

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI CONSTANTINE 1
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Polycopié de cours :

MATERIAUX DE CONSTRUCTION 2

Cours destiné aux étudiants de Licence Académique : Génie civil

Réalisé par :

Dr, KHOUADJIA Mohamed Lyes Kamel

Année universitaire : 2021/202

CHAPITRE I

I.1 INTRODUCTION :

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

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

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

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

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

I.2 LE BETON HYDRAULIQUE :

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

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

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

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

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

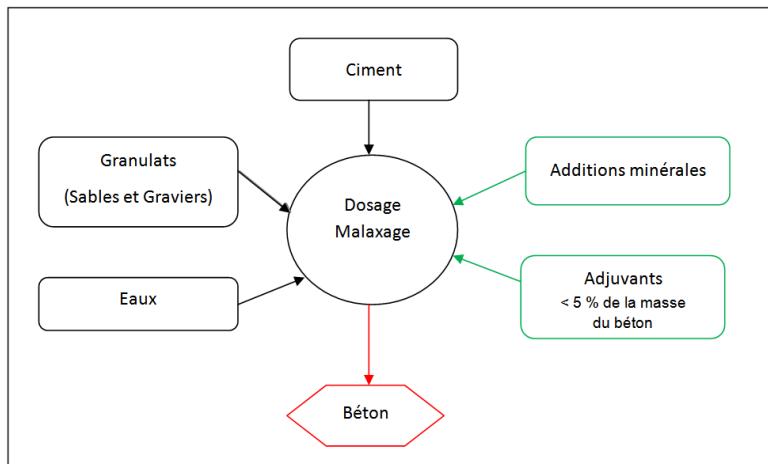


Figure I.1 . Représentation de la composition du béton

I.2.1 Les différents types de béton

Il existe différents types de béton en utilisation courante :

I.2.1.1 Béton armé

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

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

I.2.1.2 Béton Désactivé

Le béton désactivé est un béton coulé de manière à faire ressortir les graviers en surface après séchage, il est composé de ciment pur, d'eau et des granulats, après la coulage nous appliquons un désactivant pour enlever les particules de ciment en surface de la dalle, cela donne l'impression d'avoir une allée en gravier sans les graviers qui s'éparpillent sans arrêt.

I.2.1.3 Béton drainant

Le béton drainant consiste à évacuer les eaux de pluie dans la terre, il nécessite une base portante drainante. Il requiert la mise en place de géotextile, et d'un produit minéralisant, et surtout la mise en place de joints de dilatation tous les 20m².

I.2.1.4 Béton fibré

Le béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres synthétiques ou métalliques. Comme pour le béton armé, les fibres renforcent le béton. Il permet une plus grande rapidité et une plus grande facilité de mise en œuvre du fait de la suppression de la mise en place du ferraillage et une limitation de la fissuration grâce au grand nombre de fibres dispersées dans le béton.

I.2.1.5 Béton précontraint

Techniques qui consistent à tendre (comme des ressorts) les aciers constituant les armatures du béton, et donc à comprimer, au repos, ce dernier.

Dans la pré-tension (le plus souvent utilisée en bâtiment), les armatures sont mises en tension avant la prise du béton. Elles sont ensuite relâchées, mettant ainsi le béton en compression par simple effet d'adhérence. Cette technique ne permet pas d'atteindre des valeurs de précontrainte aussi élevées qu'en post-tension.

La post-tension consiste à disposer des câbles de précontrainte dans des gaines incorporées au béton. Après la prise du béton, les câbles sont tendus au moyen de vérins de manière à comprimer l'ouvrage au repos. Cette technique, relativement complexe, est généralement réservée aux grands ouvrages (comme les ponts) puisqu'elle nécessite la mise en œuvre d'encombrantes « pièces d'about » (dispositifs mis en place de part et d'autre de l'ouvrage et permettant la mise en tension des câbles).

I.2.1.6 Béton hautes performances

Le béton haute performances est constitué d'éléments qui lui confère une meilleure résistance à la compression, une grande fluidité, et des besoins en eau plus faible. Ces formules sont étudiées en bureau d'étude centrale, afin de pouvoir réduire les volumes au maximum, par ailleurs les B.H.P ont une durabilité plus importante, il en résulte de leur forte compacité et de leur très faible porosité ce qui diminue la quantité d'agents agressifs pénétrant dans le béton et donc protège les armatures de la corrosion et augmente la résistance des bétons au cycle gel/dégel.

I.2.1.7 Béton projeté

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

I.2.1.8 Béton prêt à l'emploi

Il s'agit de béton préparé en centrale, et livré par camion toupie, il est prêt à la mise en œuvre sur site sans ajout.

I.2.1.9 Béton autoplaçant

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

I.2.1.10 Béton léger

Le béton léger ou béton allégé est un béton de ciment avec une masse volumique à sec inférieure à celle d'un béton normal. Ce béton peut contenir un pourcentage volumique important de granulats légers (Argile par exemple) ou peut être rendu cellulaire par aération

ou moussage. Par rapport au béton normal, le béton léger est caractérisé, par une conductivité thermique plus faible. Par conséquent, il a une meilleure isolation thermique et une résistance mécanique plus faible de celle des bétons normaux équivalents.

I.3 LES ADJUVANTS :

Dès les origines de la fabrication du béton de ciment Portland, des recherches commencèrent sur l'incorporation de produits susceptibles d'améliorer les propriétés du béton. Dès 1881, Candlot étudie l'action des accélérateurs et des retardateurs de prise. Le début du vingtième siècle a été marqué par la commercialisation d'hydrofuges et d'accélérateurs à base de chlorure de calcium ainsi que les entraîneurs d'air [15]. De nos jours, et avec le développement qu'a connu la construction, les adjuvants prennent une place grandissante dans le domaine du génie civil. Des commissions ainsi que des normes furent créées pour l'agrément et le contrôle des adjuvants.

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

- adjuvants qui modifient l'ouvrabilité du béton : Plastifiant- réducteur d'eau, Super-Plastifiant haut réducteur d'eau ;
- adjuvants qui modifient la prise et le durcissement : accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise ;
- adjuvants qui modifient certaines propriétés particulières : entraîneurs d'air, générateurs de gaz, hydrofuges de masse.
-

I.3.1 Différent type d'adjuvant :

I.3.1.1 Plastifiants-réducteurs d'eau

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

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

I.3.1.2 Superplastifiants-hauts réducteurs d'eau

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

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

I.3.1.3 Accélérateur de durcissement

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

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

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

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

- Les domaines d'application sont les suivants :

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

I.3.1.4 Accélérateurs de prise

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

- réduire les temps de prise,
- mettre le béton hors gel,

- d'augmenter la rotation des coffrages.
- Leurs domaines d'application sont les suivants :

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

I.3.1.5 Retardateurs de prise

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

- augmenter le temps de début de prise,
- de réguler le dégagement de chaleur due à l'hydratation du ciment.
- Les domaines d'application sont les suivants :
- Béton prêt à l'emploi BPE,
- Bétons pompés,
- Bétons pour ouvrages de masse,
- Coulage du béton en continu,
- Coulage de béton par temps chauds.
- Transports sur longues distances

I.3.1.6 Entraîneurs d'air

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

- d'entraîner, à l'intérieur du béton, des micro-bulles d'air parfaitement réparties qui serviront de vase d'expansion dans le béton durci,
- d'améliorer la durabilité du béton soumis à l'action du gel et des sels de dé verglaçage,
- de faciliter la mise en oeuvre du béton.
- Les domaines d'application sont les suivants :
- Bétons prêt à l'emploi BPE,

- Bétons d'ouvrages d'art exposés aux cycles gel/dégel (association avec un superplastifiant recommandée).
- Bétons devant résister aux cycles de gel et de dégel,
- Bétons extrudés,
- Bétons routiers.

I.3.1.7 Hydrofuge de masse

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

Les hydrofuges de masse permettent :

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

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

Les adjuvants sont définis dans la norme [NF EN 934-2], comme étant des produits incorporés lors du malaxage ou avant la mise en œuvre du béton, mortiers ou coulis à une dose inférieure ou égale à 5 % en masse de la teneur en ciment. Chaque adjuvant est défini par une fonction principale, mais peut présenter une ou plusieurs fonctions secondaires. À titre d'exemple : les Plastifiants réducteurs d'eau sont des produits qui viennent se fixer par adsorption sur les grains du ciment et provoquent une défloction des grains de ciment [4].

Ce phénomène est principalement lié à la présence de charges électriques sur la surface des grains, qui va piéger un certain volume d'eau à l'intérieur des flocons afin d'empêcher l'eau d'hydrater certaines parties des surfaces des grains de ciment qui se trouvent en quelque sorte soudés les unes aux autres [30] (Figure I.13).

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

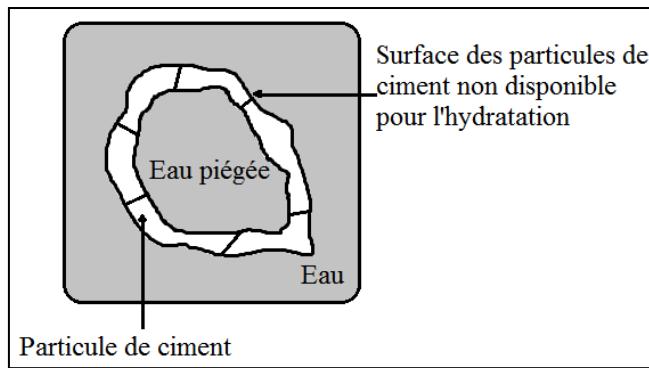


Figure I.2 . Particule de ciment en l'absence de réducteur d'eau

I.4 LES ADDITIONS MINERALES :

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

En premier lieu, à l'état frais, la structure et les frottements entre les composants du squelette granulaire sont modifiés par la présence des additions minérales. Ensuite, l'hydratation du ciment est affectée par la présence des additions qui interagissent dans la structuration des produits hydratés. Ces interactions peuvent se manifester par des synergismes ou des antagonismes entre les constituants, et sont difficiles à détecter : alcali-réaction, hydratation freinée. . .) [6].

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

I.4.1 Mécanismes d'action :

L'utilisation des sous-produits minéraux est devenue une priorité dans la composition des ciments et des bétons. La plupart des ajouts minéraux, en présence d'eau et de chaux forment un silicate de calcium hydraté suivant une réaction exothermique, qui est du même type que celle qui est formée durant l'hydratation du ciment Portland [6].

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



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

De ce fait, théoriquement dans la fabrication des bétons, l'utilisation de 20 à 30 % de pouzzolane pourrait faire réagir toute la chaux produite par l'hydratation du ciment Portland, pour la transformer en C-S-H [3]. Cependant, l'idéalisatoin de cette condition n'est jamais complète, vu la composition chimique des additions qui n'est pas bien maîtrisée.

I.4.2 Classification des additions minérales :

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

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

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

I.4.2.1 Laitier de haut fourneau :

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

La norme distingue deux classes de laitier A et B selon la manière de traitement à la sortie du haut fourneau [NF P 18-506] [3]:

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

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

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



Figure I.4 . Laitier granulé de haut fourneau
avant broyage de haut fourneau

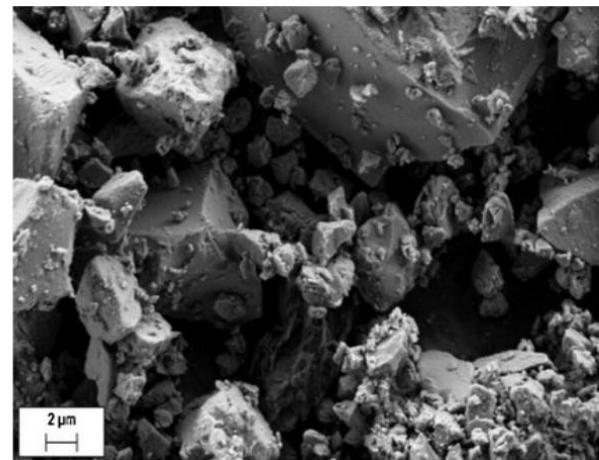


Figure I.5 . Vue au MEB du laitier granulé

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

Tableau I.1. Composition chimique du laitier granulé

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

Demirboga [41] a montré en étudiant l'effet du laitier granulé de hauts fourneaux (10 %), qu'il engendrait une augmentation de la densité et une diminution de la résistance en compression à 28 jours et une amélioration à 120 jours.

D'autre part Öner et al. [42] ont étudié l'effet de la finesse sur la variation de résistance des ciments avec du laitier de haut fourneau. Les résultats ont montré que les meilleures valeurs de résistance ont été données pour une grande finesse.

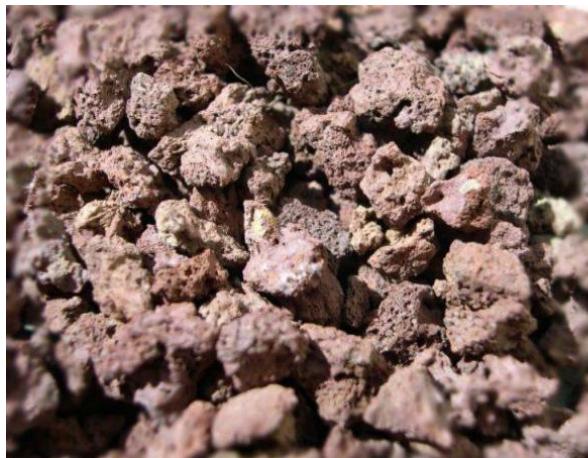
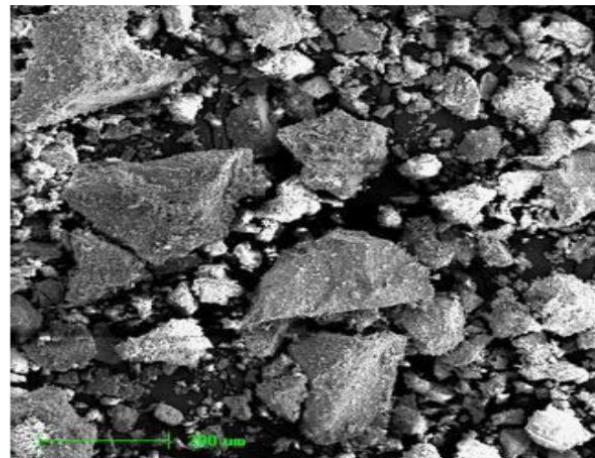
Jianping et al. [43] ont étudié aussi l'effet de la granulométrie du laitier sur les résistances mécaniques et la demande en eau. Les résultats ont montré que les résistances à la flexion et à la compression augmentent avec la diminution de la taille des particules du laitier de haut fourneau. D'autre part, les particules fines du laitier augmentent les besoins en eau. De ce fait, il y aura une augmentation du temps de prise.

Au Royaume-Uni, Osborne [44] a montré que le niveau d'alumine dans le laitier doit être inférieur à 14%. Si la teneur en alumine du laitier dépasse 14%, la teneur en C₃A du Portland-ciment ne doit pas dépasser 10%.

I.4.2.2 La pouzzolane :

La pouzzolane est une roche naturelle constituée par des scories (projections) volcaniques de nature siliceux ou silico-alumineux avec une couleur qui varie du rouge au noir selon l'état d'oxydation du fer (pour un rapport FeO/Fe₂O₃ < 0,02 la couleur est rouge (figure 2.10) ; pour un rapport $\geq 0,27$ la couleur est noir). Les pouzzolanes sont composées essentiellement de silice et d'alumine (entre 70 et 80 %). Elles ne possèdent pas eux-mêmes de propriétés liantes mais qui, sous forme finement broyé et en présence d'humidité (H₂O), réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂ à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes. Les pouzzolanes sont formées surtout d'éléments vitreux elles peuvent être substituées au ciment à un pourcentage qui peu allé jusqu'à 25 % [6].

De ce fait, forment des hydrates stables en présence d'eau. Elles jouent un rôle de remplissage des pores et de correcteurs granulaires. Elle modifie aussi le produit interne de la phase alite [30].

**Figure I.6 . Pouzzolane naturelle****Figure I.7 . Vue au MEB de la pouzzolane****Tableau I.2. Composition chimique de la pouzzolane**

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

Çolak [45] a étudié plusieurs caractéristiques des pâtes de ciment Portland contenant de la pouzzolane naturelle. Il a abouti au fait que :

- la substitution de 40 % de ciment Portland par la pouzzolane naturelle augmente le temps de prise (4 à 5 h).

- l'incorporation de la pouzzolane naturelle en remplacement du ciment Portland a engendré une augmentation de la teneur en eau et de la porosité. De ce fait l'utilisation de superplastifiant est recommandée.

- la pouzzolane agit à long terme à cause des réactions avec l'hydroxyde de calcium.

- la substitution d'un grand pourcentage de pouzzolane naturelle dans le ciment a un effet néfaste sur la résistance au cycle gel-dégel et aux sulfates.

En outre, Rodriguez-Camacho et al. [46] ont analysé l'importance de l'utilisation des pouzzolanes naturelles sur la résistance aux attaques des sulfates. Il a été constaté que certains ciments (types I et V) ont une meilleure résistance aux sulfates que les autres ciments. D'autre part, de meilleures résistances ont été enregistrées pour les pouzzolanes contenant de l'alumine à moins de 16 % et cela pour tous les types de ciment.

Par ailleurs, Turanli et al. [47] ont examiné l'effet de grande quantité de pouzzolane naturelle (35, 45, et 55 %), sur les propriétés des pâtes et mortiers. Ils ont abouti aux résultats suivants :

- le temps de prise augmente avec l'augmentation des quantités de pouzzolanes incorporées.
- l'expansion après immersion dans une solution de sulfate est inférieur pour les ciments contenant de grandes quantités de pouzzolane.

I.4.2.3 Les cendres volantes

Les cendres volantes sont les particules non combustibles entraînées par les fumées lors de la combustion du charbon pulvérisé dans les chaudières des centrales thermiques (figure 2.12). Pour réduire la pollution atmosphérique, les cheminées de ces centrales sont équipées de dépoussiéreurs qui captent les cendres pour éviter leur dispersion dans l'atmosphère.

Les cendres doivent répondre à la définition donnée dans la norme NF EN 197-1 pour être utilisées dans les ciments. En particulier, la perte au feu (résidus imbrûlés constitués essentiellement de carbone) ne doit pas dépasser 7 % en masse. Les cendres volantes se présentent sous la forme de sphères creuses de granulométrie équivalente à celle du ciment (figure 2.13). Les cendres volantes peuvent être de nature silico – alumineuse ou silico – calcaire.



Figure I.8 . Cendre volante

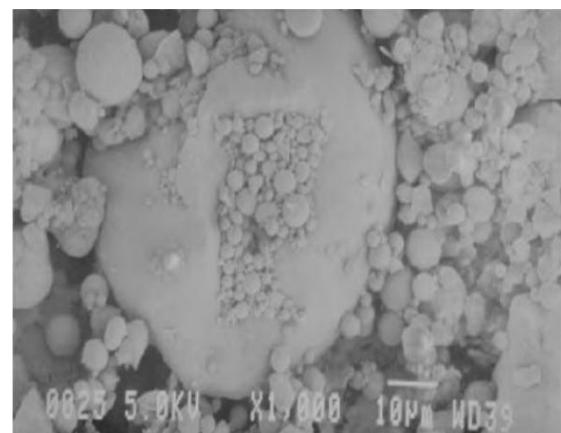


Figure I.9 . MEB d'une cendre volante

a) Cendres volantes siliceuses

La cendre volante siliceuse est une poudre fine constituée principalement de particules sphériques vitrifiées ayant des propriétés pouzzolaniques. Elle doit contenir essentiellement de la silice (SiO_2) réactive et de l'alumine (Al_2O_3). La partie restante contient de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres oxydes. La proportion de chaux CaO réactive doit être inférieure à 5 % en

masse. La teneur de SiO₂ réactif doit être d'au moins 25 % en masse. La composition chimique de la cendre volante siliceuse est donnée dans le tableau 2.5.

Tableau I.3. Composition chimique de la cendre volante siliceuse

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

b) Cendres volantes calciques

La cendre volante calcique est une poudre fine ayant des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques. Elle doit contenir essentiellement de la chaux réactive (CaO), de la silice (SiO₂) réactive et de l'alumine (Al₂O₃). La partie restante contient de l'oxyde de fer (Fe₂O₃) et d'autres oxydes. La proportion de chaux CaO réactive doit être inférieure à 50 % en masse. La composition chimique de la cendre volante calcique est donnée dans le tableau 2.6.

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

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

I.4.2.4 Les schistes calcinés

Un schiste est une roche qui a pour particularité d'avoir un aspect feuilletté, et de se diviser en plaques fines ou « feuillet rocheux ». Les schistes calcinés, sont produits dans un four spécial à une température d'environ 800°C. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques comme le ciment portland et aussi pouzzolaniques. Les schistes calcinés contiennent des phases du clinker, principalement du silicate bicalcique (C₂S) et de l'aluminate monocalcique (CA) dû à leur composition et au procédé de fabrication. Ils contiennent aussi de faibles quantités de chaux libre CaO et de sulfate de calcium CaSO₄, ainsi qu'une quantité importante de SiO₂. La composition chimique du schiste calciné est donnée dans le tableau I.5.

Tableau I.5. Composition chimique de la schiste calciné

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

I.4.2.5 Les calcaires

Les fillers calcaires sont issus de la récupération des fines obtenues par le concassage des roches calcaires, après broyage et tamisage on obtient une fine poudre blanche. Pour pouvoir les utiliser dans des matériaux cimentaires à des taux qui dépassent 5 % en masse, les fillers calcaires doivent satisfaire quelques spécifications : teneur en calcaire (carbonate de calcium, CaCO_3) ≥ 75 % en masse, teneur en argile $\leq 1,20$ % en masse, teneur en matières organiques $\leq 0,50$ %.

La composition chimique du calcaire est donnée dans le tableau 2.8.

Tableau I.6. Composition chimique du calcaire

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

I.4.2.6 Les fumées de silices

La fumée de silice est un sous-produit de la métallurgie et de la production de silicium (figure 2.14). Elle est composée exclusivement de silice (SiO_2) amorphe qui se présente sous forme de particules sphériques très fines qui confère à la fumée de silice des propriétés pouzzolaniques. Pour être employé dans les matériaux cimentaires, la fumée de silice doit satisfaire aux spécifications suivantes :

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

La composition chimique de la fumée de silice est donnée dans le tableau 2.9.

Tableau I.7. Composition chimique de la fumée de silice

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

Au microscope électronique, la fumée de silice apparaît sous forme de billes sphériques d'un diamètre moyen de 0,2 μm . Ces billes ont un diamètre moyen 100 fois plus petit que les grains de ciment (figure 2.15).



Figure I.10 . Fumée de silice

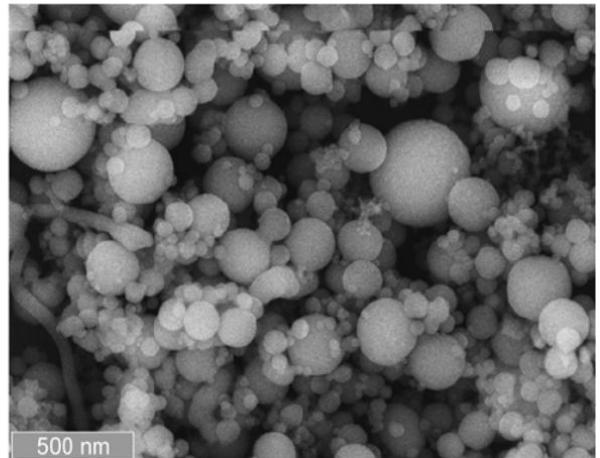


Figure I.11. Fumée de silice au MEB

I.4.3 Avantage des additions minérales :

Les ajouts minéraux contribuent à la correction de la structure inter-granulaire des mortiers et bétons. Ils jouent le rôle de micro agrégats. De ce fait, ils contribuent à la diminution de la porosité du matériau et donc à l'amélioration des propriétés des mortiers et bétons (ouvrabilité, maniabilité, résistances et durabilité...).

L'incorporation des additions minérales dans le ciment a permis de proposer plusieurs types de ciments à partir d'un même clinker (Tableau I.1).

D'autres parts il faut souligner que dans la majorité des recherches les additions minérales ont été introduites en remplaçant une partie du ciment. Alors que dans les bétons spéciaux (bétons à hautes performances, bétons autoplaçant), les additions minérales sont utilisées pour augmenter les résistances mécaniques ou rhéologiques, sans changer le dosage en ciment [6].

Tableau I.8. Principaux types de ciment (NA 442)

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

I.5 PROPRIETES DES BETONS :

I.5.1 Propriétés physiques :

I.5.1.1 Ouvrabilité et maniabilité :

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

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

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

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

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

I.5.1.2 Porosité et compacité:

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

On peut distinguer deux types de porosité [2] :

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

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

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

I.5.1.3 Déformabilité :

I.5.1.3.2 Élasticité du béton :

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

$$E = \frac{\text{contrainte unitaire}}{\text{déformation relative}} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{Eq. I.6})$$

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

$$E_{ij} = 11\,000 (f_{cj})^{1/3} \text{ (module de déformation longitudinale instantanée)} \quad (\text{Eq. I.7})$$

$$E_{vj} = 3\,700 (f_{cj})^{1/3} \text{ (module de déformation différée)} \quad (\text{Eq. I.8})$$

Avec :

$$f_{cj} = 1.1 f_{c28} \quad (\text{Eq. I.9})$$

Il s'ensuit que :

$$E_{vj} \approx \frac{1}{3} E_{ij} \quad (\text{Eq. I.10})$$

I.5.1.4 Le retrait :

Par définition, le retrait se présente comme une variation dimensionnelle d'un élément en béton, dû à des départs d'eau. D'autre part, il existe aussi une variation dimensionnelle due à des entrées d'eau qu'on appelle : gonflement. Plusieurs paramètres sont à prendre en compte dans le retrait, car [4, 49, 50]:

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

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

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

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

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

La limitation de ce retrait est souhaitée, car ce retrait engendre des contraintes de traction que ne peut supporter le béton. Donc le béton se trouve étiré dans sa masse, ce qui conduit à l'apparition, des fissures à la surface [4].

b) Retrait endogène (hydraulique) :

Qualifié aussi de retrait d'auto-dessiccation, ce retrait est dû à la diminution de l'humidité interne suite à la consommation d'eau par les hydrates [49]. L'évolution de ce retrait est liée au dosage en ciment ainsi qu'à la cinétique d'hydratation des grains de ciment et à leurs finesse.

De plus, le retrait endogène est un des processus intrinsèques du béton, car il dépend des propriétés du matériau [50].

c) Retrait thermique :

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

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

d) Retrait de dessiccation (séchage) :

Le retrait de dessiccation résulte d'une déformation volumique due au séchage de la masse du béton. L'eau qui n'a pas été utilisée lors des réactions d'hydratation s'évapore à long terme vers les faces exposées du matériau. De plus, le retrait de dessiccation dépend fortement de l'environnement, qui intervient sur l'accélération ou le ralentissement du séchage [50].

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

e) Limitation du phénomène de retrait :

La cause principale du retrait c'est le départ d'eau, de ce fait il existe différentes solutions afin de remédier plus au moins à cela [4, 50]:

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

I.5.2 Propriétés mécaniques :

I.5.2.1 Essais destructif

I.5.2.1.1 La résistance en compression :

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

$$f_{cj} = \frac{F_r}{S} \quad (\text{Eq. I.1})$$

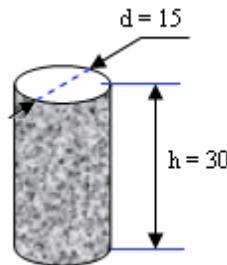


Figure 1.12. Eprouvettes cylindriques (diamètre 16 cm, hauteur 32 cm),

De plus, la connaissance des propriétés mécaniques du béton est primordiale pour une bonne conception des ouvrages. Surtout que le béton est considéré comme étant un matériau fragile lorsqu'il est soumis à l'action d'une charge croissante. En outre, le béton ne laisse pas apparaître des déformations importantes avant sa rupture, et il se comporte mieux en compression qu'en traction. La résistance mécanique des bétons dépend de plusieurs paramètres [4]:

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

I.5.2.1.2 La résistance en traction :

La résistance à la traction (f_{t28}) est peu étudiée en comparaison à la résistance à la compression, du fait qu'elle est beaucoup plus faible que cette dernière. De plus, la résistance à la traction s'annule même complètement si des fissures de retrait se sont développées [4]. Selon les normes en vigueur, il existe 3 principales méthodes d'essais de traction :

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

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

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

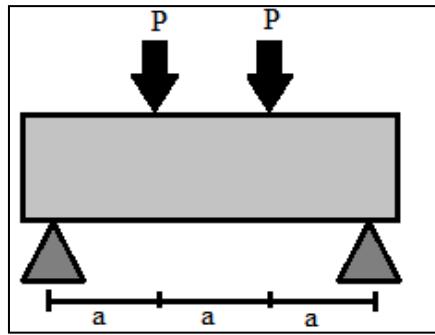


Figure I.13. Schématisation du dispositif d'essai de traction par flexion

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

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

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

Appelé «Essai Brésilien», cet essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux forces opposées (Figure I.14).

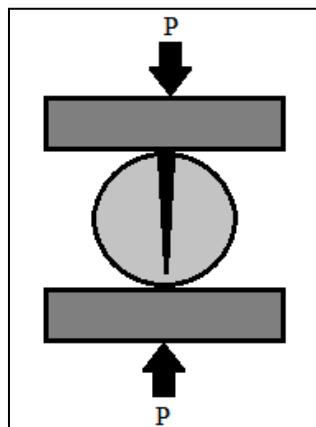


Figure I.14. Schématisation du dispositif d'essai de traction par fendage

La résistance en traction sera exprimée par l'équation suivante (Eq. I.3) :

$$f_{tj} = 2 \frac{p}{\pi D L} \quad (\text{Eq. I.3})$$

Avec :

D : Diamètre du cylindre

L : Longueur du cylindre

I.5.2.1.5 La résistance en traction directe :

Cet essai est considéré comme étant le plus délicat et le plus difficile à réaliser parmi les trois. En effet, sa mise œuvre nécessite une préparation des éprouvettes par sciage des extrémités, le collage de têtes de traction parfaitement centrées, et cela, sans aucun effort de flexion (Figure I.15) [4].

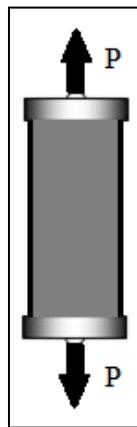


Figure I.15. Schématisation du dispositif d'essai à la traction directe

I.5.2.2 Essais non destructif

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

- Les principaux désavantages de ces méthodes sont les suivants : les résultats ne sont pas obtenus immédiatement, le béton des éprouvettes peut être différent de celui de l'ouvrage car la cure ou le serrage peuvent être différents, les résistances des éprouvettes dépendent également de leurs dimensions et de leurs formes.
- Plusieurs méthodes non destructives d'évaluation ont été mises au point. Ces méthodes sont basées sur le fait que certaines propriétés physiques du béton peuvent être reliées à la résistance et peuvent être mesurées par des méthodes non destructives. Ces propriétés physiques du béton comprennent la dureté (capacité de rebondissement), la capacité de transmettre les ultrasons, la capacité à résister à l'arrachement, ...

On cite ici deux essais

- Essai stérométrique NFP 18-417,
- Essai d'auscultation sonique NFP 18-418.

I.5.3 Propriété physico-mécaniques :

I.5.3.1 Durabilité :

La durabilité d'un ouvrage se caractérise par sa capacité à durer dans le temps sans subir de dégradations, tout en conservant son intégrité et en maintenant son niveau de fiabilité. La notion de durabilité d'un ouvrage se traduit par un ensemble de spécifications techniques basées sur des méthodes d'essais directes ou indirectes, sur l'expérience et sur des préconisations de fabrication, et d'entretien avec des frais aussi réduits que possible [51]. La durabilité des bétons dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, la qualité des matériaux et de l'environnement.

I.5.3.1.1 Principaux mécanismes de dégradation :

I.5.3.1.1.1 La corrosion des armatures 54% :

La corrosion des armatures provoque généralement un phénomène de gonflement, qui va générer des contraintes internes dans le béton et de ce fait causé des altérations de l'aspect extérieur de l'ouvrage (éclatements, fissures, apparitions de traces de rouille) [4].

I.5.3.1.1.2 Gel/dégel 10 % :

Les dégradations par le gel/dégel résultent d'un endommagement progressif. Elles dépendent de la température, du nombre de cycles (température positive à température négative) et de la durée du gel. Le gel/dégel cause l'accroissement des pressions hydrauliques dans les capillaires, qui engendre des fissures de la pâte de ciment, si la pression est supérieure à la résistance à la traction de la pâte [51].

I.5.3.1.1.3 Alcali-réaction 9 % :

C'est un ensemble de réactions chimiques complexes, qui peuvent se déclencher entre certains alcalins solubles (oxyde de sodium Na_2O et oxyde de potassium K_2O) du béton, sur une certaine forme de silice réactive, et cela, en présence d'eau. Cette réaction provoque en

général, au bout de quelques années, des déformations et des microfissurations du béton, à cause des contraintes expansives qui peuvent dépasser la faible résistance en traction du béton [51].

I.5.3.1.1.4 Autres attaques chimiques 4 % :

a) Action des chlorures :

Les ions chlore sont spécifiques à certains environnements (eau de mer et sels fondant). La pénétration des ions chlore par diffusion ou par capillarité à l'intérieur du béton, fait augmenter la vitesse de corrosion [4].

b) Attaques acides :

Les bétons présentent une basicité élevée, de ce fait ils ont une certaine réactivité vis-à-vis des solutions acides telles que (pluies acide, les marécages, milieux industriels, réseaux d'eau usée) [4].

c) Attaque sulfatique :

Après durcissement du béton, il y aura formation d'aluminate. Cette dernière peut réagir au contacte de l'eau sulfatée, ce qui va former de l'ettringite. L'ettringite est un hydrate contenant des sulfates, et dont les propriétés de gonflement sont connues depuis plus d'un siècle [51].

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

Les dégradations qui peuvent apparaître, suite à ces attaques, sont : un phénomène de gonflement (augmentation de contrainte) et des fissurations. Il existe d'autres paramètres pouvant aussi causés la dégradation des ouvrages en béton, on peut citer : le phénomène de carbonatation, lixiviation, conditions climatiques et variation thermique, ou encore la surcharge des ouvrages [4].

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

I.6 Formulation des bétons :

Présentation dans les Diapos 5

I.7 Malaxage du béton [NF P18-404] :

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

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

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

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

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

Il est à noter que trois éprouvettes par échéance ont été utilisées pour effectuer les essais.

Les photos I.1 et I.2 montrent le malaxeur, les moules ainsi que le bassin de conservation des éprouvettes.



Photos I.1 : Malaxeur et moules utilisés pendant les essais



Photos I.2 : Eprouvettes et bassin de conservation

I.8 PROGRAMME DES ESSAIS A L'ETAT FRAIS:

I.8.1 Maniabilité :

Elle désigne la facilité de mise en place du béton. Les propriétés mécaniques de ce dernier sont liées à sa maniabilité.

I.8.1.1 Affaissement au cône d'Abraams :

L'appareillage et les procédures ont été suivis tels que décrits dans la norme [NF P 18-451]. Elle est schématisée dans la figure III.9 :

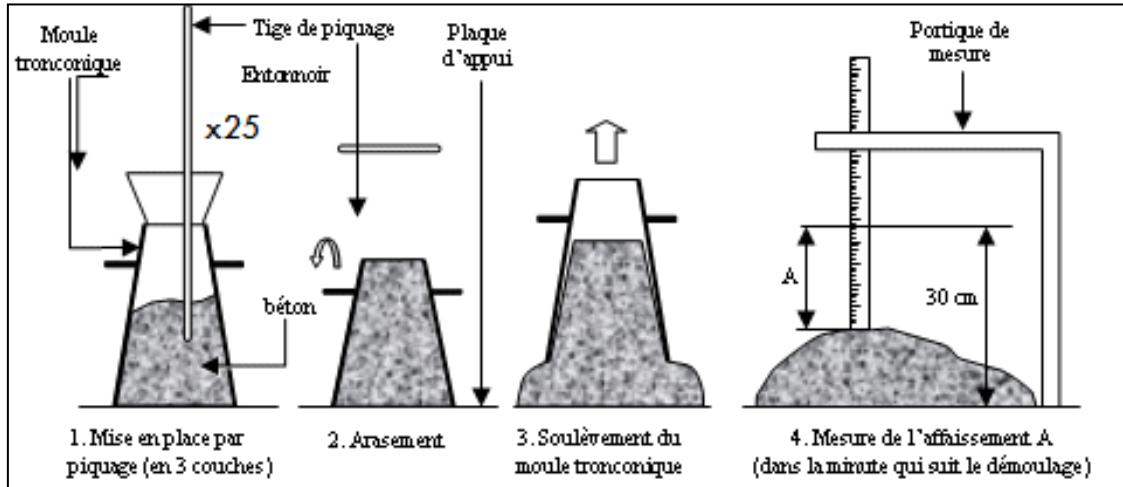


Figure I.16 . Schématisation de la mesure de l'affaissement au cône d'Abraams [4]

Dans cet essai, il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids, vu que quand le béton n'est plus maintenu il s'affaisse selon sa consistance (Photos I.3).



Photos I.3 : Essai réel d'affaissement au cône d'Abra

Les consistances données par la norme [NF P 18-451] sont présentées dans le tableau I.9 :

Tableau I.9. Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône

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

I.8.1.2 Table à secousses :

L'ouvrabilité pour les bétons ferme se mesure par la table à secousses, conformément aux normes [NF EN 12350-5]. Le moule tronconique est rempli de béton, et démoulé puis il reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue (Figure I.17 et Photos I.4). L'étalement est donné par la formule (Eq.I.4) :

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

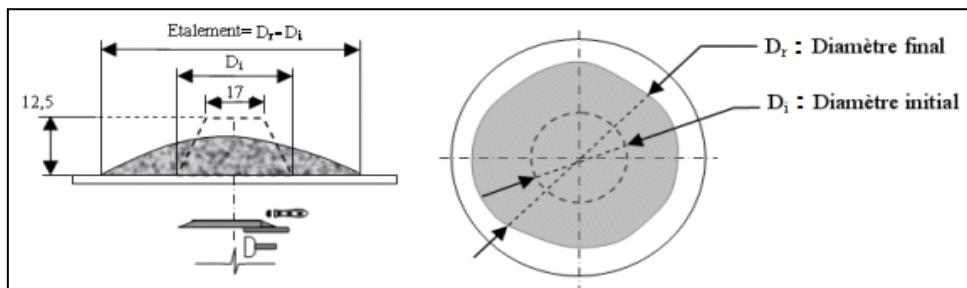


Figure I.17 : Schéma de la Table à secousses [4]

Avec :

D_r : Diamètre final de l'étalement

D_i : Diamètre initial de l'étalement



Photos I.4 : Table à secousses utilisée lors des essais

Il existe d'autres essais relative a d'autres types de béton comme les BAP ils seront présentés dans la diapo 6 : Page 21

I.9 PROGRAMME DES ESSAIS A L'ETAT DURCI:

Les essais à l'état durci ont été citéz dans la partie I.5.2 voici quelques photos d'essais



Photos I.4 Essais de résistance à la compression



Photos I.5 Essais de résistance à la Traction et traction par flexion



Photos I.6 Essais de mesure du retrait

I.10 CONCLUSION :

Au terme de ce chapitre, on peut prétendre à une meilleure connaissance du matériau béton. En effet, connaitre les constituants du béton, leurs mécanismes d'action et leurs propriétés, permet de dégager une problématique importante concernant la compatibilité entre les différents constituants du béton dans les mélanges hydrauliques.

Ainsi l'évolutivité et la complexité des constituants tels que les granulats, et plus particulièrement le sable de carrière, ne permettent pas d'avoir une approche solide sur l'action de tous les sables dans les matériaux cimentaires. De plus, la différence des méthodes d'exploitation, ainsi que des sources minéralogiques assombrissent la contribution de ces derniers dans les bétons hydrauliques.

CHAPITRE 2

Les produits céramiques

Les produits céramiques

1. Généralités

- Les matériaux de terre cuite sont utilisés depuis plusieurs siècles dans le bâtiment. Ils se sont adaptés à l'évolution de la construction et à ses impératifs, tant dans le domaine traditionnel que dans celui dit industrialisé.
- Les caractéristiques des produits de terre cuite permettent à ceux-ci d'être employés dans toutes les parties de la construction avec efficacité. Ce sont essentiellement les briques, les tuiles, les éléments pour planchers, les conduits de fumée, les carreaux rustiques, des éléments de décoration, etc.
- Ils sont fabriqués à partir d'argiles communes devenant souvent rouges à la cuisson (sauf les argiles calcaires dont la couleur de cuisson varie du rose au jaune et au blanc).

2. Classification

On peut les classer selon le critère de la porosité :

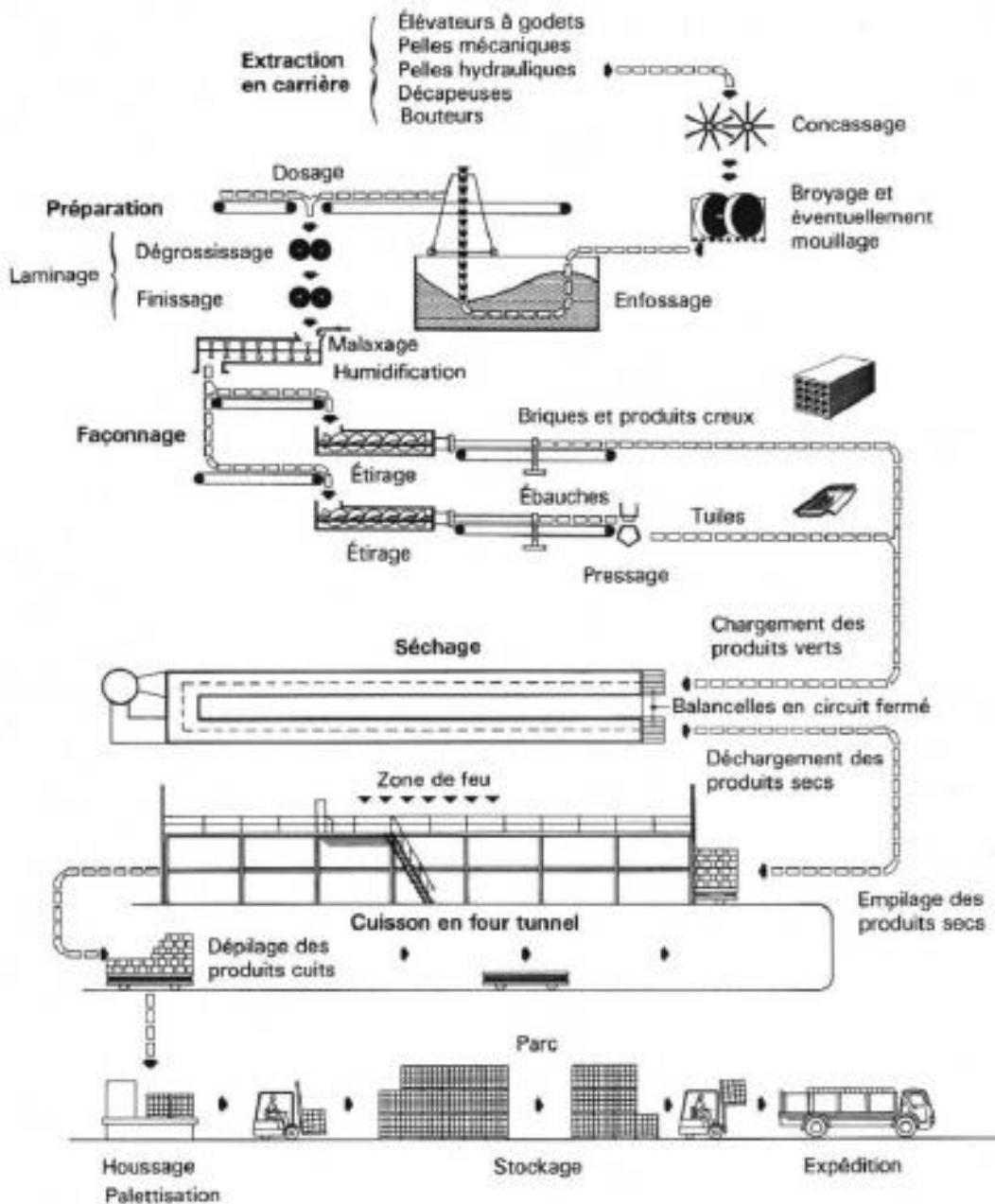
- Les produits poreux (se laissent rayer par l'acier) et notamment les terres cuites (briques, tuiles, bardeaux,...etc), les produits réfractaires (briques) et la faïence,
- Les produits non-poreux (vitrifiés) comme les grès céramiques (carreaux, tuyaux), les porcelaines et briques spéciales pour pavage.

3. Matières premières

- Les matières premières utilisées pour la préparation de la plupart des produits céramiques et terre cuite traditionnels sont généralement :
 1. des mélanges d'argiles (silicates d'alumine – exemple smectite, kaolinite, illite) et/ou de limons offrant la plasticité à la pâte ;
 2. du quartz, du sable, des feldspaths, du basalte, de l'andésite, du porphyre, de la chamoite, de la calcite, du schiste pour fournir la structure à la céramique (squelette), pour réduire la température de fusion lors de la cuisson (fondant) et réduire la plasticité de la pâte ;
 3. de l'eau pour adapter la plasticité de la pâte.
- Pour certains produits réfractaires, l'argile, laquelle joue un rôle de liant, est mélangée à des minéraux possédant des propriétés de résistance à la cuisson. Ces minéraux sont entre autres la bauxite calcinée, la cyanite, la corindon, du carbure de silicium et du graphite.
- Pour la production de produits poreux et de grandes capacités isolantes, des matières organiques (sciures de bois, fibres de cellulose, polystyrène,...) sont ajoutées dans la pâte.

4. Fabrication

- Bien que les produits céramiques et les produits traditionnels en terre cuite soient multiples, les opérations de fabrication sont similaires et se succèdent dans un ordre identique.
- Ainsi, le schéma principal de fabrication d'un produit céramique ou en terre cuite comprend un nombre limité d'opérations présentées ci-après :
 1. L'extraction des matières premières (argiles et limons)
 2. La préparation de l'argile
 3. Le façonnage
 4. Le séchage
 5. La cuisson



1. L'extraction des matières premières

- L'exploitation se fait le plus souvent à ciel ouvert, les forts tonnages de terre employés nécessitent l'installation de l'usine dans la mesure du possible à proximité de la carrière.
- L'extraction suit généralement le processus suivant :
 - enlèvement de la découverte au bulldozer, à la pelle chargeuse mécanique et même à la décapeuse,
 - extraction de l'argile à l'aide d'une pelle mécanique (argile sèche) ou l'excavateur à godets ou au marteau piqueur ou encore les explosifs quand l'argile est trop dure,
 - transport de l'argile à l'usine suivant la distance et la topographie des lieux : wagonnets, téléphérique, camions, bandes transporteuses.

2. La préparation de l'argile

- Le but visé est d'obtenir une pâte plastique et homogène ou une poudre adéquate suivant le produit à façonner. Cela nécessite diverses opérations qui diffèrent quelque peu selon la terre dont on dispose et le degré de plasticité de la pâte désirée (molle, demi-ferme, ferme).

3. Le façonnage

• Une fois la pâte convenablement préparée, il faut lui donner les formes désirées, c'est à dire celles des produits finis utilisés dans la construction. Cette opération s'appelle façonnage et est réalisée par deux grands types de machines :

- les presses mécaniques ou hydrauliques,
- les filières (deux rouleaux lamineurs débitant une nappe de pâte qu'on découpe à la longueur désirée).

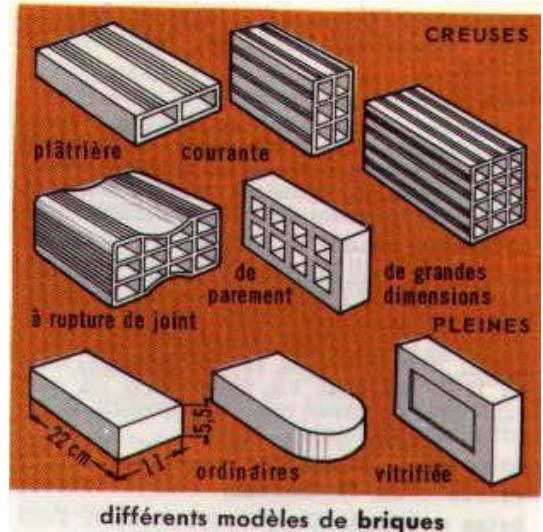
• Briques pleines:

Sont soit directement moulées à la presse ou à la filière.

Celles passées à la filière sont moins poreuses, plus résistantes et plus régulières,

• Briques de parement:

Sont façonnées par double pressage . En effet, après avoir obtenu des briques pleines à la presse ou à la filière, on les laisse sécher légèrement puis on les repasse à la presse. Ainsi leur compacité est plus grande, leurs arêtes vives et elles même plus calibrées,



• Briques perforées:

Pour alléger le produit fini et faciliter le séchage, on incorpore à la filière des noyaux qui réalisent diverses perforations dans le pain de la pâte d'argile pour obtenir ainsi des produits perforés de dimensions variables.

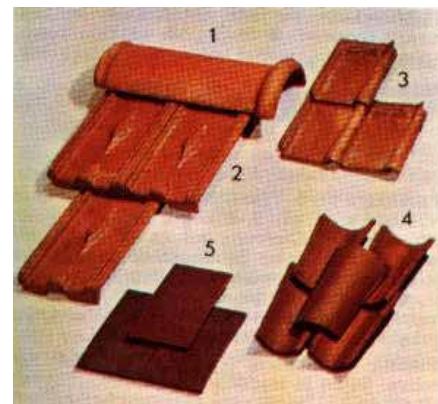
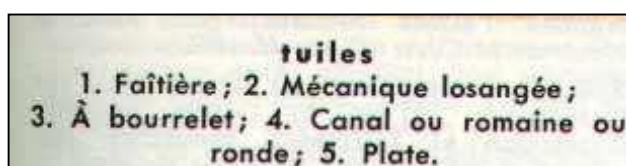
• Briques creuses:

On comprime la pâte dans une chambre avant de la passer dans une filière; les machines employées (étireuses ou mouleuses) utilisent divers procédés pour comprimer l'argile : palettes, piston, cylindre cannelés, hélices.

• Tuiles:

Leur façonnage se fait :

- en pâte molle pour tuiles plates et canal,
- en pâte ferme pour tuiles à emboîtement.



4. Séchage :

• La préparation de la pâte demandait la présence de l'eau pour la rendre facile au façonnage. Cette eau est à éliminer une fois le produit ayant pris sa forme. Le séchage a pour but d'éliminer lentement l'eau de façonnage sans déformer le produit et permettre sa manutention et son empilement dans le four.

• Cette opération est délicate car il faut interrompre le séchage au-dessous de la limite de tension que peut supporter la pâte (W_p); cette limite varie avec la nature de l'argile et la cohésion de la pâte, d'où

les difficultés pour assurer un séchage homogène.

- Il y a deux procédés de séchage :

Séchage naturel:

- Il se pratique par exposition des produits dans des hangars légers à l'air libre, ceci demande de grandes aires de dessiccation et une quantité importante de main-d'oeuvre. Il est très long à réaliser et est très irrégulier. Il est actuellement abandonné.

Séchage artificiel :

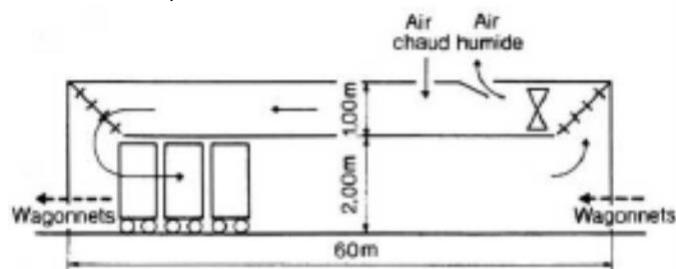
- S'effectue dans des installations permettant d'assurer à la fois un chauffage progressif et une ventilation régulière.

- Le séchage est rationnel grâce au conditionnement de l'air utilisé, à l'évaporation et au réglage de l'hygrométrie de l'air et de la ventilation.

- Les installations dans lesquelles il se pratique :

- Séchoir compartimenté en chambres où la circulation longitudinale de l'air se fait en sens inverse de l'entrée des produits. L'opération dure de un à cinq jours suivant les argiles,

- Séchoir tunnel où circule un train de wagonnets portant les produits à sécher, dans le sens inverse de l'air chaud et sec récupéré des fours. Le séchage dure de six heures à trois jours. Dans les deux cas, on peut réduire notablement la durée de séchage par un brassage énergique de l'air au moyen de puissants ventilateurs (12 à 48 heures).



5. La cuisson

- La cuisson permet de consolider thermiquement une céramique en un corps dense composé de grains fins et uniformes. On associe régulièrement la cuisson à une agglomération ou une densification des particules de la céramique.

- Une cuisson conventionnelle est accomplie à environ deux tiers de la température de fusion des matériaux à pression atmosphérique. Les températures de cuisson sont comprises en générale entre 800 et 1500°C.

- Voici les températures types de cuisson pour différentes production de céramique et de produits en terre.

Produits céramiques Intervalles de températures

- Brique de maçonnerie : 1.000°C à 1250°C

- Brique de pavage : 1.050°C à 1200°C

- Brique poreuses : 900°C à 1000°C

- Tuiles : 980°C à 1100°C

- Faïences : 1150°C à 1.250°C

- Carreaux céramiques : 1150°C à 1250°C

- Porcelaines : 1150°C à 1250°C

- Grains d'argile expanses: 1050°C à 1150°C

- Porcelaines électriques: 1300°C à 1400°C

- La cuisson des produits céramiques s'effectue selon trois stades : montée en température, palier et refroidissement.

- Elle est assurée par deux grandes familles de fours : les fours intermittents et les fours continus ou fours tunnel.

• Fours intermittents

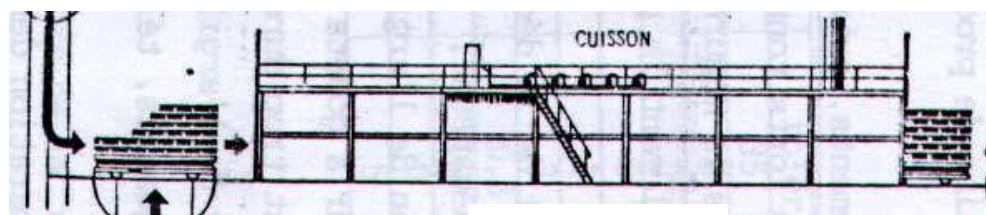
Les fours à feu intermittent ou fours intermittents sont utilisés dans le cas de productions spéciales de petites séries. Ce sont des appareils dans lesquels l'ensemble four/produit subit un cycle thermique complet : chauffage et refroidissement.

• Fours continus ou fours tunnel

Les fours tunnels sont apparus dans la seconde moitié du XXème siècle et permettent la production massive de pièces en céramique (briques, tuiles, cuvettes, hourdis, ...).

Dans ces fours, les produits à cuire sont empilés sur des wagonnets qui traversent lentement les 3 zones : échauffement, cuisson et refroidissement.

Les brûleurs jet ou à flamme courte sont installés sur les côtés du four avec une densité plus importante en zone de cuisson.



6. Emaillage

Pour imperméabiliser les produits poreux (tuiles, briques, etc.), on pratique une deuxième cuisson qui vitrifie la glaçure (produit de traitement superficiel), produit projeté au pistolet ou par trempage dans le bain d'émail.

7. Vernissage ou flambage

Il se fait surtout sur les tuyaux de grès. On projette du sel marin dans le four, le sel se volatilise à 800 °C; ses vapeurs se condensent à la surface des produits et se décomposent vers 1200 °C pour former avec la silice un vernis (silicate de soude).

8. Engobage

Consiste à recouvrir la face vue du produit (tuile, brique de parement,... etc), d'une mince couche de coulis d'argile contenant le colorant voulu. L'opération se pratique par pulvérisation, après le séchage. Il existe des engobeurs automatiques. Après cuisson, l'engobe prend un aspect mat, alors que l'émaillage rend le produit brillant.

9.Triage et stockage

Après élimination des produits non vendables (produits voilés, fendus, incuits), les éléments subissent des contrôles :

- de qualité : l'aspect et la couleur,
- de calibrage : afin de les classer en plusieurs choix selon la destination.

Leur stockage se fait en piles de produits de même choix en nombre déterminé pour faciliter le comptage et de plus en plus sur palettes en bois en plein air ou sous hangars. On utilise des chariots élévateurs pour l'empilage et le chargement sur wagon ou camion.

5. Les avantages et les inconvénients des briques de construction

Les avantages

En effet la brique peut servir :

1. Comme élément:

- Porteur :Rc pour les briques pleines 6 à 35 MPa
- De remplissage: légèreté des briques creuses
- De parement : effet décoratif

- d. De cloison: grand format et faible épaisseur
- 2. Comme élément insonore
- 3. Comme isolant thermique
- 4. Pour réduire les charges
- 5. Pour faire obstacle à la montée de l'humidité

Les inconvénients

- 1. La fragilité
- 2. Perméable aux gaz

CHAPITRE 3

Les métaux ferreux



Chapitre 3

Les métaux ferreux

4.1 Généralités

- Le fer a fourni aux hommes dès la préhistoire ustensiles et outils, mais n'a connu son apogée qu'au siècle avant dernier, qui fut marqué par des constructions tel que la Tour Eiffel.
- Malgré l'apparition du béton, fer, fonte et acier demeurent des matériaux modernes de la construction.
- Nous trouvons ces matériaux :
 - 1. Sous forme de matériaux ouvrés** : - ossatures métalliques enrobées de béton: poutrelles diverses; - barres d'acières pour armé le béton : béton armé, béton précontraint; - menuiserie métalliques, persiennes; - tuyaux et plaque de fonte, tuyaux d'acier pour canalisations; - serrurerie de fer forgé; - ferrures diverses, clous, feuillards, etc.
 - 2. Sous forme d'outillage et de matériel de chantier** : - petit outillage en acier dur; - pelles, pioches, brouettes, échafaudages, coffrages; - gros matériel : grues, bétonnières, engins de terrassements, etc.
- En raison de son altérabilité et sa faible résistance mécanique, le fer n'est plus utilisé industriellement.
- Les métaux les plus utilisés dans la construction sont la fonte et l'acier puisqu'ils présentent les avantages suivants : haute résistance, plasticité, conductibilité thermique élevée, assemblage par soudage. En revanche, ces matériaux présentent aussi des inconvénients à savoir : corrosion en présence d'eau et déformation sensible avec l'augmentation de la température.

4.2 Minérais

- Le fer n'existe pas à l'état pur : il faut traiter les minérais extraits du sol et il sont très variés.
- Ces minérais sont un mélange naturel :
- d'oxydes de fer : - magnétite Fe_3O_4 , - hématite Fe_2O_3 , - hématite brune 2 $Fe_2O_3 \cdot 3 H_2O$, - Sidérose $FeCO_3$.
- la gangue : partie minérale sous forme de silice, d'alumine, de calcaire, ...etc.

4.3 Classification des métaux ferreux

Selon la teneur en carbone, les métaux ferreux se subdivisent en deux groupes :

1. les fontes : le pourcentage de carbone est compris entre 1.7 % et 6.67 %
2. les aciers : le pourcentage de carbone < 1.7 %

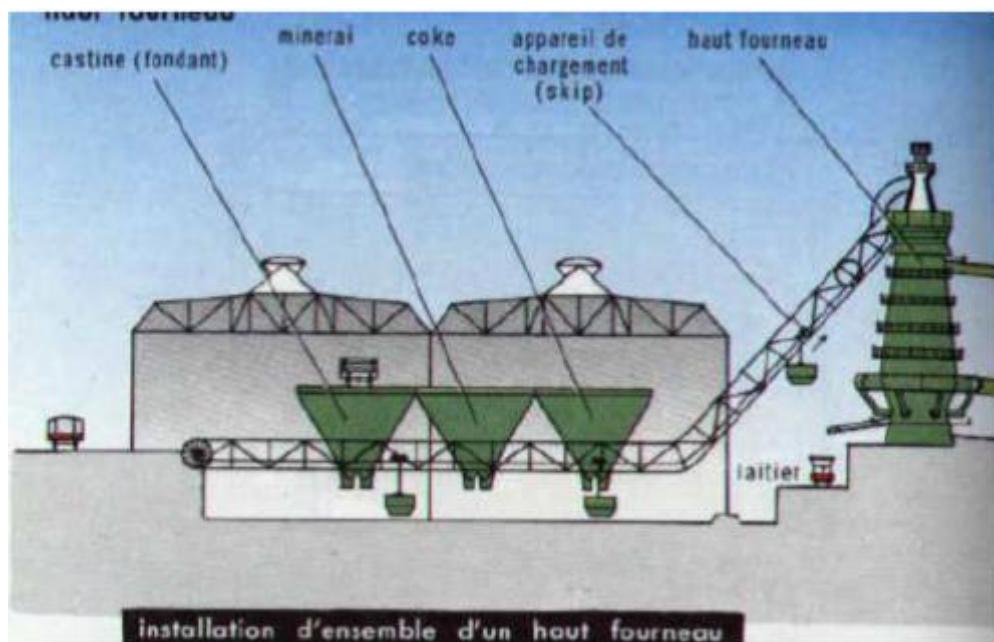
4.4 La fonte

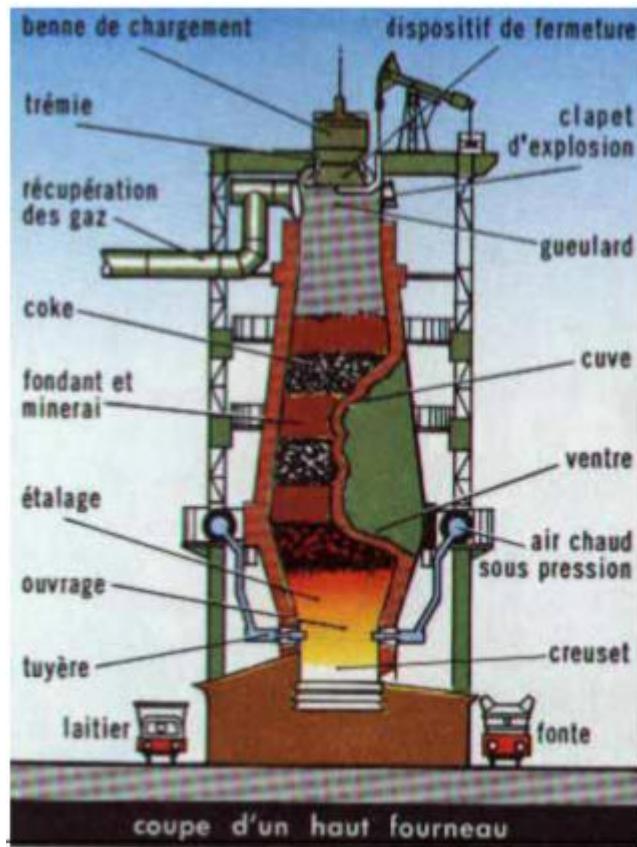
- Ce métal est obtenu à partir de matières premières naturelles qui sont les minérais de fer.

- Les fontes sont constituées par un métal de dureté variable, de couleur blanche, truitée ou grise, suivant la teneur de carbone qui fait varier les propriétés des fontes.
- Leur grande coulabilité permet d'obtenir des pièces de fonderie aux formes complexes. Le pourcentage élevé de carbone (entre 2 et 4%) rend les pièces assez fragiles, et les bruts sont inadaptés aux déformations à froid (forgeage, laminage,...) et difficilement soudables.

Processus d'élaboration :

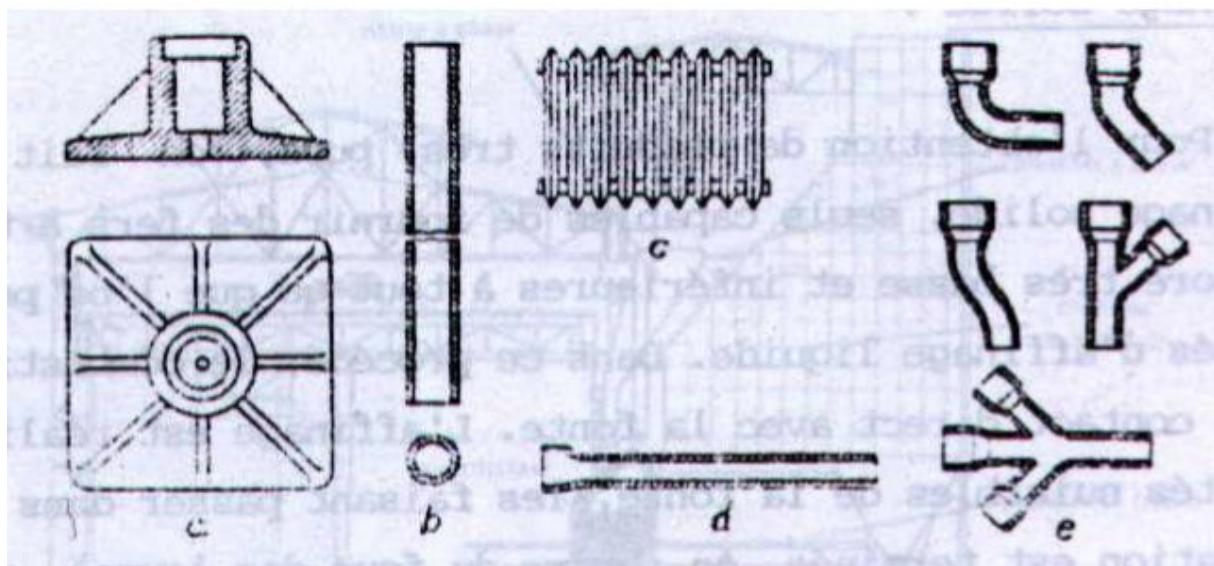
- L'élaboration de la fonte se fait dans le haut-Fourneau, la charge introduite dans le gueulard se compose de minerai de fer, de coke métallurgique et d'un fondant. □ Sous l'action de leur propre poids, ils descendent peu à peu en se réchauffant jusqu'à la fusion. Le métal fondu composé de la fonte et du laitier s'écoule dans le creuset. Par suite d'une différence sensible entre les masses spécifiques de la fonte et du laitier; ce dernier s'accumule à la surface de la fonte, il est évacué à travers le trou de coulée du laitier situé plus haut que celui de la fonte.
- La fonte du haut-fourneau est divisée suivant la destination en trois groupes : Fonte d'affinage, Fonte de moulage, Alliage ferrométallique.
- Plus de 80% de la production totale est composée de la fonte blanche d'affinage, essentiellement employée pour la fabrication de l'acier (le fer est à l'état de Cémentite Fe₃C).
- La fonte de moulage grise est employée pour l'obtention de pièces comme les radiateurs de chauffage, des plaques de cheminées,....
- Les alliages ferro-métalliques et la fonte de moulage constituent près de 20%.
- Les alliages ferro-métalliques qui contiennent un taux important de silicium et de manganèse, ils sont utilisés pour améliorer la qualité de l'acier dans des alliages spécifiques.





Utilisations :

- La fonte grise trouve essentiellement son emploi dans la construction, spécialement pour la fabrication des pieces travaillant à la compression (gabots, poteaux); ainsi que pour les produits sanitaires (tubes, radiateurs de chauffage).
- Le laitier de haut-fourneau est une matière très utilisée dans l'industrie des matériaux de construction (M.D.C) : liants, pierres artificielles, matériaux d'isolation thermique (pierre ponce de laitier, laine de laitier).
- Le gaz du gueulard de haut-fourneau est employé en qualité de combustible pour l'usine métallurgique.
- Les alliages ferro-métalliques sont utilisés comme additions dans la production de l'acier pour améliorer sa qualité.



4.5 L'acier

Elaboration :

- L'acier (% C < 1,8) est obtenu en décarburant la fonte (% C = 2÷4), et éliminant le plus possible le souffre et le phosphore tout en modifiant la teneur des autres éléments (Si, Mn).
- Les procédés pratiques d'élaboration de l'acier sont :
- l'affinage liquide, qui fournit la quasi-totalité de l'acier employé, le métal restant liquide à la fin de l'opération, □ l'affinage solide, qui donne un produit à l'état pâteux à la fin de l'opération.

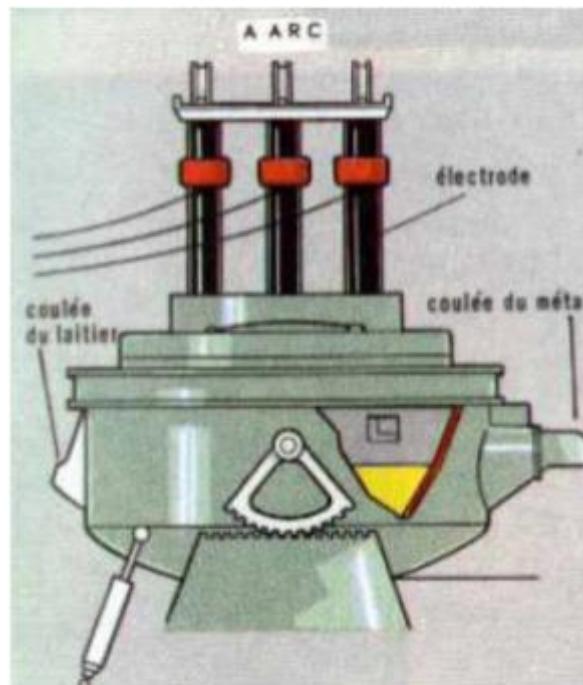
1. Affinage liquide :

Affinage par l'air aux convertisseurs Bessmer et Thomas

- La fonte liquide arrivant du mélangeur est versée dans le convertisseur, à travers lequel on souffle un intense courant d'air qui brûle les impuretés de la fonte. Cette combustion dégage en même temps la chaleur nécessaire pour éléver la température du bain depuis celle de la fonte en fusion (1200 °C) jusqu'à celle de l'acier (1600 °C).
- Le convertisseur Thomas diffère de Bessmer par son revêtement réfractaire, qui est basique (chaux) au lieu d'être acide comme dans le Bessmer (silice). Le procédé acide ou Bessmer, permet de traiter les fontes non phosphoreuses riches en silice (1,5 à 2%). Le procédé basique ou Thomas, permet de traiter les fontes phosphoreuses (1,7 à 2%) avec peu de silice (0,4 à 0,6%). La durée du traitement varie entre 15 et 30 minutes.

Affinage au four Electrique

- Ce procédé permet d'obtenir un affinage très poussé du métal, il est réservé à l'élaboration d'acier de qualité.
- Le chauffage est assuré par un arc électrique jaillissant entre des électrodes de carbone et les matières placées dans le four.
- Ce procédé utilise à côté de la fonte liquide, des déchets de métallurgie appelés riblons.



2. Affinage solide :

- Capables de fournir des fers à teneur en souffre et phosphore très basse et inférieures à tout ce que l'on peut obtenir par les procédés d'affinage liquide.
- Dans ce procédé, le combustible (charbon de bois) est en contact direct avec la fonte. L'affinage est réalisée par oxydation des impuretés nuisibles de la fonte, les faisant passer dans le laitier.
- Lorsque l'opération est terminée, on retire du four des loupes spongieuses de métal contenant de nombreuses scories. Ces loupes sont singlées pour éliminer le maximum de scories.

Classification des aciers selon leur composition :

- D'après la composition chimique, les aciers sont divisés en acier au carbone et aciers alliés.

Acier au carbone

- contiennent du carbone en proportion croissante, du magnésium en proportion supérieure au carbone et des traces de phosphore de silicium et de souffre.

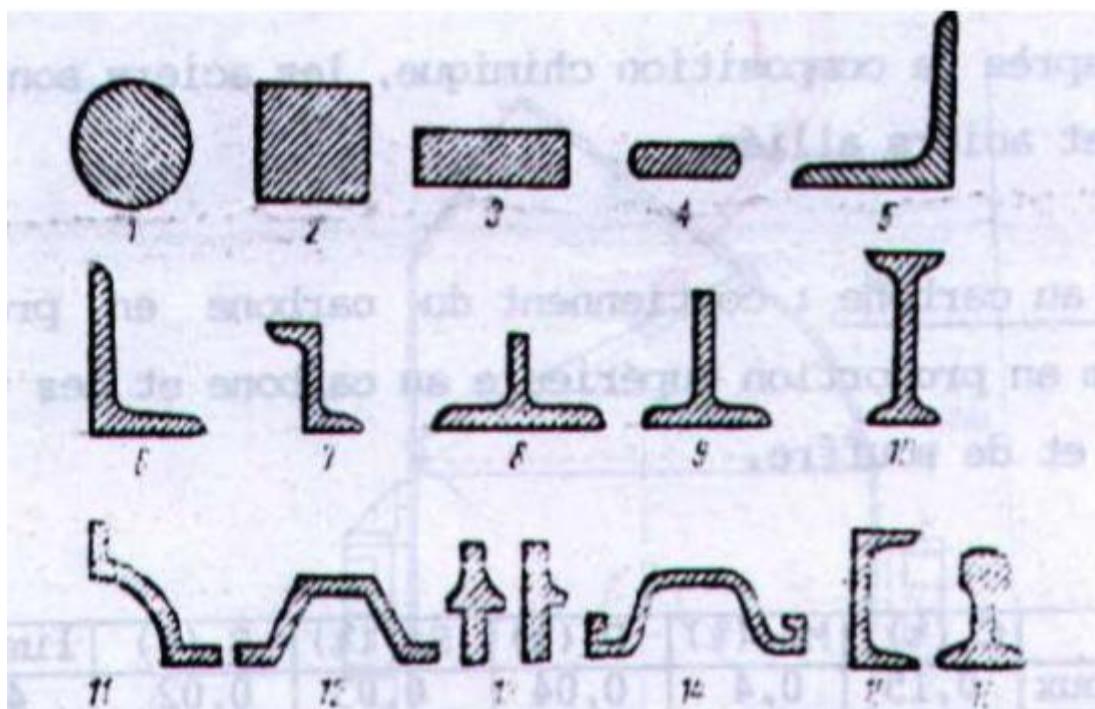
Acier allies

- Sa composition est variable suivant l'emploi. Les éléments allies sont en proportion variant généralement entre 0 et 5%.

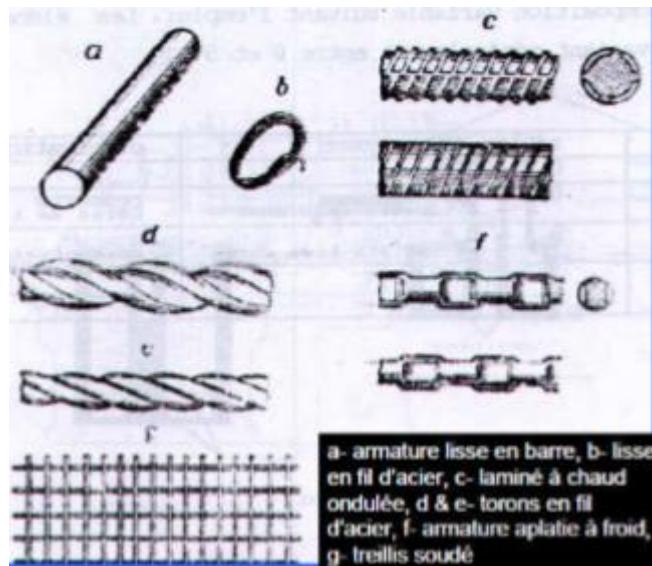
Eléments alliés	Ratio (%)	Observations
carbone	0,2 ÷ 0,7	
Magnésium	0,1 ÷ 0,7 2 ÷ 4 (acières spéciaux)	ressorts tôles de transfo.
Magnésium	0,3 ÷ 0,8 12 ÷ 14 (acières très durs)	voies ferrées
S, P, Cu, Ni, Cr, V, Molybdène	< 0,1	---

- Les propriétés mécaniques des aciers au carbone sont moindres que les aciers alliés (voir tableau).

Nature de l'acier	Résistance à la traction (MPa)	Allongement (%)
Acier de carbone	400-900	5-30
Acier allié	700-1000	9-13



1- rond, 2- carré, 3- plat, 4- barres, 5- cornières: égales, 6- inégales, 7- profils: en Z, 8 & 9- en T, 10- en double T, 11- de colonne, 12- d'auge, 13- de fenêtre, 14- de palplanche, 15- en U, 16- rail.



a- armature lisse en barre, b- lisse en fil d'acier, c- laminé à chaud ondulée, d & e- torons en fil d'acier, f- armature aplatie à froid, g- treillis soudé

- La transformation est obtenue par voie d'étirage, la tige passe au travers d'un trou conique et se trouve sertie. La traction de la tige est effectuée avec des efforts supérieurs à la limite de fluidité de l'acier et la tige s'allonge.
- Quand aux armatures, on procède à une torsion à froid pour les onduler; cette torsion se fait autour de leurs axes longitudinaux.
- L'acier riche en carbone trouve son utilisation non seulement dans la marine mais aussi dans les ouvrages de navigation (écluses, barrages). Contrairement à la fonte, il travaille à la traction et aux chocs (engrenages, matériel de dragage, godets, ...etc).

4.6 Propriétés générales des métaux ferreux

1. La ténacité : résistance opposée aux déformations (traction, compression, flexion)
2. L'élasticité : faculté de reprendre sensiblement la forme primitive après déformation passagère
3. la dureté : résistance au frottement, à l'usinage (en relation avec la ténacité).
4. La fragilité : propriété de ne pas résister au choc : acier trempé, la fonte.
5. La résilience : l'inverse de fragilité, c'est-à-dire la résistance au choc.
6. La malléabilité : facilité de déformation au marteau, à chaud, à froid, décroît avec la teneur en C.
7. La durabilité : faculté de pouvoir être étiré en fil, barre, larmes, etc.
8. La fusibilité: propriété de fusibilité .Elle croît avec la teneur en C – Intérêt pour fonderie.

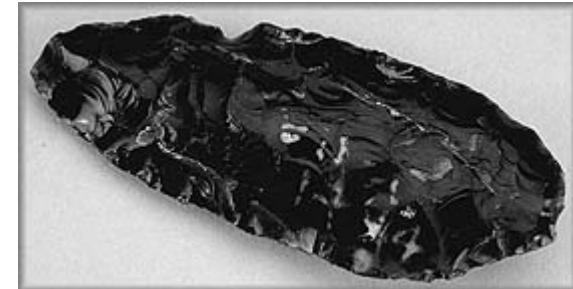
CHAPITRE 4

Le Verre

Le Verre.

Le verre existe déjà naturellement depuis plusieurs centaines de milliers d'années. L'Homme l'utilisa pour la première fois il y a 100 000 ans sous forme d'obsidienne, (verre naturel d'origine éruptive) pour fabriquer des outils, des armes coupantes et des bijoux.

L'origine des verres remonte à la plus haute Antiquité. Il y a six milles ans, des potiers Egyptiens ont fabriqué le premier verre tout à fait par accident en cuisant leurs poteries. Le premier verre était un émail, mélange de sable et d'autres minéraux fondus sur la surface d'objets en céramique. Il y a trois mille ans, des artisans découvrirent que si l'émail avait une épaisseur suffisante, il pouvait servir seul à fabriquer des objets sans pour autant qu'il soit supporter par la terre cuite.

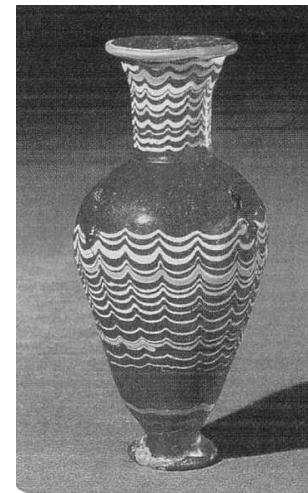


«Fer de lance» tsimshian en obsidienne, du Yukon et de l'Alaska le long de la côte du Pacifique (1937),

Un texte Latin de Pline raconte que le verre devrait sa naissance à un concours de circonstances. Selon la légende, des marins de Syrie, n'ayant pas trouvé de pierre sur une plage, utilisèrent des blocs de nitre (carbonate de soude) issus de leur cargaison pour leur feu de camp.

L'intensité des flammes permit de fusionner le sable et le nitre en un liquide inconnu auparavant et transparent : le verre. Mais ceci n'est qu'une légende car l'élaboration du verre nécessite une température d'environ 1300°C.

Il semblerait donc que le verre ait plus de 5000 ans. En effet, lors de nombreuses fouilles effectuées en Egypte, les archéologues ont retrouvé divers petits objets en verre : petits flacons de parfum, coupes, perles, etc. Ces objets antiques étaient opaques et colorés en vert ou en bleu.



Amphore opaque bleue, Egypte,
1400-1360 av. J.-C.

Les premiers verriers s'aperçurent qu'ils pouvaient faire fondre le sable plus facilement en ajoutant de la soude au contenu de leurs fours. La soude ou la potasse sous forme de cendres de bois abaissait le point de fusion du sable à tel point que les fours ordinaires permettaient d'atteindre les températures nécessaires.

Mais la seule addition de la soude n'était pas suffisante pour faire du verre de bonne qualité : celui-ci avait une vie courte et même l'eau l'attaquait. Suite à quoi, on découvrit qu'en ajoutant la chaux, sous forme de calcaire broyé, le verre obtenu n'était plus attaqué par l'eau. C'est là une formule de base connue maintenant sous le nom de verre à la chaux sodique.

ELABORATION.

1. *Matières premières.*

la silice : c'est à la silice que le verre doit sa haute viscosité et son état vitreux. La silice fond à haute température (1730°C); on y ajoute généralement des fondants. Le sable de verrerie utilisé est un sable très fin dont les plus purs contiennent 99,5 % de silice (les sables quartzeux),

la soude : pour certains verres c'est plutôt la potasse que l'on introduit sous forme de carbonate ou de sulfate. Les silicates alcalins formés sont des corps très fusibles; ils permettent d'opérer en milieu liquide plusieurs centaines de degrés en dessous du point de fusion de la silice (1400°C),

le carbonate de chaux : réduit l'intervalle de plasticité de la pâte de verre et accroît son inaltérabilité,

le groisil : composé de débris de verre cassé, constituant un fondant facilitant l'entrée en réaction des autres constituants.

Outre ces produits de base, on y ajoute pour certains verres : l'oxyde de zinc qui améliore l'éclat, l'élasticité et la résistance à la corrosion des verres,

- l'oxyde de baryum B_2O_3 qui diminue le coefficient de dilatation du verre et améliore la résistance aux chocs thermiques ; il est aussi plus résistant à l'eau (très utilisé dans les verres d'optique et le pyrex),
- l'oxyde de plomb qui entre dans la composition du cristal, Il rend le verre plus éclatant tout en lui conférant une légère teinte jaunâtre, il est plus agréable à couper et à travailler.
- l'oxyde de phosphore P_2O_5 , employé dans le domaine de l'optique.



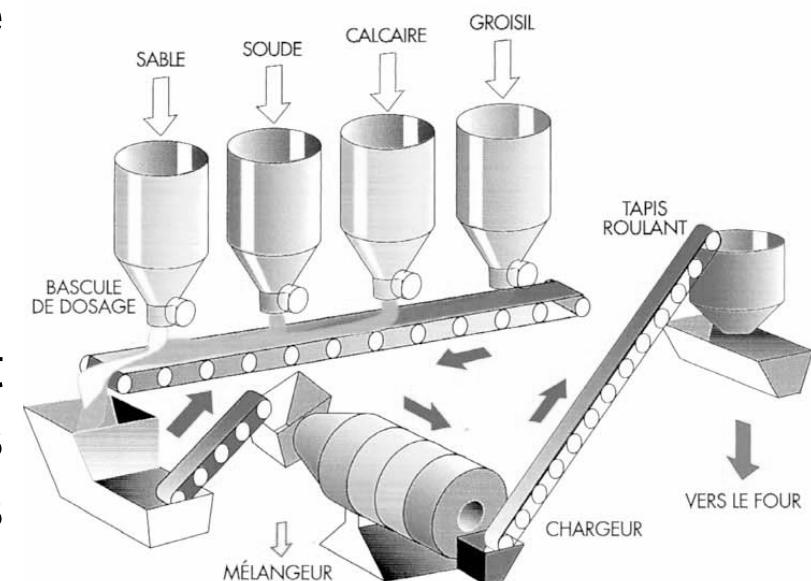
PROCEDE DE FABRICATION.

1. *Préparation des mélanges.*

Le verre se fabriquant au bois, les verreries étaient implantées au voisinage des forêts. Avec l'apparition de la houille, ce combustible remplaça le bois; mais aujourd'hui les fours de verrerie sont chauffés au gaz, au fiuel ou à l'électricité.

On mélange les composants : silice (corps vitrifiant : 70% en masse), carbonate de soude (fondant : 15%), carbonate de chaux (stabilisant : 10%) et autres constituants.

La préparation des mélanges est soumise à des dosages stricts des matières premières auxquelles s'ajoute le groisil.

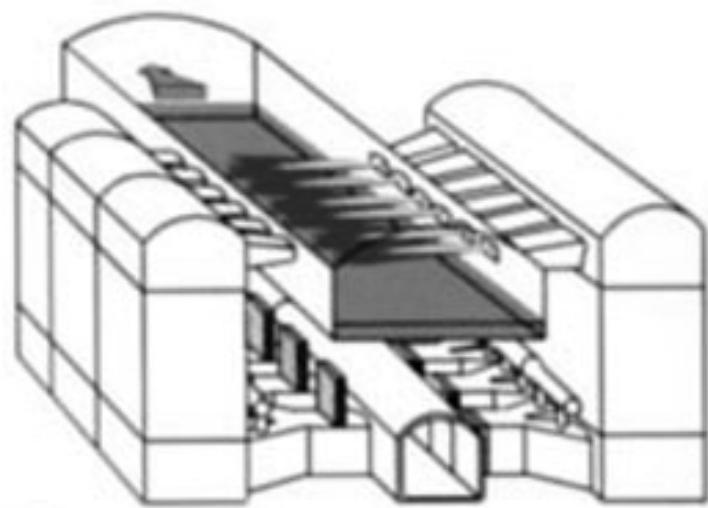


Le mélange est ensuite envoyé vers le four pour y être calciné.

2. Fusion dans le four à bassin.

On les calcine pour en chasser l'eau, cette opération porte le nom de fritte.

La température du four est élevée progressivement jusqu'à 1500°C, sous l'effet de puissants brûleurs au fuel et/ou au gaz. Au cours de sa fusion, le mélange vitrifiable s'écoule lentement dans le four où il sera progressivement affiné. L'affinage consiste à éliminer les bulles de gaz prisonnières du verre fondu en le maintenant plusieurs heures à haute température.



Pour obtenir du verre de couleur, on ajoute au mélange de base les différents colorants suivants :

- violet : oxyde de manganèse,
- jaune : chrome, argent,
- rouge : oxyde de cuivre,
- bleu : oxyde de cobalt,
- vert : oxyde de chrome ou de fer.



On abaisse ensuite la température à 800°C.

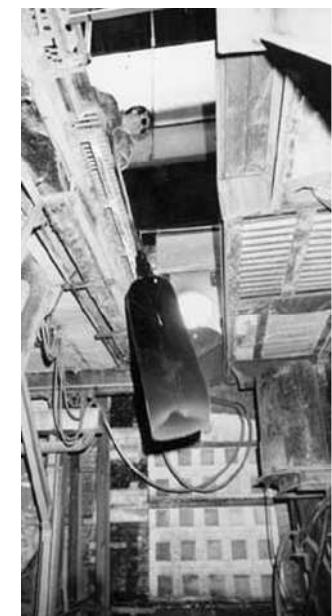
À cette température, la masse du verre formée est encore fluide; mais elle peut être travaillée.

Le façonnage peut se faire par soufflage, coulage ou étirage.



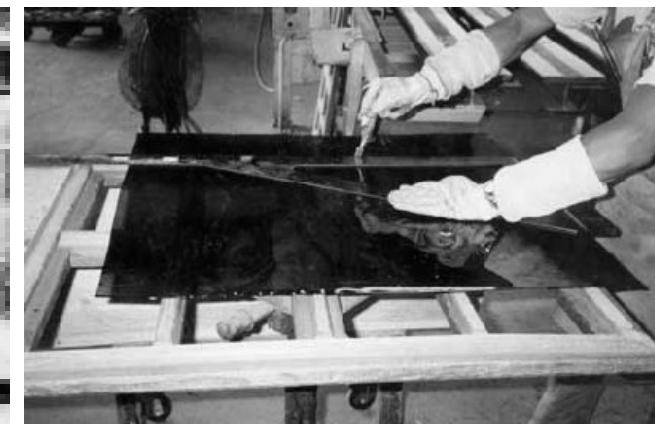
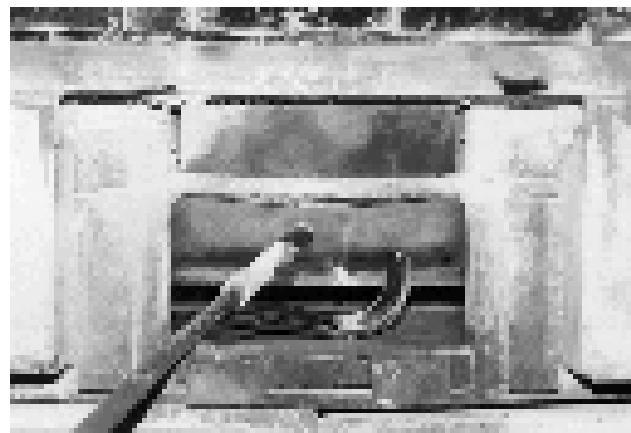
Le verre soufflé : Le cueilleur va chercher le verre en fusion dans le pot installé dans le four où la composition a été enfournée la veille. A l'aide d'une longue canne creuse, il constitue sa boule en plusieurs passes jusqu'à ce qu'elle soit parfaitement homogène.

Le souffleur prend alors le relais. Il va dilater avec art cette ébauche par combinaison de son souffle à la bouche dans la canne creuse et d'un geste de balancement au dessus d'une fosse. Il transforme ainsi peu à peu la boule en un cylindre long de 80 centimètres dont les parois ont une épaisseur de 3 à 4 millimètres.



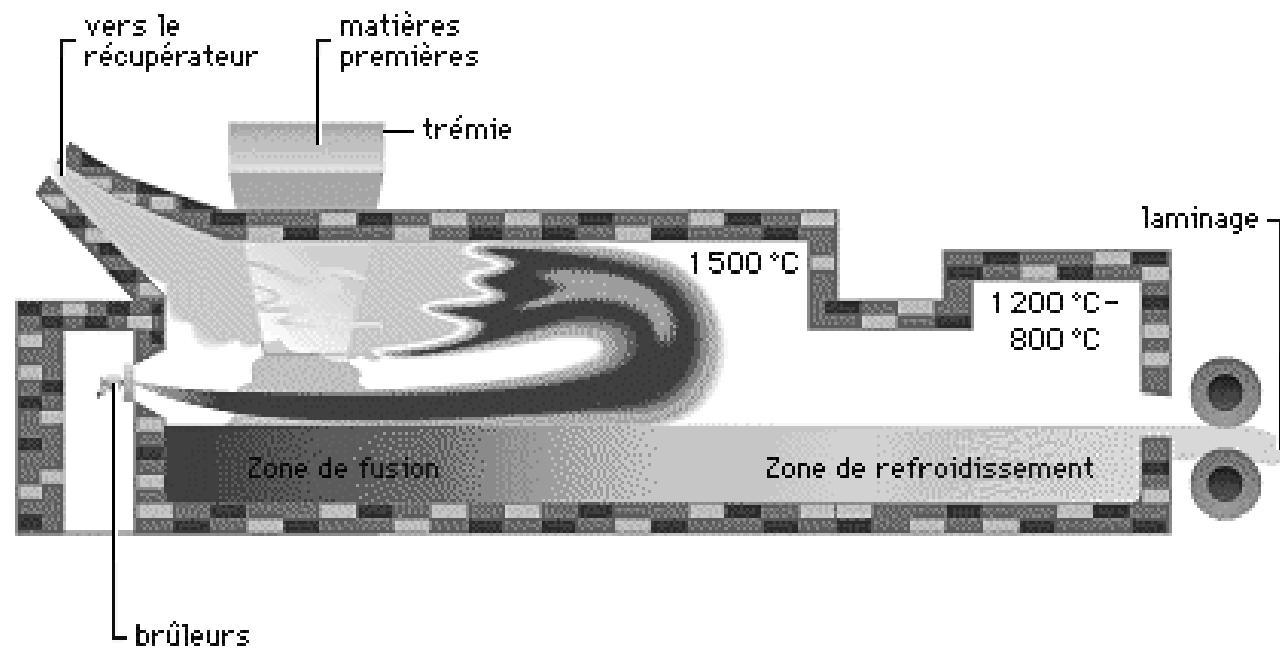
Puis le cylindre (appelé manchon) est coupé en ses extrémités, refroidi et fendu dans le sens de la longueur. Cette opération s'appelle le fendage.

Le manchon est déplié à l'aide d'une taloche en bois pour donner la feuille de verre. La plaque ainsi obtenue est refroidie progressivement dans un tunnel de recuisson, ce qui permet de diminuer les tensions dans le verre et, de ce fait, d'en faciliter la découpe.



Le verre laminé : A la sortie du four on déverse le verre à 1200°C entre deux rouleaux horizontaux espacés de quelques millimètres. Ces rouleaux sont refroidis par circulation d'eau pour éviter le collage du verre.

Des rouleaux transporteurs entraînent le large ruban de verre en direction de l'arche de recuisson où il sera recuit. Ce verre translucide, aussi appelé « verre coulé », a généralement une surface irrégulière.



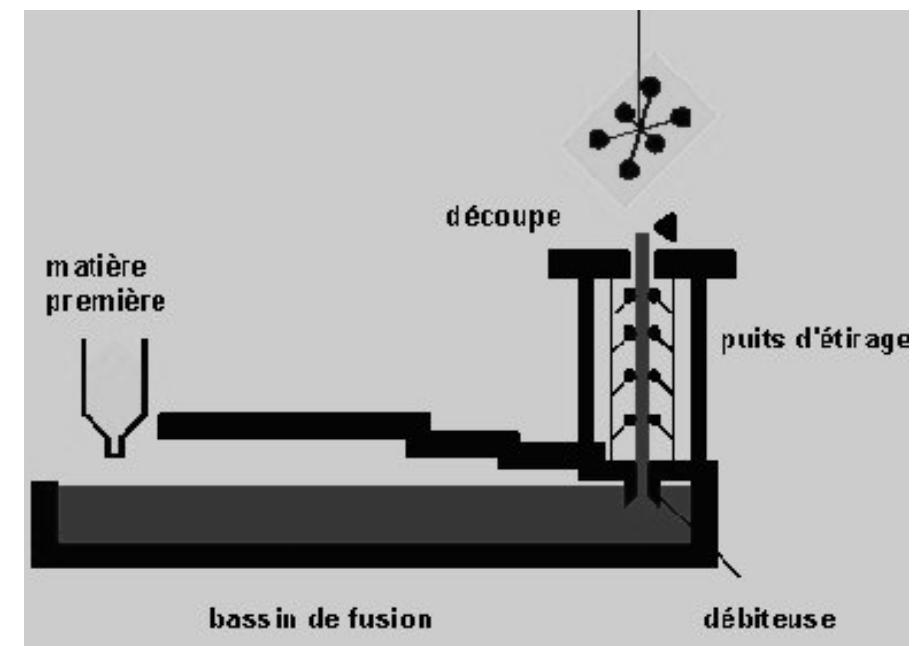
Le verre étiré : Le verre étiré est un verre produit industriellement car obtenu par étirage mécanique. Les plaques de verre étiré sont d'une épaisseur régulière de 2 à 5 millimètres.

Ce procédé a été créé au début du XX^e (1902).

Le four à fusion électrique d'étirage mécanique vertical de procédé Fourcault fonctionne en continu 24 heures sur 24, 7 jours sur 7.

La composition toute entière est réglementée par un automate de pesage ; seuls, les colorants sont rajoutés à la main dans la mélangeuse en fin d'opération.

L'enfourneuse automatique dépose la substance obtenue de façon homogène dans le four. Celle ci vient en effet recouvrir toute la surface du bain.



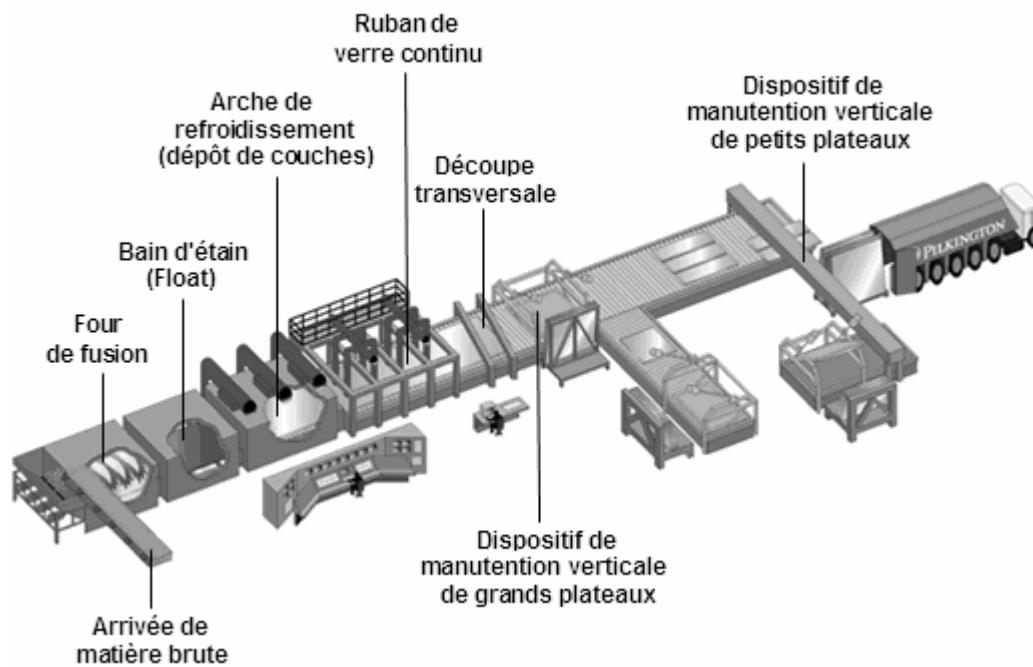
Après fusion, le verre passe dans une gorge pour arriver dans une cellule d'affinage où les bulles sont éliminées.

Puis le verre est étiré selon un procédé vertical dans le puits d'étirage grâce à une débiteuse en réfractaire.

Il est enfin recuit dans une machine d'étirage.

La formation de la feuille se fait en plongeant une barre d'amorce horizontale qui entraîne une lame de verre verticalement dans un puits d'étirage. Le puits est muni d'un dispositif de refroidissement pour que le verre devienne suffisamment rigide et où il recuit et refroidit. L'épaisseur recherchée varie suivant la vitesse de l'élévation de la barre : si celle-ci est lente, le verre est épais ; si elle est rapide, le verre est mince. Ce procédé est utilisé pour fabriquer le verre à vitre car il obtient en continu du verre transparent. Mais la qualité du poli et la planéité des faces ne sont pas aussi satisfaisantes qu'avec le verre float.

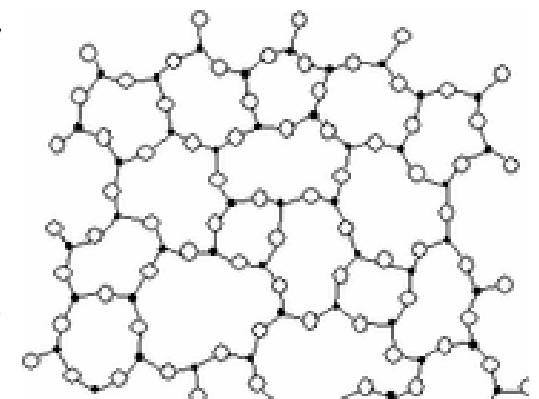
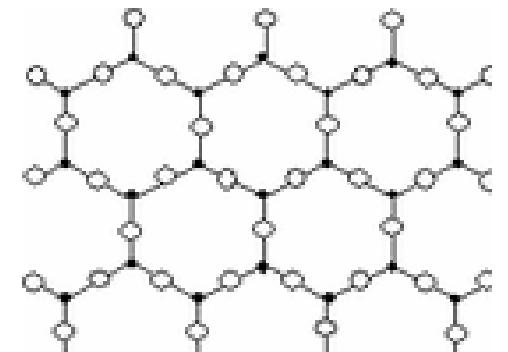
Le verre flotté : Le verre en fusion est coulé sur un bain d'étain fondu. Le principe est basé sur la différence de densité des deux matières qui permet à l'une de flotter sur l'autre (densité du verre 2,5 et de l'étain 7). Sous l'effet de son propre poids, la glace se stabilise en une feuille continue aux faces planes. Elle s'éloigne du four sur des rouleaux transporteurs vers l'étenderie. On obtient une glace avec une surface sans défaut utilisable sans traitement ultérieur.



STRUCTURE.

L'élévation de température de la silice, mettent en vibration ces atomes et changent de place, si bien qu'à un certain moment la structure se déforme et disparaît avec la fusion de la silice. En interrompant l'échauffement, le mouvement des atomes de silice se ralentit et ceux-ci tendent à reprendre leurs places primitives, celles qu'ils occupaient dans la structure cristalline.

Mais les cristaux de silice ne peuvent se former que très lentement, et quoi qu'en fasse, la vitesse de refroidissement est toujours trop grande, si bien que les atomes sont immobilisés dans la position qu'ils occupaient en l'état liquide.



C'est-à-dire en désordre, par groupes non symétriques, suivant un schéma totalement irrégulier, très différente de l'architecture cristalline.

Ce corps cristallin est donc un solide amorphe; c.à.d. non cristallin.

Cependant, les constituants du verre sont des corps cristallisables en soumettant le verre un temps suffisant à une température élevée qui le maintient fluide; on pourra obtenir cette cristallisation. On dit que le verre se dévitrifie. Le verre devient opalin, il perd sa solidité et sa transparence.

Ce défaut est plus observable sur les verres à base de potasse.

Ce dernier refondu, donne de nouveau un verre identique au primitif.

Lors du refroidissement du verre, apparaît dans sa masse des forces internes de compression et de traction.

PROPRIETES.

1. Transparency.

Le verre incolore ou blanc, laisse filtrer à peu près toute l'énergie solaire. Une vitre de 5 mm d'épaisseur n'arrête qu'environ 15% de l'énergie solaire. Aussi, il peut être opaque ou opalescent. On fabrique actuellement des verres perméables aux rayons infrarouges.

2. Densité et porosité.

La densité du verre varie avec celles des constituants, ex. : le verre ordinaire présente une densité variant entre 2,5 et 2,7 (qu'une feuille d'un mètre carré et d'un millimètre d'épaisseur pèse 2,5 kg), le verre à glaces offre une densité de 2,46 et le cristal une densité de 3,4.

La porosité est nulle. La grande compacité du verre le rend bon conducteur de l'électricité et de la chaleur.

3. Coef. de dilatation.

Il se brise s'il subit un brusque changement de température car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas en même temps. Le verre ordinaire a un coefficient de dilatation peu différent de ceux du béton et de l'acier (verre = 9.10^{-6} , béton et acier = $10 \div 11.10^{-6}$).

4. Résistance mécanique.

Plus le pourcentage de silice est élevé et plus le coefficient de dilatation est faible ; donc, plus le verre est résistant.

Le verre résiste mieux à la compression qu'à la traction; pour le verre ordinaire la résistance à la compression est de 200 MPa et la résistance à la traction de 20 MPa ($R_T / R_C = 1/10$).

5. Résistance chimique.

Le verre est pratiquement inaltérable. Toutefois, l'eau dissous en quantité extrêmement faible l'alcali du verre, forment un dépôt en surface qui devient peu à peu opaque ; le verre perd de sa transparence. Cette attaque se produit très lentement même à froid. Les silicates alcalins se combinent avec l'acide carbonique contenue dans l'air ce que donne un dépôt blanchâtre à la surface du verre. Exposés aux ultraviolets, certains verres se colorent ou se décolorent. Les verres sont en général attaqués par l'acide fluorhydrique (utilisé pour graver le verre). Le verre peut donc être dissout.

Il est ininflammable, incombustible et imputrescible.

6. dureté.

Seuls les diamants et le carbure de tungstène le rayent. Le verre le plus dur est le verre de Bohème et le cristal est le plus tendre

7. Imperméabilité.

Elle est extrêmement grande mais le verre reste poreux pour certains liquides comme le kérósène ; on dit « qu'il sue ».

8. Conductivité.

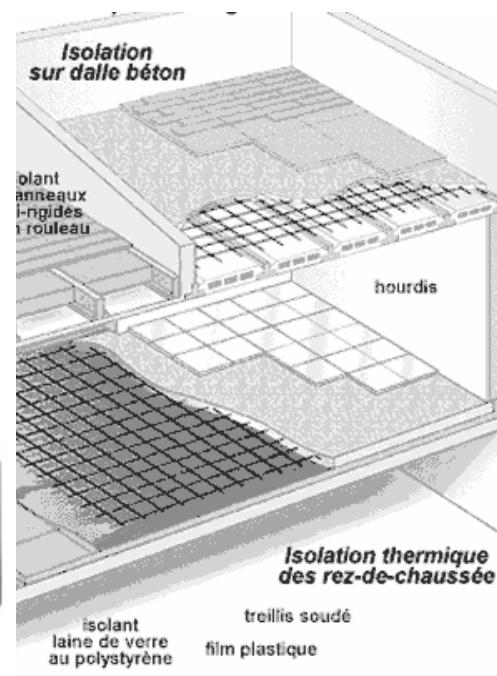
Il est mauvais conducteur (environ 500 fois moins que le cuivre) ; on l'utilise comme isolant électrique. C'est aussi un bon isolant acoustique suivant l'épaisseur de la feuille.

Ceci n'est pas le cas à chaud car il devient conducteur à partir de 250°C.

UTILISATIONS.

Dans la construction, le verre est utilisé sous diverses formes :

- briques de verre pour cloisons translucides (le verre adhère bien au ciment),
- tuiles de verre pour halls industriels,
- laine de verre offrant une bonne isolation thermique et phonique (calorifugeage des chaudières),
- vitres pour vitrage.



Production de la Laine de verre

