



UNIVERSITÉ ABDELHAFID BOUSSOUF - MILA
INSTITUT DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
oo oo oo oo oo oo
Département de Génie civil et Hydraulique



Cours

Matériaux de Construction 2

(MDC 2)

Préparé par :
Dr. TIOUA Tahar

Destiné aux étudiants 3^{ème} licence en Génie Civil

Année universitaire : 2024/2025

AVANT - PROPOS

Le présent polycopié pédagogique intitulé « Matériaux de Construction 2 » constitue un support de formation destiné aux étudiants de 3^{ème} année Licence Génie Civil.

Ce cours fait suite à un polycopié précédent portant sur les matériaux de construction 1, ce manuel a pour vocation de décrire les propriétés et les utilisations rationnelles des différents matériaux employés dans le domaine de la construction.

Ce document comprend quatre chapitres. Dans la première partie sont exposés les matériaux de construction les plus utilisés au monde, à savoir les bétons. Les Constituants, les propriétés essentielles et les méthodologies de formulation du béton y sont présentés.

La seconde partie traite de la classification des produits céramiques et la méthode de fabrication des briques, tuiles, carreaux de revêtement des murs et des sols, céramique sanitaires.

Les métaux ferreux et non ferreux fait l'objet du troisième chapitre. Une brève généralité sur les métaux est présentée au début du chapitre pour ensuite se concentrer sur les différentes propriétés physiques, chimiques et mécaniques.

La dernière partie constitue une introduction aux verres. Il est rappelé de façon synthétique, des notions sur le verre, leur composition, leur fabrication, leur propriété et leur emploi.

CHAPITRE I : Les bétons

I.1. Introduction.....	1
I.2. Constituants du béton.....	1
I.2.1. Le liant	2
I.2.2. Les Granulats	2
I.2.3. L'eau.....	2
I.2.4. Les adjuvant	2
I.2.4.1. Classification et utilisation.....	3
I.2.5. Les additions minérales.....	6
I.2.5.1. Effets des additions minérales sur les propriétés des bétons.....	9
I.3. Classification des bétons	10
I.3.1. Selon la consistance du béton à l'état frais	10
I.3.2. Selon la classe de résistance à la compression du béton à l'état durci	10
I.3.3. Selon la classes de masse volumique.....	11
I.3.3.1. Bétons Ordinaires (2000 à 2800 kg/m ³)	11
I.3.3.2. Bétons légers (300 à 1800 kg/m ³)	11
I.3.3.3. Bétons lourds (supérieur 3000 kg/m ³)	12
I.4. Caractéristiques physiques et mécaniques des bétons	12
I.4.1. La masse volumique	12
I.4.2. La porosité	12
I.4.2.1. Facteurs influençant la porosité de béton	12
I.4.2.2. Impact de porosité sur les propriétés du béton	12
I.4.3. L'absorption d'eau	13
I.4.4. Le retrait	13
I.4.5. Le fluage	13
I.5. Formulation des bétons	14
I.5.1. La méthode de Bolomy	14
I.5.2. Méthode pratique pour la composition des bétons-méthode dite « Dreux-Gorisse »	14
I.5.2.1. Données de base.....	17
I.5.3. Méthode de Faury	25
I.6. Caractéristiques principales du béton frais	26
I.6.1. L'Ouvrabilité	26
I.6.2. Mesures et contrôles de l'ouvrabilité.....	27
I.6.3. Teneur en air (Air occlus)	30
I.7. Caractéristiques principales du béton durci	31
I.7.1. Essais destructifs	31

I.7.2. Essais non destructifs	34
I.8. Notions sur les nouveaux bétons et leurs applications.....	37
I.8.1. Bétons à hautes performances (BHP)	37
I.8.2. Béton autoplaçant (BAP)	39
I.8.3. Bétons de Poudres Réactives (BPR)	41
I.8.4. Les bétons fibrés	42
I.8.5. Béton compacte au rouleau (BCR)	44

I.1. Introduction

Le développement de l'emploi d'un matériau de construction repose sur des critères techniques et économiques. La résistance mécanique et la durabilité du matériau fondent les principaux critères de choix techniques. La disponibilité et le faible coût des matières premières, la facilité d'emploi et le prix de revient du matériau valident les conditions économiques.

Le béton est aujourd'hui le matériau de construction le plus utilisé au monde : on estime que sa production annuelle correspond à environ une tonne par habitant de notre planète. Ce succès est dû à plusieurs facteurs : le béton est un matériau économique, fabriqué à partir de ressources le plus souvent locales ; il est résistant, durable, isolant thermique et phonique ; il participe à l'architecture par les formes, les textures, les teintes qu'il permet d'obtenir ; il est facile à mettre en œuvre et se marie bien avec l'acier.

Il existe deux grandes filières de réalisation des bétons :

- Le béton coulé en place, qui provient soit de centrales de béton prêt à l'emploi (B.P.E.), installations fixes permettant de fabriquer des bétons à propriétés spécifiées, soit de fabrication sur chantier de bétons à composition prescrite.
- Les produits en béton préfabriqué, éléments composant les structures, poutres, poteaux, éléments de façade, dalles de plancher, les réseaux d'assainissement, etc., qui peuvent être fabriqués de manière industrialisée.

I.2. Constituants du béton

• Définition

Le béton est un matériau de construction composé d'un mélange de granulats, de sable, et d'eau aggloméré par un liant hydraulique (le plus souvent du ciment). On y ajoute éventuellement des adjuvants, des additions minérales et d'autres composants pour modifier ses caractéristiques.



Figure I.1 : Constituants du béton

I.2.1. Le liant

Le rôle de liant dans le béton est d'enrober tous les granulats ensemble, généralement utiliser les ciments, leur choix et leur dosage en fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement.

I.2.2. Les Granulats

Le rôle des granulats dans un mélange de béton est de permettre de produire un matériau ayant une résistance et une durabilité appropriées avec le moindre coût possible. Les propriétés des bétons frais et durci dépend grandement des caractéristiques des granulats dont les principales sont:

- La granulométrie, la texture de surface des granulats et la forme des particules;
- La masse volumique;
- L'absorption, la porosité et la teneur en humidité;
- La résistance à l'abrasion et aux chocs.

I.2.3. L'eau

L'eau joue un double rôle dans la fabrication de béton. D'une part, elle permet l'hydratation du ciment et d'autre part, elle est indispensable pour assurer l'ouvrabilité et un bon compactage du béton

L'eau utilisée pour le gâchage doit être de l'eau potable ne peut pas contenir, en quantités appréciables, des substances susceptibles de réagir avec le béton ou l'armature.

Ces substances peuvent induire en particulier :

- Une accélération ou un ralentissement de la prise et du durcissement (p. ex : sucre, acides)
- Un entraînement excessif d'air non contrôlé, d'où perte de résistance (p. ex : micro-organismes, huiles, graisses, suspensions, certains sels minéraux)
- La corrosion des armatures.

I.2.4. Les adjuvant

• Définition

Les adjuvants sont des produits chimiques qui, incorporés dans les bétons lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieures à 5 % du poids de ciment, provoquent des modifications des propriétés ou du comportement de ceux-ci.

Pour des raisons de commodité d'utilisation, la plupart des adjuvants se trouvent dans le commerce sous forme de liquides. Certains adjuvants existent en poudre, afin de réduire leur coût de transport (cas des chantiers à l'export).

I.2.4.1. Classification et utilisation

Un adjuvant a, en général, une action principale d'après laquelle il se trouve classé et défini, mais il peut présenter également certaines actions secondaires que l'on appelle généralement « effets secondaires ». Les normes européennes retiennent la classification suivante :

- Plastifiants réducteurs d'eau,
- Superplastifiants hautement réducteurs d'eau,
- Entraîneurs d'air,
- Accélérateurs de prise,
- Accélérateurs de durcissement,
- Retardateurs de prise,
- Hydrofuges.

Il existe également d'autres adjuvants tels que notamment : les raidisseurs pour béton projeté, les adjuvants pour coulis d'injection, les adjuvants pour mortier stabilisé, les colorants, les inhibiteurs de corrosion, les générateurs de gaz, etc. Certains d'entre-eux sont décrits et leurs caractéristiques définies dans les normes spécifiques.

● Plastifiants réducteurs d'eau

Ce sont des produits qui viennent se fixer par adsorption à la surface du ciment. Ils provoquent une défloculation des grains et une lubrification de la pâte. Ce processus permet soit une amélioration de la maniabilité sans augmenter le dosage en eau, soit une réduction du rapport E/C, donc une augmentation des résistances mécaniques, sans modifier la maniabilité. Ils doivent, par rapport au béton témoin, assurer une résistance à la compression de 110 % minimum et permettre une réduction du dosage en eau d'au moins 5 %.

Les plastifiants se dosent généralement entre 0,3 et 0,5 % du poids de ciment et ils se caractérisent souvent par un effet secondaire « retardateur de prise » marqué lorsqu'on les utilise à un dosage plus élevé,

- **Superplastifiants hautement réducteurs d'eau**

Cette désignation complexe, traduction de l'anglais "Superplasticizers - High Range Water Reducers". Leur mode d'action est similaire à celui des plastifiants, mais il se produit avec une intensité bien plus importante. Par rapport au béton témoin fabriqué identiquement mais sans superplastifiant, à maniabilité égale, il doit permettre une réduction d'eau minimale de 12 %, en fait ce pourcentage est généralement réduit de 15 à 25 % suivant le dosage. Concernant les résistances à la compression elles doivent être de 140 % à 1 jour et de 115 % à 28 jours.

- **Entraîneurs d'air**

Ce sont des composés d'addition généralement à base de résines de synthèse : résine Vinsol, aryl alkyl sulfonates, acides gras, etc.

Les entraîneurs d'air se présentent sous forme de liquides, de sels solubles ou de poudres insolubles à ajouter au moment du malaxage. Ces adjuvants introduisent volontairement de l'air et agissent en stabilisant les bulles générées lors du malaxage, sous forme d'un très grand nombre de micro-bulles, dont 80 % d'entre elles ont un diamètre inférieur à 100 microns, la plupart étant comprises entre quelques microns et quelques dizaines de microns. Ces micro-bulles ne doivent pas être confondues avec l'air occlus, constitué de bulles de tous diamètres généralement supérieurs à 1 mm, réparties aléatoirement dans le béton, qui se trouvent emprisonnées pendant la mise en place. Ils améliorent essentiellement :

- La plasticité et l'ouvrabilité du béton, les bulles agissant comme autant de grains fins analogues à de petites billes souples et sans frottement,
- La résistance au gel du béton durci (antigelif) ; les très nombreuses petites bulles d'air disséminées dans la masse constituant en effet autant de petits vases d'expansion dans le réseau des canalicules internes pour l'eau interstitielle dont le volume augmente avant la prise en glace: cela évite la désagrégation du béton par gel de cette eau.

- **Accélérateurs de prise et accélérateurs de durcissement**

L'accélérateur de prise a pour fonction principale de diminuer les temps de début et de fin de prise du ciment. Il agit sur la prise en diminuant les potentiels électriques à la surface des grains, ce qui favorise la diffusion des ions et donc accélère le processus d'hydratation. Il permet d'augmenter la densité d'hydrates à un temps donné donc de diminuer le temps de début de transition du mélange pour passer de l'état plastique à l'état rigide.

L'accélérateur du durcissement a pour fonction principale d'accélérer le développement des résistances initiales des bétons, avec ou sans modification du temps de prise. Il permet de mettre les bétons rapidement hors gel.

Les accélérateurs seront donc tout particulièrement employés pour les bétonnages par temps froids ou pour les travaux urgents.

On distingue :

- Les accélérateurs de prise : alcalis, carbonates et sulfates de soude ou de potasse, utilisés surtout par temps froid;
- Les accélérateurs de durcissement : chlorures et carbonates, plus généralement employés afin de réduire certains délais pour décoffrer ou manutentionner les pièces.

● **Retardateurs de prise**

Ils agissent chimiquement comme les accélérateurs en retardant plus ou moins long-temps l'hydratation et le début de prise du ciment.

Parmi les produits retardateurs de prise on peut citer : les sucres et gluconates, les acides citriques et tartriques, l'oxyde de zinc, les phosphates alcalins.

Les doses à utiliser sont en général très faibles (de l'ordre de 0,1 % en extrait sec) et les produits commerciaux sont dilués ; il convient de veiller à une bonne répartition du produit dans la masse.

Ces produits sont employés en particulier :

- pour les bétonnages par temps très chaud,
- pour les transports de béton sur grande distance,
- pour des reprises de bétonnage.

● **Hydrofuges**

Ce sont des adjuvants qui, introduits dans la masse du béton, ont pour fonction principale d'en diminuer l'absorption capillaire et donc la perméabilité à l'eau de ces matériaux.

Il ne faut pas confondre hydrofuge de masse et hydrofuge de surface. Le premier entre dans la composition du béton alors que le second est appliqué uniquement à la surface de béton durci par rouleau et qui sont bien souvent à base de silicone.

Les hydrofuges de masse sont généralement des sels d'acides gras solubles dans l'eau tels que le stéarate de sodium ou l'oléate de sodium. Les sels d'acides gras dissout dans l'eau entrent en contact avec la chaux du ciment et forment des cristaux de sels de calcium insolubles dans l'eau. Ces cristaux obstruent le réseau capillaire du béton.

Les hydrofuges de masse sont utilisés dans les bétons utilisés pour les fondations, les radiers et les réservoirs. Ils sont aussi utilisés dans les mortiers d'étanchéité.

I.2.5. Les additions minérales

Une addition minérale est une poudre d'une finesse supérieure à celle du ciment. Elle peut être ajoutée et/ou substituée au ciment lors de sa fabrication (ciment composé) ou ajoutée directement dans le malaxeur lors de la fabrication du béton. Elle permet ainsi d'améliorer certaines propriétés ou conférer aux matériaux des propriétés particulières. On distingue deux types d'additions : les additions inertes et les additions réactives.

- **Fumée de silice**

Les fumées de silice sont formées de particules sphériques très fines (environ 1 μm) présentant une très forte teneur en silice (SiO_2) amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferrosilicium.

L'utilisation de la fumée de silice conduit à des bétons extrêmement compacts à caractéristiques mécaniques élevées et une résistance nettement renforcée vis-à-vis des milieux agressifs.



Figure I.2 : Fumée de silice

- **Laitier granulé de hauts fourneaux**

Le laitier granulé de haut fourneau est obtenu par refroidissement rapide de la scorie fondue provenant de la fusion du minerai de fer dans le haut fourneau. Un broyage fin du laitier lui permet d'être utilisé comme addition dans les bétons.



Figure I.3 : Laitier granulé de haut fourneau avant et après broyage

- **Les pouzzolanes naturelles**

Les pouzzolanes naturelles sont des substances d'origine volcanique ou bien des roches sédimentaires composées essentiellement de SiO_2 réactif et de Al_2O_3 . La partie restante contient de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres oxydes.



Figure I.4 : Pouzzolane naturelle avant et après broyage

- **Les cendres volantes**

Les cendres volantes sont obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes provenant du courant des gaz de chaudières, alimentées au charbon pulvérisé. Composées essentiellement de silice (SiO_2) réactive et d'alumine (Al_2O_3) (Cendres volantes siliceuses) et de chaux réactive (CaO), de silice (SiO_2) réactive et d'alumine (Al_2O_3) (Cendres volantes calciques), la partie restante contient de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres oxydes.

L'utilisation de cendres volantes permet d'améliorer l'ouvrabilité du béton frais, d'augmenter sa compacité et de réduire la chaleur d'hydratation (donc de limiter le risque de fissuration). Elles améliorent également la résistance aux eaux sulfatées.



Figure I.5 : Cendres volantes

- **Les métakaolins**

Les métakaolins sont issus de la calcination (puis du broyage) d'une argile kaolinique à des températures comprises entre 600 et 900 °C. Il existe deux types de métakaolins : ceux issus d'une calcination en four horizontal et ceux issus d'une calcination flash.

Les propriétés du métakaolin et en particulier sa finesse permettent d'optimiser l'empilement granulaire de la formulation, d'améliorer les propriétés de transfert du béton telles que la perméabilité et la diffusion des ions chlorures et la résistance aux attaques chimique (acide et sulfate).



Figure I.6 : Métakaolin avant et après broyage

- **Fillers (calcaire et siliceux)**

Ce sont des poudres de roche (calcaire ou siliceuse) obtenue par broyage et/ou sélection, dont les caractéristiques sont définies par la norme NF P18-508 et NF P18-509 respectivement pour les fillers calcaires et siliceux.



Figure I.7 : Fillers calcaires

I.2.5.1. Effets des additions minérales sur les propriétés des bétons

Les additions minérales génèrent des effets chimiques et physiques au sein du béton qui en modifient ses propriétés à l'état frais ou à l'état durci :

- **Effet filler ou effet de remplissage**

L'incorporation d'additions au sein d'un matériau cimentaire améliore son squelette granulaire. Ces fines particules s'intercalent entre les interstices des grains de ciment remplissant ainsi une partie du volume des vides. Le résultat de ce remplissage se traduit par une meilleure maniabilité du mélange et un accroissement des résistances pour un même rapport E/C et des propriétés de transfert.

- **Effet chimique ou pouzzolanique**

L'effet chimique concerne la capacité des additions, caractérisées par des propriétés pouzzolaniques et/ou hydrauliques à réagir avec l'eau et les constituants anhydres ou hydratés du ciment pour former de nouvelles phases minérales qui contribuent à la résistance mécanique au même titre que les produits hydratés du ciment, mais aussi à l'amélioration de la durabilité. Cet effet bénéfique est fonction de nombreux paramètres et tient compte de la composition chimique ou minéralogique de l'addition, de sa surface spécifique et du type de ciment.

- **Effet physique ou de surface**

L'effet de surface consiste à la création de sites préférentiels d'hydratation constitués par les surfaces procurées par l'addition minérale. Par conséquent, l'épaisseur de la couche d'hydrate qui se forme autour d'un grain de ciment anhydre est réduite, facilitant ainsi l'hydratation du cœur anhydre par phénomène de diffusion. L'addition entraîne donc une meilleure hydratation du ciment à un instant donné.

I.3. Classification des bétons

Selon la norme NF EN 206-1, les bétons sont classés à l'état frais et à l'état durci.

I.3.1. Selon la consistance du béton à l'état frais

Les classes de consistance sont mesurées selon le test au cône d'Abrams (Slump test). Elles correspondent à une caractéristique du béton lorsqu'il est encore frais. Ces différentes classes permettent de mesurer la plasticité ou la fluidité de béton et d'ajuster le dosage en fonction des performances recherchées.

La norme NF EN 206-1 définit pour les bétons à teneur en eau courante, 5 classes de consistance des bétons (S1 à S5).

Tableau I.1 : Classe d'affaissement des bétons

Classe	S1	S2	S3	S4	S5
Affaissement AC (mm)	10 à 40	50 à 90	100 à 150	160 à 210	≥ 220

La consistance peut aussi être spécifiée par :

- Le temps VEBE (en s) ;
- Le diamètre d'étalement (en mm).

I.3.2. Selon la classe de résistance à la compression du béton à l'état durci

La résistance du béton durci à 28 jours propose deux familles de classe :

- Classe de résistance à la compression pour les bétons de masse volumique normale de 2000 à 2600 Kg/m³ et les bétons lourds de masse volumique ≥ 2600 Kg/m³
- Classe de résistance à la compression pour les bétons légers de masse volumique de 300 à 2000 Kg/m³

La classe de résistance à la compression est désignée par la lettre C de "concrete" ou les lettres LC de "Light Concrete" suivi de deux nombres correspondants aux résistances mesurées respectivement sur éprouvettes cylindriques de dimensions (16x32cm) et cubiques de dimensions (20x20x20cm) le tout mesuré après 28 jours de durcissement.

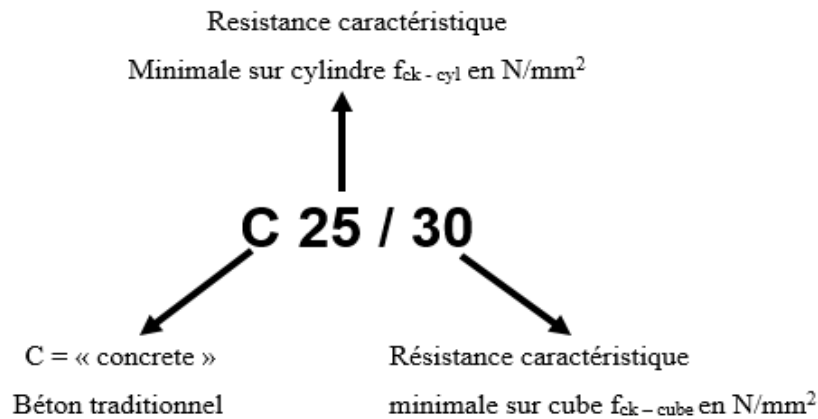


Tableau I.2 : Classe de résistance des bétons ordinaires

Classes de résistance à la compression	C8/10	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50
	C45/55	C50/60	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105	C100/115

Tableau I.3 : Classe de résistance des bétons légers

Classes de résistance à la compression	LC8/9	LC12/13	LC16/18	LC20/22	LC25/28	LC30/33	LC35/38
	LC40/44	LC45/50	LC55/60	LC60/66	LC70/77	LC80/88	

I.3.3. Selon la classes de masse volumique

La norme NF EN 206-1 classe les bétons selon leurs masses volumiques :

I.3.3.1. Bétons Ordinaires (2000 à 2800 kg/m³)

- Béton armé d'ossatures de bâtiment,
- Béton de grands ouvrages,
- Préfabriqué précontraint,
- Pistes, routes, aérodromes.

I.3.3.2. Bétons légers (300 à 1800 kg/m³)

Ils sont destinés principalement à la confection des parpaings, éléments préfabriqués, cloisons, ... Ces bétons ont l'avantage d'améliorer l'isolation thermique et phonique des constructions. On distingue :

- Les bétons caverneux (sans sable)
- Les bétons cellulaires (obtenus par dégagement gazeux)
- Les bétons de granulats légers (schiste expansé).

I.3.3.3. Bétons lourds (supérieur 3000 kg/m³)

Les bétons lourds sont réalisés avec des granulats à haute densité. Ils sont utilisés pour la protection contre les rayons radioactifs.

I.4. Caractéristiques physiques et mécaniques des bétons

I.4.1. La masse volumique

La masse volumique du béton varie en fonction de la masse volumique des constituants (principalement les granulats), leurs dosages (formulation de béton prêt à l'emploi, type de béton), mais également de la quantité d'air qu'il renferme (air occlus lors de la fabrication, du transport par camion toupie et à la mise en œuvre).

I.4.2. La porosité

La porosité du béton est le volume des espaces vides (pores) au sein de sa structure. Elle est exprimée en pourcentage et se mesure comme le rapport du volume des vides au volume total du béton. La porosité influence directement la résistance et la durabilité du matériau, car ces vides peuvent être remplis par l'eau et les polluants, ce qui affecte la pérennité du béton.

I.4.2.1.1. Facteurs influençant la porosité de béton

- Eau de gâchage : L'excès d'eau par rapport à la quantité nécessaire à l'hydratation du ciment crée des vides supplémentaires, augmentant la porosité.
- Granulats: Les vides présents dans les granulats ou l'utilisation de granulats légers peuvent aussi augmenter la porosité du béton.
- Mise en œuvre : Une mauvaise mise en œuvre peut introduire de l'air occlus, qui n'est pas toujours connecté et peut affecter la structure.

I.4.2.1.2. Impact de porosité sur les propriétés du béton

- Durabilité : Une porosité élevée facilite la pénétration de l'eau et des ions (comme les chlorures), ce qui peut entraîner une dégradation plus rapide du béton.
- Résistance : La présence de vides réduit la section utile du matériau, ce qui diminue sa capacité à résister aux contraintes.
- Perméabilité : La porosité ouverte est un indicateur important de la perméabilité du béton et de sa capacité à absorber l'eau et les polluants.

I.4.3. L'absorption d'eau

L'absorption d'eau du béton se réfère à la quantité d'eau que le béton peut absorber, principalement via ses pores et par capillarité, ce qui est lié à sa durabilité et à sa porosité. Une absorption d'eau inférieure à 5 % est considérée comme un béton de bonne qualité, tandis qu'une absorption excessive peut entraîner des fissures et des dommages structurels. La maîtrise de ce phénomène est essentielle pour garantir la longévité du béton, et peut être influencée par la formulation du béton, notamment le rapport Eau/Ciment, et l'utilisation d'adjuvants hydrofuges de masse.

I.4.4. Le retrait

Le retrait du béton est un raccourcissement naturel du matériau dû à des phénomènes hydriques et thermiques, entraînant une contraction dimensionnelle et potentiellement des fissures. Les causes incluent la perte d'eau (retrait de dessiccation et de ressuage), la réaction chimique d'hydratation et les variations de température (retrait thermique). Ce phénomène, qui se produit dès la mise en œuvre et se développe sur la durée, est géré par des joints de retrait, le contrôle de l'humidité et l'utilisation d'armatures pour limiter les fissures.

En fait il n'y a pas qu'un seul retrait du béton. On distingue 4 types de retrait dont les effets peuvent se cumuler et qui peuvent créer des fissures à la surface des parements ou dans la masse du béton.

- Avant ou pendant la prise : 1 h à 24 h
 - Retrait plastique
 - Retrait endogène ou d'autodessiccation.
- Après la prise : Quelques jours à quelques semaines, voire plusieurs mois
 - Retrait thermique
 - Retrait de dessiccation à long terme.

I.4.5. Le fluage

Le fluage est une déformation lente que subit un matériau soumis à une charge constante et permanente. Au-delà d'une certaine charge (approximativement la moitié de la résistance ultime à la compression), le béton se comporte comme un corps plastique. Après suppression de la charge, il subsiste une déformation résiduelle permanente. On admet que cette déformation due au fluage, qui se poursuit durant de nombreux mois (voire années), est de l'ordre de trois fois la déformation instantanée. Le fluage doit être pris en compte dans le dimensionnement.

I.5. Formulation des bétons

Le choix des proportions des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation. Plusieurs méthodes de formulations existent, basées sur des considérations théoriques diverses, ont été proposées et plusieurs d'entre elles sont appliquées en pratique, dont notamment :

- La méthode de Bolomy
- La méthode de Dreux-Gorisse
- La méthode de Faury
- Méthode de Joisel
- Méthode de Valette.

I.5.1. La méthode de Bolomy

C'est une méthode qui donne une courbe granulométrique de référence, il faut donc réaliser avec les granulats dont on dispose une composition granulaire totale (ciment compris) dont la courbe résultante soit aussi proche que possible de la courbe de référence théorique.

La courbe de référence donnée par Bolomy est déduite de celle de Faury, cependant elle tient compte de la consistance du béton fabriqué et de son mode de mise en place.

L'équation de la courbe granulaire est la suivante :

$$P = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}}$$

P : pourcentage pondéral de matières solides sèches (ciment + granulats)

d : ouverture de tamis

D : dimension maximale des granulats

A : coefficient prenant les valeurs données dans le tableau 4

Tableau I.4 : Valeurs de coefficient A

Type de granulat	Consistance du béton		
	ferme	plastique	Très plastique et fluide
Granulats roulés	8 à 10	10	12 à 14
Granulats concassés	10 à 12	12	14 à 16

La consistance est caractérisée par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams correspondant aux plages suivantes (tableau 5) :

Tableau I.5 : consistance du béton

Consistance du béton	Affaissement au cône (cm)
Ferme	0-4
Plastique	5 – 9
Très plastique	10 – 15
fluide	> 15

Cette courbe représente l'ensemble des matières solides (ciment compris), cependant elle ne doit être tracée qu'à partir du tamis de 0,16 mm.

Calcule pratique de la courbe de référence :

Supposons que l'on dispose des matériaux suivants dont les courbes sont reportées sur la figure I.8 : Sable 0/0.3 mm, sable 0/3 mm, Gravillon 4/6 mm, gravillon 6/14 mm.

Pour obtenir la courbe correspondant à un béton donné, après avoir choisi la valeur de (A) on remplace (D) par sa valeur et en prenant pour (d) différentes valeurs, on obtient le pourcentage de matières solides correspondant à ces valeurs.

Les valeurs de $\sqrt{d}$ sont mentionnées dans le tableau 6 pour différentes valeurs de d :

Tableau I.6 : Différentes valeurs de $\sqrt{d}$

d mm	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	5	6,3	8	10	12,5	16,	20	25
$\sqrt{d}$	0,4	0,56	0,79	1,12	1,58	2,24	2,51	2,83	3,16	3,54	4	4,47	5

Par exemple pour A= 10 et D =14 mm, on obtient les pourcentages suivants correspondant aux dimensions d :

Tableau I.7 : Différentes valeurs de P

dmm	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	5	8	12,5	14
P	19,6	23,5	29,1	36,9	48,0	63,8	78,0	95,0	100

Ces valeurs permettent de tracer la courbe correspondante :

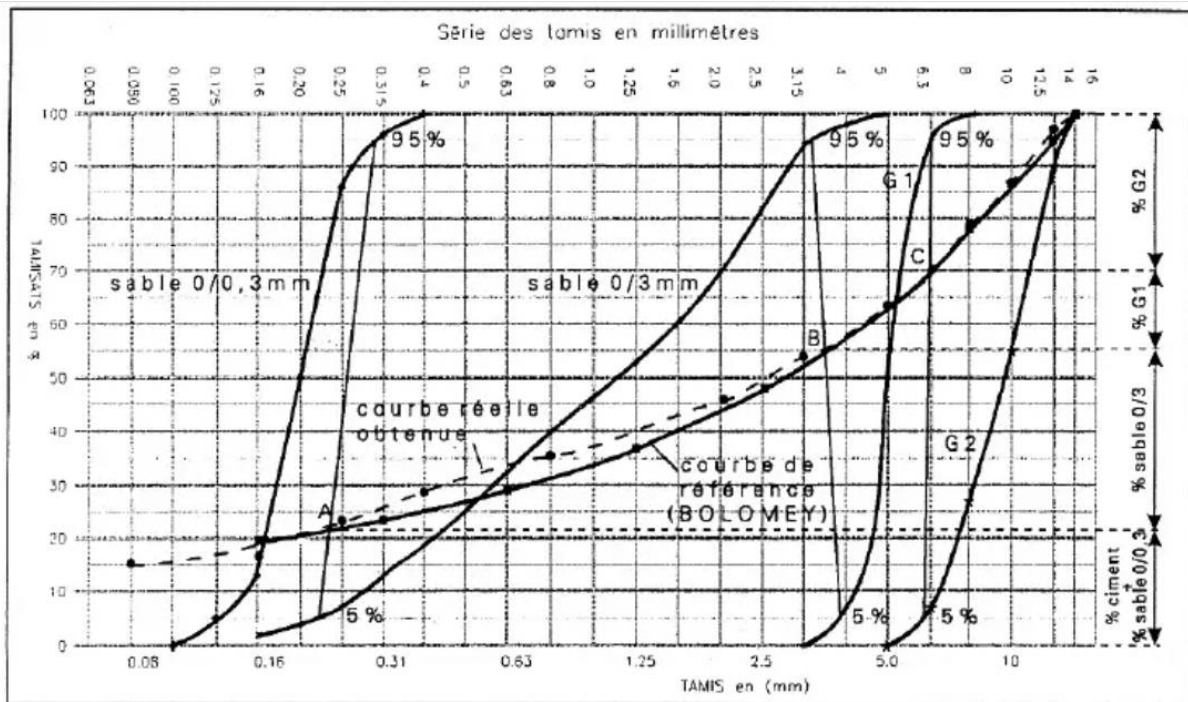


Figure I.8 : courbe de référence

Pour obtenir le pourcentage pondéral de chacun de ces granulats permettant de s'approcher le mieux possible de la courbe de référence, on rejoint le point ayant 95% de tamisât d'un granulat avec le point ayant 5% du granulat immédiatement supérieur. Ces droites coupent la courbe de référence aux points A, B et C qui permettent de calculer le pourcentage de chaque granulat. On obtient :

22-0 = 22% de sable 0/0.3 mm et de ciment (ordonnée du point A = 22%)

56-22 = 34% de sable 0/3 mm (ordonnée du point A = 56%)

70-56 = 34% de Gravillon 4/6 mm (ordonnée du point A = 70%)

100-70 = 30% de gravillon 6/14 mm.

Comme le ciment et les granulats, l'eau (E) sera exprimée en pourcentage par rapport au totale des éléments secs. Elle tiendra toutefois compte de ce qu'on est en présence des granulats comportant d'une part les éléments fins ($D < 0,16$ mm) pour lesquels on aura une quantité d'eau E_1 , et d'autre part les éléments moins fins ou gros ($(D > 0,16$ mm) pour lesquels on recherchera une quantité d'eau E_2 . Elles sont obtenues à partir des relations empiriques ci-dessous :

$$E_1 = 0.23 \times \text{poids des éléments secs} < 0.16\text{mm}$$

$$E_2 = \frac{k \times \text{poids des éléments secs}}{1.17 \times \sqrt[3]{0.16 \times D}} \geq 0.16\text{mm}$$

Le coefficient k est tiré du tableau I.8.

Tableau I.8 : Valeurs de coefficient k

Consistance du béton	Granulats roulés	Granulats concassés
Béton damé	0,08	0,095
Béton vibré	0,09 - 0,095	0,1 - 0,11
Béton coulé	0,1 - 0,11	0,12 - 0,13

On peut donc écrire :

$$\%E = \frac{E_1 + E_2}{\text{masse des éléments secs}} \times 100$$

En 1942, J. Faury proposa, comme suite à une étude générale du béton, une nouvelle loi de granulation du type continu.

I.5.2. Méthode pratique pour la composition des bétons-méthode dite « Dreux-Gorisse »

Cette méthode permet de définir d'une façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton étudié. Toutefois, seuls quelques gâchées et la confection d'éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition définitive en fonction des qualités souhaitées et des matériaux utilisés.

I.5.2.1. Données de base

a) Nature de l'ouvrage

La connaissance de la nature de l'ouvrage est nécessaire : ouvrage massif ou au contraire élancé et de faible épaisseur, faiblement ou très ferrailé. Il sera nécessaire de connaître l'épaisseur minimale des éléments et les dispositions des armatures dans les zones les plus ferrillées : distance minimale entre elles et couverture par rapport au coffrage...

b) Résistance souhaitée

Le béton doit être formulé pour qu'à 28 jours sa résistance moyenne en compression atteigne la valeur caractéristique f_c .

Cette valeur doit, par mesure de sécurité, être supérieure de 15% à la résistance minimale en compression f_{c28} nécessaire à la stabilité de l'ouvrage.

$$f_c = 1,15 f_{c28}$$

c) Consistance désirée

Elle est fonction de la nature de l'ouvrage (plus ou moins massif ou plus ou moins ferrailé) de la difficulté du bétonnage, des moyens de serrage, etc. Elle peut se définir en général par la plasticité désirée mesurée par affaissement au cône comme indiqué dans le tableau I.9

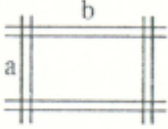
Tableau I.9: Evaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône d'Abrams

Plasticité	Affaissement en (cm)
Béton très ferme	0 à 2
Béton ferme	3 à 5
Béton plastique	6 à 9
Béton mou	10 à 13
Béton liquide	≥ 14

d) Dimension maximale des granulats

Les granulats à utiliser dans la fabrication du béton doivent permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides. Il faut en conséquence utiliser des granulats de toutes tailles pour que les plus petits éléments viennent combler les vides laissés par les plus gros. Pour permettre une mise en œuvre correcte du béton, il est important que la taille des plus gros granulats D ne s'oppose pas au déplacement des grains entre les armatures métalliques du ferrailage. Le tableau I.10 donne une borne supérieure de $D_{\max}$ à respecter en fonction de la densité du ferrailage, des dimensions de la pièce à réaliser, et de la valeur de l'enrobage des armatures. $D_{\max}$ est le diamètre des plus gros granulats entrant dans la composition du béton. Sa valeur peut être lue sur la feuille d'analyse granulométrique des granulats correspondants.

Tableau I.10: Evaluation approximative de $D_{\max}$ des granulats, en fonction des caractéristiques de la pièce à bétonner et de l'ambiance plus ou moins agressive.

Caractéristiques de la pièce à bétonner		$D_{\max}$
e_h	Espacement horizontal entre armatures horizontales	$\leq e_h / 1,5$
e_v	Espacement vertical entre lits d'armatures horizontales	$\leq e_v$
c	Enrobages des armatures : Ambiance très agressive ≥ 5 cm Ambiance moyennement agressive ≥ 3 cm Ambiance peu agressive ≥ 3 cm Ambiance non agressive ≥ 1 cm	$\leq c$
r	Rayon moyen du ferrailage $r = \frac{ab}{2(a+b)}$  Granulats roulés Granulats concassés	$\leq 1,4 r$ $\leq 1,2 r$
h_m	Hauteur ou épaisseur minimale	$\leq h_m / 5$

e) Dosage en ciment

On commencera par évaluer approximativement le rapport $\frac{C}{E}$ en fonction de la résistance moyenne désirée f_c .

$$f_c = GF_{CE} \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

f_c , résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en MPa,

F_{CE} , classe vraie du ciment (à 28 jours) en MPa,

C, dosage en ciment (en kg/m^3),

E, dosage en eau totale sur matériaux secs (en litre pour 1 m^3)

G, coefficient granulaire (tableau I.11).

Le dosage de ciment est déterminée grâce à l'abaque de la figure I.9 en fonction des valeurs de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams.

Pour cela il suffit de positionner sur l'abaque les valeurs de C/E et de l'affaissement au cône recherchées. Le point ainsi obtenu doit être ramené parallèlement aux courbes de l'abaque

pour déterminer la valeur optimale de C. Au-delà de 400 kg de ciment par m³ de béton, on préférera à un surdosage en ciment l'usage d'un fluidifiant.

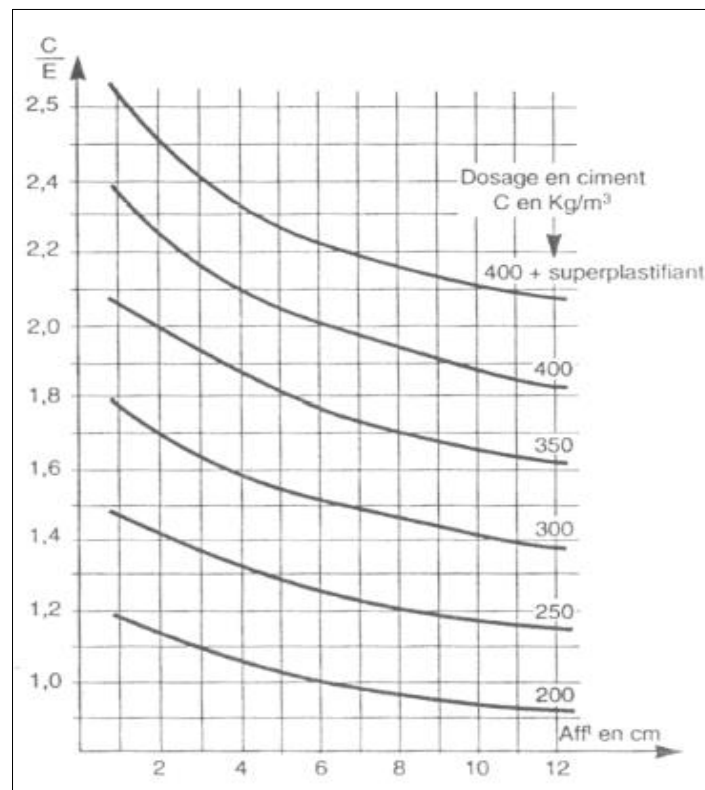


Figure I.9 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).

Tableau I.11 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G. Ces valeurs supposent que le serrage du béton sera effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principe).

<i>Qualité des granulats</i>	<i>Dimension D des granulats</i>		
	<i>Fins</i> ($D \leq 16mm$)	<i>Moyens</i> $25 \leq (D \leq 40mm)$	<i>Gros</i> ($D \geq 63mm$)
<i>Excellente.....</i>	0,55	0,60	0,65
<i>Bonne, courante....</i>	0,45	0,50	0,55
<i>Passable.....</i>	0,35	0,40	0,45

f) Dosage en eau

Ayant fait choix du dosage en ciment C, on déduit alors le dosage approximatif en eau totale à prévoir (provisoirement) et qu'il conviendra bien entendu d'ajuster ultérieurement par quelques essais de plasticité et d'ouvrabilité.

La quantité d'eau nécessaire à la confection du béton se calcule grâce aux valeurs de C/E et de C.

- Corrections sur le dosage en ciment C et le dosage en eau E

Lorsque la dimension maximale des granulats $D_{\max}$ est différente de 20 mm, une correction sur la quantité d'eau est nécessaire à l'obtention de la maniabilité souhaitée.

La correction sur le dosage en eau peut être approximativement évaluée d'après les valeurs du tableau I.12 en fonction de $D_{\max}$

Tableau I.12 : Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale (D) des granulats (si $D_{\max} \neq 20$ mm).

Dimension maximale des granulats $D_{\max}$ en mm	5	8 à 10	12,5 à 16	20 à 25	30 à 40	50 à 63	80
Correction sur le dosage en eau (en%)	+ 15	+ 9	+ 4	0	- 4	- 8	- 12

g) Tracé de la courbe granulaire de référence

Il s'agit de déterminer les pourcentages de sable, de gravillons et de gravier qui vont permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides. Les quantités des matériaux de chaque classe granulaire doivent être judicieuses pour que les plus petits éléments viennent combler les vides laissés par les plus gros. La courbe granulométrique théorique d'un matériau à minimum de vides peut être schématisée par une droite brisée. La démarche proposée par Dreux pour déterminer le mélange optimum à minimum de vides est la suivante : tracé de la courbe granulaire de référence, détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux.

La courbe granulaire de référence doit être tracée sur une feuille d'analyse granulométrique. Celle-ci est composée de deux segments « OA » et « AB » avec O le point (0) origine de la courbe, B extrémité le point ($D_{\max}$) et brisure en A est défini par son abscisse X et son ordonnée Y.

- **En abscisse :**

$$\text{Si } D_{\max} \leq 20 \text{ mm} \quad X = D_{\max} / 2$$

$$D_{\max} > 20 \text{ mm} \quad \text{Module}(X) = (\text{Module}(D_{\max}) + 38) / 2$$

- **En ordonnée :**

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p$$

K : est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés et également du module de finesse du sable. Les valeurs (k) sont indiquées dans le tableau I.6:

Ks : correction supplémentaire en fonction de la granularité du sable.

$K_s = (6 M_{fs} - 15)$ avec M_{fs} le module de finesse du sable.

K_p : correction supplémentaire si le béton est pompable.

$K_p = +5$ à $+10$ selon le degré de plasticité désiré.

Tableau I.13 : Valeur de K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité de granulats

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment	400 + Superplastifiant	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4
	400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2
	350	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
	300	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
	250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
	200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

On trace alors les lignes de partage entre chacun des granulats, en joignant le point à 95 % de la courbe granulaire du premier, au point de 5 % de la courbe du granulat suivant et ainsi de suite. On lira alors sur la courbe de référence, au point de croisement avec la ou les droites de partage, le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats S%, G% par exemple.

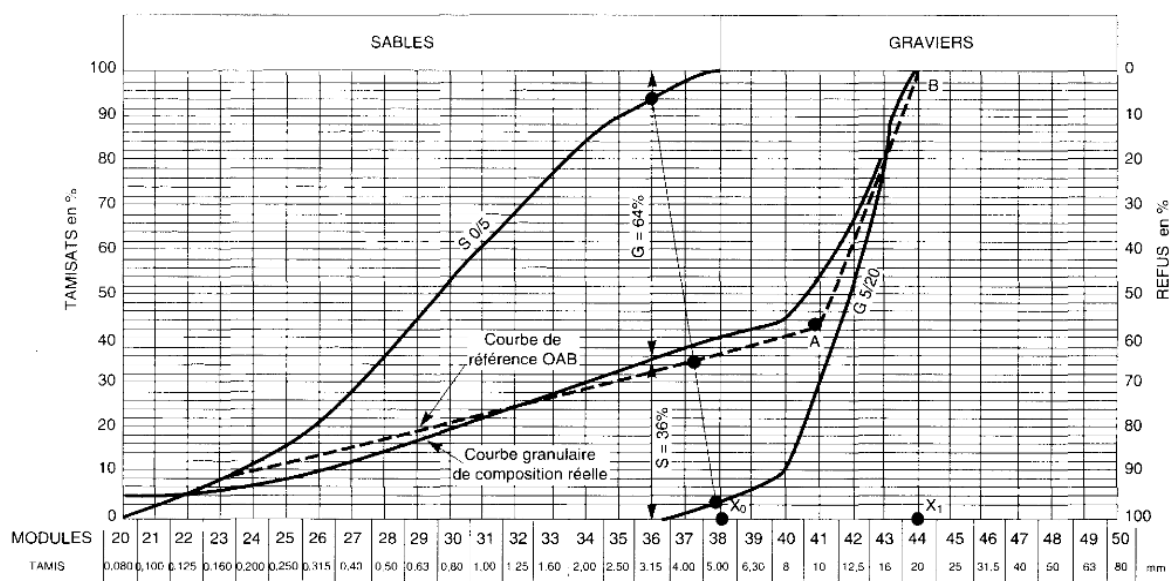


Figure I.10 : Exemple d'étude de la composition granulaire d'un béton ternaire dans un courbe d'analyse granulométrique.

h) Dosage des granulats

Le coefficient de compacité γ est le rapport de volume total absolu des matières solides (ciment et granulats, $V_T = V_G + V_S + V_C$) au volume total du béton frais en œuvre soit un mètre cube :

$$\gamma = \frac{V_T}{1000}$$

On choisira dans le tableau I.14 une valeur convenable du coefficient de compacité γ en fonction de D, de la consistance et de l'efficacité du serrage.

Si C est le dosage en ciment et $\rho_{s(c)}$ la masse volumique absolue de ciment, le volume absolu des grains de ciment est :

$$V_C = \frac{C}{\rho_{s(c)}}$$

Le volume total absolu de l'ensemble des granulats est :

$$V_T = 1000 \gamma - V_C$$

Connaissant le volume total absolu des matières solides (V) et les pourcentages en volume absolu de sable (S %), de gravier (G %), il est alors possible de déterminer les volumes de sable (V_S) et de gravier (V_G) ainsi que leurs masses respectives (M_S , M_G) :

$$V_S = V_T \times S \%$$

$$V_G = V_T \times G \%$$

Si $\rho_{s(s)}$ et $\rho_{s(g)}$ les masses volumiques absolues des sable et gravier respectivement :

$$M_S = V_S \times \rho_{s(s)}$$

$$M_G = V_G \times \rho_{s(g)}$$

Tableau I.14: une valeur convenable du coefficient de compacité γ

Consistance	Serrage	γ coefficient de compacité						
		D = 5	D = 10	D = 12,5	D = 20	D = 31,5	D = 50	D = 80
Molle	Piquage.....	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible.....	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale.....	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage.....	0,730	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible.....	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale.....	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante.....	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible.....	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale.....	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante.....	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855
Ces valeurs sont convenables pour des <i>granulats roulés</i> sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes : – sable roulé et gravier concassé = – 0,01, – sable et gravier concassé = – 0,03.								

i) Ajustement de la formule au mètre cube

Si la masse de sable est M_S , la masse de gravier M_G , la masse de ciment M_C et le dosage en eau (en litres par mètre cube), la densité du mètre cube de béton devrait être théoriquement :

$$\Delta_0 = \frac{M_S \times M_G \times M_C}{1000}$$

On peut en pesant une ou plusieurs éprouvettes mesurer la densité réelle Δ du béton frais en œuvre. Si Δ est peu différente de Δ_0 , c'est que la formule étudiée correspond bien au mètre cube; si en revanche, la densité réelle Δ est plus petite que la densité théorique Δ_0 , c'est que la formule étudiée donne un peu plus d'un mètre cube de béton et le dosage réel en ciment se trouve inférieur à celui théoriquement prévu et vice versa. La correction à apporter sur la masse totale des granulats est alors :

$$x = 1000 (\Delta - \Delta_0) \text{ (en Kg)}$$

Si $\Delta - \Delta_0 < 0$, correction à déduire car la formule proposée fait plus du mètre cube.

Si $\Delta - \Delta_0 > 0$, correction à ajouter car la formule proposée fait moins du mètre cube.

Sur la masse de chacun des granulats dont les pourcentages sont $S \%$, $G \%$

$$M_{S \text{ (corrigé)}} = M_S \pm (x * S \%)$$

$$M_{G \text{ (corrigé)}} = M_G \pm (x * G \%)$$

I.5.3. Méthode de Faury

En 1942, J. Faury proposa, comme suite à une étude générale du béton, une nouvelle loi de granulation du type continu.

Il s'inspirait pour cela d'une théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen. La loi de granulation qui en découle est une loi fonction de $\sqrt[5]{D}$; c'est pourquoi Faury adopta une échelle des abscisses graduée en $\sqrt[5]{D}$. La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est alors, théoriquement, une droite ; cependant, Faury a distingué les grains fins et moyens ($< D/2$) des gros grains ($> D/2$) et la pente de la droite de référence n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories.

On trace donc pour l'ensemble du mélange, ciment compris, une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites si l'on opère sur un graphique gradué, en abscisse, en $\sqrt[5]{D}$. L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixée à $D/2$ et son ordonnée Y est donnée par une formule tenant compte de la grosseur D du granulat et comportant certains paramètres dont la valeur est à choisir dans des tableaux en fonction de la qualité des granulats (roulés ou concassés) et de la puissance du serrage (simple piquage ou vibration plus ou moins intense).

Cette valeur se calcule par la formule suivante :

$$Y = A + 17 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

Le paramètre A se choisit dans le tableau I.15 et D est exprimée en dimension passoire. B varie de 1 à 2 selon que le béton est ferme ou mou. R est le rayon moyen du moule.

Tableau I.15 : Valeurs de A

	Sables et graviers roulés usuels	Sables roulés et graviers de broyage usuels	Sables et graviers de broyage usuels
Consistance très fluide. Mise en œuvre sans serrage	≥ 32	≥ 34	≥ 38
Consistance fluide pour faible serrage	30 à 32	32 à 34	36 à 38
Consistance molle pour serrage moyen	28 à 30	30 à 32	34 à 36
Consistance ferme pour serrage soigné	26 à 28	28 à 30	32 à 34
Consistance très ferme pour serrage puissant	24 à 26	26 à 28	30 à 32
Consistance de terre humide, serrage très puissant	22 à 24	24 à 26	28 à 30
Serrage exceptionnellement puissant	< 22 (à déterminer dans chaque cas)	< 24 (à déterminer)	< 28 (à déterminer)

Exemple : en choisissant des valeurs moyennes pour les paramètres A, B et R, la valeur moyenne de Y est de l'ordre de 60 % pour D = 16 mm et de 75 % pour D = 100 mm (courbe II, Figure I.11). Pour un béton D = 25 mm, les valeurs extrêmes de Y sont :

Valeur maximale : consistance très fluide, sans serrage, granulats concassés, effet de paroi important :

$$Y = 38 + 17 \sqrt[5]{25} + \frac{2}{1 - 0,75} = 78 \%$$

Valeur minimale : serrage, exceptionnellement puissant, granulats roulés, effet de paroi négligeable :

$$Y = 22 + 17 \sqrt[5]{25} = 54 \%$$

Ces valeurs donnent les courbes de référence tracées sur figure I.11 pour D = 25 mm (points de brisure I)

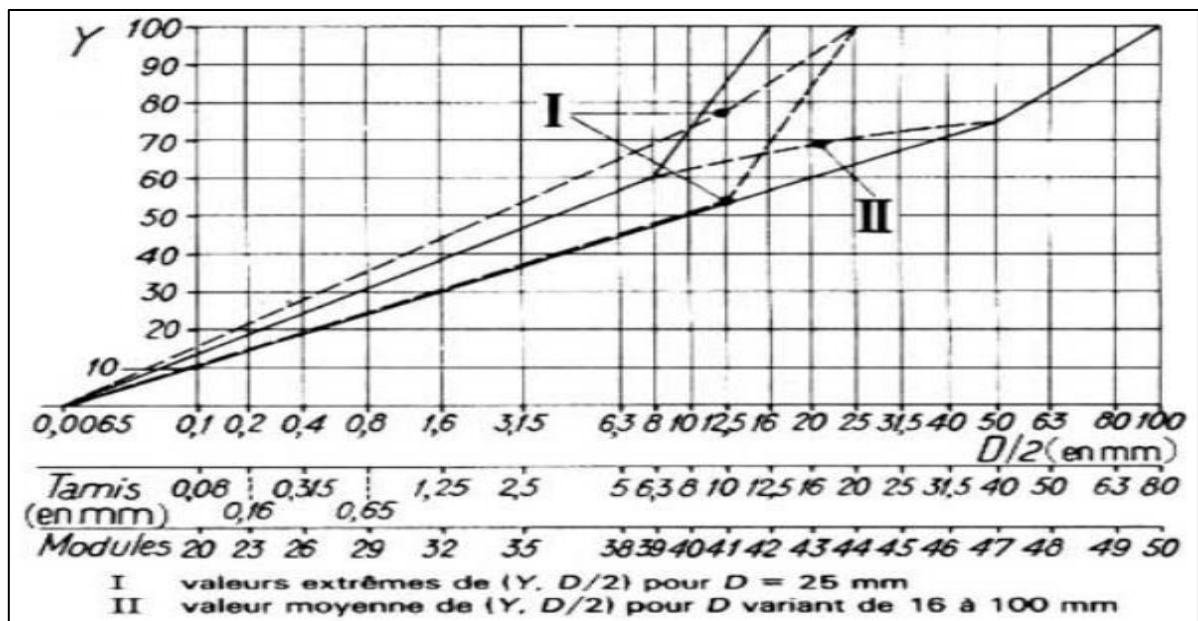


Figure I.11 : courbe de Faury

I.6. Caractéristiques principales du béton frais

I.6.1. L'Ouvrabilité

L'ouvrabilité est une qualité essentielle du béton ; elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage;

une bonne ouvrabilité comporte une marge de sécurité permettant sans conséquences fâcheuses, une certaine et nécessaire latitude par rapport aux bonnes et plus ou moins rigoureuses règles à appliquer pour une exécution optimale. De l'ouvrabilité dépendent, en effet, la plupart des qualités de l'ouvrage : compacité et résistance réelle du béton dans l'ouvrage lui-même, enrobage et adhérence des armatures, cohésion du béton entraînant un moindre risque de ségrégation, parements de belle apparence, étanchéité. C'est pourquoi l'ouvrabilité doit être considérée par le laboratoire chargé de l'étude d'un béton, comme une qualité aussi importante que sa résistance. Il arrive encore trop fréquemment que des formules de composition qui ont peut-être permis en laboratoire la confection de belles éprouvettes, doivent être modifiées sur le chantier par défaut d'ouvrabilité qui, on l'oublie trop souvent, risquerait d'entraîner pour le béton dans l'ouvrage un certain nombre de défauts dont, en particulier, des résistances localement insuffisantes.

I.6.2. Mesures et contrôles de l'ouvrabilité

Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. Nous n'en citerons que quelques-uns qui sont les plus couramment utilisés dans la pratique.

- **Essai d'affaissement au cône d'Abrams**

Cet essai (Slump-test) est incontestablement un des plus simples et des plus fréquemment utilisés. Il ne nécessite qu'un matériel peu coûteux et peut être exécuté par un personnel non hautement qualifié mais ayant reçu simplement les instructions nécessaires au cours de quelques séances de démonstration. Cet essai a fait l'objet de la norme NF EN 12350-2, et nous n'en rappelons ci-dessous que les principes essentiels : on remplit de béton un moule en tôle tronconique ($D = 20\text{ cm}$, $d = 10\text{ cm}$, $h = 30\text{ cm}$) ; le remplissage s'exécute en trois couches tassées avec une tige d'acier de 16 mm de diamètre dont l'extrémité est arrondie, à raison de 25 coups par couche : on soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement (figure I.12).

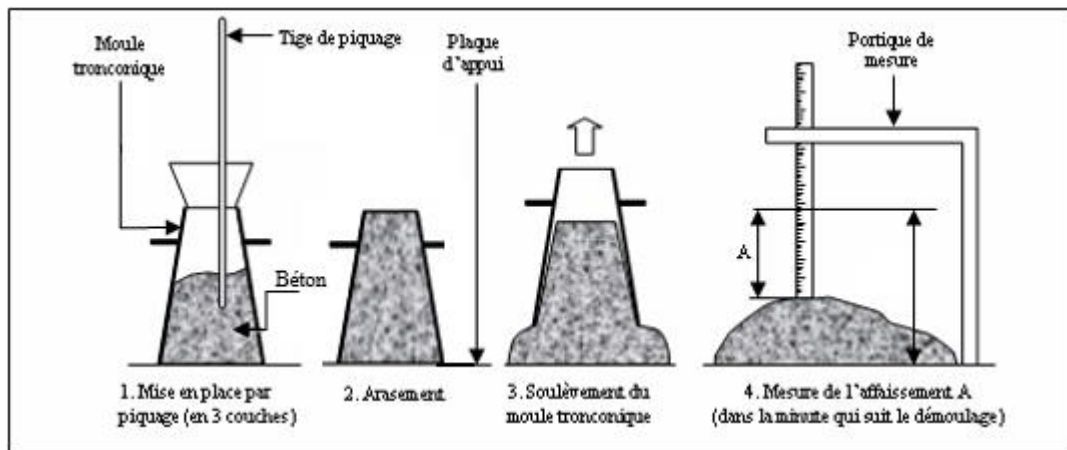


Figure I.12 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams

Les mesures sont évidemment quelque peu dispersées et il ne faut pas accorder à cet essai un caractère trop rigoureux, mais on peut admettre qu'il caractérise bien la consistance d'un béton et permet le classement approximatif indiqué au tableau I.16.

Tableau I.16 : Valeurs Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au Cône

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

● Essai Vébé

Cet essai est particulièrement utile pour tester les bétons de faible ouvrabilité. L'essai est effectué au moyen d'un consistomètre (machine à essai Vébé) comme représenté à la figure I.13. Remplir le cône d'Abrams en trois couches, chacune piquée 25 fois. Enlever la hausse, araser le béton, et ôter le moule verticalement en 5 à 10 secondes. Faire pivoter le disque au-dessus du béton et le laisser descendre jusqu'à ce qu'il entre en contact avec le béton. Noter la valeur de l'affaissement sur la règle graduée. Laisser le disque reposer librement sur le béton. Mettre en marche la table vibrante et le chronomètre simultanément, et les arrêter lorsque le béton couvre toute la face inférieure du disque. Le temps (t) exprimé en secondes définit la consistance Vébé.

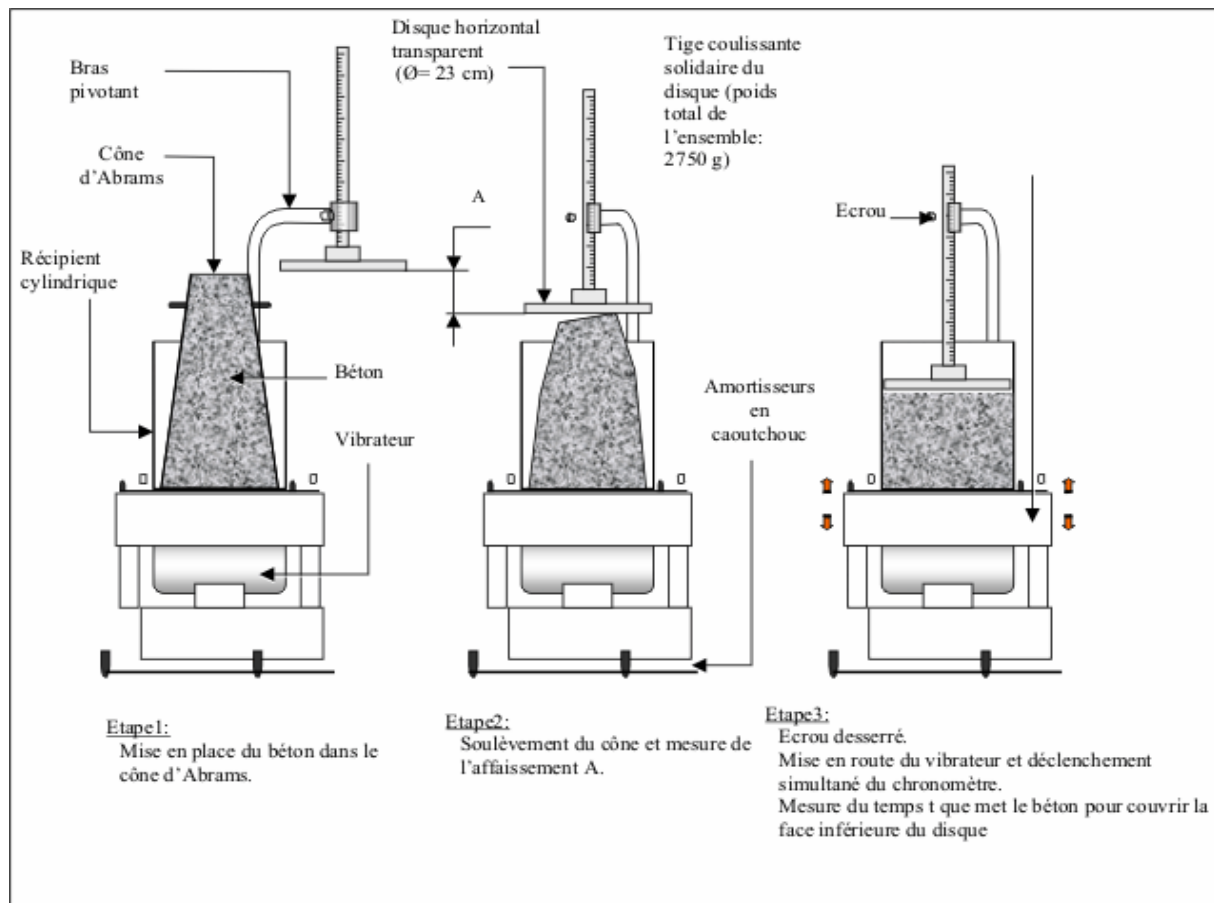


Figure I.13 : Schéma de principe du test Vébé

• Essai d'étalement à la table à choc

Cet essai simple à réaliser, est très utilisé pour apprécier la consistance des bétons fluides mais ayant vocation d'être mis en œuvre par vibration. La consistance du béton est estimée par l'étalement d'un cône (moule tronconique de 200 mm de haut, de diamètre 200 mm à sa base et 130 mm à sa partie supérieure) de béton démoulé sur une table à chocs. Ce cône de béton est soumis à son propre poids et à une série de secousses. Le moule tronconique placé au centre du plateau carré est rempli par 2 couches de béton, compacté par 10 coups de pilon. Après arasement le moule est retiré verticalement. Puis le plateau est soulevé de 40 mm jusqu'à la butée et relâché immédiatement 15 fois de suite en 15 secondes, le béton s'étale encore plus, on mesure le diamètre le plus grand ainsi que le diamètre qui lui est perpendiculaire. L'étalement est la moyenne de ces deux diamètres. Plus l'étalement est grand et plus le béton est réputé fluide.

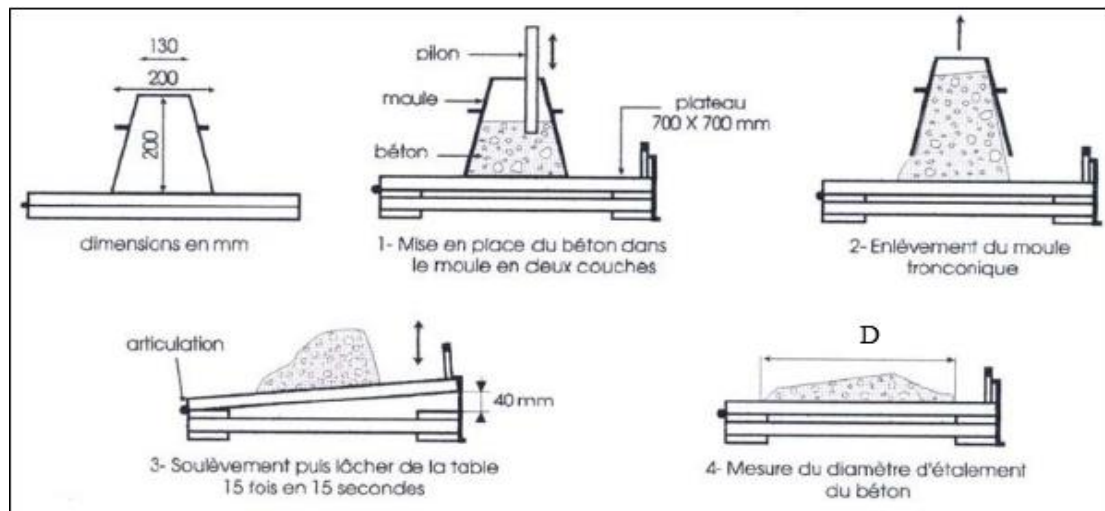


Figure I.14 : Schéma de principe du test d'étalement à la table à choc

I.6.3. Teneur en air (Air occlus)

La teneur en air du béton frais est généralement de 2 à 5 %, bien que des limites de 3 à 7 % soient couramment utilisées, selon le type de béton et l'application. Un excès d'air peut réduire la résistance mécanique, tandis qu'une teneur insuffisante, ou une mauvaise taille des bulles, peut compromettre la durabilité face au gel-dégel.

L'essai d'air occlus (ou air entraîné) dans le béton, réglementé par la norme NF EN 12350-7, est une méthode de contrôle en laboratoire pour déterminer la teneur en air d'un béton frais à l'aide d'un aéromètre à compressibilité.

À l'aide de la main écope, placer le béton dans le récipient de manière à éliminer autant d'air occlus que possible. Introduire le béton en trois couches d'épaisseurs approximativement égales. Serrer à refus le béton immédiatement après son introduction. La quantité de matériau utilisée dans la couche finale doit être suffisante pour remplir le récipient sans avoir à retirer du matériau en excès. Une petite quantité de béton supplémentaire peut être ajoutée si besoin et serrée ensuite afin de remplir le récipient, mais il convient d'éviter de retirer du matériau en excès. Il convient de nettoyer soigneusement les rebords du récipient et du couvercle et de s'assurer de la bonne étanchéité sous pression entre le couvercle et le récipient. Remplir d'eau l'espace au-dessus du béton et appliquer une pression d'air et mesurer la variation de volume.



Figure I.15 : Aéromètre à béton

I.7. Caractéristiques principales du béton durci

La résistance a été longtemps considérée comme la qualité essentielle, pour ne pas dire la seule, à rechercher pour un béton ; ouvrabilité et résistance sont à étudier de pair car elles sont étroitement dépendantes l'une de l'autre et d'autant plus qu'elles varient en sens inverse en fonction de certains facteurs essentiels de la composition du béton.

La résistance du béton dépend d'un grand nombre de paramètres : le type et le dosage des matériaux utilisés, le degré et la condition de réalisation etc.

I.7.1. Essais destructifs

- **La résistance en compression**

La résistance en compression à 28 jours est désignée par f_{c28} . Elle se mesure par compression axiale sur des éprouvettes cylindriques d'une hauteur double de leur diamètre ou cubiques (figure I.8). L'éprouvette le plus couramment employé est le cylindre de diamètre de 16 cm, hauteur de 32 cm. Elle varie suivant la taille des éprouvettes essayées. Plus celles-ci sont petites et plus les résistances sont élevées.

La résistance en compression s'obtient à l'aide de la formule suivante :

$$f_{cj} = \frac{F_{max}}{S}$$

Avec :

F_{max} : effort maximal obtenu jusqu'à rupture de l'éprouvette,

S : la section transversale de l'éprouvette.



Figure I.16 : Mesures de la résistance en compression d'un béton

- **La résistance en traction**

Le béton est un matériau travaillant bien en compression, mais on a parfois besoin de connaître la résistance en traction. La résistance en traction à 28 jours est désignée par f_{t28} . Plusieurs essais peuvent être réalisés :

- **Essai de traction directe**

Cet essai permet de connaître la résistance en traction du béton, tout comme pour l'essai en compression cette dernière est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture, mais l'essai est assez délicat à réaliser car il nécessite, après sciage des extrémités, le collage de têtes de traction parfaitement centrées, l'opération devant avoir lieu sans aucun effort de flexion parasite.

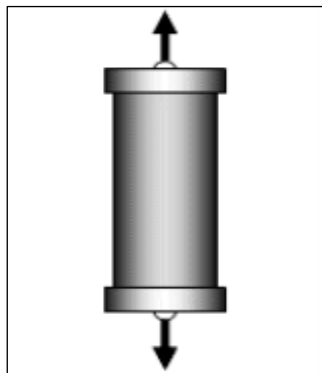


Figure I.17 : Schéma d'essai de traction directe

- Essai de traction par fendage (NF EN 12390-6)

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse figure I.10. Cet essai est souvent appelé "Essai Brésilien".

Si P est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du diamètre vertical, la résistance en traction sera :

$$f_{tj} = \frac{2F}{\pi DL}$$

Avec : D et L = diamètre et longueur du cylindre.



Figure I.18 : Essai de traction par fendage

- Essai de traction par flexion (NF EN 12390-5) :

L'essai de traction par flexion consiste à réaliser une flexion à trois ou quatre points afin de générer au sein de l'éprouvette des efforts de traction. Pour cela on utilise une éprouvette prismatique de section d et de portée l . Il faut placer l'éprouvette au sein de l'appareil de telle manière que les faces les plus planes soient en contact avec les rouleaux. La vitesse de chargement doit être constante et comprise entre : $\sigma = 0,04$ MPa/s et $0,06$ MPa/s.

La résistance en traction s'obtient à l'aide de la formule suivante dans le cadre d'une flexion en 4 points :

$$f_{tj} = \frac{Fl}{d_1 d_2^2}$$

Alors que dans le cas d'une flexion trois points elle est définie par :

$$f_{tj} = \frac{3}{2} \frac{Fl}{d_1 d_2^2}$$

La figure I.19 montre les deux géométries possibles pour l'essai traction par flexion, ainsi que les cotes à respecter.

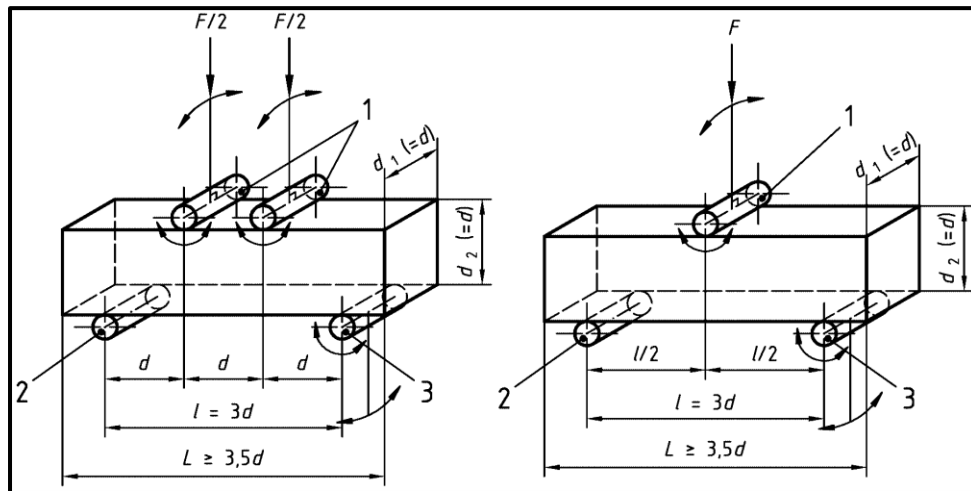


Figure I.19 : Schéma d'essai de traction par flexion normalisé

I.7.2. Essais non destructifs

• Essai au scléromètre

La méthode de dureté superficielle consiste essentiellement à une auscultation du béton par une manière standard, en utilisant une masse donnée activée par une certaine énergie puis mesurer ensuite le rebondissement. Cette méthode est connue sous le nom de scléromètre Schmidt. Cet essai est l'un des plus vieux essais non destructifs et il est encore très largement utilisé de nos jours. Il a été développé par Ernst Schmidt en 1948 et est connu sous le nom l'essai au marteau Schmidt ou essai au scléromètre. Le scléromètre (Figure I.20) est resté le seul instrument connu qui utilise le principe de rebondissement pour les essais sur le béton.



Figure I.20: Scléromètre

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.

Les mesures doivent être effectuées sur des surfaces nettes ne présentant pas de nids de gravier, des écaillages, de texture grossière, de porosité élevée ou de armatures affleurantes. La préparation de la surface consiste à éliminer tout enduit ou peinture adhérant où poncer si cette surface est constituée d'une couche superficielle friable. Toute trace d'eau sur la surface doit être essuyée.

La surface de mesure doit être divisée en zones de 400 cm² au moins, et structurée en une grille de points de mesure ayant pour espacement $d = 30 \div 50$ mm. Les points de mesures extrêmes doivent être au moins à 30 mm des bords de la surface testée.



Figure I.21: Grille de mesure sur poteau

Effectuer au moins 10 mesures successives dans la même zone. La surface de cette zone est équivalente à celle d'un carré d'environ 25 cm de côté. Au cours de ces mesures, il convient de ne pas effectuer l'essai à moins de 3 à 4 cm des bords de l'élément testé.

On utilise alors une courbe figurant sur l'appareil fourni par le fabricant pour déterminer la résistance en compression du béton testée.

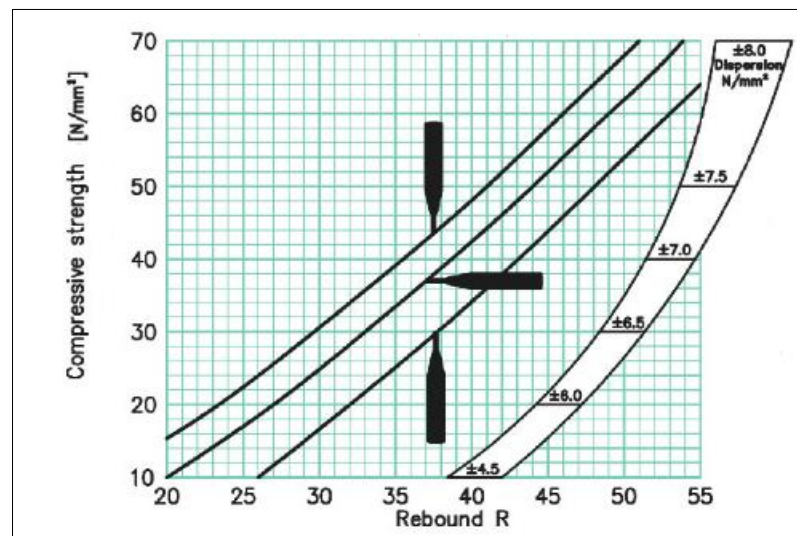


Figure I.22: courbe indice sclérométrique en fonction de résistance en compression du béton

• Essai d'auscultation sonique

Connu sous le nom d'essai aux ultrasons. Les ultrasons sont des ondes sonores de fréquence supérieure à 20 kHz, correspondant à des sons inaudibles pour l'homme. L'appareil mesure le temps nécessaire à l'onde pour atteindre le récepteur. Connaissant la distance de l'émetteur au récepteur, notée L et le temps de propagation des ondes ultrasonores dans le béton, noté T en μs , il est possible de calculer la vitesse ultrasonore, notée V en m/s, par la relation suivante : $V = L / T$

Les normes ASTM C 97-83 et BS 1881 décrivent la méthode d'essai. En Algérie, la norme NA/5027 spécifie la méthodologie de la mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton. L'essai ultrasonique peut être effectué sur des éprouvettes de laboratoires, comme sur des ouvrages en béton terminés.

Cette méthode permet de déterminer la qualité du béton et son hétérogénéité telle que la présence et étendue des défauts, des vides ou des micro-fissurations. Mais, il est impossible d'ausculter sur un site très perturbé ou présentant un état de surface fortement altéré.



Figure I.23: Essai ultrasonique sur éprouvette cubique et sur poteau

I.8. Notions sur les nouveaux bétons et leurs applications

I.8.1. Bétons à hautes performances (BHP)

Les bétons à hautes performances ont vu le jour au début des années 1960 dans la région de Chicago (USA). Ils ont été utilisés en quantités non négligeables dans plusieurs structures majeures.

Un béton à hautes performances (BHP) est un béton caractérisé par une très forte résistance à la compression, puisque celle-ci est supérieure à 50 MPa à 28 jours, et un rapport pondéral E/C inférieur à 0,40. Le béton hautes performances est apparu à la fin des années 1980. Leurs principales propriétés sont :

- ❖ Sur béton frais :
 - Une maniabilité accrue.
- ❖ Sur béton durci:
 - Une augmentation des caractéristiques mécaniques (compression, traction, module d'élasticité) tant aux jeunes âges qu'à court terme ;
 - Une plus grande imperméabilité à l'air et à l'eau, due à une compacité plus élevée ;
 - Une plus grande résistance aux agents agressifs d'où une meilleure durabilité ;
 - Une plus grande résistance à l'abrasion ;
 - Une meilleure tenue aux cycles de gel/dégel.

Ces propriétés ne peuvent être obtenues que grâce à plusieurs dispositions simultanées concernant:

- Les granulats qui doivent être de très bonne qualité, la résistance du béton pouvant être limitée par celle des granulats eux-mêmes ;

- L'emploi d'adjuvants spécifiques, notamment des superfluidifiants réducteurs d'eau ainsi que des fumées de silice, ces dernières s'avérant indispensables dès que la résistance recherchée est supérieure à 80 MPa;
- L'emploi de ciments de classes élevées (52,5 MPa) à des dosages généralement compris entre 400 et 450 kg/m³.

Le béton haute performance est utilisé pour les ouvrages nécessitant une résistance élevée :

- Les travaux souterrains et les tunnels,
- Les ouvrages d'art,
- Les travaux en milieu marin,
- Les éléments préfabriqués,
- Les ouvrages exceptionnels tels que les centrales nucléaires ou les ponts.

Exemples de compositions de BHP utilisées pour la réalisation de pont :

Tableau I.17 : Composition utilisé pour fabrication du pont de Joigny en France.

PONT DE JOIGNY (Sans fumée de silice)	
Ciment CEM1 52.5	450 kg
Granulat (6/20)	1027kg
Sable (0/4)	648 kg
Sablon	105 kg
Eau	160 litres
Super plastifiant	11,25 kg
Retardateur	4.5 kg

A cote des bétons a hautes ou même très hautes résistances, sont apparus depuis quelques années, les bétons à ultra hautes performances « BUHP », mis au point par différents fabricants de ciments et entreprises, dont les compositions comportent un fort dosage en liant, l'utilisation de fines réactives, l'incorporation de granulats broyés dont la granulométrie est millimétrique, l'emploi systématique de fibres et enfin de l'adjonction d'adjuvants spécifiques haut réducteur d'eau,

Ces bétons, qui modifient en les améliorant les conditions de travail sur chantier du fait que leur très grande fluidité autorise une mise en place, généralement, sans vibration, permettent dans la plupart des cas la suppression des armatures passives en raison des fibres qu'ils comportent. Ils se distinguent par des résistances à la compression supérieures à 150 MPa voire 250 MPa, c'est-à-dire environ 6 fois supérieures à celles des bétons classiques, ainsi que des caractéristiques physiques très améliorées. Leurs caractéristiques, essentiellement utilisées en

génie civil, en font un matériau dont le but n'est d'ailleurs pas de se substituer aux bétons classiques, mais de permettre non seulement la réalisation d'ouvrages ou d'éléments d'ouvrages qu'il était impensable d'envisager auparavant, mais également d'éléments architectoniques, tels par exemple des lames minces de pare-soleil, des panneaux de façade ... , ainsi que du mobilier urbain ou autre, allant de la chaise à la baignoire, en béton colore au moyen de pigments, qui ne pouvaient être fabriqués qu'avec des matériaux traditionnels tels les métaux, le bois ou les plastiques.

I.8.2. Béton autoplaçant (BAP)

Le premier prototype d'un tel béton fut développé en 1988 par le professeur OKAMURA de l'université de Köchi au Japon. Sa première utilisation pratique intervient deux années plus tard pour la construction d'un pont. Cette découverte en matière technologique du béton suscita un énorme intérêt au niveau mondial. A la fin des années 90 on vit apparaître les premières applications en Suède, en France, aux Pays bas et en Suisse. Depuis son utilisation ne cesse de croître.

Ces bétons dont la fluidité à l'état frais permet leur mise en place sans vibration, permettent outre une réduction considérable des nuisances sonores du chantier, rendant possible, en ville, la poursuite de travail nocturne à l'occasion de remiser rapide d'ouvrages dégradés, une grande rapidité et facilite de mise en œuvre ainsi que la possibilité de remplissage aisé de zones de coffrages difficilement accessibles.

La grande fluidité de ces bétons a pour finalité la possibilité de pouvoir remplir les coffrages sous le seul effet de leur poids, c'est-à-dire sans apport d'une énergie de compactage extérieure type vibration, par ailleurs ils ne doivent pas présenter de risque de ségrégation durant leur transport et leur mise en œuvre et conserver une excellente homogénéité.



Figure I.24: Le béton autoplaçant

Pour présenter ces propriétés, les BAP dont comportent toujours un fort volume de pâte, (mélange ciment, addition minérale eau, adjuvants), les proportions de sable et de gravillons dont le $D_{\max}$ est compris entre 10 et 20 mm, sont sensiblement identiques afin d'éviter que les gros éléments n'entravent le remplissage des moules et gênent l'enrobage des armatures.

La composition de la pâte doit éviter tout risque de ressuage et de ségrégation d'où la nécessité de maintenir un rapport E/C ne dépassant pratiquement pas 0,50. Ces propriétés, obtenues grâce à des adjuvants superplastifiants, et quelques fois l'adjonction d'agents de viscosité épaississant la pâte (type dérivés cellulosiques ou suspensions colloïdales), doivent être vérifiées par des essais permettant de s'assurer de la fluidité, de la faculté de remplissage des coffrages et de la non ségrégabilité du mélange.

La fluidité se vérifie par un essai d'étalement, réalisé avec un cône d'Abrams rempli de manière continue, sans tassement, jusqu'à l'arase supérieure du moule et par mesure de l'étalement du béton sur une plaque parfaitement plane, après enlèvement du cône, cet étalement devant être compris entre 550 et 850 mm.



Figure I.25: Essai d'étalement de béton autoplaçant

L'essai à la boîte en L (L-Box) permet d'évaluer l'aptitude au remplissage du BAP au travers des zones confinées, y compris des espaces entre les barres d'armature et autres inserts, sans aucune ségrégation et aucun blocage.



Figure I.26: Essai la boîte en L de béton autoplaçant

Le béton autoplaçant est généralement utilisé dans la réalisation de plusieurs constructions au sol avec une très forte proportion d'armatures. Il intervient donc dans la fabrication :

- Des éléments de fondation superficielle;
- Des différentes dalles;
- Des radiers;
- Des planchers;
- Des éléments de l'ossature des bâtiments tels que les poteaux, les poutres, les voiles, les chaînages, les raidisseurs, etc.

I.8.3. Bétons de Poudres Réactives (BPR)

Les BPR sont des micros bétons armés de micro armatures, dans lesquels la taille de tous les constituants est divisée par 100 par rapport à un béton ordinaire. Pour obtenir des performances exceptionnelles, la porosité des BPR est réduite à l'extrême ; ils contiennent un sable très fin (max. 600 μm), de forts dosages en ciment et fumée de silice, du quartz broyé, une teneur en eau très faible et un superplastifiant. Pour augmenter encore leurs performances, certains BPR subissent un traitement thermique : au-dessus de 90°C, le quartz broyé réagit alors par réaction pouzzolanique ; au-dessus de 200 °C, l'espacement des feuilletts de C-S-H (porosité nanométrique) diminue et on observe une augmentation de la cristallinité de ces hydrates. On peut encore presser les BPR traités thermiquement avant et pendant la prise pour augmenter leur compacité.

Alors la conception des BPR s'est faite en se basant sur les règles suivantes :

- Amélioration de l'homogénéité par suppression des gros granulats ;
- Amélioration de la compacité par optimisation du mélange granulaire et optionnellement par pressage avant et pendant la prise ;
- Amélioration de la microstructure par traitement thermique après la prise ;
- Amélioration de la ductilité par l'emploi de microfibres métalliques ;
- Fabrication et mise en place aussi proche que possible des pratiques existantes.

Les nombreuses qualités des BFUP, permettent d'envisager une multitude d'applications aussi bien en structure de génie civil (poutres précontraintes par pré ou post tension, dalles, passerelles piétonnes , ouvrages offshore, couvertures de grande portée, silos, réservoirs, cuves de rétention, canalisations , conteneurs, murs de soutènement, structures triangulées, voussoirs de tunnels ...) qu'en bâtiment (poutres, poteaux élancés, planchers de grande portée ...) ainsi que pour la création de pièces esthétiques .elles offrent des applications

innovantes , en particulier pour des structures très minces, perforées ou ajourées jusque-là inaccessibles au matériau béton.

I.8.4. Les bétons fibrés

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres de nature, de dimensions et de géométrie variées.

Dans un béton fibré, les fibres sont incorporées au moment du malaxage. Les fibres sont courtes et dispersées dans toute la masse du béton, contrairement aux armatures passives classiques du béton armé (essentiellement barres et treillis soudés) disposées de façon privilégiée dans les zones où règnent des contraintes de traction et orientées en général selon la direction des contraintes principales de traction. La répartition des fibres de petite section dans l'ensemble de la masse du béton leur permet de s'opposer de façon quasi-isotrope, au sein même de la matrice cimentaire, à la propagation des microfissures diffuses, retardant ainsi, ou même empêchant, dans certaines conditions, l'apparition de fissures d'échelle macroscopique.



Figure I.27: Bétons fibrés durcis

Les bétons fibrés offrent des propriétés et des performances supérieures dans les domaines suivants:

- Cohésion du béton frais;
- Conséquences du retrait (fissuration);
- Ductilité en traction (déformabilité avant rupture);
- Résistance à l'abrasion, à l'usure en général;
- Résistance aux chocs;
- Résistance à la fatigue;
- Résistance à la traction par flexion;

- Résistance mécanique au jeune âge;
- Bon comportement au feu.

On distingue usuellement quatre familles de fibres :

- Les fibres métalliques (acier, fonte amorphe, inox);
- Les fibres organiques (acrylique, aramide, kevlar, polyamide, polypropylène);
- Les fibres minérales (basalte, carbone, mica, verre).
- Les fibres végétales (chanvre, jute, palmier dattier)

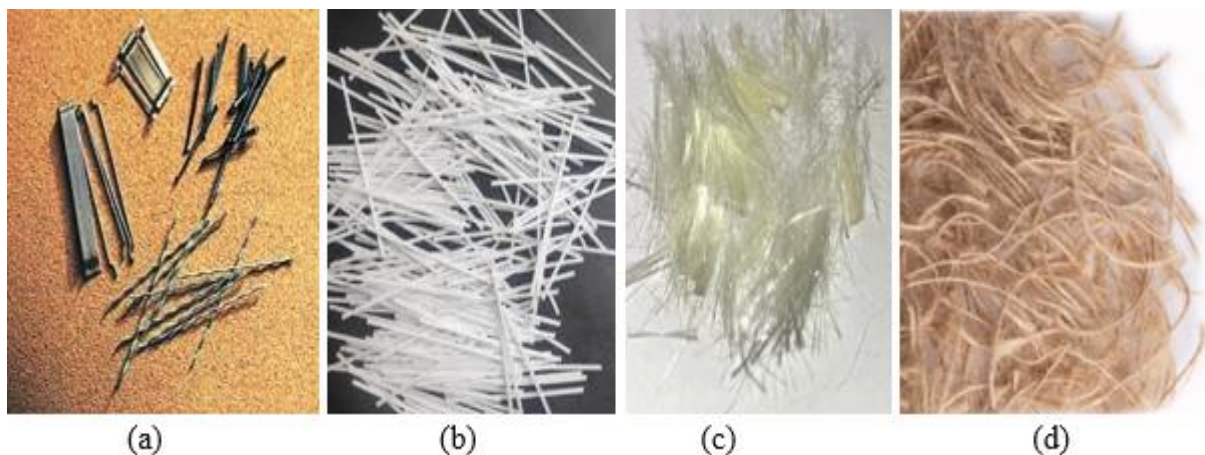


Figure I.28: Différents types de fibres (a) métallique, (b) polypropylène, (c) verre et (d) jute

Chaque type présente des caractéristiques propres :

- De dimensions;
- De formes (lisse, crantée, ondulée, à crochets, etc.);
- De résistance mécanique à la traction;
- De module d'élasticité.

Les utilisations privilégiées des bétons fibrés sont selon la nature des fibres:

❖ Bétons de fibres métalliques

- Sols industriels (dallages);
- Composants structurels préfabriqués;
- Bétons projetés;
- Pieux de fondation;
- Voussoirs de tunnels.

❖ Bétons de fibres polypropylène

- Dallages et aménagements urbains;
- Coques minces;

- Pièces à démoulage rapide: précision des arêtes, des motifs en parement;
- Bétons ou mortiers projetés de réparation;
- Bétons soumis à des risques potentiels d'élévation de température accidentelle (feu).

❖ Bétons de fibres de verre

- Éléments très minces (10 à 15 mm) pouvant atteindre de grandes dimensions (plusieurs mètres): panneaux de façade, bardages, coffrets, habillages...
- Caniveaux;
- Enduits monocouches.

I.8.5. Béton compacté au rouleau (BCR)

Le béton compacté au rouleau est un béton résistant et durable à usage routier. Ce béton « sec » est historiquement utilisé en assise routière, couche de fondation pour les plateformes industrielles. Avec une formulation adaptée et des techniques de mises en œuvre spécifiques, il peut supporter une circulation lourde ou dense directement sur sa surface très rapidement après sa mise en œuvre. Facile à appliquer avec un atelier routier classique, il permet une mise en œuvre rapide. Le BCR nécessite par ailleurs peu d'entretien.

Le BCR est constitué des mêmes ingrédients (granulats, ciment, eau, adjuvants) qu'un béton traditionnel, mais il diffère par sa composition. Il contient moins de pâte (eau + ciment) que les bétons classiques "plastiques" – mais son ratio E/C n'est pas inférieur. De ce fait, c'est un matériau de consistance « terre humide » à affaissement nul, à forte densité granulaire et avec une faible teneur en fines.

Ces bétons peuvent être fabriqués en centrale continue (matériaux traités au liants hydrauliques) ou en centrale à béton prêt à l'emploi. Les bétons compactés au rouleau sont des bétons à faible rapport E/C qui nécessitent des énergies de malaxage élevées. Ces caractéristiques peuvent entraîner la nécessité de diminuer le volume utile du malaxeur en centrale discontinue.

L'application routière demande généralement un débit de production important (fonction de la largeur et de l'épaisseur appliquées) et une alimentation continue pour garantir un uni longitudinal optimal.

Le béton compacté routier est mis en place, en une ou deux couches superposées, à l'aide d'un atelier routier classique - camions-bennes, finisseur ou niveleuse, compacteur à pneu ou compacteur double bille.

La séquence de mise en place d'un revêtement en béton compacté routier est la suivante : production et transport du BCR, régalinge, nivellement, compactage, protection par un produit anti-dessiccation, puis exécution des joints de retrait.

Les avantages du béton compacté au rouleau sont :

- Pour le concepteur de l'ouvrage le béton compacté au rouleau est polyvalent, permettant une large gamme d'applications. Sa facilité de mise en œuvre et sa résistance permettent de respecter les contraintes de temps et de budget des projets. Son dosage optimisé en liant permet également d'abaisser l'empreinte carbone des ouvrages de béton à plat.

Pour le maître d'ouvrage ou l'exploitant

- Le béton compacté au rouleau offre une durabilité et une résistance élevées, ce qui se traduit par des coûts d'entretien réduits. De plus, les chaussées en BCR peuvent être mises en service rapidement, minimisant les perturbations du trafic. La teinte naturellement claire et l'albédo élevé du matériau améliore la visibilité nocturne tout en permettant de lutter contre les îlots de chaleur urbains.

- Pour le constructeur/applicateur la mise en œuvre du béton compacté au rouleau nécessite l'utilisation de matériels similaires à ceux utilisés pour la construction de chaussées souples ou semi-rigides. Ses exigences en main-d'œuvre sont réduites, ce qui peut conduire à des économies significatives.

CHAPITRE II : Produits céramiques

II.1. Généralités	1
II.2 Classification des produits céramiques	1
II.2.1 Les céramiques traditionnelles	1
II.2.2 Les céramiques techniques	4
II.3 Procédé de fabrication des produits céramiques traditionnelles	5
II.3.1 Processus de fabrication des briques et des tuiles	5
II.3.2 Processus de fabrication des revêtement des murs et des sols	10
II.3.2.1 Entreposage des matières premières	11
II.3.2.2 Contrôle des matières premières	11
II.3.2.3 La préparation des produits semi finis	11
II.3.2.4 Préparation de la barbotine et Granulat	12
II.3.2.5 Préparation des Fritte, émaux et engobes	16
II.3.2.6 Préparation de la pâte sérigraphique	18
II.3.2.7 La chaine de production	20
II.3.2.8. Triage et emballage	26
II.3.2.9 Stockage	27
II.3.3 Processus de fabrication des appareils sanitaires	27
II.3.3.1 Matières premières	27
II.3.3.2 Préparation des matières premières	27
II.3.3.3 Façonnage	28
II.3.3.4 Séchage et émaillage	29
II.3.3.5 Cuisson	30
II.3.3.6 Traitements ultérieurs	30

II.1. Généralités

Le terme céramique a pour origine le mot grec "keramikos", qui fait référence à la poterie et à la « terre cuite ». Les céramiques constituent une gamme très étendue de matériaux non métalliques. Elles sont toutes élaborées par des procédés thermiques et incluent de nombreux silicates et oxydes ; beaucoup ont pour origine les argiles naturelles analogues à celles qui servent à la fabrication de tuiles et de briques pour le bâtiment, argiles qui sont durcies par chauffage. Les constituants principaux sont les argiles et les aluminosilicates provenant des feldspaths. Aujourd'hui la gamme de matières premières est beaucoup plus étendue et elle aboutit, via la poterie et la céramique d'art, à des produits industriels très élaborés.

La structure moléculaire des céramiques est parmi les plus complexes de toutes celles du monde minéral. Les liaisons entre les atomes, de type covalent ou ionique, sont très fortes. En conséquence, du point de vue de la dureté, de la résistance thermique ou mécanique, les céramiques montrent une nette supériorité par rapport à la plupart des matériaux métalliques.

Les céramiques possèdent trois avantages importants par rapport à d'autres matériaux concurrents : les matières premières utilisées pour leur fabrication sont relativement disponibles et peu onéreuses, elles sont peu denses et résistent à des températures très élevées, là où la plupart des métaux perdent leur résistance, enfin elles ont des propriétés optiques, électriques, chimiques, magnétiques, thermiques, etc. qui les rendent irremplaçables dans de nombreuses industries.

En revanche, elles présentent un défaut très important, qui est leur plus ou moins grande fragilité ; cependant celle-ci est due avant tout à des défauts de structure ou à des impuretés dans les réseaux moléculaires et on les rend plus résistantes en améliorant la pureté des matériaux de base et en maîtrisant mieux les processus de fabrication.

En ce qui concerne les propriétés mécaniques, les céramiques sont caractérisées par l'absence de plasticité (elles ont un comportement fragile), une dureté et une rigidité élevées, une faible résistance à la traction et une bonne résistance à la compression.

II.2 Classification des produits céramiques

On distingue deux grandes catégories d'activités industrielles regroupant deux familles de matériaux céramiques :

II.2.1 Les céramiques traditionnelles

Sont en général des silicates ou des aluminosilicates issus de matière première naturelle à base d'argile (kaolin), de quartz (sable) et de feldspath. Cette catégorie de céramique comprend entre autres le verre (vitrage, pyrex) basés sur la silice (SiO_2) et les céramiques

vitifiées (porcelaine, faïence) constituées principalement de phases cristallines sous forme de silicate enrobées dans une matrice essentiellement vitreuse. Les céramiques "traditionnelles" sont présentes dans de nombreux secteurs d'activités telles que :

- **La poterie**



Figure II.1 : Poterie artisanale

- **Éléments pour murs et cloisons**



Figure II.2 : Briques et Bloc perforée pour murs et cloisons

- **Éléments pour planchers**



Figure II.3 : hourdis brique

- **Éléments pour couverture**



Figure II.4 : Les différents types de tuiles pour toiture

- **Élément pour bardages**



Figure II.5 : Bardage en briques apparentes

Ces éléments ont su conserver toutes leurs qualités même fabriquées avec des moyens empiriques, parmi leurs avantages on peut citer

- Résistance et durabilité
- Incombustibilité
- Isolation thermique et acoustique
- Imperméabilité
- Légèreté du matériau

- **Éléments pour revêtements de sols et de murs**



Figure II.6 : Revêtements de sols et de murs

- **Éléments pour sanitaires**



Figure II.7 : Equipements Sanitaires

II.2.2 Les céramiques techniques

Elles sont obtenues le plus souvent par frittage (traitement thermomécanique qui, dans un premier temps, provoque la cohésion de granulés de poudre avec un « aggloméré » préparé

par compression à froid, cette ébauche étant ensuite chauffée dans des fours spéciaux) ou électrofusion (les oxydes sont coulés directement dans un moule).

Les céramiques techniques sont présentes dans des secteurs nouveaux et en pleine expansion comme :

- électronique
- aérospatiale
- automobile
- biomédical.

Leurs composés sont essentiellement non silicatés et les matières premières employées sont synthétiques comme :

- L'alumine Al_2O_3
- Le nitrure de silicium Si_3N_4
- La zircone ZrO_2
- Le nitrure d'aluminium AlN
- L'oxyde de magnésium MgO
- Le nitrure de bore BN
- Le carbure de silicium SiC

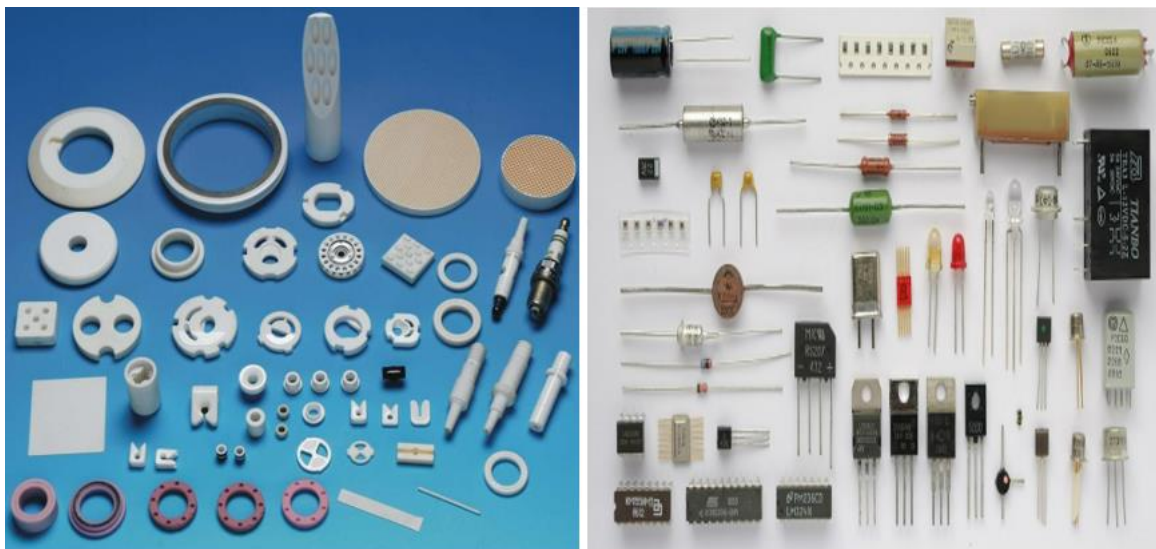


Figure II.8 : Quelques exemples des céramiques techniques

II.3 Procédé de fabrication des produits céramiques traditionnelles

II.3.1 Processus de fabrication des briques et des tuiles

La fabrication comprend plusieurs stades dont les principaux sont :

- l'extraction des matières premières ;
- la préparation ;
- le façonnage ;
- le séchage ;
- la cuisson.

• Matière première

Les matériaux essentiels sont :

- L'argile : est la matière première de base pour la fabrication des briques et des tuiles. Cette argile doit être ni trop maigre ni trop grasse. Elle doit sécher facilement avec un retrait limité et doit aboutir à une cuisson sans problèmes.

Elle peut se faire de différentes façons, à la pelle mécanique, à l'excavateur, à l'aide de poclain, pelles, chargeuses, bulldozer etc. Elle est réalisée couche par couche selon des règles légales régies, par le code des mines, soucieux de préserver l'environnement. En fin de vie, les terrains sont réaménagés. Après extraction, la terre est acheminée vers l'usine par camions jusqu'à un lieu de "stockage" afin de la faire sécher. Cette première phase permet aux fabricants de pratiquer ainsi une première homogénéisation des différentes couches. L'homogénéisation sera achevée et complétée lors de l'étape de la préparation. D'autres éléments peuvent aussi être ajoutés à la matière première pour améliorer son comportement à la fabrication ou ses performances : par exemple, du sable ou d'autres adjuvants.



Figure II.8 : Extraction des matières premières

- Les dégraissants : la pâte constituée d'argile est déformable pour permettre sa manipulation. Le séchage et la cuisson s'accompagnerait d'un retrait qui rendrait difficile la maîtrise de la forme et des dimensions du produit fini. Pour limiter ces effets indésirables, des produits non plastiques et à même de former un squelette rigide doivent être présents dans le mélange minéral initial. Ces constituants, appelés dégraissants, se présentent sous la forme de grains gros ($> 10 \mu\text{m}$). Les plus employés sont : le sable, le calcaire...

- Les fondants : le frittage des mélanges minéraux, fait intervenir l'écoulement d'un flux visqueux riche en silice. Pour que celui-ci ait une influence sur l'évolution de la microstructure (consolidation et densification), Afin d'abaisser la température de frittage, sans abaisser le point de fusion, on introduit des fondants, Ces derniers se comportent comme des dégraissants pendant la mise en forme et comme des fondants pendant le frittage. Le plus employé est : le Feldspath

Les différents types d'argiles sont alors dosés et mélangés avec la quantité adéquate de sable qui joue le rôle de dégraissant particulièrement dans le cas de séchage rapide à cycle assez réduit. Pour garantir une qualité constante et permanente du produit, le mélange des différents types d'argiles et de dégraissant doit rester sous contrôle continu et minutieux.

L'argile est par la suite entreposée dans une aire de stockage sous forme de tas assurant un mélange homogène et la continuité de l'approvisionnement lors des intempéries (accès difficile aux carrières dû au mauvais temps). L'argile doit reposer en stock pendant au moins deux mois avant de passer au stade de la préparation.

• Préparation

Cette phase comprend deux étapes :

- Le broyage et le malaxage : l'argile provenant de l'aire de stockage est déversée dans des distributeurs (distributeurs de départ). Par l'intermédiaire de tapis, le mélange est acheminé des distributeurs doseurs vers le désagréateur (brise motte) pour subir un premier broyage, ensuite vers le laminoir primaire qui à son tour le réduit en fines paillettes. Il passe par la suite dans le mouilleur mélangeur pour être humidifié et homogénéisé avant d'être stocké dans l'excavateur ou provisoirement dans les trémies.

Ces opérations servent à obtenir une masse argileuse homogène et plastique. En outre, cette opération a également pour but de réduire les inclusions solides tel que les inclusions de chaux qui peuvent éventuellement être présentes dans l'argile et qui risquent d'affecter négativement l'aspect du produit.

Maturation : l'argile contient des débris organiques qui peuvent altérer la qualité de la brique. Ces débris ne peuvent être éliminés que par l'action bactériologique. A cette fin, l'argile est entreposée pendant au moins deux semaines dans l'excavateur, un silo humide et sombre favorisant le développement de ces bactéries.

• Façonnage

- Laminage : toujours par l'intermédiaire de tapis roulants, l'argile provenant de l'excavateur, passe par un mouilleur mélangeur puis par la trémie de repos avant d'aboutir au laminoir finisseur pour subir un broyage et une friction supplémentaires. L'argile est ainsi réduite en fines paillettes de 0.5 mm d'épaisseur.
- Malaxage : du laminoir finisseur, l'argile est acheminée vers le malaxeur alimentateur de l'étireuse pour ajuster la teneur en eau et garantir une bonne plasticité de l'argile.
- L'extrusion : du malaxeur, l'argile passe dans l'étireuse pour l'extrusion sous vide atteignant au moins 90% et une pression de 22 bars. Elle est pressée à travers la filière de l'extrudeuse pour former un long boudin. La filière définit l'aspect de la brique ou tuile et détermine ainsi la gamme du produit à fabriquer.
- Découpage : le boudin étiré passe sous un coupeur qui détermine les pièces dans leur dimension quasi finale à l'aide d'un fil d'acier. Les briques ou les tuiles sont alors acheminées automatiquement et placées sur les clefs de balancelles pour accéder au séchoir et subir le cycle de séchage.

• Séchage

Les produits sont façonnés avec une teneur en eau de 15 à 30 % (chiffres exprimés en % par rapport au poids sec). Il est nécessaire, avant de les soumettre à la cuisson, d'éliminer la plus grande partie de cette eau : c'est l'opération de séchage. Il s'agit d'une phase délicate et importante de la fabrication qui doit être menée judicieusement si l'on veut obtenir des produits de qualité

La difficulté majeure rencontrée lors du séchage est la contraction que subissent les produits, qui peut entraîner des déformations voire des fissurations. Pour ne pas déformer le produit, il est indispensable d'opérer lentement et progressivement. Ainsi, le début du séchage est réalisé à l'aide d'air humide et basse température ; la fin du séchage présentant moins de risques est réalisée à l'aide d'air sec et chaud.

Dans l'industrie céramique, il est nécessaire d'optimiser le séchage en termes de vitesse, de rendement thermique et de réduction des déchets. A l'exception des procédés de séchage lents

et contrôlés, il faut maintenir un contrôle strict des vitesses de chauffage, de la circulation de l'air, de la température et de l'humidité

Le procédé de séchage emploie différents types de séchoirs :

- Séchoirs à plancher chauffant pour un séchage lent et doux d'articles céramiques complexes grand format comme les appareils sanitaires ou certains produits réfractaires. Certaines briques de forme spéciale peuvent également être séchées de cette manière
- Séchoirs tunnel (continus) pour tout produit céramique tels que briques, tuiles, on introduit de l'air à haute température dans le tunnel par l'extrémité de sortie, cet air étant amené à s'écouler vers l'extrémité d'entrée grâce à un ou plusieurs ventilateurs

• Cuisson

La cuisson est un processus clé de la fabrication des produits céramiques, car c'est d'elle que vont dépendre un certain nombre de propriétés importantes du produit fini, entre autres la résistance mécanique, la résistance à l'abrasion, la stabilité dimensionnelle, la résistance à l'eau et aux produits chimiques, et la tenue au feu.

La cuisson se fait en trois phases :

- le préchauffage (montée progressive en température) : lorsque des produits céramiques à base d'argile cuisent dans un four, l'humidité résiduelle éventuelle est évacuée à des températures comprises entre 100 et 200 °C. Si des matières organiques et des pyrites de fer sont présentes, une oxydation se produit à des températures comprises entre environ 300 et 500 °C. L'eau enfermée à l'intérieur de la structure d'un minéral argileux (eau cristalline) se libère généralement à des températures comprises entre 500 et 650 °C.
- la cuisson proprement dite (entre 900°C et 1200°C selon les matières premières et les produits) : en ce qui concerne le développement des propriétés céramiques, les principales modifications sont la décomposition de la structure réticulée des minéraux argileux d'origine, suivie de la formation de nouveaux composés cristallins et de phases vitreuses. La température à laquelle se produit la vitrification (formation de verre) varie selon la structure minéralogique de l'argile. Cette vitrification commence généralement à environ 900 °C et se termine à environ 1050 °C (pour de nombreuses argiles de briqueterie).
- le refroidissement : on diminue ensuite progressivement la température jusqu'au refroidissement complet. Cette opération doit s'effectuer de façon très contrôlée pour éviter tout risque de fissuration.

En sortant du four, comme après chaque étape du procédé de fabrication (préparation du mélange, façonnage, séchage), les produits sont contrôlés. Le cas échéant, les produits refusés sont

recyclés soit directement dans le mélange de fabrication si l'imperfection est détectée avant cuisson, soit concassé pour être réintroduit comme additif dans le mélange ou servir de remblai.

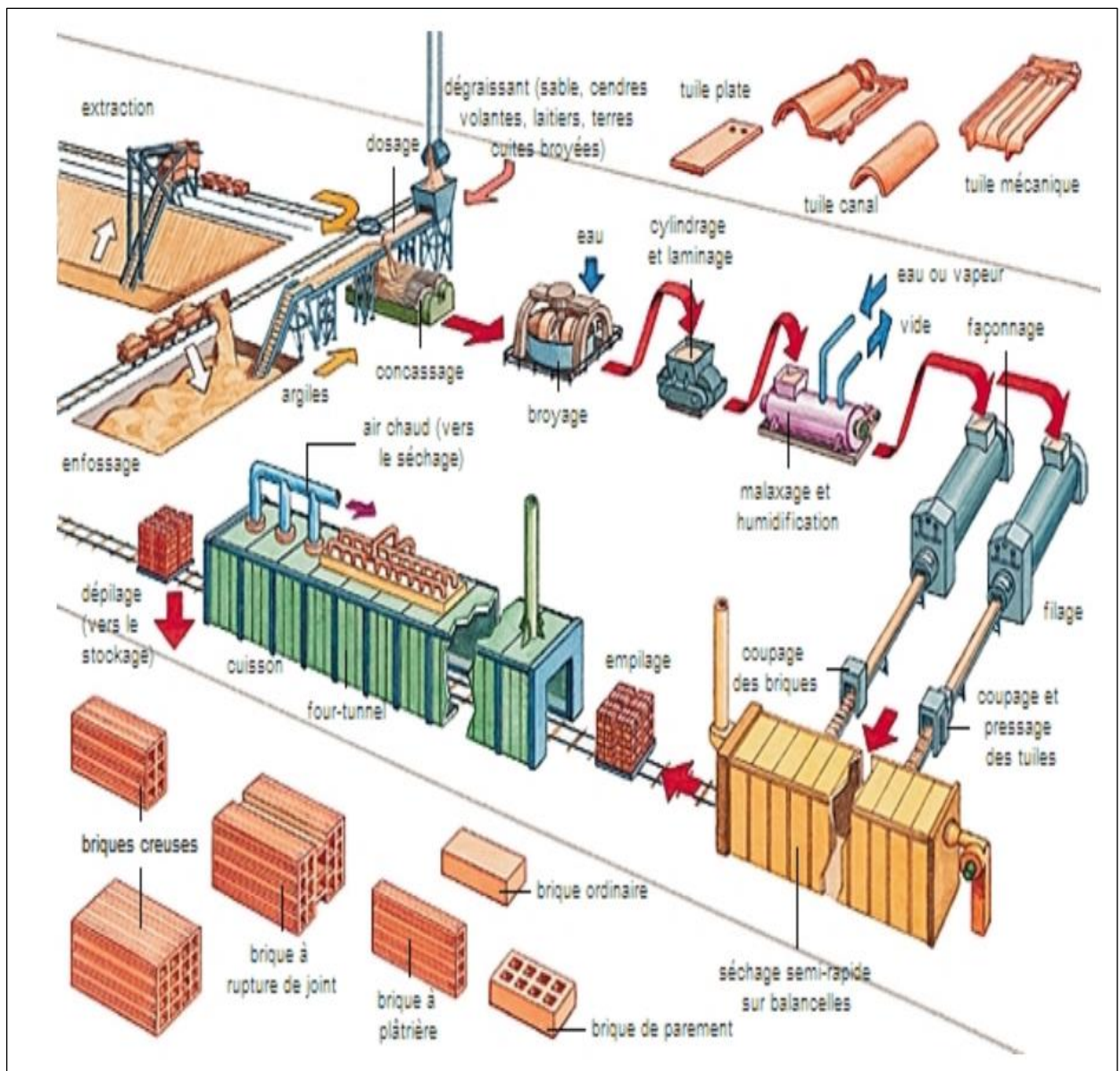


Figure II.9 : Schéma de processus de fabrication des briques et des tuiles

II.3.2 Processus de fabrication des de revêtement des murs et des sols

Les carreaux céramiques pour revêtement mural et des sols sont des produits céramiques qu'on les rencontre couramment sous forme de plaques minces utilisées pour couvrir les murs et sols, ils sont habituellement façonnés par pression des poudres céramiques à la température ambiante, après quoi ils sont séchés et cuits afin de garder leur forme de manière permanente. Le processus de production de revêtement mural et des sols fait appel aux différents types d'équipements industriels et à toute une gamme de matières premières pour donner des carreaux pouvant revêtir diverses formes, tailles et couleurs, ainsi que les sources énergétiques utilisées

pour accomplir des transformations à ces derniers et qui sont principalement le gaz naturel et l'électricité. En général, les étapes fondamentales pour obtenir des carreaux céramiques pour revêtement mural et des sols sont : l'entreposage et la préparation des matières premières, le façonnage (pressage), le séchage et cuisson des carreaux crus, le traitement des surfaces (par l'émaillage), la cuisson des biscuits émaillés, le triage et l'emballage.

II.3.2.1 Entreposage des matières premières

Les matières premières passent par plusieurs étapes avant d'arriver au produit fini, l'enchaînement de ces opérations nécessite une cohésion parfaite et régulier.

- Les matières premières destinées à la préparation de la barbotine sont : Les Argiles E1, E2 (Argile jaune), l'Argiles bleu E3, Feldspath, Calcaire, sable et de la Chamotte (biscuits recyclés) et le rebut (carreau cru). Elles sont stockées dans des zones respectives séparées par des cloisons et disposées selon le rapprochement de leurs propriétés :

Les matières plastique : sont les Argiles E1, E2 (Argile jaune), l'Argiles bleu E3, exploitées de lieu même de l'unité, contient différent minerais qui apportent la fusibilité et le kaolin (Al_2O_3 , $2SiO_2$, $2H_2O$).

Les matières dégraissantes : sont le sable et la chamotte destinées à diminuer la plasticité et le retrait et augmenter la porosité.

Les matières fondantes : sont le feldspath et le calcaire pour le rôle de la diminution la température de fusion afin de remédier à la porosité.

- Les matières premières destinés à la préparation des frites et émaux sont : quartz (SiO_2), fondant (borax penta et l'acide borique), feldspath potassique (Al_2O_3 , K_2O , et SiO_2), craie (CaO), oxyde de zinc (ZnO) pour la brillance, zircon (ZrO_2 et SiO_2) ; kaolin chamotte (SiO_2 , Al_2O_3).

II.3.2.2 Contrôle des matières premières

L'humidité de chaque matière première est mesurée quotidiennement par le procédé suivant : On prélève des échantillons des différentes matières premières stockées après homogénéisation, on place 10 à 20g de l'échantillon sur la balance hygrométrique, le pourcentage de l'humidité est affiché sur le cadran après le signal de sonore.

II.3.2.3 La préparation des produits semi finis

Le principe de fabrication revêtement mural et des sols sont fondés sur la préparation des plusieurs produits semi finis (la barbotine, fritte, émaux, engobe et la pâte sérigraphie) et qui

nécessite une cohésion parfaite afin de réaliser un produit fini de bonne qualité ; chacune de ces produits préparés dans un atelier distincte, dans des conditions particulières et bien défini.

II.3.2.4 Préparation de la barbotine et Granulat

La barbotine et le granulat sont préparés dans un atelier qui englobe : un doseur linéaire, trois moulins à tambours, les tamis, bacs de stockages et un atomiseur. (Figure II.10)

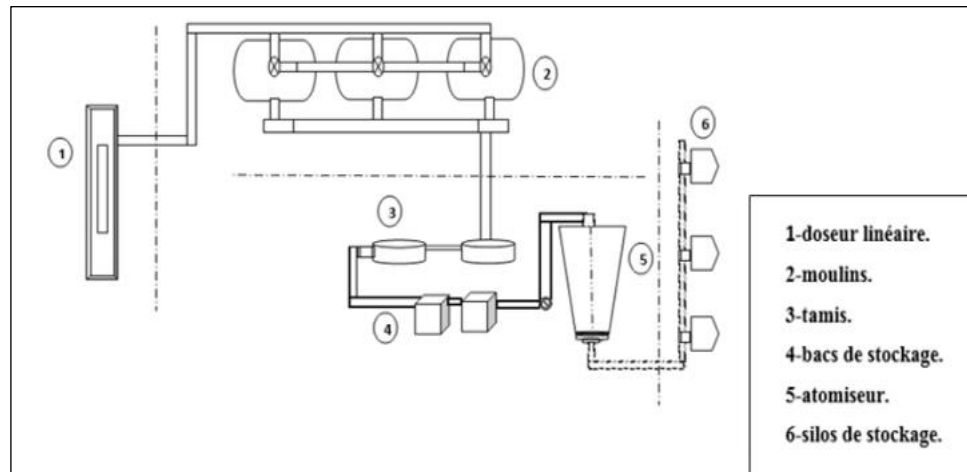


Figure II.10 : Atelier de préparation de barbotine et granulat

Le procédé suivant décrit l'ensemble d'opération pour obtenir le granulat qui représente la base de fabrication des carreaux céramique.

- **Le pesage**

Le pesage des composants doit être effectué strictement d'après les prescriptions données, et d'après la composition des matières et leurs teneurs en eau, on fait le calcul de charge pour déterminer la quantité exacte pour chaque matière première. Le pesage est effectué sur une balance spécifique (doseur linéaire).



Figure II.11 : Le doseur linéaire

• Le broyage

Les matières introduites dans des moulins à tambour rotatif avec l'eau et défloculants STPP (Tri poly phosphate de sodium) pour être homogène et visqueuse, il se fait en deux temps : En premier temps les matières premières dur comme « Argile, feldspath, calcaire, sable et de chamotte » introduite dans des moulins à tambour avec une quantité d'eau qui varie entre 8000L à 8500 L et ça dure environ 4 heures et 40 minutes, ce broyage humide nécessite un nombre de tour qui varie entre 3000 à 3500 tours avec une vitesse de 13 rotations par minute.

Des conditions sont déterminées au laboratoire en fonction des essais, c'est la durée de broyage ainsi la quantité d'eau ajouté qui doivent obéir aux exigences du résidu après le broyage final, qui ne doit pas excéder les 9% sur un tamis de 0.630 mm.

Généralement le second broyage reste plus d'une heure avec un nombre de tours qui égale à 500 tr/min et qui requiers : les argiles E1/E2 (argile jaune), E3 (argile bleu) et une quantité de 1600L d'eau ainsi qu'une quantité de défloculants : STPP et méta-silicate qu'ils assurent la dispersion des particules ainsi que leur maintien en suspension de barbotine pour avoir une solution homogène.



Figure II.12 : Les moulins à tambours

Ces moulins définissent par les caractéristiques suivantes :

- Moulin à tambours.
- Diamètre extérieure 4600 mm.
- Diamètre intérieure 3000 mm.
- Long tambour (vitesse de rotation) :13 tr/min.
- Capacité : 23.1 m³.
- Epaisseur de revêtement (Silex) :120 mm.
- Charge 12 tonne.
- Pression maximum de vidange : 4 bars.

- Densité de galets : 2.5.
- Densité de barbotine : 1.650.
- Le volume de l'élément broyeur (galets) est : 50% du volume total du moulin.

• Contrôle de la barbotine

Le contrôle du résidu, de la densité et de la viscosité s'effectue régulièrement au niveau du laboratoire :

- Le résidu : le contrôle consiste à prendre un échantillon de 10 ml est le versé dans le tube gradué puis le laissé ; le niveau de refus représente la valeur du résidu. Le tube est gradué de 12 unités, chacune représente 1%, ce qui nous donne une lecture directe du résidu en pourcentage. « Méthode de BAYER ». Nous pouvons aussi utiliser la méthode classique : On pèse 100g de la barbotine qui sera lavés sur un tamis de 63 μ m, le refus obtenu sera séché pendant deux heures puis pesé.
- La densité : un échantillon de la barbotine est rempli dans l'éprouvette graduée jusqu'à 500 ml ce dernier est pesé ; le résultat affiché représente le poids/litre de la barbotine. Cette valeur est multipliée par 2 pour avoir la densité finale.
- La viscosité : on remplit le viscosimètre par la barbotine jusqu'au trait jaugé, la viscosité représente le temps d'écoulement de 500 ml par l'orifice du viscosimètre (diamètre 3.2 mm).

• Séchage et atomisation

Stockage –tamisage : Le vidange des moulins à tambours est accéléré par une pression d'air comprimé vers des tamis pour éliminer les particules qui n'ont pas encore bien broyées et d'autre déchets, après cette tamisage ébauche (1200 μ m), la barbotine est stockée dans des réservoirs intermédiaires équipés d'agitateurs à hélices, ensuite elle est acheminée vers de grands bacs de stockage munis d'agitateur pour éviter un dépôt de grains solides, en passant par un tamisage fini (390 μ m).(Figure II.13)



Figure II.13 : Tamisage de barbotine

Atomisation : La barbotine sera ensuite séchée dans l'atomiseur à l'aide d'un brûleur qui lance l'air chaud sec de 530°C afin d'obtenir une poudre appelé granulats d'humidité de 6.90% à 7.30% ou elle est emmagasinée dans 03 silos de stockage. Le principe de fonctionnement de l'atomiseur se fait comme suit : Après l'allumage de brûleur à gaz naturel afin de chauffer l'air introduit dans l'atomiseur, une pompe assure le transport de la barbotine qui sera pulvérisé par 6 buses supportées par une lance sous une pression de 18 à 20 bars. Le contact entre l'air chaude et la barbotine provoque un transfert de chaleurs qui va créer un transfert de matière (vapeurs d'eau, granulats) tel que l'eau contenu dans la barbotine est vaporisée et la barbotine ainsi séchée tombe sous forme de granulats au fond de l'atomiseur ; en même temps que les gaz dégagés (vapeur d'eau et l'air) évacués par un ventilateur principal en passant par trois cyclones de récupération. (Figure II.14).

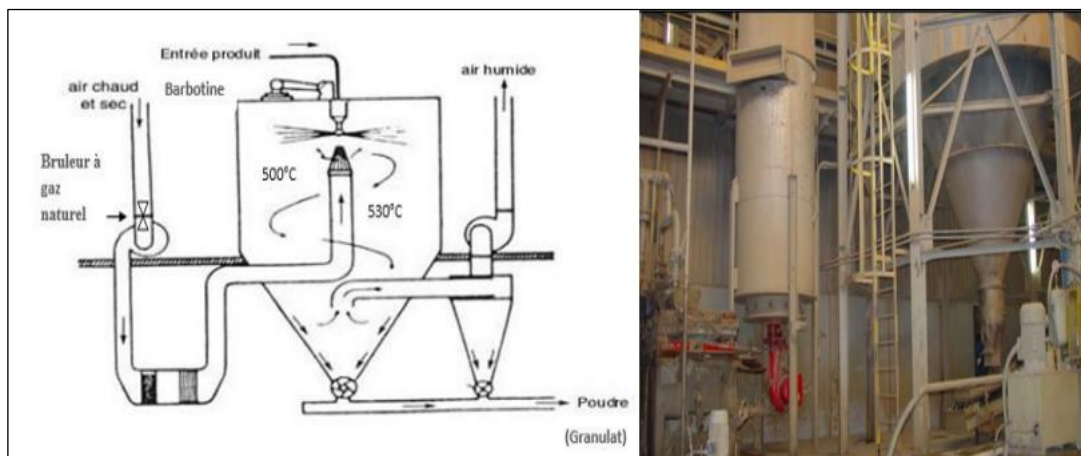


Figure II.14 : Atomiseur

L'atomiseur est caractérisé par :

- Un brûleur à gaz naturel.
- Un ventilateur (apport d'air nécessaire à la Combustion) et un ventilateur principal.
- Une chambre à combustion et un chemin d'évacuation d'air chaud.
- Tour de séchage de la matière.
- Grille se situant dans la partie supérieure de l'atomiseur.
- Un tri cyclone de récupération de la matière et buses d'injection de la barbotine.

Contrôle de Granulat : La teneur en humidité doit être contrôlée périodiquement pour rester dans les intervalles tolérés selon les normes de service. Humidité : la méthode classique consiste à prendre un échantillon à la sortie atomiseur ; le mettre dans l'étuve à 120°C pendant 02 heures ; peser soigneusement avant et après séchage. ($\% \text{ H}_2\text{O} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$). Actuellement

dans laboratoire cette mesure est réalisée par le biais d'un hygromètre ; 'une méthode rapide'.
Granulométrie : pour ce contrôle on utilise un appareille de tamis vibrants (une série des tamis superposés avec différent ouvertures : (0.630-0.400-0.250-0.160-0.100-0.063-le reste de tamis). On met 100g de granulat sec dans la série des tamis, qu'est équipé par un mode de vibration et qui sert à distribuer cette quantité dans ces différents tamis selon leur diamètre ; le pesage de ces quantités pour chaque tamis nous a aidé à conclure le pourcentage qui correspond à chaque ouverture.

II.3.2.5 Préparation des Fritte, émaux et engobes

Le deuxième atelier où la préparation des frites, émaux et engobes s'effectuent est équipé par des matériels suivants : Une balance numérique (digitale), Mélangeur, Four rotatif, les cuves, sept moulins à galet d'alumine.

• Préparation des frites

La fritte est préparée après la fusion des matières premières : (quartz SiO_2), fondant (borax penta et l'acide borique), feldspath potassique (Al_2O_3 , K_2O , et SiO_2), craie (CaO), oxyde de zinc (ZnO) pour la brillance, zircon (ZrO_2 et SiO_2) ; kaolin chamotte (SiO_2 , Al_2O_3) à haute température ($1400\text{ }^\circ\text{C}$) suivie d'un refroidissement rapide. La majorité de ces éléments forment en fondant des liquides qui se cristallisent lors du refroidissement (rencontre avec l'eau). La présence du zircon rend la fritte opaque ; d'où déjà on distingue 02 types de frites : transparente et opaque.



Figure II.15 : (a) fritte opaque, (b) fritte transparente

Processus de la fusion : les matières premières mentionnées dans la recette sont pesées totalement avant d'être placées dans le mélangeur où elles sont mélangées de façon homogène. Des temps de mélange entre 3 et 7 min sont suffisants dans le cas des mélangeurs modernes. Après le processus de mélange ; la charge est vidangée dans une cuve afin de passer à la phase de fusion, cette dernière est accomplie à l'aide d'un four à tambour rotatif chauffé par un gaz naturel. Le four à tambour rotatif se présente sous forme d'un long cylindre, incliné et tournant lentement autour de son axe. Ce four fonctionne avec un brûleur qui est fixé axialement par rapport à son extrémité inférieure et qui joue le rôle principal dans le processus de fusion.



Figure II.16 : Le processus de fusion des frites

Contrôle : Pour obtenir un email régulier et de haute qualité les frites doivent être contrôlées avant le stockage dans les silos ; ce qui peut surgir après la cuisson.

Certification des frites : L'échantillon de fritte qui fera l'objet du test au niveau du laboratoire sera broyé dans la tourne jarre au bout de 30 mn. L'email obtenu est appliqué sur un carreau humidifié puis enfourné en cuisson email ; la qualité de la fritte est appréciée après cuisson.

• Préparation de l'email

Généralement, on utilise 85% de fritte opaque, 10% de fritte transparente et 5% de kaolin qui est broyés en addition de STPP avec un pourcentage de 0.025% et CMC « colle ». Notons que le dosage de CMC est toujours de 0.08% et avec de l'eau. Et pour l'email semi opaque on utilise 47% de fritte opaque, le même pourcentage pour la fritte transparente et toujours 5% de kaolin avec 0.024% de STPP et 0.014 de la colle « CMC3 » Dans le procédé de préparation de l'email, on broie généralement la fritte, les additifs et l'eau dans des moulins à tambour (broyage humide) jusqu'à obtention d'un rejet prédéfini. On fait passer cet email à travers des tamis vibrants

puis on les stocke dans des silos en résine fermés afin d'éviter toute contamination. On peut formuler toutes sortes d'émaux, en fonction du type de produit, de la température de cuisson, et des propriétés souhaitées pour le produit fini.

• Préparation d'engobe

Il se compose de : Fritte opaque- sable lavé- kaolin et le quartz, STPP et la colle. On mélange tous les composants dans les moulins puis tamiser le mélange et enfin stocker dans des cuves.

Contrôle : Avant le transport de l'émail et l'engobe dans la chaîne d'émaillage, la viscosité et le poids spécifique doivent être contrôlés et cela pendant la préparation ensuite on fait le contrôle durant la production et ces derniers doivent être effectués à un intervalle régulier et bien défini par laboratoire.

La viscosité : On contrôle la viscosité à l'aide d'un viscosimètre, on détermine la vitesse d'écoulement de l'émail qui doit varier dans l'intervalle de 22-28 (temps en seconde, nécessaire à l'écoulement d'un échantillon de 100 ml de barbotine émail). Le poids volumique doit varier aussi entre 1690 et 1740 g/l. (On peut toujours ajouter de l'eau pour remédier à un poids volumique élevé).



Figure II.17 : Les moulins à tambour pour la préparation de l'émail et l'engobe

II.3.2.6 Préparation de la pâte sérigraphique

La pâte sérigraphique est préparée séparément dans un autre atelier qui remembre : quatre moulins ainsi que les cuves de stockage.

La pâte sérigraphique est composée d'émaux de colorant et poly man ce mélange est introduit dans des moulins à galets stéatites, une durée d'une heure est suffisante pour

l'homogénéisation de ces matières ; on utilise l'huile de poly man à la place de l'eau car elle facilite le décollement de la toile au cours de l'impression, il existe 03 sortes de pates :

- La pâte réactive : elle est composée essentiellement d'émaux fondant à basse températures. La pâte déposée sur l'émail fond avant que ce dernier commence à se ramollir ; vu que la différence de température est significative, la pâte perd sa viscosité. Ainsi une mince empreinte peut doubler ou tripler de dimension tout en donnant une couleur foncée sur les bords.
- La pâte semi réactive : est une pâte qui réagit partiellement.
- La pâte majolique : les émaux avec lesquelles la pâte est préparée, sont de même nature que l'émail recouvrant le carreau. Dans ce cas la pâte et l'émail ont des points de fusion rapprochés, ce qui n'entraîne pas un changement d'aspect (la forme imprimée reste inchangeable).

• Préparation des tamis Sérigraphies

Les tamis sérigraphie sont réalisés dans un quatrième atelier qui englobe une seule machine qui s'appelle machine de tirage. C'est un procédé d'impression à pate sérigraphique réalisé à l'aide d'accessoire important mentionnées ci –dessous :

- Monture du tamis : Le matériel le mieux approprié est un tube carré en métal soudé pour former une monture carrée ou rectangle.
- Toile de tamis : Les toiles s'avèrent les meilleures dans la pratique pour l'imprimerie d'article de céramique.il y a les toiles de T62 et T68 « le nombre 62 et 68 désigne le nombre des ouvertures dans 1cm de la toile ».
- Râteau : Le râteau presse la pâte à travers les ouvertures de la toile .il doit avoir des arêtes vives et une surface rectifiée sur le côté en contact avec la toile.
- Diapositives : Elle consiste en un porteur en poly stère comportant une photo émulsion devront être noire et étanche la lumière.
- Emulsion à copier : L'émulsion à copier consiste en une suppression colloïdale qui se durcit sous l'influence de la lumière pour devenir insoluble dans le solvant d'origine.

La préparation des tamis se fait comme suit : Sur un cadre de préférence en métal est fortement tendue une toile spéciale à mailles fines et régulières ; sur cette toile est étalée une émulsion à copier gélatine (Azocol) photo sensible qui se durcit sous l'influence de la lumière ultraviolette(U.V) et en conséquence imperméable .par contre les parties non exposées où la gélatine reste molle peuvent être lavées jusqu'à l'apparition des mailles. Après l'exposition du dessin (diapositive) sur la gélatine à la lumière UV et après lavage du cadre le dessin apparaît sur la toile. Cependant la pâte sérigraphique peut être déversée dans le cadre ajusté le carreau pour être pressée à l'aide d'un râteau à travers les ouvertures de la toile.



Figure II.18 : Un tamis sérigraphie

II.3.2.7 La chaîne de production

Après la préparation du granulat, l'émail, la pâte sérigraphique et les tamis ; passent à la chaîne de production qui englobe quatre stations principales : station de biscuits, biscuits émaillés, produits finis avant triage et enfin les produits finis emballés.

a. La préparation des biscuits

• Pressage

Le granulat qui est stocké dans des silos va alimenter les presses, passant d'abord par un tamis comme toujours pour éliminer les déchets, ces presses donnent une forme au produit (carreau). Cette opération est faite sous une pression de 240 bars.

La presse est : « PH 680 » est une machine entièrement automatique qui sert au comptage des carreaux pendant leur cycle de fabrication. Cette machine utilise l'énergie hydraulique pour les différentes actions d'emploi : 'chargement de moule, pressage, extraction de carreau, éjection de ce dernier, tous les organes fonctionnent au moyen d'énergie hydraulique' leurs caractéristiques sont :

- Puissance installée 48 KW.
- Commande de moteur P=45KW.
- Pompe 1500 tr/min -Force de rejet 20 tonnes.
- Capacité du réservoir d'huile 350 litres.
- Pompe à eau de refroidissement P=3KW.

Le fonctionnement de cette machine se déroule comme suit :

- Pressage ébauche : la presse applique une basse pression qui sert en premier lieu à compacter légèrement la poudre.
- Désaération : l'air ainsi emprisonné doit être dégagé, cela se fait par relâche de la pression ; cette phase est essentielle pour éviter les contraintes qui peuvent provoquer des fissures.
- Pressage final : pour le serrage des grains on applique une pression maintenue constante, de l'ordre de 240 bars.

Le pressage est plus important pour l'orientation des micelles que pour la réalisation de la forme finale (carreaux). A la fin de cette opération les carreaux crus sont acheminés à l'entrée de four à rouleaux biscuit à l'aide d'un convoyeur à courroies.



Figure II.19 : Pressage de granulat

• Contrôle des carreaux crus

Les mêmes contrôles (humidité ; granulométrie ; densité) sont faits :

- Humidité : la mesure se fait à l'aide d'une balance hydrométrique.
- Poids de carreau : on utilise une balance de précision.
- Mesure des dimensions : à l'aide d'un pied à coulisse ; on mesure les dimensions sur les quatre cotés du carreau cru et les épaisseurs sur les quatre diagonales pour chaque alvéole.
- Résistance à la flexion : un appareil destiné à l'essai mécanique est disponible au niveau du laboratoire. Pour chaque alvéole on mesure l'épaisseur (on prend la petite valeur) et la largeur du côté (on prend la plus grande valeur) qui subit la rupture ; on introduit ces valeurs dans l'appareil puis on actionne et on lit la valeur de la résistance affichée sur le cadran.

• Cuisson du biscuit

La cuisson biscuit est effectuée dans une atmosphère oxydante qui se passe au niveau du four à rouleaux biscuit où il existe 4 zones ce qui veut dire que le processus de cuisson des carreaux crus se passe sur 4 étapes pour obtenir le biscuit :

- Séchage : pour dégager la quantité de l'eau restante dans les carreaux, où l'humidité sera inférieure à 1%, la température est variée entre (100°C et 250°C).
- Zone de pré-cuisson : sert à chauffer les carreaux et dégager les gaz ; la température est variée entre : 250°C et 750°C.

-Zone de cuisson : cette section est construite avec des matériaux réfracteur et des fibres céramiques spécifiques aux hautes températures ($1000^{\circ}\text{C} < T < 1090^{\circ}\text{C}$).

-Zone de refroidissement : le refroidissement se fait en deux temps : Refroidissement rapide où la température peut arriver jusqu'à 600°C et refroidissement rapide lent avec une chute de température jusqu'à 150°C ; le cycle de cuisson peut atteindre 35 min.



Figure II.20 : Four à rouleau pour cuisson biscuit

• Le contrôle du biscuit

Le contrôle est effectué au niveau du laboratoire, il consiste à prendre des échantillons de carreau à la sortie du four pour déterminer leur poids ; dimensions et résistances à la flexion :

-Poids du biscuit : on utilise une balance de précision.

-Mesure des dimensions : ceci est fait à l'aide d'un pied à coulisse ; on mesure les dimensions sur les quatre côtés du carreau et les épaisseurs sur les quatre diagonales pour chaque alvéole.

-Résistance à la flexion : un appareil disponible au niveau du laboratoire ; destiné à l'essai mécanique. Pour chaque alvéole on mesure l'épaisseur (on prend la petite valeur) et la largeur du coté (on prend la plus grande valeur) qui subit la rupture ; on introduit ces valeurs dans l'appareil puis on actionne et on lit la valeur de la résistance.

-Le retrait : cette mesure est calculée après obtention des dimensions des carreaux crus et des biscuits ; le retrait est la moyenne des dimensions (largeur, longueur).

-Détermination de l'absorption d'eau : placer le lot d'échantillon dans l'eau porté à l'ébullition (bain-marie) pendant 2 heures, après ce temps réglementaire, retirer les carreaux et peser chaque pièce et noter les résultats avec précision.

$$\% \text{ Absorption} = \frac{M_2 - M_1}{M_1} * 100$$

M_1 : masse de carreau séché.

M_2 : masse de carreau humide

• Stockage des biscuits

Les biscuits sont acheminés par un convoyeur à courroies jusqu'à la machine à ventouse, cette machine sert à charger et décharger les carreaux cuits de la table à rouleau vers les wagons de stockage qui ont une capacité de 240 m², les biscuits sont stockés dans cet atelier en attendant de les transporter vers les deux chaînes d'émaillage.



Figure II.21 : Stockage de biscuit

• Certification du produit pour l'émaillage

La certification se base sur le contrôle de planéité et l'intégralité du biscuit ; chaque wagon est doté d'une fiche d'identification sur laquelle le produit est certifié, notons qu'un rapport de certification est donné par un poste de travail.

b. Préparation des biscuits émaillés

Dans cette étape il existe deux chaînes d'émaillages l'une pour l'obtention des carreaux mono couleur et l'autre pour les carreaux décorés. Les biscuits stockés dans les wagons sont transportés manuellement vers ces deux chaînes, et ils sont triés et alimentés encore manuellement par un opérateur pour lancer l'émaillage. Cette opération est faite sur plusieurs étapes :

- Le chan freinage et marteau : pour tester la résistance du carreau et le chaud freinage pour bien définir les côtés du carreau.
- Le brossage : pour éliminer la poussière.
- Le souffleur : pour éliminer les résidus de poussière sur les carreaux.
- Humidification : pour appliquer la douche sur les carreaux qui sert à diminuer l'absorption d'eau du carreau.

-Application d'engobe : c'est la première couche mise sur le biscuit, a une couleur crème. On utilise l'engobe avant l'émail puisqu'il a une bonne résistance mécanique, il est plus économique et il permet de masquer la couleur du biscuit.

-Application de l'émail : c'est une deuxième couche mise sur le biscuit qui a une couleur blanche.

-Deux groupes d'ébarbage : pour nettoyer les quatre cotés latéraux.

La première chaine est destinée pour la réalisation des carreaux mono couleur et s'arrête dans cette étape ; mais pour les carreaux décorés qui sont traités dans la deuxième chaine nécessite d'autres étapes plus que celles déjà cités, donc les carreaux émaillés continuent leur chemin passant par les relais suivants :

- L'application du fixatif, c'est une colle destinée a facilité l'application de la pâte sérigraphique.
- L'application de la pâte sérigraphique : la décoration se fait par une patte d'émail colorée dans les machines sérigraphiques « ensemble des tamis sérigraphie » chaque tamis possède un motif et une couleur particulier.



Figure II.22 : Alimentation des deux chaines d'émaillages

c. Contrôle des carreaux émaillés

On mesure les poids des couches d'émaux et engobes : Un carreau émaillé sera pesé M_1 à l'aide d'une balance de précision ; ensuite la couche d'émail est soigneusement enlevée à l'aide d'une spatule. Le carreau est pesé une nouvelle fois M_2 ; La couche d'émail = $M_1 - M_2$.

d. Stockage des carreaux émaillés

Les carreaux émaillés sont acheminés par un convoyeur courroie vers des box de stockage qui ont une capacité de 70 m², le chargement de ce dernier est effectué à l'aide d'une machine de

chargement et déchargement des box (mécanisme automatique) puis stocké dans cet atelier afin de les transporter vers le four à rouleau pour cuisson émail FRE.



Figure II.23 : Stokage de biscuit émaillé dans des box

à la sortie des lignes d'émaillage, les carreaux sont stockés à l'aide d'un bras de chargement mobile dans les boxes avec des plans à rouleaux au moyen des unités de chargement, ces dernières fonctionnent à l'aide des UNICOMP à base des cartes électroniques (entrée, sortie et CPU contiennent des EPROM programmées). En cas de mal fonctionnement de la machine la ligne d'émaillage s'arrête et l'UNICOMP affiche l'alarme qui indique l'emplacement du problème dans la machine. Les boxes chargés de ces carreaux seront ensuite positionnés sur les lignes d'entraînement automatique en direction de l'entrée du four pour la cuisson d'émail.

e. Cuisson des biscuits émaillés

Les box sont acheminés à l'aide des lignes d'entraînement automatique vers la station de déchargement afin de décharger ces carreaux émaillés à l'aide d'une machine de déchargement des box, ces derniers sont acheminés à l'entrée du four à cuisson émail (F.R.E) à l'aide d'un convoyeur à courroie. La cuisson se fait dans un four à rouleau émail à une température de 1000°C avec un cycle de cuisson de 50 min.



Figure II.24 : Déchargement des box et cuisson des carreaux émaillés

f. Stockage de produit fini avant le triage

A la sortie du four, les faïences sont acheminées par un convoyeur à courroie jusqu'à la machine à ventouse qui pourvoit au chargement et déchargement des produits finis de la table à rouleau vers les boitiers (leur capacité c'est 140 m²) qui seront stockés dans cette atelier. Ces dernières seront acheminées ensuite vers la ligne de triage à l'aide d'un chariot élévateur.



Figure II.25 : Stockage des produits finis avant le triage

II.3.2.8. Triage et emballage

Les produits finis stockés dans les boitiers sont déchargés par la machine à ventouse dans la table à rouleau puis acheminés par un convoyeur à courroie jusqu'à la machine de triage. Les carreaux sont triés par bandes de triage de façon à ce que la belle face soumise à un examen soit visuelle normalement à une distance d'un mètre. Exposer les carreaux à une intensité lumineuse uniforme à la surface des carreaux et vérifier les pièces soumises à l'essai. Les produits finis sont classés selon les choix en trois classes :

- Le 1^{er} choix : les carreaux n'ayant aucune contamination ni fissures ni bordure ébréchée.
- Le 2^{ème} choix : les carreaux peuvent présenter quelques défauts.
- Le 3^{ème} choix : des carreaux portants des fissures ayant des bords ébréchés, un émail surcuit ou incuit, une décoloration impropre.

On passe directement à l'emballage : les carreaux à revêtements mural sont mis dans des cartons.



Figure II.26 : Triage et emballage des produits finis

II.3.2.9 Stockage

Le produit fini est stocké manuellement dans des palettes pour la commercialisation. La capacité de ces palettes est de 96 cartons, les palettes sont stockées dans une zone de stockage.



Figure II.27 : Stockage des produit finis

II.3.3 Processus de fabrication des appareils sanitaires

Les étapes principales de fabrication des sanitaires sont le stockage des matières premières, la préparation des matières premières, le façonnage, le séchage et l'émaillage, la cuisson et les traitements ultérieurs.

II.3.3.1 Matières premières

Les matières premières pouvant convenir sont le kaolin, l'argile, le quartz, le feldspath et le carbonate de calcium. Un mélange type est constitué de 40 à 50 % de kaolin et d'argile, de 20 à 30 % de quartz, de 20 à 30 % de feldspath et entre 0 et 3 % de carbonate de calcium. Le kaolin est stocké de préférence sous forme de mottes avec une teneur en eau maximale de 15 pour cent. Les matières dures telles que le quartz et le feldspath sont broyées en fines particules et utilisées

avec une teneur en eau inférieure à un pour cent. Les matières premières sont stockées dans des silos ou des caissons pour éviter toute influence atmosphérique.

II.3.3.2 Préparation des matières premières

La préparation des matières premières pour les appareils sanitaires s'effectue principalement par un procédé de préparation par voie humide. Le kaolin et l'argile sont affinés dans des concasseurs à rouleaux dentés ou des appareils similaires. A l'issue de cette étape, les matières sont réduites à un diamètre de particule de moins de cinq millimètres par broyage fin. Elles sont élutriées dans de l'eau et les impuretés sont éliminées de la suspension par criblage. Ensuite, la suspension argileuse tamisée est homogénéisée dans des cuves avec des agitateurs lents. Le dosage des matières dures s'effectue par gravimétrie et des électrolytes sont ajoutés. Cette préparation des matières premières est rarement effectuée par le fabricant de céramiques. Souvent, le fabricant ne fait que doser les matières premières qui lui ont été livrées, la fabrication de l'émail à proprement parler se faisant ensuite dans des délayeurs. Un stockage consécutif de quelques jours dans des cuves agitées permet d'augmenter les caractéristiques de façonnage de la barbotine de coulage. On emploie des agents de liquéfaction et de stabilité tels que des mélanges de soude, de verre soluble, de caustique, de potasse et d'acide humique, pour obtenir une aptitude au coulage en même temps qu'une faible teneur en eau. On dose les composants de l'émail puis on les mélange et on les broie dans des broyeurs à boulets (discontinus) ou dans des broyeurs horizontaux ou annulaires (continus). On ajoute à l'émail des agents liants tels que la cellulose de carboxyméthyle ou la polyamine pour renforcer son adhérence et sa force de prise après broyage. La déferrisation de la pâte et de l'émail est réalisée au moyen d'aimants permanents pour éviter une coloration des produits due à des impuretés magnétiques.

II.3.3.3 Façonnage

Aujourd'hui, la plupart des produits en céramique sont encore façonnés dans des moules en plâtre. En matière de développement, la tendance s'oriente vers un façonnage sans plâtre, effectué dans des moules en polymère poreux. Le coulage se fait normalement dans des moules en plâtre. L'eau s'évacue de la barbotine de coulage à travers les zones poreuses des moules en plâtre pour former le corps. Le temps de formation du corps est réduit par la pression. Les appareils sanitaires complexes sont fabriqués par un procédé de coulage par drainage. On fabrique des pièces de coulage solides supplémentaires par un procédé parallèle et on les rajoute en les fixant au corps principal. Au cours de cette étape de garnissage, on crée la forme définitive du produit. Après avoir séparé le corps du moule, on ébavure les marques du moule et on les traite.

La manipulation et le dressage du corps se font le plus souvent automatiquement. Les corps des appareils sanitaires en céramique sont formés de plus en plus souvent par des machines équipées de moules polymères à plusieurs pièces associées à un coulage sous pression. En fonction de l'article, on utilise des moules en polymère à quatre ou cinq pièces. Une pression pouvant atteindre 3 MPa minimise le temps de formation du corps. Le cycle de façonnage d'une cuvette de WC est réduit à cinq à huit minutes. L'ébavurage et le garnissage se font généralement pendant que le corps est fixé dans le moule. Par rapport au moule en plâtre, le moule en polymère a l'avantage d'être plus facile à nettoyer et d'avoir une durée de vie plus longue.



Figure II.28 : Moulage et démoulage des appareils sanitaires

II.3.3.4 Séchage et émaillage

Les produits crus sèchent en deux étapes. A l'issue du séchage jusqu'à consistance cuir, l'article cru est traité pour ne présenter aucun défaut. Le séchage blanc qui suit minimise la teneur en eau jusqu'à moins d'un pour cent. Le séchage se déroule dans des séchoirs tunnels ou à

chambres. Des séchoirs à micro-ondes, construits sur le modèle des séchoirs tunnels, sont également employés pour le séchage à consistance cuir et le séchage blanc.

A l'issue du séchage blanc, on contrôle les produits crus et on débarrasse leur surface des poussières et des impuretés. On applique l'émail à la surface des produits par pulvérisation, opération réalisée par des robots ou manuellement. L'épaisseur de l'émail se situe entre 0,3 et 0,5 mm, selon la couleur de la pâte et la part d'opacifiants dans l'émail. Une pulvérisation effectuée en champ électrique permet de maximiser la qualité de l'émail.

II.3.3.5 Cuisson

Les appareils sanitaires cuisent dans des fours tunnels et des fours à rouleaux, à des températures comprises entre 1250 et 1290 °C et sous atmosphère oxydante. La fabrication à petite échelle se fait dans des fours intermittents flexibles tels que des fours intermittents. Les fours intermittents fonctionnent de manière à modifier la courbe de cuisson spécifique aux produits dans des cycles très courts.



Figure II.29 : Cuisson au four

II.3.3.6 Traitements ultérieurs

A l'issue du triage final, les surfaces de montage sont abrasées par meulage à l'eau et par polissage. Dans certains cas, des raccords sont rajoutés aux cuvettes de WC et aux réservoirs avant leur conditionnement final.

CHAPITRE III : Métaux ferreux et non ferreux

III.1. Généralités	1
III.2. Propriétés des métaux	1
III.2.1. Propriétés physiques	1
III.2.1.1. Apparence	1
III.2.1.2. La Masse volumique	1
III.2.1.3. Malléabilité	1
III.2.1.4. Fusibilité	2
III.2.1.5. Fluidité	2
III.2.1.6. Soudabilité	2
III.2.1.7. Conductibilité calorifique et électrique	2
III.2.1.8. Dilatabilité	2
III.3. Propriétés mécaniques	3
III.3.1.1. Résistance mécanique	3
III.3.1.2. Dureté	4
III.3.1.3. Résilience	4
III.3.1.4. Fatigue	5
III.3.1.5. Fluage	5
III.4. Classification des aciers selon compositions	5
III.4.1. Aciers non alliés (aciers au carbone)	5
III.4.1.1. Aciers non alliés d'usage général (S, E ...)	5
III.4.1.2. Aciers spéciaux non alliés, de type C	6
III.4.2. Aciers faiblement alliés	6
III.4.3. Aciers fortement alliés	6
III.5. Protection des métaux ferreux contre la corrosion	7
III.5.1. Protection par revêtements	7
III.5.1.1. Les revêtements métalliques	7
III.5.2. Protection électrochimique	7
III.5.2.1. Protection cathodique	7
III.5.2.1.1. La protection par anode sacrificielle	8
III.5.2.1.2 La protection cathodique par courant extérieur imposé	8
III.5.3. Lutte contre la corrosion par l'utilisation d'inhibiteur	9

III.1. Généralités

Les métaux sont des éléments naturels. On les trouve dans le sol, le plus souvent sous forme de minerai, parfois sous la forme de métal (pépites d'or). Il s'agit de corps simples ou d'alliages le plus souvent durs, opaques, brillants, bons conducteurs de la chaleur et de l'électricité. Ils sont généralement malléables, c'est-à-dire qu'ils peuvent être martelés ou pressés pour leur faire changer de forme sans les fissurer ni les briser.

Les métaux possèdent de nombreuses applications courantes, et leur consommation s'est très fortement accrue depuis les années 1980, au point que certains d'entre eux sont devenus des matières premières minérales critiques.

Les métaux sont classés en deux grandes classes les métaux ferreux et les métaux non ferreux.

Les métaux ferreux : l'Acier, la fonte...etc.

Les métaux non ferreux : le zinc, l'aluminium, le Cuivre...etc.

III.2. Propriétés des métaux

III.2.1. Propriétés physiques

Sont caractérisés par : l'apparence, la masse volumique, malléabilité, fusibilité, la conductibilité, dilatabilité etc...

III.2.1.1. Apparence

La couleur d'un métal constitue souvent un bon indice de sa nature. Elle permet d'identifier des métaux tels le cuivre, le laiton, l'aluminium, le magnésium et les métaux précieux.

III.2.1.2. La Masse volumique

La densité de la majorité des métaux dépasse 7000 kg/m^3 , celle des métaux légers (Al, Mg) est inférieure à 3000 kg/m^3 . Plus la densité du métal est petite et plus les éléments de construction qui en découlent sont légers et efficaces.

III.2.1.3. Malléabilité

C'est la qualité que possèdent les métaux de pouvoir se façonner en feuilles minces, sans se rompre. L'écrasement du métal est réalisé par laminage à froid ou à chaud, entre deux cylindres tournant en sens contraire dans la fabrication des tôles d'acier, de zinc, d'aluminium, etc Il est également pratiqué par forgeage, martelage ou emboutissage dans l'amincissement des plaques de plomb, de cuivre, d'étain, d'aluminium et d'acier. L'or, l'argent, le platine sont Particulièrement malléables. La fonte et le bronze sont très peu malléables.

III.2.1.4. Fusibilité

C'est la propriété commune à tous les corps de passer de l'état solide à l'état liquide sous l'effet de la chaleur. La température de fusion varie énormément d'un métal à l'autre. Les corps purs ont une température de fusion constante pendant la durée de la fusion (Etain (Sn) = 232°C ; Plomb (Pb) = 327°C ; Cuivre (Cu) = 1083 °C ; Fer (Fe) = 1528 °C ...).

III.2.1.5. Fluidité

C'est la qualité que possèdent certains métaux de se mouler facilement. Il faut cependant que le métal puisse se solidifier sans SOUFFLURES, ni RETASSURES. Le mélange de certains corps avec des métaux, favorise la fluidité de ces derniers. La fonte se moule assez facilement et la fluidité du bronze est due à l'étain mélangé au cuivre.

III.2.1.6. Soudabilité

C'est la propriété d'un métal de pouvoir s'unir à lui-même par fusion des bords de deux morceaux à réunir. Les métaux et principalement les alliages ne sont pas tous soudables. Le cordon gène la soudabilité des aciers et d'avantage les fontes. La présence de soufre, ou de silicium rend un acier insoudable.

III.2.1.7. Conductibilité calorifique et électrique

Ce sont les propriétés de la plupart des métaux de permettre le transport, plus ou moins rapide, à travers leur masse, de quantités de chaleur ou d'électricité.

L'argent (Ag) est le métal le plus conducteur, viennent ensuite le cuivre et l'aluminium. L'or est utilisé pour certains contacts électriques ou électroniques.

III.2.1.8. Dilatabilité

Sous l'effet de la chaleur, les matériaux se dilatent. Cette dilatation est variable suivant les matériaux et est caractérisée par un coefficient de dilatation qui représente l'allongement en longueur rapporté à l'unité de longueur et de température : $\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta t$

ΔL = dilatation totale en m

α = coefficient de dilatation fonction de la nature du matériau mm/m°C Ac-C => $\alpha = 0,0122$ mm/m°C

Inox => $\alpha = 0,019$ ”

Alu => $\alpha = 0,027$ ”

Exemple : Une tuyauterie en Ac-C véhicule un fluide à la température de 120 °C (t de montage 20 °C)

Calculer la dilatation de cette tuyauterie de longueur L = 100 m

$$\Delta L = 0,0122 \times 100 \text{ m} \times (120 - 20) = 122 \text{ mm}$$

Tableau III.1 : résumé quelques valeurs des propriétés physiques des métaux ferreux et non ferreux.

Familles	Métaux ferreux				Principaux métaux non ferreux					
Grandeurs à 20°C	Fer	Aciers au carbone	Aciers inox. 18/8	Fontes GS EN-GJS	Aluminium	Cuivre	Zinc	Magnésium	Nickel	Titane
densité	7,87	7,85	7,9	7,2	2,7	8,96	7,13	1,74	8,8	4,54
début de fusion °C	1538	1450	1425	-	660	1083	420	650	1453	1668
coefficient. de dilatation (K ⁻¹)	12.10 ⁻⁶	12.10 ⁻⁶	17.10 ⁻⁶	12,5. 10 ⁻⁶	23.10 ⁻⁶	17.10 ⁻⁶	40.10 ⁻⁶	27.10 ⁻⁶	13.10 ⁻⁶	10.10 ⁻⁶
chaleur spécifique J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	444	430	513	515	900	385	385	1025	444	523
conductibilité thermique W.m ⁻¹ .K ⁻¹	80	100	30	35	238	402	117	155	62	22
résistivité électrique μΩcm	10	11	70	50	2,65	1,73	5,9	4,48	9,2	50

III.3. Propriétés mécaniques

III.3.1.1. Résistance mécanique

La résistance mécanique est la capacité d'un métal de résister aux efforts extérieurs. Suivant la nature de ces efforts on distingue : les résistances à la traction, à la compression, à la flexion, et à la torsion qui sont caractérisées par les charges limites par lesquelles le métal se rompt.



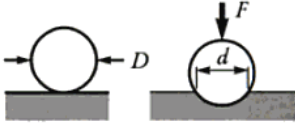
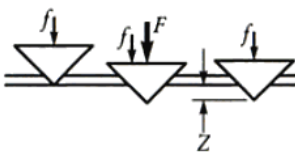
Figure III.1 : Les principales essais de résistance mécanique d'un métal

III.3.1.2. Dureté

C'est la propriété que possèdent les métaux de résister à la pénétration d'une pointe lorsqu'on applique une charge donnée. Elle est désignée par la lettre H. Dureté ne veut pas dire solidité. Un métal peut être à la fois dur et fragile. La fonte est un exemple significatif.

Les essais de dureté peuvent être réalisés à l'aide de plusieurs appareils de mesure. La principale différence entre les divers essais réside dans la forme de la pointe.

Tableau III.2 : La principale différence entre les divers essais de dureté

Méthode d'essai	Géométrie du pénétrateur	Charge F	Principe de l'essai	Paramètre mesuré	Dureté
Brinell	Bille d'acier dur ou de carbure (10 mm de diam.)	500 ou 3000 kgf		Diamètre de l'empreinte (d)	$HB = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pyramide de diamant à base carrée; angle entre les faces opposées: 136° 	5 à 100 kgf (microdureté: 5 à 1000 gf)		Diagonale de l'empreinte (d) 	$HV = \frac{1,854 F}{d^2}$
Rockwell C	Cône de diamant d'angle au sommet de 120° 	Précharge f de 10 kgf; $F = 150$ kgf		Profondeur de l'empreinte (Z)	$HRC = f(Z)$
Rockwell B	Bille d'acier dur (1,59 mm de diam.)	Précharge f de 10 kgf; $F = 100$ kgf	Même principe que Rockwell C	Profondeur de l'empreinte (Z)	$HRB = f(Z)$

III.3.1.3. Résilience

La résilience est caractérisée par la quantité de travail nécessaire à la rupture d'une éprouvette subissant des chocs. Cet essai sert à mesurer la ténacité des métaux. Il consiste à rompre une éprouvette entaillée par le choc. Le pendule, lâché d'une hauteur H vient briser l'éprouvette entaillée au moment où il passe par la position verticale. Après avoir rompu l'éprouvette, le pendule remonte à une hauteur H qui varie selon la ténacité du métal de l'éprouvette. Plus la hauteur H de remontée est faible, plus le métal est tenace et vice versa. La résilience est désignée par la lettre K et est exprimée en Joule/cm² (J/cm²).

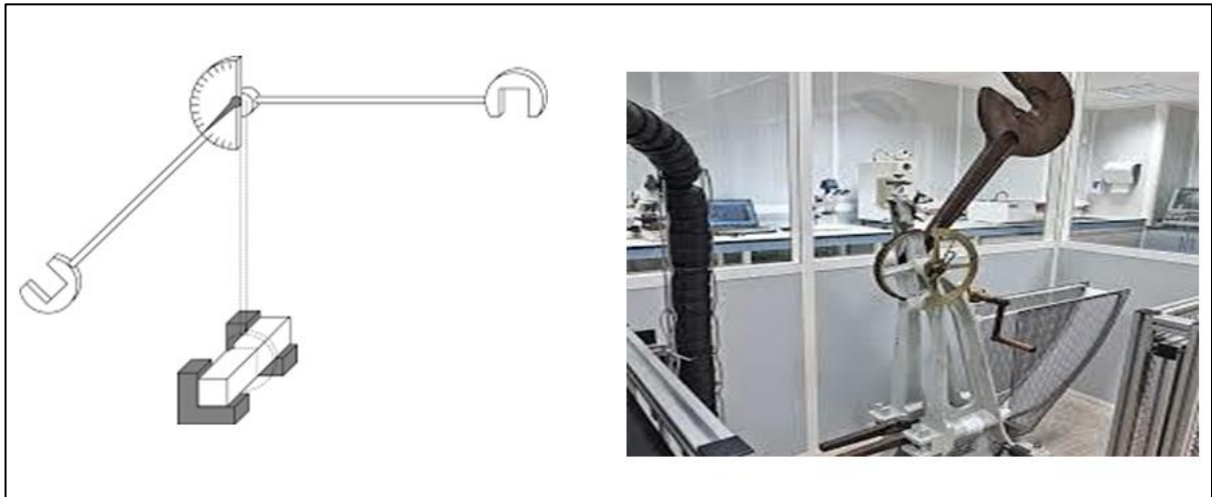


Figure III.2 : Essais de choc

III.3.1.4. Fatigue

La fatigue est la propriété de soumettre un métal aux effets alternés, répétés et conjugués d'efforts externes (statique ou dynamique).

III.3.1.5. Fluage

Le fluage caractérise la capacité d'un métal à se déformer à la suite d'une charge constante. Il peut donc conduire à l'accroissement des flèches des éléments des constructions et à la perte de stabilité.

III.4. Classification des aciers selon compositions

Les aciers sont des matériaux contenant en masse plus de fer que tout autre élément et dont la teneur en carbone est inférieure à 1,7%, limite courante qui distingue les fontes. La normalisation (NF EN 10020) retient trois familles principales d'aciers : les aciers non alliés (aucun élément d'alliage ne dépasse 0,6% ; sauf 1,65% pour Mn (Manganèse)), les aciers faiblement alliés et les aciers fortement alliés (aciers inoxydables).

III.4.1. Aciers non alliés (aciers au carbone)

III.4.1.1. Aciers non alliés d'usage général (S, E ...)

Ils sont caractérisés par une faible teneur en carbone, ce sont les plus utilisés. Ils existent dans des qualités diverses et des variantes réservées à des usages particulières (moulage, soudage...).

La plupart sont disponibles sous forme de laminés marchands (profilés, poutrelles, barres, tôles...) aux dimensions normalisées.

Exemple : GS 35 NL : Acier de construction, moulé de limite d'élasticité 355 MPa normalisé basse température.

Aciers non alliés		GS 355 NL
G	Acier moulé (si nécessaire)	NL
S	S : aciers de construction E : aciers de construction mécanique P : aciers pour appareils à pression B : aciers à béton H : produits plats pour formage L : aciers pour tube M : aciers électriques...	Indication complémentaire : F : formage N : normalisé M : laminage Q : trempé et revenu L : basse température...
355	Limite élastique Re en MPa	

III.4.1.2. Aciers spéciaux non alliés, de type C

Ils sont destinés aux traitements thermiques des pièces petites et moyennes, ils sont caractérisés par un ajustement précis de leur composition, une plus grande pureté et des éléments d'addition en très faible quantité ($Mn < 1\%$; $Cr + Ni + Mo < 0,63\%$).

Exemple : GC35E : Acier au carbone, moulé, de 0.35% en carbone, de teneur maximale en soufre

III.4.2. Aciers faiblement alliés

Pour ces aciers, aucun élément d'addition ne dépasse 5% en masse ($Mn \leq 1\%$). Ils sont choisis chaque fois qu'une haute résistance est exigée. Ils sont utilisés en l'état ou avec traitement.

Exemple : G35NiCrMo16 : Acier faiblement allié, moulé contenant 0,35% de carbone, 4% de nickel et des traces ($< 1\%$) de chrome et de molybdène.

Aciers faiblement alliés	G 35 NiCrMo 16
G : Acier moulé (si nécessaire)	
35 : Pourcentage de carbone multiplié par 100	
NiCrMo : Principaux éléments d'addition (dans l'ordre)	
16 : teneur en % des éléments d'addition (même ordre)	

III.4.3. Aciers fortement alliés

Ce type d'aciers est destiné à des usages particuliers (inoxydable...). Ils ont au moins un élément d'addition qui dépasse la teneur de 5% en masse.

Exemples : GX6CrNiTi18-11 : Acier fortement allié, moulé, contenant 0,06 % de carbone, 18% de chrome, 11% de Nickel et des traces de titane ($< 1\%$).

III.5. Protection des métaux ferreux contre la corrosion

La lutte contre la corrosion englobe plusieurs méthodes :

- Protection par revêtements.
- Protection par les traitements électrochimiques.
- Protection par inhibiteurs.

III.5.1. Protection par revêtements

Plusieurs types de revêtements sont utilisés et nécessitent tous une préparation de la surface du métal de base, de façon à ce que le revêtement soit adhérent. La mise à nu ou décapage des métaux ferreux est particulièrement importante.

III.5.1.1. Les revêtements métalliques

Les revêtements métalliques sont couramment utilisés pour protéger l'acier contre la corrosion atmosphérique. Outre leur effet anti-corrosion, les revêtements métalliques remplissent souvent une fonction décorative. On les utilise aussi comme protection contre l'usure. Il existe deux types de revêtements métalliques :

- Les revêtements anodiques : le métal protecteur est moins noble que le métal à protéger. En cas de défaut du revêtement, il y a formation d'une pile locale et ce dernier se corrode en protégeant cathodiquement le métal de base. La protection reste donc assurée tant qu'une quantité suffisante de revêtement est présente. L'épaisseur est un élément important pour ce type de revêtement. Elle est en générale comprise entre 100 et 200 μm .
- Les revêtements cathodiques : le métal protecteur est plus noble que le métal à protéger. C'est le cas par exemple d'un revêtement de nickel ou de cuivre sur de l'acier. En cas de défaut du revêtement, la pile de corrosion qui se forme peut conduire à une perforation rapide du métal de base. Dans ce cas, la continuité du revêtement est donc le facteur primordia.

III.5.2. Protection électrochimique

III.5.2.1. Protection cathodique

C'est une méthode de protection où les surfaces anodiques sont rendues cathodiques et le métal est rendu dans sa zone d'immunité (diagramme de Pour Baix). Dans cette zone, à un potentiel fixé, le métal ne peut se corroder d'une façon thermodynamique. Il s'agit alors de fournir des électrons au métal pour qu'il cesse de s'ioniser dans ce milieu et qu'il atteigne le potentiel défini.

Deux méthodes de protection sont couramment employées en pratique :

III.5.2.1.1. La protection par anode sacrificielle

C'est une application du phénomène de corrosion galvanique, C'est-à dire le métal à protéger est couplé à un métal moins noble. Le potentiel de corrosion de l'ensemble doit être inférieur au potentiel de dissolution du métal à protéger ; ce dernier devient alors cathodique par rapport à l'anode, qui se corrode. On utilise cette méthode pour protéger les structures et les équipements en acier. Les anodes sacrificielles sont faites en zinc, en magnésium ou aluminium, métaux nettement moins nobles que l'acier.



Figure III.3 : Anode sacrificielle

III.5.2.1.2 La protection cathodique par courant extérieur imposé

La protection cathodique par courant imposé (ou de soutirage) repose sur le même principe que la protection par anode sacrificielle, mais l'anode est général inerte et le potentiel de corrosion de la structure à protéger est abaissé par l'action d'une source extérieure de courant (générateur de courant continu).

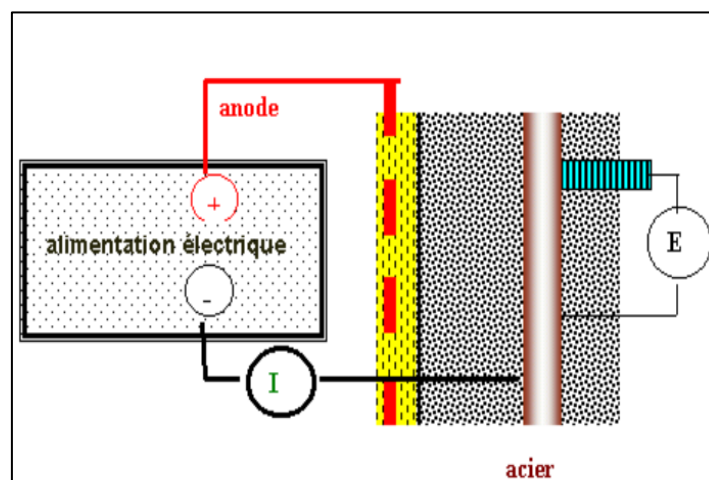


Figure III.4 : Schéma d'une protection cathodique par courant imposé

III.5.3. Lutte contre la corrosion par l'utilisation d'inhibiteur

Un inhibiteur est une substance qui diminue la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration. L'inhibition retarde des réactions d'électrodes comme le transfert de charges ou le transport de masse et spécialement le processus de corrosion. Il consiste dans l'utilisation des substances chimiques dite inhibiteurs de corrosion, qui, en les ajoutant en petites quantités à l'environnement corrosif, réduisent la vitesse de corrosion du métal par action sur le milieu ou sur la surface du métal. Les classes d'inhibiteurs On peut classer les inhibiteurs de plusieurs façons :

- Par domaines d'application (la formulation des produits : inhibiteurs organiques ou minéraux).
- Par mécanisme réactionnel (les mécanismes d'interface et principes d'action (adsorption et / ou formation d'un film).
- Par réaction partielle (les mécanismes d'action électrochimique : inhibiteurs cathodiques, anodiques ou mixtes)

CHAPITRE IV : Le verre

IV.1. Fabrication des verres	1
IV.1.1 La composition de verre	1
a) Les oxydes formateurs	1
b) Les oxydes modificateurs	1
c) Les constituants secondaires	3
IV.1.2. Elaboration	4
a) Fusion	4
b) Affinage et homogénéisation	4
c) Braise	4
IV.1.3. Mise en forme (façonnage)	4
IV.1.3.1. Le verre plat	5
a) Laminage	5
b) Etirage	5
IV.1.3.2 Le verre creux	6
a) Pressage	6
b) Soufflage	6
IV.1.3.3. Les fibres de verre	7
a) Etirage mécanique	7
IV.2. Propriétés de verre	8
a) Les propriétés optiques	8
b) Les propriétés mécaniques	8
c) Les propriétés thermiques	8
d) Les propriétés acoustiques	8
e) Les propriétés électriques	9
f) Les propriétés chimiques	9
IV.3. Utilisations de verre	9
a) Arts et artisanat	9
b) Emballages	10
c) Domaine médical et scientifique	11
D) Domaine de construction	11
e) Domaine optique et électronique	14

IV.1. Fabrication des verres

Pour fabriquer un verre, on part d'un ensemble de matières premières constitué de roches naturelles (sable, calcaire) et de produits chimiques industriels (carbonate de sodium), pris en proportions définies. Ce mélange hétérogène vitrifiable, appelé en langage verrier « composition », est porté à la fusion dans un four approprié. Mise à part les corps volatils qui s'échappent au cours de cette opération, tous les constituants du mélange initial (y compris les impuretés indésirables) fondent et forment un liquide homogène appelé verre fondu ou fonte qui vitrifie par refroidissement.

IV.1.1 La composition de verre

La composition des verres dépend des propriétés recherchées et du mode de fabrication. L'ingrédient de base sont :

a) Les oxydes formateurs

L'oxyde formateur par excellence dans l'industrie verrière est l'oxyde de silicium SiO_2 ou la silice, trouvée abondamment dans la nature sous forme de sable (quartz).

Tous les gisements de sable ne sont pas exploitables en verrerie à cause des impuretés. On utilise habituellement les sables titrant plus de 99% de SiO_2 avec un taux d'impuretés gênantes inférieur à 0,2%.

b) Les oxydes modificateurs

La silice permet d'obtenir un verre, mais son point de fusion est élevé (1730°C). On trouve difficilement des matériaux résistant à de telles températures pour former les creusets dans lesquels le verre est fondu, le prix revient de l'énergie nécessaire à la fusion de ce verre est très élevé et par surcroît son façonnage est difficile.

On n'utilise donc le verre pur de silice que dans quelques cas particuliers exigeant un verre aux qualités exceptionnelles.

Pour le verre d'usage courant on abaisse la température de fusion aux environs de 1500° en mélangeant au sable des produits appelés fondants (carbonate et sulfate de soude), on abaisse cette température à 1400°C (économie d'énergie), en coupant les ponts entre maille cristalline, favorisant l'agitation des molécules.

- L'oxyde de sodium (la soude Na_2O) : jouant le rôle de fondant pour diminuer la température de fusion de SiO_2 . Il entrait autrefois dans la composition sous forme de cendres de plantes marines (ex : la salicorne) ou de nitre (grec = nitron). Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et

sa résistance aux agents atmosphériques ainsi que le coefficient de dilatation. Il est plus utilisé pour le verre industriel que pour le verre soufflé car il doit être réchauffé lors du façonnage.

- L'oxyde de potassium (K_2O) : Il entre dans la composition sous forme de cendres de plantes terrestres comme la fougère ; aujourd'hui, on utilise du salpêtre (nitrate de potassium KNO_3). Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et le rend doux à la taille, en diminuant sa résistance chimique. Il avantage le soufflage du verre car il augmente le temps de travail lors du façonnage.

- L'oxyde de magnésium (MgO) : Est utilisé sous forme de dolomite (calcium + magnésium). Il n'est pas indispensable pour tous les verres, sauf le verre flotté, le verre à vitre et en gobeletterie. Il abaisse la température de fusion et augmente la résistance aux agents chimiques.

- Les stabilisants : On ajoute des stabilisants (calcaire ou carbonate de chaux) et quelques ingrédients complémentaires dont la nature et l'importance varient selon les qualités de verre désirées (exemple le cristal contient un pourcentage important de plomb, le verre d'optique contient du plomb, du baryum et du bore, ce dernier produit entrant également dans la composition de la verrerie culinaire et des verres de laboratoire). Compte tenu de ses constituants essentiels le verre courant est considéré comme un silicate double de sodium et de calcium, ou silicate sodo-calcique. Ils augmentent la résistance mécanique du verre, sa dureté et sa brillance et diminuent sa solubilité. Ils rendent le verre plus difficile à travailler et freinent les mouvements des fondants.

- L'oxyde de calcium (CaO) : Sous forme de chaux (stabilisant le plus employé) ou de dolomie (lorsque le verre doit contenir de la magnésie). Il augmente la résistance chimique du verre, son éclat et diminue sa solubilité, mais en excès il provoque une dévitrification.

- L'oxyde de zinc (ZnO) : Il augmente l'éclat et l'élasticité.

- L'oxyde de fer (Fe_2O_3) : (c'est un stabilisant et un colorant) souvent contenu dans les roches naturelles, il donne une teinte verdâtre. Il faut procéder à une décoloration de cette teinte. Pour cela, on peut ajouter du bioxyde de manganèse (MnO_2) (savon des verriers).

- Le minium (Pb_3O_4) apporte PbO qui augmente l'indice de réfraction (dans le verre cristal, la teneur en PbO est supérieure à 24 %) et à forte teneur (40 à 80 %) est utilisé dans les verres optiques et les verres protecteurs contre les rayons X.

- L'oxyde de plomb (PbO) : entre dans la composition du cristal. Il abaisse le point de fusion en stabilisant la composition. Il rend le verre plus éclatant en lui conférant une légère teinte jaunâtre, il est plus agréable à couper et à travailler.

- Les oxydes métalliques déterminent la couleur d'un verre. Ils sont présents comme impuretés dans les matières premières ou apportés intentionnellement. Les oxydes de fer et de chrome apportent une

couleur verte, ceux de nickel : grise, ceux de manganèse : violette, ceux de cobalt : bleue, ceux de cuivre : rouge ou verte... La couleur ambre, qui protège des rayonnements UV.

c) Les constituants secondaires

Pour modifier les conditions d'élaboration ou la teinte du verre, certains constituants sont ajoutés en très faibles quantités (<1%). Par exemple :

Les colorants : Des additifs peuvent apporter une propriété particulière comme la couleur qui est donnée par les oxydes métalliques présents comme impuretés dans les matières premières ou apportées intentionnellement. Les oxydes de fer et de chrome apportent une couleur verte, ceux de nickel : grise, ceux de manganèse : violette, ceux de cobalt : bleue, ceux de cuivre : rouge ou verte... La couleur ambre, qui protège des rayonnements UV, est donnée par des sulfures de fer, en milieu réducteur.

- La coloration directe : La couleur est donnée en ajoutant des mélanges d'oxydes métalliques qui absorbent certaines longueurs d'onde de la lumière. L'oxyde de fer par, exemple, absorbe le rouge et donne le vert. La tonalité et l'intensité d'une coloration dépendent de la nature et de la quantité des colorants ainsi que de la composition du verre lui-même (sodique ou potassique).

- La coloration indirecte : Certains oxydes sont en suspension dans la masse vitreuse au cours de la fusion. La coloration apparaît lors du réchauffement du verre aux alentours de 600°C. La chaleur provoque une dilatation des particules qui met en évidence la couleur dans la longueur d'onde souhaitée. Ce sont des colorants minéraux à base métallique mélangés à la silice pendant la fusion.

Tableau 4.4 - Exemples de colorants des verres

<i>Couleurs</i>	<i>Colorants</i>	<i>Couleurs</i>	<i>Colorants</i>
<i>Bleu</i>	Oxyde de cobalt, de manganèse	<i>Violet</i>	Oxyde de manganèse
<i>Jaune</i>	Chrome, argent	<i>Rose et rouge rubis</i>	Or
<i>Rouge</i>	Oxyde de cuivre	<i>Jaune orangé à rouge</i>	Sélénium

- Les décolorants : Les composants contiennent un pourcentage d'oxydes métalliques comme teinte verdâtre. Pour obtenir un verre incolore, il faut procéder à sa décoloration. Il existe deux techniques :

La décoloration chimique : Les principaux décolorants sont le bioxyde de manganèse (MnO₂) appelé "savon des verriers", les oxydes de titane et d'antimoine. On ajoute ceux-ci à la composition du mélange vitreux. Ils neutralisent la coloration verdâtre donnée par l'oxyde de fer.

La décoloration physique : Lors de la fusion, on introduit dans la composition du verre la couleur complémentaire à l'oxyde métallique pour tendre la teinte de la masse vitreuse vers le gris (incolore).

IV.1.2. Elaboration

Le cycle d'opérations au cours duquel le mélange vitrifiable est transformé en verre fondu apte à être mis en forme comprend trois étapes : La fusion, l'affinage-homogénéisation et la braise.

a) Fusion

Pour les verres courants, suivant la nature de la composition, la température est progressivement amenée à 1300°-1400°C. Au cours de cette montée en température, la composition enfournée subit diverses transformations : déshydratation, dissociation des carbonates et sulfates avec dégagement de CO₂, SO₂, SO₃, formation locale de composés (silicates) par réactions en phase solide, frittage général de la masse, fusion de certains composants et enfin dissolution des composants les plus réfractaires à des températures bien inférieures à leurs points de fusion propres.

b) Affinage et homogénéisation

De nombreuses réactions chimiques se produisent au cours du chauffage. Des gaz se libèrent dans le verre fondu et, comme la viscosité de celui-ci est très élevée, il se forme des bulles qui n'atteignent pas la surface du bain de verre. Les gaz, provenant de l'air ambiant, et produits lors des réactions chimiques ne sont donc pas éliminés du verre, ce qui affecte sa qualité et ses propriétés physico-chimiques. Afin de remédier à ce problème, la température du verre est augmentée vers le milieu de la cuve de fusion afin de diminuer sa viscosité. On introduit dans ce bain « surchauffé » des agents d'affinage — essentiellement des nitrates, des sulfates et des oxydes —, qui se décomposent à haute température en libérant des gaz. Ces derniers forment des bulles plus grosses, qui atteignent plus facilement la surface du bain en entraînant avec elles les bulles plus petites.

c) Braise

Le verre en fin d'affinage possède une viscosité trop faible pour pouvoir être mis en forme. Pour augmenter sa viscosité il est refroidi jusqu'à la température adéquate (1000-1200°C pour les verres courants). Cette dernière phase de l'élaboration est dénommée « braise ».

IV.1.3. Mise en forme (façonnage)

Le verre (contrairement à la céramique) devient ductile au fur et à mesure qu'il est exposé à la chaleur. Le passage de l'état solide à l'état liquide est appelé transition vitreuse. Ainsi, selon

le procédé utilisé, le verre n'a pas à être fondu complètement pour être mis en forme. Le point de fusion de la silice est $\sim 1800\text{ }^{\circ}\text{C}$, mais il peut être abaissé en ajoutant des adjuvants. Cela permet de le façonner par les procédés de : laminage, Pressage, flottation, soufflage, étirage. Le procédé de formage du verre diffère selon qu'il s'agit de verre creux (bouteilles, flacons, gobelets...), du verre plat (verre à vitres, verre translucide, glace), ou du verre filé (fibre de verre).

IV.1.3.1. Le verre plat

a) Laminage

Le verre s'écoulant du four sur un déversoir passe entre des rouleaux métalliques refroidis qui le figent en un ruban continu (3 à 15mm d'épaisseur, jusqu'à 3,60 m de largeur), débité avec une vitesse de 0,5 à 5 m/minute, et qui est dirigé vers un tunnel de recuissons pour relâcher les tensions internes (voir la figure suivant)

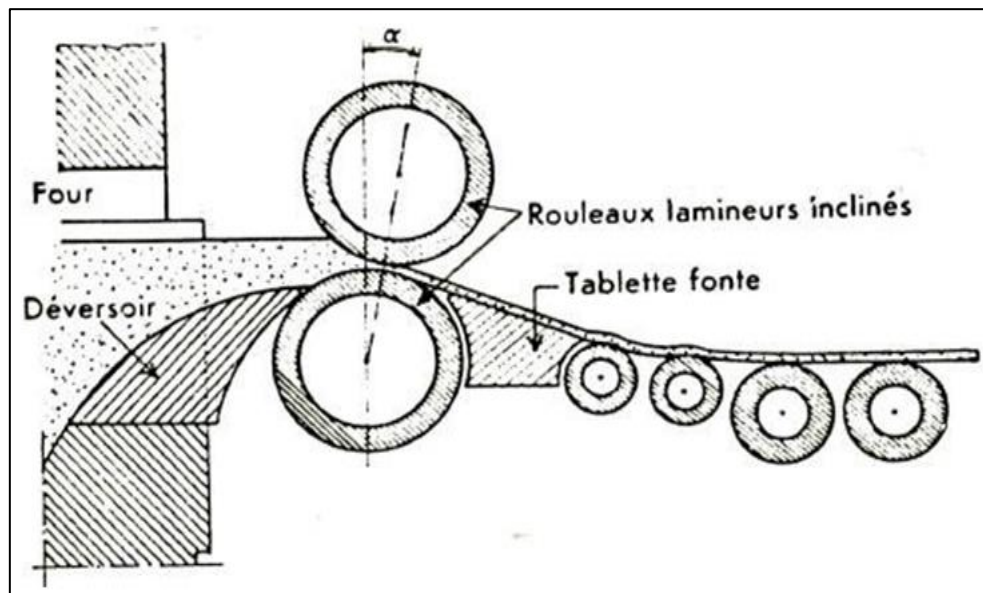


Figure IV.1 : Processus de fabrication du verre par laminage

b) Etirage

Lorsqu'on plonge verticalement une plaque solide dans le verre fondu et qu'on la retire lentement, elle entraîne une certaine portion du liquide qui monte en s'épaississant par refroidissement jusqu'au moment où il se produit une rupture dans la partie émergente (voir la figure suivant).

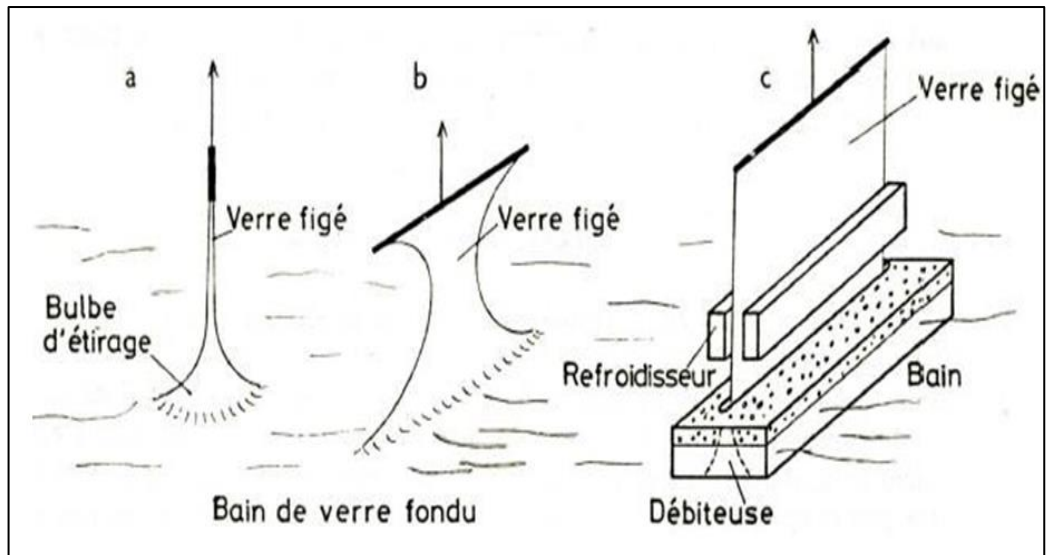


Figure IV.2 : Processus de fabrication du verre par étirage

IV.1.3.2 Le verre creux

a) Pressage

Une quantité déterminée de verre fondu ou « paraison » est introduite dans un moule et pressée vers 400-450°C. Les moules sont en acier spécial et leurs surfaces souvent chromées.

Les presses à main permettent de fabriquer jusqu'à 300 pièces/heure et les presses automatiques (comportent une série de moules) jusqu'à 1000 pièces/heure. Cette méthode est utilisée pour fabriquer les assiettes, bocaux, etc... (voir la figure suivant).

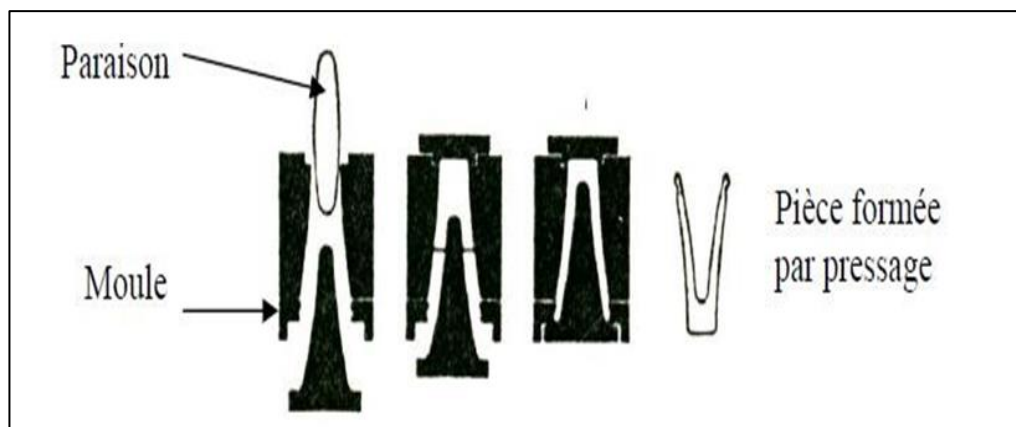


Figure IV.3 : Processus de fabrication du verre par pressage

b) Soufflage

On commence généralement par produire une ébauche dans un moule préparatoire. Cette ébauche est ensuite transférée dans un moule définitif où a lieu le soufflage final (voir la figure suivant).

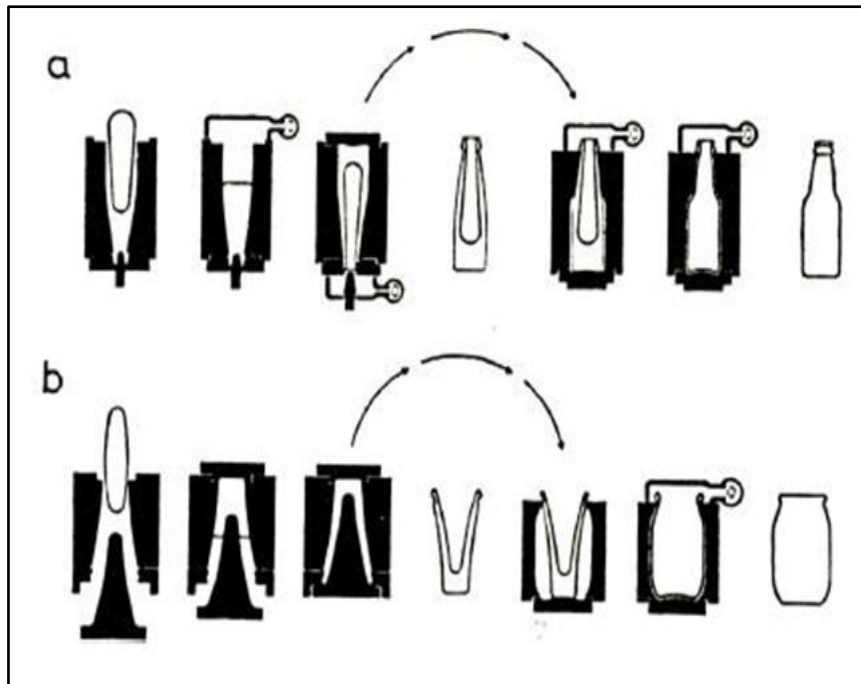


Figure IV.4 : Processus de fabrication du verre par soufflage

IV.1.3.3. Les fibres de verre

Le verre peut servir à la fabrication des fibres. On distingue deux catégories essentielles : les fibres textiles (fil continu) et les fibres pour isolation (fibres courtes enchevêtrées).

a) Etirage mécanique

Le procédé Gossler (1920) comporte un four chauffé électriquement dont le fond est percé de petits orifices. Le verre sortant de ces orifices est étiré en fibres qui s'enroulent sur un tambour mis en rotation rapide (voir la figure suivant).

Ce procédé donne des fibres longues de 14-25 μm de diamètre, avec des vitesses d'étirage de 12 à 20 m/s, utilisables sous forme de voiles ou matelas pour isolation thermique et phonique.

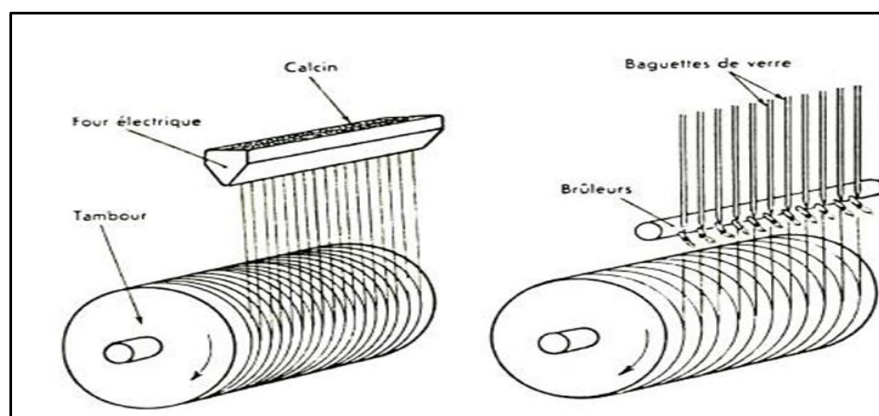


Figure IV.5 : Processus de fabrication du verre par étirage

IV.2. Propriétés de verre

Les verres constituent un ensemble extrêmement varié de produits dont les propriétés sont innombrables. Celles-ci dépendent principalement de la composition, mais également des traitements subis par le matériau, notamment thermiques.

a) Les propriétés optiques

Le verre est transparent et il peut être opaque. Il ne suffit pas qu'un milieu soit transparent pour qu'il soit invisible. Ce phénomène est lié à la discontinuité des milieux traversés par la lumière : air et verre. Lorsque la lumière frappe la surface d'un vitrage, la majorité passe par le verre. A chaque interface air-verre-air une partie de cette lumière est réfléchie et une partie est absorbée en cours de traversée. La composition des verres n'a guère évolué depuis l'antiquité, mais les techniques de production ont permis de diminuer les impuretés et défaut qui diffusent la lumière. Cette transparence est due à sa structure amorphe (pas d'ordre à grande distance) et à l'absence de défaut de taille supérieure à la fraction de micron (porosité, etc....) rencontre dans les produits frittés et conduisant à la diffusion de la lumière.

b) Les propriétés mécaniques

Sa dureté superficielle lui permet de résister à d'innombrables usages sans se rayer et sans perdre sa transparence. Seuls les diamants et le carbure de tungstène le rayent.

Il est fragile, car soumis à un effort croissant, il se rompt brutalement. Le verre trempé résiste en flexion car le traitement de trempe, thermique ou chimique, met les faces du vitrage en compression. La cassure du verre liée à sa flexion et à sa résistance au choc. La résistance du verre à la compression est très élevée. Le verre résiste mal aux chocs.

c) Les propriétés thermiques

Il est ininflammable et incombustible, il peut être utilisé en tous lieux en toute sécurité, pour l'isolation et la décoration des salles de spectacle. Très mauvais conducteur thermique. Il se brise s'il subit un brusque changement de température car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas en même temps. Son coefficient de dilatation est faible, ce qui lui confère de nombreuses applications.

d) Les propriétés acoustiques

Un bon isolant acoustique selon l'épaisseur de la feuille.

e) Les propriétés électriques

À basse température, le verre est isolant. Lorsqu'on le chauffe suffisamment, il devient conducteur d'électricité.

f) Les propriétés chimiques

Il n'est attaqué que par l'acide fluorhydrique qu'on utilise dans la gravure des objets en verre. Le verre industriel a de bonnes compatibilités avec les composés chimiques, par contre l'acide fluorhydrique (HF) dégrade le verre. Les verres ne sont pas insensibles à l'action de l'eau ou de l'air. Il ne contient aucune matière organique susceptible de le décomposer.

IV.3. Utilisations de verre

Le verre est un matériau polyvalent, utilisé dans de nombreux domaines grâce à ses propriétés uniques, telles que la transparence, la durabilité et l'inertie chimique.

a) Arts et artisanat

- Soufflage et moulage : Le verre fondu est soufflé et moulé pour créer des objets décoratifs, des sculptures et de la verrerie artistique.



Figure IV.6 : verrerie artistique et décoratifs

- Vitraux : Les vitraillistes créent des motifs colorés et translucides en assemblant des morceaux de verre teinté ou plaqué pour des fenêtres et des œuvres d'art architecturales.



Figure IV.7 : Vitraux

- Gobeletterie et verrerie d'art : Le verre au plomb est souvent utilisé pour sa clarté et son éclat dans la fabrication de gobeletterie et d'objets d'art.



Figure IV.8 : Gobeletterie en verre

b) Emballages

Le verre est largement utilisé pour la fabrication de contenants grâce à sa durabilité, sa transparence et sa recyclabilité.

- Bouteilles pour les boissons.
- Pots et flacons pour la nourriture, les cosmétiques.



Figure IV.9 : Bouteilles, Pots et flacons en verres

c) Domaine médical et scientifique

Le verre est crucial dans les laboratoires et les instruments médicaux en raison de sa stabilité chimique et sa résistance à la chaleur

- Verrerie de laboratoire
- Flacons médicaux et autres contenants pharmaceutiques.
- Endoscopes et instruments dentaires utilisant des fibres optiques en verre.



Figure IV.10 : Verrerie de laboratoire et flacons médicaux

D) Domaine de construction

Suivant le pouvoir portant, l'isolation lumineuse et sonore ainsi que suivant d'autres propriétés, cette construction se subdivise en :

- Construction de revêtement



- Construction de voûte et de coupole



Voûte en verre

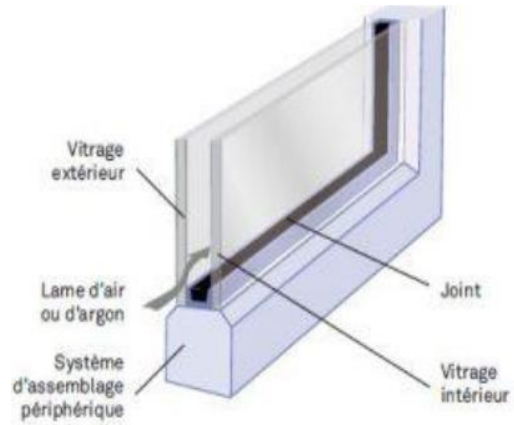


Coupole en verre

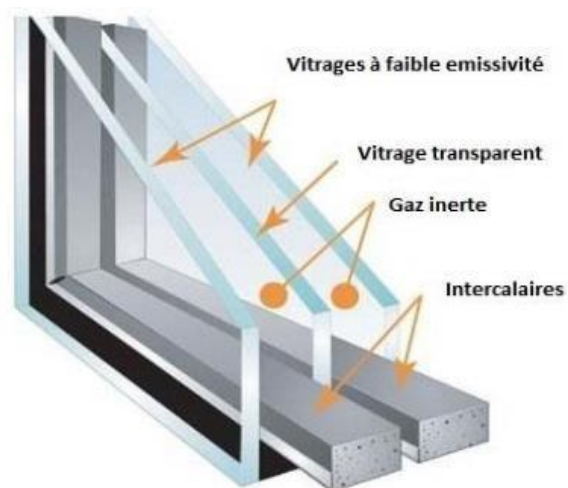
- Construction murale (simple, double ou triple vitrage)



Simple vitrage



Double vitrage



Triple vitrage

- Vitre de fenêtres.



e) Domaine optique et électronique

En raison de ses propriétés réfringentes, le verre est essentiel dans la fabrication de systèmes optiques précis.

- Verres de lunettes pour corriger la vue, comme les verres simples foyers de BBGR.



Figure IV.11 : lunettes pour corriger la vue

- Lentilles pour appareils photo, microscopes et télescopes.



Figure IV.12 : Lentilles optiques

- Fibres en verre, comme celles de SCHOTT, pour les télécommunications et l'instrumentation médicale.



Figure IV.13 : Fibres en verres

Références bibliographiques :

1. Lozach, D. (2005). *Les constituants des bétons et des mortiers*. École française du béton, Collection technique, Centre d'information sur le ciment et ses applications (CIMBÉTON)
2. "Adjuvants du béton", Afnor, 2012.
3. G. Dreux, "Le nouveau guide du béton". Éditions Eyrolles.
4. "Ciments et bétons actuels", CIIC, Paris, 1987.
5. Courard, L. (2012). *Matériaux de construction*. Polycopié de cours, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, France.
6. Timellini, G., Canetti, A. (2004). "The Italian Ceramic Tile Industry. Contribution to the identification and specification of the Best Available Techniques".
7. G. Thomas & O. Bonnefoy, Génie des Procédés : Poudres et mélanges granulaires : modélisation, propriétés, procédés, Ellipses 2012.
8. Volland, T., Leuenberger, C., Roque, R. (2004). "Statistic correlations between two methods of pollutant emission evaluation", L'INDUSTRIE CÉRAMIQUE & VERRIÈRE, No 994 – MaiJuin 2004, pp. 54 - 66.
9. Michail F.Ashby, David R.H.Jones, « Matériaux : propriétés, applications et conception », 3 ème édition, Dunod, 2008.
10. Livret technique, « Le verre » Document ressource Technologie, ALU-VERRE-PVC.
11. Lehmann. J.C, « Verre et produits verriers d'aujourd'hui et de demain » Bulletin de la S.F.P., vol 150, Juillet-Août 2005.