



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Des Frères Mentouri – Constantine
Faculté des Sciences de la Technologie
Département de Génie Civil



Polycopié de cours :

MATERIAUX DE CONSTRUCTION 2

Cours destiné aux étudiants de Licence Académique : Génie civil

Réalisé par :

Dr, KHOUADJIA Mohamed Lyes Kamel

Année universitaire : 2023/2024

PREAMBULE

❖ Public cible :

Ce cours vise à doter les étudiants d'une base solide en Matériaux de constructions, leur permettant de poursuivre leur apprentissage en S4 et de se préparer à une carrière dans le domaine du génie civil. A l'issue du cours les étudiants auront notamment des notions sur les composants des bétons et leurs comportements à l'état frais (ouvrabilité) et à l'état durci (les résistances mécaniques) sans oublier de décrire les différents types de bétons existants en se basant sur des textes normatifs actuels. Aussi, l'étudiant connaîtra les processus d'élaboration des différents matériaux, de la matière première jusqu'au produit fini.

❖ **Pré-requis :** Avant d'aborder le cours « Matériaux de construction 2 », les étudiants devront avoir acquis, au cours du semestre précédent, des connaissances préliminaires solides sur les propriétés essentielles des liants et granulats.

❖ Contenu :

Le contenu de ce polycopié se compose de quatre chapitre principaux :

Chapitre 1 : Les bétons

Ce chapitre introduira les étudiants aux fondamentaux des bétons, depuis leur définition et classification jusqu'à leurs propriétés physiques, mécaniques et de durabilité. Ils exploreront également les différents composants des bétons, leur rôle et leur influence sur les performances du matériau. L'accent sera mis sur les essais sur béton frais et durci, ainsi que sur les innovations récentes dans le domaine des bétons.

Chapitre 2 : Produits céramiques

Ce chapitre se concentrera sur les produits céramiques, en commençant par une introduction à leur définition, classification et matières premières. Les étudiants approfondiront leurs connaissances sur les procédés de fabrication des produits céramiques courants, tels que les briques, les tuiles, les carreaux de revêtement et les produits sanitaires. Ils exploreront également les propriétés et les applications de ces matériaux dans divers domaines de la construction.

Chapitre 3 : Métaux ferreux et non ferreux

Ce chapitre offrira une vue d'ensemble des métaux ferreux et non ferreux, en abordant leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques. Les étudiants se familiariseront avec la classification des aciers en fonction de leur composition et les différents traitements thermiques appliqués. Ils étudieront également les méthodes de protection des métaux ferreux contre la corrosion et les propriétés des principaux métaux non ferreux, tels que l'aluminium et le cuivre.

Chapitre 4 : Le verre

Ce chapitre conclura le programme en explorant le verre, un matériau de construction important aux propriétés uniques. Les étudiants découvriront la définition, la composition et les propriétés du verre, ainsi que les différents procédés de fabrication utilisés pour le produire. Ils termineront le module en examinant les diverses applications du verre dans le domaine de la construction et de l'architecture.

❖ Mode d'évaluation:

Examen: 100%

TABLE DES MATIERES

PREAMBULE	2
TABLE DES MATIERES	4
LISTE DES FIGURES	5
LISTE DES TABLEAUX	7
CHAPITRE I : LES BETONS	8
CHAPITRE II : LES PRODUITS CERAMIQUES	47
CHAPITRE III : LES METAUX FERREUX	57
CHAPITRE IV : LE VERRE	67
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	72

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 . Représentation de la composition du béton

Figure I.2. Béton armé

Figure I.3. Aspect des bétons Désactivés

Figure I.4. Aspect et composition des bétons drainants

Figure I.5. Aspect des bétons fibrés

Figure I.6. Fonctionnement d'une poutre : (a) en béton armé, (b) en béton précontraint

Figure I.7. Principe du relâchement des câbles dans les bétons précontraints

Figure I.8. Principe de la mise en place du béton projeté

Figure I.9. Principe de fabrication et mise en place BPE

Figure I.10. Exemple de béton allégé par argile ou polystyrène

Figure I.11. Exemple d'éléments en béton préfabriqué

Figure I.12. Mécanisme d'action des super-plastifiants

Figure I.13 . Laitier granulé de haut fourneau

Figure I.14 . Vue au MEB du laitier granulé avant broyage de haut fourneau

Figure I.15 . Pouzzolane naturelle

Figure I.16 . Vue au MEB de la pouzzolane

Figure I.17 . Cendre volante

Figure I.18 . MEB d'une cendre volante

Figure I.19 . Fumée de silice

Figure I.20. Fumée de silice au MEB

Figure I.21. Schématisation de la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams

Figure I.22. Essai réel d'affaissement au cône d'Abrams

Figure I.23. Schéma de la Table à secousses

Figure I.24 : Essai réel de table à secousses

Figure I.25. Essai de Vébé

Figure I.26 . Essai de contrôle de la maniabilité pour les BAP

Figure I.27 Appareil de mesure du retrait

Figure I.28. Eprouvettes cylindriques (diamètre 16 cm, hauteur 32 cm)

Figure I.29. Schématisation du dispositif d'essai de traction par flexion

Figure I.30. Schématisation du dispositif d'essai de traction par fendage

Figure I.31. Schématisation du dispositif d'essai à la traction directe

Figure I.32. Principe de l'essai sclérométrique

Figure I.33. Méthodes d'auscultation sonore

Figure I.34. Malaxeur et moules utilisés pendant les essais

Figure I.35. Eprouvettes et bassin de conservation

Figure II.1. Microstructure typique d'une surface céramique

Figure III.1. Aciers lisses

Figure III.2. Aciers haute adhérence (HA)

Figure III.3. Longueur de recouvrement

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Classe des différents types de fibres

Tableau I.2. Exemple de la composition chimique du laitier granulé

Tableau I.3. Composition chimique de la pouzzolane

Tableau I.4. Composition chimique de la cendre volante siliceuse

Tableau I.5. Composition chimique de la cendre volante calcique

Tableau I.6. Composition chimique de la schiste calciné

Tableau I.7. Composition chimique du calcaire

Tableau I.8. Composition chimique de la fumée de silice

Tableau I.9. Principaux types de ciment (NA 442)

Tableau I.10. Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône

Tableau II.1. Différents produits obtenus après façonnage

Tableau II.2. Températures de cuisson pour les produits en terre

CHAPITRE I

LES BETONS

I.1 INTRODUCTION :

Né avec le XX^e siècle le béton est un matériau relativement jeune qui a connu ces vingt dernières années d'importantes avancées, qui lui ont permis de diversifier les utilisations auxquelles il était jusque-là destiné tant en termes de conception que de mise en œuvre et d'esthétisme. Il est devenu un matériau de modernité et d'innovation. Il a notamment profité des progrès de la chimie et parallèlement au développement de ses techniques de production [1].

Au fil des années, l'étendue des performances des bétons physiques, mécaniques et esthétiques s'élargit sans cesse. Les caractéristiques du béton ont progressé pour répondre aux demandes des concepteurs afin d'avoir des résistances toujours plus importantes, des exigences de durabilité plus fortes, des contraintes de mise en œuvre (maîtrise de la rhéologie, maniabilité, etc.), ainsi qu'à de nouvelles exigences environnementales (épuisement des ressources naturelles, ré-exploitation des déchets de démolitions, etc.).

Des programmes de recherches ont vu le jour envers l'amélioration de l'utilisation des bétons.

D'autre part, ces matériaux sont très évolutifs et complexes. Ils subissent lors de leur préparation de grandes transformations physico-chimiques et structurales (réactions d'hydratation du ciment) et ces transformations se suivent, avec une cinétique qui décline au cours du temps, tout au long de leur vie (vieillessement ou maturation) et qui peut affecter la durabilité et conduire à la dégradation de ce dernier [1-3].

Il est donc indispensable de maîtriser parfaitement tous les paramètres pour comprendre le comportement expérimental ou "in situ" du béton ; et ce, à partir de leur fabrication dans le but d'établir, dans la suite de notre travail, des relations pertinentes entre ces propriétés et le comportement des bétons.

I.2 LE BETON HYDRAULIQUE :

Le béton est actuellement l'un des matériaux de construction les plus utilisés à travers le monde (7 milliards de m³ sont consommés chaque année dans le monde soit 1 m³ /personne). Il répond au mieux aux différentes contraintes et exigences imposées aux bâtiments et aux ouvrages de génie civil : stabilité mécanique, étanchéité, tenue au feu, isolation acoustique et thermique, durabilité, aspect de surface, et bien entendu respect de l'environnement [1].

Le béton est un matériau composite hétérogène poreux, composé de minéraux (Figure I.1), tels que (en volume) : le ciment (7 à 14%), granulats « les sables, les gravillons » (entre 60 et 78 %), eau (14 à 22 %), Air (1 à 6 %) et éventuellement des additions minérales, et des adjuvants (< à 5%) pour lui donner sa plasticité à l'état frais et lui permettre d'acquérir à l'état durci les caractéristiques physico-chimiques recherchées [3].

En outre, il représente l'un des systèmes les plus complexes parmi les matériaux manufacturés du point de vue comportement, et cela, malgré la simplicité de sa fabrication et de sa mise en place, ainsi que son faible coût de revient.

D'autre part, le comportement du béton est lié à la variété des constituants et à leur nature : ciment, granulats, adjuvants, additions, ainsi qu'aux différents rapports entre les constituants (Eau/Ciment).

De ce fait, la maîtrise de ces paramètres est requise, et ce, à partir de leur fabrication dans le but de comprendre et interpréter au mieux les résultats expérimentaux.

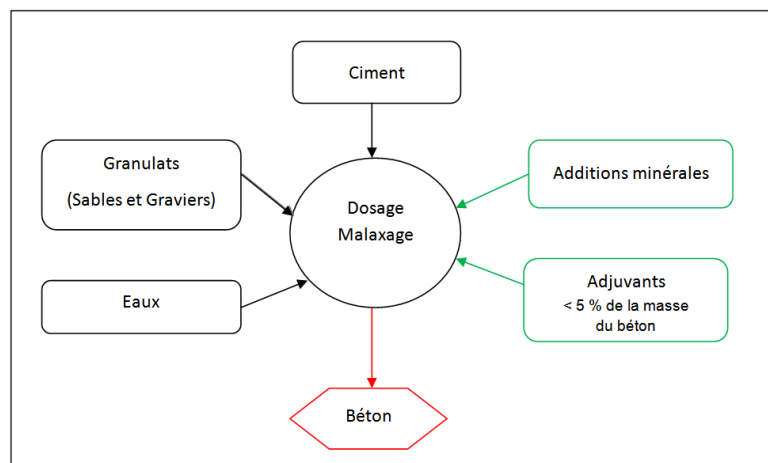


Figure I.1 . Représentation de la composition du béton

I.2.1 Les différents types de béton

Il existe différents types de béton en utilisation courante :

I.2.1.1 Béton armé

Le béton armé est un matériau composite qui est constitué de béton et de sections d'acier qui allient les résistances à la compression du béton. Il est utilisé comme matériau de construction. Les armatures des bétons armés peuvent varier dans leur composition : acier carbone et acier inox Les barres d'acier peuvent atteindre environ 12m de long et leur diamètre peut varier entre 5 à 50mm. Le béton est un matériau très résistant en compression, mais faible en traction et au

cisaillement. Pour compenser ce déséquilibre, on incorpore dans la masse de béton des barres d'armature destinées à reprendre ces efforts.



Figure I.2. Béton armé

I.2.1.2 Béton Désactivé

Le béton désactivé est un choix populaire pour les aménagements extérieurs tels que les allées de jardin, les terrasses et les cours. Le béton désactivé est un béton coulé de manière à faire ressortir les graviers en surface après séchage. La composition du béton désactivé est similaire à celle du béton classique, à la différence qu'une attention particulière sera portée sur le type de gravillons utilisés pour un rendu esthétique. Le dosage en ciment du béton désactivé est en règle générale compris entre 300 et 350 kg/m³.

Pour le réaliser, il est nécessaire de pulvériser un désactivant à la surface, qui retarde l'hydratation du ciment et qui permet d'en révéler les granulats. Au final, on effectue un nettoyage haute pression de la surface 5 et 24 heures après le coulage cela donnera l'impression d'avoir une allée en gravier sans les graviers qui s'éparpillent sans arrêt. Sa surface granulée est anti-dérapante et très robuste, résistant aux intempéries et à l'usure [4] . Les bétons désactivés sont généralement utilisés dans les aires de stationnement , les voies piétonnières et les Aires de jeux et parcs .



Figure I.3. Aspect des bétons Désactivés

I.2.1.3 Béton drainant

Le béton drainant absorbe et stockent les eaux pluviales dans leur structure, et les redistribuent progressivement vers la nappe phréatique ou vers un autre exutoire tout en améliorant la qualité esthétique des aménagements. Leur formulation repose sur des granulats variant de 2,5-10 à 5-20 mm de sable dans la quantité se situe entre 0 et 8 % de la masse totale des granulats et d'un rapport eau/liants variant de 0,26 à 0,40. Il requiert la mise en place de géotextile, et d'un produit minéralisant, et surtout la mise en place de joints de dilatation tous les 20m². Ils ont une porosité ouverte utile constituée d'un pourcentage élevé de vides interconnectés (15 à 35 %) communicant entre eux et avec l'extérieur. Selon la taille des gros granulats et la densité du mélange, le béton drainant permet d'évacuer en une minute une valeur moyenne de 200 litres d'eau par mètre carré [5]. Les bétons drainants sont généralement utilisés dans les aires de stationnement, les voies piétonnières et les Aires de jeux et parcs, les Courts de tennis et les piscines.

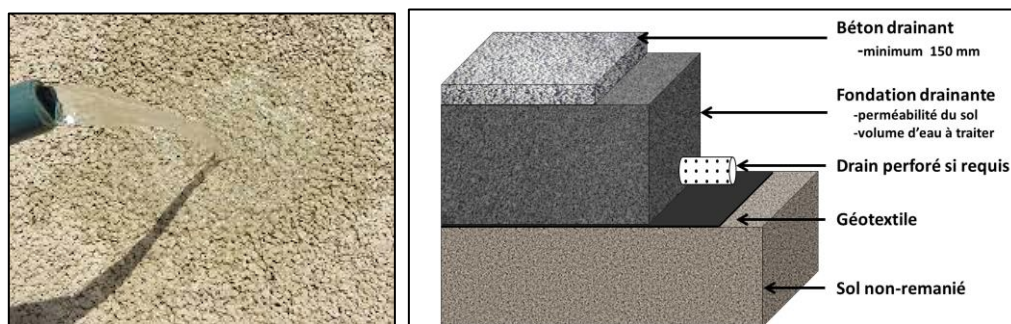


Figure I.4. Aspect et composition des bétons drainants

I.2.1.4 Béton fibré

Le béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres synthétiques, métalliques ou végétales (Tableau I.1) . Les fibres incorporées permettent le renforcement du béton. Le béton fibré permet une plus grande rapidité et une plus grande facilité de mise en œuvre du fait de la suppression de la mise en place du ferrailage et une limitation de la fissuration grâce au grand nombre de fibres dispersées dans le béton qui permettent une plus grande adhérence. Parmi les autres avantages des bétons fibrés :

- les bétons possèdent une forte résistance en traction ;
- les bétons ont un module d'élasticité plus élevé ;
- les bétons formulés ont un prix compétitif et acceptable.

Les bétons fibrés peuvent être utilisés pour une grande variété d'applications en bâtiment, en travaux routiers, en aménagements urbains et en génie civil tels que : le dallages agricoles, industriels et commerciaux, aires de stockage, tuyaux, regards, cuves, réservoirs, panneaux de façade, mortier de scellement, etc.

Tableau I.1. Classe des différents types de fibres

Fibres naturelles			Fibres artificielles (synthétiques)	
Végétales	Animales	Minérales	Minérales	Organiques
Lin Chanvre Coton Celluloses Dis Halfa	Poil Laine Soie	Amiante de roches	Laine de roche Carbone Métallique Verres	Polymères



Figure I.5. Aspect des bétons fibrés

I.2.1.5 Béton précontraint

Le béton précontraint est une technique qui vise à améliorer la résistance du béton face à des sollicitations très élevées. En créant une compression initiale en tendant (comme des ressorts) les aciers constituant les armatures, permettant ainsi au béton d'être totalement comprimé sous les sollicitations,

On distingue généralement une précontrainte par « pré-tension » et une précontrainte par « post-tension ». Dans la pré-tension (le plus souvent utilisée en bâtiment) Dans la pré-tension. Elles sont ensuite relâchées, mettant ainsi le béton en compression par simple effet d'adhérence. Cette technique ne permet pas d'atteindre des valeurs de précontrainte aussi élevées qu'en post-tension.

Pour la post-tension cette technique consiste à disposer des câbles de précontrainte dans des gaines incorporées au béton. Après la prise du béton, les câbles sont tendus au moyen de vérins de manière que les câbles transfèrent une partie de leur tension sous forme de compression du béton au repos. Cette technique, relativement complexe, est généralement réservée aux grands ouvrages (comme les ponts) puisqu'elle nécessite la mise en œuvre d'encombrantes [8].

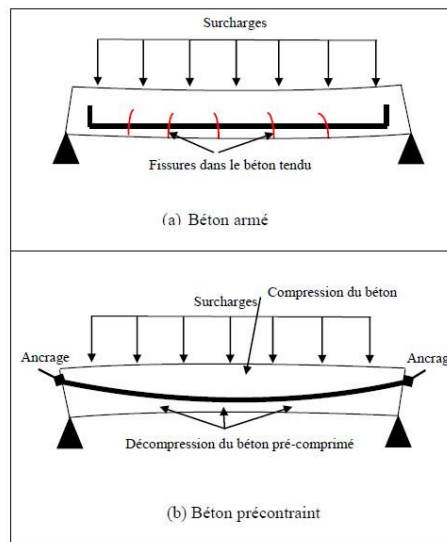


Figure I.6. Fonctionnement d'une poutre : (a) en béton armé, (b) en béton précontraint [8]

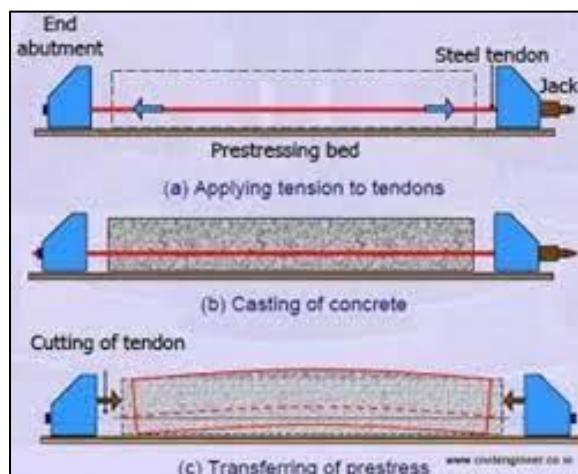


Figure I.7. Principe du relâchement des câbles dans les bétons précontraints

I.2.1.6 Béton hautes performances

Le béton haute performances est constitué d'éléments qui lui confère une meilleure résistance, une grande fluidité, et une plus grande durabilité. Les BHP ont une plus grande compacité et une très faible porosité ce qui diminue la quantité d'agents agressifs pénétrant dans le béton et donc protège les armatures de la corrosion et augmente la résistance des bétons au cycle

gel/dégel. Le BHP se compose de granulats, d'eau, de ciment de classe 52,5N ou 52,5R, de superplastifiant, et éventuellement d'une addition (souvent, des fumées de silice). La composition des BHP doit être optimisée de telle sorte que la granulométrie, des gros grains aux très fins, soit la plus compacte possible. Les BHP offre une grande résistance à court terme permettant un décoffrage rapide mais aussi des mises en précontraintes rapides.

Ainsi les propriétés élevées au jeune âge amènent à préconiser l'utilisation de ce BHP pour les ouvrages soumis à de fortes sollicitations (bâtiments de grande hauteur, ponts, réservoirs, centrales nucléaires, travaux en milieu marin ou agressif ...) [9].

I.2.1.7 Béton projeté

Le béton projeté est un béton qui est projeté à grande vitesse sur une surface au moyen d'air comprimée. La force de l'impact sur la surface compacte le matériau ce qui l'empêche de s'affaisser ou de couler. Le béton projeté a des propriétés similaires à celles d'un béton ordinaire de composition similaire et mis en place de façon usuelle si ce n'est en fait qu'une méthode de mise en place différente. Cette méthode permet d'éviter l'utilisation des coffrages, elle ne nécessite qu'une seule surface de support et peut être utilisée sur des surfaces courbes et irrégulières.



Figure I.8. Principe de la mise en place du béton projeté

I.2.1.8 Béton prêt à l'emploi

Il s'agit de béton préparé en centrale et transporté jusqu'au lieu d'utilisation dans des camions malaxeurs (camion toupie) il est prêt à la mise en œuvre sur site sans ajout. L'avantage d'utilisation des BPE c'est de garantir la qualité du produit final tout en facilitant la mise en œuvre et en simplifiant l'organisation du chantier. Cependant, l'utilisation des BPE requière le respect du temps cumulé de transport, de déchargement et de mise en place du béton qui doit être limité à 1h30 maximum pour éviter de générer un risque de ségrégation.



Figure I.9. Principe de fabrication et mise en place BPE

I.2.1.9 Béton autoplaçant

Le béton autoplaçant est un béton de ciment capable, sous le seul effet de la pesanteur, de se mettre en place dans les coffrages même les plus complexes et très encombrés sans nécessiter pour autant des moyens de vibration afin de consolider le mélange avec comme résultat un produit très homogène. Ce type de béton doit être apte à passer à travers les armatures les plus serrées avec, cependant, une vitesse dépendante de la viscosité du mélange. Pour remplir cette condition, le béton doit être très fluide, c'est-à-dire très déformable. Or ceci n'est possible que si le rapport eau/ciment est élevé ou si le béton contient un superplastifiant.

Les caractéristiques les plus importantes pour la mise en œuvre du BAP sont la fluidité, la viscosité et la résistance envers la ségrégation. Il existe de nombreux procédés pour effectuer le contrôle de ces propriétés qui vont du complexe et coûteux rhéomètre à béton, jusqu'au simple cône servant à la mesure de l'étalement (Slump Flow) . Afin de valider une formule de BAP trois essais de caractérisation ont été préconisés à savoir l'essai d'étalement, l'essai à la boîte en L et, l'essai de stabilité au tamis. De ce fait, le BAP constitue une alternative intéressante au béton conventionnel vibré. Ces domaines comprennent le bâtiment, le génie civil, les tunnels, la préfabrication et les travaux d'assainissement et de réhabilitation [10].

I.2.1.10 Béton léger

Le béton léger ou béton allégé est un béton de ciment avec une masse volumique à sec inférieure à celle d'un béton normal. Ce béton peut contenir un pourcentage volumique important de granulats légers (Argile, polystyrène par exemple) ou peut être rendu cellulaire par aération ou moussage. Par rapport au béton normal, le béton léger est caractérisé, par une conductivité thermique plus faible. Par conséquent, il a une meilleure isolation thermique et une résistance mécanique plus faible de celle des bétons normaux équivalents.

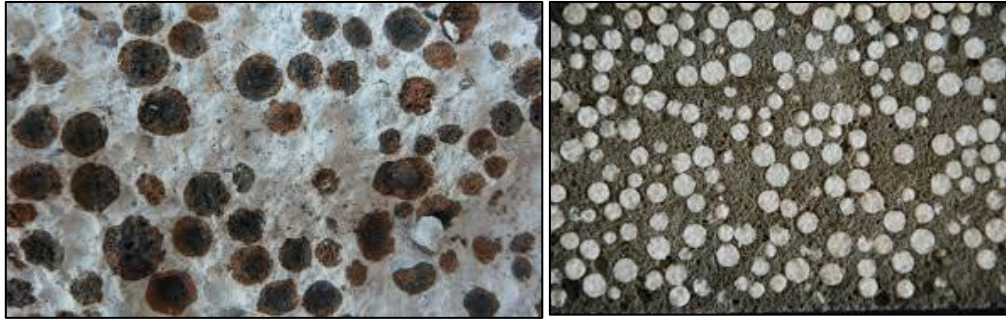


Figure I.10. Exemple de béton allégé par argile ou polystyrène

I.2.1.11 Béton préfabriqué

Le béton préfabriqué est un béton réalisé sur des sites de production dédiés. Ils peuvent être standards ou sur-mesure. De ce fait, la préfabrication en béton offre une solution de construction rapide et efficace et durable, ainsi on trouve dans la préfabrication des dalles, parpaings, blocs de coffrage, escaliers, balustrades, éléments d'assainissement.



Figure I.11. Exemple d'éléments en béton préfabriqué

I.3 LES ADJUVANTS :

Dès les origines de la fabrication du béton de ciment Portland, des recherches commencèrent sur l'incorporation de produits susceptibles d'améliorer les propriétés du béton. Dès 1881, Candlot étudie l'action des accélérateurs et des retardateurs de prise. Le début du vingtième siècle a été marqué par la commercialisation d'hydrofuges et d'accélérateurs à base de chlorure de calcium ainsi que les entraîneurs d'air [11]. De nos jours, et avec le développement qu'a connu la construction, les adjuvants prennent une place grandissante dans le domaine du génie civil. Des commissions ainsi que des normes furent créées pour l'agrément et le contrôle des adjuvants.

La norme NF EN 934-2 [12] classe les adjuvants pour bétons, mortiers et coulis, suivant leur fonction principale. On peut distinguer trois grandes catégories d'adjuvants :

- Adjuvants qui modifient l'ouvrabilité du béton : Plastifiant- réducteur d'eau, Super-Plastifiant haut réducteur d'eau ;

- Adjuvants qui modifient la prise et le durcissement : accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise ;
- Adjuvants qui modifient certaines propriétés particulières : entraîneurs d'air, générateurs de gaz, hydrofuges de masse.

I.3.1 Différent type d'adjuvant :

I.3.1.1 Plastifiants-réducteurs d'eau

Les plastifiants permettent de modifier la consistance, de réduire la teneur en eau du béton donné (Réducteur d'eau), ou , sans modifier la teneur en eau, d'augmenter l'affaissement / l'étalement ou de produire les deux effets à la fois. Leur dosage moyen est de 0,3 à 0,5 % du poids du ciment. Les Plastifiants permettent :

- d'augmenter la compacité du béton entraînant une amélioration des résistances,
- de faciliter la mise en place du béton,
- d'augmenter la maniabilité tout en réduisant l'eau de gâchage,
- de réduire la ségrégation,

I.3.1.2 Superplastifiants-hauts réducteurs d'eau

Les superplastifiants permettent de réduire fortement la teneur en eau du béton donné (haut réducteur d'eau), ou , sans modifier la teneur en eau, d'augmenter considérablement l'affaissement/l'étalement ou de produire les deux effets à la fois. Leur dosage moyen est de 0,8 à 3 % du poids du ciment. Les superplastifiants permettent :

- de réduire très fortement la quantité d'eau de gâchage tout en maintenant la maniabilité,
- d'augmenter la maniabilité tout en conservant les performances,
- de réaliser des bétons à compacité élevée, permettant des gains de performance très importants en terme de : résistances mécaniques initiales et finales élevées;
- la diminution de la porosité et l'accroissement de la durabilité.

I.3.1.3 Accélérateur de durcissement

Les accélérateurs de durcissement augmentent la vitesse de développement des résistances initiales du béton, avec ou sans modification du temps de prise. Leur dosage moyen est de 0,8 à 2 % du poids du ciment.

D'autre part, la vie du béton passe par trois phases essentielles :

- plastique : fabrication, transport et mise en oeuvre,
- prise : perte de maniabilité, faibles résistances mécaniques,
- durcissement : augmentation des résistances mécaniques.

De ce fait, les accélérateurs de durcissement permettent d'accroître la vitesse de montée en résistance du béton.

- Les domaines d'application sont les suivants :

- béton prêt à l'emploi BPE,
- bétons nécessitant une résistance à court terme,
- bétons pour décoffrages rapides,
- bétons précontraints.

I.3.1.4 Accélérateurs de prise

Les accélérateurs de prise permettent de diminuer le temps de début de prise du béton. Leur dosage moyen est de 1 à 3 % du poids du ciment. Ils permettent de:

- réduire les temps de prise,
- mettre le béton hors gel,
- d'augmenter la rotation des coffrages.

- Leurs domaines d'application sont les suivants :

- Béton prêt à l'emploi BPE,
- Bétons hors gel,
- Bétons à hautes performances initiales BHP ,
- Bétons manufacturés,
- Bétons pour travaux en zones de marnage,
- Bétons par temps froids,

I.3.1.5 Retardateurs de prise

Les retardateurs de prise permettent de retarder le début de prise du béton. Leur dosage moyen est de 0,2 à 0,5 % du poids du ciment. Les retardateurs de prise permettent de :

- augmenter le temps de début de prise,
- de réguler le dégagement de chaleur due à l'hydratation du ciment.

- Les domaines d'application sont les suivants :

- Béton prêt à l'emploi BPE,
- Bétons pompés,
- Bétons pour ouvrages de masse,
- Coulage du béton en continu,
- Coulage de béton par temps chauds.
- Transports sur longues distances

I.3.1.6 Entraîneurs d'air

Les entraîneurs d'air permettent : d'entraîner, à l'intérieur du béton, des micro-bulles d'air parfaitement réparties qui serviront de vase d'expansion dans le béton durci, d'améliorer la durabilité du béton soumis à l'action du gel... Leur dosage moyen est de 0,05 à 0,2 % du poids du ciment. Les entraîneurs d'air permettent de :

- d'entraîner, à l'intérieur du béton, des micro-bulles d'air parfaitement réparties qui serviront de vase d'expansion dans le béton durci,
 - d'améliorer la durabilité du béton soumis à l'action du gel et des sels de déverglaçage,
 - de faciliter la mise en oeuvre du béton.
- Les domaines d'application sont les suivants :
 - Bétons prêt à l'emploi BPE,
 - Bétons d'ouvrages d'art exposés aux cycles gel/dégel (association avec un superplastifiant recommandée).
 - Bétons devant résister aux cycles de gel et de dégel,
 - Bétons extrudés,
 - Bétons routiers.

I.3.1.7 Hydrofuge de masse

Les hydrofuges de masse permettent de limiter la pénétration de l'eau dans les pores et les capillaires du béton, sans altérer ses qualités plastiques et esthétiques. Ils se combinent à la chaux du ciment pour former des cristallisations complémentaires qui obstruent les capillaires du mortier ou du béton. Leur dosage moyen est de 0,5 à 2 % du poids du ciment. Les hydrofuges de masse permettent :

- de réduire la perméabilité et l'absorption capillaire du béton,
- de réduire l'apparition des efflorescences.

I.3.2 Rôle des adjuvants et mécanismes d'action :

Les adjuvants sont définis dans la norme NF EN 934-2 [12] , comme étant des produits incorporés lors du malaxage ou avant la mise en oeuvre du béton, mortiers ou coulis à une dose inférieure ou égale à 5 % en masse de la teneur en ciment. Chaque adjuvant est défini par une fonction principale, mais peut présenter une ou plusieurs fonctions secondaires. À titre d'exemple : les Plastifiants réducteurs d'eau sont des produits qui viennent se fixer par adsorption sur les grains du ciment et provoquent une défloculation des grains de ciment [13].

Ce phénomène est principalement lié à la présence de charges électriques sur la surface des grains, qui va piéger un certain volume d'eau à l'intérieur des floes afin d'empêcher l'eau d'hydrater certaines parties des surfaces des grains de ciment qui se trouvent en quelque sorte soudés les uns aux autres [14] (Figure I.12).

De plus, ce mécanisme permet soit de réduire le dosage en eau à maniabilité constante, ce qui induit donc à un gain de résistance, soit d'augmenter l'affaissement à teneur en eau constante.

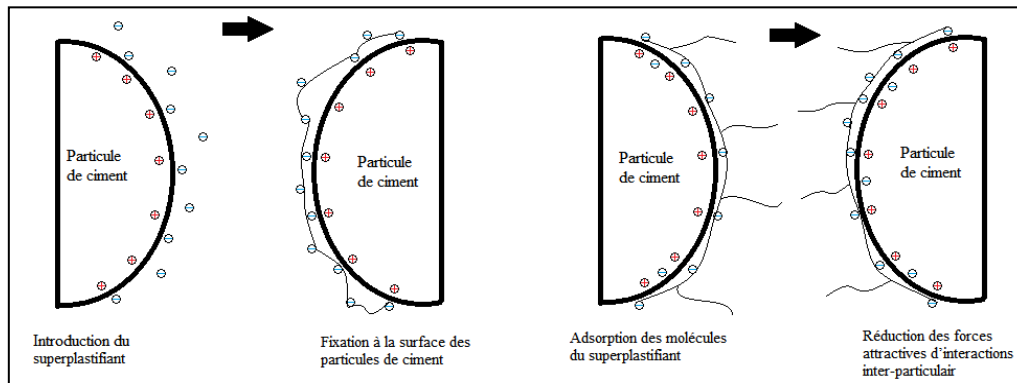


Figure I.12. Mécanisme d'action des super-plastifiants [15]

I.4 LES ADDITIONS MINÉRALES :

Les ajouts minéraux sont définis comme étant des matériaux minéraux finement divisés, ils ont un rôle important dans la fabrication des bétons. En effet, leur incorporation permet d'améliorer considérablement les propriétés à l'état frais et à l'état durci, mais aussi la durabilité et le coût de fabrication des ciments.

En premier lieu, à l'état frais, la structure et les frottements entre les composants du squelette granulaire sont modifiés par la présence des additions minérales. En suite, l'hydratation du ciment est affectée par la présence des additions qui interagissent dans la structuration des produits hydratés. Ces interactions peuvent se manifester par des synergismes ou des antagonismes entre les constituants, et sont difficiles à détecter : alcali-réaction, hydratation freinée. . .) [16].

Les études récentes qui ont analysé l'influence des additions minérales, ont démontré que ces additions ont une réactivité avec le ciment. Des modifications particulièrement complexes et de grandes ampleurs se produisent par l'introduction des additions minérales dans les mélanges cimentaires (effet granulaire, effet physico-chimique et microstructurel et éventuellement un effet chimique).

I.4.1 Mécanismes d'action :

L'utilisation des sous-produits minéraux est devenue une priorité dans la composition des ciments et des bétons. La plupart des ajouts minéraux, en présence d'eau et de chaux forment un silicate de calcium hydraté suivant une réaction exothermique, qui est du même type que celle qui est formée durant l'hydratation du ciment Portland [16].

La réaction pouzzolanique qui se produit concerne principalement les fumées de silice, les cendres volantes et les pouzzolanes naturelles. Elle s'écrit de la façon suivante:



L'Hydratation du ciment Portland engendre la libération de grande quantité de chaux (CaO), qui va maintenir un pH élevé et qui risque de nuire à la durabilité des bétons.

De ce fait, théoriquement dans la fabrication des bétons, l'utilisation de 20 à 30 % de pouzzolane pourrait faire réagir toute la chaux produite par l'hydratation du ciment Portland, pour la transformer en C-S-H [17]. Cependant, l'idéalisation de cette condition n'est jamais complète, vu la composition chimique des additions qui n'est pas bien maîtrisée.

I.4.2 Classification des additions minérales :

Dans le cadre normatif «additions pour béton hydraulique », les additions minérales sont classées en deux principales catégories :

- *Type I : ajouts minéraux inertes*
 - les additions calcaires
 - les additions siliceuses
 - les fillers
- *Type II : ajouts minéraux actifs*
 - les fumées de silice
 - les cendres volantes de houille
 - le laitier vitrifié moulu de haut fourneau
 - la pouzzolane naturelle

Dans notre cas, nous nous intéressons uniquement aux additions utilisées dans nos essais à savoir le laitier de haut fourneau et la pouzzolane naturelle.

I.4.2.1 Laitier de haut fourneau :

Les laitiers sont des sous-produits de l'industrie métallurgique. Lors du processus de fusion du minerai dans les hauts fourneaux à une température allant de 1135 à 1350°C, se produit la séparation gravitaire, la fonte se dépose dans la partie inférieure du four, tandis que le laitier surnage en partie supérieure dû à sa faible densité par rapport à la fonte.

La norme NF P 18-506 [17] distingue deux classes de laitier A et B selon la manière de traitement à la sortie du haut fourneau [18]:

- le refroidissement lent à l'air, qui donne un matériau cristallisé sans aucun pouvoir liant et qui peut contenir des éléments nuisibles aux bétons, ce qui amène leur utilisation comme granulats pour les travaux routiers.

- le refroidissement brusque dans l'eau ou dans l'air qui empêche la cristallisation, ce qui la rend plus réactive et permet son utilisation dans les ciments et les bétons.

Leur composition chimique comporte de l'oxyde de calcium (40 à 50 %), silice (25 à 35 %), l'alumine (12 à 30 %) ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faible quantité.



Figure I.13 . Laitier granulé de haut fourneau
avant broyage de haut fourneau

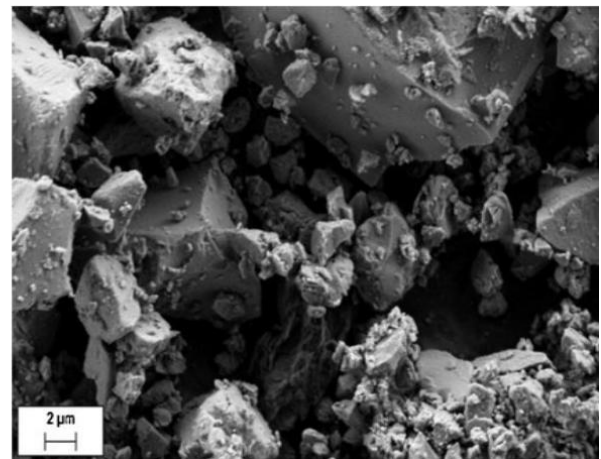


Figure I.14 . Vue au MEB du laitier granulé

La trempe du laitier confère au matériau son pouvoir **hydraulique latent**. Un broyage fin du laitier lui permet d'être utilisé comme addition dans les ciments et les bétons. L'analyse au microscope électronique à balayage d'un échantillon de laitier granulé broyé (figure 2.9) montre que les particules de laitier ont une morphologie en forme angulaire irrégulière avec des tailles de particules variables.

Tableau I.2. Exemple de la composition chimique du laitier granulé

Oxydes	SiO ₂	AL O _{2 3}	Fe O _{2 3}	CaO	MgO	K O ₂	Na O ₂	SO ₃
Teneur %	28-40	5-17	3 - 6	35-40	2-13	1 - 2	0,5-1	0,5-1

Demirboga [19] a montré en étudiant l'effet du laitier granulé de hauts fourneaux (10 %), qu'il engendrait une augmentation de la densité et une diminution de la résistance en compression à 28 jours et une amélioration à 120 jours.

D'autre part Öner et al. [20] ont étudié l'effet de la finesse sur la variation de résistance des ciments avec du laitier de haut fourneau. Les résultats ont montré que les meilleures valeurs de résistance ont été données pour une grande finesse.

Jianping et al. [21] ont étudié aussi l'effet de la granulométrie du laitier sur les résistances mécaniques et la demande en eau. Les résultats ont montré que les résistances à la flexion et à la compression augmentent avec la diminution de la taille des particules du laitier de haut fourneau. D'autre part, les particules fines du laitier augmentent les besoins en eau. De ce fait, il y'aura une augmentation du temps de prise.

Au Royaume-Uni, Osborne [22] a montré que le niveau d'alumine dans le laitier doit être inférieur à 14%. Si la teneur en alumine du laitier dépasse 14%, la teneur en C₃A du Portland-ciment ne doit pas dépasser 10%.

I.4.2.2 La pouzzolane :

La pouzzolane est une roche naturelle constituée par des scories (projections) volcaniques de nature siliceux ou silico-alumineux avec une couleur qui varie du rouge au noir selon l'état d'oxydation du fer (pour un rapport $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,02$ la couleur est rouge (figure I.12) ; pour un rapport $\geq 0,27$ la couleur est noir). Les pouzzolanes sont composées essentiellement de silice et d'alumine (entre 70 et 80 %). Elles ne possèdent pas eux-mêmes de propriétés liantes mais qui, sous forme finement broyé et en présence d'humidité (H₂O), réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂ à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes. Les pouzzolanes sont formées surtout d'éléments vitreux elles peuvent être substituées au ciment à un pourcentage qui peu allé jusqu'à 25 % [16].

De ce fait, forment des hydrates stables en présence d'eau. Elles jouent un rôle de remplissage des pores et de correcteurs granulaires. Elle modifie aussi le produit interne de la phase alite [14].



Figure I.15 . Pouzzolane naturelle

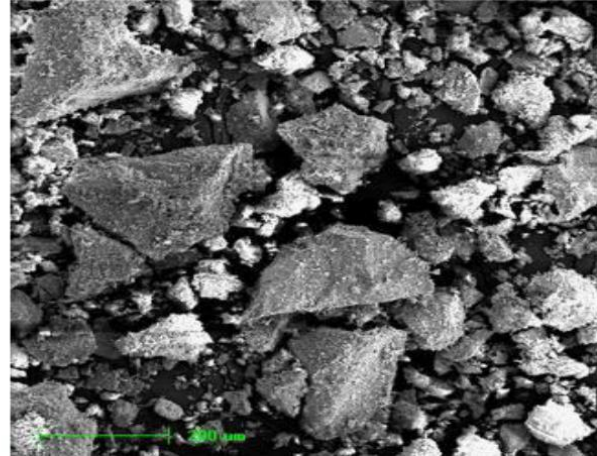


Figure I.16 . Vue au MEB de la pouzzolane

Tableau I.3. Composition chimique de la pouzzolane

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Teneur %	46,46	17,45	8,36	9,03	3,88	1,40	4,32	1,03

Çolak [23] a étudié plusieurs caractéristiques des pâtes de ciment Portland contenant de la pouzzolane naturelle. Il a abouti au fait que :

- la substitution de 40 % de ciment Portland par la pouzzolane naturelle augmente le temps de prise (4 à 5 h).
- l'incorporation de la pouzzolane naturelle en remplacement du ciment Portland a engendré une augmentation de la teneur en eau et de la porosité. De ce fait l'utilisation de superplastifiant est recommandée.
- la pouzzolane agit à long terme à cause des réactions avec l'hydroxyde de calcium.
- la substitution d'un grand pourcentage de pouzzolane naturelle dans le ciment a un effet néfaste sur la résistance au cycle gel-dégel et aux sulfates.

En outre, Rodriguez-Camacho et al. [24] ont analysé l'importance de l'utilisation des pouzzolanes naturelles sur la résistance aux attaques des sulfates. Il a été constaté que certains ciments (types I et V) ont une meilleure résistance aux sulfates que les autres ciments. D'autre part, de meilleures résistances ont été enregistrées pour les pouzzolanes contenant de l'alumine à moins de 16 % et cela pour tous les types de ciment.

Par ailleurs, Turanlı et al. [25] ont examiné l'effet de grande quantité de pouzzolane naturelle (35, 45, et 55 %), sur les propriétés des pâtes et mortiers. Ils ont abouti aux résultats suivants :

- le temps de prise augmente avec l'augmentation des quantités de pouzzolanes incorporées.

- l'expansion après immersion dans une solution de sulfate été inférieur pour les ciments contenant de grandes quantités de pouzzolane.

I.4.2.3 Les cendres volantes

Les cendres volantes sont les particules non combustibles entraînées par les fumées lors de la combustion du charbon pulvérisé dans les chaudières des centrales thermiques. Pour réduire la pollution atmosphérique, les cheminées de ces centrales sont équipées de dépoussiéreurs qui captent les cendres pour éviter leur dispersion dans l'atmosphère.

Les cendres doivent répondre à la définition donnée dans la norme NF EN 197-1 pour être utilisée dans les ciments. En particulier, la perte au feu (résidus imbrûlés constitués essentiellement de carbone) ne doit pas dépasser 7 % en masse. Les cendres volantes se présentent sous la forme de sphères creuses de granulométrie équivalente à celle du ciment et (figure I.17 et 18). Les cendres volantes peuvent être de nature silico – alumineuse ou silico – calcaire.



Figure I.17 . Cendre volante

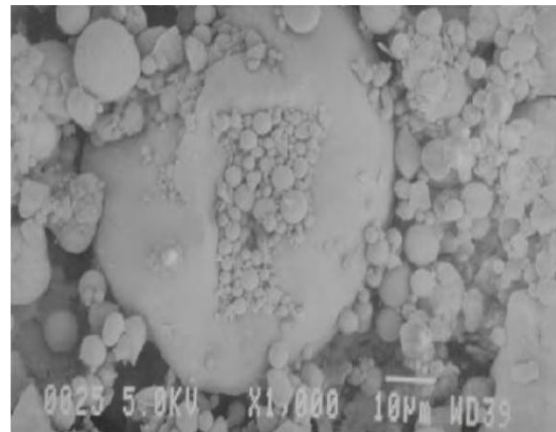


Figure I.18 . MEB d'une cendre volante

a) Cendres volantes siliceuses

La cendre volante siliceuse est une poudre fine constituée principalement de particules sphériques vitrifiées ayant des propriétés pouzzolaniques. Elle doit contenir essentiellement de la silice (SiO_2) réactive et de l'alumine (Al_2O_3). La partie restante contient de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres oxydes. La proportion de chaux CaO réactive doit être inférieure à 5 % en masse. La teneur de SiO_2 réactif doit être d'au moins 25 % en masse. La composition chimique de la cendre volante siliceuse est donnée dans le tableau I.4.

Tableau I.4. Composition chimique de la cendre volante siliceuse

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Teneur %	47,2-54	27,7-34,9	1,3 – 4,1	1,4-2,5	0,7-5,7	0,2-1,6	0,1-0,9

b) Cendres volantes calciques

La cendre volante calcique est une poudre fine ayant des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques. Elle doit contenir essentiellement de la chaux réactive (CaO), de la silice (SiO₂) réactive et de l'alumine (Al₂O₃). La partie restante contient de l'oxyde de fer (Fe₂O₃) et d'autres oxydes. La proportion de chaux CaO réactive doit être inférieure à 50 % en masse. La composition chimique de la cendre volante calcique est donnée dans le tableau I.5.

Tableau I.5. Composition chimique de la cendre volante calcique

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Teneur %	18-24,8	12,1-14,9	6,3-7,8	42,9-49	1,9-2,8	1-3	0,5-2	5,5-9,1

I.4.2.4 Les schistes calcinés

Un schiste est une roche qui a pour particularité d'avoir un aspect feuilleté, et de se diviser en plaques fines ou « feuillet rocheux ». Les schistes calcinés, sont produits dans un four spécial à une température d'environ 800°C. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques comme le ciment portland et aussi pouzzolaniques. Les schistes calcinés contiennent des phases du clinker, principalement du silicate bicalcique (C₂S) et de l'aluminate monocalcique (CA) dû à leur composition et au procédé de fabrication. Ils contiennent aussi de faibles quantités de chaux libre CaO et de sulfate de calcium CaSO₄, ainsi qu'une quantité importante de SiO₂. La composition chimique du schiste calciné est donnée dans le tableau I.6.

Tableau I.6. Composition chimique de la schiste calciné

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	P-A-F
Teneur %	50-60	19,5 – 30,1	3,1 - 8,2	0,8 – 5,0	7,3 – 16,0

I.4.2.5 Les calcaires

Les fillers calcaires sont issus de la récupération des fines obtenues par le concassage des roches calcaires, après broyage et tamisage on obtient une fine poudre blanche. Pour pouvoir les utiliser dans des matériaux cimentaires à des taux qui dépassent 5 % en masse, les fillers calcaires doivent satisfaire quelques spécifications : teneur en calcaire (carbonate de calcium,

CaCO_3) ≥ 75 % en masse, teneur en argile $\leq 1,20$ % en masse, teneur en matières organiques $\leq 0,50$ %. La composition chimique du calcaire est donnée dans le tableau I.7.

Tableau I.7. Composition chimique du calcaire

Oxydes	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3
Teneur %	0,58	0,06	0,02	55,80	0,06	-	-	0,08

I.4.2.6 Les fumées de silices

La fumée de silice est un sous-produit de la métallurgie et de la production de silicium (figure I.16). Elle est composée exclusivement de silice (SiO_2) amorphe qui se présente sous forme de particules sphériques très fines qui confère à la fumée de silice des propriétés pouzzolaniques. Pour être employé dans les matériaux cimentaires, la fumée de silice doit satisfaire aux spécifications suivantes :

-Teneur en silice amorphe $\geq 85\%$, pertes au feu $\leq 4\%$ en masse, surface spécifique 15 à 30 m^2/g .

La composition chimique de la fumée de silice est donnée dans le tableau I.8.

Tableau I.8. Composition chimique de la fumée de silice

Oxydes	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3
Teneur %	99,01	0,03	-	0,02	0,01	0,15	0,04	0,001

Au microscope électronique, la fumée de silice apparaît sous forme de billes sphériques d'un diamètre moyen de 0.2 μm . Ces billes ont un diamètre moyen 100 fois plus petit que les grains de ciment (figure I.19 et I.20).



Figure I.19 . Fumée de silice

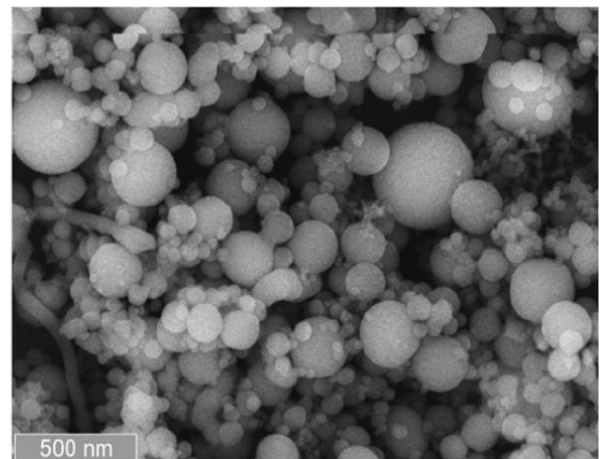


Figure I.20. Fumée de silice au MEB

I.4.3 Avantage des additions minérales :

Les ajouts minéraux contribuent à la correction de la structure inter-granulaire des mortiers et bétons. Ils jouent le rôle de micro agrégats. De ce fait, ils contribuent à la diminution de la porosité du matériau et donc à l'amélioration des propriétés des mortiers et bétons (ouvrabilité, maniabilité, résistances et durabilité...). L'incorporation des additions minérales dans le ciment a permis de proposer plusieurs types de ciments à partir d'un même clinker (Tableau I.9).

D'autres parts il faut souligner que dans la majorité des recherches les additions minérales ont été introduites en remplaçant une partie du ciment. Alors que dans les bétons spéciaux (bétons à hautes performances, bétons autoplaçant), les additions minérales sont utilisées pour augmenter les résistances mécaniques ou rhéologiques, sans changer le dosage en ciment [16].

Tableau I.9. Principaux types de ciment (NA 442)

Types de ciments	Désignation	clinker	l'un des constituants suivants (laitier, pouzzolanes, cendres, calcaire, schiste, fumée de silice,	constituants secondaires
Ciment portland	CPA – CEM I	95 - 100		0 à 5
Ciment portland composé	CPJ – CEM II A	80 – 94	6 – 20 de l'un des constituants, sauf les fumées de silice dont la teneur est limitée à 10 % et les fillers à 5 %.	
	CPJ - CEM II B	65 – 79	21 à 35, avec les mêmes limites que ci – dessus	
Ciment de haut fourneau	CHF – CEM III A	35 – 64	36 – 65 % de laitier	
	CHF – CEM III B	20 – 34	66 – 80 % de laitier	
	CLK – CEM III C	5–19	81 – 95 % de laitier	
Ciment pouzzolanique	CPZ – CEM IV A	65 – 90	10 – 35 % de pouzzolanes, cendres siliceuses, les fumées de silice sont limitées à 10%	0 à 5
	CPZ – CEM IV B	45 – 64	36 – 55 % de pouzzolanes, cendres siliceuses, les fumées de silice sont limitées à 10%	
Ciment Au laitier et aux cendres	CLC–CEMVA	40 – 64	18 – 30 % de laitier et 18 – 30% de cendres siliceuses ou de pouzzolanes	0 à 5
	CLC CEM V B	20 - 39	31 - 50 de laitier et de cendres siliceuses ou de pouzzolanes	

I.5 PROPRIETES DES BETONS :

I.5.1 Propriétés physiques :

I.5.1.1 Ouvrabilité et maniabilité :

L'une des caractéristiques principales des bétons frais et leur ouvrabilité, qui touche non seulement leur capacité de mise en place pour un remplissage du coffrage, mais également leurs performances à l'état durci.

L'ouvrabilité d'un béton est influencée par la granulométrie et la forme des granulats, par le dosage en ciment et en eau, et éventuellement par l'emploi d'adjuvants [2].

Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité reposant sur des principes différents, les plus courants sont :

- affaissement au cône d'Abrams (slump-test) : NF P 18-451
- étalement à la table à chocs (flow-test) : NF EN 12350-5
- l'essai Vébé (qui concerne les bétons fermes) : NF EN 12350-3

Enfin, un autre essai spécifique à la maniabilité peut être cité, il consiste à mesurer le temps d'écoulement nécessaire à un volume de béton soumis à des vibrations pour atteindre un repère donné NF P 18-452.

I.5.1.1.1 Affaissement au cône d'Abrams (slump-test) : NF P 18-451

L'appareillage et les procédures ont été suivis tels que décrits dans la norme NF P 18-451. Elle est schématisée dans la figure I.21 :

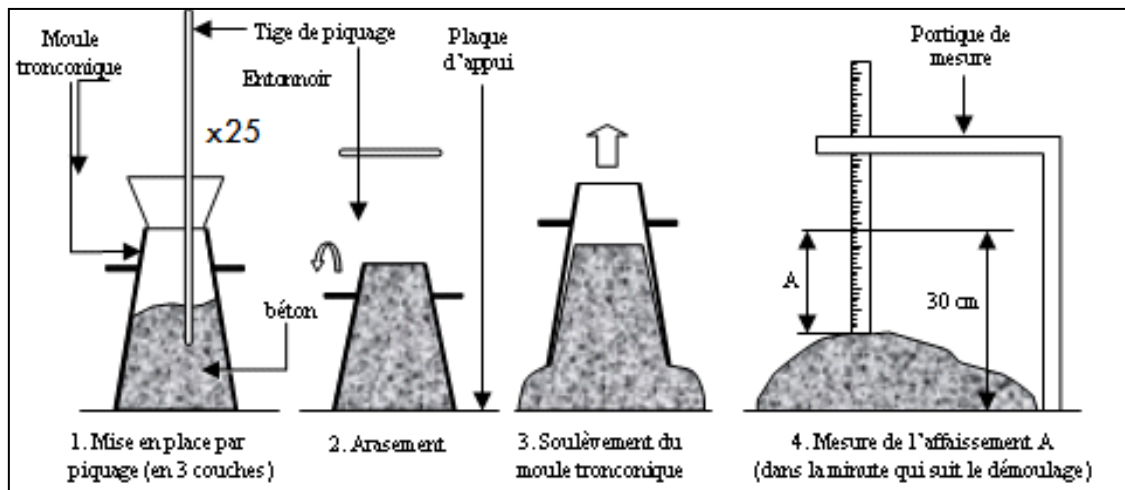


Figure I.21. Schématisation de la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams [4]

Dans cet essai, il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids, vu que quand le béton n'est plus maintenu il s'affaisse selon sa consistance (Figure I.22.).



Figure I.22. Essai réel d'affaissement au cône d'Abrams [1]

Les consistances données par la norme NF P 18-451 sont présentées dans le tableau I.10 :

Tableau I.10. Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme F	0 à 4	± 1cm
Plastique P	5 à 9	± 2cm
Très plastique TP	10 à 15	±3 cm
Fluide Fl	≥ 16	

I.5.1.1.2 Table à secousses :

L'ouvrabilité pour les bétons ferme se mesure par la table à secousses, conformément aux normes NF EN 12350-5. Le moule tronconique est rempli de béton, et démoulé puis il reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue (Figure I.23 et I.24). L'étalement est donné par la formule (Eq.I.4) :

$$E = \frac{D_r - D_i}{2} \text{ (mm) (Eq.III.4)}$$

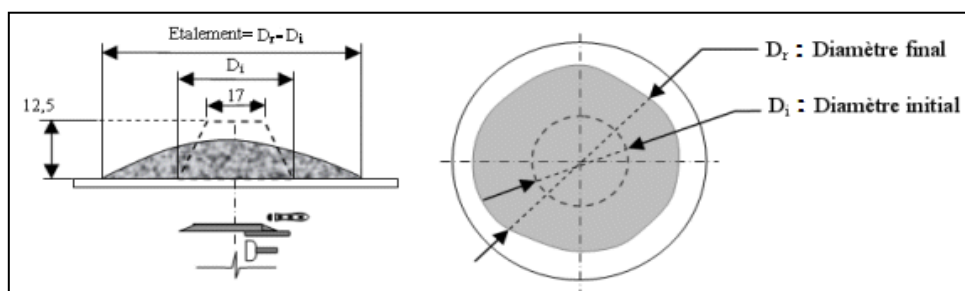


Figure I.23. Schéma de la Table à secousses [4]

Avec :

D_r : Diamètre final de l'étalement

D_i : Diamètre initial de l'étalement



Figure I.24 : Essai réel de table à secousses [1]

• I.5.1.1.3 L'essai Vébé

L'essai de Vébé est un essai de détermination de la consistance d'un béton frais par la mesure du temps que met un cône de béton (moulé dans un cône d'Abrams), soumis à une vibration, pour remplir un volume cylindrique (Figure I.25). L'essai se fait en deux étapes [1] :

- Étape 1 : On fixe un cône d'Abrams à l'intérieur d'un récipient cylindrique. On remplit le cône d'Abrams comme vu précédemment, puis on démoule le béton.
- Étapes 2 et 3 : Il est alors possible de mesurer l'affaissement du béton. Puis, on débute la vibration durant un temps t pendant lequel le béton va remplir le récipient cylindrique tout en étant compacté ou non par un disque descendant au fur et à mesure. Le temps t représente la consistance Vébé du béton. Si le résultat à l'essai Vébé (temps Vébé) est inférieur à 5 s ou supérieur à 30 s, le béton présente une consistance qui ne peut être déterminée au moyen de l'essai Vébé.

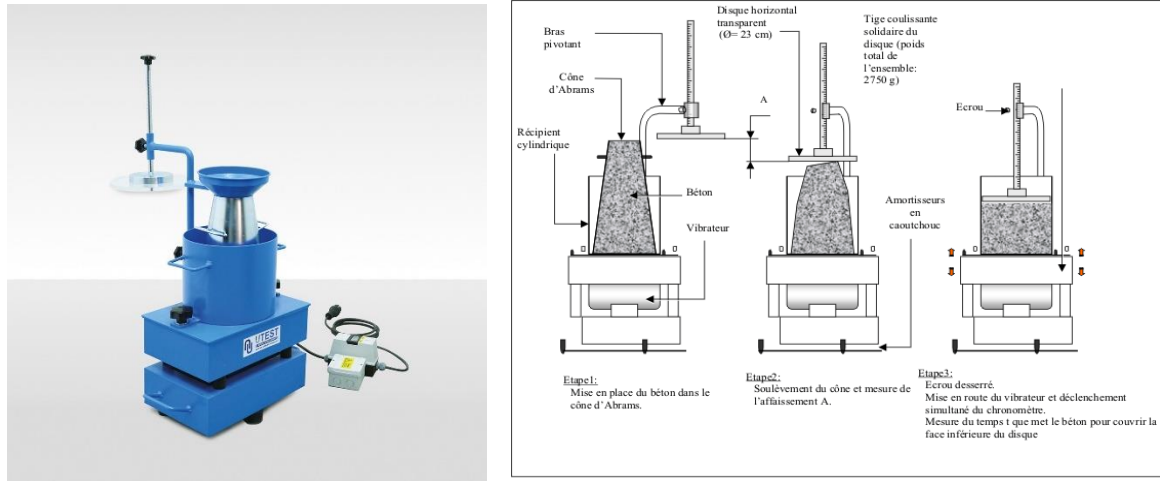


Figure I.25. Essai de Vébé

I.5.1.1.4 Autres tests :

D'autres tests existent pour la vérification de la maniabilité des bétons mais ils sont spécifiques à des bétons comme les bétons autoplaçant. On peut citer [15] :

- L'essai d'écoulement à l'entonnoir en V (V-funnel): On mesure ici la vitesse d'écoulement du béton passant à travers un entonnoir.
- La méthode de la stabilité au tamis (NF EN 12350-11): On verse du béton sur un tamis de 5 mm à une hauteur de 50 cm. Après 15mn, on va peser le volume de laitance recueilli. Plus il y aura de laitance qui aura traversé le tamis, moins le béton sera considéré comme stable, c'est-à-dire ayant une composition homogène. Cette instabilité peut créer des phénomènes de ségrégation.
- L'essai de la boîte en L: On verse le béton dans une première partie de la boîte en L, à la verticale. On soulève une trappe afin que le béton passe dans la partie horizontale, à travers des armatures de 12 mm de diamètre. On mesure ensuite les hauteurs des parties verticales et horizontales et on effectue la division entre la hauteur verticale et la hauteur horizontale, ce qui nous donne le taux de remplissage. Si ce dernier est supérieur à 0,8, alors le béton s'écoule correctement.

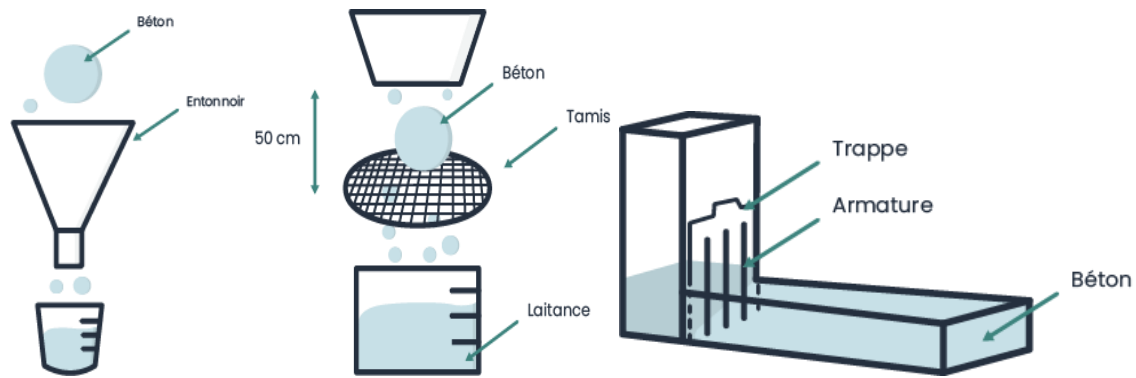


Figure I.26 . Essai de contrôle de la maniabilité pour les BAP [2]

I.5.1.2 Porosité et compacité :

Ce sont deux caractéristiques essentielles dans le béton, dont dépendent plusieurs paramètres : perméabilité, résistance mécanique, et surtout la durabilité des ouvrages.

On peut distinguer deux types de porosité [2] :

- Porosité capillaire ($0.01 \mu\text{m} \leq \varnothing \leq 0.5 \mu\text{m}$) : cette porosité est inter-granulaire, c'est-à-dire qu'elle occupe l'espace entre les grains de ciment en suspension dans l'eau. Leur volume et leur taille dépendent de la variation du rapport E/C.
- Porosité des hydrates : Elle se caractérise par sa grande surface et le fait qu'elle soit très fine. Cette porosité est inter-granulaire, mais complétée par interne C-S-H c'est-à-dire qu'elle dépend du (ciment, du cycle gel-dégel, hydratation). Le volume de ces pores peut être affecté par le rapport E/C.

L'évolution de la porosité dans le temps peut-être interprétée telle quelle [4] :

$\frac{\text{Volume des hydrates}}{\text{Volume des anhydres}}$ (Augmente) \rightarrow Volumes des pores diminue \rightarrow Diamètre (\varnothing) des pores diminue \rightarrow Le degré de connectivité diminue (entre 2 et 28 jours).

I.5.1.3 Déformabilité :

I.5.1.3.1 Élasticité du béton :

Elle correspond au rapport de la contrainte unitaire σ à la déformation relative ε . Son expression est donnée par la relation suivante :

$$E = \frac{\text{contrainte unitaire}}{\text{déformation relative}} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{Eq. I.1})$$

Le module d'élasticité du béton est lié à sa résistance caractéristique. Dans ce cas pour les projets courants, on admet [49]:

$$E_{ij} = 11\,000 (f_{cj})^{1/3} \text{ (module de déformation longitudinale instantanée) } \quad (\text{Eq. I.2})$$

$$E_{vj} = 3\,700 (f_{cj})^{1/3} \text{ (module de déformation différée)} \quad (\text{Eq. I.3})$$

Avec :

$$f_{cj} = 1.1 f_{c28} \quad (\text{Eq. I.4})$$

Il s'ensuit que :

$$E_{vj} \approx \frac{1}{3} E_{ij} \quad (\text{Eq. I.5})$$

I.5.1.4 Le retrait :

Par définition, le retrait se présente comme une variation dimensionnelle d'un élément en béton, dû à des départs d'eau. D'autre part, il existe aussi une variation dimensionnelle due à des entrées d'eau qu'on appelle : gonflement. Plusieurs paramètres sont à prendre en compte dans le retrait, car [13, 26, 27]:

- le retrait augmente avec le dosage en ciment ;
- le retrait varie en fonction du dosage en eau ;
- le retrait augmente avec l'augmentation du rapport E/C ;
- le retrait augmente quand l'humidité diminue ;
- les granulats s'opposent (freinent) le phénomène de retrait ;
- la propreté des sables est à prendre en considération ;
- le retrait à une vitesse décélérée et il est partiellement réversible ;
- la prise en compte du retrait permet de prévoir l'espacement entre les joints de dilatation.

Par ailleurs, il existe plusieurs types de retrait qui se succèdent à partir de la fabrication du béton et jusqu'à son durcissement :

- retrait à très jeune âge (avant prise) ;
- retrait endogène (hydraulique) ;
- retrait thermique ;
- retrait de dessiccation (séchage).

a) Retrait à très jeune âge (avant prise) :

Ce premier retrait résulte de la perte prématurée, par évaporation, d'une partie de l'eau de gâchage que contient le béton, ce qui se traduit par une diminution du volume de la pâte formée (8 à 12 %) par rapport à la somme des volumes absolus des anhydres et de l'eau [50].

La limitation de ce retrait est souhaitée, car ce retrait engendre des contraintes de traction que ne peut supporter le béton. Donc le béton se trouve étiré dans sa masse, ce qui conduit à l'apparition, des fissures à la surface [13].

b) Retrait endogène (hydraulique) :

Qualifié aussi de retrait d'auto-dessiccation, ce retrait est dû à la diminution de l'humidité interne suite à la consommation d'eau par les hydrates [26]. L'évolution de ce retrait est liée au dosage en ciment ainsi qu'à la cinétique d'hydratation des grains de ciment et à leurs finesses.

De plus, le retrait endogène est un des processus intrinsèques du béton, car il dépend des propriétés du matériau [27].

c) Retrait thermique :

Le retrait thermique est le résultat d'une contraction (diminution de longueur) du béton lors de son refroidissement (dissipation de la chaleur de prise du ciment).

En effet, la réaction d'hydratation peut devenir fortement exothermique et provoquer des forts gradients de température. À titre d'exemple au cœur d'un élément massif de structure, la température peut atteindre 50 à 70°C [27].

d) Retrait de dessiccation (séchage) :

Le retrait de dessiccation résulte d'une déformation volumique due au séchage de la masse du béton. L'eau qui n'a pas été utilisée lors des réactions d'hydratation s'évapore à long terme vers les faces exposées du matériau. De plus, le retrait de dessiccation dépend fortement de l'environnement, qui intervient sur l'accélération ou le ralentissement du séchage [27].

Enfin, ce retrait conduit aussi à un endommagement progressif du matériau vu la faible résistance effective du béton à la traction.

e) Limitation du phénomène de retrait :

La cause principale du retrait c'est le départ d'eau, de ce fait il existe différentes solutions afin de remédier plus au moins à cela [13, 27]:

- l'utilisation des coffrages étanches non absorbants (retrait à très jeune âge) ;

- la protection contre l'évaporation précoce de l'eau ;
- l'utilisation d'adjuvants ou de produits de cure ;
- éviter un surdosage en ciment ;
- Créer des bétons plus compacts (le retrait diminue quand les bétons sont plus compacts) ;
- Choisir une bonne répartition granulaire, car un excès d'éléments fins et d'impuretés (argiles, limons) favorise le retrait.



Figure I.27 Appareil de mesure du retrait

I.5.1.5 Fluage

Le fluage du béton dû à l'action d'une contrainte continue consiste dans une augmentation graduelle de déformation avec le temps. Il peut être du même ordre de grandeur que le retrait dû au séchage. Tel qu'on le définit, le fluage ne comprend aucune déformation élastique instantanée causée par le changement, ni le retrait ou gonflement engendrés par les variations de teneur en humidité.

En effet, lorsqu'un élément de structure en béton sèche sous charge, le fluage qui se produit est un à deux fois plus important qu'il ne le serait dans les conditions normales d'humidité. Si

De plus, si on enlève une charge permanente, la déformation décroît immédiatement. Cette déformation de retour instantanée est suivie d'une diminution graduelle de la déformation, c'est le fluage réversible.

D'autre part il existe un fluage irréversible ou ce retour n'est pas complet car le fluage n'est pas dans ce cas réversible. De plus, on a constaté que le fluage continue à se produire sur une très longue période de temps; on a pu constater que 75 pour cent du fluage observé sur 20 ans se produit au cours de la première année.

En fin, le phénomène de fluage est principalement dû à l'enlèvement de l'eau se trouvant entre les feuilles du cristallite de silicate de calcium et à un réarrangement possible des liaisons existant entre les surfaces des cristallites individuels [28] .

I.5.2 Propriétés mécaniques :

I.5.2.1 Essais destructif

I.5.2.1.1 La résistance en compression :

L'une des caractéristiques principales du béton durci est sa résistance mécanique en compression à un âge donné (28 jours). Elle est désignée par f_{c28} et se mesure par compression axiale d'une éprouvette à 28 jours selon la norme NF EN 12390-3. La compression se fait par le biais d'une presse hydraulique. La résistance d'une éprouvette cylindrique de béton est définie à (j) jours, à partir de la charge (F_r) conduisant à sa rupture divisée par la surface S comme le montre l'équation (Eq. I.6) [1]:

$$f_{cj} = \frac{F_r}{S} \quad (\text{Eq. I.6})$$

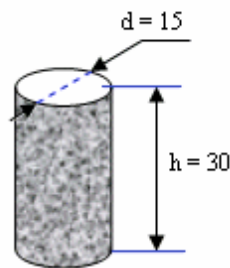


Figure I.28. Eprouvettes cylindriques (diamètre 16 cm, hauteur 32 cm),

De plus, la connaissance des propriétés mécaniques du béton est primordiale pour une bonne conception des ouvrages. Surtout que le béton est considéré comme étant un matériau fragile lorsqu'il est soumis à l'action d'une charge croissante. En outre, le béton ne laisse pas apparaître des déformations importantes avant sa rupture, et il se comporte mieux en compression qu'en traction. La résistance mécanique des bétons dépend de plusieurs paramètres [13]:

- le type et la classe du ciment ;
- la qualité des granulats utilisés pendant le bétonnage ;
- le dosage des matériaux utilisés ;
- la cadence et les conditions de réalisation.

I.5.2.1.2 La résistance en traction :

La résistance à la traction (f_{t28}) est peu étudiée en comparaison à la résistance à la compression, du fait qu'elle est beaucoup plus faible que cette dernière. De plus, la résistance à la traction s'annule même complètement si des fissures de retrait se sont développées [1]. Selon les normes en vigueur, il existe 3 principales méthodes d'essais de traction :

I.5.2.1.3 La résistance en traction par flexion NF P18-407 :

Cet essai s'effectue en général selon l'une des deux procédures :

- Avec une seule charge concentrée au milieu de l'éprouvette.
- Avec deux charges concentrées, symétriques, égales, appliquées au tiers de la portée (Figure I.15).

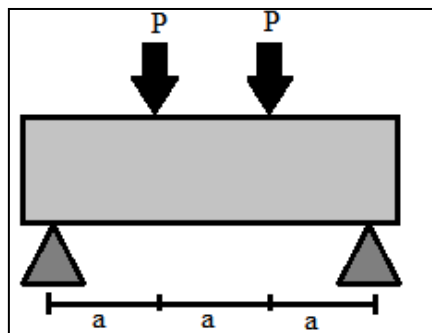


Figure I.29. Schématisation du dispositif d'essai de traction par flexion

L'essai de traction par flexion se fait à l'aide d'une éprouvette prismatique de côté «n» et de longueur «4 a» reposant sur 2 appuis horizontaux et soumise à la flexion (éprouvette de 7 cm x 7 cm x 28 cm). La résistance à la flexion est calculée par l'équation (Eq. I.7):

$$f_t = \frac{1,8 P}{a^2} \quad (\text{Eq. I.7})$$

I.5.2.1.4 La résistance en traction par fendage NF EN 12390-6 :

Appelé «Essai Brésilien», cet essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux forces opposées (Figure I.26).

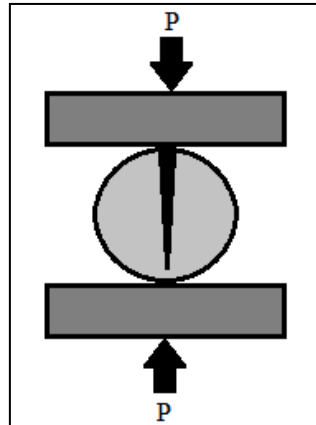


Figure I.30. Schématisation du dispositif d'essai de traction par fendage

La résistance en traction sera exprimée par l'équation suivante (Eq. I.8) :

$$f_{tj} = 2 \frac{p}{\pi DL} \quad (\text{Eq. I.8})$$

Avec :

D : Diamètre du cylindre

L : Longueur du cylindre

I.5.2.1.5 La résistance en traction directe :

Cet essai est considéré comme étant le plus délicat et le plus difficile à réaliser parmi les trois. En effet, sa mise œuvre nécessite une préparation des éprouvettes par sciage des extrémités, le collage de têtes de traction parfaitement centrées, et cela, sans aucun effort de flexion (Figure I.31) [13].

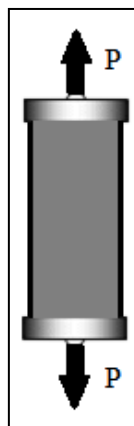


Figure I.31. Schématisation du dispositif d'essai à la traction directe

I.5.2.2 Essais non destructif

Les méthodes normalisées utilisées pour évaluer la qualité du béton dans les bâtiments ou les ouvrages ne prennent en compte que des essais destructifs sur des éprouvettes coulées au même moment.

- Les principaux désavantages de ces méthodes sont les suivants : les résultats ne sont pas obtenus immédiatement, le béton des éprouvettes peut être différent de celui de l'ouvrage car la cure ou le serrage peuvent être différents, les résistances des éprouvettes dépendent également de leurs dimensions et de leurs formes.

- Plusieurs méthodes non destructives d'évaluation ont été mises au point. Ces méthodes sont basées sur le fait que certaines propriétés physiques du béton peuvent être reliées à la résistance et peuvent être mesurées par des méthodes non destructives. On cite ici deux essais :

a) Essai sclérométrique NFP 18-417 :

Le principe de base de l'essai au scléromètre est que le rebond d'une masse élastique dépend de la dureté de la surface sur laquelle frappe la masse. Dans l'essai au scléromètre une masse approximative de 1.8 kg montée sur un ressort a une quantité potentielle fixe d'énergie qui lui est transmise par un ressort tendu à partir d'une position fixe, ce que l'on obtient en pressant la tête du marteau contre la surface du béton mis à l'essai. Lors de son relâchement, la masse rebondit depuis la tête, toujours en contact avec la surface du béton et la distance qu'elle parcourt, exprimée en pourcentage de l'extension initiale du ressort est appelée l'indice de rebondissement. Cet indice est indiqué par un curseur qui se déplace le long d'une règle graduée.



Figure I.32. Principe de l'essai sclérométrique

b) Essai d'auscultation sonore NFP 18-418 :

Les méthodes d'auscultation sonore permettent de déterminer des caractéristiques mécaniques du milieu ausculté et d'en apprécier l'homogénéité (en détectant des vides, délaminage et microfissuration), de caractériser un béton dont le rapport E/C est incorrect ou ayant subi une modification structurelle.

Les mesures sont réalisées in-situ comparativement sur zone saine et dégradée, et/ou en laboratoire sur des carottes prélevées dans une zone (destructif) . Les informations collectées (vitesse de propagation des ondes et atténuation sonore des ondes) permettent de dresser l'étendue du désordre et de déterminer la qualité des bétons.

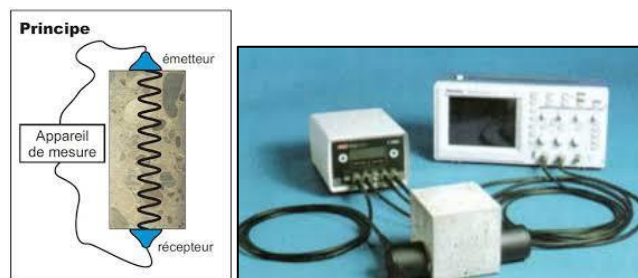


Figure I.33. Méthodes d'auscultation sonore

I.5.3 Propriété physico-mécaniques :**I.5.3.1 Durabilité :**

La durabilité d'un ouvrage se caractérise par sa capacité à durer dans le temps sans subir de dégradations, tout en conservant son intégrité et en maintenant son niveau de fiabilité. La notion de durabilité d'un ouvrage se traduit par un ensemble de spécifications techniques basées sur des méthodes d'essais directes ou indirectes, sur l'expérience et sur des préconisations de fabrication, et d'entretien avec des frais aussi réduits que possible [29]. La durabilité des bétons dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, la qualité des matériaux et de l'environnement.

I.5.3.1.1 Principaux mécanismes de dégradation :**I.5.3.1.1.1 La corrosion des armatures 54% :**

La corrosion des armatures provoque généralement un phénomène de gonflement, qui va générer des contraintes internes dans le béton et de ce fait causé des altérations de l'aspect extérieur de l'ouvrage (éclatements, fissures, apparitions de traces de rouille) [13].

I.5.3.1.1.2 Gel/dégel 10 % :

Les dégradations par le gel/dégel résultent d'un endommagement progressif. Elles dépendent de la température, du nombre de cycles (température positive à température négative) et de la durée du gel. Le gel/dégel cause l'accroissement des pressions hydrauliques dans les capillaires, qui engendre des fissures de la pâte de ciment, si la pression est supérieure à la résistance à la traction de la pâte [29].

I.5.3.1.1.3 Alkali-réaction 9 % :

C'est un ensemble de réactions chimiques complexes, qui peuvent se déclencher entre certains alcalins solubles (oxyde de sodium Na_2O et oxyde de potassium K_2O) du béton, sur une certaine forme de silice réactive, et cela, en présence d'eau. Cette réaction provoque en général, au bout de quelques années, des déformations et des microfissurations du béton, à cause des contraintes expansives qui peuvent dépasser la faible résistance en traction du béton [29].

I.5.3.1.1.4 Autres attaques chimiques 4 % :

a) Action des chlorures :

Les ions chlore sont spécifiques à certains environnements (eau de mer et sels fondant). La pénétration des ions chlore par diffusion ou par capillarité à l'intérieur du béton, fait augmenter la vitesse de corrosion [13].

b) Attaques acides :

Les bétons présentent une basicité élevée, de ce fait ils ont une certaine réactivité vis-à-vis des solutions acides telles que (pluies acide, les marécages, milieux industriels, réseaux d'eau usée) [1].

c) Attaque sulfatique :

Après durcissement du béton, il y aura formation d'aluminate. Cette dernière peut réagir au contact de l'eau sulfatée, ce qui va former de l'ettringite. L'ettringite est un hydrate contenant des sulfates, et dont les propriétés de gonflement sont connues depuis plus d'un siècle [29].

Les sources de sulfate sont multiples, on peut citer à titre d'exemple : le sol, les granulats gypseux, les déchets de plâtre, eau souterraine....

Les dégradations qui peuvent apparaître, suite à ces attaques, sont : un phénomène de gonflement (augmentation de contrainte) et des fissurations. Il existe d'autres paramètres pouvant aussi causer la dégradation des ouvrages en béton, on peut citer : le phénomène de carbonatation, lixiviation, conditions climatiques et variation thermique, ou encore la surcharge des ouvrages [1].

Tous les phénomènes et les mécanismes de dégradation cités précédemment ont des causes précises, car la durabilité d'un ouvrage peut être maintenue, si les paramètres liés à la conception de l'ouvrage et au choix des matériaux sont anticipés et maîtrisés.

I.6 Formulation des bétons :

Le béton est fabriqué à partir de ciment, de granulats et d'eau et ses propriétés dépendent directement de sa formulation. Ils existent différentes formulations dans le béton chaque formulation a des exigences liées aux composants des bétons et aux propriétés attendus par les bétons (maniabilité, résistance et durabilité) . On peut citer : DREUX-GORISSE, FAURY, BOLOMEY, DOE, VALETTE , JOISEL ;, etc

La qualité du béton dépend fortement des formulations des bétons et de ce fait des paramètres qui sont liée à la formulation des bétons comme le rapport E/C qui exerce une très grande influence sur la résistance à la compression, plus E/C est faible plus la résistance augmente, une réduction de 15 litres (par m³) de la quantité d'eau de gâchage conduit à une augmentation de 5 à 10% de la résistance à la compression.

D'autre part, un excès, ou un sous dosage en eau peut compromettre la durée de vie d'un ouvrage. L'ajout d'eau non maîtrisé, qui peut se produire au cours de bétonnage, engendre l'accroissement de la porosité et une augmentation des cinétiques de pénétration d'agent agressif ou d'autres phénomènes comme [1, 30]:

-Le ressuage : qui peut entraîner la formation de fissures, étant donné qu'il est lié à un tassement progressif du squelette sous la pesanteur et à une remontée d'eau.

-La ségrégation : a présence d'un excès d'eau réduit les forces de cohésion du béton, qui devient alors plus sensible à toutes les sollicitations extérieures.

De plus, n'importe quelle eau ne peut être utilisée dans la composition des bétons. En effet, la qualité de l'eau doit répondre à certaines exigences citées dans la norme européenne :NF EN 1008 : « Eau de gâchage pour béton », l'eau potable distribuée est réputée conforme aux prescriptions. Toutefois des chercheurs se sont penchés sur l'utilisation de différent type d'eau dans la formulation des bétons.

D'autre part, parmi les paramètres de formulations qui influe sur la qualité des bétons : le rapport gravier/sable (G/S) . L'influence de la taille maximale (D_{max}) du granulat exerce une influence sur la résistance à la compression de béton. L'augmentation maximale du diamètre global à un impact négatif sur la résistance à la compression aussi le risque de blocage croît

(perte de maniabilité) . Enfin, la réduction de la taille des gros granulats contribué significativement a l'amélioration de la maniabilité [31] .

I.7 Malaxage du béton NF P18-404 :

Le malaxage du béton doit être réalisé selon la norme NF P18-404 , comme suit :

- Pré mouillage du malaxeur, pour limiter une absorption de l'eau de gâchage
- Les constituants sont introduits dans la cuve du malaxeur
- Malaxer à sec pendant 1 min
- Ajouter de l'eau d'une façon uniforme et malaxer pendant 2mn

I.7.1 Remplissage et conservation des moules NF P18-404 :

Le remplissage et la conservation des moules se faite comme suit :

- Après gâchage, on procède au remplissage à raison de deux couches, dans des moules qui ont été enduits d'huile à l'avance
- On procède à une consolidation par vibration à la table vibrante
- Enfin araser et lisser la surface du béton
- La conservation des moules contenant les éprouvettes, se fait dans le laboratoire, et afin d'éviter toute dessiccation initiale, on protège les moules par du film plastique
- Après $24 \text{ h} \pm 2 \text{ h}$ les éprouvettes sont démoulées et immergés dans un bassin d'eau à une température de $20 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$ jusqu'à la date des essais

Il est à noter que trois éprouvettes par échéance doivent être utilisées pour effectuer les essais pour s'assurer de bon résultats . Les figure I.34 et I.35 montrent le malaxeur, les moules ainsi que le bassin de conservation des éprouvettes.



Figure I.34. Malaxeur et moules utilisés pendant les essais

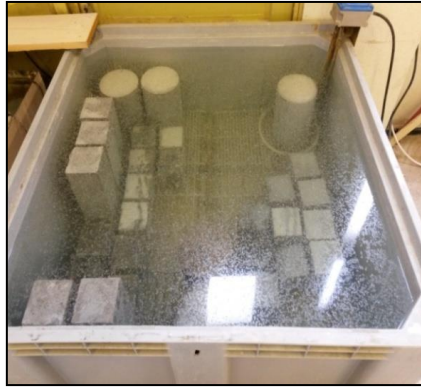


Figure I.35. Eprouvettes et bassin de conservation

I.8 CONCLUSION :

Au terme de ce chapitre, on peut prétendre à une meilleure connaissance du matériau béton. En effet, connaître propriétés et les constituants du béton, leurs mécanismes d'action permet de cerner l'évolutivité et la complexité de ce matériaux à court et à long terme.

CHAPITRE II

LES PRODUITS

CERAMIQUES

II.1 INTRODUCTION

Depuis des siècles, la terre cuite s'impose comme un matériau de construction incontournable. Souple et adaptable, elle s'est façonnée aux différentes époques et techniques de construction, s'inscrivant aussi bien dans le domaine traditionnel que dans l'univers industrialisé.

Briques, tuiles, éléments de plancher, conduits de fumée, carreaux rustiques, éléments décoratifs, la terre cuite se décline en une multitude de formes et d'usages. Sa fabrication repose sur des argiles communes, qui, cuites, se parent souvent d'une chaleureuse couleur rouge. Aujourd'hui encore, la terre cuite conserve une place de choix dans le bâtiment, appréciée pour ses nombreuses qualités et son charme intemporel.

II.2 CLASSIFICATION

Les matériaux de terre cuite peuvent être classés en deux grandes catégories selon leur porosité, c'est-à-dire leur capacité à absorber l'eau et les liquides [32] :

a) Produits poreux :

- Se rayent facilement à l'acier
- Exemples :
 - Briques
 - Tuiles
 - Bardeaux
 - Terre cuites
 - Briques réfractaires
 - Faïence

b) Produits non poreux (vitrifiés) :

- Impénétrables à l'eau
- Exemples :
 - Grès cérames (carreaux, tuyaux)
 - Porcelaines
 - Briques spéciales pour pavage

Cette classification permet de distinguer les matériaux en fonction de leurs propriétés et de leurs utilisations. Les produits poreux, comme les briques et les tuiles, sont respirants et offrent une bonne isolation thermique. Ils sont souvent utilisés dans la construction de murs et de toitures. En revanche, les produits non poreux, comme les grès cérames et les porcelaines, sont

imperméables et résistants aux taches. Ils sont parfaits pour les applications qui nécessitent une surface facile à nettoyer et à entretenir, comme les sols, les revêtements muraux et les plans de travail.

II.3 MATIÈRES PREMIÈRES

La plupart des céramiques sont des matériaux polycristallins, c'est à dire comportant un grand nombre de microcristaux bien ordonnés (grains) reliés par des zones appelées (joins de grains) comme illustré en Figure II.1

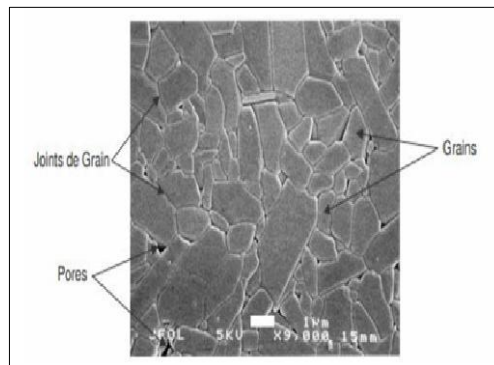
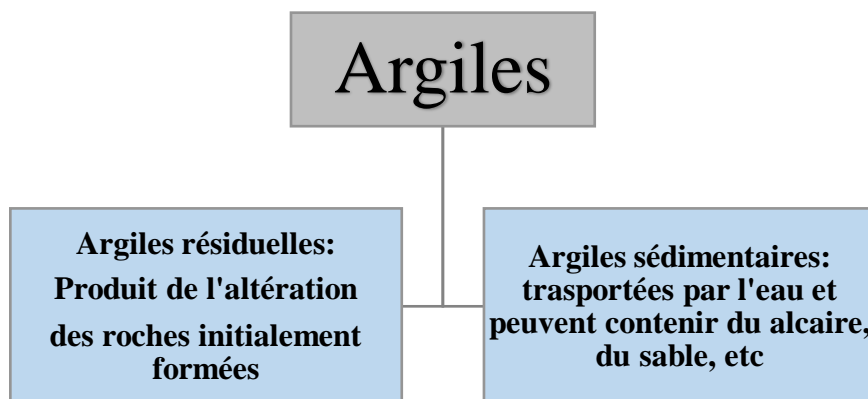


Figure II.1. Microstructure typique d'une surface céramique

D'autre part, les argiles sont subdivisées comme suit :



Par ailleurs, la fabrication des produits céramiques et des terres cuites traditionnels repose sur des matières premières essentiellement minérales comme l'argile et d'autre matières que l'on trouve couramment dans la nature [33] :

a) Des minéraux pour la structure et la fusion :

- Quartz, sable, feldspaths: Ces éléments fournissent la charpente (squelette) de la céramique.
- Basalte, andésite, porphyre, chamotte: Ils facilitent la fusion à haute température (fondant) et réduisent la plasticité de la pâte.
- Calcite, schiste: Ils apportent des propriétés spécifiques à la céramique.

b) Des additifs pour des propriétés ciblées :

- Liant: l'argile est parfois remplacée par des minéraux résistants à la chaleur (bauxite calcinée, cyanite, corindon) pour les produits réfractaires.
- Matières organiques (sciure, fibres, polystyrène): Incorporées dans la pâte, elles confèrent aux produits porosité et isolation thermique.
- Eau : Sa quantité permet d'ajuster la plasticité de la pâte pour une mise en forme optimale.

II.4 LES PRODUITS CÉRAMIQUES DANS LE GENIE CIVIL

Dans le domaine du génie civil, les produits céramiques occupent une place de choix. Leurs propriétés variées, obtenues grâce à des procédés de fabrication spécifiques, les rendent parfaitement adaptés à une multitude d'applications. En jouant sur les différents composants cités précédemment, les fabricants peuvent moduler les caractéristiques du matériau final tout en suivant des opérations de fabrication casi-similaires et qui se succèdent dans un ordre identique.

Ainsi, le schéma principal de fabrication d'un produit céramique ou en terre cuite comprend un nombre limité d'opérations présentées ci-après :

1. L'extraction des matières premières (argiles, limons ou d'autre liant)
2. La préparation de la matière première
3. Le façonnage de la matière première
4. Le séchage du produit final
5. La cuisson du produit final

II.4.1 L'extraction des matières premières :

L'exploitation des gisements d'argile se déroule majoritairement à ciel ouvert, en raison des volumes importants de terre nécessaires à la fabrication des produits céramiques. L'implantation de l'usine à proximité de la carrière est privilégiée autant que possible pour optimiser le transport des matières premières [32,33] . Les étapes clés de l'extraction :

-Enlèvement de la couche superficielle : La première étape consiste à retirer la couche de terre végétale, appelée "découverte". Cela se fait généralement à l'aide de bulldozers, de pelles chargeuses mécaniques ou, dans certains cas, de décapeuses.

-Extraction de l'argile : La nature de l'argile détermine la technique d'extraction employée :

- Argile sèche : Elle est extraite à l'aide de pelles mécaniques.
- Argile dure : L'extraction nécessite des moyens plus conséquents comme des excavateurs à godets, des marteaux piqueurs ou, dans les cas extrêmes, des explosifs.

-Transport vers l'usine : Le choix du mode de transport dépend de la distance entre la carrière et l'usine et de la topographie du terrain :

- Distances courtes ou terrains plats : Wagonnets ou bandes transporteuses.
- Distances plus importantes ou terrains accidentés : Téléphérique ou camions.

II.4.2 La préparation de la matière première :

La préparation de l'argile est une étape essentielle dans la fabrication des produits céramiques. Elle vise à obtenir une pâte homogène et plastique ou une poudre adaptée aux techniques de façonnage choisies. Le processus de préparation de l'argile s'adapte à la fois aux caractéristiques de l'argile utilisée et au degré de plasticité souhaité pour la pâte : molle, demi-ferme ou ferme. Les différentes étapes clés de la préparation de la matière première sont [32,33,34] :

1. Broyage et concassage : Les morceaux d'argile sont réduits en fragments plus fins pour faciliter leur homogénéisation. Cette étape peut se faire à sec ou par voie humide.
2. Déboulonnage : L'argile est mélangée à l'eau pour former une barbotine, une suspension liquide.
3. Tamisage : La barbotine est passée au travers de tamis pour éliminer les impuretés et les éléments grossiers.
4. Homogénéisation : La pâte est mélangée soigneusement pour obtenir une texture uniforme.
5. Épuration : Des techniques comme la décantation ou la filtration peuvent être employées pour éliminer les particules les plus fines.
6. Ajustement de la plasticité : L'ajout d'eau ou de dégraissants permet de modifier la plasticité de la pâte selon les besoins.
7. Formage de la poudre : Pour certains produits, l'argile est séchée et réduite en poudre après l'étape d'homogénéisation.

II.4.3 Le façonnage de la matière première

Le façonnage est une étape essentielle qui transforme l'argile en produits céramiques fonctionnels et esthétiques. La maîtrise de ces techniques permet aux fabricants de répondre aux exigences de formes, de dimensions et de finitions les plus variées. Cette étape, met en œuvre deux grandes catégories de machines [34] :

a) Les presses : puissance et précision

- Presses mécaniques : La force mécanique comprime la pâte dans un moule, lui donnant sa forme définitive.
- Presses hydrauliques : Elles utilisent la pression d'un liquide pour façonner l'argile avec une grande précision, notamment pour les pièces complexes.

b) Les filières : un débit continu et des formes variées


- Principe : Deux rouleaux lamineurs étalent l'argile en une nappe continue.
- Découpe : La nappe est ensuite découpée à la longueur souhaitée, donnant naissance à des éléments comme les briques, les tuyaux ou les carreaux.



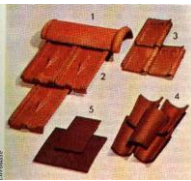
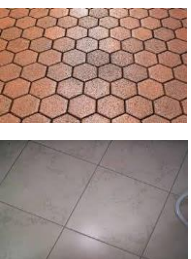
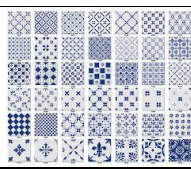


Le choix de la technique dépend de plusieurs facteurs :

- La forme du produit final : Certaines formes sont plus adaptées à un type de façonnage qu'à un autre.
- La cadence de production : Les presses permettent une production plus rapide, tandis que les filières offrent une grande flexibilité pour les formes variées.
- Les propriétés de l'argile : La plasticité de l'argile peut influencer le choix de la technique de façonnage.

De ce fait, le façonnage de la matière première insufflé la forme désirée aux produits qui prendront place dans nos constructions. Le tableau II.1 résume les principaux produits issus du façonnage.

Tableau II.1. Différents produits obtenus après façonnage

Produits	Technique d'obtention	Photos
Briques pleines	Sont soit directement moulées à la presse ou à la filière. Celles passées à la filière sont moins poreuses, plus résistantes et plus régulières,	 brique pleine

Briques perforées	Pour alléger le produit fini et faciliter le séchage. La presse filière sera équiper des noyaux qui perforera la pâte d'argile	 brique perforée
Briques creuses	On comprime la pâte dans une chambre avant de la passer dans une filière. Les machines employées : étireuses ou mouleuses, perceuse utilisent divers procédés pour obtenir le produit final	 brique creuse
Tuiles : -Faitière - À Emboîtement -Plate -Canal ou ronde	Le façonnage des tuiles est un processus essentiel qui détermine leurs caractéristiques et leur aspect. Pour imperméabiliser les tuiles, on procède à un bain d'émail et a une deuxième cuisson qui vitrifie la glaçure	
Carrelages	La barbotine est comprimée dans des moules à haute pression pour donner aux carreaux leur forme et leur épaisseur. Une couche d'émail liquide est appliquée sur la surface des carreaux avant cuisson, leur donnant leur couleur et leur aspect décoratif. D'autres procédés peuvent être utilisés pour décorer les carreaux : impression, application de motifs, inclusion de granulats, vernissage ou flambage , etc	
Les faïences	La barbotine est comprimée dans des moules à haute pression. Une couche d'émail, composée de silice, de fondant et d'oxydes métalliques, est appliquée sur la pièce séchée pour donnés au carreaux sa blancheur et ça variété de couleurs	
Les grès	La pâte d'argile est comprimée dans des moules à haute pression pour lui donner la forme des carreaux. Dans certains cas, les carreaux sont trempés dans un émail ou une glaçure ou encore dans des produits imperméabilisant et antidérapant, etc. pour leur conférer leurs propriétés esthétiques et protectrices.	
Céramique sanitaire	La porcelaine sanitaire (WC, lavabos) est une variété de céramique composée d'un mélange de : kaolin (50 %), de feldspath (25 %) et de quartz (25 %). Elle passe ensuite à l'étape du façonnage par moulage après cuisson elle doit résister à l'abrasion, aux chocs , température et aux charges statiques.	

II.4.4 Séchage :

L'eau est indispensable à la préparation de la pâte d'argile, la rendant malléable et facile à travailler. Cependant, cette même eau devient indésirable une fois la pièce formée. En effet, il faut l'éliminer progressivement pour permettre la cuisson sans déformer l'objet.

De ce fait , Le séchage est un processus délicat et crucial qui a pour objectif de retirer l'eau de façonnage de manière lente et homogène. Cette étape est cruciale car elle conditionne la réussite de la cuisson. Si l'eau s'évapore trop rapidement, des fissures peuvent apparaître sur la pièce, la rendant inutilisable. Il est donc essentiel de respecter un rythme de séchage adapté à la nature

de l'argile et à la forme de l'objet. Deux méthodes principales existent pour sécher les pièces en argile [32] :

- **Séchage à l'air libre** : La méthode la plus simple consiste à exposer les pièces à l'air ambiant. Ce procédé est économique mais demande du temps et exige des conditions climatiques favorables (température et hygrométrie constantes).

- **Séchage en chambre chauffante** : Cette technique utilise des chambres closes où la température et l'humidité sont contrôlées. Plus rapide et homogène, le séchage en chambre est toutefois plus onéreux à mettre en œuvre.

II.4.5 La cuisson :

La cuisson est une étape cruciale dans la fabrication de la céramique. Elle consiste à chauffer l'objet en argile à une température élevée, permettant ainsi de transformer la pâte fragile et malléable en un matériau solide et durable. Ce processus complexe entraîne une série de modifications physiques et chimiques au sein de la céramique, la rendant structure dense et homogène résistante à l'eau, aux chocs et à l'usure.

En effet, au cours de la cuisson, les grains d'argile s'agglomèrent et se densifient, créant une structure plus compacte et uniforme. Cette transformation est favorisée par la vitrification, un phénomène où les particules fondent légèrement en surface, créant une liaison vitreuse entre elles. Ce processus renforce considérablement la solidité de la céramique et la rend imperméable aux liquides. Le tableau II.2 résume les températures types de cuisson pour différentes productions de céramique et de produits en terre [35].

Tableau II.2. Températures de cuisson pour les produits en terre

Produits céramiques	Intervalles de températures
Briques de maçonnerie	1.000°C à 1250°C
Briques de pavage	1.050°C à 1200°C
Briques poreuses	900°C à 1000°C
Tuiles	980°C à 1100°C
Faïences	1150°C à 1.250°C
Carreaux céramiques	1150°C à 1250°C
Porcelaines	1150°C à 1250°C
Grains d'argile expanses	1050°C à 1150°C

II.4.6 Autres procédés complémentaires :

Afin d'obtenir des produits en terre de qualité répondant aux exigences esthétiques et fonctionnelles, d'autres procédés complémentaires peuvent intervenir comme :

- L'émaillage : imperméabilise et protège les pièces poreuses.
- Le vernissage : apporte un éclat unique aux surfaces en grès.
- L'engobage : offre une palette de couleurs et de textures pour une décoration personnalisée.

II.4.7 Triage et stockage :

Le triage et stockage sont des processus rigoureux et organisés afin de garantir que seuls les produits de qualité supérieure parviennent aux clients, tout en optimisant la gestion des stocks et en minimisant les pertes. Les produits font l'objet de contrôles stricts en termes d'aspect, de couleur et de calibrage pour s'assurer qu'ils répondent aux normes de qualité établies. Les produits sont généralement empilés dans des hangars par catégories et par quantité définie, ce qui permet un comptage rapide et précis tout en assurant la sécurité et en réduisant les dommages des produits.

II.5 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES PRODUITS EN TERRE :

II.5.1 Avantages :

- Durabilité** : Les produits en terre, comme les briques et les tuiles, sont connus pour leur durabilité et leur résistance à l'épreuve du temps. Ils peuvent durer des siècles s'ils sont correctement entretenus.
- Esthétique** : La terre offre une grande variété de couleurs et de textures, ce qui permet de créer des produits uniques et esthétiques. Les produits en terre cuite apportent une touche de charme et de caractère aux constructions.
- Propriétés thermiques** : La terre possède d'excellentes propriétés thermiques, permettant une bonne isolation thermique et phonique. Les murs en briques de terre cuite, par exemple, contribuent à maintenir une température fraîche en été et chaude en hiver, réduisant ainsi les besoins en chauffage et en climatisation.
- Respect de l'environnement** : La terre est un matériau naturel et abondant, dont l'extraction et la transformation ont un faible impact environnemental. De plus, les produits en terre sont biodégradables et recyclables.

- **Santé** : Les produits en terre créent un environnement sain et confortable. La terre est un matériau respirant qui permet une bonne régulation de l'humidité ambiante, ce qui peut être bénéfique pour la santé des occupants.

II.5.2 Inconvénients :

-**Fragilité** : Certains produits en terre, comme la poterie, peuvent être fragiles et cassants. Ils doivent être manipulés avec soin et stockés dans des conditions appropriées.

-**Poids** : La terre est un matériau lourd, ce qui peut poser des contraintes lors de la construction et du transport. Les murs en briques de terre cuite, par exemple, nécessitent des fondations plus solides que les murs construits avec d'autres matériaux.

-**Sensibilité à l'eau** : Certains produits en terre, comme les briques en terre crue, peuvent être sensibles à l'eau et à l'humidité. Ils doivent être protégés de la pluie et des infiltrations d'eau pour éviter les dommages.

-**Coût** : Le prix des produits en terre peut être plus élevé que celui d'autres matériaux de construction, en particulier pour les produits artisanaux ou haut de gamme.

-**Mise en œuvre** : La construction avec des produits en terre peut nécessiter des compétences et un savoir-faire spécifique. Il est important de faire appel à des artisans qualifiés pour garantir la qualité et la durabilité de la construction.

II.6 CONCLUSION :

Les matériaux de terre offrent un atout durable et écologique pour la construction. Les produits en terre offrent de nombreux avantages ce qui représentent une solution viable et prometteuse pour une construction durable et de qualité. Leur utilisation croissante contribue à la préservation de l'environnement, au confort des occupants et à la valorisation du patrimoine architectural.

CHAPITRE III

LES METAUX

FERREUX

III.1 INTRODUCTION :

Les métaux sont classés en deux grandes catégories : les métaux ferreux et les métaux non ferreux. Cette classification est basée sur la présence ou l'absence de fer dans leur composition.

III.2 LES MÉTAUX FERREUX

III.2.1 Définition et classification

Les métaux ferreux sont ceux qui contiennent du fer comme élément principal. Le fer est le métal le plus abondant sur Terre et il est relativement peu coûteux à produire. Les métaux ferreux sont généralement plus denses et plus résistants que les métaux non ferreux. Ils sont également plus sensibles à la corrosion. Ils regroupent [33,36]:

- **Le fer pur:** Fer presque pur avec une quantité de carbone inférieure à 0.1 % ils sont rarement utilisés dans sa forme pure en raison de sa sensibilité à la corrosion .
- **La fonte:** Alliage de fer avec un pourcentage de carbone compris entre 2 et 6%. Fragile et peu malléable, elle présente une grande résistance à la compression.
- **L'acier:** Alliage de fer et de carbone (moins de 2%), avec des éléments supplémentaires comme le manganèse, le chrome, le nickel et le vanadium. Sa composition variée lui confère une large gamme de propriétés, le rendant malléable, ductile, résistant et durable.
- **Aciers Inoxydables:** Ce sont des aciers, alliage de fer et de carbone auquel on ajoute essentiellement le Chrome qui au delà de (12 à 13 %) permet d'atteindre la résistance à l'oxydation souhaitée .

III.2.2 Applications des métaux ferreux

Les métaux ferreux sont utilisés dans une large gamme d'applications, notamment :

- **Construction:** Les métaux ferreux sont utilisés dans la construction de bâtiments, de ponts et d'autres structures.
- **Infrastructures:** Les métaux ferreux sont utilisés dans la construction de routes, de voies ferrées et d'autres infrastructures.
- **Machines:** Les métaux ferreux sont utilisés dans la fabrication de machines, d'outils et d'autres équipements.
- **Automobiles:** Les métaux ferreux sont utilisés dans la fabrication de voitures, de camions et d'autres véhicules.

III.3 LES MÉTAUX NON FERREUX

III.3.1 Définition et classification

Contrairement aux métaux ferreux, les métaux non ferreux ne contiennent pas de fer. Ils englobent une grande variété de métaux, chacun avec ses propres caractéristiques [33, 36] :

- **Aluminium:** Léger, résistant à la corrosion et excellent conducteur d'électricité et de chaleur.
- **Cuivre:** Excellent conducteur d'électricité et de chaleur, malléable, anticorrosif et ductile.
- **Plomb:** Dense, mou et très malléable.
- **Zinc:** Bon conducteur d'électricité, résistant à la corrosion et protège l'acier de la rouille. Il est utilisé pour les bardages, les toits , etc
- **Étain:** Malléable, mou, ductile et anticorrosif. On l'utilise surtout pour la soudure de composants électriques et électroniques
- **Nickel:** Résistant à la corrosion et allié important dans la fabrication d'acier inoxydable. On l'utilise dans l'industrie de l'aérospatiale, électroménagers, pièces automobiles, etc.
- **Chrome:** Dur, résistant à la corrosion et utilisé comme revêtement pour d'autres métaux.
- **Le titane:** Très cher, anticorrosif , très résistant il est utilisé pour les prothèses médicales

III.3.2 Applications des métaux non ferreux

Les métaux non ferreux sont utilisés dans une large gamme d'applications, notamment :

- **Aéronautique:** Les métaux non ferreux sont utilisés dans la construction d'avions et d'autres aéronefs en raison de leur légèreté et de leur résistance.
- **Électronique:** Les métaux non ferreux sont utilisés dans la fabrication de circuits imprimés et d'autres composants électroniques en raison de leur conductivité électrique.
- **Câblage:** Les métaux non ferreux sont utilisés dans la fabrication de fils et de câbles en raison de leur conductivité électrique.
- **Pièces de monnaie:** Les métaux non ferreux sont utilisés dans la fabrication de pièces de monnaie en raison de leur durabilité et de leur résistance à la corrosion.

- **Bijoux:** Les métaux non ferreux sont utilisés dans la fabrication de bijoux en raison de leur beauté et de leur durabilité.

III.4 PROPRIÉTÉS DES MÉTAUX FERREUX ET NON FERREUX

Les métaux ferreux et non ferreux ont des propriétés physiques, chimiques et mécaniques différentes qui les rendent adaptés à différentes applications [33, 36, 37].

III.4.1 Propriétés physiques

- **Densité:** Les métaux ferreux ont une densité généralement plus élevée que les métaux non ferreux. Cela signifie qu'ils sont plus lourds pour un même volume. Par exemple, la densité du fer est de $7\,874\text{ kg/m}^3$, tandis que la densité de l'aluminium est de $2\,700\text{ kg/m}^3$.
- **Point de fusion:** Les métaux ferreux ont généralement un point de fusion plus élevé que les métaux non ferreux. Cela signifie qu'ils nécessitent plus de chaleur pour fondre. Par exemple, le point de fusion du fer est de $1\,538\text{ °C}$, tandis que le point de fusion de l'aluminium est de 660 °C .
- **Conductivité thermique:** Les métaux ferreux et non ferreux sont généralement de bons conducteurs de la chaleur. Cela signifie qu'ils peuvent transférer la chaleur d'un endroit à un autre rapidement.
- **Conductivité électrique:** Les métaux ferreux et non ferreux sont également de bons conducteurs d'électricité. Cela signifie qu'ils peuvent permettre le passage du courant électrique.
- **Magnétisme:** Les métaux ferreux sont magnétiques, tandis que la plupart des métaux non ferreux ne le sont pas. Cela signifie que les métaux ferreux peuvent être attirés par des aimants.

III.4.2 Propriétés chimiques

- **Réactivité:** Les métaux ferreux sont généralement plus réactifs que les métaux non ferreux. Cela signifie qu'ils ont tendance à réagir plus facilement avec d'autres substances. Par exemple, le fer rouille lorsqu'il est exposé à l'air et à l'eau, tandis que l'aluminium ne rouille pas facilement.
- **Corrosion:** Les métaux ferreux sont plus sensibles à la corrosion que les métaux non ferreux. La corrosion est un processus qui dégrade le métal au fil du temps.

- **Alliages:** Les métaux ferreux et non ferreux peuvent être alliés à d'autres éléments pour créer des alliages. Les alliages sont des matériaux composés de deux ou plusieurs métaux. Ils ont souvent des propriétés différentes de celles des métaux purs. Par exemple, l'acier est un alliage de fer et de carbone.

III.4.3 Propriétés mécaniques

- **Résistance:** Les métaux ferreux sont généralement plus résistants que les métaux non ferreux. Cela signifie qu'ils peuvent supporter plus de force avant de se déformer ou de se rompre.
- **Ductilité:** Les métaux ferreux et non ferreux peuvent être ductiles. La ductilité est la capacité d'un métal à être étiré en fils fins.
- **Malléabilité:** Les métaux ferreux et non ferreux peuvent être malléables. La malléabilité est la capacité d'un métal à être aplati en feuilles minces.
- **Ténacité:** Les métaux ferreux et non ferreux peuvent être tenaces. La ténacité est la capacité d'un métal à absorber de l'énergie avant de se rompre.

III.5 LES ACIERS POUR LE BÉTON ARMÉ:

Les aciers pour béton armé sont des produits en acier utilisés pour le renforcement du béton. Ils sont essentiels pour la performance structurale du béton armé, car ils compensent la faible résistance du béton à la traction. L'acier pour le béton armé existe en barres longues (12m typiques) ou en fils enroulés. Les armatures peuvent être fabriquées en usine et livrées prêtes à l'emploi, ou coupées et façonnées sur le chantier avant d'être assemblées. Les propriétés de l'acier (forme, dimensions, résistance et fabrication) sont définies par des normes. On identifie les aciers par leur limite d'élasticité (en MPa), leur type (lisse ou haute adhérence) et leur ductilité. Par exemple, HA FeE500-2 indique un acier haute adhérence avec une limite d'élasticité de 500 MPa et une ductilité de classe 2 [36-38].

III.5.1 Aciers lisses:

Les aciers lisses sont des barres d'acier laminées à chaud, sans aucune déformation ou traitement de surface. Ils sont utilisés dans le béton armé pour améliorer sa résistance à la traction. L'adhérence entre l'acier et le béton est assurée par la friction entre les deux surfaces.



Figure III.1. Aciers lisses

III.5.1.1 Avantages des aciers lisses

- **Faible coût:** Les aciers lisses sont relativement peu coûteux par rapport à d'autres types d'acier.
- **Facilité de fabrication:** Les aciers lisses sont faciles à couper, à souder et à plier.
- **Bonne résistance à la traction:** Les aciers lisses ont une bonne résistance à la traction, ce qui signifie qu'ils peuvent supporter de fortes charges.
- **Bonne adhérence au béton:** Les aciers lisses adhèrent bien au béton, ce qui est important pour le béton armé.

III.5.1.2 Inconvénients des aciers lisses

- **Faible résistance à la corrosion:** Les aciers lisses sont sensibles à la corrosion, ce qui signifie qu'ils peuvent rouiller s'ils sont exposés à l'humidité.
- **Faible ductilité:** Les aciers lisses sont moins ductiles que d'autres types d'acier, ce qui signifie qu'ils sont plus susceptibles de se casser s'ils sont surchargés.

III.5.2 Acier haute adhérence (HA)

L'acier haute adhérence (HA) est un type d'acier pour béton armé qui présente des aspérités ou des reliefs en surface. Ces aspérités augmentent la surface de contact entre l'acier et le béton, ce qui améliore l'adhérence entre les deux matériaux. Cela permet à l'acier de mieux transférer les charges au béton, ce qui augmente la résistance et la rigidité de la structure en béton armé.



Figure III.2. Aciers haute adhérence (HA)

III.5.2.1 Avantages des aciers haute adhérence (HA)

- **Adhérence accrue:** La principale caractéristique des aciers HA est leur adhérence accrue au béton. Cela permet de mieux transférer les charges entre l'acier et le béton, ce qui augmente la résistance et la rigidité de la structure.
- **Formes des aspérités:** Les aspérités des aciers HA peuvent prendre différentes formes, telles que des crêtes transversales, des hélicoïdales ou des combinaisons des deux. La forme des aspérités a un impact sur l'adhérence entre l'acier et le béton.
- **Résistance à la traction:** Les aciers HA ont une résistance à la traction élevée, ce qui signifie qu'ils peuvent supporter de fortes charges.
- **Ductilité:** Les aciers HA ont une bonne ductilité, ce qui signifie qu'ils peuvent se déformer avant de se rompre. Cela est important pour la sécurité des structures en béton armé, car cela permet à l'acier de se déformer en cas de surcharge sans se rompre.
- **Meilleure résistance et rigidité:** L'adhérence accrue des aciers HA permet d'obtenir des structures en béton armé plus résistantes et plus rigides.
- **Fissuration réduite:** La meilleure adhérence des aciers HA permet de réduire la fissuration du béton, ce qui améliore la durabilité de la structure.
- **Permet des portées plus grandes:** Les aciers HA permettent de réaliser des structures en béton armé avec des portées plus grandes.
- **Possibilité de réduire la quantité d'acier:** L'utilisation d'aciers HA peut permettre de réduire la quantité d'acier nécessaire dans une structure en béton armé, ce qui peut réduire les coûts.

III.5.2.2 Inconvénients des aciers haute adhérence (HA)

- **Coût plus élevé:** Les aciers HA sont généralement plus coûteux que les aciers lisses.

- **Mise en œuvre plus complexe:** La mise en œuvre des aciers HA peut être plus complexe que celle des aciers lisses.

I.5.3 Adhérence acier béton

L'adhérence acier-béton est un phénomène essentiel dans le béton armé, car elle garantit le transfert des efforts entre l'acier et le béton et permet ainsi à la structure de résister aux sollicitations. Si l'acier glissait dans le béton, la structure ne pourrait pas remplir sa fonction porteuse et des fissures importantes pourraient se développer. L'adhérence dépend de plusieurs facteurs :

- **La forme des armatures :** Les armatures à haute adhérence, avec des reliefs en surface comme des crêtes ou des spirales, ont une meilleure adhérence que les armatures lisses.
- **La surface des armatures :** Une surface rugueuse ou sablée favorise l'adhérence par rapport à une surface lisse.
- **La résistance du béton :** Un béton plus résistant permet une meilleure adhérence des armatures.

Le fonctionnement du béton armé repose sur l'adhérence acier-béton. C'est grâce à cette adhérence que les armatures en acier, qui sont très résistantes à la traction, peuvent compenser la faiblesse du béton en traction. L'utilisation d'aciers plus performants nécessite une adhérence encore plus importante pour exploiter pleinement leurs propriétés.

I.6 Corrosion des métaux ferreux

La corrosion, un terme dérivé du latin "corrodere" signifiant "ronger" ou "attaquer", représente la dégradation involontaire des métaux sous l'influence de leur environnement, qu'il s'agisse d'agents atmosphériques ou de réactifs chimiques. Cette attaque a pour conséquence le retour des métaux à leur état d'origine d'oxyde, de sulfure, de carbonate ou d'autres composés plus stables, entraînant une altération de leurs propriétés. Ce phénomène a pris de nos jours une importance considérable, étant donné l'utilisation de plus en plus grande des métaux et alliages dans la vie moderne. De ce fait, l'emploi de nouveaux matériaux résistant à la corrosion ont fait l'objet d'un grand nombre de recherches ces dernières années. Surtout que la corrosion peut avoir des conséquences importantes sur les structures métalliques, réduisant leur durée de vie, affectant leur performance et compromettant leur sécurité. Elle peut également engendrer des coûts économiques considérables liés aux réparations, remplacements et protection. La corrosion représente un enjeu économique majeur. Car, chaque année, environ un quart de la

production mondiale d'acier est détruit par ce phénomène, soit environ 150 millions de tonnes, ce qui équivaut à 5 tonnes par seconde. Ces pertes seraient encore plus importantes sans les mesures de protection contre la corrosion [34].

I.6.1 Les facteurs de la corrosion:

La corrosion est un processus complexe influencé par divers facteurs, regroupés en quatre catégories principales [33,34,38] :

- a) **Facteurs définissant les modes d'attaque:** La présence d'agents corrosifs tels que l'oxygène, l'eau, les acides, les bases, les sels, Le pH, la température, et les micro-organismes joue un rôle crucial dans le déclenchement et la progression de la corrosion.
- b) **Facteurs métallurgiques:** La présence d'éléments, d'alliage , de défauts de surface ou de traitement comme le trempage peuvent modifier la microstructure du métal et de ce fait , améliorer ou fragiliser la résistance à la corrosion du métal.
- c) **Facteurs définissant les conditions d'emploi:** Les contraintes de traction, de compression , de cisaillement ou le frottement et l'impact peuvent accélérer la corrosion par fissuration.
- d) **Facteurs dépendant du temps:** La combinaison de plusieurs facteurs comme des variations de température, de pH ou de la concentration d'agents corrosifs peuvent avoir un effet synergique et amplifier la corrosion de manière plus importante

I.6.2 La protection des métaux ferreux contre la corrosion:

Plusieurs méthodes efficaces existent pour protéger les métaux ferreux contre la corrosion et prolonger leur durée de vie [38] :

- a) **Revêtements protecteurs:** L'application d'une peinture ou d'un revêtement sur la surface du métal crée une barrière physique qui empêche l'air et l'eau d'entrer en contact avec le métal.
- b) **Galvanisation:** Ce procédé consiste à recouvrir le métal d'une couche de zinc, un métal plus résistant à la corrosion.

- c) **Chromage:** Le chromage consiste à déposer une couche de chrome sur le métal, offrant une protection contre la corrosion et une finition esthétique brillante.
- d) **Protection Cathodique:** Cette méthode utilise un courant électrique continu pour protéger le métal contre la corrosion. Une anode, généralement en zinc ou en magnésium, est reliée au métal à protéger (cathode) et immergée dans un électrolyte. Le courant électrique attire les ions chlorure vers l'anode, les empêchant d'attaquer la cathode.
- e) **Choix du métal:** Lorsqu'il est possible, choisir un métal naturellement plus résistant à la corrosion, comme l'acier inoxydable, peut être une solution efficace pour éviter les problèmes de corrosion.
- f) **Conception et entretien:** La conception des structures métalliques et leur entretien régulier peuvent également contribuer à limiter la corrosion. Éviter les zones de confinement d'eau, assurer un bon drainage et un bon recouvrement lors de la conception (Figure III.3) et inspecter régulièrement les structures pour détecter et corriger les éventuels dommages peuvent prolonger la durée de vie des métaux ferreux

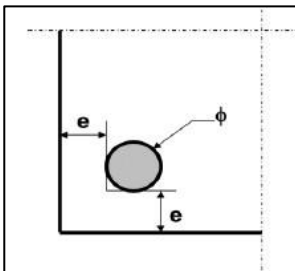


Figure III.3 Longueur de recouvrement

$e \geq 1 \text{ cm}$ Locaux couverts, non exposés aux condensations

$e \geq 3 \text{ cm}$ Locaux exposés aux intempéries, condensations, actions agressives

$e \geq 5 \text{ cm}$ Locaux en bord de mer, ou en atmosphère très agressive

I.7 Conclusion

La distinction entre les métaux ferreux et non ferreux est fondamentale pour comprendre leurs propriétés et leurs applications. Les métaux ferreux, avec le fer comme élément principal, offrent une grande résistance et durabilité, tandis que les métaux non ferreux, caractérisés par une grande diversité, se distinguent par leur légèreté, leur conductivité et leur résistance à la corrosion. Le choix du métal approprié pour une application donnée dépend des propriétés spécifiques requises et des contraintes techniques et économiques.

CHAPITRE IV

LE VERRE

IV.1 INTRODUCTION :

Si le verre fascine l'humanité depuis plus de 5 000 ans, son mode de fabrication a connu une révolution majeure vers 1920 avec l'arrivée de la mécanisation. En effet, la mécanisation a profondément transformé la fabrication du verre, la rendant plus efficace et précise. Des machines automatisées réalisent désormais les étapes clés du processus, garantissant une production de masse à des coûts maîtrisés. Cependant, le savoir-faire artisanal n'a pas disparu. De nombreux artisans verriers perpétuent les techniques traditionnelles, apportant leur touche unique à la création d'objets d'art et de pièces décoratives.

IV.2 COMPOSITION DES VERRES

La composition du verre varie en fonction des propriétés recherchées. Cette diversité d'ingrédients et de proportions permet de créer une multitude de verres aux usages multiples [39].

IV.2.1 La silice, squelette du verre :

Le sable de verrerie utilisé est un sable très fin dont les plus purs contiennent 99,5 % de silice (les sables quartzeux). Fondant à très haute température (environ 1730°C), la silice est généralement associée à des **fondants** pour en abaisser le point de fusion. C'est elle qui confère au verre sa **haute viscosité** et son **état vitreux**.

IV.2.2 Les fondants : indispensables pour la fusion

La **soude** (ou potasse pour certains verres) est ajoutée sous forme de carbonate ou de sulfate. Les silicates alcalins ainsi formés permettent de faire fondre le mélange à des températures bien inférieures au point de fusion de la silice (autour de 1400°C).

IV.2.3 Des additifs pour des propriétés spécifiques :

- Le **carbonate de chaux** réduit la plasticité du verre et le rend plus résistant aux intempéries.
- Le **groisil**, composé de verre broyé, facilite la fusion et la réaction des autres composants.
- D'autres oxydes peuvent être ajoutés pour des propriétés particulières :
 - **Oxyde de zinc**: améliore l'éclat, l'élasticité et la résistance à la corrosion.
 - **Oxyde de baryum**: diminue la dilatation et la sensibilité aux chocs thermiques, renforce la résistance à l'eau (utilisé dans les verres d'optique et le Pyrex).

- **Oxyde de plomb:** augmente l'éclat du verre et lui confère une teinte jaunâtre, facilite la coupe et le travail du verre (utilisé dans le cristal).
- **Oxyde de phosphore:** utilisé dans les verres optiques.
- Pour obtenir du verre de couleur, on ajoute au mélange de base différents colorants comme l'oxyde de manganèse (pour la couleur violet) , le chrome ou l'argent (couleur jaune), l'oxyde de cuivre (couleur rouge), l'oxyde de cobalt (couleur bleu) , l'oxyde de chrome ou de fer (couleur verte).

IV.3 PROCESSUS DE FABRICATION DES VERRES :

Le verre est issu d'un processus de fabrication de trois étapes [39,40] :

IV.3.1 Naissance du verre (fusion et affinage) :

Tout commence par la fusion de matières premières (silice : 70% en masse, carbonate de soude : 15%, carbonate de chaux, stabilisant : 10% et autres constituants si nécessaire) à des températures extrêmes : environ 1500°C pour la fusion, suivie d'un affinage à 1400°C. Cette étape cruciale élimine les bulles de gaz pour obtenir un verre pur et homogène.

IV.3.2 Le façonnage (souffler, mouler, étirer) :

Cette étape consiste à baisser la température à 800°C. A cette température, la masse du verre formée est encore fluide ; mais elle peut être travaillée. Le soufflage, moulage, étirage du verre en fusion permettent de créer une multitude d'objets aux formes variées, selon l'usage final.

IV.3.3 Trempe et recuit :

La dernière étape est essentielle pour la solidité et la durabilité du verre. Le recuit consiste en un traitement thermique contrôlé qui réduit les tensions internes du matériau. Le verre est ainsi prêt à affronter les contraintes du quotidien.

IV.4 PROPRIETES DES VERRES :

IV.4.1. Transparence :

Le verre incolore ou blanc laisse passer la quasi-totalité de l'énergie solaire, offrant une clarté exceptionnelle. Une vitre de 5 mm d'épaisseur n'absorbe qu'environ 15% de la lumière naturelle. Il peut également être opaque ou opalescent pour répondre à des besoins spécifiques. De plus, des verres perméables aux rayons infrarouges sont en cours de développement, ouvrant de nouvelles perspectives pour des applications thermiques innovantes [39] .

IV.4.2. Densité et porosité :

La densité du verre varie selon sa composition. Le verre ordinaire se situe entre 2,5 et 2,7 (une feuille d'un mètre carré et d'un millimètre d'épaisseur pèse environ 2,5 kg), tandis que le verre à glace présente une densité de 2,46 et le cristal atteint 3,4. Sa porosité étant nulle, le verre offre une grande compacité, le rendant excellent conducteur de l'électricité et de la chaleur [40,41] .

IV.4.3. Coefficient de dilatation :

Le verre est sensible aux brusques changements de température car ses différentes parties ne se réchauffent pas uniformément. Cela peut le fragiliser et le rendre cassant. Le verre ordinaire possède un coefficient de dilatation proche de ceux du béton et de l'acier (verre = 9.10^{-6} , béton et acier = 10 à 11.10^{-6}) [40, 41] .

IV.4.4. Résistance mécanique :

Plus le verre est riche en silice et moins son coefficient de dilatation est élevé, plus il est résistant. Le verre offre une meilleure résistance à la compression qu'à la traction. Pour le verre ordinaire, la résistance à la compression est de 200 MPa contre 20 MPa pour la traction (RT/RC = 1/10) [40] .

IV.4.5. Résistance chimique :

Le verre est un matériau durable et résistant à la plupart des agents chimiques. Cependant, l'eau, même en petite quantité, peut dissoudre les alcalis du verre, formant un dépôt blanchâtre qui altère sa transparence. Cette attaque est très lente et se produit même à froid. Les verres peuvent également être sensibles à l'acide fluorhydrique, utilisé pour la gravure. Néanmoins, le verre est ininflammable, incombustible et imputrescible, des atouts précieux pour de nombreuses applications [41].

IV.4.6. Dureté :

Seuls les diamants et le carbure de tungstène peuvent rayer le verre. Le verre de Bohème est le plus dur, tandis que le cristal est le plus tendre.

IV.4.7. Imperméabilité :

Le verre présente une imperméabilité remarquable, le protégeant des liquides et des gaz. Cependant, il est légèrement poreux pour certains liquides comme le kérosène, un phénomène connu sous le nom de "sudation" [41].

IV.4.8. Conductivité :

Le verre est un mauvais conducteur électrique (environ 500 fois moins que le cuivre), ce qui en fait un excellent isolant. Il est également un bon isolant acoustique, sa performance augmentant avec l'épaisseur du verre. Cependant, à chaud, le verre devient conducteur à partir de 250°C [39].

IV.5. CONCLUSION :

Le verre est un matériau d'avenir avec des propriétés uniques de transparence, de résistance et de malléabilité, le verre continue d'innover et de se réinventer. Son utilisation s'étend à des domaines toujours plus vastes, de l'architecture à l'électronique, en passant par le design et la médecine.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] KHOUADJIA, MOHAMED LYES KAMEL. "Etude des propriétés physico-mécaniques et rhéologiques des bétons à base des sables de carrières: expérimentation et modélisation." PhD diss., Université Mohamed Khider-Biskra, 2016.
- [2] SADHOUARI, F., GOUFI, N., & GUEZZOULI, A. Valorisation de l'utilisation des sables concassés par analyse des propriétés des mortiers et des bétons. SBEIDCO–1st. In: International conference on sustainable built environment infrastructures in developing countries, ENSET Oran (Algeria). 2009. p. 247-54.
- [3] BARKAT, M. Effets des additions minérales et adjuvants fluidifiants sur le comportement rhéologique des mortiers et bétons frais et durcis à base de sables des carrières, Thèse de Magister, 2012, Université Mohamed Khider de Biskra.
- [4] COLLECTION TECHNIQUE CIMBÉTON ; T 53 Espaces urbains en béton désactivé : conception et réalisation , Paris : CIMbéton , 2001 , 86 p.
- [5] LE DOEUFF, Thibaut et JACOB, Sophie. Revêtements drainants en produits préfabriqués en béton: création d'outils et évolution de la méthode d'évaluation de la perméabilité.
- [6] PATRICK GUIRAUD « Les bétons fibrés : un vaste choix de solutions constructives » Avril 2018
- [7] BELARIBI, Hassiba. L'EVALUATION DE LA QUALITE DU BETON DE FIBRES IN SITU PAR LES ESSAIS NON DESTRUCTIFS (METHODE COMBINEE ULTRASON ET SCLEROMETRE). 2007. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.
- [8] SILINE Mohammed . NOTES DE COURS « Béton Précontraint, Cours et applications » (Support pédagogique pour étudiants) (Master en Génie civil, Option : Structures) 2017.
- [9] JAEGER. J.-M., GENEST. T., VIEIL. G., FEVRE. C. - Les bétons hautes performances. Guide pratique à l'intention des bureaux d'études pour l'application des règles BAEL et BPEL 99 aux BHP - (2004).
- [10] YAGOUB, M . Evaluation de la Qualite du Beton de Fibres In Situ Cas de Beton Autoplaçant avec des Fibres Mixtes. Diss. Université Mohamed Khider-Biskra, 2009.
- [11] COLLECTION TECHNIQUE CIMBETON. Les constituants des bétons et des mortiers. Tome 1. Centre d'information sur le ciment et ses applications (France). CIMbéton, 2005, p.32-49.

- [12] NF-EN 934-2 : Adjuvants pour béton, mortier et coulis Partie 2 : Adjuvants pour béton- Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage, Septembre 2002.
- [13] VIMANE PHOUMMAVONG, M. Cours en béton armé-Essais de laboratoire, page. 1 à 146.
- [14] BOUDCHICHA, A. Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons, 2007, Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine.
- [15] BELKADI, A.A. Contribution à l'étude de la durabilité et les performances des bétons autoplaçants (fibres végétales, milieu agressif, formulation, modélisation. 2018. Thèse de doctorat. UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA.
- [16] AMOURI, C. Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité), 2009, Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine.
- [17] KERBOUCHE, A. Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et la durabilité des mortiers, Thèse de magister, 2008, l'ENSET d'Oran.
- [18] NF-P 18-506 : Additions pour béton hydraulique - Laitier vitrifié moulu de haut fourneau, Mars 1992.
- [19] DEMIRBOĞA, R. Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar. Energy and buildings, 2003, vol. 35, no 2, p. 189-192.
- [20] ÖNER, M., ERDOĞDU, K., & GÜNLÜ, A. Effect of components fineness on strength of blast furnace slag cement. Cement and Concrete Research, 2003, vol. 33, no 4, p. 463-469.
- [21] ZHU, J., ZHONG, Q., CHEN, G., & LI, D. Effect of particlesize of blast furnace slag on properties of portland cement. Procedia Engineering, 2012, vol. 27, p. 231-236.
- [22] OSBORNE, G. J. Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete. Cement and Concrete Composites, 1999, vol. 21, no 1, p. 11-21.
- [23] ÇOLAK, A. Characteristics of pastes from a Portland cement containing different amounts of natural pozzolan. Cement and Concrete Research, 2003, vol. 33, no 4, p. 585-593.
- [24] RODRIGUEZ-CAMACHO, R. E. & URIBE-AFIF, R. Importance of using the natural pozzolans on concrete durability. Cement and Concrete Research, 2002, vol. 32, no 12, p. 1851-1858.

- [25] TURANLI, L., UZAL, B., & BEKTAS, F. Effect of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended cements. *Cement and Concrete Research*, 2005, vol. 35, no 6, p. 1106-1111.
- [26] DE LARRARD, F. Structures granulaires et formulation des bétons. *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, 2000, p.30 -208.
- [27] FERRERES, D. B. Étude à long terme et à la fatigue des systèmes d'ancrage de pièces métalliques dans le béton. 2010, Thèse de doctorat, Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Departament d'Enginyeria de la Construcció, 2010 (Enginyeria de Camins, Canals i Ports).
- [28] BOILY, David. Fluage en traction des bétons de réparation. *National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada*, Ottawa, 2004.
- [29] COLLECTION TECHNIQUE CIMBETON. Les bétons : Durabilité des ouvrages en béton. Tome 1. Centre d'information sur le ciment et ses applications (France). CIMbéton, 2005, p.7-30.
- [30] RABEHI,M., S. GUETTALA ET B.MEZGHICHE (2012) La porosité ouverte du béton d'enrobage : corrélation entre la résistance à la compression et l'absorption initiale. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 16 (6):730-743.
- [31] S.M.A. Boukli Hacene, F. Ghomari, F. Schoefs et A. Etude expérimentale et statistique de l'influence de l'affaissement et de l'air occlus sur la résistance à la compression des betons. *Lebanese Science Journal*, Vol. 10, No. 2, 2009, pp 81-100.
- [32] SAFI.B, « Procèdes et mise en forme des matériaux des produit céramique », Université de Boumerdès, Faculté des Sciences de l'ingénieur, Département Génie des Matériaux.
- [33] SAIDI.H «matériaux de construction 2 cours et travaux pratiques » cours, Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbes Laboratoire des Matériaux & Hydrologie
- [34] POUNTOUENCHI, A. «Elaboration et caractérisation des briques réfractaires aluminosilicates à base des matériaux argileux de Koutaba etMayouom (Région de l'Ouest): effet de l'ajout des résidus de production de café et des balles de riz». 2020. Thèse de doctorat. PhD thesis, Université de Yaoundé I.
- [35] COURARD, LUC. «Matériaux de construction» (2012).

[36] BENZAADA.S « METAUX ET ALLIAGES FERREUX » Cours, UNIVERSITE Mohamed Kheider Biskra. Algerie

[37] LITE, U. Relations entre usinabilité et structure des métaux et alliages non ferreux (1).

[38] MICHEL.F, GUIRAUD.P, GUITONNEAU J.F & AL. « l'armature du béton, de la conception à la mise en oeuvre T46 », centre d'information sur le ciment et ses applications CIM Béton.

[39] J.L VINGNES, I. BEURROIES « Expériences sur l'élaboration et les propriétés d'un matériau, une vie de verre », Bulletin de l'union des physiciens, centre de ressources pédagogiques en Chimie, Economie, Industrie, ENS de Cachan, 1997.

[40] VERBOND VAN DE GLASINDUSTRIE « renseignement sur le matériau Verre», Fédération de l'industrie du verre asbl, Bruxelles.

[41] COURARD.L «Matériaux de construction» UNIVERSITE DE LIEGE, Faculté des Sciences Appliquées, Département ArGEnCo, Secteur GeMMe –, 2012.