

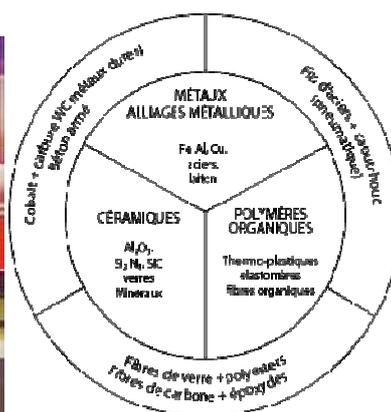
République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de
l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE DE SAIDA DR MOULAY TAHAR FACULTE DES
SCIENCES DEPARTEMENT DE CHIMIE



Matériaux Inorganiques

Polycopie des cours Destinée au 3ème Année
Licence (LMD) Chimie Inorganique

AUTEUR : DR ZAOUI FATIHA



Cours Matériaux Inorganique

Année Universitaires 2020-2021

Avant- propos

Ce recueil de cours de Matériaux Inorganiques est destiné au 3^{ème} année licence Chimie Inorganique, on propose de comprendre les différents types de matériaux inorganiques. L'étudiant acquerra les principales catégories des matériaux inorganiques et quelques procédés d'élaboration importants (céramiques, ciment –verre) ; il/elle développera ainsi une culture générale en matériaux par l'analyse d'applications technologiques simples. Je remercie à l'avance les lecteurs qui voudront bien leur faire part des remarques et critiques que leur a inspirées la lecture de ce polycopié et souhaite que ce polycopié puisse fournir à l'étudiant les informations nécessaires à la compréhension de certains aspects de la chimie inorganique.

Dr Zaoui Fatiha

Le Contenu de ce recueil de cours est reparti comme suite :

Introduction : Problématique de la science des matériaux, les différentes classes de matériaux, le cycle de vie d'un matériau, le recyclage et domaines d'application des matériaux.

Chapitre 1 : Les Céramiques traditionnelles.

Chapitre 2 : Céramiques techniques

Chapitre 3 : Le Ciment

- Les matières premières intervenant dans les ciments.
- La nomenclature utilisée par les cimentiers et la chimie intervenant dans la fabrication du ciment.
- La théorie des colloïdes intervenant dans le processus de prise d'un ciment; - présentation des autres ciments existants (ciments aux cendres volantes, ciments blancs, ciments à haut module de Young,...).

Chapitre 4 : Les verres

- Définition courante et scientifique du mot verre.
- La genèse de l'état vitreux et les différents modèles expliquant cet état.
- Les matières premières des verres (formateur de réseau, fondants, modificateurs,...).
- Les propriétés des verres ainsi que les façons de mesurer ces différentes propriétés (transparence, absorption, résistance mécanique, électrique,...).
- Les différents verres synthétisés pour différentes applications.

Bibliographie:

Il existe de très nombreux ouvrages scientifiques sur la nature et le comportement des matériaux. Voici quelques références d'ouvrages de qualité :

1-Technique d'ingénieur

2-Bulletin de l'union des physiciens N° 790 Matériaux céramiques Structure et propriétés par Daniel MICHEL Centre d'Études de Chimie Métallurgique - CNRS UPR2801 15, rue Georges Urbain - 94400 Vitry-sur-Seine

3-Fiche de cours internet

4-« Les céramiques industrielles : propriétés, mise en forme et applications »

G. Fantozzi, J.-C. Nièpce, G. Bonnefont, Dunod ed. (2013) .caractéristiques spécifiques.

[5- Fabrication-du-ciment https://www.lafarge.fr](https://www.lafarge.fr)

6- <https://www.ciments-calcia.fr/fr/implantations-contacts/fabrication-ciment>

7- J. Barton, C. Guillemet, EDP sciences ed. (2005) « Le verre: science et technologie »

Problématique de la science des matériaux

Contexte :

En observant les composants de n'importe quel objet manufacturé, il vient tout de suite à l'esprit la question : « en quoi c'est fait, et pourquoi ? ».

Le but de ce module est avant tout de fournir des connaissances et des données sur les matériaux à la disposition des concepteurs.

Mais aussi des informations sur les propriétés particulières qu'on peut trouver parmi les trois grandes familles de matériaux que **sont les métaux, les céramiques et les polymères**.

Que disent ces propriétés ? Comment choisir un matériau approprié ?

A l'heure où pullulent des publications listant d'innombrables critères et performances, il convient de revenir à l'exercice primordial : établir soigneusement le cahier des charges pour mieux choisir le bon matériau.

1-Introduction

La science des matériaux est au cœur de beaucoup des grandes révolutions techniques : en génie mécanique, électronique, nanosciences, nanotechnologies.

Les matériaux sont de la matière travaillée par l'homme pour fabriquer des objets. Le procédé d'élaboration procure au matériau une certaine microstructure qui à son tour détermine ses propriétés chimiques, physiques, mécaniques, électriques, thermiques. Il s'agit là des propriétés intrinsèques du matériau.

En conclusion le terme « matériau » désigne la substance dont sont faits les objets manufacturés. Il est plus restreint que le terme « matière », qui désigne les liquides, les gaz et les solides en général. La science des matériaux étudie la matière qui constitue les objets : **métaux, polymères, céramiques, ...**

En général la synthèse des matériaux s'appuie sur l'équation suivante :

Matières premières – prétraitement - Mise en forme - Cuisson - Produits fini - Application

2-Classification des matériaux :

Les matériaux sont classés en familles ou catégories selon leurs propriétés, leur origine, ... par exemple métaux, matières plastiques, matériaux naturels, ...

On classe souvent les matériaux en trois catégories : les métaux, les céramiques, les verres, les polymères et les matériaux composites. Ce classement fait intervenir à la fois :

- les propriétés générales : on a des métaux plus ou moins mous, mais les céramiques et verres sont toujours plus durs et plus fragiles que les métaux ;
- la nature chimique : les matériaux d'une même catégorie ont des structures proches.

Les matériaux composites sont en fait des associations de matériaux pour associer les avantages de chacun.

Pour lister les matériaux les plus connus :

- métaux : fer, fonte, acier, cuivre, aluminium, bronze, or, argent ;
- céramiques : terre cuite, porcelaine, kaolin, grès, carbures, alumine, roches ;
- verres : il existe de nombreux verres utilisés en optique ; notons que les matériaux vitrocéramiques sont à la frontière entre céramique et verre ;
- polymères : bois, papier, coton, caoutchouc, PVC (vinyle), propylène, silicone, polystyrène (expansé ou non), résines, colles, peintures, et de nombreuses marques déposées : Téflon, Plexiglas, Kevlar, Tergal, Nylon, Araldite, Formica, Bakélite, ... ;
- composites : résine époxy renforcée par des fibres de verre ou de carbone, ou bien céramiques renforcées par des particules métalliques (cermet)

Ces matériaux forment donc un compromis de comportement mécanique entre des composants de propriétés opposées. Par exemple, l'un est très dur et l'autre mou. Mais le premier est fragile, le second très tenace. On compense donc les défauts de chacun avec les avantages de l'autre.

Les matériaux hybrides sont constitués de plusieurs matériaux « élémentaires » différents, qui conjuguent leurs propriétés pour améliorer les performances d'un objet.

Cette conjugaison peut se faire dans la masse du matériau, le plus souvent à l'échelle de la microstructure (quelques dizaines de microns) et conduit aux matériaux composites.

3 .Les différentes catégories des matériaux :

Un matériau est toujours tiré de ressources naturelles (matière première) et est toujours transformé pour être utilisable. Les matériaux dits « naturels » sont des matériaux ayant subi peu de transformations et dont l'apparence rappelle la matière d'origine, par exemple :

1-Naturel :

On trouve :

- bois ;
- pierre ;
- fibres végétales (coton, chanvre, ...) ;

terre cuite ;

- caoutchouc (sève de l'hévéa).

2-Artificiel/synthétique :

Certains matériaux ont subi des transformations plus importantes, sont dits artificiels par exemple :

- verre : sable fondu ;
- ciment : roches broyées puis cuites ;
- métal : minerai réduit par la chaleur (haut fourneau) ou un traitement chimique (dissolution dans un acide, une base) et/ou électrochimique (électrolyse).

3- Matériaux Composite

Un **matériau composite** est un assemblage d'au moins deux composants non miscibles (mais ayant une forte capacité de pénétration) dont les propriétés se complètent. Le nouveau matériau ainsi constitué, hétérogène, possède des propriétés que les composants seuls ne possèdent pas.

Un matériau composite se compose comme suit :

Matrice + Renfort + Optionnellement : charge et/ou additif.

Exemples : le béton armé = composite béton + armature en acier, ou le composite fibre de verre + résine polyester.

Les matériaux composites ne forment pas une classe de matériaux à part. Ils sont obtenus par mélange de matériaux provenant chacun de l'une des trois classes précédentes. Leurs propriétés se trouvent modifiées de façon continue par la proportion de chaque composant. Le phénomène, qui permet d'améliorer la qualité de la matière face à une certaine utilisation (légèreté, rigidité à un effort, etc.) explique l'utilisation croissante des matériaux composites dans différents secteurs industriels. Néanmoins, la description fine des composites reste complexe du point de vue mécanique de par la non-homogénéité du matériau.

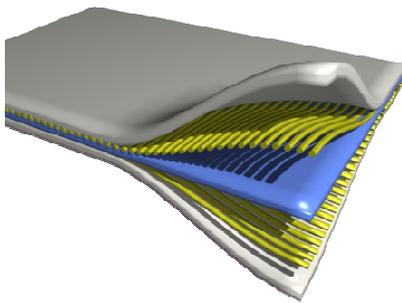


Figure N°1 : matériaux composite [1]

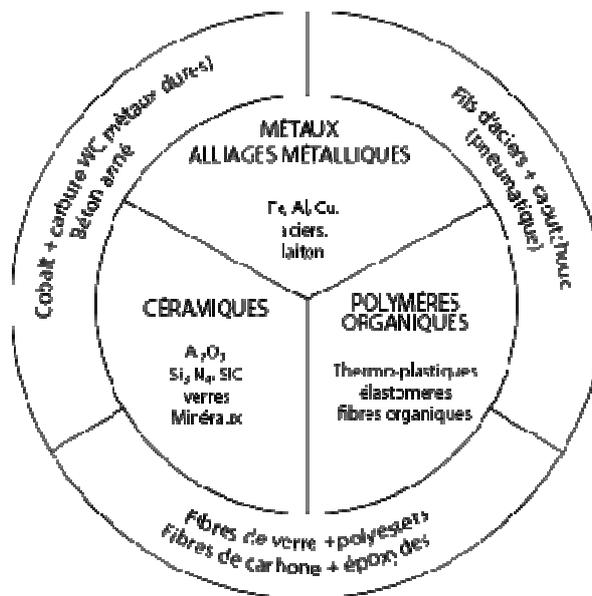


Figure N°2 : Classification des matériaux [2]

4-Propriété générales des matériaux

Les propriétés des matériaux se classent en 6 catégories en fonction des agents auxquels ils sont exposés :

- Mécanique
- Thermique
- Optique
- Electrique
- Magnétiques
- Chimique.

S'ajoute autre propriétés comme la résistance aux agressions chimique inflammabilité résistance au rayon UV.

5-Cycle de vie des matériaux

Les matériaux sont semblables à des organismes vivants : eux aussi naissent, vivent un certain temps tout en évoluant jusqu'à mourir.

Les phases de vie des matériaux sont :

a) L'élaboration

Rares sont les éléments qui peuvent être utilisés ou mis en contact avec les consommateurs sans traitement préalable. Certains matériaux ne peuvent s'obtenir qu'à la suite d'un traitement physico-chimique des matières premières qui le composent.

Par ailleurs, les produits finis doivent répondre à des exigences techniques qui suivent un règlement précis encadré par la juridiction de chaque pays. Ces directives ont pour objectif d'assurer la sécurité de l'utilisateur, sa santé, ou encore de protéger l'environnement.

b) Le vieillissement

Un matériau vieillit au contact de son environnement immédiat qui lui impose des contraintes. Les échanges chimiques permanents avec le milieu extérieur laissent des marques. Certains matériaux sont plus sensibles que d'autres à certains phénomènes : cela dépend de leur nature.

Comme exemple la corrosion

Il convient d'anticiper ces modifications :

- soit pour évaluer le temps de vie d'un produit ;
- soit pour assurer sa protection et ainsi bénéficier d'une durée d'existence plus longue.

c) La fin de vie

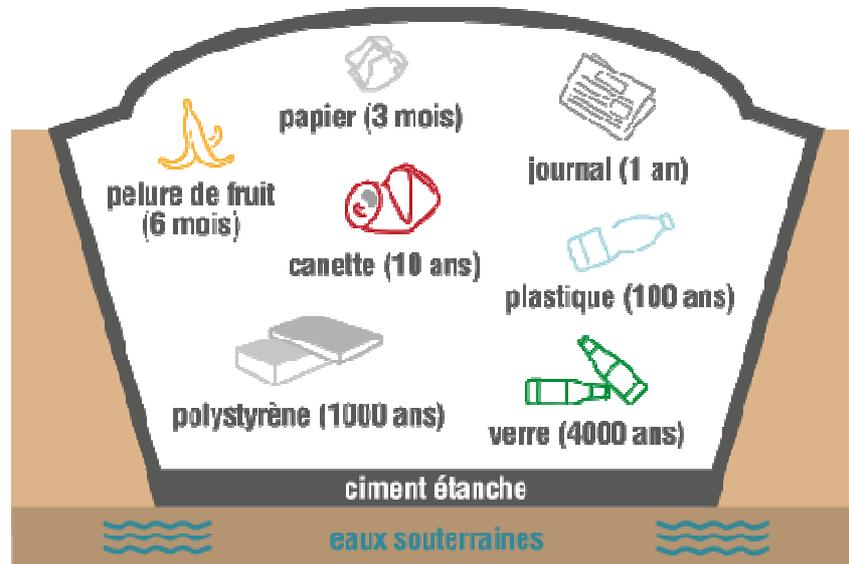
Un produit peut arriver en fin de vie pour plusieurs raisons :

- parce qu'il a rempli sa fonction (une bouteille en plastique vide par exemple) ;
- ou parce qu'il n'est plus en état de remplir sa fonction (matériel devenu obsolète ou abîmé).

Il existe à ce stade trois traitements possibles :G

- le matériau est recyclé pour être à nouveau utilisé comme matière première ;

- le matériau est **éliminé et revalorisé** ; on peut par exemple transformer un pneumatique en poudre de granulat pour réaliser un revêtement à faible émission sonore, ou encore utiliser du bois pour se chauffer. On parlera alors de revalorisation énergétique ;
- dernier cas, les déchets sont **enfouis** sur un site de stockage (75 % du volume des déchets enfouis est constitué de nos ordures ménagères).



Stockage des déchets et durée de dégradation

Figure : Exemple cycle de vie des matériaux [3]

Mais enfouir les déchets ne fait que masquer le problème : certains matériaux comme le verre ou le polystyrène mettent plus de 1 000 ans à se dégrader.

CHAPITRE I

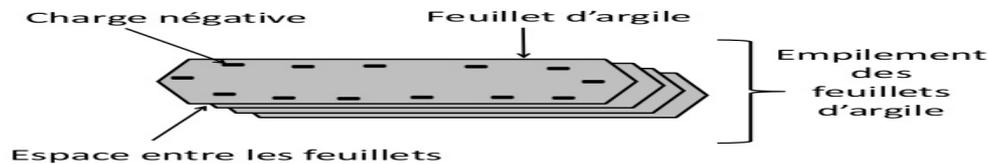
Céramique Traditionnelle

I.1.Introduction

Le mot céramique vient du terme grec « keramikos » qui veut dire de l'argile cuite .Les céramiques traditionnelles sont celles qu'on trouve dans notre environnement quotidien : arts de la table, sanitaires. Longtemps artisanales, les techniques traditionnelles se sont largement adaptées et améliorées. Ils ont une structure cristalline ou partiellement cristalline, ou verre, dont le corps est formé de substances essentiellement inorganiques et non métallique, qui nécessite de hautes températures .Les céramiques ont en général une structure cristalline parfois associé à une phase amorphe, lorsque la majorité est amorphe on parle de vitrocéramique, lorsque la totalité est amorphe on parle de verre.

I.2. Les matières premières et leurs préparations:

La matière première est obtenue par des argiles résiduelles (Produit de l'altération des roches initialement formées) ou sédimentaires (Transportées par l'eau et peuvent contenir du calcaire, de sable, etc.) La fabrication des céramiques d'une manière générale part d'une poudre. Pour les céramiques traditionnelles, il s'agit de matières premières naturelles (terre ,glaise, argile, kaolin).



Structure de l'argile

Figure N°3 : Structure de l'argile [4]

Dans la plupart des cas, on met en forme cette poudre avant de la « cuire »:

- soit on travaille la poudre sous forme de pâte, en y ajoutant un peu d'eau ou un liant organique qui sera éliminé lors de la cuisson; cette pâte peut être travaillée à la main (poterie traditionnelle) ou injectée dans un moule.
- soit on la travaille sous forme de barbotine, c'est à dire d'une suspension dans l'eau, en ajoutant beaucoup d'eau et un défloculant (silicate de sodium) ce liquide est versé dans un moule absorbant l'eau (par exemple en plâtre) et forme une couche mince sur les parois que l'on peut démouler après séchage.
- soit on remplit un moule de poudre sèche.

I.2.1 .L'aspect Rhéologique Des pâtes et Des Barbotines :

Une barbotine de coulage permet de réaliser des pièces de formes complexes à partir de moules en plâtre...La prise de la barbotine sur les parois du moule nécessite que celui-ci absorbe l'eau contenue par cette pâte liquide. . L'épaisseur de la prise se fera en fonction du

temps et l'humidité du moule, la densité de la barbotine, les capacités filtrantes de la pâte déposée et ses propriétés rhéologiques.

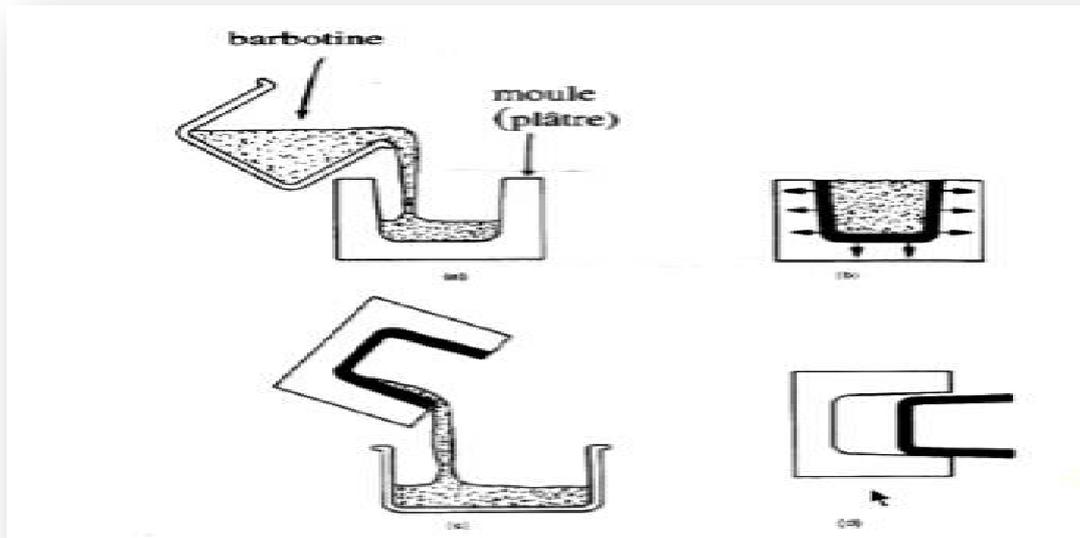


Figure N°4: La prise de la barbotine [4].

I.2.2. Caractéristiques d'une barbotine de coulage :

➤ **La densité :**

Montre la teneur en minéraux de la barbotine et la quantité d'eau de mise en œuvre. Plus la densité sera élevée et moins la barbotine contiendra d'eau, ce qui permettra de ne pas saturer trop rapidement les moules de travail.

➤ **La viscosité apparente :**

La viscosité caractérise l'écoulement de la barbotine. Celle-ci doit permettre une fluidité suffisante de la barbotine pour assurer un remplissage correct des moules et de leurs détails sans prendre trop de temps.

➤ **La thixotropie:**

Ce mot compliqué désigne le comportement pseudo plastique d'une barbotine. C'est à dire l'aptitude qu'a une barbotine à se figer lorsqu' on la laisse au repos. Elle définit la qualité du coulage.

➤ **Quantité d'eau utilisée :**

Elle doit être la plus faible possible pour donner de bons compromis entre la saturation des moules, la densité, la viscosité et la thixotropie.

➤ **Influence de la température :**

Lorsque vous délayez des matières pour préparer une barbotine, l'agitation crée rapidement un échauffement dû à la faible quantité d'eau utilisée. Lorsque la température de mesure est plus élevée que la température de travail de la barbotine il faudra savoir interpréter les résultats pour situer le comportement de la barbotine après refroidissement.

➤ **L'effet du temps**

On observe souvent qu'une barbotine préparée la veille à évolué lorsque on fait de nouvelles mesures le lendemain. Cela peut-être dû à l'effet de la température au moment du délayage, mais aussi au fait que les particules d'argile et de kaolin, sortes d'empilages lamellaires, se sont "ouvertes" à retardement et ont réduit l'action des électrolytes. Le temps de délayage doit donc prendre en compte la phase de préparation immédiate et celle qui suit jusqu'à une stabilisation des propriétés pseudo plastiques de la barbotine.

La préparation à partir d'argileux secs est la plus efficace, les particules éclatent sous l'effet de l'hydratation et l'eau additionnée d'électrolytes est plus rapidement en contact avec les feuillets argileux

I.2.3. Ajouts des électrolytes défloquant

Des ajouts de défloculants , généralement des sels de sodium (Na_2SiO_3 et Na_2CO_3) utilisés pour assurer le pH du milieu aqueux de la barbotine, ne peuvent être faits correctement qu'avec une puissance de délayage importante, de manière à les disperser très rapidement. Il est préférable de les diluer un peu pour atténuer leur effet brutal sur la barbotine lors de leur introduction.

Qualité de l'eau

Plus une eau sera dure, plus il faudra d'électrolyte pour obtenir un résultat d'écoulement (viscosité apparente) identique à celui obtenu avec une eau douce dans les mêmes proportions.

La dureté traduit la quantité de carbonates de calcium et de magnésium dissoute contenue dans l'eau.

I.2.4. Ordre d'introduction des matières :

Il est préférable d'introduire en premier les argiles, puis les kaolins et enfin les matières dégraissantes (sables, craie, etc.).

Ainsi les électrolytes entrent en contact avec les matières qui réagissent avec eux en premier, ce qui permet de mieux contrôler l'opération de délayage.

I.3 .La mise en œuvre de céramique :

Le procédé céramique comprend un ensemble d'étapes qu'il convient d'optimiser et de maîtriser pour parvenir à une céramique épanchant à la fonction souhaitée.

1 étape :

- broyage
- Dosage

2 étape :

- moulage
- frittage

3 étape :

- séchage
- cuisson



Figure N°5: Etapes de la fabrication des ceramiques traditionnelles[4].

1ère étape :

Les constituants de base « des argiles résiduelles (Produit de l'altération des roches initialement formées); et plus (terre cuite ,glaise, argile, kaolin)) sont broyés .



Figure N°6 : Matière première (kaolin terre cuite)

2ème étape :

C'est la préparation des poudres, pâtes et suspensions ou barbotines .

Les matières premières peuvent être préparées sous forme de poudres, granulées, pâtes ou suspensions les poudres obtenues sont mélangées avec de l'eau, donc soit on travaille la poudre sous forme de pate ou barbotine ou poudre sèche « ébauche ».

Ce procédé est mis en œuvre à partir de poudres ou de précurseurs afin d'aboutir aux caractéristiques attendues granulométrie, pureté, morphologie,

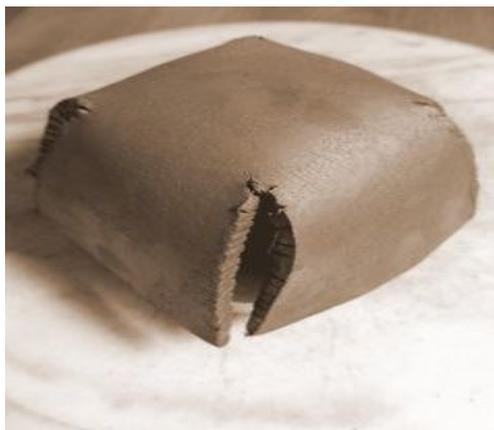


Figure N°7 : Pate barbotine

3ème étape :

C'est la mise en forme ou le moulage.

La mise en forme des céramiques est réalisée avec un ensemble de moyens adaptés à la réalisation de plaques, barres, tubes, tubes borgnes, nid d'abeille ou pièces de formes complexes ou simples. ont appris à utiliser les moules en terre cuite ou en plâtre pour fabriquer des pièces utilisées chaque jours ou créer des détails répétitifs servant à embellir et décorer les pièces fabriquées manuellement.

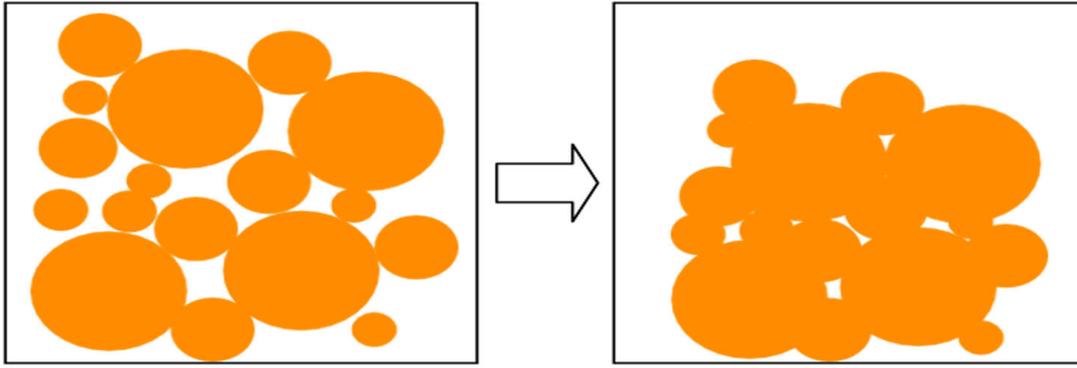


Figure N°8 : MISE EN FORME

4ème étape : C'est le Frittage: Ces phénomènes aboutissent à la disparition des petites particules et l'arrondissement des grosses. Il se produit une rétraction consécutive à la diminution de la porosité (32 à 37%). Le frittage est réalisé à une température d'environ 1300°C (température inférieure à la température de fusion).

Le frittage comprend deux étapes :

- entre 20° et 120° pendant 6 heures : déshydratation et rétraction du modèle en plâtre qui se sépare du dépôt d'alumine.
- à 1120° C pendant 2 heures : frittage en phase solide des grains d'alumine puis le séchage, déliantage, calcination , Cuisson .



5ème étape : C'est le séchage et déshydratation à température modérée (porte du four ouverte) puis à plus haute température (600-660°) pour la calcination des additifs ou colorants organiques utilisés pour le montage; ensuite une cuisson pour qu'elles deviennent solides et utilisables puis le glaçage à (T°C) de ramollissement pour donner une surface lisse et brillante.



FIGURE N° 10 : Four pour cuisson

6ème étape : C'est la finition ; l'étape de finition peut consister en un usinage ou rectification de la pièce pour la mise aux côtes finales. Il peut aussi s'agir d'une étape de collage ou d'assemblage.



Figure N°11 : Finition du produit

I.4. Le frittage:

Lors de la cuisson, le cycle thermique comporte trois phases majeures : le préchauffage, la cuisson proprement dite et le refroidissement. La cuisson se fait à une température bien inférieure à la température de fusion d'au moins un des constituants du matériau argileux. Lors de la cuisson, les particules (grains de la poudre) se soudent les unes aux autres, en éliminant la plupart des pores ou des cavités interstitielles par conséquent le matériau se contracte (retrait) et durcit tout en conservant sa forme initiale. Ce procédé s'appelle le frittage. Le frittage induit des modifications physico-chimiques irréversibles au sein du matériau de départ et la densification se manifeste par un retrait qui correspond à une réduction de la porosité: frittage d'une poudre céramique Par ailleurs, d'un point de vue technologique, on distingue le frittage naturel réalisé sans application d'une contrainte mécanique et le frittage sous charge, effectué en appliquant une pression extérieure au cours du chauffage. Le frittage naturel présente l'avantage de la simplicité tandis que celui sous charge est partiellement utilisé pour les matériaux difficiles à densifier ou pour obtenir des céramiques exemptes de porosité. D'un point de vue physico-chimique, on distingue le frittage en phase solide, le frittage avec une phase liquide et le frittage par flux visqueux

I.5. Propriétés des céramiques traditionnelles

Les céramiques ont un point de fusion élevé, une grande inertie chimique et résistent bien à la corrosion. Ces propriétés leur assurent une durée de vie pratiquement infinie et permettent aussi l'usage de certaines céramiques dans des milieux agressifs même à des températures élevées. Les céramiques sont généralement opaques car leur nature polycristalline provoque la diffusion de la lumière par les joints de grains et les porosités.

En raison de la robustesse des liaisons chimiques, les céramiques possèdent une grande rigidité et dureté. En contrepartie, les céramiques sont des matériaux fragiles car il est difficile de déformer la structure d'un composé dont les liaisons chimiques sont fortes et dirigées. En conséquence, les céramiques ne possèdent pratiquement aucune plasticité et cassent avant de pouvoir se déformer.

Le comportement fragile des céramiques, qui peut entraîner une fracture brutale sous une contrainte ou lors d'un choc, est une limitation à leur emploi.

I.6. Les domaines d'application:

Les terres cuites : elles sont utilisées en poterie et surtout pour fabriquer des produits pour le bâtiment tels que les tuiles, les briques, les conduits de fumée, les tuyaux de drainage, les carreaux de dallage, etc. A l'origine, elles étaient obtenues par modelage, séchage et cuisson d'argiles communes.

Les faïences : elles sont constituées d'un tesson poreux recouvert d'une couche continue de glaçure. Cet émail permet de masquer la couleur du tesson et surtout de remédier à sa forte perméabilité (présence de 5% et 20% de porosité ouverte). Les faïences sont connues pour la

vivacité de leur décor. Elles sont appréciées dans les arts de la table et elles sont surtout utilisées comme carreaux de revêtements muraux.

Les grès : ils présentent un tessou fortement vitrifié, opaque, coloré et pratiquement imperméable (0% et 3% de porosité ouverte).. Ils sont connus pour leur inaltérabilité, leurs excellentes performances mécaniques et leur résistance à l'érosion et aux agents chimiques. Les grès sont utilisés pour fabriquer des produits sanitaires, des carreaux de revêtement de murs ou de sol, des dalles antiacides, des tuyaux d'assainissement, etc.

Les porcelaines : les tessons de porcelaine sont blancs et translucides sous faible épaisseur (< 5mm). Ils ont une porosité ouverte négligeable (0,5%). Les porcelaines sont utilisées dans les domaines de la vaisselle, du médical (implants dentaires...), de l'électronique (isolateurs, sélectionneurs).

CHAPITRE II

LES CERAMIQUES TECHNIQUES

II.1.Introduction

On appelle céramique technique, un matériau non métallique et non organique obtenu par l'action de fortes températures -- une céramique, donc -- est destiné à des applications industrielles.

Il existe plusieurs types de céramiques techniques :

- Les céramiques silicatées sont les plus anciennes. Elles sont principalement fabriquées à partir de matières premières combinées avec des alumines comme le silicate d'aluminium.
- Les céramiques oxydées se composent principalement d'oxydes de métaux tels que l'oxyde de zirconium.
- Les céramiques non oxydées forment un groupe de matériaux faits de composés carbonés, nitrogénés et siliconés tels que le carbure de silicium ou le nitrure d'aluminium.

II.2. Application :

Céramiques techniques ou industrielles :

- 1- céramiques électroniques (faibles courants), ou céramiques fonctionnelles :
- 2-céramiques diélectriques (isolantes), conductrices, magnétiques...ect
- 3- pour applications électrotechniques (fortes puissances),
- 4- céramiques réfractaires, pour applications thermiques,
- 5-pour les applications mécaniques : céramiques structurales, pour l'usinage : abrasif (polissage), outils de coupe (plaquette de carbure),
- 6- pour les applications optiques : transparence, émission de lumière,
- 7- pour le nucléaire : combustible nucléaire.

II.3. Procédé de fabrication :

La matière premières est obtenue par des argiles résiduelles (Produit de l'altération des roches initialement formées) ou sédimentaires (Transportées par l'eau et peuvent contenir du calcaire, de sable, etc) La fabrication des céramiques d'une manière générale part d'une poudre. Pour les céramiques traditionnelles, il s'agit de matières premières naturelles (terre glaise, argile, kaolin). Pour les céramiques techniques, ce sont des poudres micrométriques obtenues par synthèse chimique ; on parle souvent de « céramiques fines ». Toutefois et bien que les deux types de céramiques soient différents, ils ont en commun le fait de mettre en oeuvre le même schéma de fabrication.

**Poudres →prétraitement →mise en forme →séchage →traitement thermique (frittage)
→produit fini.**

Dans la plupart des cas, on met en forme cette poudre avant de la « cuire » :

- soit on travaille la poudre sous forme de pâte, en y ajoutant un peu d'eau ou un liant

organique qui sera éliminé lors de la cuisson ; cette pâte peut être travaillée à la main (poterie traditionnelle) ou injectée dans un moule ;

- soit on la travaille sous forme de barbotine, c'est-à-dire d'une suspension dans l'eau, en ajoutant beaucoup d'eau et un défloculant (silicate de sodium) ; ce liquide est versé dans un moule absorbant l'eau (par exemple en plâtre) et forme une couche mince sur les parois que l'on peut démouler après séchage ;

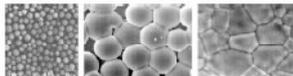
- soit on remplit un moule de poudre sèche.

La cuisson est appelée frittage. Au cours de cette opération, les grains se soudent entre eux, sans qu'il y ait un passage par une phase fondue. Le frittage « simple » laisse une grande porosité : on conserve les espaces entre les grains.

Le frittage sous pression (HIP, *hot isostatic pressing*) consiste à mettre la poudre sous pression (environ 1 000 bar, 100 MPa) pour que la porosité se referme. On utilise un gaz inerte, en général de l'argon. On a une diminution des dimensions de 10 à 15 % linéaires (25 à 40 % volumique). Lorsque l'on a un mélange de poudres de compositions différentes, on a parfois des réactions chimiques lors du frittage (frittage réactif).

Frittage

- On chauffe à $T < T_{\text{fusion}}$, (1000-2000°C)
- Par *diffusion*, les grains se soudent entre eux
- La structure est donc **polycristalline**
- Les **joints de grains** sont des zones fragiles
- La disparition des vides entraîne un *retrait*



frittage d'une céramique (microscope électronique)

Figure N°11 : Température du frittage

Compaction à chaud

- Le frittage se fait en même temps que la compaction, à chaud
- Ex. SiC : 2000 °C
Abrasif : *carborundum* (meules)
Céramique : ex. filtre à particules *diesel* (FAP)



Figure N°12: Exemple de frittage

Les produits non façonnés (PNF) sont des céramiques à usage essentiellement réfractaire, utilisés pour protéger des pièces contre la chaleur, par exemple des parois de four. Ils sont fournis aux clients en sac, prêt à l'emploi.

Sur des pièces métalliques, on peut recourir à la projection thermique pour créer un revêtement de quelques dizaines de micromètres à plusieurs millimètres. La poudre est injectée dans une flamme ou un plasma (gaz traversé par un arc électrique), le gaz de la flamme ou du plasma projetant les gouttelettes sur la pièce à recouvrir. Les gouttelettes s'écrasent et forment des plaquettes qui s'empilent. Grâce au refroidissement à l'air comprimé, la température de la pièce reste modérée (de l'ordre de 100 °C). Du fait de la structure obtenue, poreux et sous forme de plaquettes, le revêtement a une faible résistance mécanique, mais présente une excellente isolation thermique et une bonne résistance aux chocs thermiques.

Dans certains cas, la poudre est fondue et moulée. On utilise la fusion électrique : la chaleur est obtenue en faisant passer du courant dans des électrodes de carbone, on parle de céramiques électro fondues. La fusion à l'arc électrique est aussi utilisée pour l'acier de recyclage (acier électrique) et l'aluminium, mais on atteint ici des températures beaucoup plus élevées, entre 1 800 et 2 500 °C. La céramique est coulée dans un moule en sable (usage unique), en graphite (réutilisable plusieurs fois) ou en acier refroidit à l'eau (moule permanent). On fait un refroidissement très lent en four, de 1 à 18 jours, appelé « cuisson ». L'assemblage des céramiques est problématique. On procède souvent par brasage : « collage » par un métal fondu, sans qu'il y ait fusion des matériaux pièces à assembler. On peut ainsi assembler deux céramiques ou bien une céramique et un métal, et avoir une étanchéité. La différence de coefficient de dilatation entre les matériaux (pièces et brasure) génère des contraintes lors du refroidissement, contraintes qu'il faut maîtriser. Dans le cas d'un garnissage réfractaire, on peut assembler les briques avec un mortier de jointement. Les assemblages vissés sont possibles, mais la déformation élastique des pièces ainsi que l'adhérence de l'écrou ou de la tête de vis sur la pièce sont importants pour assurer le serrage ; or, les céramiques se déforment peu (module de Young E élevé) et ont en général un faible coefficient d'adhérence avec les autres matériaux.

Procédés avec compaction

- Céramiques techniques
- Compactions uniaxiales, triaxiales...
- Moulage (après mélange avec de l'eau ou un polymère fusible pour fluidifier)
- Extrusion



Tubes en céramique extrudée (Haldenwanger)

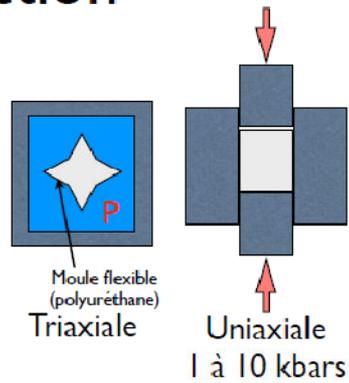


Figure N°13: Procédé de fabrication avec compaction [4]

II.4. Les produits céramiques dans la construction

Les produits céramiques prennent une part importante dans le domaine de génie civil, car, suivant leur mode de fabrication, ils ont des propriétés variées, bien différentes les unes des autres. A la base de tous les procédés de fabrication, il y a l'argile, qui, mélangée à l'eau, donne une pâte dont la propriété est de durcir à la chaleur. En faisant varier les différents composants de la pâte, la quantité d'eau et le degré de chaleur, on modifie les caractéristiques du matériau, qui devient plus ou moins dur, plus ou moins poreux, etc.

II.4.1 La terre cuite

Composé d'argiles légèrement calcaires, le mélange est cuit à une température relativement basse (800 à 1000 °C). La terre cuite ainsi obtenue est un matériau ordinaire, peu dur et poreux, qui résiste mal aux chocs. Elle est utilisée pour le gros œuvre sous forme de briques (pleines ou creuses), de tuiles, de boisseaux de cheminée et autres éléments comme les hourdis de planchers et de toitures.

La terre cuite est un bon isolant. Ses teintes variées dont les couleurs chaudes vont du beige clair au brun-rouge sont un atout majeur pour réaliser des revêtements de sols ou de murs très décoratifs. On utilise, pour ces revêtements, des carreaux ou des dalles de terre cuite, aux formes et aux dimensions multiples (carré, hexagone, trèfle, losange...) qui permettent d'exécuter un carrelage aux dessins réguliers. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue que ce genre de revêtement se tache facilement et qu'il n'a pas une grande résistance à l'usure.

II.4.2 La brique :

La brique d'argile est l'un des plus anciens matériaux de construction connus. De nos jours, la fabrication en est entièrement mécanisée : traitement de la pâte (autrefois, les ouvriers piétinaient l'argile humide), façonnage, séchage (il durait jadis près de deux ans) et cuisson. Les fours modernes peuvent traiter jusqu'à trois millions de briques à la fois, à une température de 900 à 1000 °C, 1250 °C pour les briques vernissées. Parfois, la présence de sel dans l'atmosphère de cuisson confère aux produits une légère glaçure. La brique bien cuite est lisse d'aspect et rend un son clair ; la brique mal cuite est friable et rend un son sourd.

II.4.3 Les faïences :

Les faïences sont des terres cuites recouvertes en surface d'un émail qui les rend imperméables aux liquides. La fabrication s'effectue en deux stades : d'abord établissement et cuisson de l'objet, appelé alors "biscuit de faïence", puis émaillage et nouvelle cuisson pour durcir le décor. Suivant la composition de la pâte et la nature de l'émaillage, on obtient des faïences différentes. Elles servent à l'exécution de poteries culinaires, de vaisselle plus ou moins décorée, d'appareils sanitaires ou de carreaux de revêtement. Si par émaillage la faïence est rendue imperméable, elle reste toutefois fragile et sensible aux brusques changements de température. C'est pourquoi les carreaux de faïence, qui offrent un choix de couleurs et de motifs variés, ne sont utilisés qu'en revêtement mural.

II.4.4 .Les grès

Ils sont composés d'une pâte argileuse, additionnée de minéraux riches en feldspath. Ce mélange est cuit à une température voisine de 1300 °C, température à laquelle les fondants, 9 ainsi que le feldspath, provoquent la vitrification de la pâte. C'est ce phénomène qui assure au

grès son imperméabilité, sa bonne résistance aux chocs et aux agents chimiques et sa très grande dureté (il raye le verre). Ces qualités permettent de l'employer dans l'équipement ménager (plats de cuisson, vases, etc.), mais aussi dans l'équipement des habitations : tuyaux d'écoulement d'appareils sanitaires ou revêtements de sols et de murs. Les grès se présentent sous différentes formes.

II.4.5. Carreaux de grès ordinaire (le grès cérame)

Étant donné sa dureté, un carrelage de grès cérame est pratiquement inusable. Sa non-porosité le rend insensible aux taches, et, comme il n'absorbe pas l'eau, il ne craint pas le gel. Il peut donc être utilisé à l'extérieur pour recouvrir une loggia, une terrasse ou même une piscine. Employé surtout pour les sols, il peut revêtir les murs avec la même endurance ; son entretien est pratiquement nul.

II.4.6. Carreaux de grès émaillé

De même composition que le grès cérame, les carreaux de grès émaillé présentent une surface émaillée comme s'il s'agissait d'un carreau de faïence. L'apport d'oxydes métalliques permet d'obtenir des nuances variées qui n'existent pas dans le grès cérame naturel. La surface émaillée est parfois trop lisse et trop brillante pour un emploi en revêtement de sol. On préfère, dans ce cas, une utilisation murale, d'autant plus qu'il existe une très grande variété de couleurs et de motifs sur le marché.

II.4.7 Carreaux de demi-grès

La conception de base est la même que pour le grès cérame, mais la cuisson s'effectue à une température plus basse (1100 °C), ce qui n'assure qu'une vitrification partielle de la pâte. Le produit obtenu est légèrement moins dur qu'un grès cérame et il est parfois légèrement poreux, c'est la raison pour laquelle il est préférable de ne pas l'utiliser comme revêtement extérieur.

II.4.8 .Les mosaïques

Le terme "mosaïque" définit non pas un produit, mais un assemblage d'éléments de petites dimensions formant une fresque ou reproduisant un dessin. Par extension, on désigne par ce terme les carrelages réalisés à l'aide de petits éléments de 1 à 5 cm de côté. Suivant la forme de ces éléments, l'assemblage peut être : 10 une mosaïque simple, constituée à l'aide de ronds, de carrés ou de rectangles formant des rangées symétriques et répétitives sur toute la surface ; une "mosaïque de hasard", réalisée à l'aide de fragments de formes et de couleurs variées, disposés sans tenir compte d'un motif précis. En général, les revêtements mosaïques conviennent à la plupart des réalisations intérieures et extérieures, car ils sont constitués à l'aide de carreaux de grès cérame, de pâte de verre ou de fragments de marbre, matériaux qui supportent tous parfaitement les différences de température.

II.4.9 .Carrelage :

Les produits céramiques destinés aux revêtements des surfaces forment un assemblage désigné par le terme classique de "carrelage". Il faut tout de suite distinguer deux utilisations distinctes : le carrelage des sols, le carrelage des murs. L'un et l'autre proviennent d'un

assemblage de carreaux ou d'éléments similaires, mais les matériaux et les produits utilisés sont parfois très différents, et il faut savoir les reconnaître.

II.5. Les produit céramique technique haute performance(CeramTec)

Les céramiques techniques haute performance sont considérées comme l'un des matériaux les plus efficaces de notre temps. Elles constituent la base des produits CeramTec. qui recouvrent différents matériaux céramiques et pour la plupart hautement spécialisés avec des propriétés mécaniques, électriques, thermiques et biochimiques uniques et une grande combinaison de propriétés.

II.6. Type de céramique technique (CeramTec)

Les céramiques techniques haute performance peuvent être divisées en quatre groupes majeurs de matériaux céramiques : céramiques silicatées, céramiques oxydées, céramiques non oxydées et céramiques piézo-électriques. Les céramiques silicatées représentent le type le plus ancien de matériaux céramiques pour des applications techniques et sont fabriquées principalement à partir de matières premières en combinaison avec les alumines (oxyde d'aluminium, silicate d'aluminium). Le groupe des **céramiques oxydées** contient des matériaux qui se composent principalement d'oxyde de métal tels que l'oxyde d'aluminium, l'oxyde de zirconium, le titanate d'aluminium ou les céramiques de dispersion. Les **céramiques non oxydées** représentent un groupe de matériaux comprenant des matériaux céramiques basés sur des composés carbonés, nitrogenés et siliconés tels que le carbure de silicium, le nitrure de silicium et le nitrure d'aluminium. Les céramiques piézo électriques (connues également comme céramiques fonctionnelles) représentent un groupe de matériaux utilisé pour convertir les paramètres mécaniques en paramètres électriques ou inversement pour convertir les signaux électriques en mouvement mécanique ou vibration.



[Oxyde d'aluminium \(\$Al_2O_3\$ \)](#)

[Titanate d'aluminium \(\$Al_2TiO_5\$ \)](#)



Céramique mixte/de dispersion



Céramique piézo-électrique



Céramique à base de silicates



Oxyde de zirconium (ZrO₂)



Nitride d'aluminium (AlN)



Carbure de silicium (SiSiC / SSiC)



Nitride de silicium (Si_3N_4)



Figure N°14 : Types des céramiques haute performance [4]

II.7. Propriétés des céramique technique

Les matériaux céramiques utilisés en tant que céramiques techniques ou céramiques de haute performance dans les applications techniques doivent satisfaire à des exigences extrêmement élevées en termes de propriétés. La diversité des propriétés va de la résistance à l'usure et à la chaleur, de la résistance à la température et à la corrosion en passant par la biocompatibilité et la compatibilité alimentaire.

- Résistance à la flexion
- Biocompatibilité
- Résistance chimique
- Densité et rigidité (Module Young)
- Résistance à la compression
- Isolation électrique
- Rigidité diélectrique
- Dureté
- Résistance à la corrosion

- Compatibilité alimentaire
- Piézo-électricité et dynamique
- Résistance à la température
- Résistance aux chocs et fluctuations thermiques
- Métallisation (technologie d'assemblage)
- Résistance à l'usure
- Dilatation thermique
- Isolation thermique
- Conductivité thermique

Ces multiples propriétés permettent d'utiliser les céramiques techniques dans une variété d'applications en industrie automobile, électronique, technologie médicale, énergie et environnement et en général ingénierie en équipement et génie mécanique.

CHAPITRE III LE CIMENT

III.1 Introduction :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau



Figure N°15 : Ciment liant hydraulique

III .2. Fabrication du ciment :

Le ciment est fabriqué (par voie sèche) selon le processus suivant (figure 16):

- ❖ - Extraction de matière première de la carrière
- ❖ Concassage primaire de la matière première
- ❖ Concassage secondaire de la matière première en taille plus petite
- ❖ Broyage de la matière concassée.
- ❖ Dosage et homogénéisation de la farine crue (matière broyée) .
- ❖ Phase de préchauffage de la farine crue (et pré calcination) à 850° C, puis la cuisson dans un four rotatif incliné à une température généralement de 1450° C, le produit sortant du four s'appelle le clinker.
- ❖ Broyage du mélange : clinker + gypse ($\approx 5\%$) + ajouts éventuels.
- ❖ Le produit fini (ciment) est prêt alors pour être expédié en sacs en vrac.



1. Fabrication des ciments

- **Matières premières**
 - 80% **calcaire**
 - 20% **argile**
- **Produit de la cuisson**
 - Transformations chimiques
 - Granules de **clinker**
- **Produits d'addition**
 - **Gypse** (régulateurs de prise)
 - Laitiers de haut fourneau
 - Fillers
 - Fumée de silice
 - ...
- **Ciment**
 - Broyage
 - Conditionnement

ciments, liants hydrauliques

10

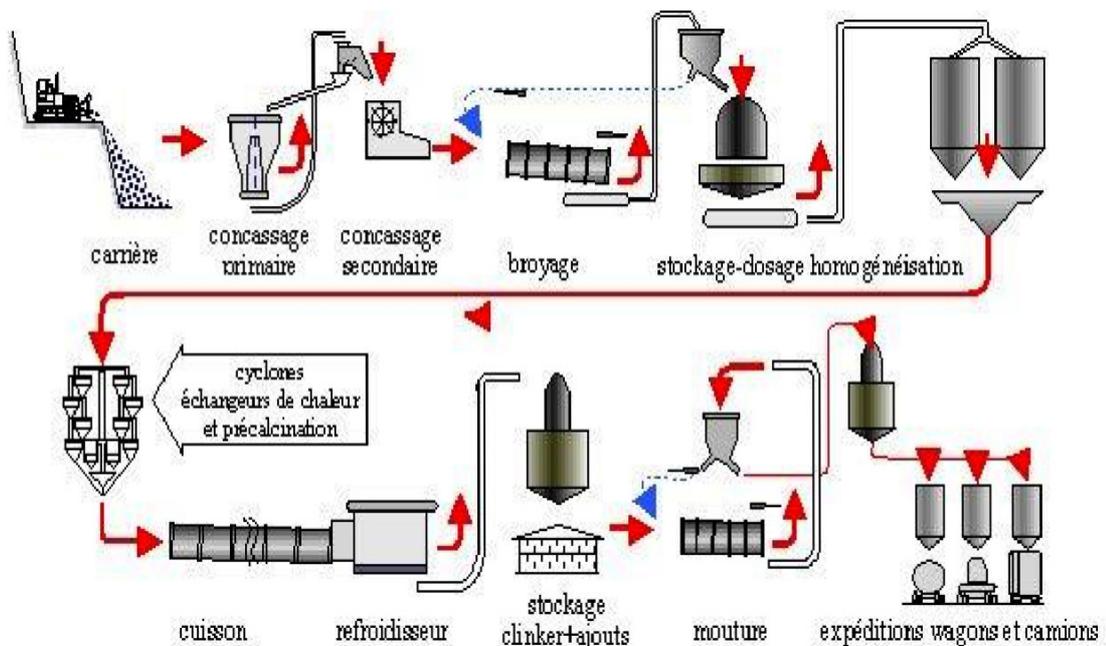


Figure 1- Méthode de fabrication de ciment par voie sèche.

FIGURE N°16 : Procédé par voie sèche de fabrication du ciment [5]

III.3. ETAPES DE FABRICATION DU CIMENT

III.3.1. Extraction et concassage :

Les matières premières sont extraites de carrières généralement à ciel ouvert. Les blocs obtenus sont transportés vers l'atelier de concassage et réduits en éléments d'une

dimension maximale de 50 mm. Ces concasseurs sont situés parfois sur les lieux même de l'extraction.

III.3.2. Préparation de cru :

- Un mélange homogène d'argile et de calcaire est réalisé.

Les proportions sont déterminées selon leurs compositions chimiques et sont toujours proche de 80 % de calcaire et 20% d'argile.

Le mélange est broyé en une poudre de granulométrie inférieure à 200 microns. La poudre obtenue est homogénéisée par un mélangeur pneumatique ou mécanique. Le produit obtenu est appelé « le CRU ».

III.3.3. Cuisson

Tout au long de la cuisson un ensemble de réactions physicochimiques (*calcination ou décarbonatation*) conduit à l'obtention du clinker (figure N°17) :

La décarbonatation du calcaire donne de la chaux vive, et l'argile se scinde en ses constituants : silice et alumine qui se combinent à la chaux pour former des silicates et aluminates de chaux. Ce phénomène est dite clinkerisation réalisé dans des fours rotatifs à une température maximale d'environ 1450°C, la cuisson permet la transformation du cru en clinker (forme de grains de 0,5 à 4 cm de diamètre).

-A la sortie du four, le clinker est refroidi rapidement par un choc thermique à une température de 50 à 250°C).

✓ NB : deux facteurs très importants :

- la température atteinte : au moins de 1450°C.
- le refroidissement brusque à la sortie du four

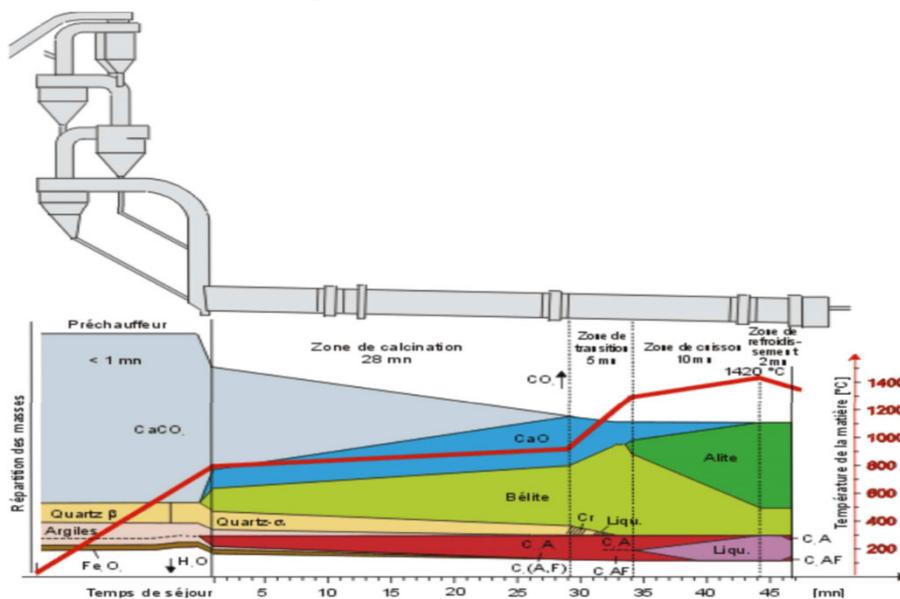


Fig. 1.1 : Evolution des températures à l'intérieur du four et formation des minéraux

Figure N°17 : Evolution des températures a l'intérieur du four [6].

Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile (silicates d'alumine et d'oxyde de fer), se combinent avec la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et aluminates de chaux

III.3.4. Broyage du clinker :

- Il est ensuite véhiculé vers les trémies des broyeurs où il est finement broyé avec 3 à 5% de gypse afin de régulariser la prise.
- Dans certains cas, en plus du gypse, on ajoute d'autres constituants tel que le laitier de Haut-fourneau, les pouzzolanes, les cendres volantes ou les fillers pour l'obtention de diverses catégories de ciment.

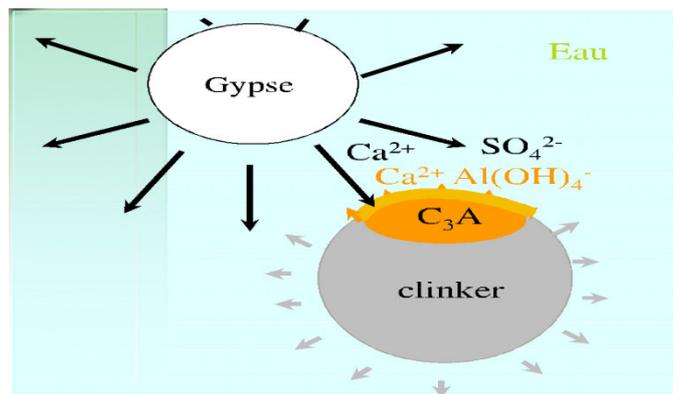


Figure N°18: ajout du gypse régulateur de prise

III.4. Composition chimique et minéralogique du ciment

Lors de la cuisson du cru les constituants principaux (Tableau) de la matière première réagissent entre eux pour former principalement quatre composés minéralogiques du clinker : (Tableau N°1) Teneur moyenne des oxydes constitutif du clinker :

Oxydes constitutifs	Teneur %	Sources (matière premières)
CaO	60 à 69	Calcaire
SiO ₂	18 à 24	
Al ₂ O ₃	4 à 8	Argile
Fe ₂ O ₃	1 à 8	
MgO	0 à 3	
Alcali(K ₂ O et Na ₂ O)	0 à 2	Argile et calcaire
SO ₃	0 à 3	

Tableau N°2 Composition minéralogique du clinker :

Composés	Composition	Appellation abrégée
Silicate tricalcique	3 CaO.SiO ₂	C ₂ S
Silicate bicalcique	2 CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminate tricalcique	3 CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Aluminoferrite tetracalcique	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

III .5. Catégories de ciments :

L'industrie cimentière commercialise de nombreux types de ciments afin de répondre aux différents problèmes rencontrés dans la construction tel que :

- ✓ Resistances mécaniques
- ✓ Resistances aux attaques chimiques ou physiques
- ✓ Mise en œuvre particulière.

On cite quelques types de ciment :

- Ciment Portland Artificiel (CEM I).
- Ciment Portland Composé (CEM II).
- Ciment de Haut-Fourneau (CEM III).
- Ciment Pouzzolanique (CEM IV).
- Ciment Composé (CEM V).

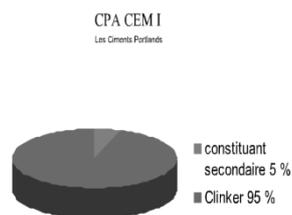


Figure N°19 : Composition CIMENT CEM I

III.6 .Production du ciment en Algérie (GICA)

Le Groupe industriel des ciments d'Algérie (GICA) est créé le 26 novembre 2009, à la suite de la transformation juridique de l'ex Société de Gestion des participations Industrie des ciments. Le 2 mai 2018, GICA effectue sa première opération d'exportation de ciment vers l'Europe. Fin avril 2018, 45 000 tonnes de ciment ont été livrés en Europe via la filiale de distribution des matériaux de construction du groupe.

Le 21 juillet 2019, la cimenterie de Sigus est entrée en production avec une capacité de 2,2 millions tonnes. Réalisée pour un coût global de 51,2 milliards de dinars, la cimenterie occupe une superficie de 570 ha.

En août 2019, GICA obtient deux certifications qualité de l'American Petroleum Institute (API) et l'institut algérien de normalisation (Ionor) pour le ciment pétrolier.

En 2019, les exportations algériennes de ciments de tous types avaient atteint 1.8Mtonnes pour un montant de 60 M USD dont 1.6 M tonnes de clinker gris d'une valeur de 51 M USD

Selon les prévisions, en 2020, la capacité de production du pays doit augmenter à 40,6 millions de tonnes avec 20 millions de tonnes pour le groupe public GICA, et 11,1 millions de tonnes pour Lafarge Holcim Algérie, ainsi que 9,5 millions de tonnes pour le reste des opérateurs producteurs.

En conclusion, le groupe des ciments d'Algérie GICA a été élu meilleur cimentier en Algérie, par le portail AfrikaCem , et ce dans le cadre des AfrikaCem Awards2020, qui récompense les meilleurs entreprises du ciment.

IV .1 Introduction

Le verre est l'un des plus anciennes substances artificielles .l'homme commença à le produire et à l'utiliser à peu près en même temps que le bronze.

Le verre est un matériau connu depuis plus de 5000 ans .Toutefois, ce n'est qu'aux environs de 1920 que la mécanisation est apparue dans les processus de production.

Aujourd'hui il n'existe guère de matière qui, sous des formes extrêmement diverses soit aussi présente dans notre vie quotidienne.

Les verre sont formés de silicates synthétique résultant de réaction qui mettent en jeu essentiellement du sable et des carbonates.ces réactions ne se produisent aisément qu'à très haute température. On obtient un liquide visqueux que l'on met en forme avant qu'il devienne progressivement solide homogène en se refroidissant.

Dans ce chapitre, après un rappel sur les propriétés du verre, la composition du verre et le procédé de sa fabrication avec quelques exemples seront passés en revue.

IV.2. Définition

Le dictionnaire indique que le mot verre vient du mot vitrum et désigne une substance minérale transparente et isotope.

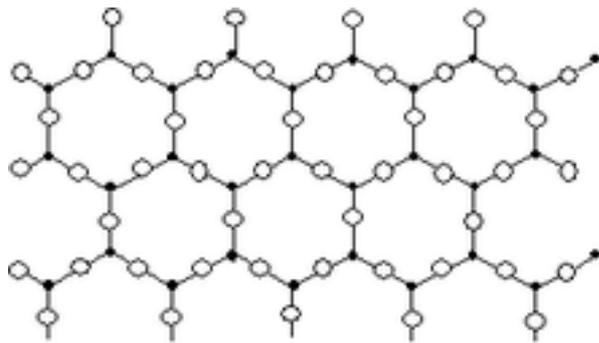
Plusieurs définitions ont été proposées pour un verre. On peut le considérer comme un solide non cristallin obtenu par figeage d'un liquide surfondu. Lors de ce refroidissement, il acquiert les propriétés d'un solide sans pour autant présenter un ordre cristallin à longue distance et sans périodicité dans l'arrangement des atomes. Cette définition n'est pas générale car il existe des solides qui ne sont pas des verres comme par exemple les gels et répondent à cette définition. Ce qui a permis à Tammann (1939) de postuler l'existence d'un état vitreux, et on peut définir le verre comme un solide non cristallin présentant le phénomène de transition vitreuse.

Le verre est un matériau amorphe, c'est-à-dire non cristallin. De ce fait, il présente un désordre structural important. Sa structure microscopique est telle qu'il n'existe aucun ordre à grande distance dans un verre.

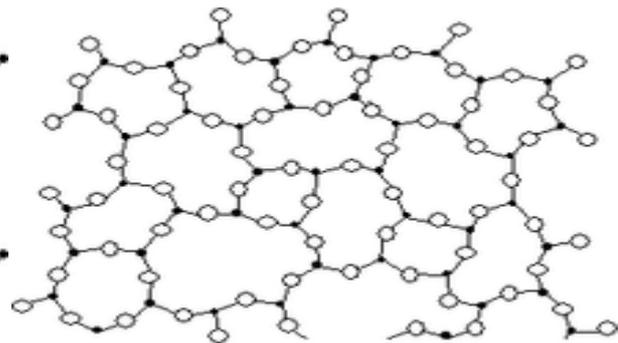
IV.3. Structure du verre :

Le verre est un matériau amorphe, c'est-à-dire non cristallin. De ce fait, il présente un désordre structural important. Sa structure microscopique est telle qu'il n'existe aucun ordre à grande distance dans un verre. Un verre peut même être vu comme un « réseau » tridimensionnel, semblable à celui d'un cristal, mais dans lequel seul l'ordre à courte distance est conservé.

Comparons, par exemple, la structure de la silice cristalline (sous sa forme cristobalite) et celle de la silice vitreuse.



Représentation schématique
bi-dimensionnelle de la silice
cristalline (cristobalite)



Représentation schématique
bi-dimensionnelle
de la silice vitreuse

Dans les deux cas, chaque atome de silicium est lié avec quatre atomes d'oxygène, formant ainsi des tétraèdres SiO_4 ; chaque tétraèdre pouvant être considéré comme une « brique » de l'édifice final. Mais tandis que la cristobalite peut être définie comme un empilement régulier de ces briques SiO_4 , la silice vitreuse peut être considérée comme un empilement anarchique de ces mêmes briques SiO_4 .

En raison de sa structure amorphe, les verres produisent, en diffraction des Rayons X (DRX), un halo de diffusion, contrairement aux cristaux qui donnent des pics étroits et intenses.

IV.4. Les propriétés du verre

Le verre est la seule matière minérale solide que l'on puisse produire à des dimensions et sous des formes quelconques tout en conservant sa transparence.

Ces propriétés physicochimiques thermiques et acoustiques sont les suivantes :

IV.4.1. Propriétés physique:

- La transparence : mais il peut être opaque ou opalescent
- La Dureté : seuls les diamants et le carbure de tungstène le rayent ; le verre le plus dure est le verre de Bohème et le cristal est le plus tendre
- La densité : elle dépend des composants, elle est environ 2,5 ($\rho = 2500 \text{ kg/M}^3$),
- La résistance et élasticité : la cassure du verre est liée à sa flexion et à sa résistance au choc il casse là où le métal se tord : contrairement sa résistance à la compression est importante il faut une pression de 10 tonnes pour briser un centimètre de cube de verre
- L'imputrescibilité il ne se purifie pas .
- L'imperméabilité; elle est extrêmement grande mais le verre reste poreux pour certains liquides comme le kérosène.
- Haute indice de réfraction.

IV.4.2. Propriété chimiques

- **L'action de l'eau** : l'eau agit sur les silicates qui en se décomposant, forme un dépôt en surface qui devient peu à peu opaque; le verre perd de sa transparence

- **L'action de l'air** les silicates alcalins se combinent avec l'acide carbonique contenu dans l'air ce qui donne un dépôt blanchâtre à la surface du verre .
- **L'action de la lumière** exposée aux ultraviolets certains verres se colorent ou se décolorent.
- **L'action des acide** ils décomposent la silice le plus rapide est l'acide fluorhydrique qui permet de graver en profondeur le verre plaqué le verre peut donc se dissout.

IV.4.3. Propriétés thermiques :

- **La dilatation** : c'est un très mauvais conducteur de chaleur il se brise s'il subit un brusque changement de température car les différent partie du verre ne se réchauffent pas en même temps son coefficient de dilatation est faible ce qui lui confère de nombreuses applications, il set d'isolant thermique (laine de verre) .
- **La 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 a chaud car il devient conducteur à partir de 250°C.
- Il est ininflammable et incombustible.

IV.4.4. Propriétés acoustiques :

On demande de plus en plus aux vitrages d'être non seulement une barrière mais aussi un écran acoustique

Un bruit est la superposition de sons élémentaires qui couvre un spectre de fréquence.

L'atténuation sonore due à un vitrage est déterminée quantitativement par son indice d'affaiblissement acoustique que l'on obtient en mesurant, pour chaque bande de fréquence la différence entre les niveaux de pression de part et d'autre du vitrage

L'affaiblissement acoustique global croit lorsque la masse du vitrage augmente.

IV.5. Les constituant de base du verre

Les principales matières premières utilisées se classent en trois catégories : les vitrifiant ,les fondants et les stabilisants ; a ces matières s'ajoutent les affinants ,les colorants et les opalisants .La principale fonction de ces diverses catégories s'explique par leur désignation :

- **Les vitrifiants** (exemple la silice) : sont les éléments de base qui créent la structure vitreuse.
- **Les fondants** (carbonate de sodium ou de potassium): permettent de fondre les vitrifiant à des températures acceptables
- **Les stabilisants** (chaux, magnésie et alumine) : permettent d'empêcher la détérioration dans le temps des verres fondus.
- Les affinants (sulfate de sodium et le nitrate de sodium et de potassium) facilitent l'élimination des gaz provenant des réactions chimiques
- Les colorants(soufre , les oxydes de manganèse, le fer nickel ,cobalt, chrome ,uranium ,vanadium) apportent les éléments nécessaires à la coloration du verre.

C'est la teneur en fer par exemple qui limite l'utilisation de certains sables pour la fabrication de verres clairs car elle donne une coloration verdâtre au produits finis.

- Les opalisants (fluor et les phosphates) sont utilisés lorsque les verres ne doivent pas être transparents .

A ces matières premières sont ajoutés des déchets de verre récupérés appelés groisil ou calcin il facilite la fusion des matières premières et contribuent à des économies et à l'élimination des déchets.

IV. 6. La composition chimique du verre:

Les verres sont composés de ;

1-Formateurs; La silice SiO_2 (tétraèdre desilice) ou l'anhydride borique B_2O_3 (pyrex) ou P_2O_5 .

Qui sont responsable de :

- **Etat vitreux;**
- **Propriétés mécaniques;**
- **Dilatation thermique.**

2-Modificateurs., Na_2O , K_2O , CaO , MgO etc.

Qui sont responsable de :

- **Diminuent la T°C de fusion ;** (Na_2O , K_2O)
- **Augmentent la brillance;** (K_2O)
- **La stabilité chimique;** (CaO , BaO , MgO)
- **Résistance aux agents chimiques** (Al_2O_3 , F_2O_3).

3- Colorants; MnO_2 , Fe_2O , Cu , Ag , .etc.

EXEMPLE :

La composition chimique du verre :

a) **Composition du Verre ordinaire :** Sodo-Calcique (Vitres, bouteilles): 70% SiO_2 + 10% CaO +15% Na_2O

Verre Boro-Silicaté: Alimentaire ou –chimique pyrex: 80% SiO_2 +15% B_2O_3 +5% Na_2O est l'agent fondant (800° au lieu de 1650°)

b) Les principaux constituants des verres industriels sont :

- ✓ Silice (SiO_2) :68 -74%
- ✓ Alumine (Al_2O_3) : 0,3-3%
- ✓ Oxyde de sodium : (Na_2O): 12-16%
- ✓ Oxyde de potassium (K_2O): 0-1%
- ✓ Chaux(CaO): 7-14%

✓ Magnésie(MgO): 0-4,5%

IV.7. Les types de verre :

On distingue plusieurs types de verre selon leur composition chimique, leur utilisation ou leur technique de fabrication .Parmi eux, on distingue ;

1. Sodo-Calcique (Vitres, bouteilles): 70% SiO₂ + 10% CaO +15% Na₂O
2. Verre Boro-Silicaté: Alimentaire ou –chimique pyrex: 80% SiO₂+15% B₂O₃ +5% Na₂O est l'agent fondant (800° au lieu de 1650°)
3. Verres céramiques (vitrocéramiques)
4. Verres au plomb

- **Le verre Armé :**

Le verre armé est renforcé par une grille métallique durant de sa fabrication, mais les risques de coupures en cas de casse sont les mêmes qu'un verre standard. Ce dernier est composé de mailles de 12,5 mm et de 25 mm avec une forme carrée ou hexagonale. Pour parvenir à ce résultat, les bandes de verre plat sont rendues molles et flexibles dans un four à très haute température. Une fois malléable, une première bande passe entre des rouleaux afin d'y fixer la grille. Une seconde bande est ensuite pressée de l'autre côté de la grille pour que celle-ci soit totalement incorporée au vitrage. Une fois bien au centre, la grille voit le verre refroidir et se durcir autour d'elle afin d'obtenir sa résistance.



- **Le verre trempé thermiquement :**

Est équivalent au verre Securit, est fabriqué à travers un chauffage à 700°C avant d'être immédiatement refroidi à 300°C avec de l'air froid. Le résultat est un **verre cinq fois plus solide qu'un verre classique**. Il supporte mieux la pression du vent et les grands écarts de température. On le retrouve souvent pour les parois de douches, les crédences, étagères, cloisons, plateaux de tables, vitrines, verrières, etc.

- **Le verre trempé chimiquement :**

Est encore plus résistant, après un bain à 400°C de 12 à 36 h dans une solution saline. Bien plus grand, ce dernier offre une capacité de compression très élevée sur une faible épaisseur, engendrant une importante résistance à la rupture. Destiné à ne pas se briser en cas de choc thermique, le verre durci peut s'avérer très utile dans certaines zones à risque ou pour des besoins spécifiques. Particulièrement résistant, cette vitre résistante à la chaleur de classe M0 est idéal dans les lieux à risque d'incendie.

Il est surtout utilisé pour les hublots dans l'aviation, les matériels blindés ou les cellules photovoltaïques



- **Le verre Bombé :**

Fruit d'une conception spécifique, il fait appel à des outils précis pour obtenir des formes variées, adaptées aussi bien à l'habitat qu'à l'aménagement des locaux professionnels. Le **principe de la fabrication d'un vitrage bombé** consiste à modifier la forme d'un verre par le biais d'une haute température. Pour se faire, elle nécessite du matériel particulier avec des fours de bombage pouvant fournir des volumes vitrés de larges dimensions selon les demandes.

Parmi les formes de bombage proposées, on retrouve le verre cylindrique, en couple, en doucine, en dos d'âne, en coude, en cintre régulier, conique, avec un côté cylindrique ou en demi-cercle.



- le verre laqué
- le verre trempé
- le verre sablé

- le verre feuilleté
- le verre imprimé
- le verre antibactérien

La classification des différents types du verre :

- Les verres sodo-calciques :

Le verre sodo-calcique est le type de verre le plus courant. On l'utilise pour les fenêtres, les bouteilles et les bocaux, mais c'est aussi une alternative économique pour la fabrication de tubes, tiges, plaques et verres de laboratoire.



- Les verres borosilicates :

Le verre borosilicate est couramment utilisé pour des applications en chimie et en ingénierie. Le plus connu est le Pyrex (1915) qui possède une bonne résistance aux chocs thermiques. On en fait des ustensiles de laboratoire et de cuisine (résistance à la chaleur et aux agents chimiques). Il sert aussi pour l'isolation (fibres de verre) et le stockage de déchets radioactifs.

- Les verres Aluminosilicates :

Le verre aluminosilicate est un type de verre peu connu utilisé comme verre niveau en raison de sa température de service élevée et de sa bonne résistance aux chocs thermiques. Il est proposé sous forme de plaque et de tube

- Les verres de silices :

Le verre de silice est un verre de haute pureté (99,9999 %) fabriqué selon des procédés synthétiques.

On l'utilise pour la fabrication de tubes de lampe à halogène, des éléments d'optique et des miroirs de télescope. Le verre de silice possède des niveaux de transmission élevés jusqu'à une longueur d'ondes d'environ 190 nm, ce qui le rend adapté aux stérilisations par UV.



- Les verres de quartz :

Le verre de quartz est un matériau extrêmement polyvalent pouvant s'utiliser à température élevée dans un large éventail d'applications. Il présente une pureté inférieure et est plus économique que le verre de silice mais il n'assure pas une aussi bonne transmission dans le spectre UV. Il est néanmoins disponible sous différentes formes : tubes, tiges, fenêtres et creusets. Il peut également être travaillé de la même manière que le verre, pour la fabrication de formes plus complexes, notamment de verres de laboratoire.



- **Les verres optiques :**

Le verre optique est un terme qui fait généralement référence à un groupe de matériaux en verre possédant des qualités optiques supérieures à celles des verres sodocalcique et borosilicate. Le verre optique est particulièrement adapté à la fabrication de composants optiques tels que les lentilles de précision.



- **Les verres ou Plomb :**

On l'appelle crystal si la teneur en oxyde de plomb est supérieure à 24 %. Il sert en gobeletterie et en verrerie d'art, pour les téléviseurs et en électronique. Le cristal est limpide, très sonore, très résistant à la dévitrification. En élevant la teneur en plomb (60%), on obtient un verre dense utilisé pour la protection des rayons X. Le verre contient du plomb s'il noircit lorsqu'on le chauffe au chalumeau.



- Les Vitrocéramiques :

Ce sont des dérivés du verre dont la fabrication est basée sur le principe de **dévitrication**. Ils sont notamment utilisés en verrerie culinaire résistante au feu (plaques de cuisson). On les utilise aussi pour fabriquer des miroirs de télescope géant d'environ deux mètres de diamètre.



IV. 8. Fabrication du verre :

La transition vitreuse : C'est l'étape la plus importante dans la fabrication du verre. La transition vitreuse est le passage du verre de l'état liquide vers l'état solide passant par l'état pâteux. Elle est caractérisée par sa température de **transition vitreuse T_g** . Lors du refroidissement rapide du verre à la sortie du four (voir la figure), le verre passe de l'état liquide à l'état plastique (pâteux) ensuite se transforme en solide c'est le produit du verre.

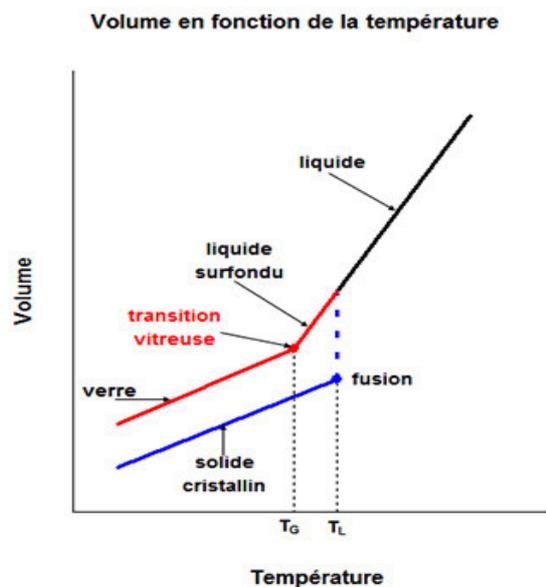


Figure N°20 la Transition vitreuse

IV.9. Procédé et Mise en forme

Verre Plat: Procédés de FloatGlass (Figure N°21)

Étapes de la fabrication d'un verre sodo-calcique :

1. Matières premières broyées, dosées et mélangées

mélange : sable de quartz pur (SiO_2) + carbonate de sodium NaCO_3 +calcaire (CaO)+calcin (déchet de verre).

2. Fusion: Four à $T= 1200-1500^\circ\text{C}$

L'élaboration du verre comprend trois phases essentielles:

- ✓ La fusion au cours de laquelle les matières premières sont fondues à des températures avoisinant $1\ 550^\circ\text{C}$;
- ✓ L'affinage au cours duquel le verre fondu est homogénéisé et débarrassé des bulles gazeuses ;
- ✓ Le conditionnement thermique où le verre peu visqueux est refroidi jusqu'à ce que sa viscosité corresponde aux exigences du procédé de mise en forme.

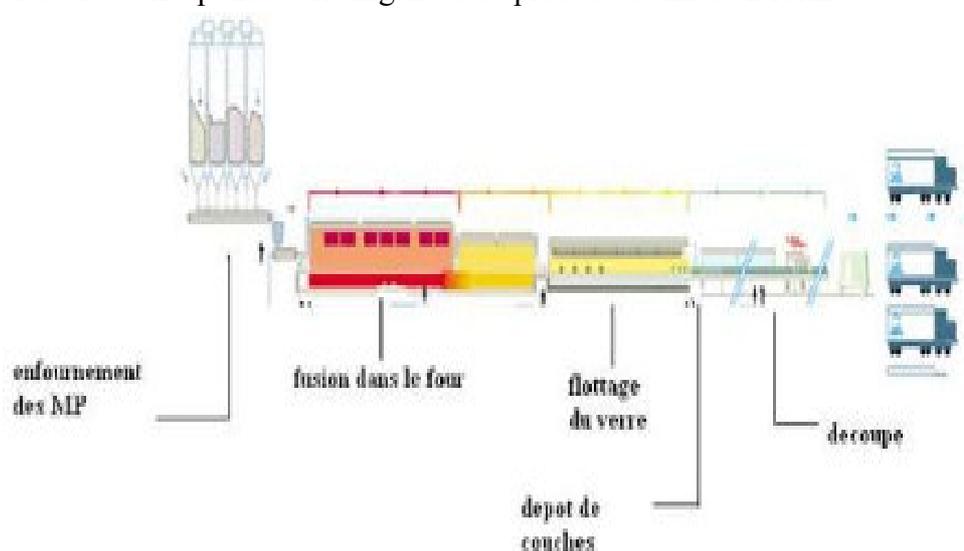


Figure 11.Ligne de production du float glass

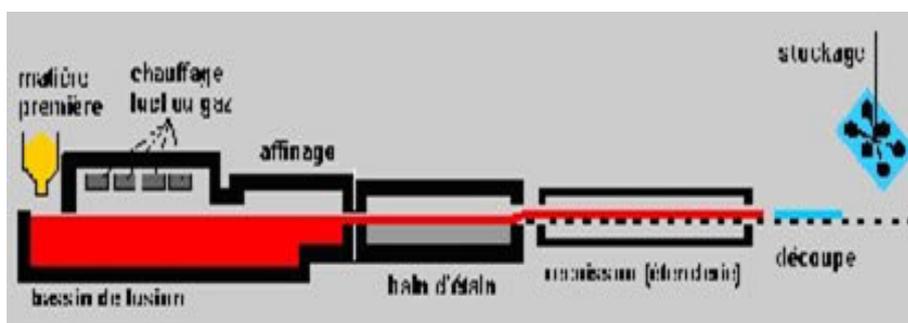


Figure N° 21 Procédés de FloatGlass [7]

Autres procédés de mise en forme du verre plat

Verre étiré: épaisseur de 0,6 à 6,2 mm

Procédé du laminage

IV.10. L'Elaboration du verre

L'élaboration du verre représente l'ensemble des opérations au cours desquelles le lit de fusion (matières premières naturelles et calcin broyé) est transformé en verre fondu, apte à être mis en forme. Ces étapes d'élaborations sont :

- la fusion ;
- l'affinage et l'homogénéisation ;
- la braise.
- La mise en forme

IV.10.1. La fusion

Suivant la nature et la composition du verre, la température est progressivement élevée à 1 300 – 1 400°C. Au cours de cette montée en température, le mélange enfourné subit diverses transformations complexes : déshydratation (évaporation de l'eau résiduelle), dissociation des carbonates et des sulfates avec dégagement de CO₂ et SO₂, fusion de certains composants et dissolution des composants les plus résistants.

VERRE EN FUSION DANS UN FOUR



Source : Saint-Gobain, 2003

Figure N°22 : Verre en Fusion dans un four [7]

La fusion s'effectue dans des fours en matériaux réfractaires qui résistent à des températures supérieures à 1 800°C. Deux procédés sont actuellement utilisés :

- le procédé discontinu ;
- le procédé continu.

IV.10.1.1 Le procédé discontinu

Le procédé discontinu sert à produire des verres en petites quantités. Deux types de fours peuvent être différenciés :

- le four à pot permet l'élaboration de verre en faible quantité dans des pots en réfractaire, placés dans des fours chauffés au gaz ou au mazout ;
- le four à creuset de platine est utilisé pour les verres spéciaux.

IV.10.1.2. Le procédé continu

La production massive du verre industriel a lieu exclusivement dans les fours continus, dits fours à bassin, alimentés en permanence en matière. De ce fait, la quantité de verre en fusion est quasi constante dans le four. La durée de vie de ces équipements est estimée à 10 ans. Il existe deux types de fours à bassin :

- le four pour verre plat ;
- le four pour verre creux.

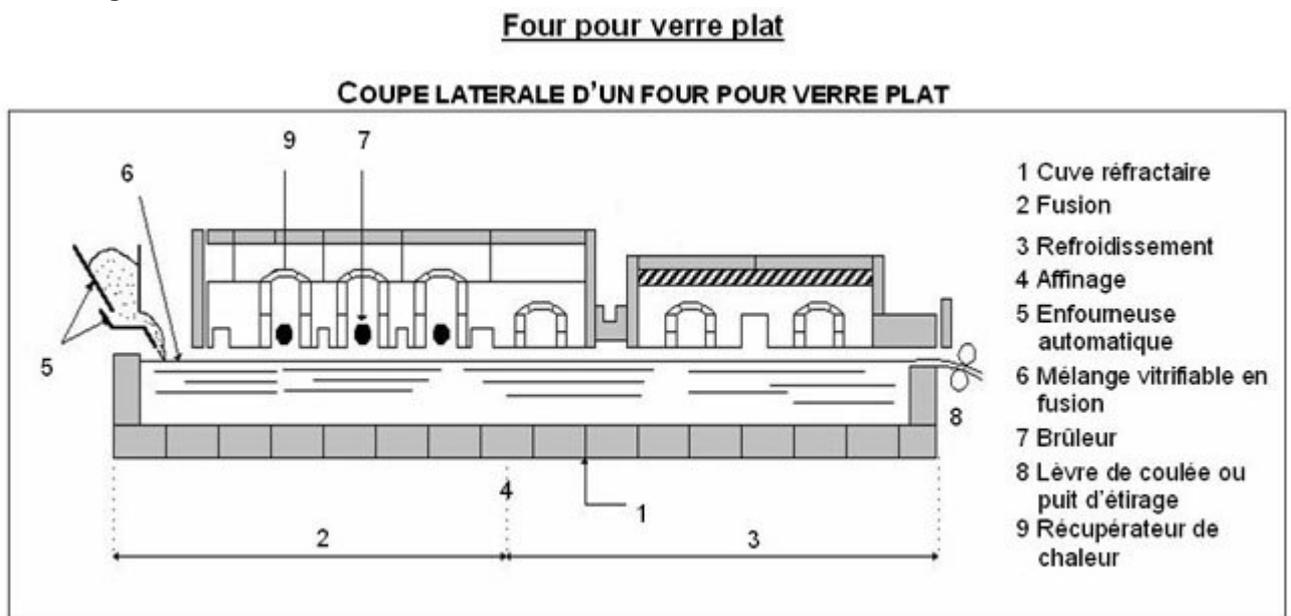


Figure N° 23 : Four pour verre plat [7]

La partie essentielle d'un four est la cuve (1) qui est construite en blocs réfractaires et dont l'étanchéité est assurée par le verre lui-même. Le chauffage s'effectue grâce au gaz ou au fioul lourd. Le four est équipé d'un dispositif de récupération de chaleur (9). La chaleur émise, lors de la fonte du lit de fusion, est récupérée dans des chambres à empilage de briques qui sont réchauffées. La chaleur est redistribuée sur les brûleurs (7). Le four comporte deux séries de brûleurs et de récupérateurs, disposés de chaque côté, qui fonctionnent alternativement. Les flammes viennent directement en contact avec la surface du bassin. Les brûleurs sont réglables individuellement afin de contrôler d'amont en aval le régime thermique du four.

Les matières premières sont enfournées mécaniquement en continu (5). Le verre élaboré est fourni aux machines de mise en forme en aval par une lèvre de coulée (8) ou des puits d'étirage (ceci dépend du système de mise en forme utilisé par l'industriel). Les étapes d'élaborations ont lieu en continu dans les différentes portions du four.

La fusion en bassin permet de diminuer considérablement le prix de revient en minimisant les dépenses en combustibles. En effet, le bassin est maintenu en température pour éviter les dépenses énergétiques dues à la remise en marche du four. Les bassins de verre plat peuvent contenir jusqu'à 1 000 tonnes de verre pour une surface de 300 m².

Four pour verre creux

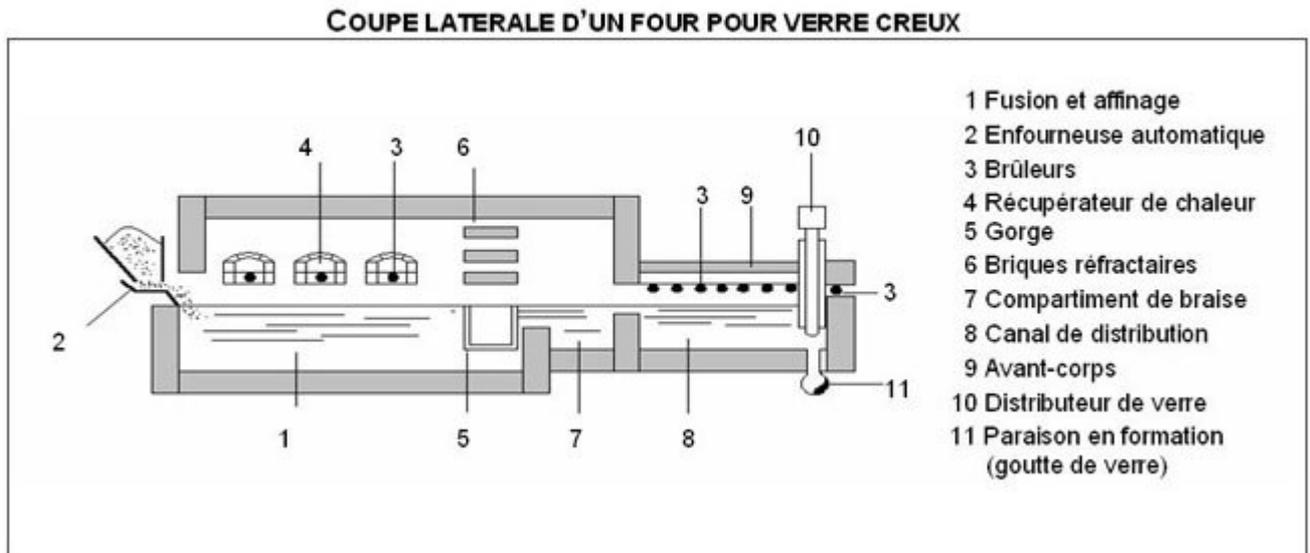


Figure N° 24 : Four pour verre creux [7]

Les fours pour produits dits en « verre creux » ont le même principe de fonctionnement que le four précédent, à l'exception du compartiment de braise (7) qui est séparé du reste de la cuve par une « gorge » servant de siphon. Le verre est refroidi dans ce compartiment de travail pour être amené vers les machines de formage par une série de canaux de distribution en éventail (8), plus communément appelé « feeders ». Ce dispositif permet de contrôler la viscosité (10) du verre et de multiplier la distribution des paraisons(11) à différents postes de travail.

IV.10.2. L'affinage et l'homogénéisation

Après la fusion, la pâte de verre n'est pas homogène. Elle contient de nombreuses bulles de gaz issues de la dissociation des composants¹², de l'atmosphère du four, de la réaction avec les réfractaires, etc., et qui se trouvent piégées dans ce milieu à forte viscosité. Pour éliminer ces inclusions, la pâte de verre est affinée. Cette opération consiste avant tout à élever la température du verre fondu, entre 1 450 et 1 550°C, pour diminuer sa viscosité, ce qui rend la pâte de verre plus fluide. La vitesse de remontée des bulles à la surface est ainsi augmentée et favorise l'homogénéisation de la pâte de verre. Des agents (Na₂SO₄ ou As₂O₃) sont enfin ajoutés pour affiner le verre. Cet affinage chimique, très complexe, consiste à libérer, en fin de processus de fusion, des quantités importantes de gaz qui prennent naissance sur les fines bulles déjà

formées et, en augmentant leur volume, les entraînent plus rapidement vers la surface.

IV.10.3. La braise

Le verre, en fin d'affinage, a une viscosité trop faible pour pouvoir être mis en forme. Sa viscosité est donc augmentée en abaissant la température entre 1 000 et 1 200°C. Cette dernière phase de l'élaboration est appelée la braise. Cette expression date de l'époque où les fours étaient chauffés au bois et les braises étaient maintenues sur le foyer.

IV.10.4. La mise en forme

La mise en forme du verre est désormais entièrement mécanisée. Des procédés différents sont utilisés selon le type de verre (plat ou creux) mis en forme. Par exemple dans le cas du verre plat, plusieurs procédés sont employés :

- le laminage ;
- l'étirage ;
- le procédé « float » ou la flottation.

a) Le laminage

Le laminage consiste à laisser couler la pâte de verre pour la mettre en forme.

SCHEMA DU PROCEDE DE LAMINAGE DU VERRE

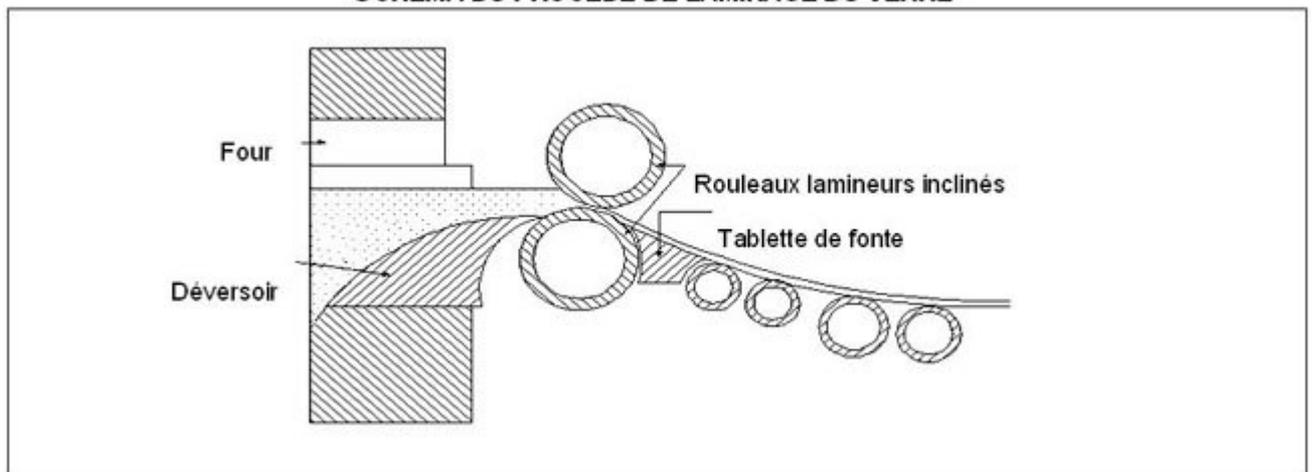


Figure N°25 : Schéma Laminage du verre

Le verre s'écoule du four sur un déversoir, passe entre des rouleaux métalliques refroidis, écartés selon l'épaisseur de verre désirée, qui le figent en un ruban continu. Puis il est débité en plaques dont la longueur dépend du produit voulu. Il est dirigé vers un tunnel de recuisson pour relâcher les tensions internes qui empêcheraient le découpage. La feuille brute n'est ni parfaitement plane, ni transparente. Elle doit obligatoirement subir après refroidissement des opérations de doucissage et de polissage. Le laminage du verre a un coût de revient relativement élevé dû aux opérations de doucissage et de polissage. C'est pourquoi, il est fortement concurrencé par les procédés d'étirage.

b) L'étirage

L'étirage consiste à tirer la pâte de verre.

L'étirage d'un ruban (feuille) de verre par immersion d'une pièce réfractaire appelée « Débiteur » (voir fig. 26) dans le bain.

- Le verre liquide ensuite passe à travers la fente longitudinale de la débiteur (voir fig. 26) sous l'effet de la pression hydrostatique.

- A l'aide des refroidisseurs qui sont des boîtes métalliques ou circule de l'eau et qui sont situées au-dessus de la débiteur, le verre est refroidi fortement.

- Au-dessus des refroidisseurs, des rouleaux métalliques entraînent verticalement le ruban de verre d'une longueur de 7 m environ.

L'avantage du procédé de verre flotté (Floaglass): obtention de meilleur polissage des surfaces (élimination des défauts de surface).

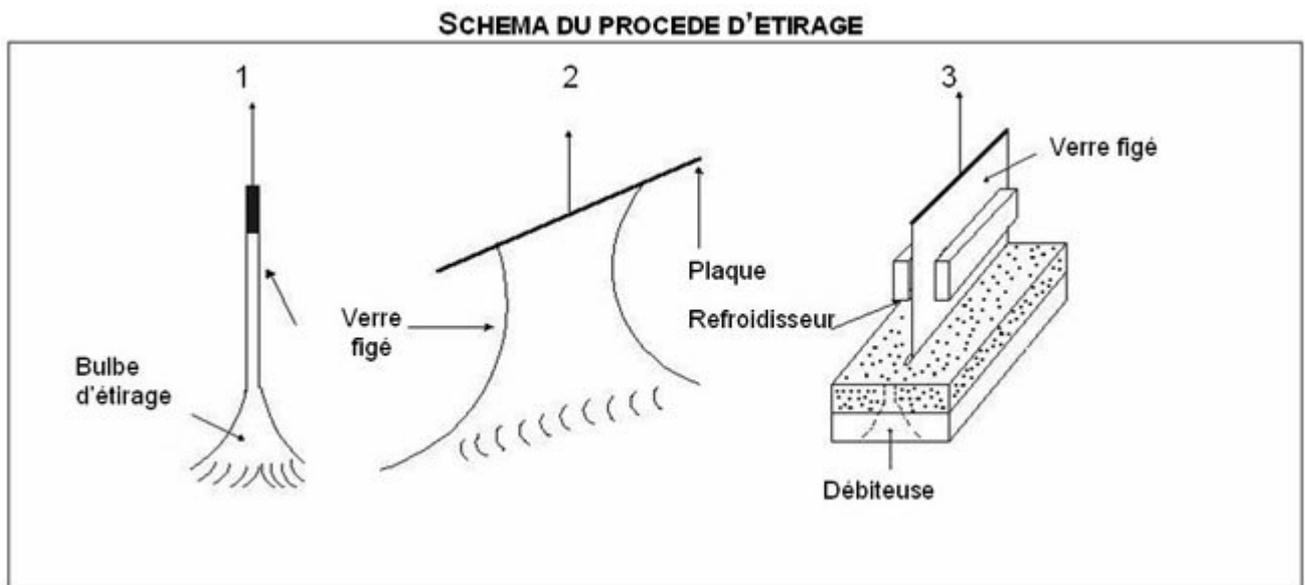


Figure N°26 : Schéma du procédé d'étirage

IV.10 Cycle de vie du verre :

Le verre est donc bien présent en grande quantité dans notre quotidien mais aussi dans divers domaines scientifiques. Il est composé dans la plupart des cas d'oxyde de silicium en majorité, mais il existe d'autres types de verres à partir d'espèces chimiques différentes. La fabrication du verre nécessite des fours de très grande puissance, pouvant parfois atteindre 1500 °C afin de permettre au mélange de rentrer en fusion. Le verre possède des propriétés physico-chimiques très particulière lui permettant entre autre de ne pas réagir avec son milieu d'utilisation ce qui le rend fort utile en verrerie de laboratoire et même dans le domaine nucléaire. Le verre est aussi un matériau essentiel au développement de la science et de la

construction, au même titre que les matériaux composites (béton), les bois, et les métaux. De plus le recyclage du verre fait aujourd’hui l’objet d’enjeux croissants.



Questions de compréhension pour chaque chapitre ;

Questions N°1 :

- 1-Dites comment sont classés les matériaux inorganiques.
- 2-Citer les catégories des matériaux inorganiques.

Questions N°2 :

- 1-Quelles sont les 5 grandes étapes du cycle de vie d'un bâtiment ?
- 2- Citer quelques matériaux qu'on peut recycler

Questions N°3 :

1-Cocher la bonne réponse :

1. Les matériaux sont classés selon leurs compositions et leurs structures
- 2 .Les céramiques sont des matériaux inorganiques de structure poly cristal
3. Les faïences fait partie des céramique techniques
4. on fabrique les céramiques traditionnelles la terre cuite
5. Le verre est une substance inorganique amorphe
6. Les verres industriels sont formés uniquement du groisil
7. La cuisson de la farine cru se fait à 1600 C°
8. l'Aluminate tricalcique C_3A est l'élément essentiel du clinker
9. L'argile et le calcaire sont les matières premières du ciment
10. On ajoute du gypse au clinker pour produire le ciment Portland

2- Donner la signification scientifique des termes suivants:

Liant hydraulique, Barbotine, Frittage, Groisil, Température de transition

Question N°4 :

- a) Citer les étapes essentiels de la fabrication d'un produit céramique traditionnel.
- b) Citer quelques exemples des céramique techniques.

Question N°5 :

Lors de la fabrication du ciment et dans l'étape de cuisson les constituants principaux des matières premières réagissent entre eux pour former principalement quatre composées minéralogiques.

- a) A quelle température se fait la cuisson et quel est le produit obtenu.
- b) Nommer les quatre composés minéralogiques de ce produit.
- c) Donner les réactions mise en jeu lors de la cuisson

Questions N°6 :

- a) Citer les matières premières essentielles utilisés dans la fabrication du verre.
- b) Dans la fabrication du verre on utilise des éléments chimiques cités dans le tableau ci-dessous, préciser le rôle de chaque élément :

Elément	CaO	MgO	Fer	NaNO ₃	Soufre	Alumine	Fluor
Rôle							

- d) Expliquer en quelques lignes le procédé de fabrication du verre .
- e) Citer Les différents verres synthétisés pour différentes applications .

1 Table des matières

Problématique de la science des matériaux	3
1-Introduction.....	3
2-Classification des matériaux :	3
3 .Les différentes catégories des matériaux :	4
4-Propriété générales des matériaux.....	6
5-Cycle de vie des matériaux.....	7
CHAPITRE I Céramique Traditionnelle.....	8
I.1.Introduction.....	8
I.2. Les matières premières et leurs préparations:	8
I.2.1 .L'aspect Rhéologique Des pâtes et Des Barbotines :	8
I.2.2. Caractéristiques d'une barbotine de coulage :	9
I.2.3. Ajouts des électrolytes défloquant	10
I.2.4. Ordre d'introduction des matières :	10
I.3 .La mise en œuvre de céramique :	10
Figure N°6 : Matière première (kaolin terre cuite).....	11
I.4. Le frittage:	14
I.5.Propriétés des céramiques traditionnelles	14
I.6. Les domaines d'application:.....	14
CHAPITRE II LES CERAMIQUES TECHNIQUES.....	16
II.1.Introduction	16
II.2. Application :	16
II.3. Procédé de fabrication :	16
II.4. Les produits céramiques dans la construction.....	20
II.4.1 La terres cuite	20
II.4.2 La brique.....	20
II.4.3 Les faïences :	20
II.4.4 .Les grès.....	20
II.4.5.Carreaux de grès ordinaire.....	21
II.4.6.Carreaux de grès émaillé.....	21
II.4.7 Carreaux de demi-grès.....	21
II.4.8 .Les mosaïques.....	21
II.4.9 .Carrelage :	21
II.5. Les produit céramique technique haute performance(CeramTec).....	22

II.6. Type de céramique technique (CeramTec)	22
Figure N°14 : Types des céramiques haute performance[2]	24
II.7. Propriétés des céramique technique.....	24
CHAPITRE III LE CIMENT	26
III.1 Introduction :	26
III .2. Fabrication du ciment :	26
III.3.1. Extraction et concassage :	27
III.3.2. Préparation de cru :	28
III.3.3. Cuisson	28
III.3.4.Broyage du clinker :	29
III.4. Composition chimique et minéralogique du ciment.....	29
III .5. Catégories de ciments :	30
CHAPITRE IV LE VERRE	32
IV .1 Introduction.....	32
IV.2. Définition.....	32
IV.3.structure du verre.....	31
IV.4. Les propriétés du verre	33
IV.4.1.Propriétés physique:	33
IV.4.2. Propriété chimiques.....	33
IV.4.3. Propriétés thermiques :	34
IV.4.4.Propriétés acoustiques :	34
IV.5 .Les constituants du verre	34
IV. 6. La composition chimique du verre :	35
IV.7. Les types de verre :	36
IV. 8. Fabrication du verre :	40
IV.9. Procédé et Mise en forme.....	40
IV.10. L'Elaboration du verre	41
IV.10.1. La fusion.....	41
IV.10.1.1 <i>Le procédé discontinu</i>	42
IV10.2. L'affinage et l'homogénéisation.....	43
IV.10.3. La braise	44
IV10.4. La mise en forme.....	44
b) L'étirage.....	45

IV11-Cycle de vie de verre45