

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR –ANNABA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département De Génie Civil

Polycopié De Cours

MATERIAUX INNOVANTS



MASTER I STRUCTURE

Prépare par : Dr. MELAIS Fatma Zohra

Maître De Conférences

Avant-Propos

Performance et durabilité accrues des matériaux de construction ainsi que la réduction maximale des coûts de réalisation des ouvrages sont les objectifs les plus recherchés dans le domaine de génie civil.

Ce polycopié est un support de cours intitulé '**Matériaux Innovants**' s'adresse aux étudiants de master 1 structure filière de génie civil afin d'apprendre et d'approfondir leurs connaissances sur les matériaux de constructions innovants. le programme d'études de ce cours comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre présente les différents types de valorisation des matériaux et des déchets dans le but est de produire un matériau écologique qui respecte les critères environnementaux et économiques. Ce chapitre commence par la valorisation des matériaux naturels (la pierre et l'argile) et leurs utilisations dans la construction moderne, en suite la valorisation des matériaux naturels activés et leurs effets sur la résistance et la durabilité des matériaux cimentaires. En termine ce chapitre par la valorisation des déchets et sous-produits industriels.

Le deuxième chapitre décrit, dans la première partie, les liants alternatifs organiques et inorganiques utilisés dans la stabilisation des argiles. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la description des produits de substitution, ces matériaux dont l'impact sur l'environnement est très faible pourraient remplacer le ciment Portland classique.

Le troisième chapitre est consacré à l'identification de certains bétons innovants, il comporte des généralités sur les bétons autoplaçants, les bétons de chanvre et les bétons de fibres. Leurs compositions, leurs caractéristiques, les principales applications et les méthodes de formulation de chaque type du béton, aussi une présentation des différents types de fibres utilisées pour renforcer les matériaux cimentaires, leurs caractéristiques et leur application.

Le quatrième chapitre clôture ce polycopié est consacré aussi aux matériaux de construction spéciaux. Il comporte une présentation des bétons à haute performance, bétons à bas PH et les coulis d'injection, leurs compositions, leurs caractéristiques et les principales applications.

Dr. MELAIS Fatma Zohra

Table des matières

CHAPITRE I Eco-Matériaux

I. Valorisation des matériaux	7
1. Définition	7
2. Enjeux de la valorisation	7
3. Types de valorisation.....	7
II. Valorisation des matériaux naturels	8
1. <i>La pierre naturelle</i>	8
1.1.Définition	8
1.2.Extraction de la pierre naturelle.....	8
1.3.Types de pierre naturelle.....	10
1.4.Propriétés physiques et mécaniques.....	12
2. <i>Argiles pour les briques en terre crue stabilisée</i>	16
2.1.Aperçu historique	16
2.2.Brique en terre crue : Définition	16
2.3.L'argile : matière première	16
2.4. L'extraction et la préparation de la terre.....	17
2.5.Stabilisation des briques en terre crue	18
2.6.Différentes Briques de terre crue.....	19
3. <i>Pouzzolane naturelle</i>	20
3.1.Définition.....	20
3.2.Propriétés physiques et chimiques.....	20
3.3.Principales applications de la pouzzolane naturelle.....	21
<i>Rappel : Ciment et additions minérales (fillers)</i>	22
III. Matériaux actives	29
Les argiles calcinées	29
1. <i>Métakaolin</i>	30
1.1.Définition	30
1.2.Le kaolin : matière première	30
1.3.Extraction du kaolin.....	31
1.4.Normalisation et utilisation	32
1.5.Avantages d'utilisation du métakaolin	32
2. <i>Cendres de balles de riz</i>	33
2.1.Définition	33
2.2.Propriétés physiques et chimiques	33
2.3.Utilisation	33

3. Sous-produit industriels et déchets	34
3.1. Granulats de caoutchouc	34
3.1.1. Définition et obtention des granulats de caoutchouc	34
3.1.2. Avantages et utilisation de caoutchouc.....	36
3.2. Laitiers de haut fourneau	36
3.2.1. Fonctionnement du haut fourneau.....	36
3.2.2. Caractéristiques des laitiers	38
3.3. Verre recycle	40
3.3.1. Définition	40
3.3.2. Propriétés des verres.....	40
3.3.3. Valorisation du verre.....	41

CHAPITRE II

Liants Alternatifs Et Produits De Substitution

I. Liants organiques: stabilisants d'argiles	43
1. Les polysaccharides	43
2. Les lipids.....	45
3. Les proteins	46
II. Liants bélitiques	48
1. Définition	48
2. Fabrication des ciments sulfoalumineux-bélitiques	48
3. Avantages d'utilisation des ciments sulfoalumineux-bélitiques	49
III. Liants de verre	50
1. Définition	50
2. Réaction pouzzolanique du verre	50
3. Avantages d'utilise des liants de verre	50
IV. Géopolymères et Polymères inorganiques	51
1. Géopolymères	51
1.1. Définition	51
1.2. Les matières premières	51
1.3. Synthèse des géopolymères	51
1.4. Propriétés et les utilisations des géopolymères	52
2. Polymères inorganiques.....	
V. Pouzzolanes naturelle et artificielle	53
1. Définition	53
2. Composition des pouzzolanes	53
3. Réactivité des pouzzolanes	53

CHAPITRE III

Nouveaux Matériaux

I. Béton autoplaçant	56
1. Définition	56
2. Constituants d'un béton autoplaçant	56
3. Concept du béton auto autoplaçant.....	57
4. Domaines D'emploi des BAP	58
5. Caractérisation des BAP à l'état frais.....	58
5.1.Ouvrabilité.....	58
5.2.Homogénéité	61
6. Formulation des bétons autoplaçant	61
7. Caractérisation des BAP à l'état durci	63
7.1.Résistance mécanique	63
7.2.Module d'élasticité	63
8. Propriétés physico-chimiques et durabilité	63
II. Béton de chanvre	65
1. Généralités	65
2. Transformation du chanvre	65
3. Formulations et compositions des bétons de chanvre	66
4. Propriétés des bétons de chanvre	67
III. Béton renforcé de fibres	69
1. Définitions.....	69
2. Rôle des fibres	69
3. Types de fibres	69

Chapitre IV

Matériaux De Construction

I. Béton à hautes performances	75
1. Définition et voies d'obtention des BHP	75
2. Applications des BHP.....	75
3. Formulation et composition des BHP	76
4. Comportement physico-mécanique des BHP	78
5. Différent classes des BHP	78
6. Bétons à très hautes performances (BTHP)	79
7. Bétons à ultra hautes performances(BUHP).....	79
II. Coulis d'injection	81
1. Définition	81
2. Domaines d'utilisation	81
3. Conditions des coulis.....	83
3.1. Condition géométrique	83

3.2. Condition de fluidité	83
4. Type des coulis	84
4.1. Coulis stable	84
4.2. Coulis de comblement de carrière souterrains	84
4.3. Coulis de chaux	84
4.4. Coulis et mortiers activés et injectés	84

Chapitre I

Eco-Matériaux



Dans ce premier chapitre nous allons identifier et présenter les différents types de valorisation des matériaux et des déchets dans le but est de produire un éco-matériau qui respecte les critères environnementaux et économiques.

Les éco-matériaux sont des matériaux écologiques, qui peuvent être utilisés pour la construction, l'habitat, l'aménagement, ou encore la décoration intérieure.

I. Valorisation des matériaux

De nos jours, la nécessité d'un développement durable est un facteur crucial. Ceci impose aux concepteurs et aux constructeurs du génie civil de s'intéresser à la valorisation des matériaux, des déchets ou encore des sous-produits ou résidus industriels.

1. Définition

La valorisation des matériaux ou des déchets est un ensemble de procédés par lesquels on transforme un déchet matériel ou organique dans l'objectif d'un usage spécifique. Il offre des avantages d'ordre technique, économique et écologique.

2. Enjeux de la valorisation

Enjeu environnemental : limiter la quantité de déchets produits, limiter la pollution induite par la production de ces déchets, limiter les ponctions de matières premières dans le milieu naturel, limiter les consommations d'énergie liées à l'extraction, le cheminement, la mise en œuvre des matériaux.

Enjeu social : limiter les nuisances olfactives et visuelles.

Enjeu économique : des bénéfices financiers peuvent être générés par la revente de certains matériaux. La réduction des déchets à la source permet de réaliser des gains financiers (consommer au plus juste)

3. Types de valorisation

Il existe plusieurs types de valorisation :

- ✓ **Le recyclage :** est un procédé de traitement des déchets qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui composaient un produit similaire arrivé en fin de vie, ou des résidus de fabrication.
- ✓ **Le réemploi :** le produit usagé, après réparation ou remise à l'état neuf, est à nouveau utilisé pour le même usage ou un usage différent.
- ✓ **La réutilisation :** le produit est utilisé plusieurs fois pour le même usage.
- ✓ **La régénération :** le déchet, après transformation, retrouve les mêmes caractéristiques physico-chimiques et peut être utilisé comme une matière vierge.

Avant de valoriser un matériau ou un déchet il faut connaître son origine, l'analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps. Un programme d'essai spécifique se révèle nécessaire afin d'évaluer l'aptitude d'un matériau à être employé durablement dans chacun des cas.

Essai de caractérisation : les essais physico-mécaniques (masse volumique, porosité ouverte, absorption d'eau, résistance à la traction, résistance à la flexion)

Essai de performance en usage : sensibilité au tachage, résistance aux chocs, résistance au glissement.

Essai de la durabilité : résistance au gel.

II. Valorisation des matériaux naturels

1. La pierre naturelle

1.1. Définition

La pierre naturelle est un matériau de construction constitué de la roche d'où elle est extraite, elle est employée depuis l'antiquité (période pendant laquelle elle a été largement diffusée) et elle reste employée de nos jours. La pierre est le matériau le plus abondant à la surface de la terre et qui peut être réutilisé indéfiniment sans dépense d'énergie pour être transformé.

Ce matériau naturel ne génère pas beaucoup de déchets ou pollution lors de son façonnage. Le fait que la pierre ne soit pas un matériau composite, induit qu'elle ne nécessite pas d'apport en ciment, béton ou autre liant. Ce matériau naturel n'a, d'autre part, pas besoin de traitement ou d'apport en produit chimique pour assurer sa viabilité.

La pierre ne produit pas d'émanation toxique dans la maison (contrairement à certaines peintures) et est un matériau respirant. Elle absorbe l'humidité et favorise l'économie d'énergie. Ses qualités isolantes évitent une surconsommation de chauffage en hiver et de climatiser en été.

1.2. Extraction de la pierre naturelle

L'extraction de la pierre naturelle se fait essentiellement en **carrières à ciel ouvert** (les bancs peuvent se situer à des profondeurs variant de 2-3 mètres à 20 -30 mètres) et plus rarement en galerie souterraine.

Le premier travail consiste à enlever toutes les couches de terrains inexploitable (la découverte) qui peuvent aller de quelques centimètres à plusieurs dizaines de mètres. Vient ensuite la phase d'extraction qui consiste à retirer de la masse des blocs les plus réguliers et les plus grands possibles.

Le bloc brut est ensuite transporté vers l'atelier pour y être transformé.



Figure I.1. Carrière à ciel ouvert

Techniques d'extraction

En fonction de la nature du gisement et des caractéristiques du matériau, le carrier doit choisir principalement entre **trois techniques** :

- la coupe (sciage) au câble diamanté
- la coupe à la haveuse
- l'exploitation à l'explosif.

D'autres techniques plus marginales existent : découpe au jet d'eau, découpe à l'aide de coins hydrauliques...

A/ Le sciage au fil diamanté

Un câble, constitué de 2 ou 3 torons d'acier à torsion alternée, sur lequel sont serties des perles diamantées. Ce câble de longueur variable se développe sur des poulies de renvoi actionnées par une machine électrique ou thermique, et permet ainsi de scier la masse marbrière.



Figure I.2. Sciage au fil diamanté

B/ Coupe à la haveuse

La **haveuse** est une sorte de tronçonneuse pour pierre munie d'un bras pivotant autour d'un axe. Sur ce bras circule une chaîne équipée de dents en carbure de tungstène ou pastilles diamantées permettant de scier verticalement ou horizontalement le banc de pierre. La hauteur de coupe peut atteindre jusqu'à 5 mètres.



Figure I.3. Coupe à la haveuse



Figure I.4. Fil diamanté

C/ L'exploitation à l'explosif

Le carrier perce des trous d'environ 3 cm de diamètre. Ils sont ensuite bourrés d'explosif qui va agir par expansion des gaz. La quantité est calculée pour ne pas abîmer le bloc et protéger l'intégrité de la pierre. Cette technique est couramment pratiquée dans les carrières de granit et de grès.



Figure I.5. Exploitation à l'explosif

1.3. Types de pierre naturelle

On distingue des milliers de types de pierres naturelles en fonction de la provenance, de la texture, du processus géologique, de la couleur, ils peuvent être répartis en plusieurs catégories :

1.3.1. Granit

Le granite est une roche plutonique magmatique à texture grenue, c'est la pierre naturelle la plus dure et la plus résistante. Se caractérise par une couleur claire, gris pâle, rouge, rougeâtre ou verdâtre et exceptionnellement bleutée ainsi que par un aspect tacheté.



Figure I.6. Pierre de granite

Le granite est une roche acide (riche en silice) et dense de densité moyenne égale à 2,7.

La composition chimique moyenne du granite est présentée dans le tableau I.1 :

Tableau I.1. Composition chimique du granite

SiO ₂	Al ₂ O ₃	(Na ₂ O, K ₂ O)	Oxydes (Fe, Mn, Mg, Ca)
74,5 %	14 %	9,5 %	2 %

Les pierres granites Sont très conseillées pour les tablettes de cuisine et également pour revêtement de sols à passage intensif.

1.3.2. Ardoise

L'ardoise est une roche métamorphique qui s'est formée dans de fortes conditions de pression et de température. L'ardoise est résistante et sa couleur peut varier du blanc au noir, en passant par toutes sortes de gris.



Figure I.7. Pierre d'Ardoise

La composition chimique moyenne du l'ardoise est présentée dans le tableau I.2 :

Tableau I.1. Composition chimique du l'ardoise

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe	Mg	Autres oxydes	H ₂ O
50 %	30,1 %	8 %	2,3%	6,3 %	3,3%

Les pierres ardoise sont principalement utilisées dans le domaine de la construction en aménagement intérieur comme dallage ou comme plan de travail en cuisine ou salle de bain.

1.3.3. Calcaire

Le calcaire est une roche sédimentaire constituée en grande partie du carbonate de calcium (CaCO₃), d'un peu de magnésium (MgCO₃) ainsi que d'autres substances en faible quantités. de masse volumique varie de 1500 à 2700 kg/m³.

Les pierres calcaires présentent une très grande diversité d'aspects et de propriétés, en particulier vis-à-vis de leur dureté, de leur compacité, de leur gélivité avec toutes les caractéristiques physiques qui en découlent.

Les professionnels de la pierre classent les calcaires principalement en fonction de leur dureté:

Pierres très tendres - Pierres tendres - Pierres semi-dures - Pierres dures - pierres marbrières.

Les pierres calcaires sont principalement utilisées dans le bâtiment, en revêtements de façades, de sols et de murs intérieurs et extérieurs.



Figure I.8. Pierre de calcaire

1.3.4. Marbre

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire et constitué principalement de cristaux de calcite. Le marbre de Carrare est le type le plus connu (universellement connu comme un des marbres les plus prisés pour sa blancheur).

Le marbre est moins solide et résiste moins bien à l'usure que le granit. Elle ne résiste dans la plupart des cas pas au gel.

Le marbre ne résiste pas aux taches, ce qui nécessite d'appliquer une couche de protection si vous placez le marbre dans la cuisine.



Figure I.9. Pierre de Marbre

1.4. Propriétés physiques et mécaniques

La norme française NF B 10-601 « Pierre naturelle- prescriptions générales d'emploi des pierres naturelles » de juillet 2006 permet une meilleure identification des pierres. Ainsi elle demande que chaque dénomination de pierre fasse l'objet d'une fiche de caractérisation, cette fiche de caractérisation doit comporter :

- ***L'origine de la pierre selon la norme NF EN 12440, avec :***
 - La nature pétrographique de la pierre
 - Lieu d'extraction (pays, commune)
 - Les caractéristiques d'aspect (couleur, texture,...etc.)

- **Les essais d'identité :**
 - La mesure de la masse volumique apparente et la mesure de la porosité ouverte selon la norme NF EN 1936.
 - La résistance moyenne à la flexion selon la norme NF EN 12372.
- **Les essais d'aptitude à l'emploi :**
 - Les essais d'aptitude à l'emploi donnent les caractéristiques correspondant à l'emploi de la pierre dans une position dans l'ouvrage. La norme précise pour chaque destination dans l'ouvrage les essais d'aptitude à l'emploi à géographique.

1.4.1. Masse volumique réelle

La masse volumique réelle des roches dépend de leur nature minéralogique. La masse volumique réelle est définie par :

$$\frac{\text{Masse du matériau sec}}{\text{volume de sa partie solide}}$$

Pour la masse volumique réelle majorité des roches, elle est souvent proche de 3 g/cm³ :

- Calcaire : 2,72 g/cm³
- Basalte : 2,85- 2,90 g/cm³
- Silice : 3,1 g/cm³

1.4.2. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est liée à la compacité de la pierre, elle est définie par :

$$\frac{\text{Masse du matériau sec}}{\text{volume apparent}}$$

Quelques valeurs de masses volumiques apparentes de quelques types de pierre sont données le tableau I.3.

Tableau I.3. Masses volumiques apparentes de quelques types de pierre

Types de pierre	Masse volumique en Kg/m ³
Pierre calcaire	1500 à 2700
Grès	2000 à 2500
Granite	2400 à 2900
Ardoise	~ 2800
Basalte	2800 à 3000
Marbre	2600 à 2800
Quartzites	~ 2650

1.4.3. Porosité ouverte

La porosité exprime le pourcentage du volume des vides accessibles à l'eau par rapport au volume apparent. La porosité des pierres calcaire s'échelonne de 0,3% pour le granit de 0,06 à 2%, pour le grès de 0,66 à 22% et pour le marbre de 0,1 à 2%.

La porosité accessible à l'eau est fonction de la morphologie de la structure, c'est-à-dire les dimensions, la forme, la distribution, la communication des vides entre les cristaux.

1.4.4. Durabilité (gélivité)

Les recherches sur la durabilité des pierres ont mis en évidence que plusieurs paramètres interviennent pour entraîner plus ou moins rapidement la détérioration des matériaux.

L'action de l'eau est fondamentalement, car celle-ci peut circuler et séjourner dans les capillaires. Comme cette eau se transforme en glace sous l'action du gel, avec une augmentation de volume, ce phénomène est très important. La solidification débute par les zones voisines de la surface et après dans les cavités les plus grosses. Elle se poursuit en gagnant peu à peu l'intérieur du matériau. Sous l'effet de l'expansion, l'eau excédentaire (non gelée au premier stade) est repoussée progressivement dans les pores les plus fins.

L'expansion provoque des pressions qui sont supérieures à la résistance des matériaux de construction (à pression hydraulique développée par l'eau se transformant en glace peut atteindre 2000 Kg/cm³).

1.4.5. Résistance en compression

La connaissance de la résistance de rupture en compression a pour but de permettre de choisir les pierres en fonction des sollicitations auxquelles le matériau sera soumis dans l'ouvrage. L'essai est exécuté sur des éprouvettes cubiques de 5 ou 7 cm d'arête selon les prescriptions de la norme NF EN 1926.

- Les pierres calcaires : de 5 à 200 MPa
- Marbres : de 80 à 210 MPa
- Granite : de 150 à 250 MPa
- Grés : de 30 à 250 MPa
- Ardoises : de l'ordre de 100 MPa

1.4.6. Résistance à la traction par flexion

La connaissance de la résistance de rupture en traction est nécessaire pour déterminer les dimensions des éléments soumis à des tensions de traction en travaillant en flexion. On citera notamment les dallages : les marches, les consoles des balcons. En ce qui concerne les produits en pierre, il convient de mentionner les tablettes, les sièges de bancs, les consoles de cheminée, les vasques des fontaines...etc.

La constitution des pierres calcaires et des marbres, par cimentation naturelle des dépôts, explique que cette agglomération ne confère pas en traction une résistance à la cohésion aussi importante que celle obtenue en compression par suite des pressions et des températures (cristallisation des grains de calcite des marbres). Aussi les valeurs de résistance en traction

sont caractéristiques des corps fragiles et n'atteignent que le dixième de la résistance à la compression pour le calcaire et le granite.

1.4.7. Module d'élasticité et déformation sous charge

Comme toutes les matières solides, les roches se déforment sous charge. Ces déformations sont invisibles à l'œil sous l'effet d'une contrainte de compression qui ne dépasse pas 25% de la contrainte de rupture, le matériau se déforme proportionnellement à la contrainte appliquée.

Dès la suppression de la contrainte, appliquée pendant une courte durée, le matériau retrouve sa dimension initiale. Ces déformations instantanées réversibles sont qualifiées de déformations élastiques. (Comme un ressort)

La détermination du module d'élasticité statique s'effectue en mesurant la déformation d'une pierre pendant un essai de chargement sous une presse.

Le rapport entre la contrainte et la déformation élastique caractérise une propriété du matériau appelée le **module d'élasticité E** :

$$E = \frac{\sigma}{\frac{\Delta l}{l}}$$

Pour les pierres calcaires, les valeurs du module d'élasticité varient de 5 000 MPa (calcaire très tendre) à 70 000 MPa (calcaire dur).

2. Argiles pour les briques en terre crue stabilisée

L'utilisation de la terre comme matériau de construction est une tradition très ancienne. En raison de son abondance et la disponibilité de la main d'œuvre, la construction en terre est très répandue dans toute la longue histoire du monde, particulièrement dans les zones rurales et les régions arides.

2.1. Aperçu historique

Les modes constructifs utilisant la terre crue se sont diffusés à partir des principaux foyers de civilisation, la Mésopotamie, l'Égypte, l'Inde et la Chine. Dans ces vallées fertiles, les terres alluviales et la paille des céréales ont permis de mettre au point une technologie multiforme qui ensuite essaima au gré des migrations et des conquêtes.

Très logiquement, ses défauts (sensibilité à l'eau) ont amené à la combiner avec d'autres matériaux naturels peu transformés, comme la pierre (sous forme de cailloux ou de sable), le bois, les végétaux. La cuisson a permis de faire des progrès considérables, débouchant sur la terre cuite (brique, tuiles) et la chaux. Le matériau terre crue, typique de contexte rural, a produit un habitat parfaitement avec son environnement naturel.

Le matériau terre a été extrêmement employé, voire banalisé jusqu'au lendemain de la seconde Guerre mondiale, même si l'on note sa défaveur croissante en milieu urbain.

Ce matériau a été déconsidéré car il rappelait un contexte de pauvreté à fuir et oublier. Le souvenir des qualités thermiques de la terre et le constat de sa bonne compatibilité avec l'environnement ont cependant ressurgi à l'occasion des crises énergétiques qui ont fait suite aux trente glorieuses.

2.2. Brique en terre crue : Définition

La brique en terre crue, appelée aussi « adobe », est le premier matériau de construction qu'homme a inventé et utilisé. Il a déjà découvert qu'il peut emplir des pierres pour faire des murs et des piliers. Le principe de la maçonnerie est alors acquis. Il découvre qu'il est intéressant de prendre des portions d'argile, de les mouler et de les laisser sécher pour avoir des éléments de construction (des pierres artificielles) en quantités illimitées. En leur donnant des dimensions identiques, son travail devient plus facile et ses édifices sont plus stables. Il invente ainsi le module dans la construction. C'est une technologie qui rassemble à celle que les hirondelles utilisent pour leur nid.

Il est fort possible que l'homme ait moulé des briques bien avant qu'il n'ait commencé à tailler des pierres. Au Moyen-Orient, on a découvert des murs en briques crues qui datent de 50 siècles avant notre ère.

De nos jours, une grande partie de la population mondiale habite toujours dans des maisons construites selon cette technique, surtout dans des zones rurales, mais aussi dans des villes.

Sous des climats secs ces logements offrent des qualités techniques tout à fait satisfaisantes.

2.3. L'argile : matière première

La matière première de la brique est l'**argile**. Ce qui importe, c'est de trouver une terre qui puisse être facilement mise en forme, séchée sans perdre cette forme et dont la température de

cuisson ne soit pas trop élevée (et donc intéressante d'un point de vue économique). Cette matière première est présente dans le sous-sol, bien que les propriétés en soient très dissemblables suivant les origines géologiques.

Les argiles proviennent de la désagrégation des roches au fil de temps sous l'effet du gel, de la chaleur, de l'érosion.... Le classement des roches désagrégées se fait sur la base de leur granulométrie, c'est-à-dire de dimensions des éléments qui les composent. Par ordre décroissant, on trouve les graviers, les sables et les argiles (particules plus fines).

Les argiles sont des minéraux se présentant sous la forme de feuillets à l'échelle microscopique, d'où leur nom « phyllites » (Figure 10). Ils appartiennent donc, comme les micas au groupe des phyllosilicates. Chaque cristal est composé de quelques centaines de feuillets empilés, de taille nanométrique. C'est la structure du feuillet élémentaire qui caractérise l'espèce minérale. Chaque feuillet est composé de deux, trois ou quatre couches.

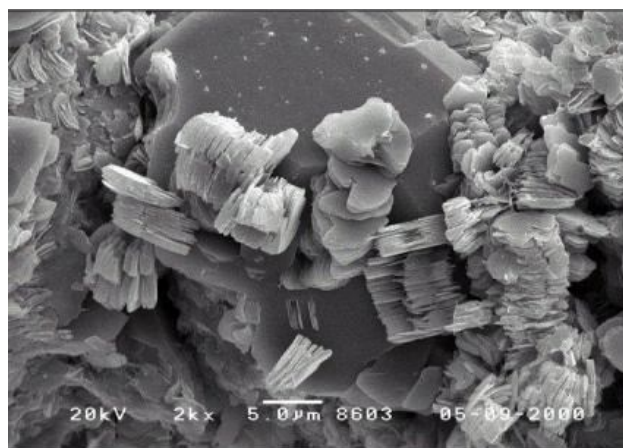


Figure I.10. Structure en feuillets des argiles observée au microscope électronique à balayage

2.4. L'extraction et la préparation de la terre

Plusieurs sites peuvent être mis à contribution : on en extrait des terres différentes, qui sont mélangées de façon à obtenir un matériau convenable. Le sol utilisé pour la fabrication de l'adobe est un sol argilo-sableux, pris sous la couche arable.

Le matériau est émotté et tamisé, débarrassé de ses éléments végétaux. Il est ensuite hydraté, généralement à l'arrosoir. L'état hydrique recherché est une pâte mi-molle, à la limite de la boue. On laisse reposer la terre mouillée environ 48h, pour que les mottes se délitent et que le matériau devienne plus homogène. Il est ensuite malaxé (au pied, ou à l'aide d'un outillage agricole simple, fourche, pelle ou râteau) puis réhydraté.

Des fibres sont ensuite incorporées à la terre, puis on laisse à nouveau le matériau reposer. Différents sortes de fibres sont utilisables. Les plus courants sont les fibres végétales (paille hachée, aiguilles de pin). La longueur de la fibre est déterminée par les dimensions du bloc, elle est de l'ordre de quelques centimètres. La proportion de paille par rapport à la terre se définit essentiellement par la pratique. Selon les travaux de recherches elle varie de 10 à 20 Kg de paille pour 1m³ de briques, ailleurs, on recommande un volume de paille correspondant à 30% du volume total.

Le moulage

Le moulage traditionnel est réalisé à la main. Le moule mouillé pour faciliter le démoulage ultérieur. Les manipulations se faisant sur le sol, l'opérateur est accroupi. Il saisit une masse de matériau à deux mains et la jette dans le moule d'un geste sec : ce mouvement rapide permet d'expulser les bulles d'air contenues dans le matériau. On retire l'excès de terre à la règle, pour égaliser la surface avant de démouler le bloc.

Le démoulage

Démouler aussitôt les briques en faisant attention de ne pas les déformer. De petites secousses permettent un démoulage efficace. L'idéal est de travailler avec un mélange assez sec pour qu'il ne colle pas trop aux bords et que la brique ne se déforme pas une fois démoulée.

Les briques sont laissées à sécher à température ambiante pendant 1 à 5 jours, en fonction du temps. Elles sont ensuite entreposées à l'abri de la pluie.

2.5. Stabilisation des briques en terre crue

La terre a l'inconvénient de présenter une faible durabilité sous l'action des intempéries. L'eau est un facteur susceptible de provoquer des désordres importants sur les ouvrages en terre mettant en cause leur pérennité. Toutefois, en raison de son bas coût et les besoins importants dans le logement, les autorités locales encouragent la recherche dans ce domaine.

Différentes techniques sont employées dans la construction en terre pour améliorer sa résistance et sa durabilité. La technique la plus récente et la plus prometteuse pour améliorer cette résistance c'est l'ajout des stabilisants dont le rôle est :

- Renforcer la cohésion de l'argile de la terre et, ce faisant, la solidité du produit fini.
- Réduire le problème de gonflement de l'argile en cas de pathologie.
- Améliorer la protection contre la pluie.
- Réduire le temps de prise, parfois fort longs.

Les stabilisants les plus utilisés sont : Ciment, Chaux, Mélange chaux/ciment, Paille et d'autres ajouts tel que cendres, huile de coco, bouses de vache.

Dont le rôle est quadruple



Ciment



Chaux



Paille

Figure I.11. Quelques stabilisants

2.6. Différentes Briques de terre crue

A/ Adobes : Les premiers éléments de construction préfabriqués utilisés par l'homme étaient des briques moulées en terre crue "adobes". Les briques d'adobe sont moulées à partir d'une terre malléable souvent ajoutée de paille, ils possèdent une structure interne solide. On peut les utiliser dans la réalisation de structures porteuses, pour les cloisons intérieures, la réparation de toutes les techniques de construction en terre



Figure I.12. Briques d'adobe



Figure I.13. Mur de briques d'Adobe

B/ Les briques de terre comprimées "BTC" : sont des briques généralement stabilisées au ciment ou à la chaux, sont de la terre tamisée très légèrement humide qui est fortement comprimée à l'aide d'une presse. Une fois pressées, elles sont stockées et mises à sécher en phase humide, sous bâche, durant une à trois semaines.

Les briques de terre comprimées sont utilisables sans enduit, en mur extérieur.



Figure I.14. Briques de terre comprimées

C/ Les briques crues "extrudées" : sont des briques destinées à être cuites, retirées de la chaîne de production avant le passage au four. On les utilise principalement en intérieur pour construire des murs, des cloisons et des parois non soumises à des efforts statiques.



Figure I.15. Briques crues "extrudées"

3. Pouzzolane naturelle

3.1. Définition

La pouzzolane est une roche naturelle pyroclastique, formé de fragment de magma projeté dans l'atmosphère lors d'éruption volcanique et refroidi au cours de leur parcours aérien. Elle possède une structure alvéolaire. La pouzzolane est généralement rouge ou noire, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise.



Figure I.16. Pouzzolane naturelle

Selon la norme américaine ASTM C125-07, les pouzzolanes naturelles sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux, qui ne possèdent pas eux-mêmes pas de propriétés liantes mais qui réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour former des composés possédants des propriétés liantes.

3.2. Propriétés physiques et chimiques

1. La pouzzolanacité ou l'effet pouzzolaniques : se définit comme la capacité, qu'ont les matériaux à température ambiante et en présence d'eau, de fixer l'oxyde de calcium (chaux) pour donner des composés stables possédant les propriétés hydrauliques du ciment.

La silice amorphe contenue dans ces matériaux (les pouzzolanes) réagit en présence d'eau avec la portlandite formée pendant l'hydratation des C_3S et C_2S pour former des silicates de calcium hydratés C-S-H.

Les principaux paramètres influençant les réactions pouzzolaniques sont :

- La composition chimique (chaux, silice, alumine) et surtout la teneur en silice SiO_2
- La durée de cure,

- La finesse de la pouzzolane (améliorée par broyage)
- Le rapport E/C du mélange
- La température.

L'activité pouzzolanique dépend à court terme de la surface spécifique du matériau, et elle est à long terme en étroite corrélation avec sa teneur en silice et alumine.

2. La densité varie en fonction de la granulométrie (les éléments les plus fins sont les plus denses) et l'hygrométrie ambiante. La densité moyenne de la pouzzolane est de 850 Kg/m^3 à 1900 Kg/m^3 .

3. La porosité qui varie de 30 à 60% selon la granulométrie ; et très grossière (vacuoles $> 100\mu\text{m}$) et fermée.

4. La composition chimique moyenne de la pouzzolane naturelle est donnée dans le tableau I.4.

Tableau I.4. Composition chimique moyenne de la pouzzolane naturelle

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
42 à 55%	2 à 24%	8 à 20%

En ce qui concerne leur comportement thermique, la pouzzolane a une température moyenne de fusion de 1140°C et présente une mauvaise conductibilité thermique.

3.3. Principales applications de la pouzzolane naturelle

Les pouzzolanes sont des granulats légers utilisés dans différents secteurs industriels de fait de leurs propriétés liées à leur composition essentiellement vitreuse, leur faible densité, leur forte porosité que leur confère leur structure alvéolaire, les principaux usages de la pouzzolane sont les suivants :

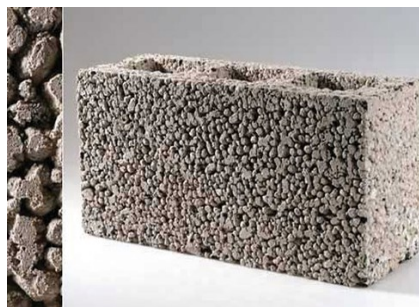
1- Viabilité : construction des assises et structuration des chaussées, recouvrement de câblage et de canalisations souterrains.

2- Bâtiment : fabrication des bétons légers, des blocs légers (parpaings), buses, éléments préfabriqués....

3-Sols sportifs : sols gazonnés ou stabilisés (couche de fondation drainante, couche intermédiaire, couche de surface ou chape).



Sols sportifs



blocs légers (parpaings)



Fabrication des bétons légers

Figure I.17. Principales applications de la pouzzolane naturelle

La pouzzolane est utilisée comme composant principal ou secondaire du ciment ou bien comme addition minérale dans les mortiers et les bétons.

Rappel : Ciment et additions minérales (fillers)

1. Définition du ciment

D'après la définition donnée par la norme **NF EN 197-1**, le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau.

2. Les étapes de la fabrication du ciment

Pour fabriquer du ciment, il faut réunir quatre éléments principaux selon des dosages préétablis : la chaux (65 %), la silice (20 %), l'alumine (10 %), l'oxyde de fer (5 %). L'élément prépondérant étant le calcaire ou la craie.

L'ensemble de ces éléments, appelé cru, est ensuite traité en installations procédant par voie humide ou par voie sèche, suivant la teneur en eau du calcaire ou de la craie.

Dans la voie humide, le cru est broyé et malaxé avec de l'eau pour constituer une pâte liquide qui est homogénéisée et stockée dans de grandes cuves cylindriques. Cette pâte est ensuite introduite dans la partie supérieure du four.

Dans la voie sèche, le cru est séché puis broyé. Il est ensuite homogénéisé dans de grands silos. Il est enfin introduit sous forme pulvérulente dans une tour de préchauffage où la décarbonatation se déroule partiellement, avant d'entrer dans le four proprement dit.

Le ciment est fabriqué, par voie sèche, selon le processus suivant :

2.1. Extraction, concassage et broyage

Les matières premières sont extraites des carrières. Les blocs extraits sont ensuite concassés sur le site même de la carrière à une dimension d'environ 50 mm.

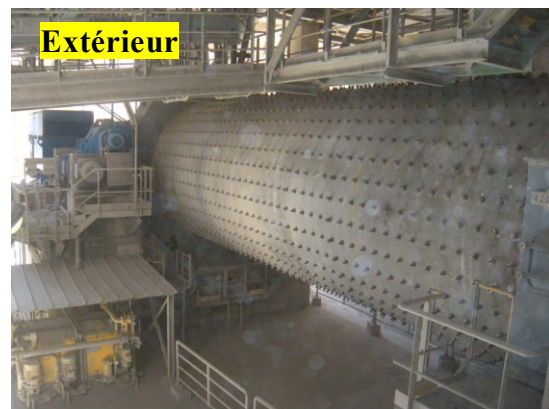
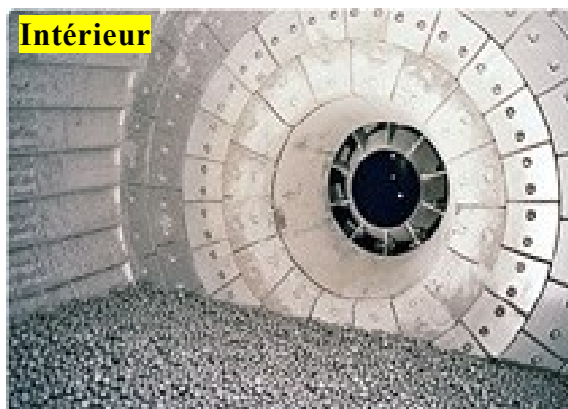


Figure I.18. Broyeur à boulets

2.2. Préparation du cru

Les morceaux de calcaires et d'argile sont broyés très finement et sont intimement mélangés pour donner le cru. Deux techniques de fabrication sont utilisées : le mélange est préparé sous forme de poudre (c'est la voie sèche ou semi-sèche) ou sous forme de pâte (c'est la voie semi-humide ou humide).

La voie sèche est aujourd'hui la plus utilisée. La pratique de la préhomogénéisation affine considérablement le dosage du calcaire et de l'argile, par l'empilement de nombreuses couches des deux matières premières.

Au sortir de la préhomogénéisation, le mélange est broyé très finement pour donner ce cru dont nous venons de parler. Le cru est ensuite réhomogénéisé par fluidisation.

La composition du cru respecte généralement les proportions suivantes :

Tableau I.5. Composition du cru

Composant du cru	Proportion
Carbonate de calcium (CaCO ₃)	77 à 83 %
Silice (SiO ₂)	13 à 14%
Alumine (Al ₂ O ₃)	2 à 4%
Oxyde de fer (Fe ₂ O ₃)	1,5 à 3 %.

La cuisson

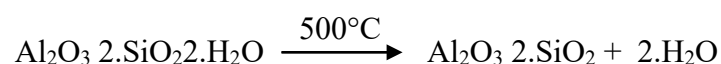
Les installations de cuisson comprennent deux parties :

A/ La poudre est déversée dans un échangeur de chaleur dans lequel circulent en sens inverse les gaz très chauds qui s'échappent du four. Le cru y progresse jusqu'à l'entrée du four proprement et est donc préchauffé à une température d'environ 800°C quand il atteint l'entrée du four. Sa décarbonatation commence.

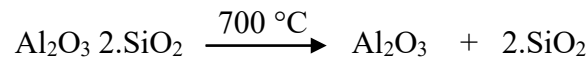
B/ Le cru pénètre dans un four rotatif légèrement incliné qui tourne à un rythme de 1 à 3 tour/mn. Ce four mesure de 60 à 90 mètres. Le cru, en entrant dans le four achève sa décarbonatation et chemine vers la zone de clinkérisation (1450°C).

Sous l'effet de la chaleur à une température allant de 500 °C à 800 °C, l'argile se décompose en oxydes simples (SiO₂ et Al₂O₃) et le calcaire se décarbonate pour former la chaux (CaO). Aux températures plus élevées de 900 à 1450 °C les oxydes de l'argile se combinent avec la chaux pour former les quatre principaux minéraux du clinker selon le schéma simplifié suivant :

- *Départ de l'eau de constitution de l'argile :*



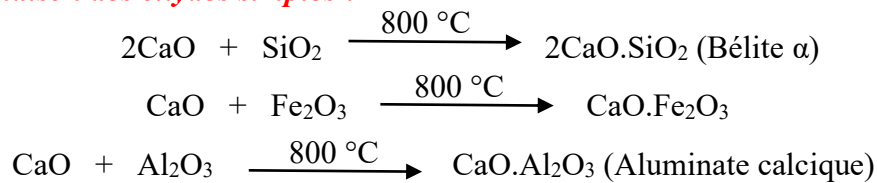
- **Décomposition de l'argile en oxydes simples :**



- **Décarbonatation du calcaire :**

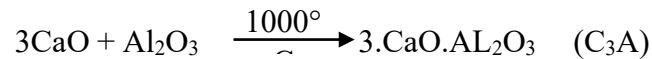


- **Combinaison des oxydes simples :**



- **Formation des aluminates et des Ferro – aluminates de calcium :**

La température de la matière monte jusqu'à 1450°C. Une partie de la matière fond pour donner naissance à la phase liquide constituée de phase aluminat et ferrite), cette étape Demande beaucoup d'énergie.



A la fin de la cuisson, la matière est brusquement refroidie. Elle se présente alors sous forme de granules. Il s'agit du clinker dont la composition est présentée dans le tableau I.6 :

Tableau I.6.Composition minéralogique du clinker

Minéraux	Formule chimique	Désignation simplifiée	Teneur en %
Silicate tricalcique	3CaO.SiO ₂	(C ₃ S)	50-70
Silicate bicalcique	2CaO.SiO ₂	(C ₂ S)	10-30
Aluminate tricalcique	3CaO.Al ₂ O ₃	(C ₃ A)	2-15
Alumino-ferrite tétra calcique	4CaOAl ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	(C ₄ AF)	5-15



Figure I.19. Clinker

2.3. Broyage du mélange

Finement broyé avec du gypse (destiné à réguler la prise), le clinker donne le ciment Portland. D'autres ciments sont obtenus en ajoutant à cette phase de broyage divers constituants : laitier granulé de haut fourneau, cendres volantes, fillers, schistes calcinés, qui sont des matériaux pouzzolaniques.



Figure I.19. Ciment

3. Les différents ciments

Selon la norme **NF EN 197-1**, les ciments peuvent être classés en cinq grandes familles :

Ciment Portland (CPA CEM I)

Ciment Portland composé (CPJ CEM II)

Ciments de hauts fourneaux (CHF CEM III)

Ciments pouzzolaniques (CPZ CEM IV)

Ciments au laitier et aux cendres ou **ciment composé** (CLC CEM V)

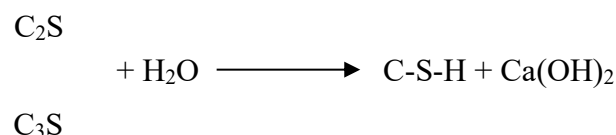
4. Hydratation du ciment

La pâte de ciment hydraté est le résultat de la réaction chimique entre l'eau et le ciment (réaction d'hydratation). C'est un processus chimique complexe où les principaux composés du ciment réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui durcissent avec le temps. C'est surtout l'hydratation du C_3S et du C_2S qui participent le plus au développement de la résistance, en produisant du silicate de calcium hydraté C-S-H et de la portlandite $Ca(OH)_2$.

La réaction de l'eau avec les quatre phases du ciment forme des hydrates stables qui lui donnent une résistance mécanique aux matériaux cimentaires.

□□ *Hydratation des silicates (C_3S , C_2S)*

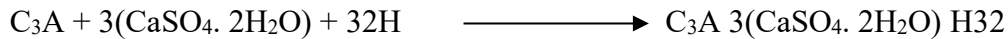
L'hydratation des silicates produit des gels de silicate de calcium hydraté $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ (**CSH**) et l'hydroxyde de calcium ou la Portlandite $Ca(OH)_2$ (**CH**), selon la réaction suivante:



➤ **Hydratation des Aluminates (C₃A)**

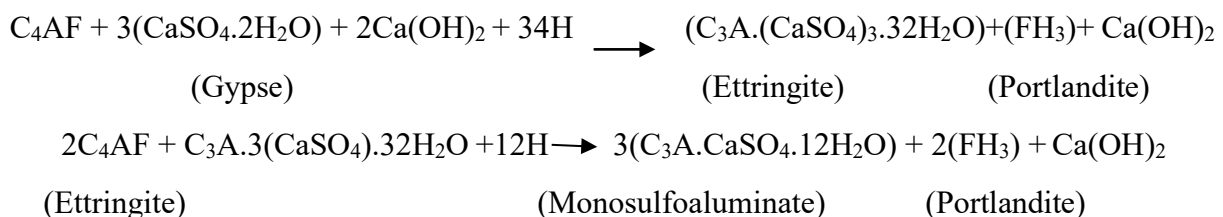
La présence du gypse (CaSO₄·2H₂O) joue un rôle très important dans l'hydratation des aluminates, dans le cas d'absence du gypse, la réaction de C₃A avec de l'eau est très violente et mène au raidissement immédiat de la pâte.

En présence du gypse, les C₃A réagissent d'abord pour former le trisulfoaluminate hydraté (Ettringite) selon La réaction suivante :



➤ **Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique (C₄AF)**

La réaction d'hydratation du C₄AF est de la même façon que C₃A, et elle est encore mal connue. Néanmoins, plusieurs études ont montré la similitude entre les produits d'hydratation du C₄AF et du C₃A. Le C₄AF en présence de gypse forme de l'ettringite, du monosulfoaluminate (après épuisement du gypse), Cette réaction dégage peu de chaleur et le C₄AF présente une participation très modeste aux développements de la résistance mécanique.



IV. Bilan de l'hydratation

Les hydrates sont des produits obtenus suite à la réaction de l'eau avec les quatre phases du ciment ; le résumé suivant synthétise les caractéristiques principales des hydrates formés :

A / *Silicates de calcium hydratés (CSH)*

Les CSH occupent entre 60 et 70% du volume de solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. Ils ont une structure en feuillets formés de cristaux très petits et mal cristallisés.

Les CSH sont des matériaux poreux, contenant une quantité d'eau variable, et en équilibre chimique avec la solution aqueuse.

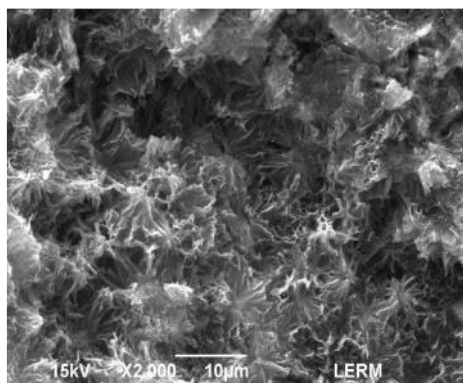


Figure I.20. Observation au Microscopie Electronique à Balayage du Gel de C-S-H.

B/ Portlandite (CH)

La portlandite occupe entre 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée. La portlandite a une morphologie hexagonale prismatique. Elle participe peu au développement de la résistance. En fait, la présence de la portlandite peut être un risque, parce qu'elle est fortement soluble et susceptible à l'attaque d'acide et de sulfate.

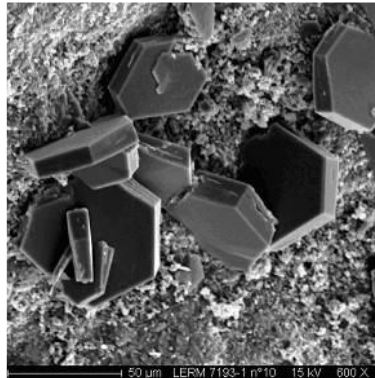


Figure I.21. Observation au Microscopie Electronique à Balayage du Portlandite.

C/ Aluminates hydratés ou ettringite

Ils occupent de 15 à 20 % du volume solide de la pâte de ciment hydraté, on les retrouve généralement sous deux formes : Ettringite (trisulfoaluminate) aiguilles prismatiques et Mono sulfoaluminates (plaquettes hexagonales).



Figure I.22. Observation au Microscopie Electronique à Balayage d'ettringite.

5. Additions minérales

5.1. Définition

Les additions minérales ou fillers sont des grains qui ne dépassent pas 0.08 mm, le mot fillers provient de l'Anglais « to fill » signifiant remplir. Les fines sont des produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches naturelles ou artificielles (calcaire, basalte, laitier...). Ces fines sont utilisées essentiellement pour améliorer la compacité en complétant l'ossature granulaire ; et pour réduire le dosage en ciment coûteux. Il existe deux types d'additions minérales :

Les additions minérales actives (pouzzolane, laitier granulé, fumé de silice,

Les additions minérales inertes (calcaire , laitier cristallisé,.....)

5.2. Effets des additions minérales

A/ Effet fillers ou effet de remplissage

L'incorporation de l'addition minérale permet le remplissage d'une partie du volume des vides du squelette granulaire par les particules fines, et donc libérer l'eau contenue dans les pores. Si la quantité d'eau est réduite, et la maniabilité est conservée, la résistance mécanique va s'améliorer. La réduction progressive du dosage en eau pour une même consistance en incorporant les additions.

B/ Effet physique ou de surface

Il concerne les modifications induites par la présence des particules d'additions minérales sur le processus d'hydratation du ciment et sur la structuration des produits hydratés. La présence des additions minérales provoque une accélération des réactions d'hydratation du ciment ceci est d'autant plus que les particules sont fines. Il agit essentiellement sur l'évolution des résistances mécaniques aux jeunes âges.

C/ Effet chimique ou pouzzolanique

Il concerne la capacité des additions, caractérisé par des propriétés pouzzolanique et/ou hydraulique, à réagir avec l'eau et les constituants anhydres ou hydratés du ciment pour former de nouvelles phases minérales qui contribuent à la résistance mécanique au même titre que les produits hydratés du ciment.

La réaction pouzzolanique concerne principalement la fumée de silice, la poudre de verre, la cendre volante siliceuse, etc. La silice amorphe contenue dans ces matériaux réagit en présence d'eau avec la portlandite formée pendant l'hydratation des C_3S et C_2S pour former des silicates de calcium hydratés C-S-H, mais d'un rapport C/S voisin de 1, donc plus riche en silice.

5.3. Quelques types des additions minérales

A/ Laitier vitrifié (granulé)

Défini par la norme NF EN 15167-1 comme un matériau vitrifié, il est obtenu par refroidissement rapide (par trempe), et présente une structure vitreuse et par conséquent riche en énergie. Cette forme vitreuse est une forme instable qui présente une hydraulicité latente. Donc le laitier granulé est un liant hydraulique qui contient essentiellement quatre oxydes : chaux (CaO), magnésie (MgO), silice (SiO_3) et l'alumine (Al_2O_3). Le laitier granulé moulu est défini aussi par la norme NF EN 15167-1 comme une fine poudre, il est obtenu par broyage de laitier granulé de haut-fourneau, il est utilisé comme addition minérale dans les mortiers et les bétons.

B/ Fillers calcaire

D'après la norme NF P18-508 les fillers sont des matériaux minéraux finement divisés, et peuvent être substitués partiellement au ciment pour améliorer certaines propriétés du béton hydraulique, ou pour lui conférer des propriétés particulières. Les fillers calcaires obtenus par broyage et/ou sélection, proviennent des gisements de roches calcaires.

Un filler calcaire est essentiellement utilisé comme une addition inerte permettant de remplacer une partie du ciment, et éventuellement d'augmenter le volume de poudre dans le béton ; son

influence sur les propriétés du béton depuis l'état frais jusqu'à l'état durci est un aspect important à prendre en compte pour limiter l'apparition de désordres (homogénéité, aspect de surface, baisse des résistances).

III. Matériaux activés

Les argiles calcinées

Les argiles sont de fines particules (< 2 microns) qui résultent de l'érosion des roches. Elles sont constituées de plusieurs centaines de feuilles empilées les unes sur les autres. Chaque feuille est à son tour composée de différentes couches entre 2 et 5), qui varient d'un type d'argile à l'autre mais qui sont souvent une combinaison de couches de silicate et d'aluminates. Leur composition chimique et leur taille leur confèrent un réel potentiel pour une utilisation en tant que pouzzolane¹ dans le ciment.

La calcination est une étape essentielle dans le développement d'une pouzzolane artificielle à partir d'une argile, car elle permet le passage d'une structure cristalline un arrangement ordonné des atomes) à une structure amorphe une structure désordonnée des atomes). Sans cette calcination ou activation thermique, les cristaux d'argiles seraient dans un état trop stable qui empêcherait toute réaction avec l'hydroxyde de calcium provenant du ciment.

Mélanger des additions minérales à du clinker est une solution pour réduire l'empreinte CO₂ des ciments et des bétons. Et le recours à des argiles calcinées constitue une alternative prometteuse.

Le métakaolin est un exemple d'argile calcinée déjà utilisée par les cimentiers. Il est produit par calcination du kaolin, une argile qu'on trouve partout dans la croûte terrestre. Cette pouzzolane est très réactive ; la substitution de 5 % à 10% de ciment par du métakaolin peut augmenter sensiblement les propriétés mécaniques du béton. Le problème est que le kaolin dispose de propriétés recherchées pour d'autres types d'applications, comme les cosmétiques, l'alimentaire ou encore la porcelaine, ce qui renchérit sensiblement son prix et diminue fortement sa disponibilité pour l'industrie de la construction. Par conséquent, le métakaolin n'est aujourd'hui employé dans le béton qu'à de très faibles taux de substitution de ciment et pour des applications très spécifiques.

1 Le terme **pouzzolane** vient du latin pulvis puteolana, désignant les sables de Pozzuoli, port italien situé au pied du Vésuve. Ce sable volcanique était déjà remarqué par Vitruve au 1er siècle avant J.-C. pour la fabrication de béton romain résistant à l'eau.

1. Métakaolin

1.1. Définition

Le métakaolin est un produit issu de la calcination d'une argile – la kaolinite – à des températures comprises entre 600 °C et 850 °C. Cette calcination induit une déshydroxylation (perte d'eau issue de sa structure cristalline) de la kaolinite, menant à la transformation d'un produit cristallisé (non réactif) en un produit amorphe et réactif, doté d'un fort pouvoir pouzzolanique. La couleur du métakaolin varie d'une source à une autre, en fonction du taux d'oxyde de fer présent dans le gisement et peut s'étendre du blanc au rouge, en passant par le rose.



Figure I.23. Métakaolin

1.2. Le kaolin : matière première

Le kaolin résulte essentiellement de l'altération de roches riches en feldspaths, principalement des roches acides (granite, granodiorite, pegmatite). Les produits de cette altération restent sur place : c'est le « kaolin résiduel », aussi appelé « kaolin primaire ». Dans le cas où les produits d'altération subissent un transport puis un dépôt, on parle de « kaolin sédimentaire » ou « kaolin secondaire ».

La kaolinite, de formule $Al_4[Si_4O_{10}(OH)_8]$ ou $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ est le principal constituant du kaolin et des argiles kaoliniques. Ce minéral fait partie de la classe des phyllosilicates, ou silicates en feuillets. Le plus souvent, la kaolinite se présente sous la forme de plaquettes pseudo-hexagonales de la taille du micron, qui peuvent s'empiler sous la forme de livres ou de vermicules atteignant de 50 à 100 μm d'épaisseur.

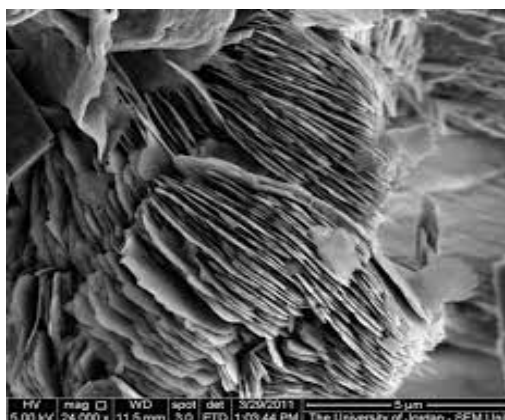


Figure I.24. Microstructure de kaolinite

1.3.Extraction du kaolin

Les modes d'extraction du kaolin dépendent :

- **de la dureté du matériau** : L'extraction du matériau est réalisée à la pelle. Toutefois, certains éléments inclus dans le gisement ou la découverte, peuvent localement nécessiter une phase de minage.

- **de la qualité du matériau** qui conditionne son usage. Ainsi, une utilisation qui requiert peu d'exigence de qualité n'aura pas les mêmes méthodes d'exploitation qu'un matériau avec des spécificités de qualité strictes à respecter pour une utilisation plus spécifique.

Pour les gisements de kaolin et argiles kaoliniques à faible contrainte de qualité, l'exploitation s'effectue directement à la pelle mécanique et chargée sur camion. Le tri sur site est succinct.

Pour les gisements de kaolin et argiles kaoliniques à forte contrainte de qualité, un tri est opéré sur place. L'exploitation s'effectue à la pelle mécanique de petite taille, un minage continu est envisageable, toujours avec un chargement sur camion ou par convoyeur. L'opérateur s'appuie à la fois sur le plan d'exploitation issu du modèle qualité réalisé, du suivi qualité durant l'exploitation mais aussi sur un contrôle visuel pour les qualités de gisement visible à l'œil nu (comme les fractures riches en oxydes de fer de teinte rouge). La précision du plan d'exploitation et l'expérience des opérateurs à l'extraction est importante car elle conditionne la bonne alimentation de la chaîne de traitement en qualité ainsi que sa régularité.



Figure I.25. Pelle mécanique manipulant le kaolin

L'argile kaolinique est mélangée, pour parfaire son homogénéisation, puis stockée sous hangar couvert avant d'être pré-séchée. Il s'ensuit une phase de broyage, puis de sélection (les éléments les plus gros sont éliminés) et d'enrichissement avant que les particules de kaolinite ne passent auprès d'une flamme alimentée par du gaz naturel. C'est pendant cette phase de quelques secondes que s'opère la transformation de la kaolinite en métakaolin.

Dans le four de calcination, la kaolinite chemine de haut en bas autour d'une flamme, qui porte le produit entre à une température comprise entre 600 °C et 800 °C, permettant la déshydroxylation de la kaolinite en métakaolin «schéma ci-dessous ». Enfin, le produit est refroidi et stocké en silo, prêt à être livré.

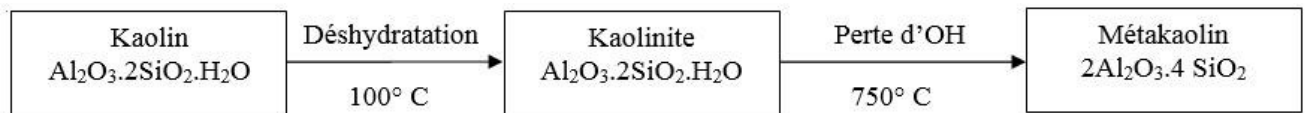


Figure I.26.Four de calcination

1.4. Normalisation et utilisation

Depuis 2010, le métakaolin répond aux spécifications de la norme produit NF P 18-513, qui précise ses caractéristiques physiques, chimiques mais aussi les critères de conformité du produit. Mais c'est depuis 2012 que le métakaolin peut réellement être utilisé comme addition minérale pour béton à part entière, après intégration à l'Annexe nationale de la norme béton NF EN 206-1.

Le métakaolin est classé comme une addition de type II (pouzzolanique ou hydraulique latent) avec un coefficient de prise en compte $k = 1$. Ce qui permet de remplacer le ciment par une masse égale de métakaolin pour un indice d'activité de 1.

Le métakaolin est une addition, c'est-à-dire un matériau finement broyé à caractère inorganique (silicate d'alumine), qui peut être incorporé au ciment ou au béton afin d'en améliorer certaines propriétés.

1.5. Avantages d'utilisation du métakaolin

Lorsqu'on l'utilise comme ajout cimentaire, le métakaolin offre plusieurs avantages.

- Augmentation de la résistance à la compression et à la flexion.
- Augmentation de la durabilité.
- Production d'un béton ayant des caractéristiques environnementales de développement durable.
- Perméabilité réduite (y compris la perméabilité aux ions chlorure), donc protection supplémentaire.
- Amélioration de la plasticité et des caractéristiques de mise en place du béton.

2. Cendres de balles de riz

2.1. Définition

La cendre provient de l'incinération des balles de riz dans les chaudières. C'est un matériau charbonneux sous forme de déchet végétal grisâtre et très léger, elle possède une teneur élevée en silice et de bonnes propriétés pouzzolaniques.

La balle du riz est un coproduit dérivé de la transformation du riz. Elle est constituée de l'ensemble des bractées ou glumelles qui renferment le grain. Après avoir protégé la graine pendant sa croissance, la balle peut être utilisée comme matériau de construction (isolation thermique).



Figure I.27. Balles de riz



Figure I.28. Cendres de balles de riz

2.2. Propriétés physiques et chimiques

La cendre de balle de riz est très riche en silice de 92 à 97%, elle est hautement poreuse, légère, absorbante, et ses propriétés isolantes sont utiles pour de nombreuses applications industrielles.

La composition chimique et les caractéristiques physiques sont représentées aux tableaux I.7 et I.8.

Tableau I.7. Composition chimique des cendres de balles de riz

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Na ₂ O
96,01%	0,96%	0,08%	0,30%	0,28%	0,96	0,88%	0,06%

Tableau I.8. Caractéristiques physiques des cendres de balles de riz

Densité (g/cm ³)	Absorption d'eau (%)	Conductibilité thermique (WK-1m-1)
0,61	37,41	0,15

2.3. Utilisation

Plusieurs travaux ont été effectués sur la balle de riz dans le cadre de la valorisation de sous-produits agricoles :

Dans le domaine de la cimenterie ; les cendres ont une réelle activité pouzzolanique et ont permis la mise au point d'un ciment Portland aux cendres CPAC composé à 80 % de ciment Portland CPA et 20 % de cendre de balles de riz.

La cendre de balle de riz est utilisée aussi dans la production de blocs à faible coût, à la production de béton de haute qualité, des panneaux isolants légers....

3. Sous-produit industriels et déchets

La valorisation des déchets dans le génie civil est un secteur important dans la mesure où les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des critères de qualité trop rigoureux.

La récupération des déchets touche deux impacts très importants, l'impact environnemental qui est résout par l'évacuation de ces déchets et l'impact économique qui est l'utilisation de ces derniers dans l'industrie ou dans le domaine de la construction, ces déchets ont l'avantage d'être disponibles en grande quantité et avec de faible valeur marchande.

Sous-produit ou déchets : tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit.

1.1.Granulats de caoutchouc

1.1.1. Introduction

Le volume de déchets du caoutchouc issus des pneus usagés est toujours en croissance ce qui pose de sérieux problèmes écologiques à l'environnement. Ces déchets, non biodégradables, sont souvent abandonnés simplement aux sites de décharges ou brûlés sous conditions contrôlées notamment dans les fours des cimenteries. Ce qui cause une grande pollution atmosphérique.

1.1.2. Définition

Les granulats de caoutchouc proviennent d'un broyage très fin de la gomme des pneus usagés, après extraction des fibres textiles et des fils métalliques également contenus dans les pneus. La taille des granulats varie de 0,8 à 20 mm. Pour que les granulats de pneus usagés puissent entrer dans les différentes filières de production industrielles.



Figure I.29.Granulats de caoutchouc

Etape 1 : Ramassage et stockage

Les pneus usagés sont ramassés et stockés dans le centre de recyclage



Figure I.30. Ramassage



Figure I.31. stockage

Etape 2 : Pesage et triage

Les pneus sont pesés et triés à la main : 1 pneu sur 6 en moyen peut être réutilisé sur le marché de l'occasion (Le pneu qui est encore en bon état (sain)) et les pneus non réutilisables sont envoyés au broyage



Figure I.32. Triage des pneus

Etape 3 : Broyage

Les pneus sont broyés jusqu'à ce qu'ils atteignent la taille souhaitée

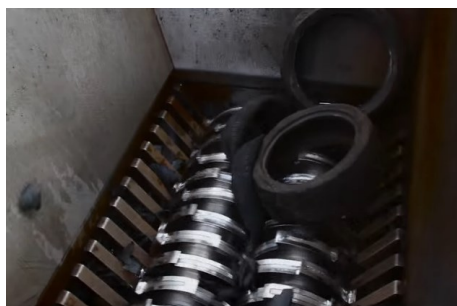


Figure I.33. Broyage des pneus

Etape 4 : Extraction des fils d'acier et des fibres textiles

Un pneumatique est composé de gomme de caoutchouc, fils d'acier et textile (pour renforcer et améliorent la résistance de la gomme). À la fin on obtient les Granulats de caoutchouc.



Figure I.34. Extraction des fils d'acier et des fibres textiles

1.2.3. Avantages et utilisation de caoutchouc

L'addition de caoutchouc du pneu dans les bétons améliore :

- Les caractéristiques de fatigue et augmente la résistance contre les fissures.
- La résistance mécanique (par le traitement de la surface des grains du caoutchouc).

Un prétraitement des granulats de caoutchouc par l'acide (NaOH) suivit d'un rinçage par l'eau pour enlever le zinc de la surface du caoutchouc. Ceci conduit à des changements considérables du caoutchouc traité ce qui améliore l'adhésion entre le caoutchouc traité et la matrice du ciment.

- Le comportement en conditions climatiques sévères, notamment les cycles de gel/dégel.
- Incorporation des particules du caoutchouc dans des matières cimentières pour des usages tel que les bétons (en substitution partielle ou total des granulats naturelle) et dans les chaussées d'autoroute (bétons bitumineux)

1.2.Laitiers de haut fourneau

Le laitier d'HF est un co-produit découlant de la transformation, dans le Haut-Fourneau, soit des oxydes de fer en "Fonte", soit des oxydes de manganèse en alliage "Ferro-manganèse".

1.2.1. Fonctionnement du haut fourneau

Du coke et du minerai (sous forme d'aggloméré) sont chargés en couches alternées dans le haut fourneau où règne une température pouvant atteindre 2000°C.

Le coke, en brûlant sous l'effet de l'air chauffé introduit par les tuyères, entraîne la fusion et la réduction du minerai.

Tous les constituants non métalliques et non gazeux se liquéfient aux températures atteintes. La densité de ce liquide étant d'environ 3, celle de la fonte aux alentours de 7 et celle du Ferromanganèse de l'ordre de 6,3, il y a séparation par gravité.

Le laitier qui vient de prendre naissance surnage à la surface du bain de fonte. Il est constitué des cendres du coke, de la gangue des minerais et des fondants le cas échéant.

Le laitier et le ferromanganèse sont coulés par deux orifices séparés : le trou à laitier et le trou à métal. Toutefois, une partie du laitier coulé avec l'alliage est séparée par siphon à la sortie du

haut-fourneau. La température des laitiers, de l'ordre de 1450 °C, est supérieure à celle de la fonte ou du ferromanganèse de quelques dizaines de degrés.

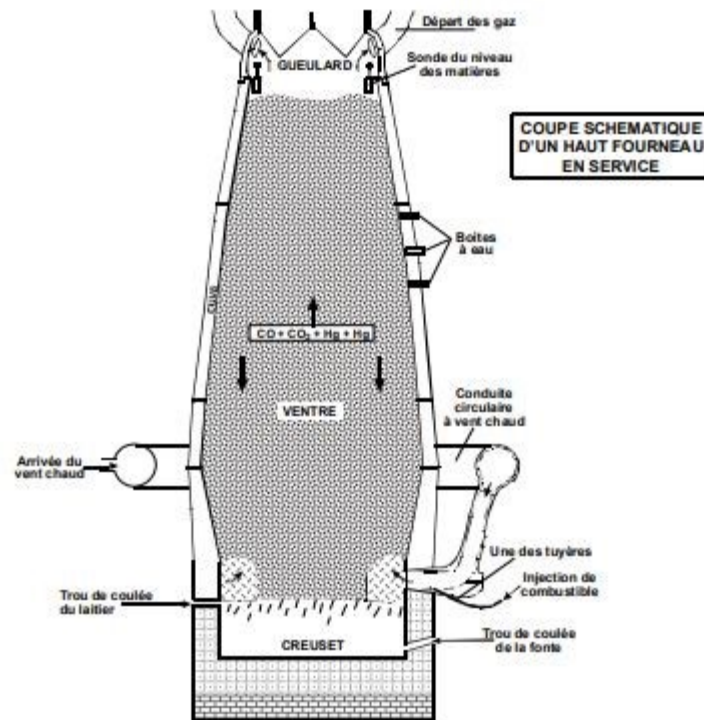


Figure I.35. Haut fourneau

On distingue deux formes minéralogiques différentes de laitier Selon leur mode de refroidissement.



A/ Coulé du laitier de haut fourneau



B/ Laitiers de haut fourneau

Figure I.36. Laitiers de haut fourneau

Le refroidissement rapide : Le procédé consiste à refroidir brutalement le laitier en fusion. Le produit obtenu se présente sous la forme d'un sable. Lors de cette trempe, le laitier acquiert une structure vitrifiée qui correspond à celle qu'il présentait à haute température, à l'état liquide. L'évolution normale du refroidissement ayant été stoppée, le laitier conserve une énergie latente qui constitue son potentiel de prise hydraulique. Le refroidissement peut s'effectuer selon deux méthodes distinctes. Le laitier obtenu par cette technique est appelé **laitier vitrifié (granulé)** et défini par la norme **NF EN 15167-1**.



Figure I.37. Refroidissement rapide du laitier liquide (par trempe)



Figure I.38. Laitier granulé

Le refroidissement lent : Le laitier est épandu en couches d'épaisseurs relativement faibles afin d'augmenter sa surface d'échange avec l'air et qu'il puisse ainsi se refroidir dans les meilleurs délais (si besoin est, il est procédé à un arrosage à l'eau de mer). En se solidifiant naturellement, le laitier cristallise, d'où son nom générique de laitier cristallisé.



Figure I.39. Refroidissement lent à l'aire libre



Figure I.40. Laitier cristallisé

Caractéristiques des laitiers

Caractéristiques chimiques

Le laitier cristallise : Il correspond à une forme minéralogique stable. Il est chimiquement stable et son pouvoir hydraulique, lorsqu'il existe, ne peut être que modeste. Il est constitué pour 95 à 98 % de sa composition d'un mélange de quatre oxydes : silice SiO_2 , chaux CaO , alumine Al_2O_3 et magnésie MgO ; le complément est constitué par des oxydes secondaires (FeO , MnO) et des composés sulfurés

Le laitier vitrifié : Le laitier vitrifié, qui a subi une trempe, présente une structure vitreuse et désordonnée. Cette forme vitreuse est instable car le laitier (du fait de la trempe) a gardé une énergie de cristallisation non dissipée qui va lui permettre d'être hydraulique. Sous l'effet d'une activation basique, le laitier vitrifié va donc évoluer vers son plus bas niveau d'énergie en formant des produits d'hydratation solides. C'est la formation de ces hydrates qui constitue la prise et le durcissement du laitier et qui lui confère la caractéristique de liant hydraulique.

Caractéristiques physiques

Le laitier cristallise : Il se présente sous deux aspects

En l'état, après une période de vieillissement de trois mois, c'est un tout venant dont la granulométrie est de l'ordre de 0/300 mm, sans garantie de fuseau.

Après diverses opérations de concassage-criblage il peut, selon la demande, être proposé sous une large gamme de fractions granulométriques 0/D et d/D.

Le laitier vitrifié (granulé)

Le laitier vitrifié correspond à un sable 0/5 à 0/6 mm. Il peut être broyé pour augmenter sa teneur en fines (éléments inférieurs à 0.080 mm) donc sa réactivité.

II.2- Utilisation des laitiers de haut fourneau

Le laitier cristallise utilisations en remblai ou en couche de forme



Figure I.41. Utilisation du laitier cristallise en remblai

Si le laitier granulé de hauts fourneaux est additionné avec une quantité $> 5\%$ en masse, il doit (NF EN 197-1) :

- * contenir au moins deux tiers en masse de laitier vitreux,
- * être constitué d'au moins deux tiers, en masse, de la somme CaO , MgO et SiO_2 ,
- * avoir un rapport en masse $(\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2)$ supérieur à 1.

La détermination de la teneur de chaque constituant est réalisée conformément à la norme NF EN 196-2. Les différents types de ciment comprenant du laitier sont indiqués dans le tableau suivant (Tableau I.9) :

Tableau I.9. Différents types de ciment comprenant du laitier

Désignation	Notation	Clinker	Laitier de HF
Ciment Portland composé	CPJ-CEM II/A	80-94	6 à 20
	CPJ-CEM II/B	65-79	21 à 35
Ciment de haut fourneau	CHF-CEM III/A	35-64	36-65
	CHF-CEM III/B	20-34	66-80
	CLK-CEM III/C	5-19	81-95
Ciment au laitier et aux cendres	CLC-CEM V/ A	40-64	18-30
	CLK-CEM III/B	20-39	31-50

III- Verre recyclé

II.1- Définition

Le verre est un matériau fragile (cassant) et transparent à la lumière visible, à base de silice. La silice l'ingrédient de base est La silice (dioxyde de silicium SiO_2 qui représente environ 70% de la masse Elle est l'élément formateur de réseau. Si l'on augmente sa quantité, on augmente la dureté du verre. Son point de fusion est à 1730°C . Elle entre dans la fabrication sous forme de sable dont les plus purs en contiennent 99,5 % (les sables quartzeux). Plus le pourcentage de silice est élevé et plus le coefficient de dilatation est faible ; donc, plus le verre est résistant.

II.2- Propriétés des verres

- **Dureté** : Le verre est un matériau relativement dur, sa dureté sur l'échelle de Mohr qui en compte 10 varie de 5 à 7 en fonction de sa composition.
- **Masse volumique ou densité** : La densité du verre est voisine de celle du béton, elle varie de 2,45 à 2,55.
- **Conductibilité thermique** : Le verre conduit relativement mal la chaleur, sa conductivité varie de 0,65 à 1,15 $\text{W/m}^\circ\text{C}$.
- **Contraintes thermiques** : Le verre résiste mal à la chaleur parce qu'il possède d'une part un faible coefficient de conductivité thermique et d'autre part un coefficient de dilatation relativement élevé
- **Comportement au feu** : Le feu n'a aucune action chimique sur le verre :

Il est ininflammable et incombustible

- Il n'est pas décomposé

- Il n'est pas oxydé

- **Résistance chimique** : Il n'est attaqué que par l'acide fluorhydrique ou quelques produits fortement alcalins. Les eaux de ruissellement de béton sont de ce point de vue particulièrement dommageable pour les vitrages.

➤ **La transparence du verre :**

Il ne suffit pas qu'un milieu soit transparent pour qu'il soit invisible. Ce phénomène est lié à la discontinuité des milieux traversés par la lumière, ici : l'air et le verre.

Lorsque la lumière frappe la surface d'un vitrage, la majeure partie de celle-ci passe à travers le verre. Cependant une partie de cette lumière est réfléchiée et une partie est absorbée en cours de traversée.

Le facteur de transmission varie d'une longueur d'onde à l'autre. Ainsi dans les domaines de l'ultraviolet et de l'infrarouge, l'absorption est très importante ; au contraire dans le domaine où se situe le spectre visible, le verre est transparent.

Ainsi le verre est transparent pour le visible dans un domaine de longueur d'onde compris entre 0,38 et 0,78 μm . La lumière visible ne met en vibration aucun électron et l'énergie qu'elle transporte n'est pas susceptible d'être absorbée.

II.2-Valorisation du verre

Deux méthodes pour valoriser le verre usagé, soit par réemploi directe (le produit usagé, après réparation est à nouveau utilisé pour le même usage ou un usage différent). Soit par recyclage (exemple, la valorisation du verre de bouteilles dans les matériaux cimentaire).

Granulats : La valorisation du verre de bouteilles comme granulats dans les bétons pourrait constituer une alternative intéressante, sur le plan environnemental, en évitant sa mise en décharge. Cependant, sur le plan technique les verres de bouteilles contiennent des quantités importantes d'alcalins pouvant entraîner des effets préjudiciables sur le béton en relation avec les réactions alcali-silice ou alcali-granulats.

Addition minéral (ajouts) : La poudre de verre est issue de la récupération des bouteilles en verre dans des décharges sauvages et dispersées dans la nature (montagne, bord de mer etc.). Celles-ci sont nettoyées afin d'éliminer les étiquettes en papier et les traces de sucre qui peuvent provoquer un retard de prise de la pâte du ciment, concassées et finement broyées.



Figure I.42. Granulats du verre



Figure I.43. Poudre de verre

Chapitre II

Liants alternatifs et produits de substitution



Ce chapitre décrit, dans la première partie, les liants alternatifs organiques et inorganiques utilisés dans la stabilisation des argiles et dans les matériaux cimentaires

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la description des produits de substitution aux ciments

I. Liants organiques : stabilisants d'argiles

Les stabilisants d'origine animale ou végétale sont répertoriés en fonction de la nature de la molécule responsable de l'amélioration de la cohésion et des mécanismes physico-chimiques mis en œuvre.

Quatre catégories se distinguent : les polysaccharides, les lipides, les protéines et les autres molécules complexes

1. Les polysaccharides regroupent les macromolécules de la famille des sucres complexes. Ce sont de longues chaînes, linéaires ou ramifiées, formées par la juxtaposition, régulière ou aléatoire, de motifs répétés d'un ou plusieurs sucres simples. La cellulose, l'amidon, les principales molécules des gommages naturelles et les gels de jus végétaux sont des polysaccharides.

Les polysaccharides sont tous d'origine végétale. Il existe aussi des polysaccharides d'origine animale, c'est le cas de **la chitine** : très présente dans la cuticule ou la carapace des insectes et des crustacés.

Il existe une grande variété de sous-produits agricoles s'utilisant comme matière fermentescible pour stabiliser la terre. Parmi eux, les pailles fines ou broyées et balles de céréales, le foin (notamment le foin de fonio au Burkina) sont les plus utilisés.



Foin



Paille de blé broyée



Balle de riz

Figure II.1. Sous-produits agricoles utilisés dans la stabilisation

1.1. Transformation des fibres végétales

La transformation des fibres végétales intervient après son récupération en passant par plusieurs opérations nécessaires pour l'obtention d'une matière première naturelle utilisée comme stabilisant.

Macération de fibres végétales

Pour accélérer le processus de dégradation de ces matières, du jus d'ensilage ou des peaux de fruits comme le raisin ou la pomme s'emploient parfois pour déclencher la fermentation.

La macération de fibres végétales est très largement répandue : chaque région du monde propose des recettes similaires avec ses propres ingrédients. Les nombreuses variantes diffèrent par leurs ingrédients aussi bien que par leur temps de macération allant de quelques jours à

plusieurs semaines. Cette étape de macération dépend des conditions de température et d'humidité.

La macération de fibres végétales conduit, lorsque les conditions de température et d'humidité sont favorables, à leur décomposition par des micro-organismes (bactéries et champignons). Ils dégradent peu à peu la matière organique en commençant par absorber des sucres simples. Ils s'attaquent ensuite, par leurs enzymes extracellulaires, à des biopolymères plus ou moins aisément dégradables (pectines, amidon, cellulose, etc.). En revanche, certaines macromolécules comme la lignine sont difficilement dégradées.

Au fur et à mesure de cette dégradation, les molécules de cellulose et autres fibres microscopiques se séparent, la matière végétale se divise : la surface de contact entre les argiles et ces fibres végétales microscopiques est très grande, leurs chances d'interagir se multiplient.

De plus, certaines bactéries fabriquent des biopolymères appelés exopolysaccharides. Ce sont souvent des polysaccharides complexes : des grandes molécules stables, capables de former des gels et de lier les particules minérales entre elles.

Ce sont de véritables colles des argiles qui peuvent rendre le mortier plus visqueux et faciliter sa mise en œuvre.

1.2. Exemple : Bale de riz pour enduits

La préparation de l'enduit a réclamé trois à quatre semaines de temps de macération.

- Dans les bassins, les mottes de terre ont été brisées avec la pioche
- Puis recouvertes totalement d'eau. Pendant trois ou quatre jours, la terre est écrasée à la pioche puis malaxée (pieds et mains) jusqu'à obtenir un mélange de la consistance d'une boue liquide à laquelle ont été ajoutés trois sacs de balle de riz tamisée dans chaque bassin.
- Le mélange est pétri à la main au moins une fois par semaine ; la couleur devient gris foncé, la fermentation fait augmenter le volume tout en donnant une odeur de pourriture.
- De l'eau a été ajoutée régulièrement car l'évaporation était forte et le processus de macération ne devait pas être interrompu.
- Le jour du crépissage environ 5 sacs de balle de riz ont été ajoutés dans chaque bassin jusqu'à obtenir une consistance d'une boue.



Figure II.2. balle de riz.



Figure II.3. Enduit à base de balle de riz



2. Les lipides : Les lipides constituent la matière grasse des êtres vivants. Alors que la plupart des familles de molécules de base du monde vivant sont définies par leur structure chimique, les lipides sont caractérisés par leur propriété physique : la solubilité. Ils ne sont pas ou faiblement solubles dans l'eau. Les termes huile, beurre, graisse, cire ne désignent que leur état physique, liquide, solide ou de consistance intermédiaire à température ambiante.

Exemple : Huile de lin

Matière première : L'huile de lin est extraite des graines : elles sont séchées puis légèrement grillées avant d'être pressées. L'emploi de cette huile en peinture remonte au XVe siècle. D'autres huiles, d'usage traditionnel ou récent, sont également employées pour stabiliser la terre : l'huile de kapok, de raisin sauvage, l'huile de poisson, l'huile dure (mélange d'huile de lin, de bois de chine et de ricin), etc.



Figure II.4. Graines de lin



Figure II.5. Huile de lin

Les huiles sont des corps gras liquides à température ambiante. Suivant l'usage et la viscosité de l'huile, il est parfois nécessaire de la chauffer un peu ou de la diluer dans un solvant comme la térébenthine pour faciliter son application. Les huiles s'utilisent dans la masse, ajoutées après l'eau de gâchage ou en imprégnation sur l'enduit de finition sec.

Elles sont généralement réservées aux couches de finition et aux endroits les plus exposés aux détériorations (sols, mur extérieur particulier, etc.)

Les huiles sont des composés hydrophobes qui ne sont pas miscibles à l'eau. Elles contribuent à améliorer la résistance à l'eau des enduits et sols en terre. De plus, certaines huiles, dites siccatives, peuvent rendre plus résistant l'enduit ou le sol de terre, en durcissant.

Très lent de polymérisation des acides gras. Ces acides gras polyinsaturés s'oxydent à l'air et forment des liaisons covalentes entre eux : les molécules d'acides gras se relient fortement les unes aux autres, l'huile durcit. La présence d'oxydes métalliques accélère la siccation: ce sont des siccatifs, ils apportent l'oxygène nécessaire au durcissement de l'huile grâce à leurs groupements hydroxyles.



Figure II.6. Utilisation d'Huile de lin comme stabilisant

3. Les protéines sont des molécules essentielles pour le fonctionnement cellulaire tant dans le monde animal que dans le monde végétal. Elles ont des fonctions très variées suivant leur nature. Certaines ont un rôle structurel, comme le collagène (peau et os), d'autres assurent le transport de molécules, comme l'albumine (œuf et sang) et la caséine (lait).

Exemple : Caséine

Matière première : La caséine est une protéine du lait. Il s'agit d'un émulsifiant qui donne des solutions (du type huile dans l'eau) très stables.

Les sources de caséine sont variées : le lait, le fromage blanc 0% de matière grasse et la caséine en poudre. Les molécules de caséine sont naturellement organisées en petites pelotes. Pour fabriquer la colle de caséine, cette structure doit être cassée, les molécules de caséine dispersées.

Lors de cette étape, le lait ou le fromage blanc perd sa couleur blanche pour devenir translucide. Certaines recettes emploient pour cette étape une base forte, comme l'ammoniaque, du carbonate d'ammonium ou du borax.

Rôle de la Caséine

Les molécules de caséine sont toutes petites en comparaison de la taille des pelotes de caséine. Une fois libérées par l'ammoniaque, ces molécules sont en partie chargées négativement. Elles conservent sur certains morceaux de leur chaîne leur caractère hydrophobe. Ce sont donc des molécules amphiphiles : capables de lier à la fois l'eau et à la fois l'air ou des composés ou matériaux hydrophobes. La présence d'une charge négative entraîne, suivant les conditions de pH et de force ionique, une attraction ou une répulsion d'origine électrostatique. Suivant la charge portée par les argiles, la caséine peut donc avoir un rôle de dispersant (par neutralisation de charge) ou de colle en liant fortement les particules d'argile entre elles.



Figure II.7. Caséine

II. liants bélitiques

1. Définition

La préparation des ciments a l'inconvénient de libérer énormément de CO₂. L'industrie du ciment est donc aujourd'hui à la recherche d'une alternative valable au ciment Portland, c'est-à-dire des ciments présentant au moins les mêmes caractéristiques de résistance et de qualité que les ciments Portland, mais qui, lors de leur production, dégageraient moins de CO₂.

A ce titre, ces dernières années, les recherches se sont orientées vers les ciments dits *sulfo-alumineux* et *sulfo-bélitiques*, qui dégagent moins de CO₂ que les ciments Portland lors de leur production.

Ces types de ciments, appelés sulfo-alumineux à base de calcium et à haute teneur en bélite, ils se distinguent de ciment Portland par absence d'alite (C₃S), sa faible teneur en chaux et sa grande friabilité.

Ces caractéristiques sont importantes puisqu'elles permettent de réduire la demande d'énergie nécessaire à la décarbonatation du calcaire et au broyage pendant la fabrication.

2. Fabrication des ciments sulfoalumineux-bélitiques

La fabrication du ciment sulfoalumineux est réalisée à partir d'environ 40 % de calcaire (au lieu de 80 % pour le ciment Portland), d'une source d'aluminium comme la bauxite (40 %) et d'une source de sulfate (20 %).

La fabrication du constituant majoritaire du ciment sulfoalumineux émet donc près de trois fois moins de CO₂ que celle du constituant majoritaire du ciment Portland (alite, C₃S).

Les clinkers sulfoalumineux-bélitiques sont couramment mélangés avec une source de sulfate telle que la bauxite, l'anhydrite ou le gypse, qui sont des produits naturels extraits directement des carrières.

Hormis lors de l'extraction, du broyage et du transport, la production de l'anhydrite n'est pas responsable d'émission de dioxyde de carbone. De plus, l'anhydrite n'est pas un composé particulièrement rare ou onéreux.

En résumé, la présence de sulfate de calcium dans les ciments permet de réduire le coût et l'impact environnemental des liants. Le procédé cimentier ainsi que la composition du cru, des phases anhydres et hydrates du ciment Sulfo-alumineux -bélitiques sont présentés sur la figure ci-dessous :

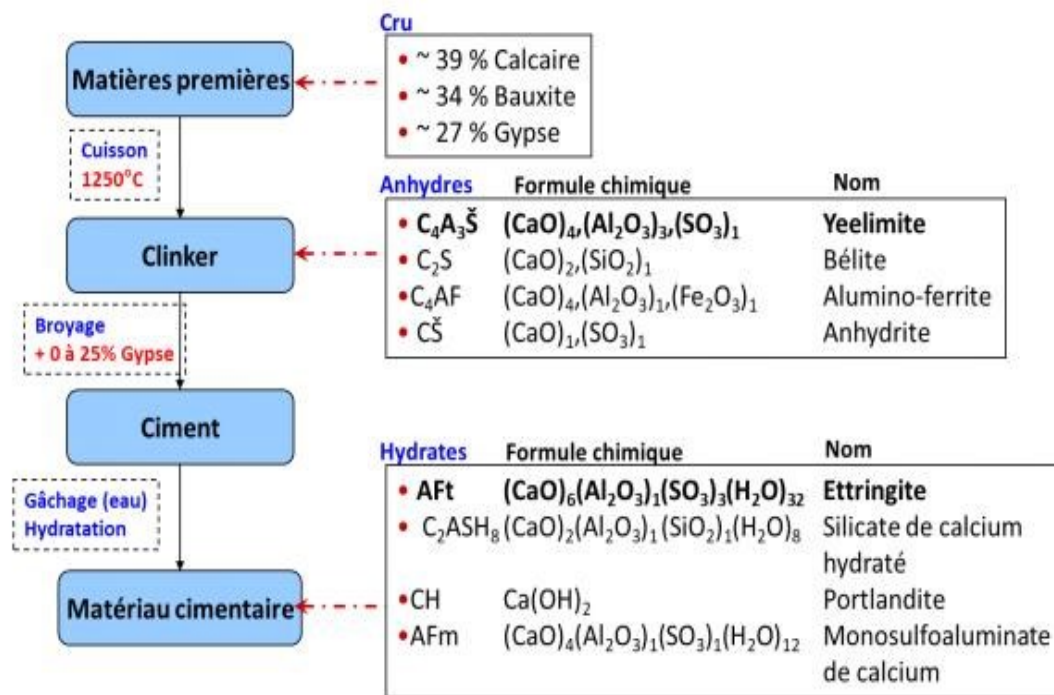


Figure II.8. Représentation schématique du procédé cimentier ainsi que la composition du cru, des phases anhydres et hydrates du ciment Sulfo-alumineux béliques

3. Avantages d'utilisation des ciments sulfoalumineux-béliques

Les ciments sulfoalumineux-béliques présentent en effet plusieurs avantages par rapport au ciment Portland.

- Un durcissement rapide et une résistance au jeune âge très élevée
- Une bonne résistance mécanique à long terme
- Des propriétés expansives ou non
- Une faible alcalinité
- Une faible perméabilité
- Une bonne durabilité en environnement agressif, en milieu marin ou en milieu sulfaté notamment.

III. Liants de verre

1. Définition

Les liants de verre sont des géopolymères ou des liants obtenus essentiellement à base de la poudre de verre. Cette dernière, sa haute teneur en silice amorphe SiO_2 lui confère des propriétés pouzzolaniques en se combinant avec la chaux pour produire d'autres hydrates (CSH)

La poudre de verre est issue de la récupération des bouteilles en verre dans des décharges sauvages et dispersées dans la nature (montagne, bord de mer etc.). Celles-ci sont nettoyées afin d'éliminer les étiquettes en papier et les traces de sucre qui peuvent provoquer un retard de prise de la pâte du ciment, concassées et finement broyées.

2. Réaction pouzzolanique du verre

L'activité pouzzolanique du verre évalué par diverses méthodes : les tests mécaniques sur éprouvettes, ou tests chimiques de consommation de chaux.

L'indice d'activité est défini comme étant le rapport de la résistance du mélange avec verre à la résistance du mélange témoin

L'indice d'activité influencé par plusieurs facteurs :

La taille des grains de verre

Teneur en verre

La couleur de verre

La température

3. Avantages d'utilise des liants de verre

L'utilise des liants à base de verre offre plusieurs avantages.

- Augmentation de la résistance mécanique.
- Augmentation de la durabilité.
- Perméabilité réduite donc protection supplémentaire.
- Production d'un béton ayant des caractéristiques environnementales de développement durable.

IV. Géopolymères et Polymères inorganiques

1. Géopolymères

1.1. Définition

Le terme **géopolymère** est très récent, il a été inventé il y a près de quatre décennies par le professeur Joseph Davidovits pour les liants alumino-silicate formés dans un environnement alcalin, ceux-ci ont également été appelés géo-ciment, polymère inorganique, céramique liée aux alcalis ou verre synthétisé à basse température ; leur utilisation pratique à grande échelle s'est réellement concrétisée depuis 1989. Les géopolymères apparaissent comme une solution adéquate pour remplacer les matériaux traditionnels vus leurs stabilités, durabilité et résistance aux différents milieux et conditions climatiques.

1.2. Les matières premières

Les matières premières sont principalement des minéraux d'origine géologique, d'où le nom «géopolymère» ; A l'instar des roches, les polymères minéraux résistent aux agressions chimiques, basiques ou acides, ainsi qu'aux solvants organiques, ils sont pauvres en émission de gaz à effet de serre CO₂.

Les géopolymères peuvent être classés en deux grands groupes :

Les géopolymères entièrement inorganiques

Les géopolymères contenant une certaine quantité de matière organique.

1.3. Synthèse des géopolymères

La synthèse des géopolymères dépend de nombreux paramètres dont le plus important est le type des matières premières utilisées. Les matériaux à base de silicium et d'aluminium tels que le kaolin, le métakaolin et les cendres volantes peuvent être utilisés.

Les cendres volantes sont un sous-produit généré lors de la combustion de charbon pulvérisé dans les centrales thermiques, Il contient essentiellement SiO₂ et Al₂O₃ ainsi que d'autres composés tels que CaO, Fe₂O₃, MgO et MnO.



Figure II.9. Cendres volantes

En raison de leur disponibilité, de leur composition alumino-silicate, de leur faible demande en eau et de leur grande ouvrabilité, les cendres volantes sont devenues un matériau d'intérêt pour la synthèse des géopolymères.

Pendant la géopolymérisation, les cendres volantes réagissent avec les milieux alcalins et spécifiquement les solutions aqueuses de polysialates conduisant à la formation de matériaux cimentaires, comprenant du gel d'alumino-silicate-hydrate (A – S – H).

Les géopolymères à base de cendres volantes présentent une bonne résistance mécanique et une durabilité améliorée.

Le facteur limitant, qui a gêné l'utilisation des cendres volantes dans les géopolymères, est sa faible réactivité, qui conduit souvent à une prise lente et au développement de la résistance.

Dans de nombreux cas, la dissolution des cendres volantes n'est pas complète avant la formation de la structure durcie finale. Dans une microscopie et une microanalyse de particules de cendres volantes restantes dans des ciments géopolymères, il a été signalé que la mullite «silicate d'aluminium» présente dans les cendres volantes n'a pas réagi et le calcium semble être actif dans le processus d'activation alcaline des mélanges des cendres volantes.

Les géopolymères commencent à sortir des applications très spécialisées pour devenir des matériaux plus standards, notamment dans la construction. En effet, il est possible de remplacer le béton par des géopolymères, une opération qui économise beaucoup d'énergie.

Il s'agit d'un nouveau matériau, un nouveau liant pour béton, les géopolymères sont de nouveaux matériaux pour les revêtements et les adhésifs, de nouveaux liants pour les composites de fibres.

1.4. Propriétés et les utilisations des géopolymères

Les géopolymères sont explorées dans de nombreuses disciplines scientifiques et industrielles : chimie inorganique moderne, chimie physique, chimie des colloïdes, minéralogie, géologie et dans tous les types de technologies de processus d'ingénierie. Les matériaux résistants au feu, l'isolation thermique, les matériaux de construction de faible technologie, les carreaux de céramique à basse énergie,

- les articles réfractaires, les réfractaires à choc thermique
- Ciments et bétons
- Composites pour la réparation et le renforcement des infrastructures

V. Pouzzolanes naturelle et artificielle

1. Définition

Une pouzzolane est un matériau naturel ou artificiel capable de réagir en présence d'eau avec de l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes. (Voir chapitre 1)

Pouzzolane naturelle : produit d'origine volcanique composé de silice, alumine et d'oxyde de fer et ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques, exemple : verre volcanique.

Pouzzolane artificielle : toute matière composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques, exemple : le fumé de silice, cendre de balle de riz, cendres volantes.

2. Composition des pouzzolanes

Les pouzzolanes sont des roches acides ayant des teneurs élevées en silice et en alumine, la composition chimique des pouzzolanes est donnée dans le tableau suivant :

Tableau II.1. Composition chimique des pouzzolanes

Eléments	Pourcentages
SiO ₂	42-73
Al ₂ O ₃	10-20
CaO	1-10
MgO	1-3
Fe ₂ O ₃	4-14
Alcalins	1-8

La somme (silice + alumine) varie souvent de 70 à 80%.

Les quantités de chaux sont limitées, ce qui explique par ailleurs la capacité des pouzzolanes à fixer la chaux.

3. Réactivité des pouzzolanes

Les pouzzolanes (matériaux naturelles pouzzolaniques) sont définies selon la norme **ASTM C125-07** comme des matériaux siliceux ou silico-alumineux, qui ne possèdent pas eux-mêmes pas de propriétés liantes mais qui réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes.

Selon la norme **ASTM C618**, un matériau est considéré comme pouzzolanique si :

- Sa composition chimique vérifiée : $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 > 70\%$
- Son indice d'activité i est : $0,67 < i < 1$

L'indice d'activité est un paramètre qui décrit quantitativement le degré de réaction dans le temps ou le taux de réaction entre un matériau pouzzolanique et le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en présence d'eau.

L'indice d'activité est déterminé à travers des essais mécaniques de compression sur des éprouvettes de mortier $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$. Il est donné par le rapport entre la résistance à la compression d'un mortier avec p% d'ajout et la résistance à la compression d'un mortier témoin avec 100% de ciment.

$$i = \frac{R_p}{R_0}$$

i : indice d'activité pouzzolanique

R_p : résistance à la compression du mortier avec p % d'ajout en masse de ciment

R₀ : résistance à la compression du mortier 100 % de ciment

Chapitre III

Nouveaux matériaux



Ce chapitre est consacré aux certains bétons innovants. Il comporte des généralités sur les bétons autoplaçants, les bétons de chanvre et les bétons de fibres, leurs compositions, leurs caractéristiques, les principales applications et les méthodes de formulation de chaque type du béton.

I. Le béton autoplaçant

Développé en France dans les années 90 mais originaire du Japon (années 80), le béton autoplaçant ou encore béton autonivelant a été créé pour contrer le manque de fluidité du béton classique. En effet, un béton trop pâteux incitait les maçons à rajouter de l'eau dans le béton pour le rendre fluide ce qui est destructeur pour sa résistance. En conséquence, du béton autoplaçant a été conçu pour résoudre ce problème.

1. Définition

Les bétons autoplaçants sont des bétons très fluides pouvant se mettre en place sans vibration car ils se compactent d'eux même par effet gravitaire. Ils restent toujours homogènes et sans ségrégation même en milieu fortement ferraillé.



Figure III.1. Béton autoplaçant

2. Constituants d'un béton autoplaçant

2.1. Ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui, mélangée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

2.2. Granulats

Les granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes compris entre 0 mm et 40 mm (sable, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle.

Pour faciliter l'écoulement du mélange, la confection d'un bon béton autoplaçant utilise généralement des granulats roulés de rivières. Du fait que les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons, la quantité de granulats est donc limitée, en général le rapport gravier/sable exprimé en masse est de 1 dans un BAP.

Le risque de blocage dans un milieu fortement ferraillé augmente lorsque le D_{\max} augmente. Ainsi, le D_{\max} des granulats doit être compris entre 10 et 20 mm.

2.3. Additions minérales

Sont des produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches naturelles ou artificielles (calcaire, basalte, laitier...). Ces fines sont utilisées essentiellement pour améliorer la compacité en complétant l'ossature granulaire ; et pour réduire le dosage en ciment coûteux. Il existe deux types d'additions minérales : les additions minérales actives et les additions minérales inertes...

1.1. Eau de gâchage

La quantité d'eau de gâchage est la quantité totale ajoutée au mélange sec du béton, pour le mouillage et l'hydratation, cette quantité est déterminée en fonction de la composition et les moyens de mise en œuvre.

1.2. Adjuvants (superplastifiants)

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés à faible dose (moins de 5% de la masse du ciment) dans le béton ou le mortier, afin de modifier certaines de ses propriétés.

Les superplastifiants sont des produits organiques qui, ajoutés à de faibles proportions (de 0,2 à 2 % environ) au béton frais permettent d'en modifier les propriétés rhéologiques (l'ouvrabilité) durant une période plus ou moins longue.

2. Concept du béton auto autoplaçant

Les bétons auto plaçant (BAP) se distinguent des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons à vibrer, par leurs propriétés à l'état frais.

Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation).

Les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons (figure III.2). En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche.

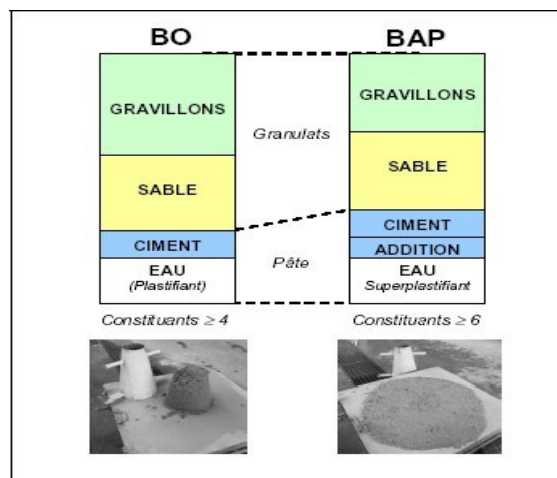


Figure III.2. Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO Plastique et d'un BAP.

Le rôle de la pâte est de séparer les gravillons pour limiter les contacts, en particulier dans les milieux ferraillés, et ainsi prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement. Le volume important d'éléments fins permet aussi de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité. Mais il n'est pas suffisant pour atteindre la fluidité. Les super plastifiants qui ont un double effet, électrique et stérique, qui leur permet de disperser au mieux les particules. La quantité de fines n'est pas non plus toujours suffisante pour empêcher la ségrégation. On a recours alors aux agents de viscosité.

3. DOMAINES D'EMPLOI

Les caractéristiques des BAP laissent entrevoir de nombreuses possibilités techniques du fait de leur grande fluidité :

- ❖ Possibilité de coulage de zones fortement ferraillées



- ❖ Possibilité de coulage de zones d'architecture complexe et difficilement accessibles

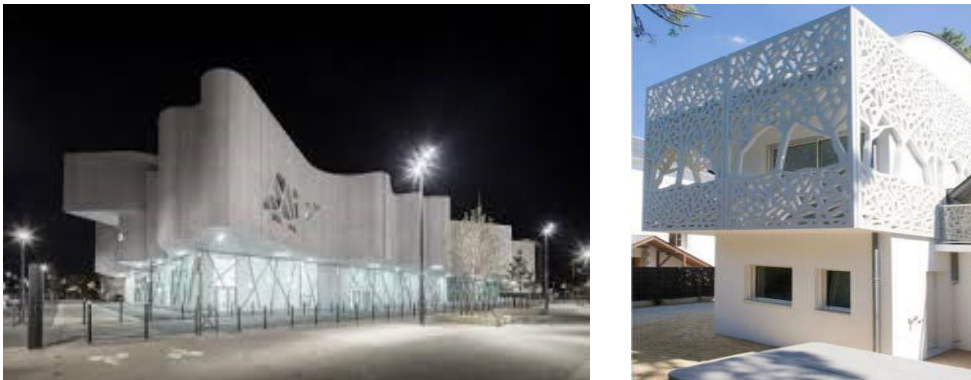


Figure III.3. Domaines d'emploi des BAP

5. Caractérisation des BAP à l'état frais

5.1. Ouvrabilité

Trois essais de caractérisation ont été préconisés pour la caractérisation des bétons frais :

A/ essai d'étalement (slump- flow NF EN12350-8)

C'est un essai utilisé pour estimer la fluidité des BAP sans confinement. Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams .Le béton est introduit dans le cône sans

compaction. On mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute. Une observation visuelle permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Cet essai est très facile à réaliser en chantier et ne nécessite qu'un petit échantillon (6 litres) de béton. Une valeur de l'étalement comprise entre 600 et 750 mm suffit au béton pour être autoplaçant. Pour un étalement supérieur à 750 mm, le béton risque de subir une ségrégation, et pour des étalements inférieurs à 600 mm, le béton risque de présenter une déformabilité insuffisante pour pouvoir passer à travers les zones fortement armées.

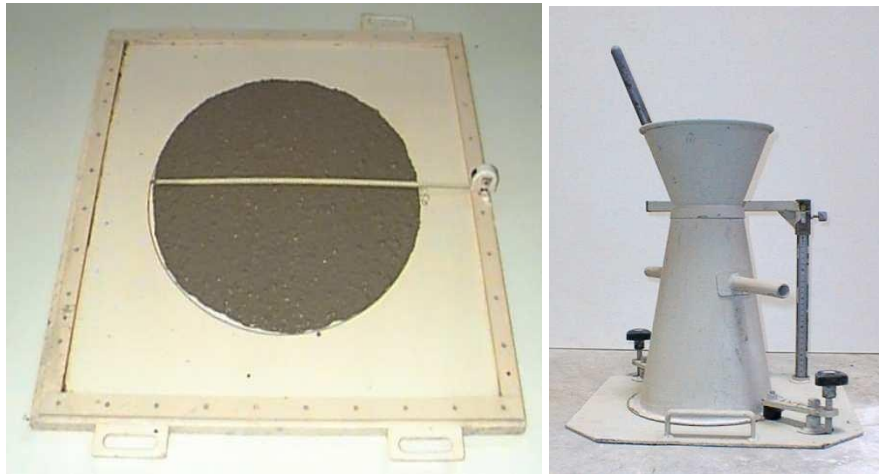


Figure III.4. Représentation schématique de la mesure de l'affaissement et de l'étalement

B/ Essai à la boîte en L (L-box test NF EN 12350-10)

L'échantillon de béton est mis dans un des deux compartiments d'une boîte. Quand la porte de séparation des deux compartiments est levée, on mesure la dénivellation de hauteur du béton entre les deux compartiments. Cet essai permet d'évaluer la déformabilité du mélange qui sera excellente dans le cas où la dénivellation est négligeable. On note que cet essai est destiné à donner une appréciation sur la fluidité du béton.

Lors de l'essai, on remplit d'abord la partie verticale d'une boîte en forme de L (figure 3). Après une minute, la trappe est levée permettant l'écoulement à travers trois armatures de diamètre 14 mm et distantes de 39 mm. Le taux de remplissage final H_2/H_1 renseigne sur la mobilité du béton en milieu confiné.

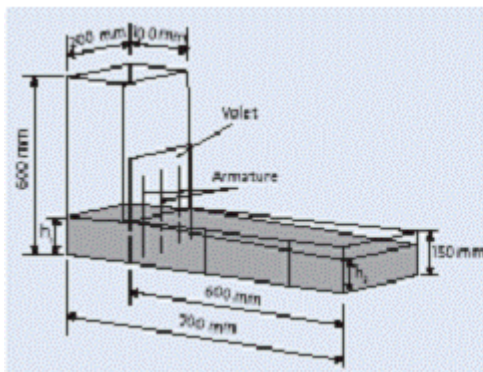
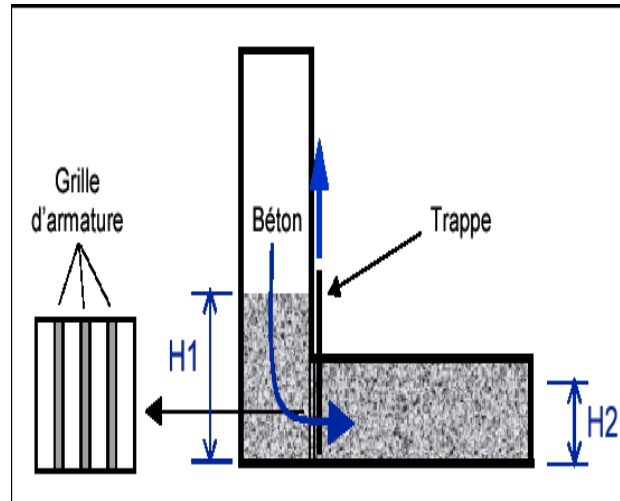


Figure III.5. Schéma de la boîte en L

C/ Essai de stabilité au tamis (NF EN 12350-11)

À la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans un seau. Après une attente de quinze minutes, une masse 4,8 kg de béton est versée du seau sur un tamis de maille 5mm. Deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis. Un pourcentage élevé de laitance par rapport à la masse initiale est un indicateur d'une faible résistance à la ségrégation.

$$P_i = (P_{\text{laitance}} / P_{\text{échantillon}}) \times 100 \%$$

Le tableau I.1 donne les valeurs préconisées pour les trois essais d'ouvrabilité des BAP

Tableau III.1. Valeurs préconisées pour les essais d'ouvrabilité

Pour l'obtention d'un BAP.	
Étalement	de 600 à 750 mm
H2/H1	> 0,8
Laitance	< 15%

Selon son concepteur, cet appareil est surtout utile pour les BAP formulés avec agent de viscosité, et un volume de fines plus réduit qu'à l'accoutumée, qui sont, a priori, plus sensibles au ressuage.



Figure III.5. Essai de stabilité au tamis

5.1. Homogénéité

Lors de leur mise en œuvre, les BAP sont soumis à différentes sollicitations. Dans un premier temps, le matériau doit s'écouler et passer à travers des armatures plus ou moins denses. Une fois le remplissage effectué, le matériau est soumis à la gravité jusqu'à la prise. Afin de rester homogène tout au long de ces différentes étapes, le matériau doit répondre à ces sollicitations de différentes manières. S'il y a instabilité, c'est à dire une séparation entre les gros granulats et la phase suspendante lors de la mise en œuvre dans le coffrage, on parle de ségrégation dynamique. La ségrégation statique peut apparaître une fois que le matériau est en place et jusqu'à la prise. La ségrégation peut être nuisible aux résistances mécaniques mais également à la durabilité de la structure.

6. Formulation des bétons autoplaçant

Formuler un béton, c'est trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier des charges donné. La mise au point d'une formule de BAP est beaucoup plus complexe que celle d'un BO, parce que, d'abord, les constituants sont au nombre minimal de six, contre quatre dans le cas des bétons ordinaires.

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde, pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton. La méthode la plus utilisée est l'Approche japonaise :

Approche japonaise

Les principes de formulation et leur application sont les suivants.

Dosage des gravillons : Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides (figure III.6). Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

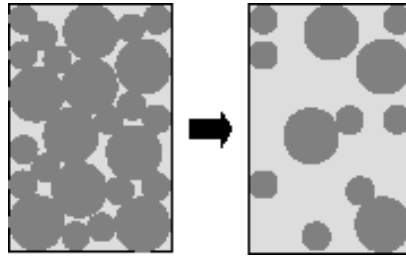


Figure III.6. Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité.

La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57.

Dosage du sable : Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

Dosage du liant : La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m³). Les rapports massiques : eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

Dosage de l'eau et du superplastifiant : Les dosages en eau et en superplastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier (figure III.7.a)



(a) Cône à mortier



(b) Entonnoir à mortier

Figure III.7. Mesures d'étalement

Et des mesures d'écoulement à l'entonnoir (figure 6.b). Les auteurs définissent l'étalement relatif D par l'équation :

$$D = \frac{d^2 - d_0^2}{d^2}$$

Où d est le diamètre de la galette et d_0 la base du cône.

Ils définissent également l'écoulement relatif T par l'équation 2.2, $T = 10/te$

Où te est le temps d'écoulement à l'entonnoir.

7. Caractérisation des BAP à l'état durci

7.1. Résistance mécanique

Les principaux travaux réalisés sur la résistance mécanique des BAP révèlent que pour un rapport eau/liant similaire, les BAP développent une résistance mécanique en compression égale et parfois même légèrement supérieure à celle des bétons ordinaires vibrés. La raison à cette différence est liée à l'utilisation des additions minérale.

7.2. Module d'élasticité

Le module d'élasticité dépend à la fois des proportions et des modules des différentes phases constituant un béton. Or, un BAP est composé d'un volume de pâte important et de rapport G/S plus faible qu'un béton ordinaire vibré.

D'après différents travaux et l'Eurocode, le module d'élasticité est fonction de la résistance en compression des bétons. Donc, à résistance égale, un BAP devrait avoir le même module qu'un béton vibré. La formule réglementaire du module est : $E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3}$

D'autres auteurs indiquent que les modules d'élasticités des BAP sont plus faibles que ceux des bétons vibrés. Leur volume de pâte plus élevé peut expliquer ce phénomène.

8. Propriétés physico-chimiques et durabilité

8.1. Porosité

La porosité est définie par le rapport du volume total des pores dans un corps poreux à son volume apparent. Elle s'exprime en pourcentage du volume apparent.

À l'échelle macroscopique, Baron et Ollivier définissent une structure poreuse d'un matériau cimentaire comme un ensemble d'espaces vides plus au moins connectés, répartis aléatoirement dans un milieu et limités par la présence d'une matrice solide.

7.2. Absorption capillaire

L'absorptivité est influencée par le rapport eau/ciment (E/C), le taux de saturation des pores et la composition du liant, notamment, la nature du ciment et des additions minérales.

L'essai d'absorption d'eau par capillarité est un essai qui nous donne une information sur la capacité d'absorption d'eau dans un béton par remontée capillaire. Il consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de béton préalablement conditionnée par un étuvage

7.3. Perméabilité au gaz

La perméabilité au gaz est un indicateur de durabilité qui mesure la capacité de matériau poreux traversé par des fluides sous un gradient de pression. Le flux se produit dans un réseau poreux.

7.4. Diffusion des ions chlorures

Le coefficient de diffusion des ions chlorures est un paramètre de transport très important, qui caractérise la pénétration d'agents agressifs dans un réseau poreux exposé en environnement marin.

Les différentes études de la littérature qui concernent les principaux travaux réalisés sur les propriétés de transfert des BAP révèlent que les additions minérales (fillers calcaires, laitier

granulé ...) conduisent à une densification de la microstructure pour un même E/C qu'un béton vibré. De plus, cela a pour effet de réduire la porosité. Toutes ces médications améliorent les propriétés de transfert et donc de la durabilité des BAP.

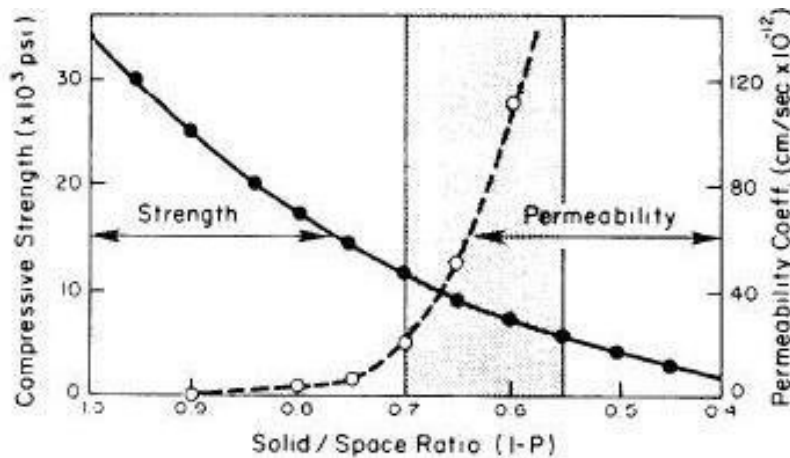


Figure III.8. Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton

7.5. Carbonatation

La carbonatation est le résultat de la réaction du dioxyde de carbone (CO_2) contenu dans l'air ambiant et les hydrates du ciment, notamment la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). La carbonatation se produit lorsque le CO_2 diffuse à travers la peau du béton et en présence d'une certaine teneur d'humidité, résulte alors le carbonate de calcium (CaCO_3) selon la réaction suivante :



Ce dernier a pour effet bénéfique de réduire la porosité et d'augmenter la résistance à la surface du béton. En effet, le carbonate de calcium (CaCO_3) par son volume molaire supérieur à celui de la portlandite, occupe un volume plus important, réduisant ainsi la porosité. De plus, la réaction entre le CO_2 et la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ produit de l'eau (équation) qui peut être réutilisée pour l'hydratation du ciment anhydre.

Par contre, l'effet néfaste de la carbonatation est la baisse du pH de la solution interstitielle qui passe d'un pH de 12,5 – 13,5 dans la zone non carbonatée à une valeur inférieure à 9 dans la zone carbonatée. Si le front de carbonatation atteint les armatures en acier et si l'oxygène et l'humidité nécessaires sont fournis, la corrosion des barres d'acier peut être amorcée entraînant une augmentation volumique des produits de corrosion de 2 à 6 fois le volume initial. Cette détérioration se conclut par l'éclatement du béton autour des armatures corrodées et à une accélération du phénomène en ambiance atmosphérique.

Plusieurs facteurs influencent le processus de carbonatation, dépendant des conditions environnementales (teneur en CO_2 , taux de saturation des pores, l'hygrométrie de l'environnement extérieur et la température), et aussi et/ou de la composition et des propriétés des bétons (rapport eau/liant, porosité totale, quantité de portlandite).

Les résultats faisant état d'une comparaison entre BAP et bétons vibrés indiquent qu'il semble

ne pas y avoir de différence notable entre leurs cinétiques de carbonatation.

II. Le béton de chanvre

Le béton de chanvre est considéré comme un nouvel Éco- matériau car il ne fait objet de recherches scientifiques que depuis une vingtaine d'années.

II.1. Généralités

Le béton de chanvre est obtenu par le mélange des granulats léger de chanvre (la chènevotte), d'un liant à base de chaux (souvent chaux hydraulique + chaux aérienne) et d'eau. Ce béton léger est un très bon isolant thermique.

Le chanvre dont le nom scientifique est *cannabis sativa* est une plante annuelle de la famille des Cannabacées (figure III.9). Le chanvre comprend trois espèces :

Cannabis sativa–chanvre

Cannabis indica–chanvre

Cannabis ruderalis–chanvre

Parmi celles-ci, seule la première est destinée à la culture du chanvre industriel; elle se distingue par une faible teneur en *tétrahydrocannabinol (THC)*, moins de 2 %. En général, on trouve cette espèce en Asie Centrale et particulièrement en Europe.

Le tétrahydrocannabinol possède des propriétés psychoactives agissant sur le psychisme en modifiant le rythme cérébral.



Figure III.9. Plante de chanvre

II.2. Transformation du chanvre

La transformation du chanvre intervient après sa récolte en passant par plusieurs opérations nécessaires pour l'obtention d'une matière première naturellement isolante.

II.2.1. La récolte

La première étape consiste en un fauchage des tiges matures puis la découpe de celles-ci en longueur de 40 cm environ. Cette paille de chanvre est déposée en tas, de faible hauteur, sur toute la longueur du champ.

II.2.2. Le rouissage sur champ

Cette étape est indispensable pour obtenir un produit de qualité et durable. Laissés sur le lieu de la récolte (chanvre), l'alternance de rosée, de pluie et d'ensoleillement provoque un rouissage qui contribue à éliminer les pectines de la plante qui sont préjudiciables à la conservation de la fibre.

II.2.3. Défibrage à l'aide d'un défibreur mécanique. Ce dernier permet à la tige de chanvre de se séparer en deux produits principaux (figure III.10) :

La fibre : située en périphérie de la tige et la moelle que l'on appelle *chènevotte*.

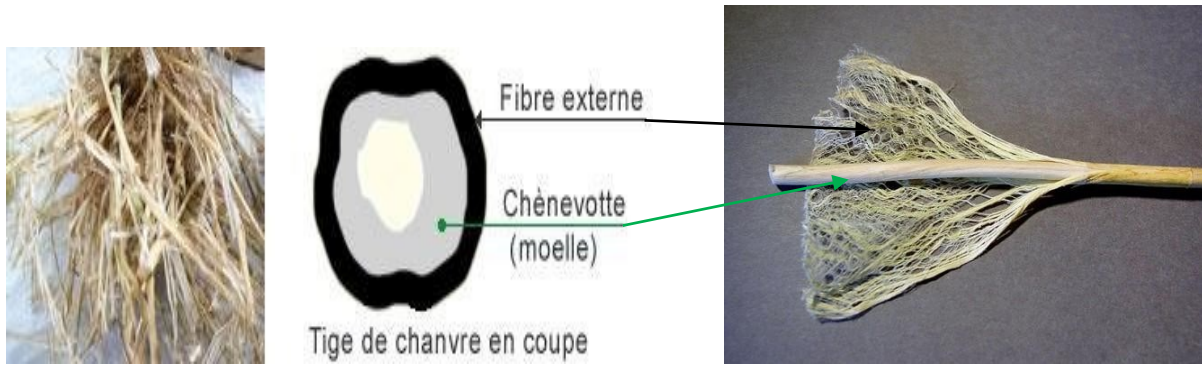


Figure III.10. Composition de la tige de chanvre

La fibre : elle est cardée pour obtenir une laine de chanvre de très bonne qualité isolante, elle est aussi exploitée pour une transformation en rouleaux ou panneaux qui seront le plus souvent utilisés en pose verticale pour l'isolation thermique des murs.



Figure III.11. Fibre de chanvre

La chènevotte : correspond à la partie intérieure rigide de la tige. Séparée de la fibre par défibrage. Elle n'a subi aucun traitement particulier (aucun additif ou produit de synthèse). La chènevotte est composée de petits copeaux rigides de chanvre d'une longueur inférieure à 3 cm. Elle ne contient pas de fibre.



Figure III.12. Bois de chanvre (chènevotte)

II.3. Formulations et compositions des bétons de chanvre

Quatre types de mélange sont définis en faisant principalement varier le dosage en liant. Leur dénomination reflète l'usage pour lequel ils sont le plus couramment utilisés, "Toit", "Sol", "Mur", "Enduit". Leur composition, et leur mise en œuvre sont présentées d'une manière

détaillée dans les règles professionnelles d'exécution du béton de chanvre (Association construire en chanvre, 2007).

Le mélange “**Toit**” se présente comme une sorte de stabilisé de chènevotte, il y a peu de liant. Il est très isolant mais peu résistant. Sa densité apparente est d'environ 250 kg/m^3 .

Le mélange “**Sol**” permet de réaliser les couches d'isolation ou les dalles d'étage. Sa densité apparente est de l'ordre de 500 kg/m^3 .

Le mélange “**Mur**” est né d'un compromis entre la résistance mécanique et l'isolation thermique. Il a des densités apparentes d'environ 420 kg/m^3 .

Le mélange “**Enduit**” se caractérise par une forte teneur en liant, sa densité est autour de 800 kg/m^3 .

Des exemples de compositions pour ces types de mélange sont donnés dans le tableau III.2.

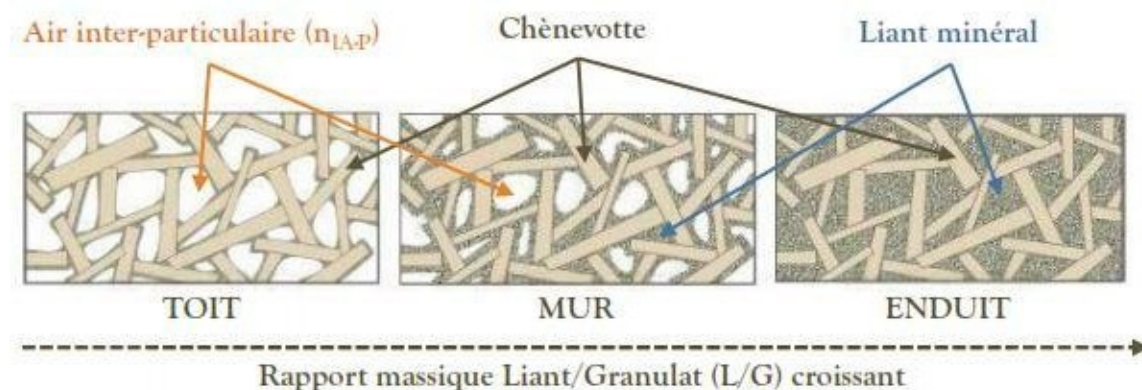
Tableau III.2. Exemples de compositions des bétons de chanvre

	Chanvre (kg/m^3)	Liant (kg/m^3)	Eau (kg/m^3)
Toit	100	100	200
Sol	100	275	500
Mur	100	220	350
Enduit	100	800	500

II.4. Propriétés des bétons de chanvre

4.1- Isolation thermique

L'intérêt principal de ce matériau (béton de chanvre) est sa faible conductivité thermique¹. Cette performance est reliée d'une part au réseau poreux du matériau qui permet de stocker de l'air (un très bon isolant). D'autre part, la répartition de la taille des pores, du micromètre (porosité intra –particulaire de la chènevotte et du liant) au centimètre (porosité inter – granulaire).



¹ *La conductivité thermique ou conductibilité thermique* est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction. Notée λ le représente l'énergie (quantité de chaleur) transférée par unité de surface et de temps sous un gradient de température de 1 kelvin ou 1 degré Celsius par mètre.

4.2- Matériau ductile

Dans le cas d'un béton hydraulique usuel, quel que soit la composition, le comportement mécanique en compression sera fragile. Dans le cas du béton de chanvre, Ce matériau présente globalement un comportement très ductile et il n'apparaît pas de rupture brutale sur la courbe contrainte – déformation.

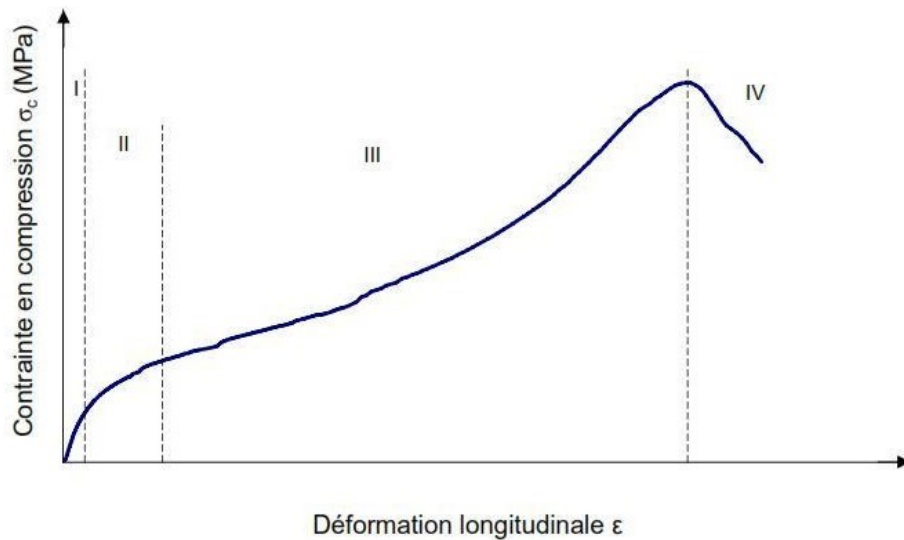


Figure III.13. Courbe contrainte- déformation d'un béton de chanvre

4.3- Faibles performances mécaniques

Le béton de chanvre possède une faible résistance en compression et aussi un faible module d'élasticité.

III. Béton renforcé de fibres

1. Définitions

Un **béton fibré** est un béton dans lequel sont incorporées des fibres. À la différence des armatures traditionnelles, les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement plus homogène.

Nous appellerons fibre, tout matériau de forme élancée, dont le diamètre moyen est relativement petit, la plupart des fibres utilisées ont une longueur comprise entre 1 et 60 mm avec un élanement (rapport de la longueur sur le diamètre) de l'ordre de 30 à 300. La forme de la fibre est variable et contrôlée selon le comportement souhaité.

2. Rôle des fibres

Lorsque les charges appliquées au béton s'approchent de la charge de rupture, les fissures se propagent, parfois rapidement. Les fibres noyées dans le béton permettent d'arrêter le développement de la fissuration. Les barres d'armature en acier jouent un rôle analogue, car elles agissent comme des fibres de grande longueur. Les fibres courtes et discontinues ont cependant l'avantage de se mélanger et de se disperser dans le béton de façon uniforme.

Donc le rôle principal des fibres est :

- De limiter l'ouverture des fissures du béton (ces fissures sont dues à différentes causes, tel que le retrait, les contraintes thermiques,...). la figure III.14/A illustre ce phénomène.
- De transformer le comportement fragile du béton en comportement ductile illustré par la figure III.14/B
- D'améliorer la résistance à la flexion.

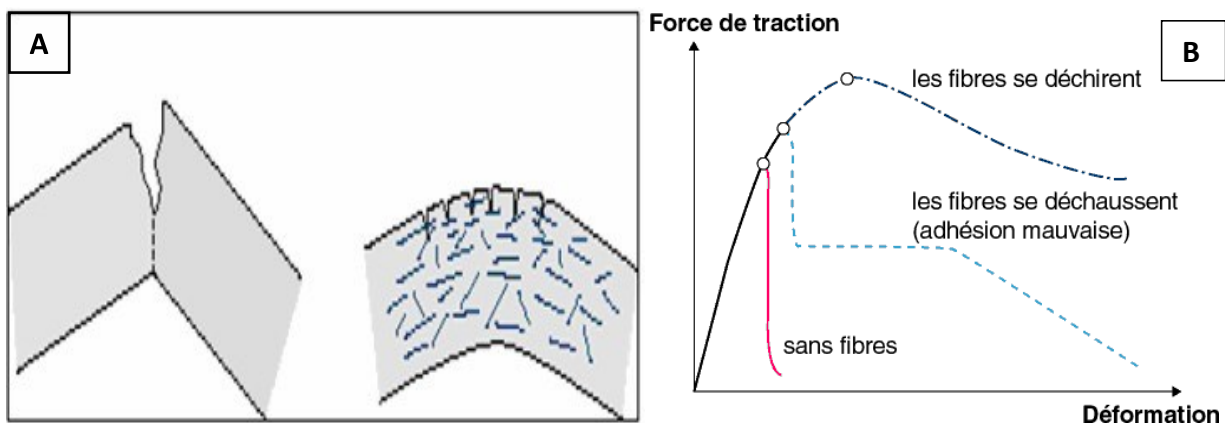


Figure III.14. Illustration de l'apport du renfort par des fibres

3. Types de fibres

Une très grande variété de fibres existe, mais les fibres les plus utilisées sont classées en trois grandes catégories :

Les fibres végétales (Jute, sisal, coir, bois, bambou, palmier, ...)

Les fibres métalliques (acier, fonte, ...)

Les fibres synthétiques : (polypropylène, polyester, carbone, ...)

Le tableau III.3 donne quelques caractéristiques des différents types de fibres.

Tableau III.3. Caractéristiques de certaines fibres.

Fibre	Diamètre en μm	Densité en (g/cm^3)	Module d'élasticité en GPa	Résistance à la traction en GPa	Allongement de rupture en %
Acier	5-500	7,8	200	1-3	3-4
Verre	5-20	2,6	80	1,5-3	2-3,5
Polypropylène	10-200	0,9	5-10	0,4-0,75	15-25
Amiante	0,02-20	2,5-3,4	200	3	2,3
Polyester	-	1,4	8	0,7-0,85	11-13
Carbone	5-9	1,7-2,0	250-400	2-3	0,5-1,5
Cellulose	14-45	1,5	20-40	0,15-0,5	8-12
Jute	18-2000	1,45	-	0,35	3-4
Sisal	10-50	1,5	15,2	0,8	3
Coir	20-700	1,08	2,8	0,17	37,7

3. 1- Fibres végétales

Les fibres végétales sont des fibres naturelles destinées, comme les autres types de fibres, à améliorer les caractéristiques mécaniques du béton à la traction et à la déformation en s'opposant à sa fragilité. Généralement, ils sont des déchets des de transformation industriels ou agricoles. Une fibre végétale est caractérisée physiquement par son diamètre, sa densité, sa teneur en eau et son pourcentage d'absorption d'eau.



A/ Fibres de jute



B/ Fibres de chanvre



C/ Fibres de sisal

Figure III.15. Quelques types des Fibres végétale

3.2- Fibres métalliques

Les fibres d'acier sont les fibres les plus utilisées et il existe de nombreuses variétés de fibres qui se différencient les uns des autres par leurs diamètres, leur section (ronde, carrée, rectangulaire ...), leur longueur et leur mode d'élaboration. Elles peuvent être rectilignes ondulées ou présenter des élargissements aux extrémités, soit des coudes ou des crochets pour améliorer l'adhérence.

Les fibres métalliques sont destinées à renforcer le béton, elles sont courtes et leurs longueurs discrètes d'acier ayant un rapport (l/d) allant de 20 à 100, avec des sections transversales suffisamment petites pour être dispersées de manière aléatoire dans le béton frais en utilisant les techniques de mélange habituelles.

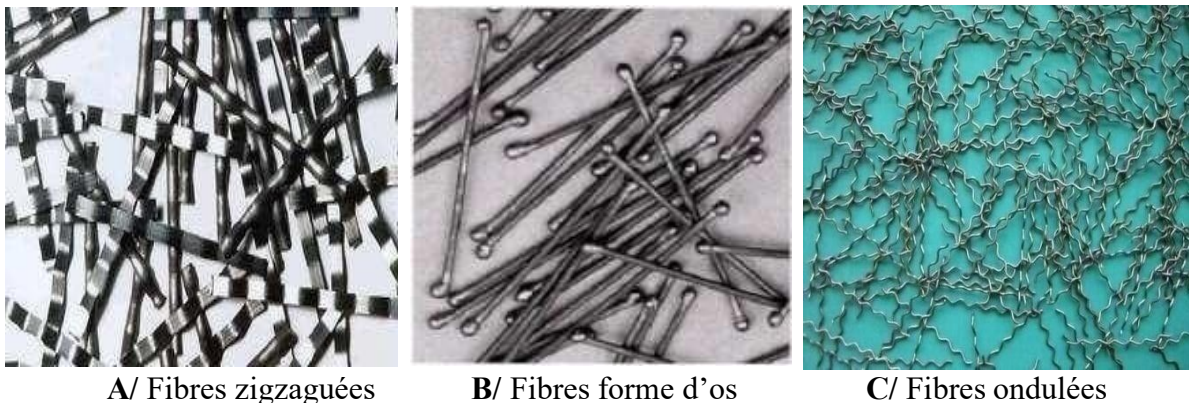


Figure III.16. Quelques types des Fibres métalliques

3.3- Fibres synthétiques

Les Fibres synthétiques proviennent de produits dérivés du pétrole, polymères et de l'industrietextile dont la structure ressemble à celle des matières plastiques qui peuvent résister à l'environnement alcalin du béton à long terme et améliorent ses propriétés mécaniques.

Il s'agit, comme il est présenté dans la figure 4, des fibres polypropylène, de verre, de nylon, decarbone, aramide, polyéthylène, acrylique et polyester. Dans les applications actuelles des bétons commerciaux et industriels, les fibres synthétiques sont typiquement ajoutées aux bétons, mais avec des dosages plus faible (dans la plage de 0,06 à 0,2% du volume total)



Figure III.17. Quelques types des Fibres synthétiques

4. Formulation des bétons de fibres métalliques

Pour mieux optimiser la composition des bétons de fibres métalliques, le laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) propose une méthode expérimentale basée sur la méthode de Baron Lesage. Cette méthode est basée sur deux hypothèses :

- Pour un dosage en eau et ciment fixé au départ (E/C fixé), le béton le plus maniable est le plus compact et son squelette minéral est optimal.
- Le dosage optimal en granulats ne dépend pas de la nature et du volume de pâte de ciment (Eau + ciment).

Pour appliquer cette méthode au béton de fibres métalliques on introduit une troisième hypothèse :

- L'ajout de fibres métalliques ne modifie pas les deux premières hypothèses. On doit d'établir au préalable :
 - Le rapport eau / liant
 - Le diamètre du plus gros granulat
 - La géométrie et les dimensions de la fibre

- Le pourcentage des fibres
- La maniabilité souhaitée
- La variation du rapport massique S/S+G avec la maniabilité correspondante : si la maniabilité voulue n'est pas atteinte, il faudra augmenter ou diminuer le volume de liant ou ajouter un superplastifiant.

L'application de la méthode de Baron-Lesage pour la composition du béton de fibres métalliques conduit à une composition totalement différente de celle du béton courant.

La composition obtenue est riche en pâte de ciment, ce qui favorise l'adhérence des fibres à la matrice.

L'introduction de la fibre au sein du squelette granulaire va se traduire localement, c'est à dire autour de chaque fibre par un desserrement du squelette granulaire. Ainsi ***un certain volume des plus gros granulats va être « remplacé » par un certain volume de fibres.***

Chapitre IV

Matériaux de construction



Ce chapitre est consacré aussi aux matériaux de construction spéciaux. Il comporte une présentation des bétons à haute performance et les coulis d'injection, leurs compositions, leurs caractéristiques et les principales applications.

I. Béton à hautes performances

1. Définition et voies d'obtention des BHP

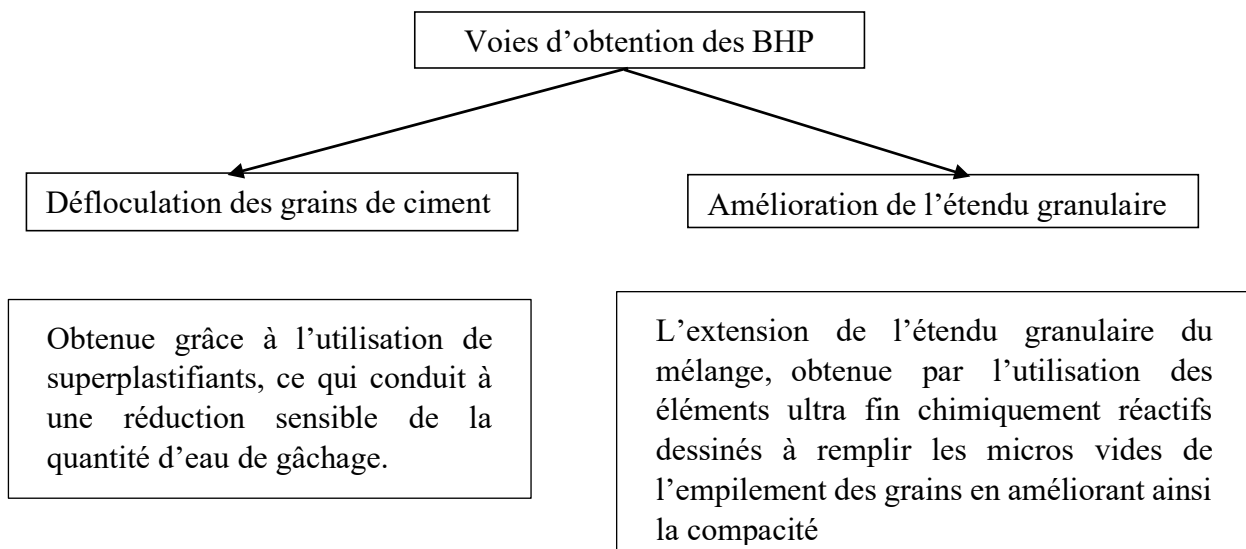
Un béton à hautes performances (BHP) peut être défini comme un béton qui développe dès le jeune âge des résistances mécaniques plus élevées que celles des bétons ordinaires.

Sa porosité réduite qui lui assure une meilleure durabilité à long terme du fait qu'il est plus dense et compacte et donc imperméable. Cette minimisation de la porosité est généralement obtenue en utilisant des rapports Eau/Liant plus faibles que dans le cas des Bétons Ordinaires «BO», associé à l'ajout d'adjuvants afin d'assurer une ouvrabilité satisfaisante.

Les bétons à hautes performances BHP se caractérisent par

- ❖ Une résistance à la compression à 28 jours supérieure 50MPa
- ❖ Un rapport eau/liant inférieur à 0,40.

Dans les perspectives d'améliorer les propriétés du béton, différents chercheurs se sont attachés à explorer les voies visant à formuler un béton de très haute compacité grâce à l'utilisation des constituants de qualité et avec réduction maximale du dosage en eau, deux voies de natures physico-chimiques différents sont



2. Applications des BHP

Le BHP présente des avantages et des performances très intéressantes par rapport au béton traditionnel :

- Durabilité améliorée vis-à-vis aux agressions physico-chimiques (perméabilité réduite, meilleure protection de l'armature contre la corrosion, réduction de la pénétration des ions chlore,...etc).
- Résistance accrue au jeune âge. Cette propriété permet de réduire le temps de coffrage.
- Une résistance finale accrue après durcissement, ce qui permet de réduire les sections du béton et par conséquent, la diminution du poids de la construction.

Donc les principaux domaines d'utilisation sont : les ouvrages d'art, les gratte-ciels, les constructions mixtes...

En plus de ces principaux domaines, on peut citer quelques applications plus particulières, comme les éléments préfabriqués pour le bâtiment, les chaussées, les assainissements, les tunnels et encore les centrales nucléaires.



Ouvrages d'art



Gratte-ciels



Centrales nucléaires

Figure IV.1. Domaines d'utilisation des BHP

3. Formulation et composition des BHP (*La méthode de formulation de l'université de Sherbrooke*)

La procédure de formulation commence par le choix de cinq caractéristiques particulières du BHP

- 1- Le rapport eau/liant
- 2- Le dosage en eau
- 3- Le dosage en super plastifiant
- 4- Le dosage en gros granulats

5- La teneur en air.

3.1. Rapport eau/liant :

On peut trouver le rapport eau/liant en utilisant la figure 1 pour des bétons ayant des résistances à la compression données à 28 jours.

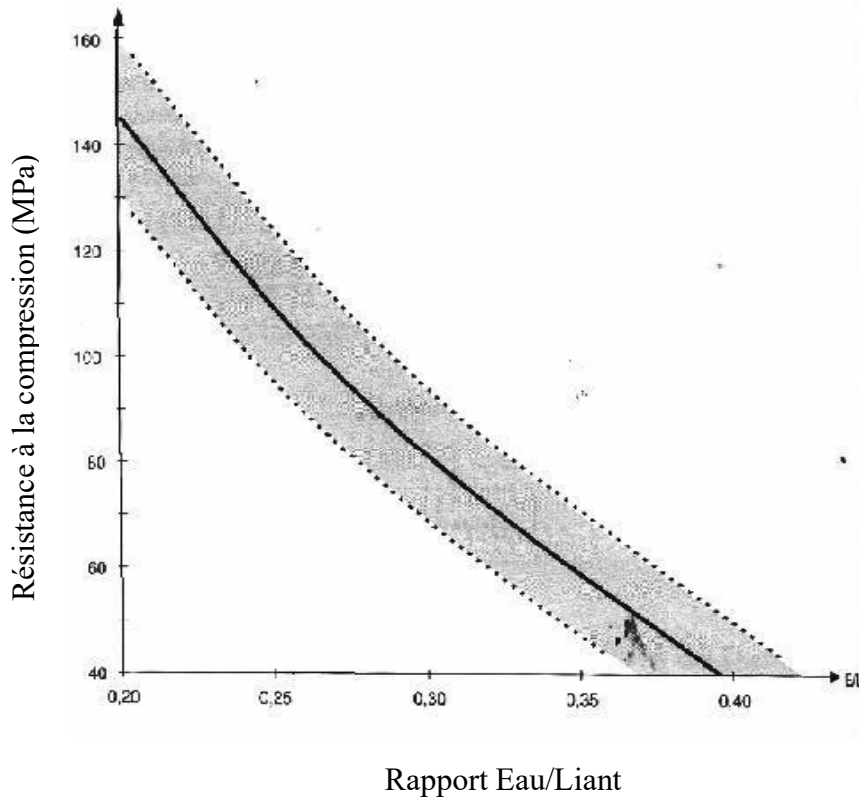


Figure IV.2. Détermination du rapport eau/liant

3.2. Dosage en eau :

La figure 2 présente une approche simplifiée sur concept du point de saturation, lorsque le point de saturation d'un superplastifiant n'est pas connu on suggère de commencer avec un dosage en eau de l'ordre de 145l/m³.

Point de saturation %	0,6	0,8	1	1,2	1,4
Dosage en eau l/m ³	120	125	135	145	155
	125	135	145	155	165

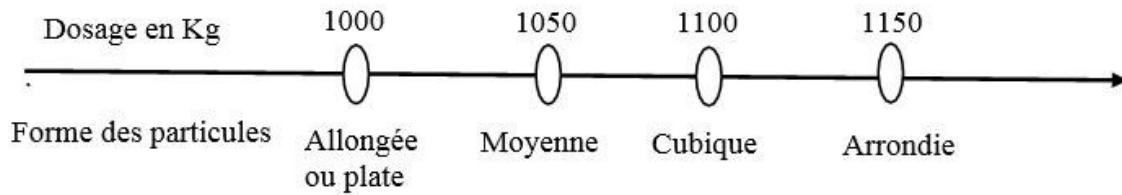
3.3. Dosage en superplastifiant :

Le dosage en superplastifiant se déduit du dosage au point de saturation

3.4. Dosage en gros granulats :

Le dosage en gros granulats peut être déduit de la figure 3 en fonction de la forme des granulats. S'il y a quelque doute sur la forme des granulats ou si on ne la connaît pas, on peut toujours

commencer par une quantité de gros granulats de 1000 kg/m³



3.5. Dosage en sable :

Le dosage en sable est déterminé à partir de la formule de base

$$VC + VGG + VS + VF + VE + VSP = 1000 \text{ l}$$

$$VS = [1000 - (VC + VGG + VF + VE + VSP)] \text{ l}$$

$$\text{Masse sable} = \rho_s \times V_s$$

4. Comportement physico-mécanique des BHP

4.1. Maniabilité (Affaissement au cône d'Abrams)

L'affaissement dépend essentiellement de deux facteurs : le squelette granulaire et la quantité et la fluidité de la pâte.

Facteurs influençant l'affaissement :

- Quantité des granulats et rapport G/S
- Composition granulométrique
- Forme des granulats
- Rapport Eau/ Liant
- Dosage en superplastifiant

4.2. Masse volumique

Généralement la masse volumique d'un BHP est légèrement supérieure à celle d'un béton ordinaire, ceci est dû à la meilleure compacité des BHP ($\rho_{app} = 2400$ à 2500).

4.3. Rigidité

Le module d'élasticité du béton est essentiellement déterminé par les propriétés des granulats et de la matrice de mortier. Au fur et à mesure que la matrice se consolide et se rigidifie, le béton présentera également une rigidité accrue. Le module d'élasticité du béton à hautes performances est toujours lié à la résistance à la compression.

5. Différentes classes des BHP

Les BHP sont divisés en cinq grandes catégories, chaque catégorie correspond à une plage de résistance de 25 MPa [selon Aïtcin 1995]¹.

Aïtcin 1995 : Pierre Claude Aïtcin est professeur à l'université de Sherbrooke et l'auteur de l'ouvrage bétons haute performance. Cet ouvrage est la référence pour les BHP.

La classe I représente les BHP qui ont une résistance à la compression comprise entre **50 et 75 MPa**

La classe II correspond aux BHP avec résistance comprise entre **75 et 100 MPa**

La classe III désigne les BHP avec une résistance comprise entre **100 et 125 MPa**

Les BHP de classe IV ont une résistance comprise entre **125 et 150 MPa**

Les BHP de classe V ont une résistance supérieure à **150 MPa**.

Selon la norme française les trois dernières classes correspondent aux bétons à très haute performance (classe III et classe IV) et à ultra hautes performances (classe V).

5. Les bétons à très hautes performances (BTHP)

Les bétons à très hautes performances BTHP se caractérisent par une à la compression à 28 jours supérieure 100MPa

Pour améliorer les performances d'un béton, il convient d'en réduire la porosité en agissant sur le squelette granulaire (granulométrie) par l'addition de particules ultrafines type "fumée de silice", l'ajout d'un adjuvant superplastifiant (haut réducteur d'eau) et par la réduction du rapport eau/ciment.

La fumée de silice (fumée condensée de silice) est un sous-produit de la métallurgie et de la production de silicium, obtenue par condensation et dépoussiérage. La silice représente environ 90% de la composition chimique.

Elle se caractérise par un diamètre des particules sphériques ultra fine ($\sim 0,01\mu\text{m}$). Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement à la rapidité à laquelle la réaction pouzzolanique se développe, mais aussi à un effet physique particulier aux particules de fumée de silice qui est l'effet filler grâce à grande finesse.

6. Les bétons à ultra hautes performances(BUHP)

Les bétons à ultra hautes performances BUHP se caractérisent par une à la compression à 28 jours supérieure 150MPa, ces bétons sont toujours des bétons fibrés(**les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUHP)**), ce type de béton combine les avantages des bétons très hautes performances et les bétons renforcés de fibres.

En comparaison aux bétons normaux, les BUHP contiennent plus de ciment, un rapport eau/ciment plus bas, des granulats à large distribution granulométrique et des fibres.

6.1. Caractéristiques des bétons à ultra hautes performances :

Les principales caractéristiques de ces bétons sont les suivantes :

- Une très grande ouvrabilité (leur grande fluidité autorise une mise en place sans vibration)
- Des résistances à la compression à 28 jours très élevées comprises entre 150 et 250 MPa(c'est-à-dire environ 6 fois supérieures à celles des bétons classiques)
- de hautes résistances à court terme (24 heures) et des résistances mécaniques au jeune âge très élevées

- Une compacité très importante
 - Une faible perméabilité
 - Une durabilité exceptionnelle (ce qui permet de les utiliser dans des environnements trèsagressifs)
 - Une ductilité (déformabilité sous charge sans rupture fragile) importante.

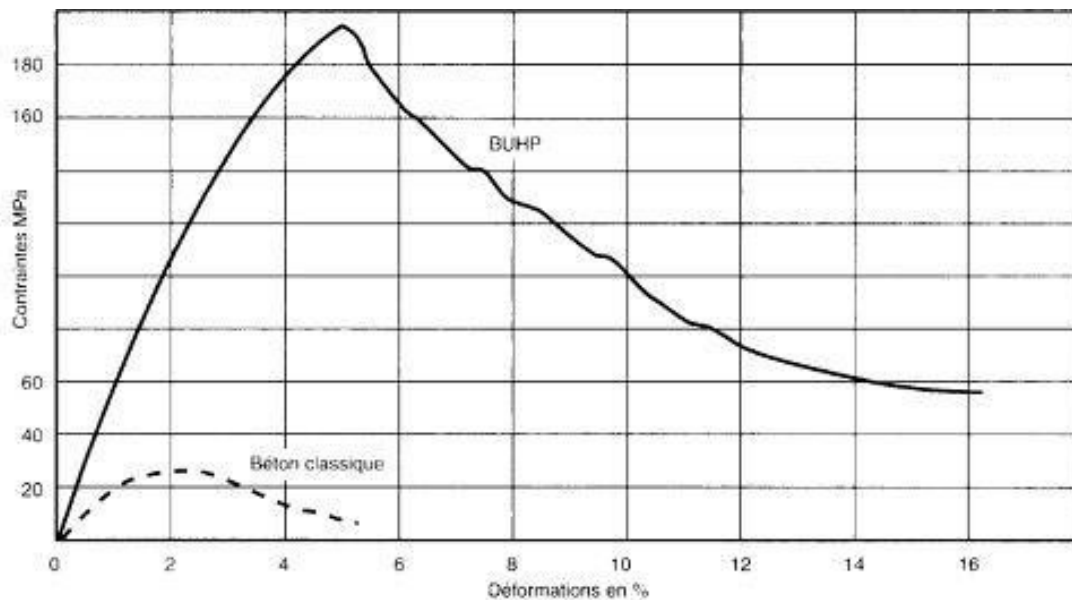


Figure IV.3. Courbe contrainte- déformation d'un BUHP et un béton classique

6.2. Principe de formulation des BFUHP

L'obtention de résistances élevées et de faibles perméabilités aux agents agressifs passe par une réduction très importante de la porosité, en jouant sur deux paramètres.

Une teneur en eau extrêmement faible (rapport eau/liant < 0,25 voire 0,20) : grâce à l'utilisation optimisée de superplastifiants qui déflocculent les particules fines.

Une compacité maximale : obtenue en utilisant des composants correspondant à plusieurs classes granulaires (qui incluent ciment, ultrafines, fillers et sable).

La taille et la quantité des plus gros grains sont considérablement réduites (diamètre maximal variant de 1 à 7 mm).

L'optimisation de l'empilement granulaire permet de diminuer le volume des vides. Les BFUP présentent donc une très faible porosité capillaire.

II. Coulis d'injection

1. Définition

Les coulis du ciment sont des mélanges fluides de ciment, d'adjuvants et d'eau destinés au remplissage des joints et des fissures, ou à l'injection dans des gaines de précontrainte.

Injection : elle a pour but de faire pénétrer dans des fissures un produit susceptible de créer une continuité mécanique et/ou une étanchéité entre les parties disjointes.



Figure IV.4. Coulis

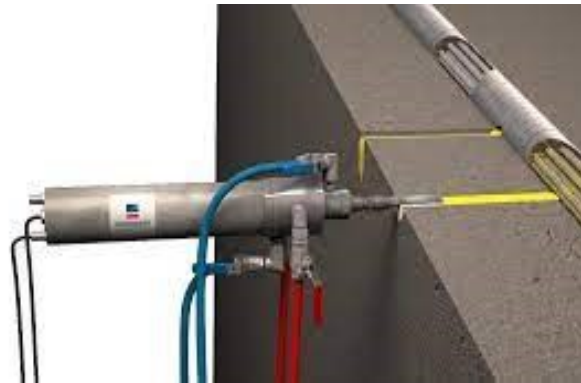
2. Domaines d'utilisation

Les coulis auront à remplir des fonctions variées pouvant être :

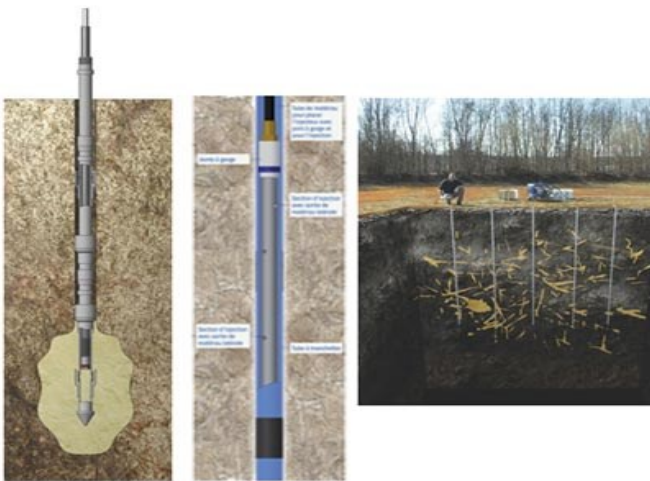
- De remplissage
- D'étanchéité
- De consolidation

Les principales applications des coulis sont :

- 1- Travaux souterrains :
 - Comblement des grosses cavités
 - Injection dans les failles et les grosses fissures des roches fissurées
 - Injection dans des sols pulvérulents (consolidation)
 - Calage de voussoirs préfabriqués (dans la réalisation de tunnels)
- 2- Injection dans un squelette de granulats mis en place au préalable
- 3- Scellement de tirants d'ancrage
- 4- Consolidation des dalles (support)
- 5- Régénération de maçonneries et joints divers
- 6- Injection des gaines du béton précontraint



A/ Injection des gaines du béton précontraint



B/ Application des coulis dans les travaux souterrains



C/ Remplissage des joints

Figure IV. 5. Domaines d'utilisation des coulis

3. Conditions des coulis

3.1. Condition géométrique

Le coulis doit pouvoir passer librement. Il faut pour cela que le diamètre maximum de ses grains soit inférieur à 5 ou 10 fois les interstices les plus petits à remplir. Dans le cas d'un coulis de ciment les plus gros grains ont de 0,15 à 0,2mm de diamètre, ce qui pratiquement, nécessite des interstices partout supérieurs à 1 mm (et pour un coulis de micro-mortier 0/0,5mm des interstices supérieurs à 3mm). Si cette condition n'est pas respectée, le coulis ne pourra pas passer (ou ne restera pas suffisamment homogène).

3.2. Condition de fluidité

Un coulis trop épais mettra plus de temps pour pénétrer et la pression d'injection à exercer risque d'être plus élevée (on est d'ailleurs parfois limité en ce qui concerne la pression à exercer).

Un coulis trop fluide risque de ségréger (ressuage important). Il y a donc, pour la teneur en eau, une quantité limite inférieure et une limite supérieure.

La fluidité se mesure simplement à l'aide du cône de marsh (**Figure IV.7**). Le principe de l'essai consiste à chronométrer le temps mis par 1 litre de coulis pour passer au travers d'un ajustage calibré (par exemple : 10mm de diamètre). A titre indicatif, il faudrait :

- Que la fluidité soit donnée par la moyenne de trois essais
- Que la mesure se refasse 15 et 30 minutes après confection du coulis et que l'on effectue systématiquement une homogénéisation de ce coulis avant la mesure
- Que le temps d'écoulement soit compris entre 13 et 25 secondes (inférieur dans tous les cas à 25 secondes)

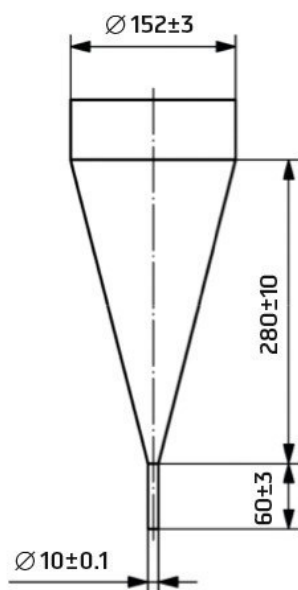


Figure IV.6. Dimensions du cône de marsh selon la norme NF P 18 358



Figure IV.7. Cône de marsh pour les essais de fluidité

4. Type des coulis

4.1. Coulis stable

Les coulis de ciment classique sont dits «instables» car il peut se produire une séparation des éléments (ciment, eau) sous l'effet de la pesanteur ou de la pression d'injection. On stabilise les coulis grâce à l'ajout d'argile ou de bentonite (qui gonfle dans l'eau de 20 à 30 fois son volume) à raison de 1 à 10 % du poids, du ciment, et parfois grâce à l'ajout complémentaire d'une petite quantité de chaux éteint.

On peut aussi stabiliser des coulis et augmenter leurs performances grâce à l'ajout de silice fine (fumée de silice dont les grains sont 100 fois plus petits que ceux du ciment).

4.2. Coulis de comblement de carrière souterrains

Ces coulis sont injectés dans des trous de forage. On utilise parfois des cendres volantes si celles-ci sont disponibles. La formulation est la suivante :

- 1000 Kg de cendres volantes
- 50 à 100Kg de ciment
- 400 Kg d'eau

4.3. Coulis de chaux

On réalise des coulis de chaux éteinte très fine (qui ne durcit pas hors de l'air) pour le traitement de sols argileux. Ces coulis peuvent être :

- Soit répandus sur le sol pour effectuer un traitement sur une faible profondeur, de l'ordre de 20 à 40 cm.
- Soit injectés sous de pressions afin de consolider des terrains en profondeur et à l'aide de lances enfoncées dans le sol jusqu'à des profondeurs de 12 m.

4.4. Coulis et mortiers activés et injectés

Dans un squelette de gros granulats on injecte un coulis ou un mortier colloïdal spécialement activé, appelé colgrout (procédé colcrete mis au point en 1936 en Grande-Bretagne). Le colgrout se fabrique en deux étapes :

- ✓ Malaxage à haute turbulence du ciment et de l'eau dans un appareil spécial ;
- ✓ Malaxage du coulis de ciment avec du sable.

Parmi les applications possibles, mentionnons :

- ✓ L'injection de milieux fortement fissurés ;
- ✓ L'injection des massifs de fondation et des murs de soutènement ;
- ✓ L'injection dans le cas de travaux à effectuer sous l'eau ;
- ✓ L'injection dans des enveloppes en plastique (brevet suisse datant de 1965)

Références Bibliographiques

- 1- **Ecologie industrielle et valorisation des déchets**, Vorburger Julia, Université Laval, Essai Stage, (2006) 155p
- 2- **Garantir des chantiers respectueux de l'environnement et du voisinage gestion des déchets de chantier**, Veille documentaire - Fiches « Qualité Environnementale »
OB10_ACT001_FT003_Gestion_Dejets Chantier_V6 2010 05 27
http://enviroboite.net/spip/IMG/pdf/1005_Gestion_Dejets_Chantier_CSDAzur_Domene_Invivo_V1.pdf?689/cfbcca21da26e4459b41976f577c061d39223d9d
- 3- **Terre crue** : techniques de construction et de restauration, Bruno Pignal, Livre, (2005)
- 4- **La brique** : fabrication et traditions constructives, Giovanni Peirs, Livre, (2004)
- 5- **Pierre et maçonneries en pierre**, CHAGNEAUD Bernard, Livre
- 6- **Bétons haute performance**, Pierre-Claude Aïtcin, Livre (1998)
- 7- **Cours bétons innovants**, Achoura D, Université Badji Mokhtar d'Annaba
- 8- **Cours matériaux de construction**, Ali Boucetta T, Université Badji Mokhtar d'Annaba, Polycopié, (2019) 74p.
- 9- **Des argiles calcinées comme substitut au ciment**, Scrivener et al, Tracés : bulletin technique de la Suisse romande (2011)
- 10- **Mémento Kaolin et argiles kaoliniques**. Rapport final. Rapport BRGM/RP-67334-FR, Charles N., Colin S., Gutierrez, T., Lefebvre G. (2018), 93p.
- 11- **Le laitier de haut fourneau**, Alexandre. J., Sebileau. J.L., livre, (1988) 341p.
- 12- **La pratique des ciments, mortiers et bétons**, Tome 1, caractéristiques des liants et des bétons, Mise en œuvre des coulis et mortiers, Michel Vénuat, livre, (1989) 284p