en fonction du type et de la taille des particules. Ils sont adaptés à la fois pour les bétons structuraux et les bétons présentant une bonne isolation thermique. Les bétons fabriqués à partir de ces granulats présentent une masse volumique variant de 1200 à 2000 kg/m³, ce qui entraîne un gain de poids significatif.

- les granulats très légers

Ils proviennent de sources végétales et organiques (comme la pierre ponce, le liège, etc.) tout autant que de matériaux minéraux (tels que le bois, le polystyrène expansé). Ces granulats possèdent une légèreté notable, variant de 20 à 100 kg/m³, ce qui permet d'obtenir des bétons d'une masse volumique comprise entre 300 et 600 kg/m³. Ils sont principalement utilisés pour l'isolation, mais également comme composants légers : blocs de remplissage, chape sur des planchers peu résistants, etc.



Figure 2.3 : Laitier granulé de haut fourneau

Laitier concassé de haut fourneau

2.3 Texture et forme des granulats

La maniabilité des bétons est influencée par la forme des granulats, celle qui se rapproche le plus d'une sphère étant préférable ; une forme inadaptée (aiguilles, plats) requiert un volume d'eau supérieur et peut entraîner des imperfections visuelles. (Consultez la figure 2.4)

La forme d'un granulat est définie par :

- Sa longueur L ,
- Son épaisseur E qui est le plus petit écartement d'un couple de plans tangents parallèles.
- Sa grosseur G .



Figure 2.4 : La forme des granulats.

2.4 Les caractéristiques des granulats

2.4.1 Les caractéristiques physiques des granulats

2.4.1.1 La masse volumique

Pour chaque granulat on peut déterminer une masse volumique absolue et une masse volumique apparente :

La masse volumique Absolu ($M_v \text{ abs.}$) – Évoque la masse correspondant à l'unité de volume absolu d'un objet, c'est-à-dire de la substance qui compose cet objet, sans prendre en considération le volume des espaces vides. Sa densité se situe entre 2500 et 2700 kg/m³.

La masse volumique apparente ($M_v \text{ app.}$)

Représente le poids de l'unité de volume visible d'un objet, y compris les espaces vides qu'elle contient. Sa densité se situe entre 1350 et 1550 kg/m³. On l'appelle toujours « la masse volumique en vrac », et elle est déterminée selon les procédures NFP 18.554 et NFP 18.555.

2.4.1.2 La compacité

Représente le rapport de la masse volumique apparente et la masse volumique absolue, donc :

$$C = \frac{M_{v \text{ app}}}{M_{v \text{ abs}}} \times 100(\%)$$

Donc, le pourcentage des vides est donné de la relation suivante :

$$V = (1 - C) \times 100(\%)$$

- Les valeurs typiques de compacité se situent autour de 60% pour les sables et gravillons roulés, et approximativement 50% pour les sables et gravillons concassés.
- En ce qui concerne les produits en tout-venant, leur densité est supérieure à celle des granulats élémentaires et la forme arrondie de leurs grains facilite la compaction.
- On obtient une compacité optimale des granulats en combinant un tiers d'éléments fins avec deux tiers d'éléments de plus gros volume apparent.

2.4.1.3 La teneur en eau

- Sur le site de construction, les granulats possèdent un certain taux d'humidité qui est plus élevé lorsque le granulat est fin.
- Le pourcentage d'eau dans un granulat est équivalent à son contenu en eau par rapport au matériau sec :

$$W = \frac{\text{Masse de l'eau contenue}}{\text{Masse du matériau sec}} \times 100(\%)$$

- La quantité d'eau présente dans les graviers et cailloux n'est pas particulièrement significative, tandis que celle contenue dans le sable peut avoir des implications sérieuses ;
- En ce qui concerne les sables, une forte concentration en eau entraîne une augmentation de volume appelée « foisonnement ».

2.4.1.4 La porosité

La porosité d'un granulé correspond au rapport du volume des espaces vides de ce matériau à son volume total, ce qui est illustré par l'équation suivante :

$$P = \frac{\text{Volume des vides}}{\text{Volume de matière}} \times 100(\%)$$

- La porosité a un impact sur la résistance mécanique et la densité volumique, et elle est un élément clé dans la détermination de la quantité d'eau de gâchage ;
- L'utilisation de granulats à haute porosité pourrait mener à une réduction de la fluidité du béton, car ces granulats sont secs lorsqu'ils sont ajoutés au malaxeur et vont donc en absorber une portion de l'eau de gâchage.

2.4.1.5 La propreté des granulats

Dans le domaine des sables, la pureté est vérifiée par le test connu sous le nom d'« Équivalent de sable » (E.S.) (NF P 18-598). Une certaine quantité de sable a été mélangée dans une solution nettoyante (cette solution comprend 111 g de chlorure de calcium anhydre, 480 g de glycérine et 12 g de formaldéhyde pour un volume total de 40 litres d'eau). La méthode illustrée à la figure 2.5 est utilisée pour évaluer la propreté d'un sable.

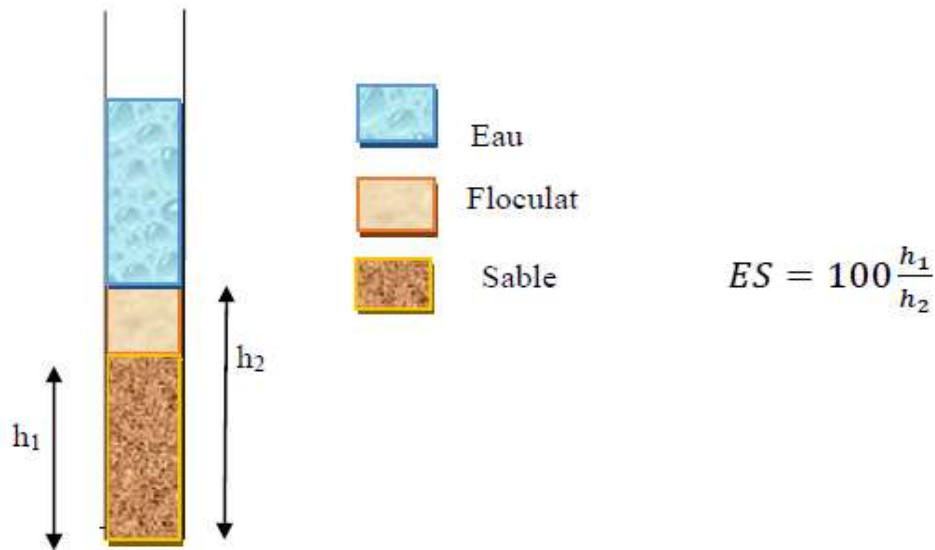


Figure 2.5 : Méthode de mesure de la propreté du sable.

Le tableau 2.1 présente les valeurs recommandées par la norme (NF P 18-598) pour définir la nature et la qualité du sable.

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

2.4.2 Les caractéristiques mécaniques des granulats

Les essais standards de traction ou de compression ne déterminent pas les propriétés mécaniques des granulats. Au contraire, il s'agit d'évaluations qui reproduisent certaines exigences spécifiques liées à l'utilisation prévue des granulats, comme le niveau d'usure pour ceux destinés au béton routier.

2.4.2.1 L'essai Los Angeles

- L'objectif de cet essai est d'évaluer la résistance à la fragmentation due aux chocs et à l'usure causée par des frottements mutuels.

- Cet essai est soumis aux normes NFP 18.573 et s'applique aux pierres brisées ainsi qu'aux grains concassés. La machine Los Angeles est équipée d'un cylindre en acier vide, hermétiquement scellé à ses extrémités, possédant un diamètre intérieur de 711 mm et une longueur intérieure de 508 mm. Le cylindre est installé sur deux axes fixés à ses extrémités et présente une ouverture latérale pour l'insertion des granulats. La charge abrasive (qui se caractérise par l'usure par friction) est composée d'un nombre spécifique de boulets en fonte.
- Le modèle d'essai inclut un granulat pur et séché en étuve, qui doit être aussi proche que possible de la granulométrie réelle utilisée pour les travaux. La machine est activée à une vitesse de 30 à 33 tours par minute, en suivant un cycle de 500 ou 1000 tours selon la taille des particules.
- On procède au tamisage de l'échantillon et on collecte le résidu qui est ensuite pesé ; par la suite, on calcule le taux d'usure :

$$LA = \frac{(\text{poids initial} - \text{poids finale})}{\text{Poids initial}} \times 100(\%)$$

Le coefficient de Los Angeles déterminé par l'utilisation d'un tamis de 1,6 mm à la fin du test caractérise le granulat. On considère que l'essai est concluant si le taux d'usure est inférieur à 25 ou 30%.

- Concernant les agrégats qui pourraient être exposés aux impacts du gel, il est possible d'évaluer le coefficient Los Angeles suite à une série de 25 cycles de gel et dégel (-25°C ; +25°C) et de le mettre en parallèle avec le coefficient standard.
- En réalité, une méthode de contrôle plus aisée consiste à disposer le granulat entre deux plaques d'acier de 5 mm d'épaisseur et à l'exposer à une pression statique. Dans ces circonstances, un gravillon de 5/10 doit supporter une pression de 16 kg, tandis qu'un gravillon de 10/20 doit tolérer une pression de 26 kg.



Figure2.6 : Machine de Los Angeles

2.4.2.2 L'essai-Deval

- L'objectif du test Deval est d'évaluer la résistance à l'usure d'un matériau. L'essai reproduit l'attrition grâce à un mélange de frottements mutuels et d'impacts modérés. Le test est réalisé sur tous les granulats de classe granulaire 25-50 mm, qu'ils soient d'origine naturelle ou artificielle, utilisés pour le ballast des chemins de fer. On distingue deux sortes d'essai : à sec et humide. Le test concerne tous les matériaux, indépendamment de leur composition minéralogique, et propose une appréciation de la capacité du matériau à se modifier au sein de la chaussée sous l'influence mécanique des véhicules.

- Le coefficient Deval, également appelé résistance à l'attrition par frottements réciproques et chocs modérés, évalue la résistance du matériau. Par définition, ce coefficient est égal à :

$$CD = \frac{2800}{P}$$

Où

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

- Si le test est réalisé à sec, le coefficient obtenu sera dénommé « coefficient Deval sec ».

- Si l'essai se réalise en présence d'eau, on le nommera "coefficient Deval humide". Le test fournit aussi des indices sur la vulnérabilité du matériau.

2.4.2.3 L'essai micro-Deval

Le test micro-Deval permet d'évaluer la résistance à l'abrasion par frottements mutuels des composants d'un granulat. Durant le test, les éléments se frottent entre eux, contre le cylindre rotatif de la machine et contre les boulets (qui servent d'abrasif), que ce soit à sec ou en présence d'eau, entraînant ainsi une modification du matériau. Le choix de la classe de granulométrie du matériau à tester est fait parmi les différentes classes disponibles : 4-6.3 mm ; 6.3-10 mm ; 10-14 mm ; 25-50 mm. Une charge abrasive est utilisée pour les tests effectués sur des graviers ayant une taille de 4 à 14 mm.

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

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

Où

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 2.7 : Machine de Micro Deval.

2.4.3 Les Caractéristiques géométriques des granulats

Dans l'élaboration d'un béton, on vise généralement à obtenir un matériau qui soit robuste, imperméable et pérenne.

Pour atteindre ce but, il faut :

- Que le béton frais soit simple à travailler et à compacter.
- Une densité maximale de granulats par volume (pour minimiser la quantité de liant requise afin de combler les espaces vides).
- une maximisation de la surface spécifique du liant pour optimiser son hydratation.

Par ailleurs

Il est nécessaire de sélectionner D_{max} aussi grand que le permettent la taille minimale de la pièce à bétonner et l'espace requis par les granulats.

- Il est nécessaire de sélectionner la taille de chaque grain afin de combler les espaces laissés par les grains de taille supérieure.

L'analyse de la distribution des tailles permet d'identifier la taille et les pourcentages en poids correspondants des différentes catégories de grains qui composent l'échantillon.

Le test de l'analyse granulométrique vise à diviser le matériau en différentes classes granulaires à l'aide d'une série de tamis. Les tamis avec des mailles carrées dont la dimension intérieure, exprimée en millimètres, varie entre 0.08 mm et 80 mm.



Figure 2.8 : Série de tamis avec une tamiseuse électronique.

Les masses associées à divers rejets ou différents tamisages sont comparées à la masse primaire du matériau. Ces pourcentages obtenus seront utilisés, que ce soit en tant que valeurs numériques ou sous forme graphique (courbe d'analyse granulométrique).

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

Tableau 2.2 : Résultats de l'analyse granulométrique

Maille des Tamis (mm)	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 (%) : $100 - (\frac{R_i}{M_s} \times 100)$

Les courbes granulométriques des différents types des granulats sont représentées sur la figure 2.9

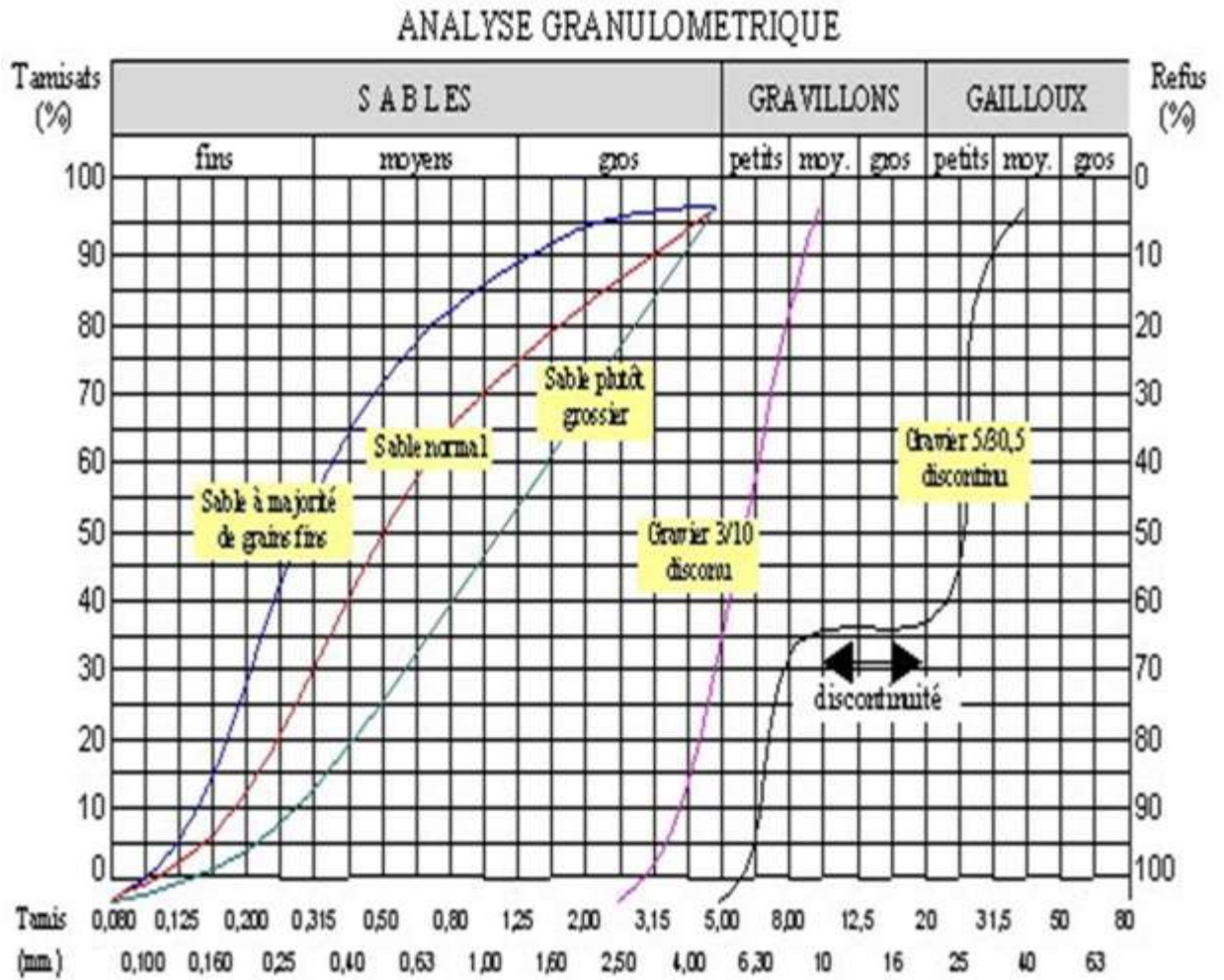


Figure 2.3: Les courbes granulométriques des différents types des granulats

Module de finesse

Les sables doivent avoir une taille des grains qui évite la présence excessive ou insuffisante d'éléments fins.

D'après la norme française [NFP 18-540], le module de finesse est couramment utilisé pour décrire les sables à béton par un chiffre unique : il représente le 1/100 de l'addition des refus en pourcentage sur les divers tamis de la série suivante : 0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 – 5

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

- M_f de 1.80 à 2.20 : Sable un peu trop fin.
- M_f de 2.20 à 2.80 : Sable préférentiel.
- M_f de 2.80 à 3.20 : Sable un peu trop grossier.

Correction du module de finesse du sable :

Par voie expérimentale, la reconstitution (correction) des sables peut être réalisée en incorporant progressivement le sable d'ajout au sable principal jusqu'à obtenir une combinaison qui confère au béton les caractéristiques souhaitées. La règle d'Abrams offre une solution directe si l'on connaît le M_f des sables composants et celui que l'on souhaite obtenir.

Soit :

- Un sable grossier S_1 de module de finesse M_{f1}
- Un sable fin S_2 de module de finesse M_{f2}
- Le sable de mélange S de module de finesse souhaité M_f

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

- Proportion en sable S_1 :

$$S_1 (\%) = \frac{M_f - M_{f2}}{M_{f1} - M_{f2}}$$

- Proportion en sable S_2 :

$$S_2 (\%) = \frac{M_{f1} - M_f}{M_{f1} - M_{f2}}$$

Exemple : déterminer le module de finesse du sable, dans l'analyse granulométrique est présentée dans le tableau suivant

Maille des Tamis (mm)	Masse du refus partiel (g)	Masse du refus cumulé (g)	Refus cumulé en Pourcentage (%)	Tamisât cumulé en Pourcentage (%)
6	0	0	0	100
5	75	75	7.5	92.5
4	30	105	10.5	89.5

3.15	16	121	12.1	87.9
2.5	124	245	24.5	75.5
1.25	250	495	49.5	50.5
0.63	220	715	71.5	28.5
0.315	193	908	90.8	9.2
0.16	87	995	99.5	0.5
0.08	5	1000	100	0

- Faire la correction avec un 2eme sable fin $M_{f2} = 2.0$ pour avoir un sable préférentiel $M_f = 2.5$.

La solution

$$M_f = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.50 - 5\} = 3.43$$

Donc c'est un sable grossier.

Pour avoir un sable préférentiel $M_f = 2.5$, les proportions en sable fin S_1 et en sable grossier S_2 seront déterminées comme suit :

- Proportion en sable S_1 :

$$S_1(\%) = \frac{2.5 - 2}{3.43 - 2} \times 100 = 35\%$$

- Proportion en sable S_2 :

$$S_2(\%) = \frac{3.43 - 2.5}{3.43 - 2} \times 100 = 65\%$$

Chapitre 03 :

Les liants

3.1 Introduction

Les liants minéraux sont des substances qui ont été finement broyées. Mélangés à de l'eau, ils produisent une pâte adhésive qui durcit progressivement pour se transformer en pierre synthétique. Dans le domaine de la construction, les liants minéraux sont combinés à l'eau et/ou aux agrégats (sable, gravillon, gravier) pour se transformer en une pâte de ciment ou mortier, voire en béton. On sait que certains liants se solidifient uniquement à l'air, tandis que d'autres le font dans des environnements humides ou aquatiques. Cette caractéristique nous donne la possibilité de classer les liants minéraux en :

- Liants aériens : qui ne durcissent et ne sont capables de maintenir leurs propriétés mécaniques que dans l'air (par exemple, la chaux grasse, le plâtre).
- Liants hydrauliques : ces derniers se solidifient et préservent leurs caractéristiques mécaniques tant à l'air qu'à l'eau (par exemple : chaux hydraulique, ciment Portland, etc.).

3.2 Liants aériens (Chaux grasse)

La chaux grasse a été l'un des premiers agents de liaison employés (aux côtés du plâtre et du bitume) depuis des milliers d'années. Les Égyptiens, les Mayas et les Chinois ont érigé des structures pérennes en utilisant des mortiers à base de chaux. Durant l'époque médiévale, l'usage de la chaux était courant (elle était souvent mélangée avec des tuiles ou des briques broyées), et cette pratique a persisté jusqu'au milieu du 19^{ème} siècle. La chaux, produite par la calcination de pierres calcaires (CaCO_3) ou dolomitiques (mélange de CaCO_3 et MgCO_3) puis d'une extinction à l'eau, durcissait progressivement à l'air. C'est ce qui lui a valu son nom communément utilisé de chaux aérienne.



Figure 3.1 : Chaux aérienne.

3.2.1. Fabrication

a) Extraction

On procède à l'extraction du calcaire dans les carrières. Traditionnellement, l'extraction était réalisée à l'aide d'outils manuels (comme des pics ou des pioches), comme illustré dans la figure 3.2. Actuellement, l'emploi d'explosifs (détonations de mines) est utilisé pour faciliter le processus d'extraction de la roche. Les blocs qui en résultent sont constitués de roche, transportés par des excavatrices et transférés dans des camions de chargement. Ils sont dirigés vers les sites de préparation, où commence leur transformation (concassage, criblage et calibrage).



Figure 3.2 : Extraction de la matière première.

b) Concassage, criblage et calibrage

La première étape consiste à broyer et tamiser les blocs afin d'obtenir une taille de pierre adaptée au type de four employé. Les fours verticaux demandent une amplitude de mesure allant de 20 à 140 mm, alors que les fours rotatifs se contentent d'une plage de 5 à 40 mm.

c) Cuisson ou calcination

Deux types de fours sont employés dans l'industrie pour la cuisson du calcaire.

- Un four vertical ou un four droit, à l'image des fours ancestraux, est habituellement conçu sous la forme d'un cylindre en acier (dimensions moyennes : diamètre de 2 m et hauteur de 8 m), revêtu intérieurement d'un matériau réfractaire résistant à l'usure et à la corrosion (voir figure 3.3). Il est équipé de ventilateurs à tirage. La partie inférieure

est équipée d'une grille pour le défournement. Les améliorations récentes ont permis de rendre le four droit annulaire le plus performant en termes d'économie d'énergie.



Figure 3.3: Four vertical ou four droit.

- Le four rotatif présente les attributs typiques de ceux employés dans le secteur du ciment (voir la figure 3.4). Pour produire de la chaux, il chauffe le matériau à une température comprise entre 1000°C et 1300°C , en fonction du type de chaux souhaité. L'un des côtés est l'entrée pour le calcaire. Avant d'être soumis à la calcination, il passe par une zone de préchauffage. Avant d'être extraite, la chaux est soumise à un processus de refroidissement. La pierre descend progressivement en passant d'abord par une zone de préchauffage. Cette étape essentielle favorise l'évaporation de l'eau libre présente dans la roche, prévenant ainsi le bris des blocs. Ensuite, la pierre passe à une seconde phase où elle est soumise à la calcination. Il s'agit d'une décarbonatation qui entraîne la libération de « CO_2 » dès 900°C . La décarbonatation dans les dolomies se produit à une température ne dépassant pas 400°C , produisant ainsi de la magnésie (MgO). Les vapeurs d'eau générées sont éliminées avec les fumées et contribuent à la décarbonatation efficace du calcaire. Cette chaux vive ainsi fabriquée poursuit son chemin vers une troisième zone de refroidissement avant d'être récupérée. L'injection

d'air frais à la base du four entraîne un flux d'air qui traverse le four en direction opposée et joue un rôle dans les diverses phases de production de la chaux : refroidissement, combustion du combustible, etc.



Figure 3.4 : Four rotatif pour la fabriquer de la chaux.

d) Extinction

C'est le processus qui transforme la chaux vive en chaux éteinte, entraînant une expansion de volume : le foisonnement. Elle découle d'une modification de la structure moléculaire et de la création d'aiguilles d'hydrate de chaux. Lors de son utilisation, il est impératif que la chaux soit entièrement hydratée, faute de quoi des déformations destructrices peuvent apparaître dans les structures. L'extinction est réalisée en ajoutant de l'eau et peut être effectuée par différentes techniques :

- Méthode de l'extinction spontanée :

Est obtenue en soumettant la chaux vive à l'action lente et continue de l'air. L'humidité présente dans l'atmosphère assure le rôle de l'eau d'extinction.

- La méthode par arrosage manuel :

Il s'agit de fournir la quantité appropriée d'eau nécessaire à l'éteinte, soit entre 10 et 15%. La réaction dégage de la chaleur (exothermique) et peut provoquer des éclaboussures lorsqu'elle s'effectue avec des blocs de chaux.

- La méthode traditionnelle par immersion :

Cela implique l'immersion des blocs dans l'eau, suivie d'un égouttage et enfin leur stockage pour permettre la poursuite de l'extinction. Cette réaction dégage de la chaleur (15500 cal/mol.g; $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$). Il est impératif d'ajouter la chaux avec soin, car la réaction peut provoquer des éclaboussures et des ébullitions.

- L'extinction par fusion, dite extinction ordinaire :

Il s'agit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une consistance pâteuse (chaux en pâte). Cette technique nécessite une excellente gestion de la quantité d'eau, car il est essentiel d'éviter à la fois l'excès (formation de grumeaux) et le manque (consistance inadéquate) lors du mélange avec la chaux. Les granulats de chaux vive sont écrasés et subissent un traitement dans un hydrateur. L'apport d'eau (7 à 10%) contribue à l'hydratation de la chaux vive tout en facilitant aussi la dissipation de la chaleur générée pendant la réaction ($T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$). Les particules qui n'ont pas réagi, appelées « grappiers » (impuretés, surcuits, incuits, etc.), sont éliminées par le biais du tamisage. La chaux éteinte en poudre est tamisée et conditionnée en sacs de 25 ou 50 kg, ou livrée en vrac.

3.2.2 Propriétés principales de la chaux grasse**a) Physiques**

- * Le refus au tamis de $800\text{ }\mu$ est nul et le refus au tamis de $80\text{ }\mu$ doit être inférieur à 10 %.
- * La finesse globale doit se situer dans l'intervalle de 8.000 à 20.000 cm^2/g .
- * La masse volumique apparente varie de 500 à 700 kg/m^3 et la masse volumique absolue varie de 2200 à 2500 kg/m^3 .
- * La résistance réfractaire de la chaux aérienne varie entre 1800 à 2000 $^{\circ}\text{C}$.
- * La chaux aérienne prend lentement. Le temps de début de prise est de 600 minutes (10 heures).
- * La plasticité est élevée, ce qui facilite sa mise en œuvre et son emploi dans les mortiers traditionnels.
- * Elle présente une porosité importante, conférant aux enduits une bonne perméabilité à la vapeur d'eau.

b) Chimiques

- * La teneur en chaux libre et magnésie (CaO et MgO) doit être supérieure à 80 %.
- * La teneur en oxyde de carbone (CO₂) doit rester inférieure à 5 %.
- * La chaux aérienne durcit uniquement par carbonatation, c'est-à-dire par absorption du dioxyde de carbone de l'air.
- * Sa solubilité dans l'eau est faible (environ 1,2 g/l), mais suffisante pour amorcer le processus de prise.

c) Mécaniques

- * La résistance à la compression est relativement faible par rapport aux liants hydrauliques, de l'ordre de 1 à 2 MPa après 28 jours.
- * La résistance en traction est également limitée, mais compensée par une grande déformabilité.
- * Elle conserve une bonne souplesse, ce qui permet d'absorber de légers mouvements différentiels sans fissuration majeure.

d) Propriétés d'usage

- * Elle confère aux mortiers une bonne ouvrabilité et une adhérence durable aux supports.
- * Grâce à sa perméabilité, elle permet aux murs de « respirer » et favorise l'évacuation de l'humidité.
- * Ses propriétés antibactériennes et antifongiques naturelles limitent la prolifération des micro-organismes.
- * Elle est particulièrement adaptée aux travaux de restauration du patrimoine bâti et à l'écoconstruction.

3.2.3 Utilisation de la chaux grasse dans le bâtiment**a) Enduits :**

On identifie essentiellement deux fonctions : la protection et l'esthétique. Les mortiers de chaux offrent une grande élasticité, ce qui contribue à prévenir les fissures dues au retrait et au faïençage. Une fois solidifiés, les mortiers de chaux possèdent la capacité

d'être étanches à l'eau tout en étant perméables à l'air, afin de favoriser la respiration du mur.

b) Mortiers de pose et de jointement :

L'adhérence d'un mortier de pose est plus significative que sa résistance compressive. Les mortiers à base de chaux, qui acquièrent cette adhésion par leur plasticité, sont donc parfaitement appropriés pour cet usage. De plus, ils présentent une faible perméabilité à l'eau et une faible propension à se fissurer. Ils n'entraînent pas d'efflorescences. Les mortiers de chaux sont d'excellents mortiers pour le jointoiment des maçonneries en pierres douces, en béton cellulaire ou en briques. On les retrouve également fréquemment dans les travaux de construction.

3.3 Liants hydraulique (ciment portland)

3.3.1. Définition

Le ciment est un agent liant hydraulique, c'est-à-dire qu'il peut durcir en présence d'eau. C'est une poudre extrêmement fine qui, une fois combinée à l'eau, crée une pâte qui se fixe et durcit progressivement au fil du temps.

Le ciment occupe la première place parmi les liants servant à lier les matières solides tels que les granulats et pierres.

3.3.2. Bref historique du ciment

Les Grecs sont les premiers bâtisseurs à utiliser la chaux issue de la cuisson du calcaire. Les Romains perfectionnent la méthode de la chaux en incorporant des cendres volcaniques et des briques broyées, ce qui leur permet d'obtenir un liant hydraulique, quelque part entre la chaux et le ciment véritable.

C'est en 1817 que le Français Louis Vicat a découvert les principes chimiques des ciments et a établi leurs règles de production. Il est donc reconnu comme l'inventeur, bien qu'aucun brevet n'ait été déposé en son nom.

Joseph Aspdin, un Anglais, a déposé un brevet en 1824 pour le ciment « Portland », qui est produit par un processus de calcination combinant la cuisson du calcaire et de l'argile dans des fours alimentés au charbon. Le terme « Portland », qui fait référence à la similarité de couleur et de solidité avec la pierre de Portland (située dans le sud de l'Angleterre), est toujours en usage dans le secteur industriel à ce jour.

3.3.3 Fabrication du ciment

Le ciment Portland est une substance minérale en poudre qui a la caractéristique de se solidifier sous l'eau, créant une pâte qui se durcit grâce à un processus d'hydratation et une réaction chimique.

La fabrication de ciment passe par les opérations suivantes :

Extraction et concassage : les matières premières principales (calcaire et argile) sont extraites des carrières, puis concassées en fragments de taille réduite.

Préparation du cru : les fragments sont homogénéisés et broyés finement pour obtenir une farine crue appelée « cru », dont la composition chimique est rigoureusement contrôlée.

Cuisson ou calcination : le cru est introduit dans un four rotatif à une température pouvant atteindre **1450 °C**. Cette étape conduit à la formation du **clinker**, nodules durs constitués principalement de silicates de calcium.

Refroidissement et broyage : le clinker est refroidi rapidement afin de conserver ses propriétés minéralogiques, puis broyé finement avec un faible pourcentage de gypse (3 à 5 %) pour réguler la prise du ciment.

Stockage et expédition : le ciment obtenu est stocké dans des silos avant d'être conditionné en sacs ou expédié en vrac.

Le clinker, qui est le principal composant du ciment, est obtenu par la cuisson d'un mélange adéquat de **80 % de calcaire et 20 % d'argile**.

À noter :

* Les réactions chimiques principales qui se produisent durant la cuisson sont la décarbonatation du calcaire ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) et la formation des phases minérales du clinker (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF).

* La consommation énergétique de cette industrie est élevée, d'où l'importance de technologies modernes visant à réduire les émissions de CO_2 .

La figure 3.5 illustre le processus de production du ciment Portland.

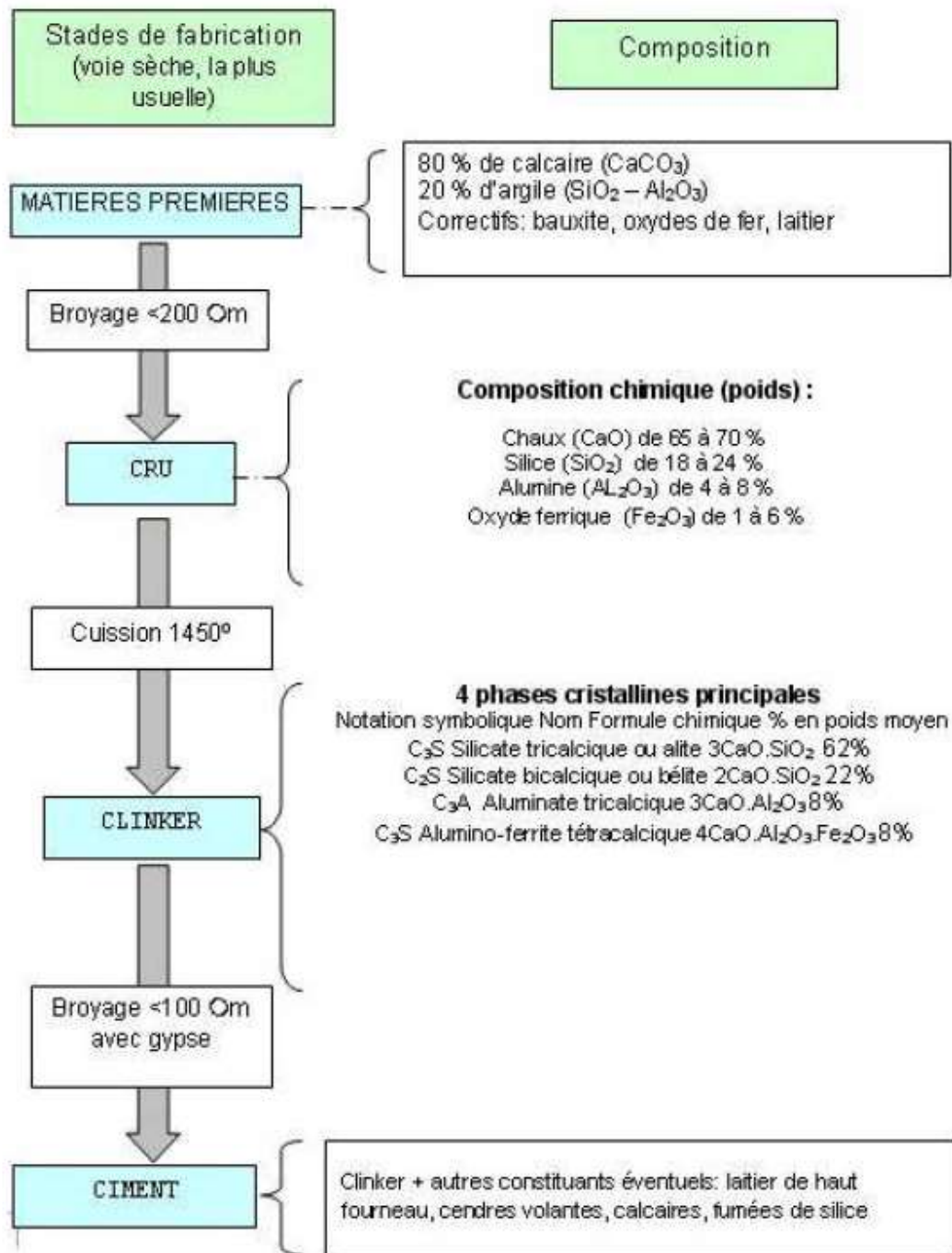


Figure 3.5 : Etapes de fabrication du ciment portland.

a. Extraction et concassage

Cette phase implique l'extraction de matériaux bruts (calcaire et argile) depuis des carrières en plein air. Ces ressources sont obtenues à partir des parois rocheuses grâce à l'abattage par explosion ou à l'utilisation d'une pelle mécanique. Les morceaux de roche récupérés sont acheminés et réduits en particules dont les dimensions ne dépassent pas 50 mm. Les matières premières sont prélevées, mesurées et combinées

de manière à assurer une composition constante au fil du temps. L'échantillonnage continu permet d'établir la quantité des divers composants requis (oxyde de fer, alumine et silice).

b. Préparation de cru

Le mélange, connu sous le nom de « cru », est créé par le broyage et le délayage des particules de calcaire et d'argile à des proportions déterminées, jusqu'à obtenir une consistance très fine. Il est possible d'effectuer des corrections de composition en intégrant des ajouts en quantités minimales comme l'oxyde de fer. Le cru est automatiquement transformé en poudre (pré-homogénéisation). L'homogénéisation préliminaire permet d'obtenir une distribution idéale des deux éléments principaux du ciment en superposant plusieurs strates. Cette poudre de cru est à nouveau homogénéisée par fluidisation, ajustée si besoin, puis emmagasinée en silo avant d'être introduite dans le four.

c. Cuisson ou calcination

Les dispositifs de cuisson sont semblables et se composent de deux éléments : un échangeur de chaleur, comprenant 4 à 5 cyclones où la poudre déversée par le haut se déplace jusqu'à l'entrée du four. Ce dernier chauffe en raison du contact avec les gaz chauds qui émergent de celui-ci, ce qui entraîne une partie de sa décarbonatation. La seconde phase implique la cuisson dans un four cylindrique mesurant de 60 à 150 mètres de long et possédant un diamètre variant entre 4 et 5 mètres, qui est légèrement incliné et effectue approximativement une rotation par minute. Le mélange se déplace vers l'avant du four où la décarbonatation est finalisée et continue jusqu'à la zone de clinkérisation (1450 °C). Sous l'action de la chaleur, les composants de l'argile (silicates d'alumine et d'oxyde de fer) se mélangent à la chaux extraite du calcaire pour former des silicates et des aluminates de chaux.

d. Broyage

Le clinker produit est transporté vers les trémies des broyeurs où il est minutieusement pulvérisé et combiné à 3 à 5% de gypse, qui agit comme un modérateur de prise. Dans certaines situations, on incorpore des éléments supplémentaires comme le laitier, la pouzzolane, les cendres volantes et les fillers calcaires pour produire différents genres de ciment. Le tableau 3.1 indique les compositions chimiques du clinker.

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

e. Les expéditions

Les particules de ciment sont récupérées une fois le broyage terminé et sont ensuite acheminées vers des silos pour leur stockage. Ces silos ont une forme cylindrique et peuvent avoir une capacité maximale de 10.000 tonnes.

3.3.4 Ajouts cimentaire

Les ajouts cimentaires sont des substances à la granulométrie extrêmement fine que l'on intègre principalement au ciment, mais qui peuvent aussi être ajoutées au béton. Les ajouts servent soit à perfectionner les propriétés du béton, soit à lui attribuer des caractéristiques spécifiques. Les ajouts ont souvent un coût inférieur à celui du ciment Portland, ce qui permet d'obtenir une composition de ciment plus économique (voir figure 3.6).



Figure 3.6 : Ajouts cimentaire.

3.3.4.1 Avantages des ajouts cimentaires

Avantages fonctionnels

- * Optimisation de la maniabilité et diminution de la consommation en eau ;
- * Diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton ;
- * Renforcement des caractéristiques mécaniques et de la longévité du béton ;
- * Amélioration de la résistance aux agents chimiques (sulfates, chlorures) et réduction de la perméabilité du béton ;
- * Contribution à une meilleure compacité et à la réduction des fissurations.

Avantages économiques

- * Le prix des ajouts minéraux issus de sous-produits industriels correspond fréquemment aux frais liés au transport et à la gestion.
- * Réduction de la consommation d'énergie, ce qui réduit le prix du ciment.
- * Valorisation des déchets industriels qui, autrement, nécessiteraient des coûts élevés d'élimination.

Avantages écologiques

- * Réduction des émissions de CO₂ produites par l'industrie du ciment.
- * Élimination des sous-produits de la nature et contribution à l'économie circulaire.
- * Diminution de l'extraction des matières premières naturelles, préservant ainsi les ressources non renouvelables.

3.3.4.2 Classification et Caractéristiques des ajouts cimentaires

Selon la norme NF EN 206-1, il existe deux types d'addition :

- Les additions de type I

Il s'agit de matériaux presque inertes, naturels ou artificiels qui, grâce à leur composition granulométrique, renforcent les caractéristiques physiques du ciment Portland (facilité d'utilisation, densité, etc.).

Parmi ces additifs on distingue :

a) Fillers

Il s'agit de substances minérales obtenues par le broyage de certaines pierres (calcaires, Basaltes, laitiers, Bentonites, etc.). Ils ne doivent jamais dépasser 5 % de la composition du ciment en termes de masse.

* Leur rôle principal est de combler les vides entre les grains de ciment et d'optimiser la compacité du mélange.

* Ils améliorent la maniabilité du béton frais et réduisent le risque de ségrégation.

b) Calcaires (L ; LL)

Il s'agit de calcaire finement broyé dont la quantité de carbone organique est limitée :

* L : $\leq 0,20\%$

* LL : $\leq 0,50\%$.

* Ces ajouts permettent d'obtenir un ciment dit *ciment au calcaire* qui présente une meilleure ouvrabilité.

* Ils contribuent également à la réduction de l'énergie nécessaire à la production du clinker, et donc à la diminution des émissions de CO₂.

- Les additions de type II

Il s'agit de matériaux soigneusement moulus de nature inorganique, pouzzolanique ou hydraulique latente.

Parmi ces additifs on distingue :

a) Cendres volantes (V, W) *Fly ash* :

Ces particules sont extraites par précipitation électrostatique ou mécanique à partir des particules fines présentes dans les fumées des chaudières fonctionnant au charbon broyé. Les cendres volantes peuvent être de composition siliceuse (V) ou calcaire (W).

b) Fumée de silice (D) :

Elle est issue de la transformation du quartz hautement pur en présence de charbon dans des fours à arc électrique. Selon les normes NA 442 et EN 197-1 (NA 442, 2000 ; EN 197-1, 1996), la masse du ciment ne peut contenir plus de 10 % de fumée de silice.

c) Laitier granulé des hauts fourneaux (S) :

Obtention par trempe du laitier en fusion grâce à un refroidissement rapide. Les particules de laitier d'une taille inférieure à 10 μm participent à la solidité du béton dans sa jeunesse. Les particules ayant des diamètres allant de 10 à 45 μm participent à l'émergence de résistances futures. Les ciments aux laitiers offrent une meilleure résistance face aux attaques chimiques (sulfates, chlorures).

d) Pouzzolanes naturelles (P, Q) :

Il s'agit de substances naturelles contenant de la silice ou de la silico-alumine. Il existe deux types :

- Des substances d'origine volcanique (verre volcanique, ponce, rhyolite, tuf, zéolite).
- Des argiles et des schistes activés thermiquement (calcinés).

e) Métakaolin :

On obtient le métakaolin grâce à la calcination de l'argile kaolinitique ($T^\circ = 650$ et 850 $^\circ\text{C}$), suivie d'un broyage qui permet d'obtenir une finesse très élevée. Le produit obtenu affiche une forte pouzzolanité et peut être vu comme un ajout très actif.

3.3.5 Types de ciments en fonction de leur composition

Cinq types majeurs de ciments courants sont définis par les normes NA 442 et EN 197-1. On les classe selon leur composition. Ils sont désignés par CEM et numérotés de I à V en chiffres romains pour leur notation européenne : Le type précise les ingrédients qui composent le ciment et détermine leurs proportions limites.

3.3.5.1. Ciment Portland CPA – CEM I

Composition : Constitué de 95 % à 100 % de clinker et de 0 à 5 % de constituants secondaires (filler, gypse).

Caractéristiques :

- * Développement rapide des résistances mécaniques.
- * Dégagement élevé de chaleur d'hydratation, ce qui le rend moins adapté aux ouvrages massifs.
- * Bonne durabilité en milieu courant.

Usages principaux :

- * Bétons et mortiers courants.
- * Ouvrages nécessitant une résistance initiale élevée.
- * Travaux de préfabrication.

Inconvénients :

- * Risque de fissuration dû à la forte chaleur d'hydratation.
- * Moins performant dans les environnements agressifs (sulfates, eau de mer).

3.3.5.2. Ciment portland composé C.P.J – CEM II

Comportant au moins ****65 % de clinker****, le solde étant constitué d'un ou plusieurs composants secondaires tels que le laitier, la pouzzolane, les cendres volantes, le filler calcaire, etc.

Le ciment CPJ se divise en deux classes principales :

CEM II/A : avec 80 à 94 % de clinker et 6 à 20 % de constituants secondaires.

CEM II/B : avec 65 à 79 % de clinker et 21 à 35 % de constituants secondaires.

À l'heure actuelle, le **CPJ** est le ciment le plus utilisé, car il présente un bon compromis entre performance mécanique, durabilité et coût de production.

3.3.5.3. Ciment de haut fourneau CHF-CEM III

Les ciments de haut fourneau sont composés d'un assemblage de clinker et de laitier granulé et broyé provenant du haut fourneau.

Il existe trois classes de ciment de haut fourneau, ces classes sont nommées ciments de haut fourneau CHFCEM III /A, CHF-CEM III /B, C LK-CEM III /C.

Ces ciments peuvent contenir jusqu'à 5 % de filler, mais ce qui les distingue, c'est la quantité de laitier granulé de haut fourneau broyé qu'ils renferment. Les proportions exactes sont les suivantes :

Tableau 3.2 Teneur en laitier dans les ciments de haut fourneau.

Classe du ciment	% du laitier
classe III / A	36 à 65 %
classe III / B	66 à 80 %
classe III / C	81 à 95 %

3.3.5.4. Ciment pouzzolanique CPZ-CEM IV

Il existe deux classes de ciment pouzzolanique :

CPZ-CEM IV/A : dont le pourcentage en cendres volantes ou pouzzolanes est compris entre 10 % et 35 %.

CPZ-CEM IV/B : dont le pourcentage en cendres ou pouzzolanes est compris entre 36 % et 55 %.

Le ciment pouzzolanique présente :

* Une résistance mécanique relativement faible à court terme : environ 12 MPa à 7 jours et 22,5 MPa à 28 jours.

* Une bonne durabilité, avec une résistance notable face aux attaques des sulfates et des acides.

Ce type de ciment est particulièrement recommandé pour les ouvrages exposés à des environnements chimiques agressifs ou à des milieux sulfatés.

3.3.5.5. Ciment au laitier et aux cendres CLC-CEM V

Concernant ce ciment, en plus du clinker, les deux autres composants sont le laitier et la pouzzolane ou la cendre volante. On distingue deux catégories :

- CLC-CEM V / A: dont le pourcentage de la pouzzolane ou cendre volante est compris entre 18 et 30 %, et laitier entre 18% et 30 %

- CLC-CEM V / B: dont le pourcentage de la pouzzolane ou cendre volante est compris entre 31 et 50 % et laitier entre 31 et 50 %.

3.3.5.6. Autre types de ciment

a) Ciments alumineux fondus (CAF)

Le ciment alumineux fondu est un liant hydraulique obtenu par fusion d'un mélange de calcaire et de bauxite, suivi d'un broyage fin (sans ajout de gypse) atteignant une finesse proche de celle du CPA.

Ses principales caractéristiques :

- * Temps de prise : entre 150 et 210 minutes.
- * Développement très rapide des résistances : environ 40 MPa dès 6 heures avec un rapport E/C = 0,40.
- * Résistance initiale élevée permettant une mise en service rapide des ouvrages.

Applications : utilisé dans les projets nécessitant rapidement de fortes résistances mécaniques comme les poutres, linteaux, dalles de sols industriels, réparations urgentes et travaux de préfabrication.

b) Ciment prompt naturel (CPN)

Obtenu par la cuisson à température modérée d'un calcaire argileux homogène, puis par un broyage très fin.

Sa composition minéralogique particulière lui confère des propriétés spécifiques :

- * Prise et durcissement extrêmement rapides.
- * Imperméabilité améliorée.
- * Bonne résistance aux eaux acides et sulfatées.

Applications : il est privilégié pour les travaux spéciaux tels que les injections, scellements, colmatages rapides, ouvrages hydrauliques, maçonneries soumises à des eaux agressives.

3.3.5.7. Critères de choix du ciment

a) Le choix de la classe de résistance du ciment en fonction de la résistance du béton à 28 jours

Dans les mélanges de béton les plus basiques, le ciment assume au minimum deux fonctions : il offre la solidité requise et fournit également les composants fins nécessaires pour assurer un bon comportement du béton frais.

Le choix de la classe de résistance du ciment (32,5 – 42,5 – 52,5) dépend directement de la résistance mécanique recherchée du béton à 28 jours :

- * Pour des bétons courants de faible à moyenne résistance (béton de remplissage, maçonnerie, dallages simples), un ciment de classe 32,5 est suffisant.
- * Pour des bétons armés utilisés dans les structures classiques du bâtiment et des ouvrages courants, on opte pour un ciment de classe 42,5, offrant un bon compromis entre résistance et maniabilité.
- * Pour des bétons de haute performance, sollicités dans des structures spéciales (ponts, ouvrages maritimes, éléments précontraints), la classe 52,5 est privilégiée grâce à son développement rapide et élevé des résistances.

En outre, il est important de prendre en compte le type de résistance :

- * N (Normale) : montée en résistance modérée, adaptée pour la majorité des travaux.
- * R (Rapide) : développement rapide des résistances initiales, utile en préfabrication ou par temps froid.

b) Impératifs de mise en œuvre

Un décoffrage rapide et une précontrainte précoce nécessitent l'utilisation de ciments présentant une résistance élevée dès les premiers jours.

En période de coulage par temps froid, le béton garde plus longtemps sa plasticité et son état malléable, ce qui retarde l'évolution de sa résistance mécanique. Dans ce cas, il est recommandé de profiter de la chaleur dégagée par l'hydratation en privilégiant des ciments de classes 42.5R ou 52.5R.

À l'inverse, lors d'un bétonnage en conditions chaudes, il convient d'adopter une stratégie opposée afin de limiter une prise trop rapide et d'assurer une mise en œuvre optimale.

c) Environnement de l'ouvrage

Le béton doit, dans sa formulation et ses caractéristiques, être adapté aux conditions de son environnement (sec, humide, milieu agressif, etc.).

* **Milieu sec** : un béton avec une classe de résistance normale peut suffire, à condition de respecter les dosages minimaux en ciment et une compacité adéquate.

* **Milieu humide** : nécessité d'une faible porosité pour limiter la pénétration d'eau et les risques de dégradations (corrosion des armatures, fissuration).

* **Milieu marin** : choix d'un ciment résistant aux sulfates et à la pénétration des ions chlorure, avec un enrobage suffisant des armatures.

* **Milieu industriel agressif (sulfates, acides)** : utilisation de ciments spécifiques (CPA-SR, ciments pouzzolaniques, au laitier) qui améliorent la résistance chimique.

* **Cycles gel/dégel** : formulation avec un rapport E/C réduit et incorporation éventuelle d'entraîneurs d'air pour assurer la durabilité.

L'adaptation du ciment et de la composition du béton à l'environnement de l'ouvrage constitue une exigence fondamentale pour garantir la durabilité et limiter les coûts d'entretien à long terme.

3.3.6 Propriétés du ciment

3.3.6.1 Propriétés physiques

- **Finesse de mouture** : L'hydratation du ciment débute à la surface des grains, c'est pourquoi c'est la surface totale des grains qui détermine le matériau accessible à l'hydratation. Ainsi, la rapidité de l'hydratation est liée à la finesse des particules de ciment. Pour obtenir une hydratation rapide et une robustesse à court terme, l'utilisation d'un ciment à la finesse élevée est nécessaire. La méthode employée pour déterminer la surface spécifique du ciment est celle de Blaine.

La consistance :

La consistance représente le taux idéal d'eau permettant d'obtenir une pâte de ciment à consistance standard. Elle se détermine à l'aide de l'appareil de Vicat, conformément à la norme NF EN 196-3.

Cette caractéristique est essentielle pour juger la qualité de l'hydratation et la maniabilité du mélange. Une pâte trop sèche empêche une bonne mise en œuvre, tandis qu'une pâte trop fluide entraîne une ségrégation et une diminution des résistances mécaniques.

-La prise : C'est l'expression utilisée pour caractériser le durcissement de la pâte de ciment. On définit la prise comme la transition d'un état liquide à un état solide. Le commencement de la prise se manifeste par une montée soudaine de la viscosité de la pâte de ciment accompagnée d'une hausse de sa température. Le processus de fin de prise implique la transformation graduelle et constante de la pâte de ciment en un bloc solide. On a généralement recours au test de « Vicat », conforme à la norme NF EN 196-3, pour évaluer le temps d'écoulement et de fin d'enregistrement.

- Retrait : Le retrait est la diminution du volume apparent de la matière ; il est mesuré sur des éprouvettes 4×4×16cm, conservées à l'air de température $T = 20\text{ °C}$ et d'humidité relative.

-Expansion : En présence d'humidité ou d'eau, les volumes de ciment, mortiers et bétons augmentent. Les facteurs principaux de l'expansion comprennent : - une quantité excessive de gypse, - un surplus de chaux libre CaO. - un excès de magnésium libre MgO. L'expansion est évaluée conformément à la norme NF EN 196-3, et nous employons le même équipement que celui utilisé pour le retrait.

3.3.6.2 Propriétés mécaniques

Les ciments sont soumis à des tests de résistance mécanique en traction et en compression, effectués sur des échantillons de mortier standard de 4x4x16 cm âgés de 28 jours. On considère alors que la résistance du mortier reflète celle du ciment.

3.3.7 Classification des ciments en fonction de leur résistance nominale

Quelle que soit l'appellation du ciment, la classe indique la résistance limite garantie obtenue à 28 jours et en compression.

Trois classes de résistance nominale sont couvertes : **32,5, 42,5 et 52,5**

- Pour chaque classe de résistance nominale, une sous-classe de résistance aux jeunes âges est définie (L, N et R).

- Concernant tous les types de ciments, la résistance à la compression, établie selon la norme EN196-1 (résistance en compression basée sur une éprouvette standardisée), doit répondre aux critères du tableau ci-après :

Tableau 3.3. Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe.

Classe	Résistance à la compression (MPa) EN 196-1				Temps de début de prise (min)	Stabilité (expansion) (mm)
	Au jeune âge		A 28 jours			
	2 Jours	7Jours	Min	Max		
32.5 N	-	16.0				≤ 10
32.5 R	≥ 10.0	-	≥ 32.5	≤ 52.5	≥ 75	
42.5 N	≥ 10.1	-				
42.5 R	≥ 20.0	-	≥ 42.5	≤ 62.5	≥ 60	
52.5 N	≥ 20.1	-				
52.5 R	≥ 30.0	-	≥ 52.5	-	≥ 40	

Chapitre 04 :

LES MORTIERS

4.1 Définition

Dans toute structure, il est essentiel d'assembler les divers composants (blocs de béton, briques, éléments préfabriqués en béton, etc.) à l'aide d'un mortier à base de ciment ou autres liants. L'objectif est de :

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

Le mortier se prépare en combinant un liant (comme la chaux ou le ciment), du sable, de l'eau et éventuellement des ajouts. Il est possible d'obtenir diverses compositions de mortier en manipulant plusieurs paramètres : le liant (sa nature et sa quantité), les adjuvants et ajouts, ainsi que la quantité d'eau. Pour le liant, tous les types de ciment et de chaux peuvent être utilisés ; leur sélection et leur proportion dépendent du projet à réaliser et de son contexte environnemental.



Figure 4.1 : Le mortier

4.2 Composition

Par définition, les mortiers contiennent des liants, des granulats et de l'eau ; éventuellement des adjuvants.

Les liants

Les liants constituent la base du mortier, car ils assurent la cohésion entre les grains de sable et permettent au mélange de durcir et de devenir résistant. Ils peuvent être :

- Le ciment Portland, très répandu, qui offre une résistance mécanique élevée et une prise rapide.
- La chaux, utilisée depuis l'Antiquité, connue pour sa souplesse et sa grande plasticité. Elle favorise la rétention d'eau et améliore l'ouvrabilité du mortier. Toutefois, sa résistance mécanique est nettement plus faible que celle du ciment. La prise de la chaux s'effectue grâce à un phénomène lent appelé carbonatation, réaction chimique avec le dioxyde de carbone (CO₂) de l'air. Cette réaction est fortement influencée par les conditions climatiques : le froid et l'humidité ralentissent considérablement la prise.
- Le ciment de maçonnerie, produit normalisé, constitué de ciment Portland, de filler minéral (souvent du calcaire finement broyé), et d'adjuvants (agents mouillants, hydrofuges, entraîneurs d'air). Ce type de ciment combine à la fois résistance, maniabilité et durabilité, ce qui le rend adapté aux mortiers de construction courante.

La chaux

Elle demeure l'élément traditionnel du mortier, surtout dans la restauration du patrimoine. Ses avantages sont nombreux : excellente plasticité, grande facilité de mise en œuvre, amélioration de l'adhérence et forte capacité à retenir l'eau. Ces qualités rendent le mortier de chaux particulièrement apprécié pour la maçonnerie ancienne et les supports sensibles. Cependant, ses limites résident dans :

- une faible résistance mécanique, qui ne convient pas aux structures nécessitant une forte portance.
- un temps de séchage long, nécessitant des conditions climatiques favorables.
- une prise lente par carbonatation, retardée dans des environnements humides ou froids.

Le ciment de maçonnerie

Il s'agit d'un liant élaboré pour répondre aux besoins de la construction moderne. En plus du ciment Portland, il contient :

- un filler inerte (calcaire) .

-des adjuvants divers: substances mouillantes pour améliorer la dispersion, agents hydrofuges pour limiter la pénétration de l'eau, et entraîneurs d'air pour améliorer la résistance au gel-dégel.

Certains ciments de maçonnerie sont dits combinés, car ils associent du ciment Portland et de la chaux hydratée, renforcés d'adjuvants. Cette composition permet d'obtenir un mortier équilibré entre résistance, maniabilité et durabilité.

Les granulats

Le sable constitue le granulat essentiel du mortier. Il joue un rôle inerte mais fondamental : il assure la compacité, réduit les retraits et confère une bonne texture au mélange. Les sables utilisés présentent généralement une granulométrie comprise entre 0,080 mm et 4 mm. Leur propreté est primordiale : la présence d'argiles, de matières organiques ou de sels peut compromettre la qualité et l'adhérence du mortier.

L'eau

Elle est indispensable pour deux raisons :

-Hydratation du ciment, réaction chimique qui permet la prise et le durcissement du mortier.

-Ouvrabilité, c'est-à-dire la facilité de mise en place et de maniement du mortier frais.

La quantité d'eau doit être suffisante pour garantir une bonne maniabilité, mais jamais excessive, car un excès entraîne une diminution de la résistance mécanique et une augmentation du retrait. L'eau utilisée doit être propre et exempte d'impuretés (acides, alcalis, sels ou matières organiques). En règle générale, une eau potable est considérée comme adaptée.

Les adjuvants

Ils sont des produits ajoutés en faible quantité pour modifier certaines propriétés du mortier. Dans les mortiers traditionnels, leur utilisation est limitée, mais dans certaines applications modernes, ils peuvent être très bénéfiques. Ils permettent par exemple :

-d'améliorer la maniabilité.

-d'accroître la rétention d'eau.

-d'introduire des bulles d'air microscopiques pour améliorer la résistance au gel.

-de réduire la perméabilité à l'eau.

Cependant, leur usage n'est généralement pas recommandé dans les mortiers courants, sauf cas spécifiques.

4.3 Les différents types de mortiers

En construction on utilise différents types de mortier :

4.3.1. Les mortiers de ciment

Les mortiers de ciment sont extrêmement robustes, et ils sèchent et se solidifient rapidement. En général, le mélange est composé de 1 part de ciment pour 3 parts de sable, et la proportion d'eau par rapport au ciment se situe aux alentours de 0,35. Les proportions standard sont généralement de 300 à 400 kg de ciment pour chaque mètre cube de sable.

4.3.2. Les mortiers de chaux

Les mortiers de chaux présentent une résistance inférieure comparativement aux mortiers de ciment (gras et soyeux). Le processus de durcissement des mortiers de chaux prend plus de temps comparé aux mortiers de ciments.

Cependant, ils offrent plusieurs avantages :

Plasticité et maniabilité : leur texture souple facilite la mise en œuvre et le lissage.

Perméabilité à la vapeur d'eau : ils permettent aux murs de « respirer », réduisant ainsi les risques de condensation et de dégradations dues à l'humidité.

Compatibilité avec les matériaux anciens : ils s'adaptent bien aux pierres et briques traditionnelles, évitant les fissurations dues aux différences de rigidité.

Durabilité : malgré une résistance mécanique limitée, ils présentent une bonne longévité dans les constructions anciennes grâce à leur capacité d'autoréparation par carbonatation progressive.

En revanche, leur faible résistance initiale limite leur emploi dans les structures porteuses modernes. Ils sont donc surtout utilisés :

-dans la restauration du patrimoine architectural.

-pour les enduits de façade.

-ou encore dans les environnements nécessitant une bonne régulation hygrométrique.

4.3.3. Les mortiers bâtards

Il s'agit de mortiers composés d'un liant résultant du mélange de ciment et de chaux. On utilise habituellement la chaux et le ciment en proportions équivalentes, cependant il arrive que l'on privilégie l'un ou l'autre selon l'application et la qualité recherchée.

Ce type de mortier combine les avantages des deux composants :

La chaux confère au mortier une meilleure plasticité, une bonne rétention d'eau et une perméabilité à la vapeur d'eau, ce qui facilite la mise en œuvre et améliore l'adhérence sur différents supports.

Le ciment apporte la résistance mécanique et la rapidité de durcissement, garantissant ainsi une solidité adaptée aux contraintes structurelles.

Propriétés

- Bonne maniabilité et facilité d'application.

- Résistance mécanique intermédiaire, supérieure à celle des mortiers de chaux mais inférieure aux mortiers purement cimentaires.

- Bonne adhérence et durabilité.

Usages

Les mortiers bâtards sont largement utilisés pour :

- La maçonnerie courante (blocs, briques, pierres).
- Les enduits extérieurs et intérieurs nécessitant à la fois résistance et souplesse.
- Les travaux de restauration, où l'on recherche un compromis entre la rigidité du ciment et la souplesse de la chaux.

4.3.4. Mortiers fabriqués sur chantier

Ils sont confectionnés à partir du ciment et du sable provenant du site de construction. Le ciment utilisé est généralement du ciment ordinaire CPA ou CPJ, et parfois des ciments spécifiques tels que le ciment alumineux fondu.

On utilise aussi des chaux hydrauliques et parfois des liants pour la maçonnerie. Le sable est généralement roulé (de nature silico-calcaire), parfois concassé, et le mélange se fait manuellement ou à l'aide d'un petit malaxeur à béton. Ainsi, ces mortiers ne présentent pas une grande uniformité et les sables peuvent varier d'une livraison à l'autre. Quoi qu'il en soit, ils doivent être propres et avoir une granulométrie adéquate.

4.3.5. Mortier industriel

On fabrique ces mortiers à partir de composants secs soigneusement sélectionnés, conditionnés en sacs, vérifiés en usine et d'une régularité parfaite. L'emploi de ces mortiers nécessite simplement l'ajout d'eau appropriée, suivi d'un mélange, avant leur application.

Les mortiers peuvent incorporer différents types de liants et de sables, ainsi que divers adjuvants et potentiellement des pigments.

Les producteurs de mortiers industriels offrent une palette exhaustive de produits qui répond à l'ensemble des exigences.

4.4 Les emplois des mortiers**4.4.1. Les joints de maçonnerie**

La construction effectuée en composants maçonnés (blocs de béton, pierres taillées, briques) requiert leur jointoiement avec un mortier qui doit posséder des propriétés mécaniques adéquates pour garantir la répartition des charges et une densité suffisante

pour être imperméable. Il est généralement recommandé d'utiliser des mortiers qui n'ont pas un module d'élasticité trop élevé, afin de pouvoir s'ajuster aux variations dimensionnelles des éléments qu'il lie sans se fissurer.

Ainsi, les mortiers de joints représentent un élément crucial de la maçonnerie qui nécessite une étude approfondie et une application correcte pour garantir le rôle qui leur est attribué. C'est en particulier le cas de la maçonnerie visible.



Figure 4.2 : Joints de maçonnerie.

4.4.2. Les enduits

Ce champ d'application représente l'une des plus larges utilisations des mortiers. On observe actuellement une progression des enduits épais monocouches, ainsi que des enduits isolants qui sont encore perçus comme non conventionnels.



Figure 4.3 : Application d'enduit.

4.4.3. Les chapes

Les chapes servent à garantir l'uniformité de la surface du sol et à assurer son nivellement. Les chapes peuvent servir de finition : on y ajoute généralement des produits spécifiques. Elles peuvent également servir de base pour un revêtement de sol. Les chapes doivent avoir une résistance adéquate pour garantir la transmission des charges au support.

Adhérente ou flottante, la chape peut également avoir une fonction thermique ou acoustique.



Figure 4.4 : Application d'enduit pour chape.

4.4.4. Les scellements et les calages

Face à la diversité des défis de scellement et de calage, les fabricants de mortiers industriels ont développé des produits spécifiques pour les divers travaux à effectuer : fixations d'éléments de toiture, fixations d'éléments secondaires, fixations de mobilier urbain, fixations de regards de visite, assemblage d'éléments préfabriqués...



Figure 4.5 : Calage d'un poteau en charpente métallique.

4.5 Types de mortiers en fonction de dosage de liant

4.5.1 Mortier normal

C'est un mortier qui contient en volume une partie de liant pour trois parties de sable normal. Avec ces proportions le liant remplit les vides du sable, c'est à dire que 1m³ de sable plus 1/3 de m³ de liant ne fournit qu'un m³ de mortier.

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

4.5.2 Mortier maigre

Ce type de mortier contient une quantité de liant inférieure à celle du mortier normal. Sa résistance mécanique est plus faible, mais il reste économique. On l'emploie surtout comme couche de pose, de remplissage ou dans des ouvrages où la résistance n'est pas un critère déterminant.

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

4.5.3 Mortier gras

Ce mortier contient une proportion de liant plus élevée que le mortier normal (plus d'1/3 de liant pour 1 m³ de sable). Grâce à cet excès de liant, il présente une meilleure plasticité, une adhérence supérieure et une résistance mécanique accrue. Toutefois, il subit un retrait plus important lors du séchage. Il est utilisé pour des travaux nécessitant une solidité et une étanchéité renforcées.

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

4.6 Formulation (fabrication) des mortiers

L'utilisation du mortier dépend principalement de la qualité et de la résistance, ce qui influence les ratios de liant et de sable. Bien que sa quantité soit restreinte, l'eau contribue aussi de manière significative à la qualité du mortier. L'expression « dosage » fait référence à la proportion de liant par rapport à la quantité de mortier.

La quantité de mortier à utiliser peut fluctuer considérablement selon l'application et le type de mortier à préparer. Il est crucial d'effectuer cette opération avec exactitude, car la résistance finale de l'ouvrage y est fortement liée. Il n'est alors pas envisageable de modifier les données, soit intentionnellement pour des motifs d'économies, soit par inadvertance.

Il existe deux façons de formuler le mortier.

4.6.1 Dosage en volume

Les volumes des ingrédients des mortiers sont définis et modifiés au besoin. En général, le dosage du mortier se fait de manière assez simple :

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

Exemples :

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

4.6.2 Dosage en poids

Le dosage pondéral d'un mortier correspond à la quantité de liant contenue dans un mètre cube de mortier prêt à l'emploi. En fonction des densités, la quantité de mélange et des matériaux qui le constituent produira diverses conclusions relatives à la construction.

Le dosage du mortier pour un sac de ciment

Utilisation	Ciment	Chaux	Sable fin Granulométrie : type 0.2 mm Densité : 1,57/m ³	Sable à maçonner Granulométrie : type 0.5 mm Densité : 1,9/m ³	Eau Environ
Assemblage de parpaings Ex : Parpaings 20x20x50 cm pour 7 m ²	50 Kg			250 Kg soit 167 litres	25 L
Assemblage de briques Ex : Briques 6x11x22 cm pour 7 m ² avec mortier bâtard	25 Kg	25 Kg	200 Kg soit 135 litres	50 Kg soit 34 litres	25 L
Chape sur sol béton	50 Kg			200 Kg soit 135 litres	25 L
Enduit de façades traditionnel pour 20 m² Première couche gobets 3 à 5 mm	50 Kg		150 Kg soit 100 litres		25 L
Enduit bâtard Deuxième couche corps d'enduit 15 à 20 mm	50+50 Kg	50 Kg		690 Kg soit 460 litres	75 L
Troisième couche finition 5 à 7 mm	20 Kg	20 Kg	175 Kg soit 117 litres		10 L
1 m³ Mortier de joint pour pierres	50 Kg		66 Kg soit 44 litres		25 L
Mortier de joint pour briques	25 Kg	25 Kg	66 Kg soit 44 litres		25 L

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

Figure 4.6 : Dosage en poids

4.7 Propriétés

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

4.7.1. Mortier plastique

La propriété la plus importante du mortier plastique est son ouvrabilité. On peut la caractériser comme la capacité du mortier à se déployer à l'aide d'une truelle pour combler toutes les fentes et crevasses de l'élément maçonnerie. En vérité, il s'agit d'un mélange de plusieurs caractéristiques, incluant la plasticité, la densité et la cohésion. L'ouvrabilité est difficile à quantifier précisément en laboratoire, cependant, le maçon peut s'en faire une idée en observant comment le mortier se comporte lorsqu'il l'applique avec sa truelle. L'ouvrabilité est le résultat de l'effet de roulement à billes, qui découle de la lubrification des granules grâce au lait de ciment. Même si la catégorie de

granulats et la composition des matériaux sont cruciales, c'est le niveau d'humidité qui fixe les mesures finales du retrait, et le maçon est en mesure de le réguler lors de l'application.

Une bonne ouvrabilité et un bon pouvoir de rétention d'eau sont essentiels à une qualité maximale du rejointoiment.

a) Mesure de l'ouvrabilité du mortier

L'essai d'étalement sert à définir la répartition des échantillons de mortiers utilisés pour la fabrication des éprouvettes destinées aux tests de compression. Le test d'étalement est effectué sur une table mobile dotée d'un plateau plat attaché par des charnières à une base solide. Un moule ayant la forme d'un tronc de cône avec un diamètre à la base $D_0=10$ cm est placé au centre du plateau (figure 4.7).

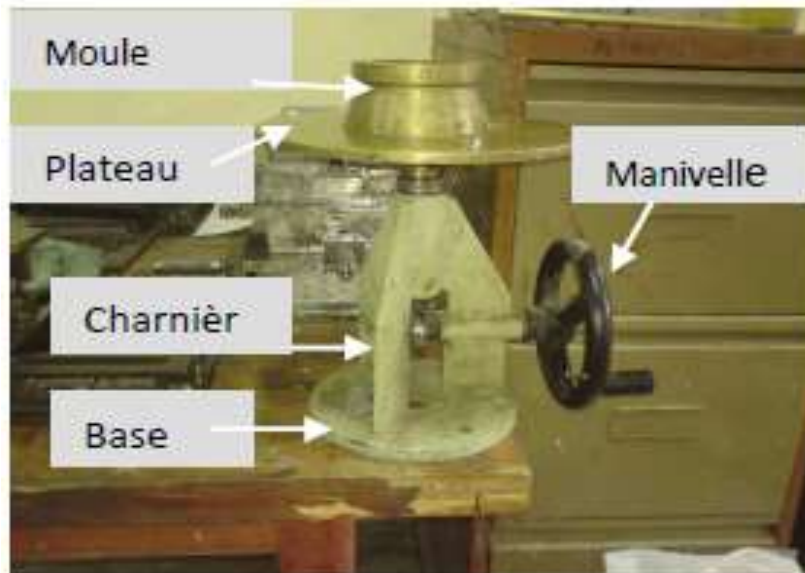


Figure 4.7 : Table à choc

Avant utilisation, le moule et le plateau sont graissés. Le cône est comblé de mortier par des strates successives, chaque couche est compressée en piquant grâce à une tige. Le moule est monté verticalement sans déplacement latéral, et on laisse le mortier se répandre sur la plaque de métal. En actionnant le levier, on effectue 15 cycles de chute. Chaque cycle a une durée de 1 à 3 secondes. Le plateau mobile présente une chute de 15 mm (figure 4.8). On évalue différents diamètres D_i du mortier étalé sur la table, et on détermine l'étalement de la manière suivante :

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

Avec :

D_m : Le diamètre moyen du mortier étalé.

D_0 : Le diamètre de la base du moule tronconique.



a) Remplissage du moule b) application des coups et étalement c) mesure des diamètres

Figure 4.8 : Etape suivie pour calculer l'étalement d'un mortier.

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 :

Il s'agit d'un mortier standard dont le diamètre moyen après le test d'étalement est $D_M = 15$ cm. Le cône est façonné à partir d'un moule dont le diamètre à la base est de $D_0 = 10$ cm.

$$\text{étalement} = \frac{D_M - D_0}{D_0} \times 100 = \frac{D_M - D_0}{D_0} \times 100 = 50\%$$

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

b) Délais de prise

On évalue généralement le temps de prise sur une pâte de ciment pure d'une consistance standard, en suivant les normes pertinentes (en utilisant l'instrument Vicat).

On peut déterminer le temps de prise d'un mortier en utilisant le même équipement, mais en ajoutant une surcharge de 700 grammes sur la plateforme supérieure. L'aiguille qui s'introduit dans le mortier a un poids de 1000 g (300+700) g. Le commencement de la prise est le moment où l'aiguille s'immobilise à 2,5 mm du fond, tandis que la conclusion de la prise est le moment où l'aiguille se fixe à 2,5 mm du niveau supérieur.

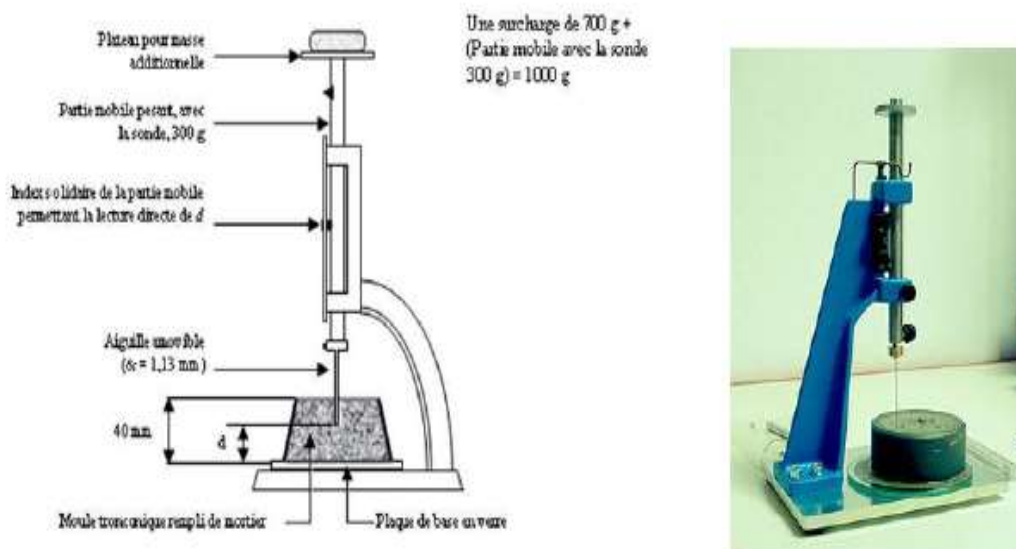


Figure 4.9 : Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge.

4.7.2. Mortier durci

Le mortier durci présente plusieurs caractéristiques mécaniques de résistance qui sont significatives. Il est crucial que le jointoiment entre l'élément et le mortier soit solide, tout comme une ouvrabilité optimale et un excellent pouvoir de rétention d'eau confèrent au jointoiment une robustesse maximale. De ce fait, ces caractéristiques surpassent en importance la résistance à la compression du mortier. La capacité d'un mortier à éviter les fissures est aussi déterminée par sa résistance à la flexion, qui revêt une importance notable. Les mortiers doivent toujours avoir une résistance inférieure à

celle des éléments de maçonnerie afin que les fissures apparaissent dans les joints, là où elles peuvent être facilement colmatées.

a) Essai de la résistance à la traction par flexion

L'évaluation de la résistance à la traction par flexion des mortiers a été réalisée grâce à des tests de flexion en trois points sur des échantillons prismatiques de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, avec une cadence de chargement de 50 N/s.

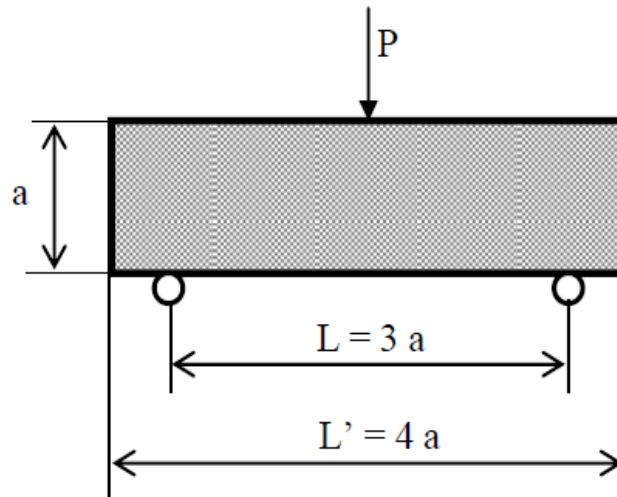


Figure 4.10 : Schéma de calcul de la flexion

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

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

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.

b) Essai de La résistance à la compression

On évalue la résistance à la compression des mortiers en se basant sur les six demi-prismes obtenus lors de l'essai de flexion. Ces tests sont réalisés conformément à la norme NF EN 196-1. La formule suivante fournit la contrainte de compression :

$$R_C = \frac{F_C}{b^2}$$

On appelle cette contrainte résistance à la compression, et si F_C est donné en newtons, alors cette résistance en méga pascals se traduit par :

$$R_C = \frac{F_C}{1600}$$

F_C : est la charge appliquée sur l'éprouvette à la rupture en N.

1600=40mmx40mm surface comprimée.

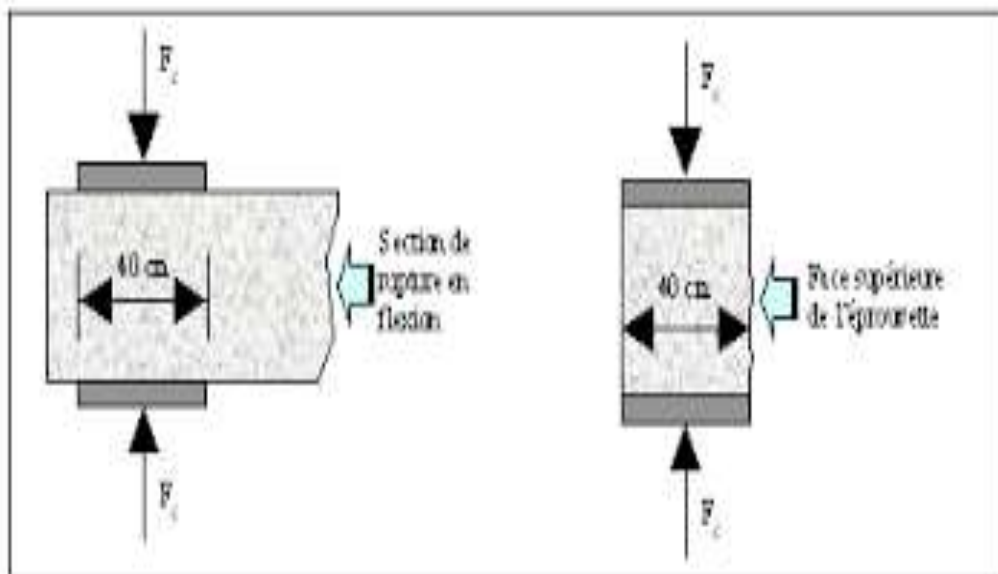


Figure 4.11 : Dispositif de rupture en compression

4.8 Méthodes de préparation des mortiers

4.8.1 Préparation manuelle

Premièrement, à l'aide d'une pelle, il est nécessaire de mélanger le sable et le liant à sec aussi soigneusement que possible. Ensuite, on doit créer une dépression au centre du mélange pour accueillir l'eau de gâchage.

La masse est humectée progressivement puis malaxée à l'aide d'un robot à mortier.

Cependant il faut savoir :

- Il est crucial que le mélange à sec soit réalisé avec soin pour assurer une distribution uniforme du liant dans l'ensemble du sable.
- Il est recommandé de verser l'eau en plusieurs étapes, d'abord pour garantir un mélange de qualité et pratique, ensuite parce qu'il est plus facile d'ajouter de l'eau que d'en retirer une fois versée.



Figure 4.12 : Préparation manuelle

4.8.2 Préparation mécanique

Les mortiers sont fabriqués à l'aide de machines connues sous le nom de bétonnières. Pour certains modèles, le mélange doit être effectué à sec, en partie avant l'intégration au tambour de mélange, où il est correctement humidifié. Certains préfèrent effectuer eux-mêmes la préparation complète : ils intègrent soit directement dans le malaxeur, soit dans une benne, tous les composants du mortier.

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



Figure 4.13 : Préparation mécanique

Annexes

Mesure de quelques propriétés des matériaux de construction

Objectifs du TP

- * Se familiariser avec les matériaux de construction (ciment, sable, gravier, eau).
- * Apprendre à mesurer quelques propriétés physiques fondamentales.
- * Comparer les résultats obtenus avec les valeurs théoriques ou normatives.

Propriétés mesurées

1. Masse volumique apparente (ρ_a)

* Définition : rapport de la masse du matériau sec au volume occupé (y compris les vides entre grains).

* Matériaux concernés : sable, gravier, ciment.

* Méthode : remplir un récipient de volume connu, peser, puis calculer.

$$\rho_a = \frac{M}{V}$$

2. Masse volumique réelle (ρ_r)

* Définition : rapport de la masse des grains secs au volume des seuls solides (excluant les vides).

* Détermination avec une éprouvette graduée + eau.

3. Teneur en eau (W)

* Définition : rapport entre la masse d'eau contenue dans l'échantillon humide et la masse sèche.

* Méthode : pesée avant et après séchage à 105 °C.

$$W = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$

4. Granulométrie

* Définition : distribution dimensionnelle des grains.

* Méthode : tamisage pour sable et gravier.

* Permet de tracer la courbe granulométrique.

5. Teneur en fines

* Proportion de particules passant au tamis 0,08 mm (NF EN 933-1).

Matériel utilisé

* Balance de précision.

* Récipients gradués (éprouvettes, cylindre).

* Étuve (105 °C).

* Jeu de tamis normalisés.

* Picnomètre.

Exploitation

* Comparer les masses volumiques mesurées avec les valeurs normatives.

* Dédire l'influence de la granulométrie et de la teneur en eau sur les propriétés du béton/mortier futur.

Masses volumiques des granulats

Masse volumique réelle (ρ_r) – méthode au pycnomètre

Matériel :

- * Pycnomètre de 1 L
- * Balance de précision
- * Eau distillée
- * Étuvé (105 °C)
- * Granulat sec (sable ou gravier)

Procédure :

1. Sécher l'échantillon de granulats à 105 °C jusqu'à masse constante.
2. Peser m_1 = masse du pycnomètre vide.
3. Remplir le pycnomètre avec de l'eau → peser m_2 .
4. Introduire une quantité connue de granulat sec dans le pycnomètre → peser m_3 .
5. Compléter le pycnomètre avec de l'eau jusqu'au trait → peser m_4 .

Calcul :

Masse volumique apparente (ρ_a) – méthode au récipient cylindrique

Matériel :

- * Récipient cylindrique (volume connu V)
- * Balance de précision
- * Granulat sec

Procédure :

1. Peser m_0 = masse du récipient vide.
2. Remplir le récipient avec les granulats sans compaction → peser m_1 .
3. Calculer la masse des granulats :
 $[m = m_1 - m_0]$
4. Déterminer la masse volumique apparente :

3. Masse volumique sèche (ρ_d)

- * Sécher l'échantillon de granulats à 105 °C jusqu'à masse constante.
- * Déterminer sa masse et diviser par le volume occupé.

TP N°1 : Masses volumiques des granulats

1. Masse volumique réelle (ρ_r) – méthode au pycnomètre



Matériel :

Pycnomètre de 1 L
 Balance de précision
 Eau distillée
 Étuve (105 °C)
 Granulat sec
 (sable ou gravier)



Procédure :

1. Sécher l'échantillon de granulat à 105 °C jusqu'à masse constante.
2. Peser m_1 = masse du pycnomètre vide.
3. Remplir le pycnomètre avec de l'eau → peser m_2
4. Introduire une quantité connue de granulat sec dans le pycnomètre
peser m_3
5. Compléter le pycnomètre avec de l'eau jusqu'au trait → peser m_4

Calcul :

$$\rho_r = \frac{m_{\text{granulats secs}}}{(m_2 - m_1) - (m_4 - m_3)}$$

2. Masse volumique apparente (ρ_a) – méthode au récipient cylindrique



Récipient

Récipient cylindrique (*volume connu*
 V)

Balance de précision
 Granulat sec

Procédure :

1. Peser m_0 = masse du récipient vide.
2. Remplir le récipient avec les granulats sans compaction → peser m_1



Analyse granulométrique d'un sable et d'un gravier

L'analyse granulométrique d'un sable et d'un gravier (selon la norme NF EN 933-1) consiste à déterminer la répartition dimensionnelle des grains qui composent ces matériaux. Elle est essentielle pour la formulation des bétons et mortiers car la granulométrie influence directement la compacité, la maniabilité et la résistance.

Objectif

- * Déterminer la distribution des dimensions des grains d'un granulat (sable ou gravier).
- * Construire la courbe granulométrique qui représente le pourcentage des grains passant à travers une série de tamis normalisés.

Matériel nécessaire

- * Série de tamis normalisés (maille carrée) conformes à la norme (par ex. : 0,063 – 0,125 – 0,25 – 0,5 – 1 – 2 – 4 – 8 – 16 – 31,5 – 63 mm selon le type de granulat).
- * Balance de précision ($\pm 0,1$ g).
- * Étuve (pour sécher les échantillons à 110 °C).
- * Agitateur ou tamiseur mécanique.

Procédure expérimentale

1. Préparation de l'échantillon :

- * Prélever un échantillon représentatif (réduction par quartage si nécessaire).
- * Sécher à l'étuve jusqu'à masse constante.
- * Peser la masse totale sèche (M).

2. Tamisage :

- * Placer la série de tamis (ordre décroissant des ouvertures).

* Verser l'échantillon sur le tamis supérieur et tamiser mécaniquement ou manuellement.

* Récupérer et peser la fraction retenue sur chaque tamis (m_i).

3. Calculs :

* Pour chaque tamis :

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

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

4. **Représentation graphique :

* Tracer la courbe granulométrique sur papier semi-logarithmique :

* Axe des abscisses : ouverture des tamis (échelle logarithmique).

* Axe des ordonnées : pourcentage passant (0–100 %).

Résultats obtenus

* La courbe granulométrique permet de :

* Déterminer la finesse du sable (sable fin, moyen ou grossier).

* Vérifier la conformité du granulat aux normes (zones granulométriques).

* Calculer le module de finesse (MF) pour les sables :

$$M_f = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis}$$

Pour un sable, on utilise généralement les tamis : 0,08 – 0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5 – 5 mm.

Pour un gravier, on utilise les tamis plus gros : 4 – 8 – 16 – 31,5 – 63 mm.

Rapport d'analyse granulométrique - Exemple

Méthode: NF EN 933-1 (tamisage)

Échantillon sable - Masse totale (sec): 1000 g

Module de finesse (MF) (exemple): 1.0

Échantillon gravier - Masse totale (sec): 500 g

D10 (ex.): 63.00 mm D30 (ex.): 4.00 mm D60 (ex.): 4.00 mm

Remarques:

- Les valeurs ici sont des exemples. Remplacez-les par vos mesures réelles si besoin.
- Courbes granulométriques tracées en échelle logarithmique (ouverture des tamis).

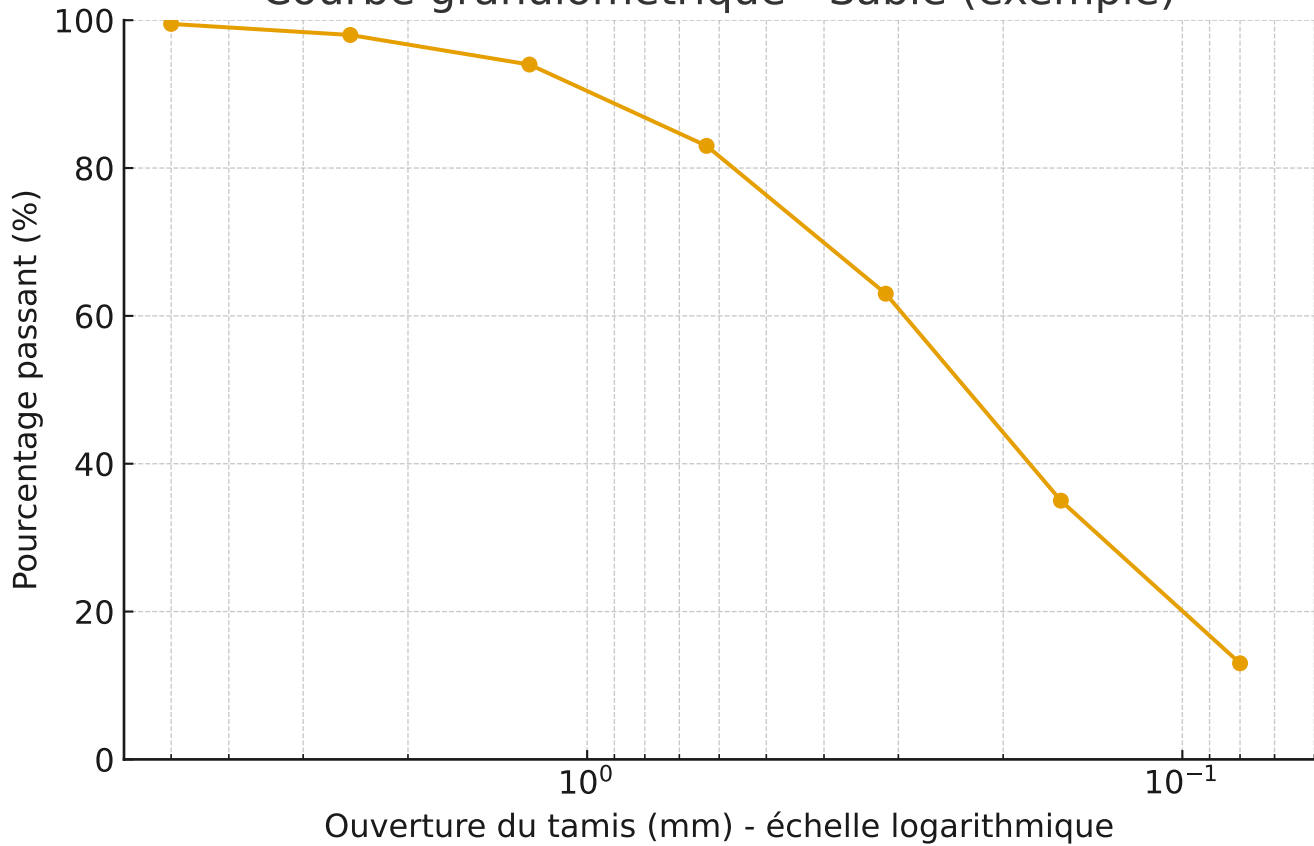
Tableau - Sable (exemple)

Tamis	Ouverture (mm)	Masse retenue (g)	Pourcentage retenu (%)	Pourcentage passant (%)
5.00 mm	5.0	5	0.5	99.5
2.50 mm	2.5	15	1.5	98.0
1.25 mm	1.25	40	4.0	94.0
0.63 mm	0.63	110	11.0	83.0
0.315 mm	0.315	200	20.0	63.0
0.160 mm	0.16	280	28.0	35.0
0.080 mm	0.08	220	22.0	13.0
Pan	0.0	130	13.0	0.0

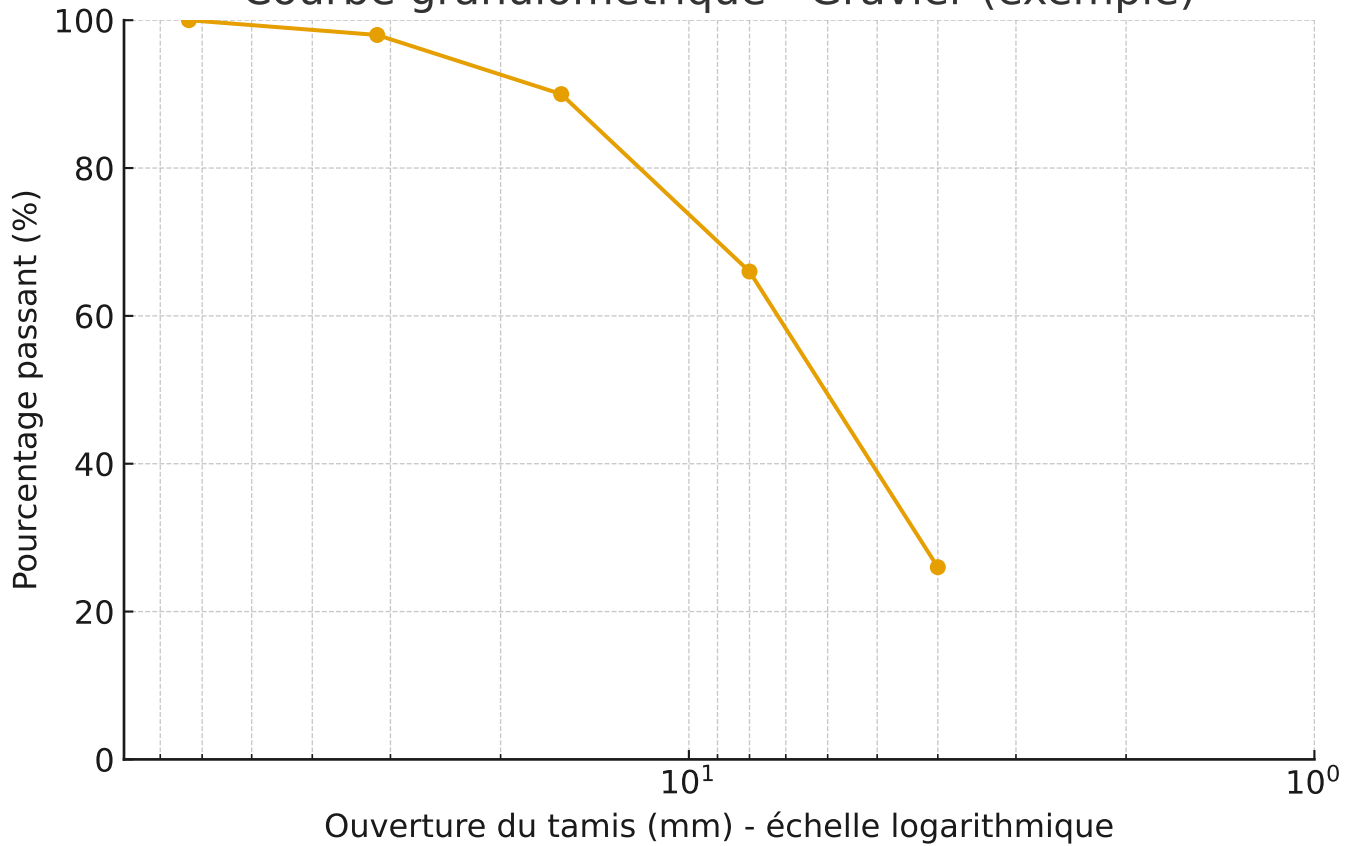
Tableau - Gravier (exemple)

Tamis	Ouverture (mm)	Masse retenue (g)	Pourcentage retenu (%)	Pourcentage passant (%)
63.0 mm	63.0	0	0.0	100.0
31.5 mm	31.5	10	2.0	98.0
16.0 mm	16.0	40	8.0	90.0
8.0 mm	8.0	120	24.0	66.0
4.0 mm	4.0	200	40.0	26.0
Pan	0.0	130	26.0	0.0

Courbe granulométrique - Sable (exemple)



Courbe granulométrique - Gravier (exemple)



Essais de propreté sur granulats.

Les essais de propreté sur granulats font partie des contrôles de qualité réalisés en laboratoire pour vérifier la présence d'impuretés susceptibles d'altérer les performances des bétons et mortiers (adhérence pâte/granulat, résistance mécanique, durabilité).

1. Essai d'équivalent de sable (ES)

Norme : NF EN 933-8.

Principe : mesure la proportion relative des fines argileuses contenues dans le sable par comparaison au volume de sable propre.

Procédure :

- * Mélange du sable avec une solution flocculante.
- * Agitation dans une éprouvette graduée.
- * Après décantation, on mesure la hauteur du sable propre (HS) et la hauteur totale avec les particules argileuses en suspension (HT).

Formule :

$$ES = \frac{HS}{HT} \times 100$$

Interprétation : plus la valeur de l'ES est élevée (≥ 70), plus le sable est propre.

2. Essai de propreté au bleu de méthylène (VBS)

Norme : NF EN 933-9.

Principe : quantifier la teneur en fines argileuses actives (smectites, montmorillonite...) par adsorption d'un colorant (bleu de méthylène).

Procédure :

- * Suspension d'une quantité connue de fines dans de l'eau.

* Ajout progressif de bleu de méthylène jusqu'à obtention d'un halo bleu persistant sur papier filtre.

Résultat : volume de bleu de méthylène consommé par 100 g de fines (VBS en g/100g).

Interprétation :

* VBS < 1 → granulats très propres.

* VBS élevé (> 2) → teneur importante en argiles actives nuisibles.

3. Autres essais complémentaires

Teneur en impuretés organiques (méthode au sulfate d'ammonium ou par comparaison de couleur).

Teneur en éléments légers (essai par flottation dans un liquide lourd, pour repérer particules de bois, charbon, etc.).

Teneur en chlorures et sulfates (analyses chimiques, importants pour éviter corrosion des armatures).

En résumé :

* **Équivalent de sable (ES)** → impuretés fines globales.

* **Bleu de méthylène (VBS)** → argiles actives.

* **Analyses complémentaires** → organiques, sulfates, chlorures, particules légères.

Références Bibliographiques

- [1] KECHKAR Chiraz, M A T E R I A U X D E C O N S T R U C T I O N 1. Université 8 Mai 1945 Guelma, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie Civil & Hydraulique, 2022.
- [2] Toufik BOUBEKEUR, Polycopié de MATERIAUX DE CONSTRUCTION 01, CENTRE UNIVERSITAIRE DE TISSEMSILT INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES, Mai 2017.
- [3] Toufik BOUBEKEUR, "Evaluation des performances des ciments portland au calcaire", thèse de Magister, Université de Chlef, 2009, 107 p.