

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOAND OULHADJE-BOUIRA



Faculté des Sciences et des sciences appliquées
Département Génie Civil

Mémoire de fin d'étude
DERRADJI LEILA
LAOUCHDI FATIMA

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 02** en :

Filière : **Génie Civil**
Option : Ingénierie des matériaux de construction

THEME :
ÉLABORATION ET CARACTÉRISATION D'UN MATERIAU
MORTIER A BASE D'UN LIANT TERNAIRE RENFORCE PAR DES
FIBRES METALLIQUES

Devant le jury composé de :

Mr KENNOUCHE
Mr MESBOUA
Mr HAMI

Salim
Noureddine
Brahim

UAMOB
UAMOB
UAMOB

Président
Encadreur
Examineur

Année Universitaire 2016/2017

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord le DIEU Tout Puissant

À nos familles pour les sacrifices qu'elles ont faits pour que nous terminions nos études.

À notre promoteur MR: MESBOUA NOUREDDINE, pour nous avoir guidés pour la réalisation de cette étude.

J'adresse mes sincères remerciements au chef de département MR: KENNOUCHE SALIM à nous écouter à tout moment.

Ainsi que à MR. GHEZRAOUI HICHAM encadreur de stage au niveaux de CITEM pour nous avoir guidés et conseillée et pour ces remarques.

À tous les enseignants et le personnel administratif de l'UAMOB qui ont contribué à notre formation et à l'élaboration de ce présent travail.

Aux membres des jurys qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre modeste travail.

DERRADJI & LAOUCHDI



Dédicace

Lila

à tous ceux qui intéressé de moi



FATIMA

J'ai le grand honneur de dédier ce travail A l'être le
plus cher à mon cœur Mon père a ma mère

A mon mari

Mes chers frères. Mes chères Sœurs

A mes très chers amis « Lila et Hanane »

A tous ceux et celles qui m'ont aidé de loin ou de
prés.

Je dédie ce modeste travail.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I: CIMENT PORTLAND.....	3
1. Le ciment Portland.....	4
1.2 Fabrication du ciment portland.....	6
1.3 Composition du ciment portland	6
1.3.2. Compositions chimiques générales des ciments.....	8
1.3.3. Classification des ciments portland	9
2. Hydratation du Ciment Portland.....	10
2. 1. Mécanismes de l'hydratation.....	10
3. Récapitulations.....	15
CHAPITRE II : GENERALITE SURE LES MORTIERS.....	16
2. Définition.....	18
3. Caractéristiques essentielles.....	19
4. Propriétés des mortiers.....	19
4.1. Mortiers plastiques.....	19
4. 2.Mortier durci.....	20
5. Les emplois des mortiers.....	20
5.1. Les joints de maçonneries.....	21
5.2. Les enduits.....	21
5.3. Les chapes.....	21
5.4. Les scellements et les calages.....	21
5.5. Les coulis.....	22
6. Les techniques particulières de mise en œuvr.....	22
6.1. La projection.....	22
6.2. L'injection.....	22
7 .Matériaux composant le mortier.....	23
7.1. Liants.....	23
7.2 .les granulats.....	23
7.3. Eau.....	25
8. Mortiers de chaux hydraulique.....	25
9. Mortiers de portland.....	25

10. Etude de la qualité des mortiers.....	26
11. Capacité d'absorption d'eau.....	27
11.1. Coefficient de ramollissement.....	28
11.2. Coefficient de ramollissement.....	29
11.3. Adhérence.....	29
11.4. Actions des liquides agressifs.....	29
CHAPITRE III:LES ARGILES.....	30
1.1. Notions générales sur les argiles.....	31
1.2. Définition.....	31
1.3. Structure cristalline des argiles.....	31
1.4. Classification des minéraux argileux.....	32
1.4.1. Minéraux de type TO.....	33
1.4.2. Minéraux de type TOT.....	34
1.4.3. Minéraux type TOTO.....	34
1.2. Groupes des argiles.....	36
1.2. Les kaolins.....	36
1.2.1. Définition.....	36
1.2.2. Structure de la kaolinite.....	36
1.2.3. Origine des Kaolins.....	37
1.2.3.1. Kaolins primaires.....	37
1.2.3.2. Kaolins secondaires.....	38
1.2.4. Caractéristiques des métkaoлин.....	39
1.2.4.1. Compositions chimique et minéralogique.....	39
1.2.5. Caractéristiques physiques de métkaoлин.....	40
1.2.5.1. Masse volumique.....	40
1.3. Bentonite.....	40
1.3.1. Définition.....	41
1.3.1. Origine de la bentonite.....	41
1.3.2. Structure de la bentonite.....	41
1.3.3. Application de la bentonite.....	42
1.3.4. Caractérisation de la bentonite.....	43
CHAPITRE VI : LES FIBERS.....	44
1. Définition.....	45
2. Différent nature de fibre.....	45
2.1. Fibres minérales.....	45
2.2. Fibres végétales.....	45
2.3. Fibres synthétiques.....	45
2.4. Fibres artificielles.....	46
2.5. Fibres de cellulose.....	46

2.6. Les fibres de cellulose.....	46
2.7. Fibres de polypropylènes.....	47
2.8. Fibres de verre.....	47
2.9. Fibres métalliques.....	48
2.9.1. Connaissance du materais.....	48
2.9.2. Les fibres Fibraflex (fibres de fonte amorphe).....	50
2.9.3. Les fibers Harex.....	50
2.9.7. Les fibres Ruban en fonte amorphe de Pont –à- Mousson.....	52
2.9.8. Autres fibres.....	52
3. Conclusion.....	52
CHAPITRE V : PARTIE PRATIQUE ET RESULTATS.....	53
1. Introduction.....	54
2. Caractérisations des matériaux utilisés.....	55
2.1. Le ciment AIN KBIRA SETIF.....	55
2.1.1. Les essais physiques.....	55
2.1.2. Les essais mécaniques.....	55
2.1.3. Les essais chimiques.....	56
2.1.4. Les essais minéralogiques.....	57
2. 2.Le sable.....	57
2.2.1. Analyse granulométrique.....	57
2.2.2. Caractéristiques physiques du sable.....	57
2.2.2.1. Module de finesse.....	59
2.2.2.2. Propreté.....	59
2.2.2.3. L’essai au bleu de méthylène.....	59
2.3. L’eau de gâchage.....	60
2.4. L’adjuvant.....	61
2.5. Les fibres.....	61
2.6. Les argiles.....	62
2.6.1. Bentonite.....	63
2.6.2. Bentonite calcinée.....	63
2.6.3. Kaolin.....	64
2.6.4. Métkaolin.....	65
2.2.7. Fumée de silice.....	66
2.2.7.1. Domaine d’application.....	66
2.2.7.2. Caractères généraux.....	67
3. Confection des éprouvettes.....	67
3.1. Les différentes étapes de confection.....	68
3.1.1. Pesée des constituants.....	68
3.1.2. L’incorporation des fibres.....	68
3.1.3. L’incorporation des argiles.....	68

3.1.4. Malaxage d'un mélange type.....	68
3.2. Confection des éprouvettes.....	69
4. Caractérisation de mortier.....	72
4.1.1. Les essais rhéologiques.....	72
4.1.2. L'étalement.....	72
4.1.3.La masse volumique.....	74
4.2. Résultats d'essais à l'état durci.....	78
4.2.1. La masse volumique.....	79
4.2.2. Essais mécaniques.....	79
4.2.2.1. Essai en flexion.....	84
4.2.2. 2.Essai de compression.....	84

LISTE DES TABLEAUX.

Chapitre I : Le ciment portland

Tableau I. 1 : Composition du cru d'alimentation [1]	5
Tableau I. 2 : Composition typique d'un clinker en % massique [1].....	6
Tableau I. 3 : Phase anhydres présentes dans un ciment portland artificiel [1].....	7
Tableau I.4 Proportions massiques des constituants (sulfate de calcium et additifs exclus) entrant dans la composition de quelques ciments courants, avec: S = Laitier granulé de haut fourneau, V = Cendres volantes siliceuses, Z =Pouzzolanes naturelles [1].....	8
Tableau I.5 classification du ciment portland selon l'Association canadienne dnormalisation (CSA).[1].....	9
Tableau I.6 : classification du ciment portland selon norme ASTM C 150.[1].....	9

Chapitre II: les mortiers

Tableau(III.1) : Différents dosages de mortiers utilisés [1].....	25
Tableau(III.2) : Dosage par m ³ de sable dans les mortiers [1].....	25
Tableau(III.3) : Emploi des mortiers et classe de résistances [1].....	26-27

Chapitre III: les argiles

Tableau (III.1) :Classification des minéraux argileux selon la proportion et la composition des couches T et O [11].....	33
Tableau (III.2) : composition chimiques de métkaolin[13].....	40
Tableau (III.3) : Caractéristiques physico-chimique de la bentonite	42
Tableau (III.4) : Composition chimique de la bentonite [14].....	42

Chapitre IV: les fibres

Tableau (IV.1) : Caractéristiques physiques et mécaniques de la fibre Bekaret [16].....	51
Tableau(IV.2): caractéristiques physiques et mécaniques de la fibre Novatex [16].....	52
Tableau (IV.3) : caractéristiques physiques et mécaniques du ruban en fonte. A [17].....	52

Chapitre V: partie pratiques et résultats

Tableau (V.1) : Caractéristiques physiques	56
Tableau (V.2) : Caractéristiques mécaniques	56
Tableau(V.3) : Composition chimique du ciment	57
Tableau (V.4) : Composition minéralogiques	57
Tableau (V.5) : Résultats de l'analyse granulométrique du sable	58-59
Tableau (V.6) : caractéristiques physiques.....	59
Tableau(V.7) : Caractéristiques physiques du sable (0/4).....	61
Tableau(V.8) : Caractéristiques des fibres.....	62
Tableau(V.9) : composition chimique de bentonite.....	63
Tableau (V.10) : composition chimique effectuées par fluorescence X de bentonite calciné.....	64
Tableau (V.11): composition chimique de kaolin	65
Tableau (V.12) : composition chimique de métakaolin	66
Tableau (V.13): composition minéralogique.....	67
Tableau (V.14): Notation de différentes formulations.....	70
Tableau (V.15) : La composition typique de chaque formulation.....	71

Tableau (V.16) : étalements du mortier avec différentes pourcentage d'argile sans fibres et avec fibres	73
Tableau (V.17) : Masse volumique du mortier avec différentes pourcentage d'argile	74
Tableau (V.18) : : Masse volumique du mortier avec différentes pourcentage d'argile	76
Tableau (V.19) : La Résistance à la flexion des différents types des mortiers 7 J (Mpa)	77
Tableau (V.20) : La Résistance à la flexion des différents types des mortiers 14 J (Mpa)	78
Tableau (V.21) : La Résistance à la flexion des différents types des mortiers 28J (Mpa)	79
Tableau (V.22) : La Résistance à la compression des différents types des mortiers 7 J(Mpa)	81
Tableau (V.23) : La Résistance à la comperssion des différents types des mortiers 14 J (Mpa)	82
Tableau (V.24) : La Résistance à la compression des différents types des mortiers 28 (Mpa)	84

LISTE DES FIGURE

Chapitre I : LE CIMENT PORTLAND

Figure I.1 : vue de clinker par microscope optique.....	7
Figure I.2 : Schéma situant les différents produits minéraux à Base de calcium, silicium pouvant entrer dans la composition des ciments courants.....	8
Figure I.3 : Représentation schématique de l'évolution de la chaleur lors de l'hydratation d'un ciment	12
Figure I.4 : CSH (a), Pentlandite (b) d'après.....	13
Figure I.5 : Aiguilles d'Etrangéité.....	13

Chapitre III : Les Argile

Figure III.1: Structure octaédrique et tétraédrique des couches d'argiles.....	31
Figure III .2: Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicate.....	32
Figure III .3 : Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres alumineux d'un minéral de type TO.....	35
Figure III.4: Représentation schématique des empilements de tétraèdres Siliceux et d'octaèdres alumineux d'un minéral de type TOT	35
Figure III.5 : Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres Alumineux d'un minéral de type TOTO	36
Figure III. 6: Structure des minéraux inter stratifiés	37
Figure III.7 : Structure type 1:1, cas de la kaolinite	38
Figure III. 8: représente la coupe schématique d'un gisement de kaolin primaire.....	39
Figure III.9 : Traitement thermique du Kaolin KT.....	41
Figure III.10 : Transformation du kaolin en métakaolin	41

Chapitre VI: Les Fibres

Figure IV .1 : Rôle des fibres dans la matrice de béton	48
Figure IV .2: Fissuration dans le béton sans et avec fibres.....	49
Figure IV .3: comportement de charge –déformation de béton avec fibres et béton sans fibres.....	49
Figure IV.4 : Les fibres métalliques, (formes et dimensions variables).....	50

Chapitre V: Partie Pratique Et Résultats

Figure V .1 : L'essai d'analyse granulométrique.....	58
--	----

Figure V. 2: L’essai d’équivalent de sable.....	60
Figure V. 3 : L’essai au bleu de méthylène.....	60
Figure V. 4 : MEDAFLOW 145.....	62
Figure V.5 : Caractérisation des fibres.....	62
Figure V.6 : betonie.....	63
Figure V. 7 : betonie calcinée.....	64
Figure V.8 : kaolin.....	65
Figure V. 9 : métakaolin.....	66
Figure V.10: le malaxage d’un mélange.....	69
Figure V. 11 : confection des éprouvettes	70
Figure V. 12: Viscosimètre VT550.....	71
Figure V. 13 : Evolution de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement.....	72
Figure V. 14 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement...	72
Figure V.15 : essai d’étalement.....	73
Figure V.16 : L’étalement du mortier avec différentes teneurs d’argile.....	74
Figure V.17: Masses volumiques du mortier avec différentes teneur d’argile.....	76
Figure V. 18: Masses volumiques du mortier avec différentes teneur d’argile sans fibres et avec fibres.....	79
Figure V. 19. Essai de traction par flexion.....	77
Figure V.20 : Les valeurs obtenues de la résistance mécanique en flexion pour différents teneurs d’argile pour 7 j.....	78
Figure V.21 : Les résultats de la résistance mécanique à la flexion des différents pourcentage sans fibres et avec fibres 7j.....	78
Figure V.22 : Les valeurs obtenues de la résistance mécanique en flexion pour différents teneurs d’argile pour 14 j.....	79
Figure V.23 : Les résultats de la résistance mécanique à la flexion des différents pourcentage sans fibres et avec fibres 14j.....	79
Figure V.24 : Les valeurs obtenues de la résistance mécanique en flexion pour différents teneurs d’argile pour 28 j.....	80
Figure V.25 : Les résultats de la résistance mécanique à la flexion des différents pourcentages sans fibres et avec fibres 28j.....	80
Figure V.26 : Essai de compression.....	81
Figure V. 27 : Les valeurs obtenues de la résistance mécanique en compression pour différents teneurs d’argile pour 7 j.....	82

Figure V.28 : Les résultats de la résistance mécanique à la flexion des différents pourcentages sans fibres et avec fibres 7j.....	82
Figure V.29 : Les valeurs obtenues de la résistance mécanique en compression pour différents teneurs d'argile pour 14 j.....	84
Figure V.30 : Les résultats de la résistance mécanique à la compression des différents pourcentages sans fibres et avec fibres 14j.....	84
Figure V.31 : Les valeurs obtenues de la résistance mécanique en compression pour différents teneurs d'argile pour 28 j.....	87
Figure V.32 : Les résultats de la résistance mécanique à la compression des différents pourcentages sans fibres et avec fibres 28j.....	84

Résumé

L'utilisation des ajouts dans le ciment pour la fabrication des mortiers et bétons offrent des avantages économiques et écologiques indéniables. Cette étude s'intéresse aux propriétés physiques et mécaniques de mortier à base de ciment et (métakaolin et bentonite calcinée de l'Algérie).

Le but principal de cette étude est l'élaboration et caractérisation de la performance de mortier à base de métakaolin et bentonite calcinée à différents pourcentages (8,10,12 et 14% par rapport au dosage en masse du ciment), ont caractérisés les matériaux utilisés et ont effectués des essais à l'état frais tels que l'étalement et la masse volumique, et à l'état durci la masse volumique et les essais mécaniques à la compression et la flexion.

Les résultats observés ont montré que La substitution partielle du ciment par le métakaolin et la bentonite calcinée elle une influence sur la résistances mécaniques du mortier.

Mots clés : métakaolin, bentonite calcinée ,la résistance mécanique , mortier.

ABSTRACT

The use of additions in cement in manufacturing mortar and concrete offers economic and ecological advantages.

Few studies were conducted on the effect of local (metakaolin and calcined bentonite Algéria) The main purpose of this study is to develop and characterize the performance of mortar based metakaolin and calcined bentonite to different percentages . have been characterized the materials used and have carried out tests in the fresh state, such as spreading and density and in cured state the density and mechanical tests to compression and bending.

The observed results showed that partial substitution of cement by metakaolin and calcined bentonite influenced the mechanical strength of the mortar.

Key words: metakaolin, calcined bentonite, mechanical , strength , mortar.

ملخص:

استخدام الإضافات في الأسمنت لتصنيع الجص والخرسانة يوفر مزايا اقتصادية وبيئية لا يمكن إنكارها.

هذه الدراسة تهتم بالخصائص الفيزيائية و الميكانيكية للجص المرتكز على الاسمنت و البنتونيت المكلس من الجزائر

ان الهدف الاساسي لهذه الادراسة اعداد و وصف قدرات الجص المرتبطة على الميتاكاولين و البنتونيت المكلس بنسب مؤوية مختلفة .

لقد قمنا بوصف المواد المستعملة و اجرينا تجارب ميكانيكية .

لقد بينت النتائج المتحصل عليها ان الاستبدال الجزئي للاسمنت بالميتاكاولين و البنتونيت المكلس يؤثر على المقاومة الميكانيكية للجص.

مفتاح الكلمات: الميتاكاولين, البنتونيت المكلس, المقاومة الميكانيكية. الجص.

Introduction General

Introduction générale

L'industrie du ciment est cruciale pour répondre aux différents programmes de construction lancé par l'Algérie, nous avons actuellement douze usines de ciment ne répondent pas à la demande du marché et c'est difficile obtenir du clinker dans cette étude nous proposons l'utilisation de produits locaux de scories de four plus haut avec le clinker pour augmenter la production de ciment portland d'une part et d'autre part pour protéger l'environnement de la libération de dioxyde de carbone

Les matériaux d'addition font actuellement partie des développements les plus récents dans la production du béton, car l'utilisation des additions apporte une amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton. D'autre part leur utilisation a pour objectif de réduire la consommation de ciment, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement. Dans ce travail étudié les limitations de la substitution partielle du ciment par le métakaolin et la bentonite calcinée par des pourcentages (8, 10, 12, 14%).

Depuis plusieurs décennies la recherche sur les liants hydrauliques moins coûteux et respectueux pour l'environnement est devenue une préoccupation majeure pour pallier aux difficultés rencontrées au cours de la fabrication du ciment Portland. Parmi les liants cimentaires pouvant être utilisés dans les domaines comme le génie civil, la construction et la restauration des bâtiments,

L'objectif de ce travail consiste à l'élaboration et la caractérisation à la valorisation des matériaux locaux, consiste à étudier des mortiers substitués par deux types d'argile, métakaolin et bentonite calcinée.

Méthodologie du travail :

Ce mémoire est structuré en deux parties, la première partie consacrée à la recherche bibliographique qui constitue cinq chapitres

Le premier chapitre: généralités sur les ciments Portland fabrication et composition et classification, mécanisme de hydratation .

Le deuxième chapitre : sur les mortiers fonction, caractéristique, propriétés et les emplois des mortiers

Introduction General

Le troisième chapitre: sur les argiles structure cristalline, classification des minéraux argileux et groupe des argiles métakaolin et la bentonite calcinée

Le quatrième chapitre : les différents types de fibres, et fibres métalliques.

Le cinquième chapitre : Ce chapitre résume la caractérisation des matériaux utilisés dans notre travail, les différents essais physico-mécaniques réalisés sur les matériaux utilisés pour la fabrication du mortier et les différents essais réalisés sur mortier à l'état frais et à l'état durci

Enfin, nous présentons une conclusion générale sur l'étude élaborée et cela d'après les résultats expérimentaux obtenus, tout en donnant des recommandations à les prendre en considération dans les prochaines recherches et cela pour une meilleure exploitation de ce matériau.

1. Le ciment Portland

Le ciment Portland est obtenu après traitement thermique à 1450°C d'un mélange d'argile et de calcaire. Le produit obtenu après calcination et broyage est le Clinker auquel on rajoute une faible quantité de gypse pour retarder la prise lors de l'hydratation assurant ainsi une meilleure maniabilité. [3]

1.1. Aspect historique

L'utilisation et la fabrication du ciment remontent à l'antiquité. En effet, les romains et les grecs savaient fabriquer du ciment. Ils utilisaient la chaux (CaO) mélangée avec le sable et des matériaux d'origine volcanique : c'est la réaction pouzzolanique. On appelle pouzzolanes, les minéraux qui rentrent dans cette réaction et qui sont composés dans leur grande partie de silice et d'alumine. *Joseph Aspdin* est considéré comme l'inventeur du ciment qu'on utilise aujourd'hui : il en a breveté l'appellation en 1824. On peut cependant noter que *Smeaton*, rapporte en 1793, la synthèse d'un matériau proche du ciment à partir d'un calcaire argileux et de cendres volcaniques siliceuses. Il obtint un mortier aussi dur et du même aspect que la pierre de la presqu'île de Portland, au sud de l'Angleterre. L'appellation de ciment Portland devait être conservée jusqu'à nos jours. Selon laquelle le béton est un matériau moderne et que la chaux et les liants chaux-pouzzolane sont une invention des Grecs et des Romains est peut-être à réviser. En effet, la découverte sur un site néolithique, au sud de la Galilée, de dalles de béton contenant d'importantes quantités de chaux et ayant conservé une excellente qualité à travers le temps, laisse penser que les origines du béton remontent en fait à la période néolithique, et que l'utilisation de la chaux daterait peut-être d'une période encore plus éloignée [3]

1.2 Fabrication du ciment Portland

Le ciment Portland est fabriqué à partir de produits naturels qui sont extraits de carrières puis concassés, homogénéisés, cuits à très haute température dans un four pour former un clinker qui est finement broyé et associé à une faible proportion de gypse pour obtenir le ciment. Ces matières premières sont composées essentiellement de chaux (CaO), de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3) la chaux est apportée généralement par les roches carbonatées qui représentent 80 % du cru d'alimentation (Tableau 1.1) Par contre, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer sont apportés par des argiles ou des schistes formant approximativement 20 % du cru d'alimentation. L'alumine, l'oxyde de fer, la magnésie (MgO) et des alcalis (Na_2O et K_2O) peuvent exister dans les matières premières sous forme d'impuretés, il est nécessaire d'avoir les oxydes suivants : Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO

et les alcalis dans le mélange pour diminuer la température nécessaire pour la formation de silicate de Calcium. Quand les quantités de ces oxydes ne sont pas suffisantes dans les matières premières, d'autres matériaux comme la bauxite et l'oxyde de fer sont ajoutés pour l'ajustement de la composition

Tableau I.1 : Composition du cru d'alimentation [1]

Matière Première	Formule Chimique	Abréviation	Proportion	Source de matière Première
Chaux	CaO	C	77%	Argile, calaires, calcite, craie, laitier, marbre, schiste,
Silice	SiO ₂	S	10 à 15%	Argile, calaires, basalte, silicate de calcium, laitier, cendres quartzite, sable, schiste, etc.
Alumine	AL ₂ O ₃	A	5 à 10%	Argile, bauxite, laitier cendre volante, minerai d'aluminium, schistes
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	F	2 à 3%	Argile, minerai de fer, pyrite calcinée, schiste, etc.

On note quatre procédés de fabrication par voie humide, par voie semi humide, par voie sèche ou par voie semi sèche, dans le procédé par voie sèche, le broyage et l'homogénéisation se font sur des matériaux secs. Par contre, dans le procédé par voie humide, le broyage se fait sur une forme de pâte (slurry) qui contient à peu près 30 à 40% d'eau. Le procédé par voie sèche est plus économique parce qu'il n'y a pas d'eau à évaporer. La «farine1», résultant du concassage, broyage et homogénéisation de la matière première, est introduite à l'extrémité supérieure d'un four en acier de forme cylindrique qui est incliné selon un angle de 3 à 4 degrés et qui tourne à une vitesse de rotation de 1 tr/min, le four peut être long (d'environ 75 m de longueur) ou court (d'environ 40 à 50 m de longueur) avec une pré calcination, un gros brûleur est placé à l'extrémité inférieure du four.

Le mélange homogénéisé traverse lentement le four vers la partie inférieure où il y a plusieurs réactions chimiques conduisant à la formation du clinker de ciment portland à 100 évaporation de l'ordre de 1% (eau) ; à 450 C° : départ de l'eau combinée à l'argile ;

Entre 700 et 900 C° : calcination de CaCO₃ Selon la réaction (1)



La chaux (CaO) obtenue réagit avec la silice, activée par la déshydratation de l'argile ou du schiste, et avec l'alumine; Jusqu'à 1200 C°: formation de C2S par combinaison de SiO2 et CaO; à partir de 1250C°: formation de C3S résultant de la combinaison de C2S et de la chaux résiduelle, au-dessus de 1300 C°, cette réaction est activée par l'apparition de la phase liquide qui contient les aluminates et les ferro-aluminates qui, par refroidissement, vont se cristalliser en composés bien définis le C3A et le C4AF. La matière son du four sous forme de billes de 5 a 25 mm de diamètre appelée clinker; à 1450 C°, la linéarisation est complète. Pour contrôler la prise du ciment, le clinker est broyé avec un faible dosage en gypse (CaSO4.2H2O) généralement inférieur 5%, parfois l'anhydrite (CaSO4) est ajoutée au clinker au lieu du gypse, à la sortie du broyeur, on obtient une fine poudre de ciment Portland qui est acheminée vers des silos pour l'entreposage.

1.3 Composition du ciment portland

1.3.1 Composition du ciment anhydre

Le clinker portland résulte de la cuisson, autour de 1450 C°, d'un mélange homogène de matières premières finement divisées (argiles, calcaires, marnes) en proportion convenable. Son analyse chimique révèle en moyenne les teneurs massiques d'oxydes indiquées dans le tableau I.2 ces oxydes sont combinés dans le four pour former quatre phases solides principales, avec essentiellement des silicates de calcium et des aluminates de calcium dans les proportions moyennes indiquées dans le *tableau I. 2*

Tableau I. 2 : Composition typique d'un clinker en % massique [1]

CaO	SiO2	AL2O3	Fe2O3	MgO	SO3	K2O	Na2O
62- 67%	19-25%	2-9%	1-5%	0-3%	1-3%	0,6%	0,2%

La composition théorique des phases principales du ciment peut être calculée à partir d'une composition chimique faite en fluorescence X en utilisant les équations de BOGUE. Les équations de Bogue sont les suivantes

$$\% C3S = (4,071 \times \% Cao) - (7,600 \times \% Sio2) - (6,718 \times \% Al2O3) - (1,43 \times \% Fe2O3) - (2,852 \times \% S03)$$

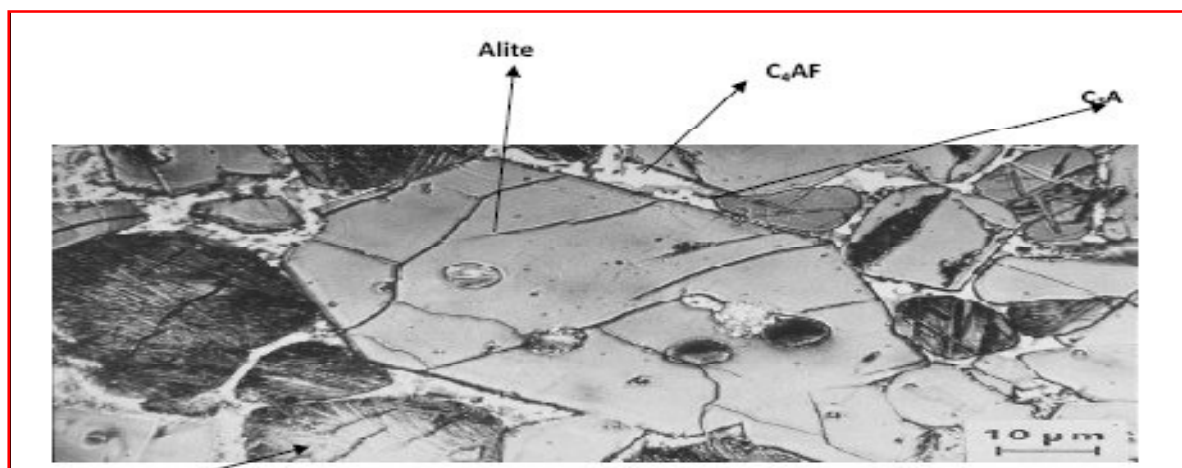
$$\% C3A = (2,650 \times \% Al2O3) - (1,692 \times \% Fe2O3)$$

$$\% C4AF = (3,043 \times$$

Tableau I. 3 : Phase anhydres présentes dans un ciment portland artificiel [1]

Nom	Formule en oxydes	Notation cimentière	% massique
Silicate tricalcique	3CaO. SiO ₂	C3S	60-65
Silicate dicalcique	2CaO. SiO ₂	C2S	20-25
Aluminate tricalcique	3CaO. Al ₂ O ₃	C3A	8-12
Aluminoferrite Tétracalcique	4CaO. Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	C4AF	8-10
Gypse	CaO.SO ₃ .2H ₂ O	CsH2	Ajouté
Divers (dont chaux libre)	CaO	C	1-3

Le ciment Portland, ou plus exactement le clinker finement broyé, se présente sous la forme de grains poly cristallins de quelques dizaines de microns



Bélite

Figure I.1 : vue de clinker par microscope optique [2]

1.3.2. Compositions chimiques générales des ciments

Les ciments classiquement utilisés sont fabriqués par mélange et cobroyage de clinker Portland et d'autres constituants minéraux, avec une certaine quantité de gypse -sulfate de calcium (= 5 % du ciment) nécessaire pour réguler la prise.

Le diagramme présenté sur la figure (I.2) permet de situer ces principaux constituants selon leur teneur massique en oxyde de calcium, de silicium et d'aluminium.

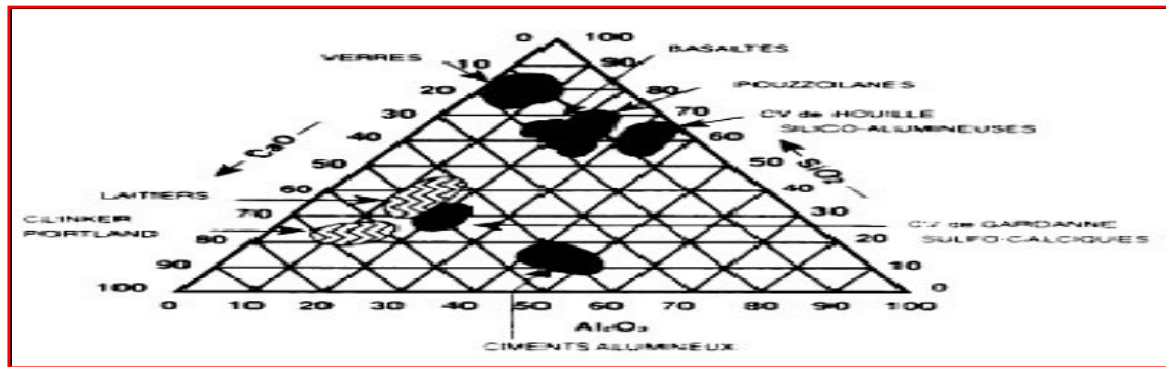


Figure 1.2 : Schéma situant les différents produits minéraux à

Base de calcium, silicium pouvant entrer dans la composition des ciments courants [1]

Les compositions pondérales de quelques ciments courants normalisés [NF P 15-301] sont présentées dans le tableau I.4.

Tableau I.4 Proportions massiques des constituants (sulfate de calcium et additifs exclus)

entrant dans la composition de quelques ciments courants, avec

: S = Laitier granulé de haut fourneau, V = Cendres volantes siliceuses, Z =

Pouzzolanes naturelles [1]

	Notation	Clinker	Autres constituants	Constituants Secondaires
Ciment Portland	CEM I (CPA)	95 -100		0-5
Ciment de haut Fourneau	CEM III/C (CLK)	5-19	81-95 [S]	0-5
Ciment au S et (V ou Z)] 0-5 laitier et aux cendres	CEM V/A (CLC)	40-64	18-30 [Ciment au S et (V ou Z)]	0-5
	CEM V/B (CLC)	20-39	31-50 [S et (V ou Z)]	0-5

1.3.3. Classification des ciments portland

On fabrique plusieurs ciments portland possédant différentes caractéristiques physiques et chimiques et répondant à des besoins précis. L'association canadienne de normalisation (CSA) divise les différents types de ciment Portland en cinq catégories la composition typique des ciments de chaque catégorie est donnée au

Tableau I.5 classification du ciment portland selon l'Association canadienne d'normalisation (CSA).[1]

Type	Caractéristique	C3S	C2S	C3A	C4AF
Type 10	CP normal	50	24	11	8
Type 20	CP à Q modérée	42	33	5	13
Type 30	CP à haute R initiale	60	13	9	8
Type 40	CP à faible Q d'hydratation	26	50	5	12
Type 50	CP résistant aux sulfates	40	40	35	9
CP ciment portland		R résistance		Q chaleur	

Les ciments portland spécifiés et utilisés aux États-Unis sont normalement conformes à ASTM C 150, Standard Specification for Portland cement, La norme ASTM est de loin la plus utilisée dans le domaine du ciment et du béton.

La norme ASTM C 1157, Performance Specification for Hydraulic Cements, établit six types de ciment portland

La norme ASTM C 150 établit les huit types de ciment portland suivants, qu'elle désigne au moyen de chiffres romains :

Tableau I.6 : classification du ciment portland selon norme ASTM C 150.[1]

Type I	Normal
Type IA	normal, à air entraîné
Type II	à résistance moyenne aux sulfates
Type IIA	à résistance moyenne aux sulfates, à air entraîné
Type III	à haute résistance initiale
Type IIIA	à haute résistance initiale, à air entraîné
Type IV	à faible chaleur d'hydratation
Type V	à haute résistance aux sulfates

2. Hydratation du Ciment Portland

Dans la chimie du ciment, le terme hydratation regroupe la totalité des changements qui se produisent quand un ciment anhydre ou un de ses composants se trouve en contact avec l'eau. Ces réactions sont généralement plus complexes qu'une simple conversion en hydrates. La prise du ciment est le processus d'évolution du système vers un mélange consistant et le

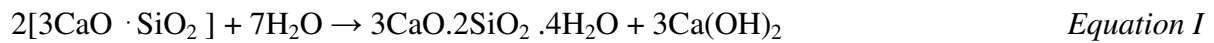
développement de propriétés mécaniques remarquables. Du fait de la complexité du système à étudier, les travaux sur la chimie de l'hydratation du ciment Portland se sont focalisés sur les phases les plus importantes.[3]

2. 1. Mécanismes de l'hydratation

Pour une hydratation totale, le ciment a besoin d'une quantité d'eau équivalente à 38% de son poids. Si on ajoute davantage, les couches d'eau entre les grains de ciment deviennent suffisamment épaisses pour que, même si le ciment est totalement hydraté, les produits de réaction ne puissent plus remplir entièrement les espaces entre les grains. L'excès d'eau par rapport à la stœchiométrie altère les propriétés mécaniques du matériau final. Du fait de la forte proportion du silicate tricalcique C_3S dans le ciment, l'hydratation de ce dernier se résume pour l'essentiel à l'étude du processus d'hydratation du C_3S , du moins sur le long terme. différents mécanismes ont été proposés pour rendre compte du phénomène de l'hydratation du ciment. Cependant, le mécanisme le plus pertinent et toujours confirmé par les constatations expérimentales C'est un mécanisme de dissolution-précipitation : lorsqu'on ajoute de l'eau au ciment, les réactifs anhydres vont progressivement passer en solution. Or, ils sont plus solubles que les produits d'hydratation finaux. Ils vont donc sursaturer la solution et causer la précipitation d'hydrates. Ceci va diminuer la concentration des espèces en solution et donc permettre de nouveau un passage en solution des constituants anhydres. Le phénomène se poursuivant ainsi jusqu'à l'hydratation totale. Lorsqu'on mélange du ciment avec de l'eau, la pâte fraîche de ciment ainsi formée se présente comme un système dispersé constitué d'un réseau de particules dans une phase aqueuse et les principaux mécanismes d'actions de l'eau sur la pâte de ciment sont les suivants : L'adsorption : fixation physique ou chimique en surface des molécules d'eau L'hydrolyse : transformation du solide et décomposition de l'eau. dissolution/Solvatation : rupture des liaisons ioniques dans le cristal et dispersion des ions dans le liquide qui sont rapidement hydratés .cristallisation : elle a lieu en deux parties, la germination (ou nucléation) qui consiste à former des assemblages (germes) aléatoirement, puis la croissance des germes qui s'effectue par accumulation d'atomes ou de molécules en couches successives au niveau de l'interface liquide/solide.

- **Hydratation de C₃S**

Les mécanismes d'hydratation du C₃S et C₂S sont relativement similaires. L'hydratation du C₃S conduit à la formation de deux produits distincts : la phase C-S-H (silicates de calcium hydratés) et la phase CH (Portlandite) suivant la réaction :



Ou en notation abrégée :



- **Hydratation de C₃A**

L'hydratation du C₃A s'effectue très rapidement en présence d'eau pour former des phases hydratées intermédiaires (C₄AH₁₉, C₄AH₁₃, C₂AH₈) ou encore appelées AFm. Ces phases évoluent ensuite vers une phase plus stable (C₃AH₆) à une vitesse qui dépend fortement de la température, du rapport liquide/solide d'hydratation, de la taille des grains et de la concentration en CO₂. D'une manière générale, l'hydratation du C₃A est grandement influencée par les conditions et le milieu d'hydratation. L'addition du gypse (sulfate de calcium) permet de réguler l'hydratation du C₃A et ainsi d'éviter le phénomène de prise rapide du ciment. Après la dissolution rapide des deux composés, il se forme un trisulfoaluminate de calcium hydraté, l'étringite jusqu'à l'épuisement du gypse. La solution s'appauvrit alors en ion sulfate et l'étringite évolue vers une phase de type Afm, le monosulfate de calcium hydraté.

- **Hydratation de C₄AF**

De nombreuses études ont montré que l'hydratation des phases C₄AF ou C₂(A,F) est semblable à celle de C₃A lorsque les conditions d'hydratation sont identiques. La cinétique d'hydratation du ferroaluminate de calcium est par contre, beaucoup plus lente que celle de l'aluminate de calcium à température ambiante et s'accélère vers 50°C. Lors de la dissolution de la phase anhydre C₄AF, l'aluminium est libéré plus facilement que le fer. Les premiers produits d'hydratation contiennent du Fe³⁺ comme de l'Al³⁺ et tendent à évoluer vers des hydrogrenats comme dans le cas de C₃A. Cependant, les avis divergent concernant la distribution du fer parmi les phases produites. Identifiés par diffraction des rayons X et spectroscopie Mössbauer, deux phases contenant du fer. Ils mettent aussi en évidence que la présence de chaux augmente la quantité de fer dans l'hydrogrenat. Pour un ciment donné, les quantités de C-S-H et de Ca(OH)₂ formées dépendent essentiellement du rapport eau/ciment noté E/C et du temps de réaction. En moyenne, une pâte de ciment hydratée ordinaire contient 50 à 70 % de C-S-H et 25 à 27 % de Ca(OH)₂. La phase C-S-H est donc la phase majoritaire

dont dépend l'évolution des caractères physiques et plus particulièrement les propriétés mécaniques du matériau. La structure des C-S-H n'est pas bien définie mais toutes les observations montrent qu'elle forme un gel peu cristallin L'aspect structural de cette phase sera étudié ultérieurement. La Portlandite quant à elle, ne présente que peu d'importance de point de vue résistance mécanique (on lui attribue toutefois un rôle dans la résistance en traction), mais par contre, cet hydrate joue un rôle primordial dans le processus de durabilité.

2.2. Chronologie de l'hydratation

L'hydratation du C_3S implique le développement des trois réactions chimiques avancées dans le mécanisme de Le Chatelier : dissolution et sursaturation, précipitation de la phase C-S-H et précipitation de la Portlandite. Le suivi du flux thermique au cours du temps par calorimétrie isotherme permet de suivre l'évolution de l'hydratation des constituants du ciment. Concrètement, on suit l'évolution de la chaleur d'hydratation en fonction du temps et on peut distinguer cinq phases successives lors de ce processus [3]

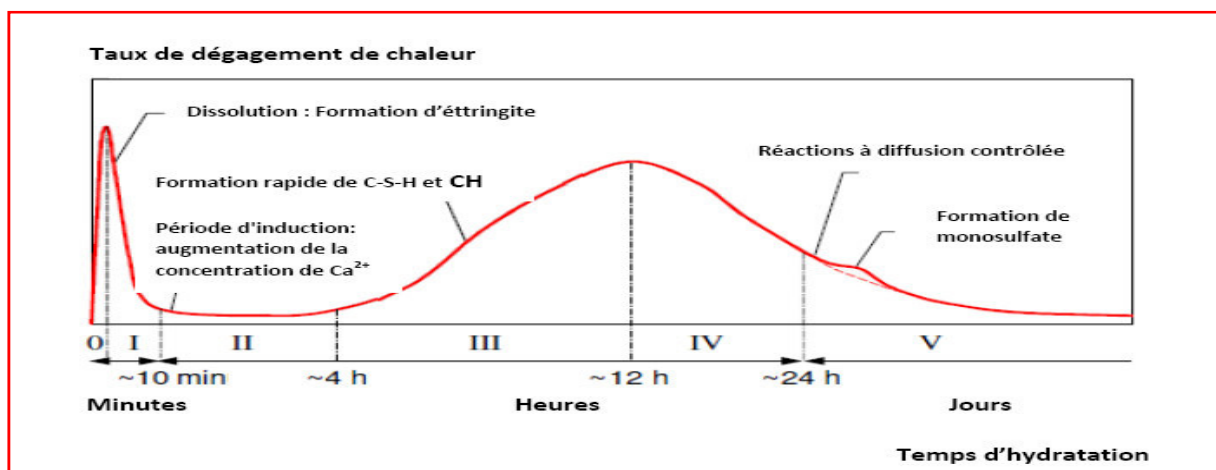


Figure I.3 : Représentation schématique de l'évolution de la chaleur lors de l'hydratation d'un ciment, [4]

La période I de pré-induction est celle du gâchage, au cours de laquelle le passage en solution des ions provenant des constituants s'effectue. On observe une dissolution rapide exothermique (pic du flux thermique) avec libération d'ions calcium, silicates, aluminates, sulfates et alcalins. La période II d'induction (période dormante) se traduit par la diminution du flux thermique (inertie thermique) pendant quelques heures. La dissolution du C_3S se poursuit lentement en libérant des ions calcium et des OH^- . La phase C-S-H (figure I.2) se forme mais malgré la forte sursaturation en chaux de la solution, la précipitation de Portlandite (CH) ne se produit pas. Notons que si l'on considère l'hydratation de l'aluminate

tricalcique (C_3A) également présent dans le ciment Portland, la période dormante correspond à la réaction des ions provenant du C_3A avec le gypse pour donner naissance à l'Ettringite. [3]

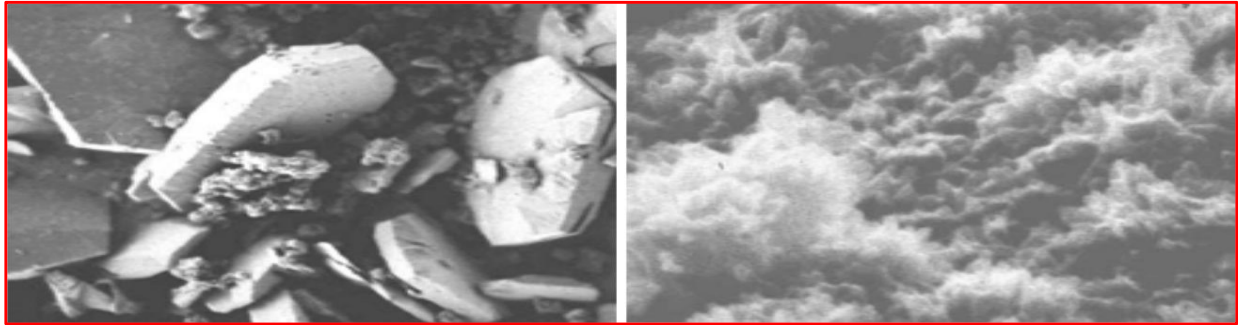


Figure I.4 : CSH (a), Pentlandite (b) d'après [3]

La période III d'accélération (période de prise) est déclenchée par la précipitation de la Portlandite qui survient au bout de ≈ 5 heures et qui entraîne la dissolution de tous les constituants du ciment anhydre. L'accélération des réactions est visible dans la courbe d'évolution du flux thermique et conduit à la précipitation de l'Ettringite, de la Portlandite et des C-S-H. Le phénomène de prise résulte de cette précipitation et dépend essentiellement de trois conditions majeures:

- Coagulation des particules, sous l'action des forces de Van der Waals, des forces électrostatiques et de solvatation (voir ci-après).
- Connexité de la structure coagulée.
- Rigidifiassions de la structure connexe et solidification des contacts résultants de la coagulation des C-S-H.



Figure I.5 : Aiguilles d'Ettringite [3]

La période IV de décélération (durcissement) se traduit par une lente diminution du flux thermique et par un ralentissement de l'hydratation. Lors de cette période, on observe le recouvrement des grains par une couche d'hydrates de plus en plus épaisse. Le durcissement fait alors suite à la fin de la prise. L'épuisement du gypse, visible avec la chute de la

concentration en sulfate, déclenche un pic dans la courbe du flux thermique. La formation du monosulfoaluminate par réaction de l'Ettringite (*figure I.3*) avec l'excès d'aluminate est très exothermique et rapide, d'où la présence de ce pic. Les alcalins contenus dans le réseau cristallin de C_3A sont alors libérés dans la phase aqueuse. La précipitation des hydrates intervient essentiellement au cours de la période d'accélération et de décélération. Les hydrates formés au cours de ces deux périodes sont morphologiquement distincts. Au cours de la phase d'accélération, les produits externes précipitent dans l'espace intergrain, initialement occupé par l'eau de gâchage. Les produits de précipitation internes se développent pendant la période de décélération, en remplacement de la phase solide anhydre. La structuration de la pâte et le développement ont lieu essentiellement au cours de ces deux périodes.

La période V de ralentissement (diffusion) se manifeste pendant plusieurs mois, voire plusieurs années après la prise. La porosité du matériau décroît de façon continue et le réseau de produits hydratés devient de plus en plus dense. La structure du matériau elle-même évolue par "recristallisation" et polymérisation des produits précédemment formés. De plus cette dernière période fait suite à l'épuisement du monosulfoaluminate et à la formation d'aluminate hydraté. Les hydrates continuent de se former dans les pores capillaires, s'enrichissent en alcalins, et par le jeu de l'équilibre de solubilité de la Portlandite, deviennent de plus en plus pauvres en calcium. Au bout de 30 jours, les hydrates ne contiennent quasiment plus que du NaOH et KOH. Ainsi, la partie solide de la matrice est caractérisée par un réseau poreux de grains de ciment, liés par des aiguilles de silicates de calcium. [3]

3. Récapitulations

Le procédé de fabrication du ciment Portland et en particulier le processus de clinkérisation conduit aux émissions de CO_2 , le remplacement d'une partie de ciment par un ajout peut contribuer positivement à la réduction de émissions de CO_2 .

- L'hydratation du ciment est un phénomène physico-chimique très complexe car elle met en jeu un grand nombre de réactions chimiques parallèles ayant des cinétiques différentes, les pâtes de ciment hydratées sont principalement constituées :

- Les hydrates (CSH, $Ca(OH)_2$, sulfoaluminate)
- Les grains de ciment non hydraté.
- Des espaces capillaires et des bulles d'air.
- La chaux hydratée $Ca(OH)_2$ (portlandite) est résulte essentiellement de l'hydratation de C_3S et C_2S occupe de 20 à 25% il participe peu au développement de la résistance il devient instable (lixiviation) lorsque le pH devient inférieur à environ 12,5.

- L'hydratation du ciment Portland est un processus exothermique le C3A et le C3S contribuent très largement au développement de cette chaleur, si l'on désire obtenir une faible chaleur d'hydratation, on pourra diminuer le C3A ou diminuer le C3S .[2]

1. Historique

Les mortiers ont été très utilisés du 16^{em} siècle. En 1959, l'anglais JHON Smeaton produit un mortier aussi dur que la pierre en mélangeant des CaO hydrauliques et des cendres volcaniques. A la première guerre mondiale, en raison de leur grande légèreté, pour le même calibre, par rapport aux autres bouches à feu, et parce qu'ils permettent de tirer à partir d'un emplacement encaissé ou d'atteindre des objectifs masqués. Pendant la seconde guerre mondiale, leur emploi a été plus restreint, le bombardement aérien s'étant révélé plus efficace. C'est pourquoi l'utilisation des mortiers lourds (jusqu'à 160 mm) a pratiquement disparu au profit des mortiers légers, dit d'infanterie.

2. Définition

Le terme mortier désigne un mélange de liant (ciment ou chaux) et de sable gâché avec une certaine quantité d'eau, des adjuvants et des colorants peuvent aussi être ajoutés. Selon qu'il contient plus ou moins de liant, un mortier est dit gras ou maigre.

On distingue les mortiers de leur composition et de leur utilisation :

- Mortier de ciment fabriqué avec du ciment artificiel de type portland blanc ou gris, il est très résistant.
- Mortier de chaux fabriqué avec de la chaux hydraulique. Moins résistant et moins étanche que le mortier de ciment, il est plus souple et laisse respirer les murs.
- Mortier bâtard, fabriqué avec un mélange de ciment et de chaux, avec des caractéristiques intermédiaires entre le mortier de ciment et le mortier de chaux.
- Mortier réfractaire à base de ciment fondu.
- Mortier rapide à base de ciment prompt.
- Mortier pour hourdage : C'est le mortier utilisé pour construire, c'est lui qui assemble les éléments de maçonneries. On utilise du mortier de ciment ou du mortier bâtard.

Mortier pour enduit : C'est le mortier qui est utilisé en revêtement de murs. On utilise du mortier de ciment, du mortier de chaux ou du mortier bâtard.

Les mortiers peuvent être :

- Préparés sur le chantier en dosant et en mélangeant les différents constituants, adjuvants compris,
- Préparés sur le chantier à partir des mortiers industriels secs prédosés (il suffit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire),

Livré par une centrale : Ce sont les mortiers prêts à l'emploi, dans les dernières années, les mortiers retardés stabilisés, ont un temps d'emploi supérieur à 24 heures. Les mortiers industriels se sont beaucoup développés ces dernières années, permettant d'éviter le stockage et le mélange de constituants sur des chantiers parfois exigus et difficiles d'accès: rénovation, travaux souterrains. [5]

Œuvre sur un chantier de construction. Le béton est placé dans des coffrages étanches non absorbants, en métal ou en bois, destinés à retenir toute l'eau afin que l'hydratation du béton soit complète et que celui-ci acquiert la plus grande résistance mécanique possible. Le mortier est placé entre des éléments de maçonnerie absorbants, et dès qu'il est en contact avec eux il commence à perdre de l'eau. La qualité primordiale recherchée pour le béton est la résistance mécanique, mais pour le mortier, elle ne constitue qu'une caractéristique parmi plusieurs d'autres.

3. Caractéristiques essentielles

Pour que les mortiers et les bétons soient de bonne qualité, il est indispensable que les granulats composant ces matériaux adhèrent parfaitement au ciment. En effet, la résistance à la traction d'un matériau hydraulique dépend essentiellement de l'adhérence des grains au ciment durci. On recherche également, pour un mortier ou un béton, les qualités suivantes :

- Résistance à l'écrasement,
- Compacité,
- Etanchéité ou imperméabilité,
- Constance du volume pendant la prise et le durcissement.

Toutes ces qualités dépendent d'une multitude de facteurs, qui sont en particulier :

- La qualité du liant, sa nature et son dosage,
- La composition granulométrique du sable,
- La quantité d'eau de gâchage,
- Les conditions de mise en œuvre,....etc. [6]

4. Propriétés des mortiers

D'après leurs propriétés, les mortiers se subdivisent en deux catégories :

4.1. Mortiers plastiques

La propriété la plus importante du mortier plastique est son ouvrabilité. On peut la définir comme la propriété du mortier à s'étaler à la truelle pour colmater toutes les fentes et fissures de l'élément de maçonnerie. L'ouvrabilité ne se mesure pas avec précision en

Laboratoire, mais le maçon peut l'évaluer en observant le comportement du mortier lorsqu'il l'étale avec sa truelle.

L'ouvrabilité est due à l'effet de roulement à bille résultant de la lubrification des granulats par le lait de ciment. Bien que la classe des granulats (sable) et la proportion des matériaux jouant un rôle très important, c'est la teneur en eau qui détermine les valeurs finales du retrait, et le maçon peut la contrôler à la mise en œuvre. La capacité d'un mortier de garder une certaine ouvrabilité sous l'influence de la succion des briques dépend de son pouvoir de rétention d'eau mesuré lors d'essais en laboratoire. Une bonne ouvrabilité et une bonne rétention d'eau sont essentielles à une qualité maximale de liaison.

Le pouvoir de rétention d'eau est caractérisé par la propriété de la pâte de ne pas se stratifier (exemple : pendant le transport), et de conserver assez d'eau dans la couche fine sur une base poreuse.

La dessiccation du mortier peut être si importante qu'il n'y aura plus suffisamment d'eau pour le durcissement du mortier qui ne pourra pas atteindre la résistance requise. Le pouvoir de retenir de l'eau peut être augmenté par introduction des plastifiants minéraux et organiques.

En réalité, l'ouvrabilité est une combinaison de plusieurs propriétés comprenant : la plasticité, la fluidité (la maniabilité), la compacité et la cohérence

La fluidité est la propriété d'une pâte de mortier qui puisse avoir, suivant les composants, des consistances différentes, depuis sèche jusqu'à fluide. Les mortiers de maçonnerie, de travaux de finissage des bâtiments et autres se font suffisamment fluides.

4. 2. Mortier durci

Le mortier durci possède un certain nombre de propriétés mécaniques d'importance majeure. La solidité de la liaison entre l'élément et le mortier est très importante. Quant à l'ouvrabilité, il n'existe pas de méthodes sûres pour la mesurer et par conséquent les mortiers sont évalués d'après les valeurs de résistance à la compression d'éprouvettes soumises à des conditions de moulage et de cures plus proches de celles que l'on rencontre avec le béton qu'avec le mortier.

La solidité du liaisoennèrent, les bonnes ouvrabilités un bon pouvoir de rétention d'eau donnent au liaisoennèrent une force maximale, et par le fait même ces qualités sont plus importantes que la résistance du mortier à la compression. la résistance à la flexion est également importante, parce qu'elle détermine la capacité d'un mortier à résister à la fissuration. Les mortiers devraient toujours avoir moins de résistance que les éléments de maçonneries pour que les fissures se produisent dans les joints, où elles peuvent être facilement colmatés. [7]

5. Les emplois des mortiers

Selon les auteurs, les mortiers peuvent être employés pour :

5.1. Les joints de maçonneries

La construction réalisée en éléments maçonnés (blocs de béton, pierre de taille, briques,...) nécessite leur assemblage avec un mortier qui doit présenter des caractéristiques mécaniques suffisantes pour assurer la transmission des charges et une compacité importante pour être étanche. On a généralement à utiliser un mortier ne présentant pas un module d'élasticité trop élevé, de façon à pouvoir s'adapter aux variations dimensionnelles des éléments qu'il liaisonne sans se fissurer.

5.2. Les enduits

Les enduits au mortier sont utilisés aussi bien pour les travaux neufs que pour la réfection des façades.

- Les enduits remplissent plusieurs rôles :
- Protection des gros œuvres contre les intempéries,
- Imperméabilisation, tout en laissant respirer le support,
- L'esthétique (aspect décoratif, couleur).
- Les enduits habillent le gros œuvre en le protégeant. Ils constituent la finition extérieure visible de construction.

5.3. Les chapes

Les chapes ont pour fonction d'assurer la mise à niveau de dallage et la régularité de sa surface. Les chapes peuvent constituer la finition : on y incorpore alors souvent des produits spécifiques. Elles peuvent aussi constituer le support d'un revêtement de sol. Les chapes doivent présenter une résistance suffisante pour assurer la transmission des charges au

Support, et parfois résister à l'abrasion ou au poinçonnement (sols industriels). Adhérente ou flottante, la chape peut également avoir une fonction thermique ou acoustique.

5.4. Les scellements et les calages

L'évolution des techniques de construction, le positionnement précis de pièces préfabriquées, le scellement d'éléments rapporteurs béton, entraînent une utilisation croissante de produits de scellement et de calage.

Parmi les utilisations, on peut citer :

- Calage d'équipements multiples industriels, machines lourdes à fort couple ou à fortes vibrations,
- Scellement des poutres, poteaux, acrotères,...
- Scellement de portes, fenêtre et éléments de second œuvre,
- Scellement de mobilier urbain, d'éléments de signalisation,
- Travaux de scellement en milieu marin,
- Assemblage d'éléments,
- Scellement de regards de visite sur routes à fort trafic avec remise en circulation quasi-immédiate.

5.5. Les coulis

Le coulis est un mélange fluide, à base de charges fines inférieures à une valeur de 0.3 mm de liants hydrauliques et d'adjuvants, les ciments utilisés sont des ciments portland artificiels ou des ciments portland composés. Les ciments de laitier ou les ciments alumineux sont utilisés pour leur résistance aux milieux agressifs. Il existe aussi des liants spéciaux pour coulis d'injection. Les charges sont constituées par des suspensions d'argile, de bentonite (argile colloïde). Les domaines d'utilisation des coulis sont les remplissages des cavités et fissures dans les roches, les sols ou les ouvrages béton ou maçonneries.[9-5]

6. Les techniques particulières de mise en œuvre

Suivant les auteurs, les mortiers peuvent être mis en place par deux méthodes :

6.1. La projection

Fabriqués sur chantier ou plus généralement pré dosés, les mortiers projetés comportent, outre le liant et le sable habituels, des adjuvants spécifiques améliorant

l'adhérence, des charges (silice, carbonate,.....) et parfois des fibres (verres, polypropylènes, acier). Projetés à l'aide de machines, le plus souvent à air comprimé, le mortier est plus compact, adhère mieux au support et se prête bien à son application sur des parties d'ouvrages difficiles d'accès et de forme irrégulière. La suppression de manipulation délicate et pénible, ainsi que les gains de productivité, expliquent le succès du mortier projeté dans de nombreuses applications :

- Enduits monocouches, enduits isolants,
- Revêtement de voûtes, en galeries, consolidation de talus,
- Travaux de réparation, etc....

6.2. L'injection

L'injection de mortier n'intéresse que certains types de travaux où les cavités à remplir sont suffisamment larges. Il est nécessaire que le diamètre maximum des grains de sable les plus gros ne dépassent pas le 1/5 des vides les plus fins à remplir. S'il n'en était pas ainsi, il faudrait utiliser des coulis d'injection. Comme dans le cas de coulis de ciment, le mortier d'injection doit être constitué de façon à être le plus injectable possible : grande fluidité pour un ressuage modéré (et, partant, une bonne stabilité, peu de ségrégation).

Les applications de l'injection sont essentiellement le remplissage des cavités, gaines, enveloppes diverses, ou plus généralement les vides d'accès difficile. L'injection est généralement pratiquée pour certains travaux sous l'eau, avec des formules de mortiers étudiés pour éviter le délavage.[8]

7. Matériaux composant le mortier

Par définition, les mortiers contiennent des liants, des granulats et de l'eau, des adjuvants ou des colorants peuvent aussi être ajoutés.

7.1. Liants

Le liant peut être du ciment portland (CPA, CPJ), de la chaux ou du ciment de maçonnerie, ou un des divers mélanges de ces matériaux. Ces trois sortes de liants doivent satisfaire aux normes respectives de l'AFNOR.

Le ciment portland donne au mortier de maçonnerie sa résistance mécanique, en particulier sa résistance initiale, qui est indispensable à une époque où la vitesse de construction est telle que l'on exige qu'un mur puisse supporter une charge importante le

lendemain même de sa construction. Les mortiers de ciment portland manquent de plasticité, ont un faible pouvoir de rétention d'eau et sont malaisés à travailler.

La chaux qui est le composant traditionnel du mortier, possède une plasticité et un pouvoir de rétention d'eau excellents, mais sa résistance mécanique est faible et sa cure est lente. La chaux grasse, obtenu par extinction de la chaux vive et en la laissant vieillir, est le produit de qualité que l'on devrait utiliser, mais le vieillissement prend beaucoup de temps et le travail de la chaux grasse est très salissant. C'est pourquoi il est plus pratique d'utiliser la chaux hydratée sèche. La cure des mortiers de chaux s'effectue lentement par carbonatation sous l'effet du gaz carbonique de l'air, ce processus peut être fortement ralenti par temps froid et humide.

Le ciment de maçonnerie est un produit déposé contenant du ciment portland et un filler minéral inerte (calcaire) et des adjuvants tels que des agents mouillants, des agents hydrofuges et des entraîneurs d'air.

Les adjuvants donnent la plasticité et le pouvoir de rétention d'eau que confère la chaux aux mortiers de ciment et chaux. Certains ciments de maçonnerie sont des mélanges de ciment portland et de chaux hydratée, avec en plus des adjuvants.

7.2 .les granulats

Le sable est le granule employé le plus fréquemment. Il est inerte et sert d'abord à accroître la compacité. Ses limites granulométriques sont indiquées dans la norme AFNOR (NF P 18-560). Malheureusement, la plupart des granulats sont choisis pour des raisons propriétés du mortier soient fortement altérés, mais la qualité du mortier serait certainement améliorée si

Suivant : le coefficient de foisonnement se calcul par : $K_F = \frac{V_{\text{humide}} - V_{\text{sec}}}{V_{\text{sec}}} \times 100\%$

Le sable est caractérisé aussi par le module de finesse qui se calcul par la formule

suivante : $M_f = \frac{\sum [refus\ cumulé\ sur\ tamis\ de\ module\ 23, 26, 29, 32, 35, 38]}{100}$

Selon si: $M_f > 2.5$ le sable est gros

$2.0 < M_f < 2.5$ le sable est moyen

$1.5 < M_f < 2.0$ le sable est fin

$1.0 < M_f < 1.5$ le sable est très fin

Le sable doit être sain, siliceux, silico-calcaireou même calcaire à condition que Grains ne soie pas friables .Il doit être propre, c'est-à-dire dépourvu d'impuretés

Susceptibles de compromettre la qualité du mortier en œuvre (argile, vase, terre végétale, plâtre, sels minéraux).

Le degré de propreté ste mesuré par l'essai d'équivalent de sable, ES Il est préférable des sables roulés de rivière, esl sables de carrière conviennent s'ils ne renferment pas d'impuretés nocives. Les sables de mer doivent être lavés (sinon ils sèqchentmal et peuvent donner lieu à des efflorescences en raison des sels qu'ils contiennent). La granulométrie des sables doit être limitée à 5 mm. En général le dosage des Mortiers Sont exprimés en poids de liant par m^3 du sable sec. Or le plus souvent, sur le chantier, le sable renferme un certain pourcentage d'eau (pouvant varier de 0 à 20 %) et il suffit de très peu d'eau pour que le poids du m^3 soit modifié ; c'est le phénomène bien connu du foisonnement du sable.

7.3. Eau

L'eau remplit un double rôle : elle sert à hydrater le ciment, et ce qui est plus important, elle contribue à son ouvrabilité. Il convient de noter que les exigences relatives à mortiers varient avec le but à atteindre et avec la nature de liant. Les dosages normaux de mortiers de ciment sont plus élevés que ceux des mortiers de chaux.[9]

8. Mortiers de chaux hydraulique

On utilisera, de préférence du sable de rivière. Les dosages employés diffèrent suivant la nature de la chaux hydraulique utilisée, et de l'usage qu'on veut faire du mortier obtenu.

Le tableau I.3 résume les différents dosages utilisés :

Tableau II. 1. Différents dosages de mortiers utilisés [1]

Type de chaux	Mortier maigre	Mortier normal	Mortier gras
Hydraulique	Ouvrages courants	Fondations	Ouvrages
	(à l'air)		Immergés
Légère	250	300	350
Lourde	300	350	400
Eminemment hydraulique	35	400	450

9. Mortiers de portland

Les dosages par m³ de sable ainsi que les usages, des différents types de mortiers fabriqués sont indiqués au tableau I.4 :

Tableau II.2. Dosage par m³ de sable dans les mortiers [1]

Détermination du		Dosage	Usages
Mortier		En Kg	
Mortier maigre		250-350	Maçonnerie de remplissage
Mortier normal		350-400	Toutes maçonneries à l'air et à l'eau douce (rivière) immergés seulement lorsque le mortier a Durci
Mortier semi-riche		400-500	Parements, voûtes, enduits aériens
Mortier assez riche		500-600	Travaux à la mer, radiers d'écluse, fondations Immergés
Mortier riche		600-800	Rejointoiement
Mortier très riche		800-1000	Spéciaux pour tuyaux centrifugés
Mortier	Spécialement	1000-1200	Enduits à immerger dès le début
Riche			du durcissement, pierres artificielles, dallages

- **Mortiers bâtards**

On appelle ainsi les mortiers qui contiennent à la fois du ciment et de la chaux. Ces derniers sont excellent à condition que le mélange chaux plus portland soit bien homogène.

10. Etude de la qualité des mortiers

- **Résistance à l'écrasement**

Cette résistance dépend d'une multitude de facteurs, en particulier de la qualité du liant, de la nature et de la pureté du sable. Toutefois, le liant et le sable étant donnés, et en laissant provisoirement de côté le soin apporté à la mise en œuvre, la résistance dépend d

Dosage du liant,

- Qualité de l'eau de gâchage,
- Composition granulométrique du sable.

De nombreux chercheurs ont essayé de traduire en formule les influences des cesfacteurs. Parmi ces formules, nous citerons les deux plus connues, à savoir les formules de FERET et de BOLOMEY

Tableau II.3 : Emploi des mortiers et classe de résistances [1]

	Conditions	Classe de
Emploi des mortiers	de mise	Résistance
	en œuvre	(Bars)
Pose en pierres des murs extérieurs des bâtiments	Humidité < 60 %	10
avec des mortiers bâtards et de ciments	60 < Humidité < 75%	25
	Humidité > 75 %	50
Tableau I.5.1. Mortiers de maçonneries	Humidité < 60 %	> 25
Pose des murs armés avec mortiers de ciment		
	Humidité > 60 %	> 50
Pose des poteaux , des trumeaux, des corniches, des linteaux, des voûtes et		25 à 50
des autres parties de bâtiments		
Pose en pierres souterraines et celles des socles au-dessous de la couche		
d'isolement hydraulique avec des mortiers	de ciments et de ciments à	25 à 50

bâtards,		
Argile		
	Panneaux en béton lourd	> 100
Remplissage des joints horizontaux lors du montage des murs en panneaux de béton	Panneaux en béton léger	> 50
Pose des murs en panneaux, gros blocs ou pierres ordinaires pendant l'hiver : en briques et pierres de forme régulière	Murs de fondations Poteaux Corniches et linteaux	10 25 50
Pose des murs en panneaux, gros blocs ou pierres pendant l'hiver : en pierres de carrières	Murs de fondations Poteaux	25 50
Pose à chauffage artificiel en enclos de protection ou avec utilisation des additions chimiques		10
Remplissage des joints horizontaux lors du montage des murs en panneaux de béton et des briques traitées par vibrations		100
Tableau I.5.2. Mortiers pour travaux de finissage		
Mortiers décoratifs employés pour les travaux de finissage des panneaux en béton armé		> 150
Finissage des panneaux en béton légers		> 50
Enduits des façades des bâtiments		> 50
Résistance au gel des mortiers de finissage		> 35
Tableau I.5.3. Mortiers spéciaux		
Remplissage des joints entre les éléments de construction en béton armé préfabriqué de mortiers préparés au portland et sable de quartz		> 100
Remplissage des canaux dans les éléments de construction précontraints		> 300
Chape de plancher		³ 500
Tamponnage des sondes de pétrole		25 à 100

11. Capacité d'absorption d'eau

La capacité d'absorption d'eau (*CAE*) des matériaux de constructions est leurs pouvoirs d'absorber et de retenir l'eau. elle se caractérise par la quantité d'eau absorbée par un matériau sec entièrement immergé dans l'eau et s'exprime en pourcentage de la masse (capacité d'absorption massique) ou du volume (capacité d'absorption volumique).

Elle se calcule d'après la formule suivante [3] : $CAE = \frac{m_{sat} - m_{sec}}{M_{sec}} \times 100 \%$

m_{sat} : la masse du matériau saturé d'eau

m_{sec} : la masse du matériau sec

La CAE varie principalement en fonction du volume des pores, de leurs types et de leurs dimensions. Elle est aussi influencée par la nature de la substance et son pouvoir hydrophile.

La CAE des mortiers de finissage à agrégats en sable de quartz, pas plus de 8 % ; et celle des mortiers à agrégats en roches de 12 % au maximum.[10]

- **Coefficient de ramollissement**

Le coefficient de ramollissement est le rapport de la résistance à la compression d'un matériau saturé d'eau R à la résistance à la compression du matériau à sec

- **Retrait et gonflement**

On sait que l'hydratation du ciment s'accompagne, du fait de la contraction Le Chatelier, de la réaction d'un fin réseau de pores capillaires à l'intérieur de la pâte de ciment hydratée. Mais lorsque la consommation d'eau pour l'hydratation du ciment provoque leur assèchement, cela aboutit à la formation de ménisques. On s'accorde à expliquer le retrait par les forces de traction (capillaires ou autres) qui se développent de ce fait à l'intérieur des capillaires les plus fins. Le départ d'eau par évaporation a les mêmes conséquences [9].

- **Le gonflement**

observé après la prise est du à la constitution d'hydrates comme la Portlandite, $Ca(OH)_2$, qui, contrairement à la formation des autres hydrates, se fait avec augmentation de volume. Ce gonflement s'oppose en partie au retrait et est lié à la quantité de chaux libre non hydraté restant après la prise. Si cette quantité est faible, le gonflement pourra être négligeable. [6]

- **Porosité et perméabilité**

La porosité (contraire de la compacité) est le rapport du volume des vides au volume total. Elle se mesure donc par la quantité : $1 - (C + S)$

- **La perméabilité**

La propriété qu'a le mortier de se laisser traverser par les liquides [2].

- **Compacité**

La compacité est une des qualités essentielles d'un mortier car elle entraîne une bonne résistance ainsi qu'une bonne étanchéité. L'étude de la compacité (C+S) revient

principalement à l'étude de la composition granulométrique du mortier et à la détermination des dosages en ciment et en eau.

Pratiquement, dans les conditions les plus favorables, la compacité d'un mortier de ciment atteint 0.90 et peut descendre jusqu'à 0.75. Pour les mortiers de chaux hydrauliques, cette compacité varie de 0.60 à 0.80 suivant les cas.

- **Adhérence**

L'adhérence concerne la liaison du mortier lui-même avec les maçonneries. Une des conditions essentielles pour que le mortier adhère bien aux pierres et que ces dernières soient propres. Par ailleurs, le ciment portland adhère mieux que les ciments prompts et les chaux.

- **Décomposition des mortiers**

On distingue deux types d'actions selon les auteurs [2]

- **Actions des liquides agressifs**

On désigne par le nom des liquides agressifs les eaux séléniteuses, les eaux très pures et les eaux de mer. Pour les travaux de fondations qui sont en contact avec les eaux séléniteuses, on utilisera les ciments de laitier au clinker ou, à défaut, de ciment de laitier à la chaux. Pour les mortiers en contact avec l'eau de mer, on utilisera des ciments pouzzolanique ou des ciments riches en laitier

1. Les argiles

1.1. Notions générales sur les argiles

L'argile est une matière première utilisée depuis la plus haute antiquité. Le mot argile vient du grec "argiloshhg" dérivé de "argos" qui veut dire blanc, ou du latin "argila"; c'est la couleur du matériau utilisé en céramique qui a conduit les anciens à lui donner ce nom. On trouve les minéraux argileux très fréquemment dans les sols et les roches sédimentaires.

Grâce à leurs propriétés physico-chimique intéressantes, les argiles font partie des minéraux industriels qui présentent une grande valeur économique et écologique. Ils sont utilisables pour différentes applications, telle que : le raffinage d'huile alimentaire, la cosmétique, la médecine, la fabrication des matériaux de construction et l'élaboration de matériaux géopolymères,

1.2. Définition

Les argiles, ou roches argileuses sont un mélange de minéraux et d'impuretés cristallines. Souvent hydratés, de forme lamellaire ou fibreuse. Telles que les argiles sableuses, les argiles calcaires ou marnes et les argiles bitumeuses.

Le terme "ARGILE" désigne non seulement une formation rocheuse, mais définit aussi un domaine granulométrique comprenant des particules minérales dont le diamètre Des grains est inférieur à deux micromètres ($< 2 \mu\text{m}$) [10].

1.3. Structure cristalline des argiles

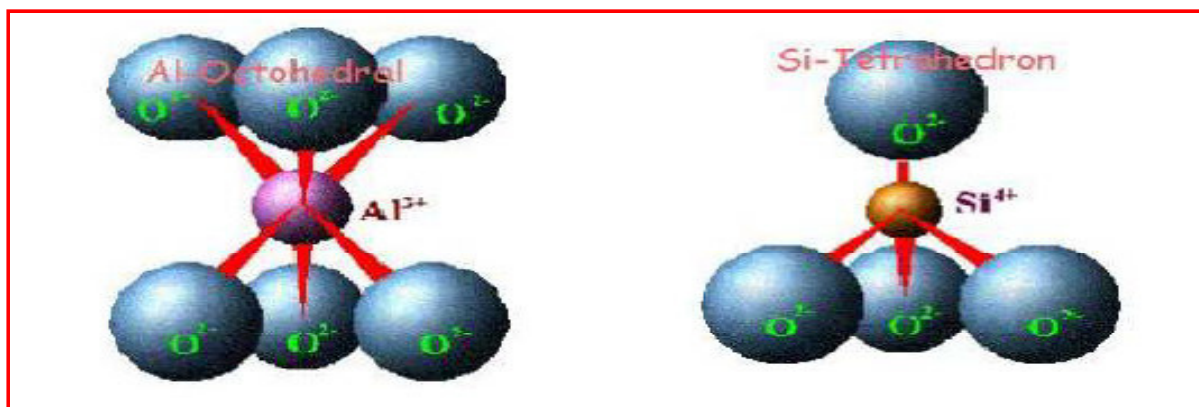


Figure III.1: Structure octaédrique et tétraédrique des couches d'argiles. [10]

La superposition des couches tétraédriques et octaédriques forme un feuillet élémentaire séparé souvent par un espace inter foliaire. Cet espace inter foliaire peut être vide, comme il peut renfermer des cations alcalins ou alcalino-terreux et des molécules d'eau. Ces cations

peuvent quitter facilement l'espace inter foliaire et être remplacés par d'autres cations. L'association d'un feuillet et d'un espace inter foliaire représente une unité structurale.

Les différents groupes de minéraux argileux se différencient par l'arrangement de leurs couches tétraédriques et octaédriques représentés sur la figure 2.

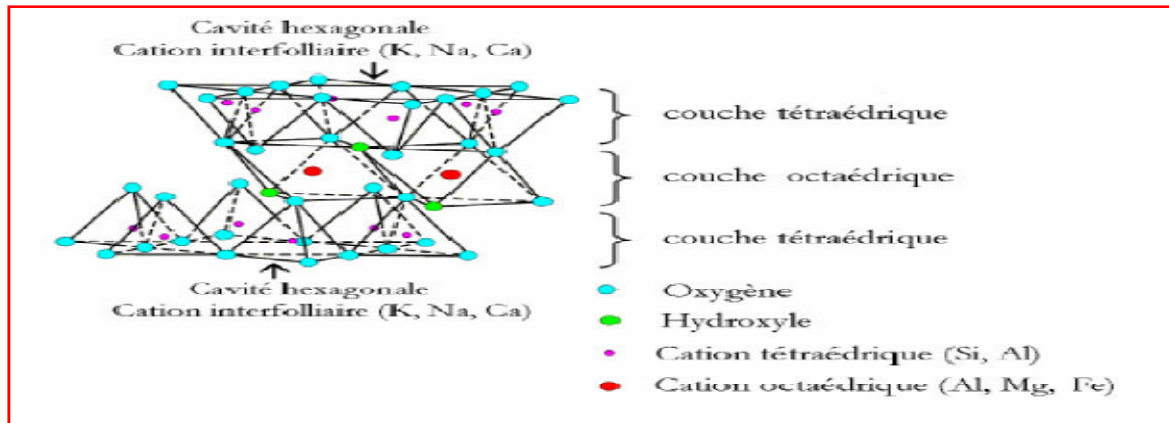


Figure III.2: Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicate [11]

- La couche tétraédrique : est formée par l'enchaînement de tétraèdres constitués des Ions de Si^{4+} , Al^{3+} .
- La couche octaédrique : est constituée par un enchaînement d'octaèdre, dont les sommets sont occupés par des atomes d'oxygènes ou des groupements hydroxyles, les Centres étant occupés par des ions Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} et Fe^{2+} . Cet enchaînement est caractérisé par :
 - Un caractère dioctaédrique : deux sites octaédriques sur trois sont occupés par des cations trivalents.
 - Un caractère troctaédrique : trois sites octaédriques sur trois sont occupés par des cations divalents [11]

1.4. Classification des minéraux argileux

Tableau III. 1 : Classification des minéraux argileux selon la proportion et la composition des couches T et O [11]

Type d'argile	Formule Structurale			Charge Compensée	A	Groupe	Famille
	M ₂₋₃	Si ₂	O ₅	0		Kaolinite-	Diocatédrrique
1 / 1	(OH) 4					serpentine	Triocatédrrique
2 / 1	M ₂₋₃	Si ₄	O ₁₀	0		Pyrophyllite-	Diocatédrrique
	(OH) 2					Talc	Triocatédrrique
				0.25-0.6		Smictite	Diocatédrrique
							Triocatédrrique
				0.6-0.09		Vermiculite	Diocatédrrique
							Triocatédrrique
				1		Mica	Diocatédrrique
							Triocatédrrique
				2		Mica cassant	Diocatédrrique
							Triocatédrrique
2 / 1 / 1	M ₂₋₃	Si ₄	O ₁₀	Variable		Chlorite	
	(OH) ₂ -M-						
	(OH) ₂₋₃						

La classification des argiles et leur nomenclature dépendent de leur composition chimiques et de l'ordre structural. La classification adoptée par le comité de nomenclature de l'Association Internationale pour l'Etude des Argiles (AIPEA) varie avec les données structurales. Suivant le mode d'agencement des tétraèdres et des octaèdres on distingue 2 grandes familles de minéraux :

Les minéraux fibreux qui sont des espèces à pseudo feuillets, par exemples les palygorskites (attapulgate) et les sépiolites.

Les minéraux phyllite à structures lamellaires. Ces derniers sont les plus répandus et les plus étudiés. Leur classification est basée sur le mode d'association des couches structurales et le degré d'occupation des sites de la couche octaédrique (di ou tri octaédrique). Selon la séquence d'empilement des couches tétraédriques et octaédriques on distingue des minéraux de type 1/1 (T-O), 2/1 (T-O-T) et 2/1/1(T-O-T-O)

1.4.1. Minéraux de type TO

Le feuillet est formé par la juxtaposition d'une couche tétraédrique et une couche octaédrique. Les cristallites des minéraux de type TO ont leurs feuillets successifs empilés de telle sorte que le plan des atomes d'oxygène d'un feuillet se trouve en face de celui des groupements d'hydroxyles du feuillet voisin. Des liaisons hydrogènes inter feuillets stabilisent alors l'empilement (figure 3). Cet assemblage peut se faire pour différentes positions des deux plans, ce qui entraîne des déplacements relatifs des feuillets et détermine le système cristallin du minéral. L'ensemble des charges est reparti de telle sorte que le feuillet est électriquement neutre. La cohésion des feuillets est assurée par des ponts hydrogènes. Dans ce sous-groupe d'argiles, on peut citer la famille des kaolinites (la kaolinite, la dickite et la nacrite) et l'hallowite. L'équidistance caractéristique est environ 7.1 \AA [11].

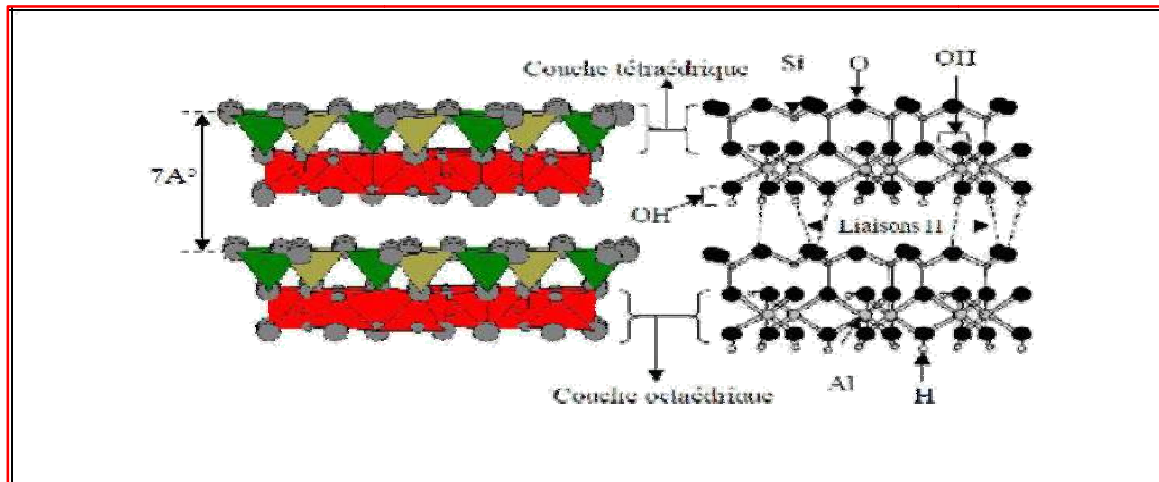


Figure III.3 : Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres alumineux d'un minéral de type TO [11].

1.4.2. Minéraux de type TOT

Ce type de minéraux résulte de la combinaison d'une couche octaédrique placée entre deux couches tétraédrique (figure 5). Les minéraux présentant cette structure sont très nombreux, car les substitutions sont fréquentes aussi bien dans la couche tétraédrique que dans la couche octaédrique, ce qui entraîne la présence de différents cations nécessaires à la neutralisation électrique. La nature de ces cations et leur liaison plus ou moins intime avec le feuillet qu'ils relient, multiplie les espèces chimiques et modifie les propriétés physico-chimiques des minéraux.

L'équidistance caractéristique varie de 9.4 à 15\AA selon le contenu de l'interfeuillet. À ce type correspondent les groupes du talc, des smectites, des vermiculites et des micas [12].

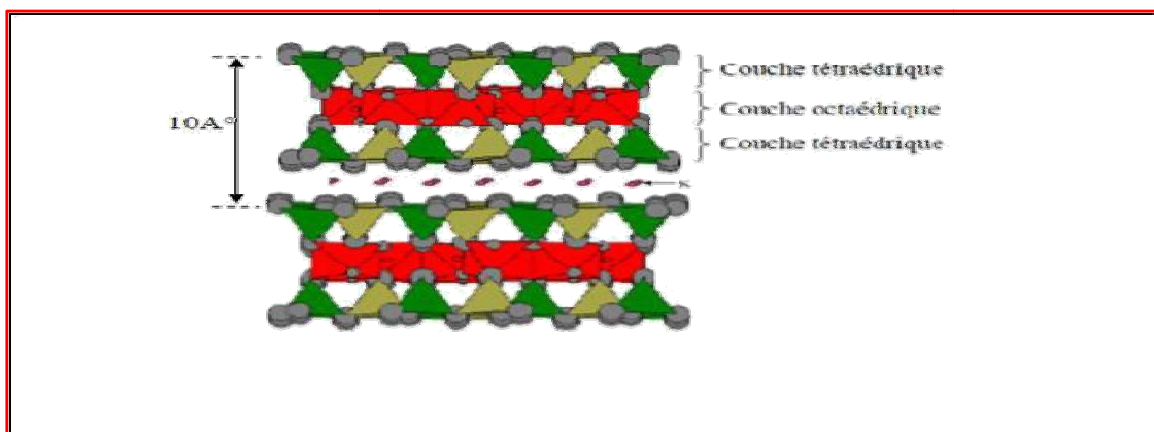


Figure III.4 : Représentation schématique des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres alumineux d'un minéral de type TOT [11].

1.4.3. Minéraux type TOTO

Ces minéraux sont issus de la combinaison de deux couches octaédriques avec deux couches tétraédriques. La charge du feuillet est compensé par une couche interfoliaire d'octaèdre contenant des atomes d'aluminium et/ou de magnésium (*figure III.5*) l'équidistance caractéristique est alors d'environ 14\AA , à ce type correspond le groupe du chlorite

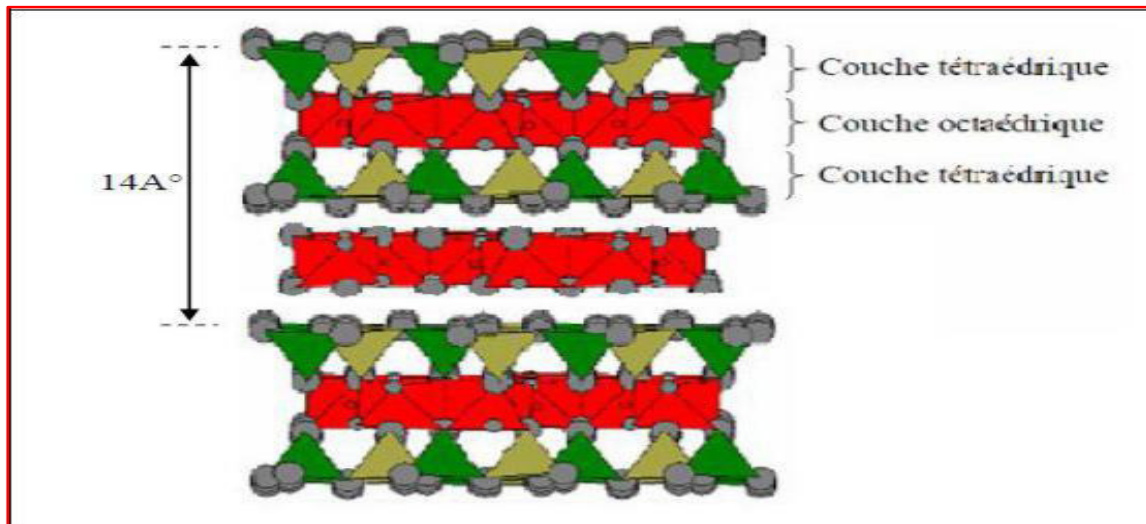


Figure III .5 : Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres Alumineux d'un minéral de type TOTO [11].

1.4.4. Minéraux interstratifiés

Les similitudes dimensionnelles, à micro échelle, des différentes argiles, permettent l'inter stratification de plusieurs types de feuillets. Parmi les interstratifiés les plus fréquents, citons : illite-smictite, entre argiles T-O-T, mais aussi interstratifiés entre argiles T-O-T et argiles T-O, tel que smectite-kaolinite. Ces interstratifiés peuvent présenter tous les degrés d'ordre, entre distribution parfaitement régulière et distribution totalement aléatoire des différents types de feuillets

Un minéral interstratifié régulier est formé de l'empilement régulier de feuillet de minéraux argileux élémentaires de nature différente, en proportion variées. Dans ce cas l'empilement des différents types de feuillet se fait selon des séquences répétitives (exemple : A-B-A-B-A-B).

Un interstratifié est considéré comme irrégulier si l'empilement des différents types de feuillets est aléatoire, c'est-à-dire si aucune séquence répétitive ne se dessine (*figure III. 6*) [11]

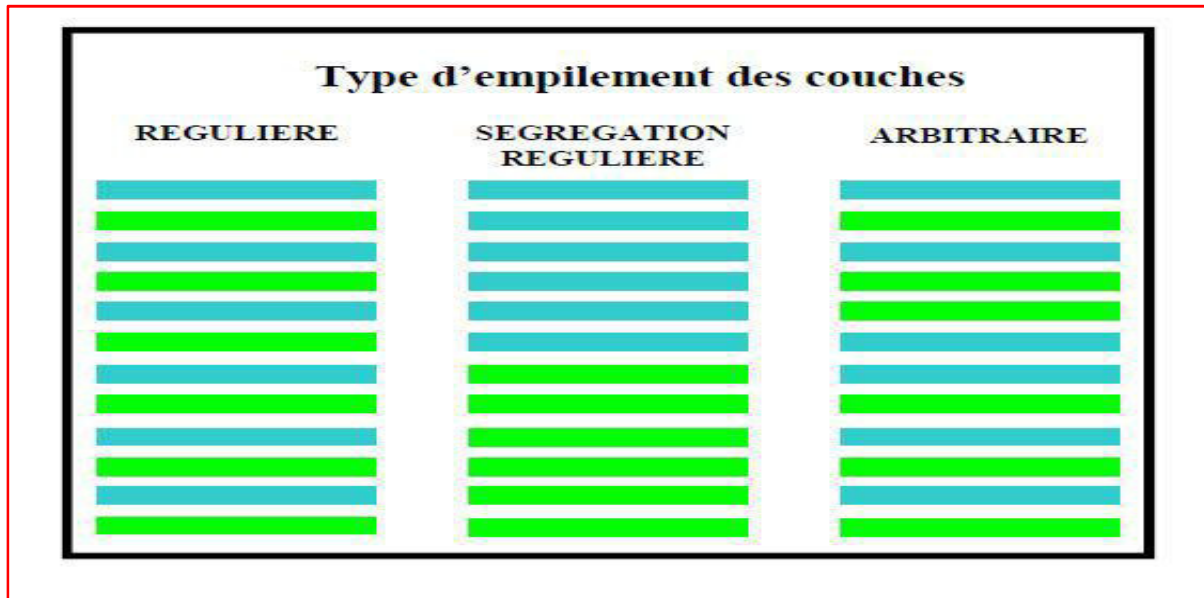


Figure III. 6: Structure des minéraux interstratifiés [11].

1.2. Groupes des argiles

1.2. Les kaolins

1.2.1. Définition

Le terme kaolin, d'origine chinoise, vient de "Kaoling". Il signifie littéralement « haute colline ». Cette matière première entrant dans la fabrication des porcelaines chinoise était extraite d'une colline proche de King Tching à partir de 210 avant Jésus-Christ. Le kaolin est une roche composée essentiellement de kaolinite, résultant de la décomposition des granites et des feldspaths par hydrolyse sous un climat chaud et humide, ou par une action hydrothermale. La kaolinite est une argile TO dioctaédrique dont le cation octaédrique est l'aluminium. Elle a pour formule $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})$

1.2.2. Structure de la kaolinite

La kaolinite présente une structure de type 1:1, avec une équidistance d'environ 7Å et elle est de type dioctaédrique (un site octaédrique sur trois est évacué).

Les trois sites de la couche octaédrique sont donc remplis par deux cations d'aluminium et le troisième site est vacant. C'est la position des sites vacants qui permet de différencier les minéraux de type 1:1 : kaolinite décrite et nacrite (*figure I.3*). Les faces basales sont de deux

types, constituées, soit d'ions oxygène organisés en réseau hexagonal, soit d'OH en assemblage compact.

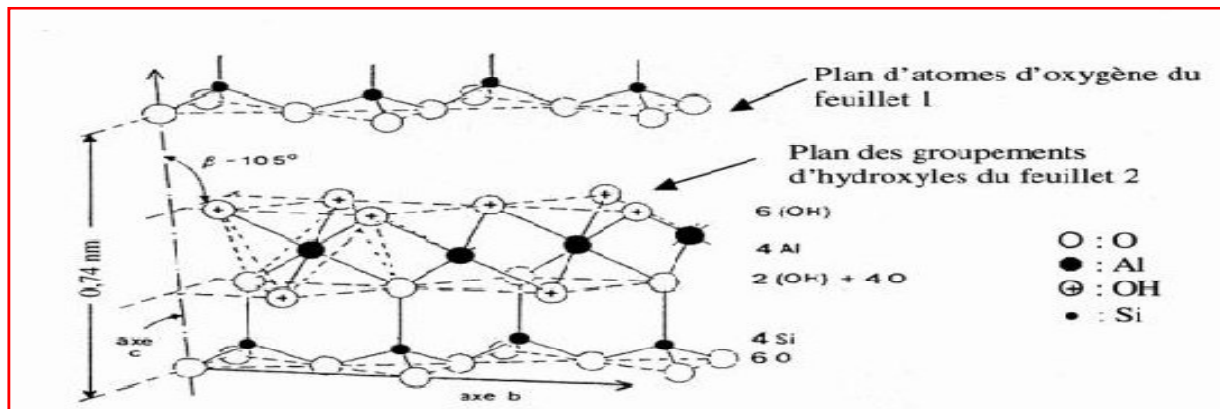


Figure III.7 : Structure type 1:1, cas de la kaolinite [12]

1.2.3. Origine des Kaolins

1.2.3.1. Kaolins primaires

La kaolinite provient généralement de l'hydrolyse de n'importe quel minéral ou verre Silicoalumineux. Par exemple la formation de kaolinite à partir de feldspath potassique peut s'écrire :

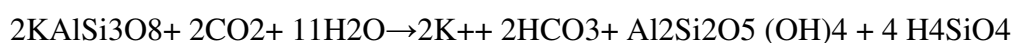


Le processus ci-dessus conduit à des kaolins dits primaires, en contact direct avec la roche Silicoalumineuse qui leur a donné naissance.

La kaolinisation des minéraux Silicoalumineux suppose un lessivage total des éléments alcalins et alcalino-terreux (K, Na, Ca), du fer et le départ d'une partie de la silice ; on estime à Environ 30 % la diminution de volume liée à ces lessivages Deux fluides peuvent être à l'origine des phénomènes de kaolinisation:

- Les eaux de surface (ou météoriques), en milieu tropical (< 40 °C)
- Les fluides hydrothermaux de température inférieure à 300°C

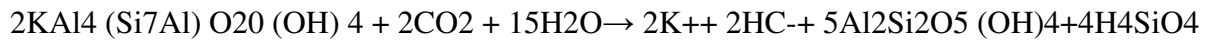
Certaines substances, une fois dissoutes dans l'eau, augmentent le caractère acide de celle-ci, accélérant ainsi la décomposition des minéraux primaires. D'après Helgeson et Mackenzie la dissolution du gaz carbonique atmosphérique peut, lors de l'hydrolyse, tripler les vitesses de décomposition des feldspaths potassiques et de formation de la kaolinite. ce processus géochimique naturel conduit directement à la formation de la kaolinite suivant la réaction :



En revanche, si le drainage est faible, le transfert de potassium est incomplet et il se forme de L'illite selon la réaction :



Lors d'un drainage ultérieur, cette illite peut poursuivre son hydrolyse, en expulsant le potassium, pour conduire alors à la kaolinite:



Des réactions analogues permettent de décrire l'hydrolyse de l'albite (feldspath sodique) directement en kaolinite ou en un composé intermédiaire (montmorillonite sodique). D'après Helgeson et Mackenzie toujours, dans les mêmes conditions d'hydrolyse, la formation de la kaolinite est dix fois plus rapide à partir de l'albite que des feldspaths potassique

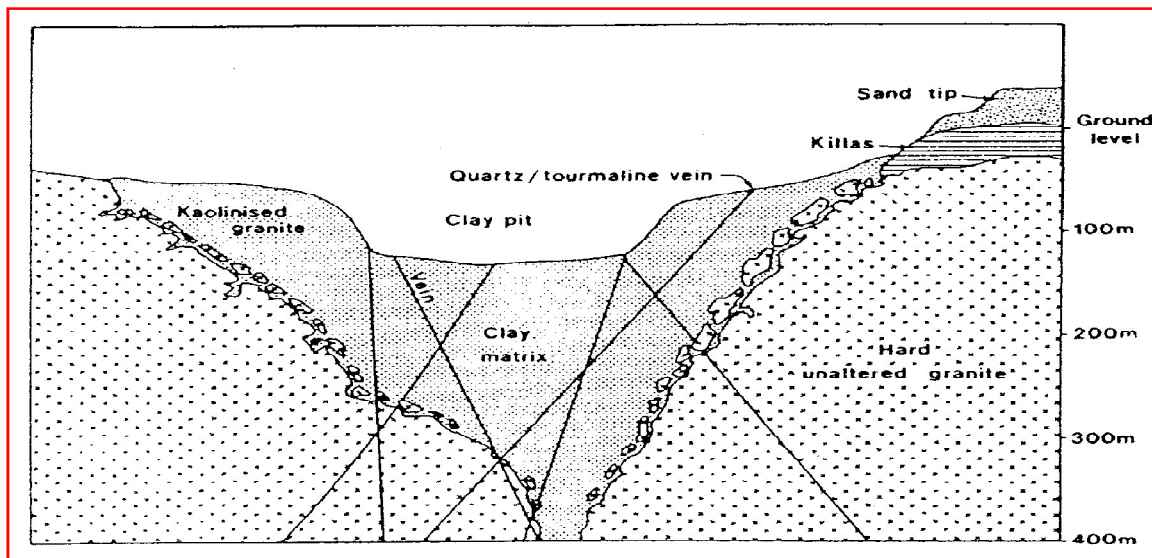


Figure III. 8: représente la coupe schématique d'un gisement de kaolin primaire.[12]

1.2.3.2. Kaolins secondaires

Les kaolins dits secondaires ont pour origine des kaolins primaires entraînés par les eaux de Ruissellement puis déposés. Les gisements de kaolin sédimentaire se rencontre dans les dépôts continentaux à épicontinentaux, mis en place en général au cours de cycles transgression régression. Ils peuvent être rencontrés à différentes époques géologiques durant lesquelles prévalait Un climat de type tropical favorisant une intense altération. La formation de ces dépôts est possible dans deux zones : En eau de mer : Au contact de l'eau de mer, riche en cations, près de 90% des argiles chargées négativement Flocculent. Ces dépôts, qui forment alors des bouchons constitués de kaolinite impure, sont communément appelés argiles kaolin tiques (mélange avec d'autres éléments tels que micas, quartz. en eau douce :

Si les argiles, généralement chargées négativement dans l'eau "pure", ne rencontrent pas de cations susceptibles de favoriser leur floculation, elles restent longtemps en suspension. Il s'ensuit un tri sélectif des éléments indésirables en fonction de leur aptitude à sédimenter. Les

particules les plus lourdes, qui se déposent en premier, sont ainsi recouvertes par un kaolin riche en kaolinite. Les micas, formés de feuillets qui flottent également longtemps sur l'eau, se retrouvent alors généralement mélangés à la kaolinite

c) Minéraux accessoires

Fait de leur genèse, les kaolins contiennent divers minéraux accessoires, en diverse

Kaolin Métkaolin + 2H₂Ogaz

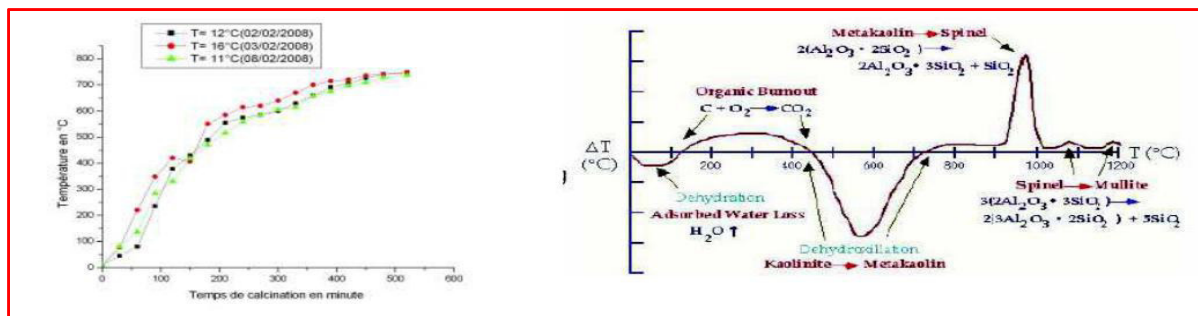


Figure III.9 : Traitement thermique du Kaolin KT.[15]

Figure III.10 : Transformation du kaolin en métkaolin[15]

1.2.4. Caractéristiques des métkaolin

1.2.4.1. Compositions chimique et minéralogiques

Les ultrafines d'origine naturelle étant issues de roches, les oxydes majoritairement représentés sont les oxydes de calcium, de silicium, d'aluminium et de fer. Les métkaolin contiennent principalement de l'oxyde de silicium (entre 50 et 55 %) et de l'oxyde d'aluminium (entre 40 et 45 %). Des exemples de compositions chimiques de métkaolins tirés de la littérature sont présentés dans le tableau [13]

Tableau III.2 : composition chimiques de métkaolin[13]

Composition	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
[Khatib et al., 1996a]	52,1	41,0	4,3					
[Poon et al., 2001]	53,2	43,9	0,4	0,02	0,05	0,2		1,7
[Gruber et al., 2001]	52,1	45,3	0,6	0,05		0,2	0,2	1,6
[Staquet et al., 2004]	55,0	40,0	0,6	< 0,1			1,6	
[Batis et al., 2005]	65,9*	22,6	0,9	0,4	0,02			
	47,8	38,2	1,3	0,03	0,04			

1.2.5. Caractéristiques physiques de métkaolin

1.2.5.1. Masse volumique

Les valeurs moyennes des masses volumiques des métkaolin sont de l'ordre de $2,5 \text{ kg/dm}^3$. Ces valeurs peuvent fluctuer en fonction de la composition minéralogique de la roche mère mais également en fonction du mode de fabrication des métkaolin. En effet, les traitements thermiques entraînent une profonde modification de la composition minéralogique et des morphologies des particules. Selon les travaux de [Measson, 1981], la température maximale du traitement thermique [13]

1.2.5.2. Granulométrie des métkaolin

Trois types de populations caractérisent la distribution granulométriques des métkaolin

- une population de plaquettes ou d'agglomérats de plaquettes submicroniques centrée sur $0,2 - 0,3 \mu\text{m}$
- une population de plaquettes ou d'agglomérats de plaquettes macaroniques centrée sur $3 \mu\text{m}$ environ

Une population de « grandes » plaquettes ou d'agglomérats de plaquettes centrée sur $8 - 10 \mu\text{m}$

1.3. Bentonite

1.3.1. Définition

La bentonite est une roche argileuse, friable, tendre et onctueuse au toucher, sa teinte dépend des composés minéraux et impuretés (matière organique et oxydes des métaux) qui lui sont étroitement associés. Elle est blanche, grise ou légèrement jaune. Elle se caractérise par une capacité élevée d'adsorption, d'échange ionique et de gonflement

1.3.2. Origine de la bentonite

L'altération et la transformation hydrothermale de cendres des tufs volcaniques riches en verre entraînent la néoformation des minéraux argileux, qui font partie principalement du groupe de la smaltite. Les roches argileuses ainsi formées portent le nom de bentonite, d'après le gisement situé près de Fort Benton (Wyoming, Etats-Unis). Elle contient plus de 75 % de montmorillonite ; cette dernière fut découverte pour la première fois en 1847 près de Montmorillon, dans le département de la Vienne en France. En Algérie, les gisements de bentonite les plus importants économiquement se trouvent dans l'ouest algérien. On relève en particulier la carrière de Maghnia (Hammam Boughrara) dont les réserves sont estimées à un million de tonnes et de celle de Mostaganem avec des réserves de deux millions de tonnes

1.3.3. Structure de la bentonite

La montmorillonite est le constituant principal de la bentonite. C'est un phyllosilicate 2 :1 (famille de smectites) dans lequel la charge négative de la couche est électriquement équilibrée par une charge égale, des cations échangeables (Ca, Mg, K+NH et Na+) situés principalement entre ces couches silicates ; ces cations ne font pas partie de la structure et garde une certaine mobilité

1.3.4. Application de la bentonite

Les bentonites ont de larges applications dans différents domaines (forage, fonderie, céramique, peinture, pharmacie, terres décolorantes,..., etc.).La majeure partie de la bentonite exploitée dans le monde est utilisée comme liant du sable de moulage, dans l'industrie de la fonderie et aussi pour épaissir les fluides de forage

Tableau III.3. Caractéristiques physico-chimique de la bentonite

Surface spécifique (m ² /g)	Cations échangeables (meq/100g)					PH
	Ca ²⁺	M	g ²⁺	Na ⁺	K ⁺	
80	30.6	12.8	36.2	9.5		6.2

Tableau III.4: Composition chimique de la bentonite [14]

	Constituants	%
1	SiO ₂	69.4
2	Al ₂ O ₃	14.7
3	Fe ₂ O ₃	1.2
4	CaO	0.3
5	MgO	1.1
6	Na ₂ O	0.5
7	K ₂ O	0.8
8	MO ₂	0.2
9	AS	0.05

1.3.5. Caractérisation de la bentonite

La bentonite ayant donnée un maximum d'adsorption du phénol est caractérisé au moyen des deux expériences suivantes dans une éprouvette graduée, une masse de bentonite occupera un volume V_a . [14]

1. Définition

La mise au point de produits composites renforcés de fibres dans les secteurs de la construction civile ou maritime, dans la fabrication des automobiles, l'aérospatiale et autres a offert l'opportunité de surpasser certaines difficultés qui ont demeurées un obstacle devant l'évolution des caractéristiques, mécaniques ou techniques des matériaux. Devant cet exploit, les chercheurs de par le monde et jusqu'aujourd'hui, tentent d'utiliser des fibres de différentes natures et caractéristiques pour parer certaines anomalies qui demeurent un handicap devant la vulgarisation de leurs utilisations. Surtout dans le domaine de Génie Civil. A cet effet, différents types de fibres sont utilisées dans les matériaux de constructions afin de remédier à certaines anomalies, dans le but d'une amélioration des performances mécaniques et rhéologiques de ces derniers.[16]

2. Différent nature de fibre

Les fibres sont classées selon leur origine (naturelle, synthétique ou artificielle), leur forme (droite, ondulée, aiguille, ...etc.), leur dimension (macro ou microfibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Les principales fibres utilisées sont.

2.1. Fibres minérales

Elles regroupent plusieurs sortes de fibres (amiante, alumine.....etc.), et sont utilisées en grande quantité dans plusieurs applications traditionnelles. Les fibres d'amiante autrefois utilisées pour l'isolation et l'ignifugea, se sont aujourd'hui révélées cancérogènes.

2.2. Fibres végétales

La principale fibre végétale est la cellulose qui résiste aux alcalis. Les fibres végétales résistent aussi à la plupart des acides organiques mais sont détruites par les acides minéraux forts. Il existe quatre sortes de fibres végétales: les fibres provenant des poils, les fibres du liber, et les fibres extraites des troncs de certaines graminées. Elles sont souvent utilisées dans la fabrication du papier et dans les panneaux de construction (fibres de bois).

2.3. Fibres synthétiques

Cette famille regroupe plusieurs types de fibres comme (nylon, polypropylène, acryle, polyester ...etc.). Elles sont apparues à la fin du XIX^{ème} siècle sous le nom de rayonne.

Elles sont dérivées de la cellulose naturelle. Ajouré 'hui, la plupart des fibres synthétiques

proviennent de produits dérivés du pétrole et de polymères géantes dont la structure ressemble à celle des matières plastiques. La première fibre plastique

Commercialisée avec succès, le Nylon, daté de 1938. Depuis, de nombreux synthétiques, dont les fibres acryliques, l'aramide, l'oléfine et le polystyrène sont apparus. Ces fibres ont également été étudiées à des fins industrielles très précises, telles que la fabrication des matériaux d'isolation, tissus pare-balles, les fuselages et ailes d'avion.[17]

2.4. Fibres artificielles

Ce type de fibres est le plus utilisé dans le domaine industriel en général et dans le domaine de génie civil en particulier. Il regroupe les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres d'acier et d'autres. Elles sont aujourd'hui les plus répandues dans l'industrie de la construction. Ci-après nous allons présenter les principales fibres utilisées pour renforcer les mortiers et bétons

2.5. Fibres d'amiante

Ces fibres sont considérées comme les renforcements les plus anciens des matrices cimentaires et aussi pour la confection de tissus résistants aux feux. Elles sont en fait des bûchettes de micro- fibres extrêmement fines, difficilement fusibles (vers 1500°C) et ont l'avantage d'être inattaquables par les ciments. Elles possèdent une excellente tenue au feu, une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité élevé. Elles sont aussi plus résistantes aux agressions chimiques et aux micro-organismes, ainsi que leur résistance électrique élevée. Les fibres d'amiante sont utilisées dans les applications suivantes: voiles, tuyaux, panneaux, matériaux d'isolation thermique et protection contre le feu, tuyaux d'égout, plaques de toitures plates et ondulées, revêtements de mur.

2.5. Fibres de cellulose

Ces fibres sont considérées comme les renforcements les plus anciens des matrices cimentaires et aussi pour la confection de tissus résistants aux feux. Elles sont en fait des bûchettes de micro- fibres extrêmement fines, difficilement fusibles (vers 1500°C) et ont l'avantage d'être inattaquables par les ciments. Elles possèdent une excellente tenue au feu, une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité élevé. Elles sont aussi plus résistantes aux agressions chimiques et aux micro-organismes, ainsi que leur résistance électrique élevée. Les fibres d'amiante sont utilisées dans les applications

suivantes: voiles, tuyaux, panneaux, matériaux d'isolation thermique et protection contre le feu, tuyaux d'égout, plaques de toitures plates et ondulées, revêtements de mur.

2.6. Les fibres de cellulose

Sont obtenues à partir du bois par différents processus chimiques et mécaniques. Elles étaient utilisées pendant des années comme un additif au ciment d'amiante et non pas comme un renfort. Aujourd'hui, elles sont utilisées principalement pour renforcer les matrices organiques et aussi des matrices cimentaires destinées à la fabrication des plaques minces, des pipes, et d'autres types d'éléments. Leurs propriétés physiques sont changeables selon les modes de fabrication de ce type de fibres. Les diamètres de ces fibres varient de 1 à 4 mm, tandis que leurs longueurs comprises entre 10 à 50 mm, alors que l'élanement peut être dans les environs de 100. Leurs résistances en traction varient entre 10 et 30 MPa. Elles sont très efficaces dans l'amélioration de la résistance mécanique d'un composite. Cette amélioration est réalisée essentiellement par le freinage des fissures.

2.7. Fibres de polypropylènes

Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfines. Il est fabriqué depuis 1954 pour l'industrie textile. Il a connu une extension croissante dans ce domaine où il apporte les avantages suivants: bonne résistance à la traction qui peut atteindre 800 MPa, déformabilité élevée. Ces fibres sont obtenues suivant le processus d'extrusion, étirage qui confère une orientation prépondérante aux molécules et qui engendre des propriétés mécaniques élevées. L'ajout de fibres de polypropylène au mortier et au béton remonte à 1960 mais ce n'est qu'à partir de 1967 qu'apparaissent des réalisations intéressantes notamment en Grande Bretagne. Ces fibres sont utilisées dans les bâtiments pour l'élaboration de panneaux décoratifs, ainsi que l'élaboration de revêtement de façades dans plusieurs constructions et aussi dans la réalisation des canalisations et des pieux.

2.8. Fibres de verre

Ces fibres sont fabriquées à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet Joule, qui comporte 50 à 800 trous d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100 μm . Elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines (découpage à la demande) ou sous forme de morceaux prédécoupés de 3, 6, 12, et 50 mm de long. Ils sont regroupés en trois types : La fibre de verre classique (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et la fibre de verre au borosilicate.

Ces fibres sont généralement caractérisées par les propriétés suivantes :

- bonne adhérence avec la matrice,
- disponibilité sous toutes les formes (coupées, continues ...),
- bonne résistance à l'humidité et à la corrosion,
- conductivity thermique relativement faible

2.9. Fibres métalliques

Ce type de fibres, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, a été et reste encore l'objet de recherches très importantes dans le monde. On se limite aux fibres d'acier qui sont sans doute les plus utilisées dans le domaine du génie civil. En effet, les propriétés mécaniques du béton renforcé par ces fibres sont influencées par la résistance d'adhésion interfaciale entre fibre et matrice. Les fabricants des fibres d'acier ont essayé par tous les moyens d'améliorer l'adhérence en jouant sur l'irrégularité de la surface de la fibre, ce qui les conduit aux nombreuses variétés de fibres qui se différencient les unes des autres par leur diamètre, leur section (ronde, carrée, rectangulaire), leur longueur et leurs modes d'opération. Les diamètres des fibres d'acier varient généralement entre 0.1 et 0.7 mm, avec des longueurs de 10 à 70 mm.

2.9.1. Connaissance du matériaux

Le béton renforcé de fibres métalliques (BRFM) est un matériau composite dont les propriétés mécaniques résultent de la combinaison des propriétés du béton, des fibres et de l'interface entre les matériaux. permettrait d'augmenter la résistance au feu (par limitation des ouvertures des fissauration protègent les armatures traditionnelles).

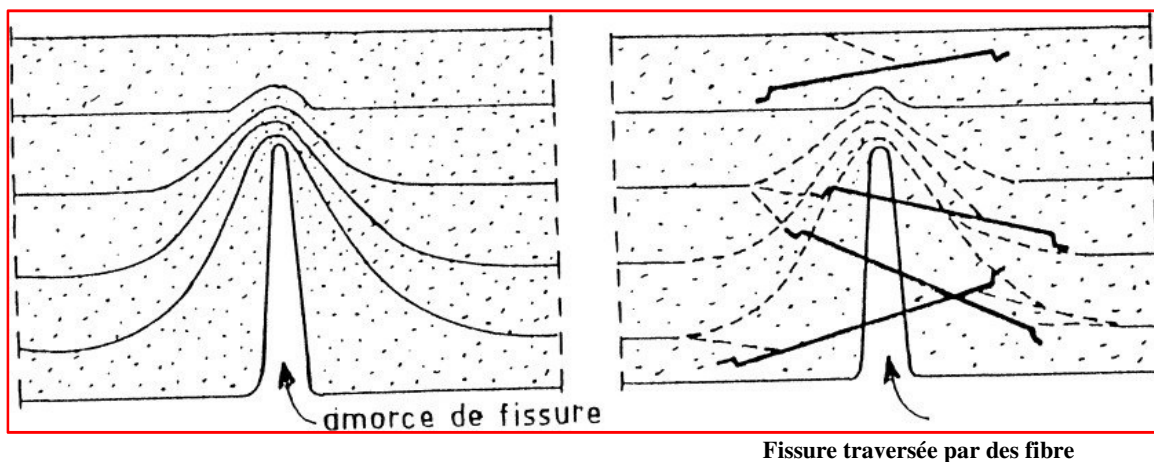


Figure IV.1 : Rôle des fibres dans la matrice de béton [17]



Figure IV.2: Fissuration dans le béton sans et avec fibres[17]

Il est à noter que le rôle principal des fibres dans un matériau peut-être lié à deux points essentiels:

- le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service
- la transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes voir figure 4 -3.

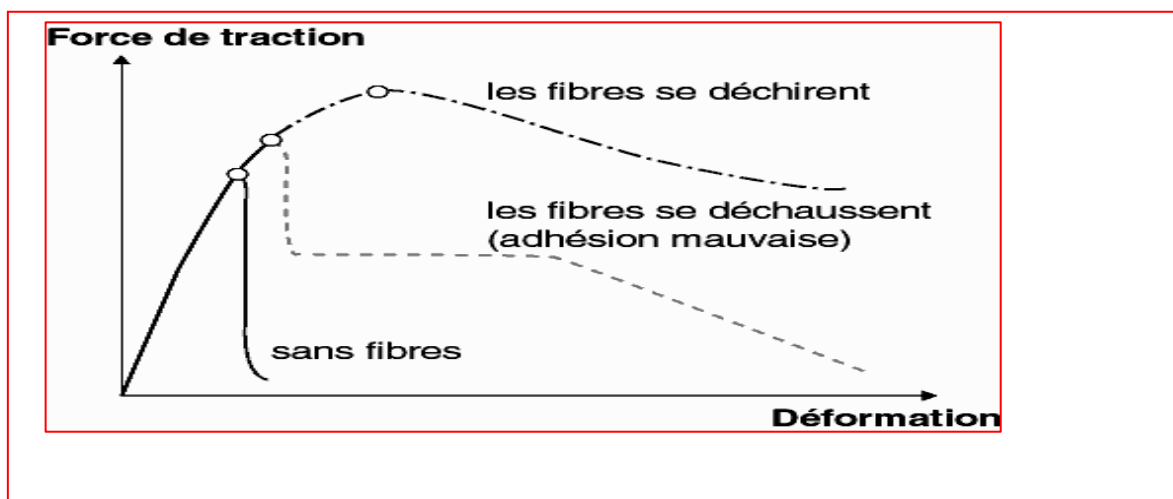


Figure IV.3: comportement de charge -déformation de béton avec fibres et béton sans fibres.[17]

a) Forme de la fibre d'acier

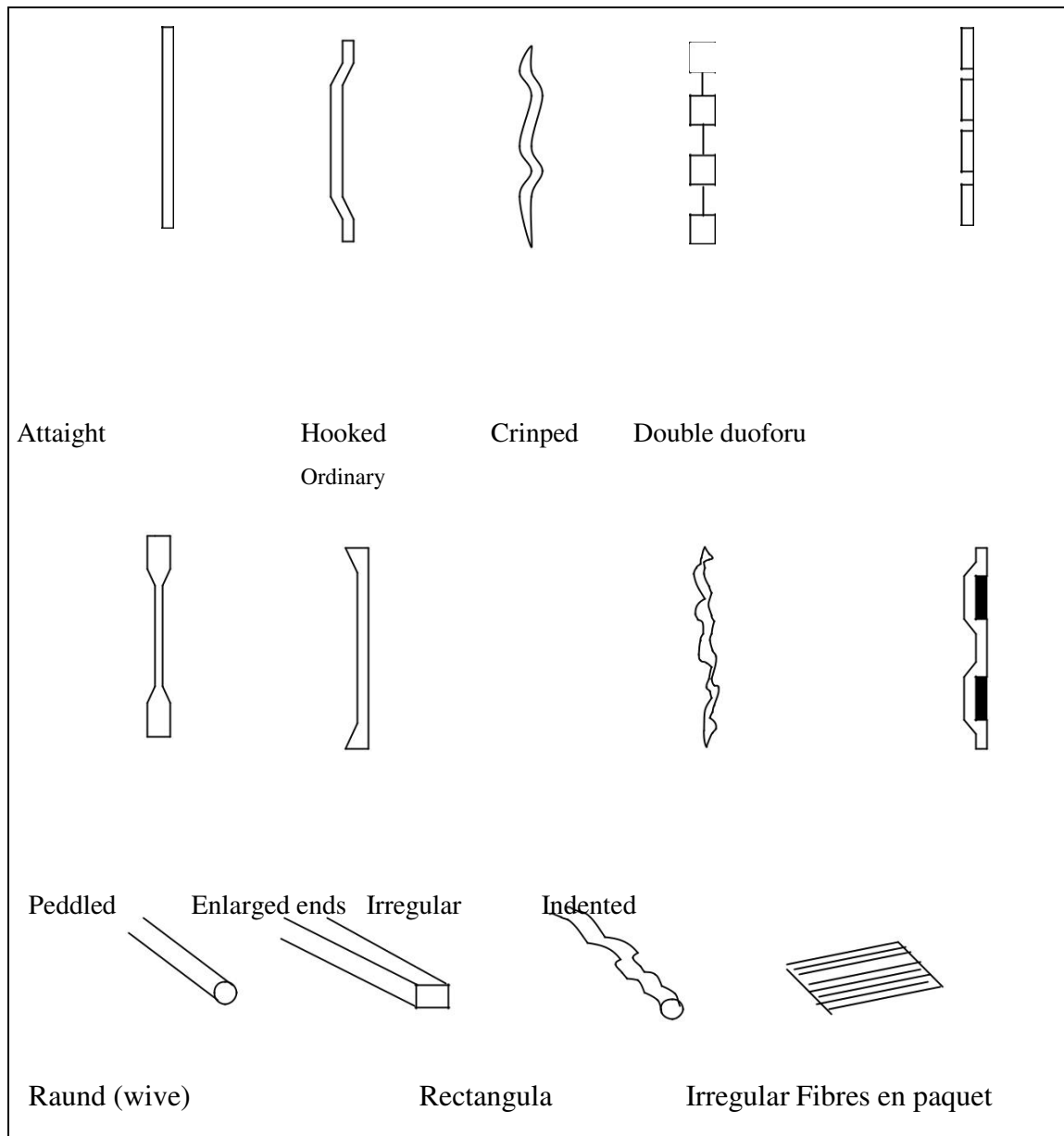


Figure IV.4 : Les fibres métalliques, (formes et dimensions variables) [16]

b) Section transversale de la section d'acier

Pour des usages particuliers, certaines fibres utilisées sont inoxydables ou traitées contre la corrosion. Leur principal avantage est une amélioration de la résistance à la traction et à la flexion, une augmentation de la ductilité donc une bonne tenue aux chocs ainsi qu'à l'usure.

De ces avantages découlent les principaux domaines d'utilisation : en particulier les dallages industriels, les ouvrages coulés en place tels que les pieux, piste d'aéroport, revêtement de tunnel, soutènement; ces deux dernières applications font appel à la

technique des bétons projetés, les voussoirs de tunnel préfabriqués sur site, les produits en béton manufacturé tels que pannes, panneaux de façade, pré cadre de baies.

La recherche de l'adhérence et d'une bonne compatibilité avec le béton a donné naissance à une grande variété de fibres métalliques susceptibles, par leurs formes ou leurs états de surfaces de mieux s'ancrer dans le béton. a ce propos nous citons les fibres métalliques les plus utilisées.

2.9.2. Les fibres Fibraflex (fibres de fonte amorphe)

Elles se présentent sous forme de rubans métalliques de 5 à 30 mm de longueur, de 1.6 mm de largeur et de quelques microns d'épaisseur. De part sa souplesse elles sont facilement incorporées dans le béton, que l'on peut ensuite couler, pomper ou projeter sans problème. Par la présence de chrome dans l'alliage donne à Fibraflex une grande résistance à la corrosion; elles présentent aussi une résistance à la traction remarquable qui est supérieure ou égale à 1400 (MPa).

2.9.3. Les fibres Harex

La fibre Harex a été spécialement conçue pour une utilisation en armatures de chapes. Ce type de fibre optimise la qualité et l'ouvrabilité des chapes. Celle-ci est obtenue par fraisage. Les copeaux produits légèrement enroulés sur eux même, possèdent une résistance à la traction d'environ 700 (MPa)

2.9.4. Les fibres Bekaert de chez Dramix

Tableau IV. 1 : Caractéristiques physiques et mécaniques de la fibre Bekaret [16]

Fibre	Diamètre en (mm)	Longueur en (mm)	Résistance à la traction en (MPa)
Bekaret de chez Dramix	0.4 – 0.8	25 – 60	1100

Ces fibres en acier tréfilé sont fabriquées par Bekaert; elles se présentent sous forme de plaquettes encollées, ce qui facilite l'introduction dans le béton et évite la formation d'oursin (la colle se dissout dans l'eau de gâchage). Le crochet développe progressivement un ancrage puis dissipe de l'énergie par plastification de celui-ci ainsi que par frottement à l'interface avec la matrice Les plus courtes sont utilisées essentiellement en béton projeté. Le tableau IV.1) donne les Caractéristiques physiques et mécaniques de la fibre Bekaret.

présenter une adhérence exceptionnelle dans le béton;

-ne modifie pas les caractéristiques rhéologiques du béton;

-s'oriente dans le sens de la taloche de façon à ne pas apparaître en surface du béton. Le tableau (IV.2.), présente les caractéristiques physiques et mécaniques de la fibre Novatex

Tableaux IV .2 :caractéristiques physiques et mécaniques de la fibre Novatex [16]

Fibre	Diamètre en (mm)	Longueur en (mm)	Résistance à la traction en (MPa)
Novatex	0.7	30	1150

2.9.7.Les fibres Ruban en fonte amorphe de Pont –à- Mousson

Les fibres ruban en fonte amorphe sont obtenues par refroidissement brutal, cette trempe crée une structure vitreuse qui est en partie à l'origine de sa résistance à la corrosion.

La mise en œuvre de ces fibres ne possède pas de problème particulier quant au béton coulé sur place pourvu que les dosages restent inférieurs à 0.75%. Par contre on peut introduire jusqu'à 1% de fibres dans un béton de sable. Mais il faut savoir que l'une de leur caractéristique importante est leur grande résistance à la corrosion [17]

Le tableau (IV.3), illustre les caractéristiques physiques et mécaniques du ruban en fonte. A.

Tableau 4.3. caractéristiques physiques et mécaniques du ruban en fonte. A [17]

Fibre	Longueur en (mm)	Résistance à la traction en (MPa)
Ruban en fonte amorphe	15 – 30 – 45 – 60	200

2.9.8. Autres fibres

Le besoin d'atteindre des performances techniques élevées fait que la recherche pour trouver et utiliser des fibres de nature et de formes variées ne cesse de se développer. En effet, un grand nombre de fibres peuvent être employées dans le renforcement des Matériaux de construction, qu'elles soient animales, végétales ou minérales. Parmi cela nous pouvons citer les fibres céramiques qui ont connu beaucoup d'applications industrielles sous différentes formes. Elles ont trouvé un très grand succès surtout dans le domaine de la construction des fours et équipements auxiliaires

3. Conclusion.

Selon ce que on cherche, la nature des fibres utilisées est en relation avec les applications et les modes de mise en œuvre ; le choix des fibres dépend du rôle que l'on désire leur faire jouer. Toutefois, pour un rôle structural de contrainte importante, l'utilisation d'une fibre de caractéristiques mécaniques élevées pour renforcer les matériaux de constructions est inévitable. après un siècle d'études, les chercheurs s'accordent à dire que les fibres doivent être :

- compatible avec la matrice.
- rugueuses, pour permettre une bonne adhérence.
- d'un prix abordable, compte tenu des dosages à employer[16]

1. Introduction

Ce chapitre résume la caractérisation des matériaux utilisés dans notre travail, les différents essais physico-mécaniques réalisés sur les matériaux utilisés pour la fabrication du mortier (Sables, Ciment, Eau de gâchage, ajouts (métakaolin et bentonite calciné) adjuvant ,fibre) et les différents essais réalisés sur mortier à l'état frais (essais d'étalement au cône, masse volumique ,ouvrabilité) et durci tel que les propriétés mécaniques (Résistance à la compression et résistance à la flexion).

Notre travail est effectué au niveau de CETIM ; le travail est divisé en trois étapes :

Pour atteindre l'objectifs de notre étude nous avons divisez notre travail en quatre étapes comme suit :

En premier lieu, on a procédé à la caractérisation de tous les matériaux utilisés à savoir

- Le ciment (CRS d'ain kbira)
- Le sable (OUED SOUF)
- Ajouts (métakaolin et bentonite calciné)
- Fibre metallique
- Eau de gachage

La deuxième partie est consacrée à la formulation de différentes compositions de mortier. En outre, un mortier témoin est élaboré selon la norme NF EN 196 afin d'effectuer une comparaison en matière de performances mécaniques avec les différents formulations

La troisième partie consiste à une étude rhéologique sur la pâte cimentaire avec les mêmes superplastifiants à des dosages variables afin de déterminer leurs dosages à saturation et distinguer le mode d'écoulement et faire le lien avec les dosages utilisés dans les motrier

La quatrième partie est consacrée aux résultats et interprétations des caractérisations rhéologiques (à l'état frais) et physico mécaniques (à l'état durci) des mortiers réalisés.

2. Caractérisations des matériaux utilisés

Avant d'entamer une formulation, il convient de connaître les caractéristiques des matériaux qui seront employés à cet effet par le biais d'essais normalisés au laboratoire

2.1. Le ciment AIN KBIRA SETIF

Selon la norme EN 196-6. Le ciment analysé est un ciment portland résistant aux sulfates, dont les caractéristiques physico mécaniques et chimiques satisfont aux exigences des ciments CEM I 52.5 N SR3 selon norme en vigueur, les caractéristiques de ce dernier sont représentées par suivre :

2.1.1. Les essais physiques

Les caractéristiques physiques de ce ciment sont présentées dans le tableau ci-après

Tableau 1: Caractéristiques physiques

Caractéristiques	Détaille	résultats	Unités	normes
Consistance normale	23.1		%	
Délai de prise	Début de prise	170	Min	NA 230
	Fin de prise	410	Min	NA 230
Surface spécifique (SSB)		3613	Cm ² /g	NA 230
Masse volumique		3.13	Kg/m ³	

2.1.2. Les essais mécaniques

Le tableau suivant représente la résistance mécanique à la flexion et à la compression d'un mortier normalisé conformément à la norme EN P 196-1.

Tableau 2 : Caractéristiques mécaniques.

Resistance (Mpa)	Age (jours)			Normes
	2j	7j	28j	
Compression	14.1	30.0	52.8	
Flexion	3.3	5.6	8.2	

2.1.3. Les essais chimiques

L'analyse thermique gravimétrique permet de déterminer qualitativement et quantitativement les compositions des oxydes contentent dans le ciment y compris la fraction des parties au feu, comme indique le tableau suivant :

Tableau 3: Composition chimique du ciment

Composition Chimique	Teneur %
SiO ₂	22.00
Al ₂ O ₃	4.57
Fe ₂ O ₃	5.13
CaO	62.21
MgO	3.30
K ₂ O	0.41
Na ₂ O	0.05
SO ₃	0.97
CaO libre	1.138
Cl ⁻	< 0.01
Ins.	0.71
P.F	1.000

2.1.4. Les essais minéralogiques

A partir de microscope optique polarisé, la détermination des différentes phases minéralogiques s'effectue par la différence de coloration entre les composants de clinker, à partir des calculs de surface de chaque phase cristalline, on peut déterminer la teneur de chacun de ces derniers, comme indique le tableau 4.

Tableau 4: Composition minéralogiques

Phase	Constituants minéraux du Clinker	Teneur rapportée au Clinker (%)
Clinker	C ₃ S	46
	C ₂ S	28
	C ₃ A	03
	C ₄ AF	16
	CaO _L	01
Régulateur de prise	Gypse	05

2. 2. Le sable

Le sable que nous avons utilisé pour notre mortier provient de oued souf , avec distribution granulometrique varie entre 0.063mm et 4mm

2.2.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique traduit la distribution pondérale des grains par classe granulaire définit deux dimension d'ouverture de mailles carrées avec des teneurs déterminées de tamisât et de refus



Figure 1 : L'essai d'analyse granulométrique.

L'essai a été réalisé selon les modalités de la norme EN- NF 933-2 , les résultats d'analyse granulométrique de sable sont récapitulés dans le tableau

Tableau .5 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable

Masse sèche totale : $M_1= 636$ g Masse sèche après lavage : $M_2= 631$ g		Masse sèche des fines retirées par lavage : $M_1-M_2= 5$ g		
Ouverture des tamis (mm)	Poids (g)	Teneurs (%)		Module de finesse (%)
	Refus cumulés (Ri)	Refus cumulés	Tamisât cumulés	
6.3	00	00	100	
5	5	0.78	99.22	

4	9	1.41	98.59	2.56
3.15	13	2.04	97.96	
2.5	20	3.14	96.86	
2	29	4.55	95.45	
1.25	73	11.47	88.53	
1	106	16.66	83.34	
0.63	242	38.05	61.95	
0.5	329	51.72	48.28	
0.315	491	77.20	22.80	
0.250	540	84.90	15.1	
0.125	619	97.32	2.68	
0.08	629	98.89	1.11	
0.063	630	99.05	0.95	
Fond de tamis	631	99.21	0.79	

Tableau. 6 : caractéristiques physiques.

Caractéristique	Symbole	Sable (0/4)
Masse volumique absolue (g/cm³)	P _S	2.67
Teneur en eau (%)	W	0.46
L'absorption d'eau (%)	A _s	1.68

2.2. Caractéristiques physiques du sable

2.2.1. Module de finesse

Le module de finesse MF est défini comme étant la somme des pourcentages ramenés à l'unité des refus cumulés L'essai a été réalisé selon les modalités de la norme EN-NF 933-8.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 6.

2.2.2. Propreté

L'essai d'équivalent de sable, permet seulement de mesurer la propreté d'un sable, la valeur de l'équivalent de sable ES est le rapport multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse

sédimentée par la hauteur totale du flocculat et de la partie sableuse sédimentée. L'essai à été réalisé selon les modalités de la norme EN-NF 933-8



Figure 2: L'essai d'équivalent de sable

2.2.3. L'essai au bleu de méthylène

L'essai au bleu de méthylène à été réalisé selon les modalités de la norme EN-NF 933-9. Cet essai permet d'apprécier globalement l'activité de la fraction argileuse contenant dans le sable.

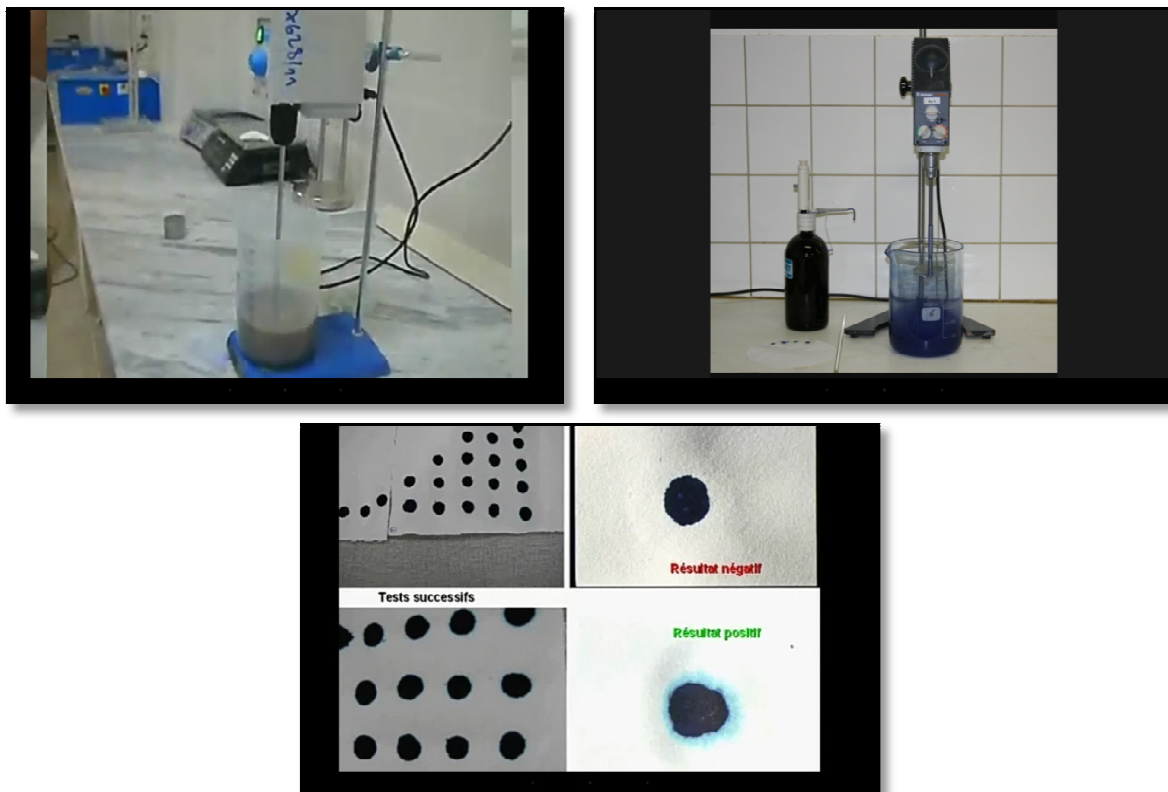


Figure 3 : L'essai au bleu de méthylène

Voilà le prochain tableau représente les caractéristiques physiques du sable utilisé

Tableau. 7 : Caractéristiques physiques du sable (0/4).

Caractéristiques	Symbole	Résultats
Module de finesse	M_f	2.56
Equivalent de sable (%)	ESV	83
	ESP	81
Valeur Bleu de méthylène (g/kg)	V_B	0.5

3. L'eau de gâchage

Pratiquement, on peut utiliser toute les eaux naturelles potables n'ayant pas une odeur ou un goût. Pour les essais sur le mortier on a utilisé l'eau potable de la ville de Boumerdès.

4. L'adjuvant

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au mortier frais en faible quantité (inférieur à 5 %). Ils améliorent les propriétés physico-mécaniques des mortiers auxquels ils sont ajoutés.

Au cours de la préparation de notre mortier, on a incorporé un Super plastifiant haut réducteur d'eau de la nouvelle génération dit «MEDAFLOW 145 », conforme à la norme NF EN 934-2, fabriqué par GRANITEX Il est conçu à base de poly carboxylate d'éther modifiés, et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un long maintien d'ouvrabilité.

Le MEDAFLOW 145 permet d'obtenir des béton et mortiers de très haute qualité

La fiche technique de ce produite, fourni par le fabricant, donne les caractéristiques générales suivantes :

- ⊕ Forme Liquide
- ⊕ Couleur brai clair
- ⊕ pH 5-6
- ⊕ Densité $1,065 \pm 0,015$
- ⊕ Teneur en chlore $\leq 1\text{g/l}$.
- ⊕ Extrait sec $30 \pm 1.5\%$



Figure 4 : MEDAFLOW 145

La fourchette de dosage recommandée est de 0,2 à 3,0 % du poids de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé par URMPE en fonction du type de ciment et des effets recherchés.

5. Les fibres

Les fibres utilisées sont de types métalliques sous forme géométrique accroché, leur caractérisation a été établie par la fiche technique de la société.



Figure 5 : Caractérisation des fibres.

Le tableau suivant présente les résultats des caractérisations effectuées.

Tableau 8 : Caractéristiques des fibres

Type	Accrochée	
Diamètre	0.55	mm
Longueur	30	mm

6. Les argiles :

Les argiles utilisées sont de types bentonite calcine et métakaolin.

6.1 Bentonite



Figure 6 : bentonite

Tableau 9 : composition chimique de bentonite

Analyses	Etat du calibrage	Formulation du composé	Concentration(%)	Méthode de calcul
Mn	Trace	MnO	0,010	Fixe
Zn	Trace	ZrO ₂	0;010	Fixe
Nb	Trace	Nb ₂ O ₅	0,010	Fixe
Na	Caliber	Na ₂ O	1,857	Calculé
Mg	Caliber	MgO	1,659	Calculé
Al	Caliber	Al ₂ O ₃	18,100	Calculé
Si	Caliber	SiO ₂	57,378	Calculé
S	Caliber	SO ₃	0,477	Calculé
K	Caliber	K ₂ O ₃	1,713	Calculé
Ca	Caliber	CaO	1,796	Calculé
Fe	Caliber	Fe ₂ O ₃	3,267	Calculé
Rb	Caliber	Rb ₂ O	0,244	Calculé
Cl	Caliber	Cl	0,698	Calculé

6.2 Bentonite calcinée



Figure 7 : bentonite calcinée

Tableau 10 : composition chimique effectuées par fluorescence X de bentonite calcinée

Analyses	Etat du calibrage	Formulation du composé	Concentration (%)	Méthode de calcul
Mn	Trace	MnO	0,010	Fixe
Zn	Trace	ZrO2	0;010	Fixe
Nb	Trace	Nb2O5	0,010	Fixe
Na	Caliber	Na2O	1,499	Calculé
Mg	Caliber	MgO	1,812	Calculé
Al	Caliber	Al2O3	19,399	Calculé
Si	Caliber	SiO2	64,231	Calculé
S	Caliber	SO3	0,705	Calculé
K	Caliber	K2O3	2,525	Calculé
Ca	Caliber	CaO	3,796	Calculé
Ti	Caliber	TiO2	0,426	Calculé
Fe	Caliber	Fe2O3	5,194	Calculé
Rb	Caliber	Rb2O	0,414	Calculé
Cl	caliber	Cl	0,391	Calculé

6.3. Kaolin



Figure 8 : kaolin

Tableau 11 : composition chimique de kaolin

Analyses	Etat du calibrage	Formulation du composé	Concentration (%)	Méthode de calcul
Mn	Trace	MnO	0,010	Fixe
Zn	Trace	ZrO ₂	0;010	Fixe
Nb	Trace	Nb ₂ O ₅	0,010	Fixe
Na	Caliber	Na ₂ O	0,010	Calculé
Mg	Caliber	MgO	0,281	Calculé
Al	Caliber	Al ₂ O ₃	34,644	Calculé
Si	Caliber	SiO ₂	44,410	Calculé
S	Caliber	SO ₃	0,166	Calculé
K	Caliber	K ₂ O ₃	0,374	Calculé
Ca	Caliber	CaO	2,703	Calculé
Ti	Caliber	TiO ₂	1,485	Calculé
Fe	Caliber	Fe ₂ O ₃	0,284	Calculé
Rb	Caliber	Rb ₂ O	3,147	Calculé
Cl	caliber	Cl	0,361	Calculé

6.4. Métakaolin



Figure 9 : métakaolin

Tableau 12 : composition chimique de métakaolin

Analyses	Etat du calibrage	Formulation du composé	Concentration (%)	Méthode de calcul
Mn	Trace	MnO	0,010	Fixe
Zn	Trace	ZrO ₂	0,010	Fixe
Nb	Trace	Nb ₂ O ₅	0,010	Fixe
Na	Caliber	Na ₂ O	0,010	Calculé
MgO	Caliber	MgO	0,281	Calculé
Al	Caliber	Al ₂ O ₃	35,644	Calculé
Si	Caliber	SiO ₂	55,610	Calculé
S	Caliber	SO ₃	0,166	Calculé
K	Caliber	K ₂ O ₃	0,374	Calculé
Ca	Caliber	CaO	1,703	Calculé
Ti	Caliber	TiO ₂	1,485	Calculé
Fe	Caliber	Fe ₂ O ₃	2,284	Calculé
Rb	Caliber	Rb ₂ O	3,147	Calculé

6.5. Composition minéralogique

Tableau 1 3 : composition minéralogique

minéraux	kaolin	bentonite	Bentonite calcinée
Quartz	05	26	25
Albite		16	13
illite	22	25	22
Montmorillonite	–	04	14
Sépiolite	–	06	–
Orthoclase	–	10	–
Labradorite		10	21
Kaolinite	70	–	–
Minéraux	03	03	05
Ferrugineux	–		

7. Fumée de silice

Fumée de silice utilisée est une fumée de silice ultrafine obtenue lors de fabrication du silicium.

➤ Domaine d'application

- Béton a haute durabilité résistants en milieux agressifs.
- Milieu marin : digue, aménagement portuaire...
- Zone de montagne : présence d'eau pure ,gel dégel ou de sels de deverglage
- Béton a haute résistance (BHP BTHP...)

➤ Caractères généraux.

- améliore les performance a long terme : résistance en compression, flexion et traction.
- augmente le module d'élasticité.
- Réduit le fluage.
- Réduit le risque du ségrégation.
- Améliore la durabilité en milieux agressif.

3. Confection des éprouvettes

Le mortier est préparé selon la modalité de la norme NF P15-403, qui prend en considération une partie de liant ,argile et de trois parties de sable et d'une demi-partie d'eau (E/C = 0,50).

Cette norme fait l'objet d'une caractérisation mécanique à la flexion 3 point et à la compression simple, des éprouvettes présmatique 4x4x16, suivant ce protocole, nous avons confictionné

3.1. Les différentes étapes de confection

3.1.1. Pesée des constituants : La masse des constituants nécessaires aux essais est déterminée en fonction des éprouvettes à préparer ; elle pesée avec une précision de 0,5%. Dans le cas de la préparation de 3 éprouvettes 4x4x16 , les quantités sont respectivement les suivantes :

Sable	1350 g ;
Liant	450 g ;
Fumer de silice	3% par apport la quantité de ciment.
Eau	225 g (E/C = 0,50) .
Superplastifiant	1.% d'après le point du saturation .

N B :

La quantité des fibres est incorporées par apport au volume selon la méthode suivante

La quantité des argiles substitué à des teneur 8,10,12 et14%.

3.1.2. L'incorporation des fibres

L'incorporation des fibres en fraction volumique s' effectue selon le calcul suivant :
le dosage des fibres 0.5 ,1 % par apport au volume total du mélange.

N B :

La quantité des argiles est incorporées par apport au masse selon la méthode suivante

3.1.3. L'incorporation des argiles

L'incorporation des argiles en fraction massique s' effectue selon le calculsuivant :

Masse de ciment —————> 100%

X (Masse d'argile) —————> 8%

X = les dosages des argiles (8 ; 10 ; 12 et 14%) par apport au masse total du Ciment.

3.2. Malaxage d'un melange type

Le malaxage est effectué au moyen du malaxeur spécifié par la norme .Le malaxeur étant en position de fonctionnement :

- Mettre 225 ml d'eau ;
- Mettre 450 g (ciment +8 ;10 ;12 et14%) ;

- c) Malaxer pendant 30s à vitesse lente , introduire les fibres d'une manière aléatoire ; puis malaxer pendant 2 mn à vitesse rapide.
- d) Arrêter le mouvement avec le batteur démonter de son axe racler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune partie de mortier n'échappe au malaxage
- a) Après remontage du batteur reprendre le malaxage pendant 2 mn à vitesse rapide



Figure 10: le malaxage d'un mélange

3.3. Confection des éprouvettes

Les éprouvettes sont moulées au moyen de l'appareil à chocs (Tonitechnic conformément au mode opératoire suivant :

- a) Le malaxage étant terminé, forme une galette rectangulaire .
- b) La partager en 06 fractions égales, le moule ayant été fixé sur la table à chocs muni de sa hausse .
- c) Introduire dans chacun des 3 compartiments une fraction de la galette, égaliser la surface du mortier au moyen de la raclette maintenue verticale, déplacée dans un double aller et retour .
- d) Recommencer les mêmes opérations pour la deuxième couche après 60 nouveaux chocs.
- e) Le moule étant tiré de la machine et débarrassé de la hausse, araser le mortier avec l'arrête de la règle métallique plate, maintenue verticale et déplacée par un mouvement de scie de faible amplitude et sur la longueur des éprouvettes .
- f) Nous avons préparé 15 batteries de 3 éprouvettes « 4×4×16 » pour chaque âge (28 jours), Pour cela on eu besoin de :



Figure 11 : confecntion des éprouvettes

Pour une battrie de 3 éprouvettes	En total (15batteries)	
Sable (sec) :	1350 g	⇒ 20.350 kg
Liant (ciment) :		⇒6.126 kg
Eau :	225 ml	⇒ 3.375 litres
Fume de silice :	13.5 g	⇒ 202.5 g
Adjuvant :	4.5 g	⇒67.5 g
Bentonite :		⇒ 297.0 g.
Métakaolin :		⇒297.0g

Tableau 14 : Notation de différentes formulations.

DESIGNATION	TENEUR EN ARGILE %	NOTATION
1/ mortier témoin.	--	T
Mortier témoin fibré		T F
2/ mortier avec bentonite calciné et métakaolin	8	8%
	10	10%
	12	12%
	14	14%
Mortier fibré avec bentonite calcinée métakaolin	8	MF8%
	10	MF10
	12	MF12
	14	MF14%

Tableau 15 : La composition typique de chaque formulation.

Type	La masse des argiles (g)	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (g)
MT	/	450	1350	225
M8	36	414		
M10	45	404		
M12	54	396		
M14	63	387		

4. Caractérisation de mortier

4.1. L'état frais

Au cours de la préparation des mélanges, on a incorporé un Super plastifiant haut réducteur d'eau de la nouvelle génération dit MEDAFLOW 145 ».

4.1.1. Les essais rhéologiques

a) Courbe de viscosité

Le point de saturation du Super plastifiant est déterminé par le viscosimètre. On fait varier le dosage de Super plastifiant jusqu'à ce que le coulis ait un comportement presque newtonien, c'est-à-dire à une viscosité plastique constante en fonction du gradient de vitesse.

La détermination du point de saturation de notre ciment en Superplastifiant (MEDAFLOW 145), est réalisée à l'aide du viscosimètre VT550 qui est représenté dans la figure suivante

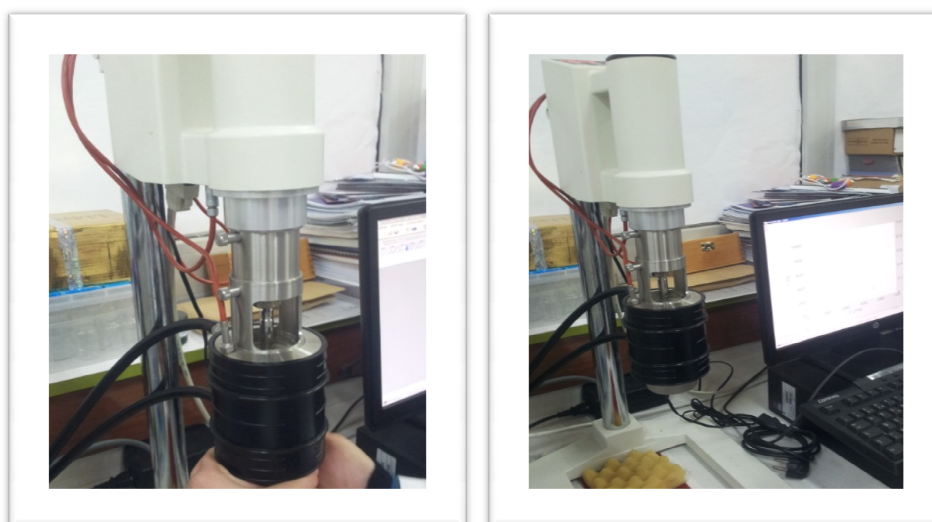


Figure 12: Viscosimètre VT550.

Les résultats évolution de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement sont représentés sur la courbe suivante :

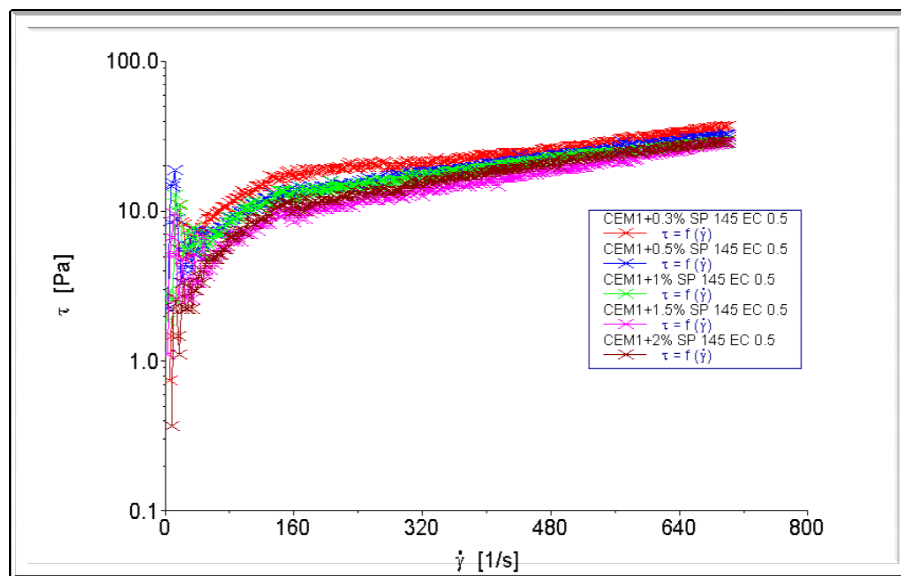


Figure 13 : Evolution de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement.

b). Courbe d'écoulement

Les résultats d'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement sont représentés dans la figure 14.

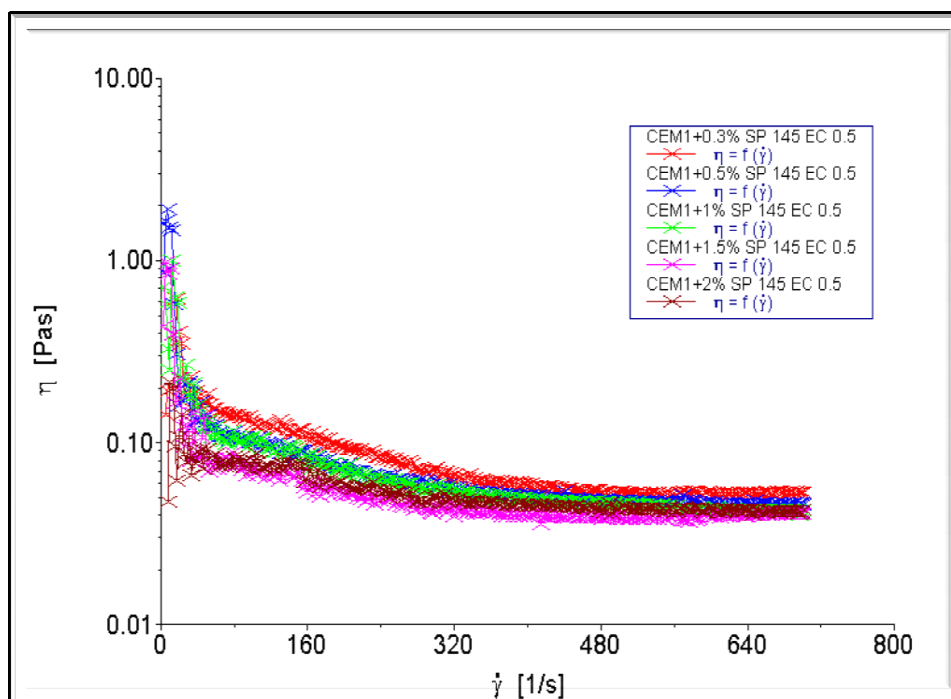


Figure 14 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement.

4.1. 2.L'étalement

L'essai au mini cône a pour but de mesurer le diamètre d'étalement d'un certain volume de mortier placé dans ce dernier sur une plaque en Plexiglas, et avec des caractéristiques

géométriques un diamètre supérieur de 19 mm, un diamètre inférieur de 38 mm et une hauteur de 57 mm



Figure 15 : essai d'étalement

Tableau 16 : étalements du mortier avec différents pourcentage d'argile sans fibres et avec fibres

Code	Etalement (cm)
Sans fibre	
T%	12.8
F8%	14
F10%	13.5
F12%	13.5
F14%	13
Fibres 0.5%	
T%	15
F8%	14.5
F10%	14.5
F12%	14
F14%	13
Fibres 1%	
T%	16
F8%	15.5
F10%	14.5
F12%	13.8
F14%	13.3

Ces résultats sont présentés graphiquement par l'historgramme suivant

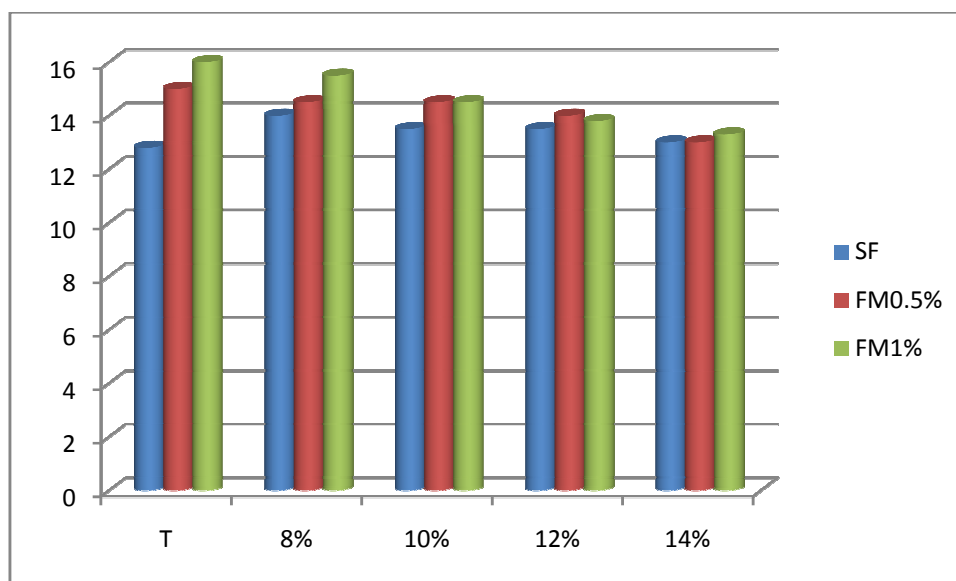


Figure 22 : L'étalement du mortier avec différentes teneurs d'argile

Commentaire

L'ajout de fibre influe négativement sur la fluidité du mortier cela est due à la forme longitudinal de fibre qui empêche l'étalement de mortier

4.1.3.La masse volumique

La masse volumique de mortier frais a été déterminée par la formule suivante :

$$\varphi = \frac{M}{V} \text{ (M est la masse de récipient et V son volume), les résultats sont inscrit dans le}$$

tableau 17.

Tableau 17 : Masse volumique du mortier avec différentes pourcentage d'argile

code	Masse volumique (kg /m3)
Sant fibre	
T%	2.13
F8%	2.10
F10%	2.08
F12%	2.03
F14%	2.02
Fibres 0.5%	
T%	2.20
F8%	2.19
F10%	2.15
F12%	2.12
F14%	2.09

Fibres 1 %	
T%	2.28
F8%	2.25
F10%	2.21
F12%	2.14
F14%	2.10

Les résultats sont représentés schématiquement sur l'histogramme de la figure suivante :

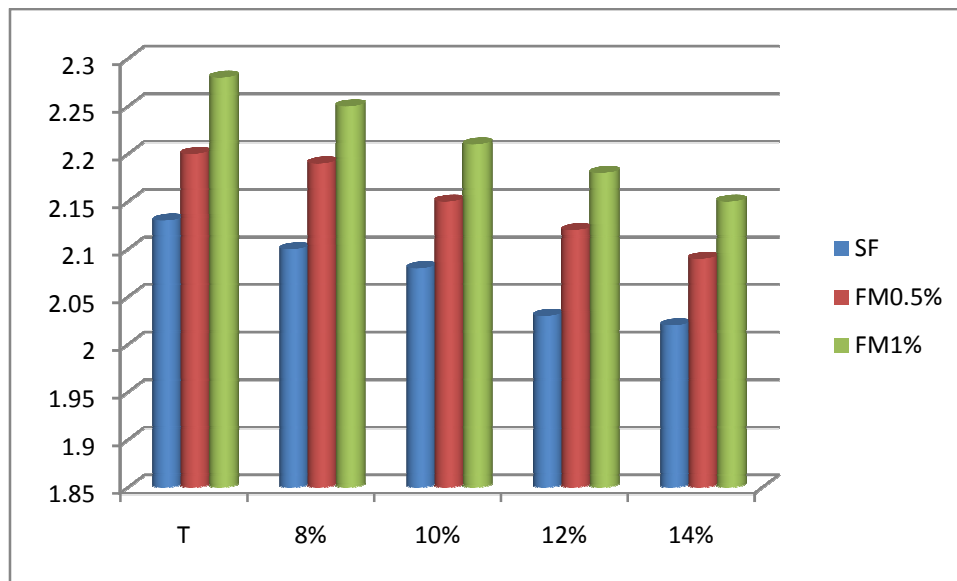


Figure 16: Masses volumiques du mortier avec différentes teneur d'argile

Commentaire :

La masse volumique diminue avec l'augmentation du pourcentage de argile (métakaolin , bentonite calcinée) sans fibres et avec fibres a cause de leur densité est inferieur que la densité de ciment et le fibre .

4.2. Résultats d'essais à l'état durci

4.2.1. La masse volumique

Tableau 18 : Masse volumique du mortier avec différentes pourcentage d'argile

code	Masse volumique (g/cm ³)
Sans fibre	
T%	2.22
F8%	2.20
F10%	2.19
F12%	2.19
F14%	2.12
Fibres 0.5%	
T%	2.24
F8%	2.21
F10%	2.20
F12%	2.20
F14%	2.19
Fibres 1%	
T%	2.30
F8%	2.28
F10%	2.26
F12%	2.24
F14%	2.20

Les résultats sont représentés schématiquement sur l'histogramme de la figure suivante :

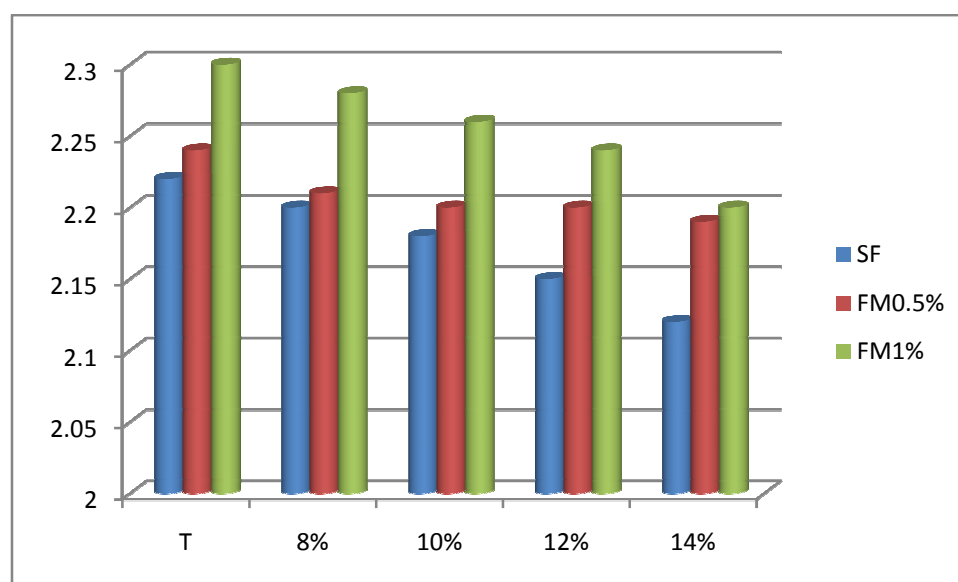


Figure 17: Masses volumiques du mortier avec différentes teneur d'argile sans fibres et avec fibres

4.2.2. Essais mécaniques

4.2.2.1. essai en flexion

Les essais les plus courants sont des essais de traction par flexion. Ils s'effectuent en général sur des éprouvettes prismatiques de côté a et de longueur $4a$, reposant sur deux appuis sous charge concentrée unique appliqué au milieu de l'éprouvette (moment maximal au centre)



Figure 18. Essai de traction par flexion.

Les résultats de la résistance mécanique en flexion des différents pourcentages de métakaolin et bentonite calcinée aux différents âges (7, 14, 28 jours) avec fibres et Sans fibres :

Tableau 19 .La Résistance à la flexion des différents types des mortiers 7 J (Mpa)

type	T	8%	10%	12%	14%
Sans fibres	5	4.7	4.7	4.6	4.6
Fibres 0.5%	5.5	5.1	4.9	4.8	4.7
Fibres 1%	6.2	5.5	5.2	5.0	4.9

Les résultats sont représentés schématiquement sur l'histogramme de la figure ci-dessous

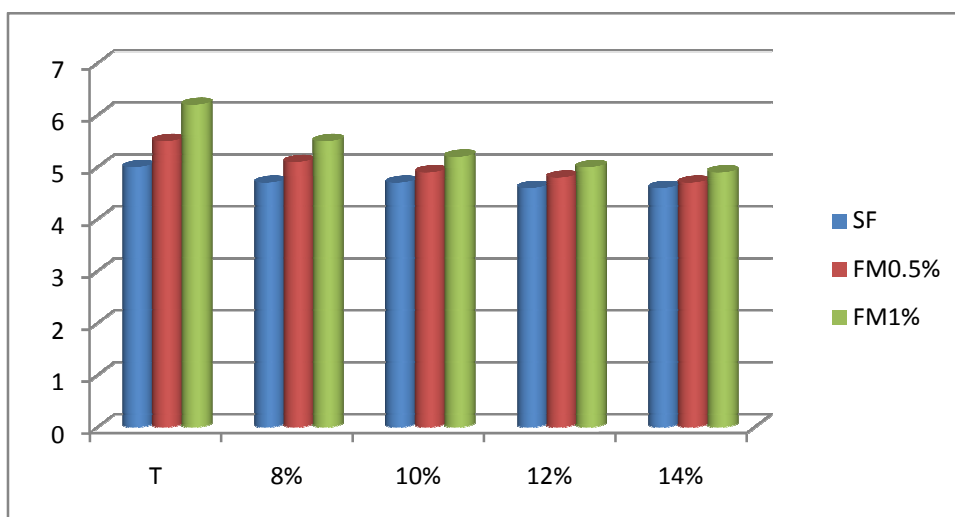


Figure 19 : Les valeurs obtenues de la résistance mécanique en flexion pour différents teneurs d'argile pour 7 j

Les résultats sont représentés graphiquement sous forme de courbes sur la figure ci-dessous

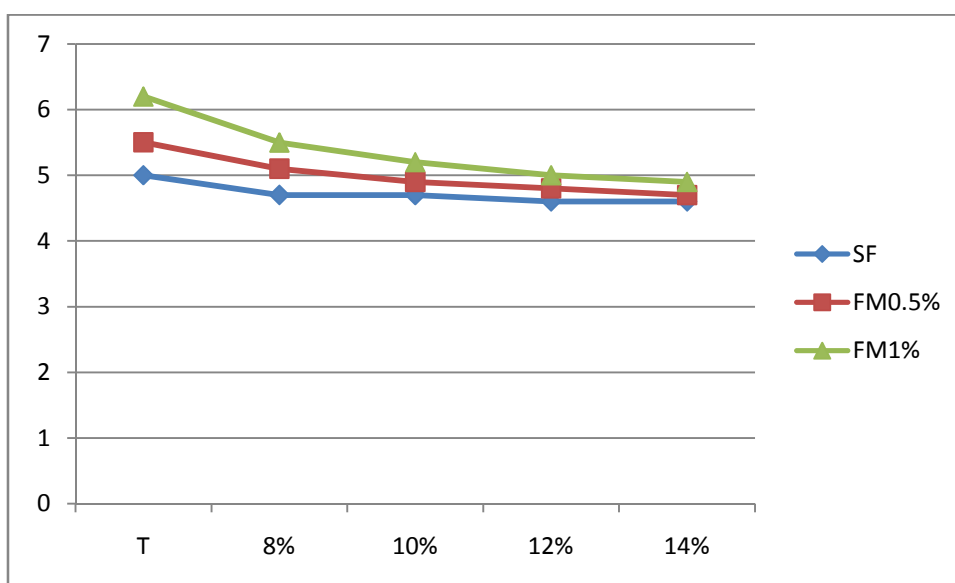


Figure 20 : Les résultats de la résistance mécanique à la flexion des différents pourcentage sans fibres et avec fibres7j.

Tableau 20.La Résistance à la flexion des différents types des mortiers 14 J (Mpa)

Type	T	8%	10%	12%	14%
Sans fibres	5.3	5.1	5.0	4.8	4.7
Fibres 0.5%	5.9	5.4	5.3	5	5.1
Fibres 1%	6.7	6.1	5.7	5.5	5.3

Ces valeurs présentées schématiquement sur l’histogramme de la figure suivante :

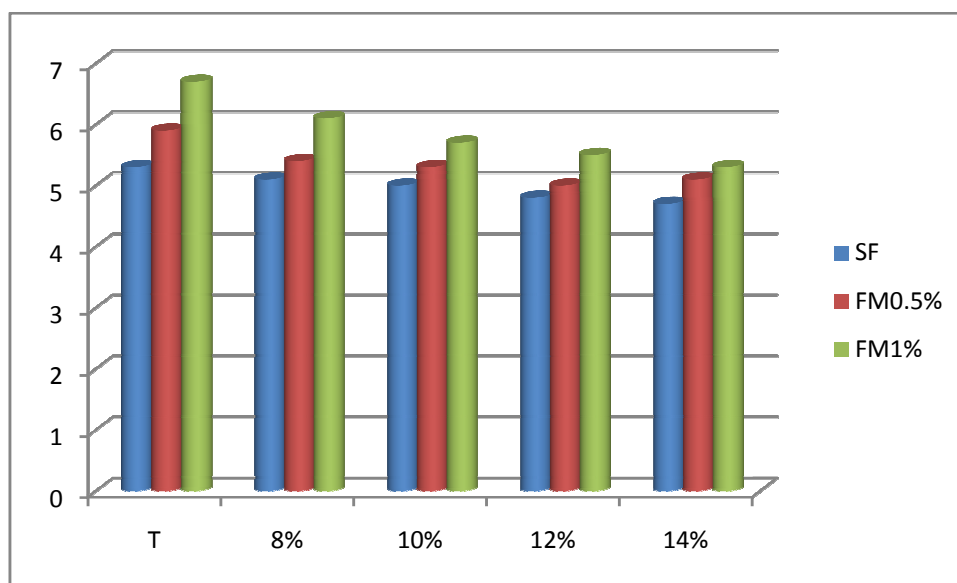


Figure 21 : Les valeurs obtenues de la résistance mécanique en flexion pour différents teneurs d'argile pour 14 j

Les résultats sont présentés graphiquement sous forme des courbes sur la figure ci- dessous :

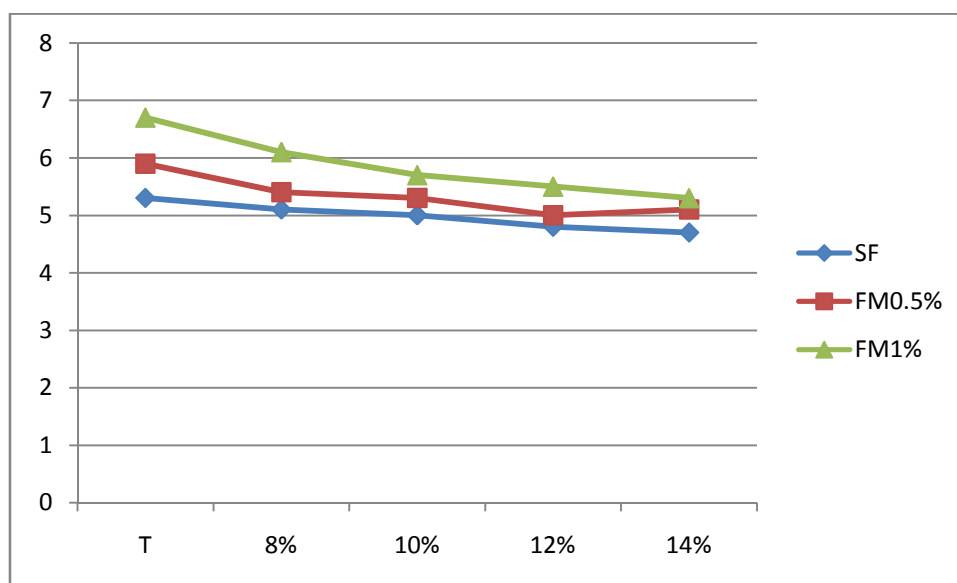


Figure 22 : Les résultats de la résistance mécanique à la flexion des différents pourcentage sans fibres et avec fibres 14j.

Tableau 21 .La Résistance à la flexion des différents types des mortiers 28J (Mpa)

Type	T	8%	10%	12%	14%
Sans fibres	5.8	5.5	5.7	5.4	5.3
Fibres 0.5%	6	5.9	5.8	5.5	5.3
Fibres 1%	7.0	6.8	6.1	5.7	5.6

Ces valeurs présentées schématiquement sur l’histogramme de la figure suivante :

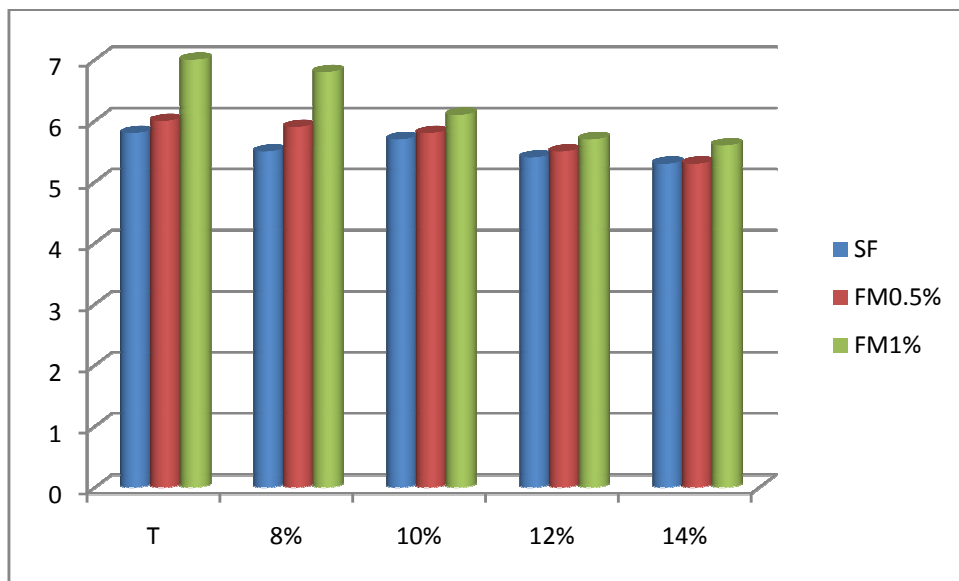


Figure 23 : Les valeurs obtenues de la résistance mécanique en flexion pour différents teneurs d’argile pour 28 j

Les résultats sont présentés graphiquement sous forme des courbes sur la figure ci- dessous :

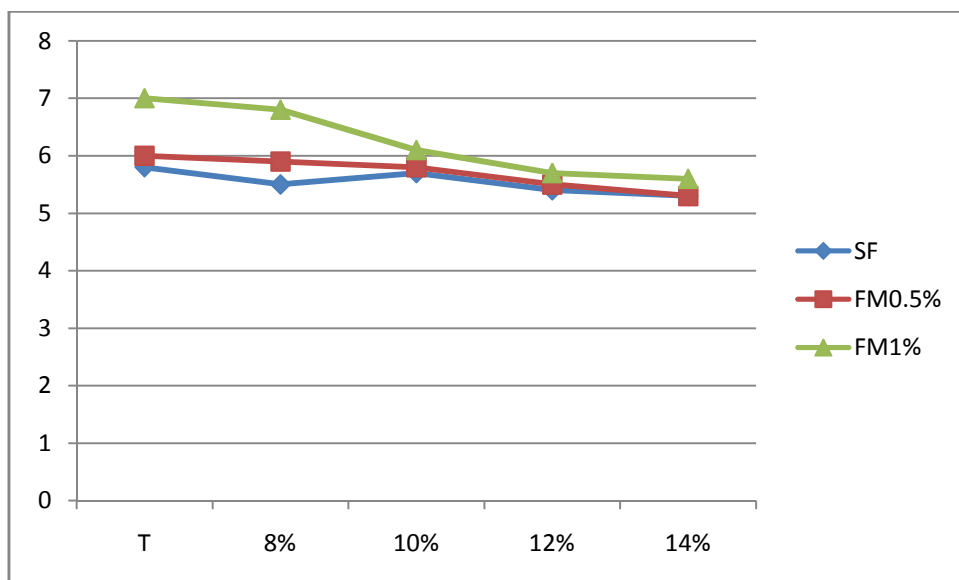


Figure24 : Les résultats de la résistance mécanique à la flexion des différents pourcentages sans fibres et avec fibres 28j.

4.2.22. Essai de compression

Les demi-échantillons provenant de l'essai de flexion vont subir l'essai de compression sur leurs faces de moulage, sous une section de 40×40 mm, entre deux plaques de métal dur d'au moins 10± 1mm d'épaisseur, de 40±1mm de largeur et de longueur et dont la tolérance de plénitude est de 0.01mm.

Le demi-prisme est placé entre elles de manière que son extrémité intacte dépasse d'environ 1cm.

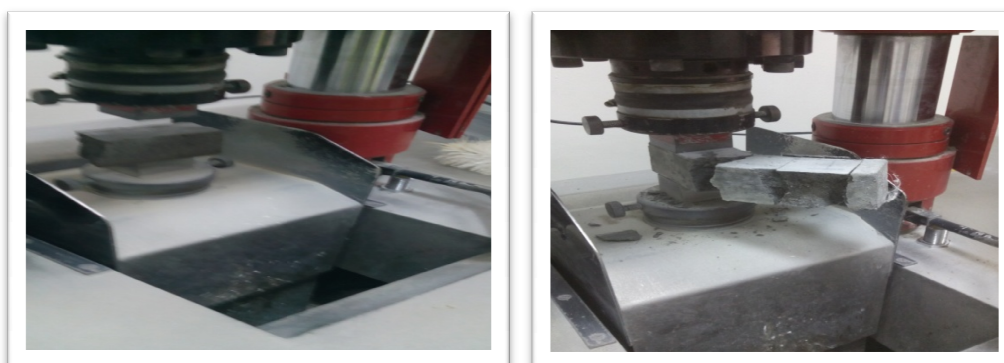


Figure 25 : Essai de compression.

1.1. La résistance mécanique à la compression

Les résultats de la résistance mécanique en compression des différents pourcentages de métakaolin et bentonite calcinée aux différents âges (7, 14, 28 jours) avec fibres et Sans fibres :

Tableau 22 .La Résistance à la compression des différents types des mortiers 7 J (Mpa)

Type	T	8%	10%	12%	14%
Sans fibres	29.4	23.4	18.3	17.5	16.3
Fibres 0.5%	32.4	31.8	29.6	29.1	27
Fibres 1%	33.9	33	31.6	30.4	28.5

Ces valeurs présentées schématiquement sur l'histogramme de la figure suivante :

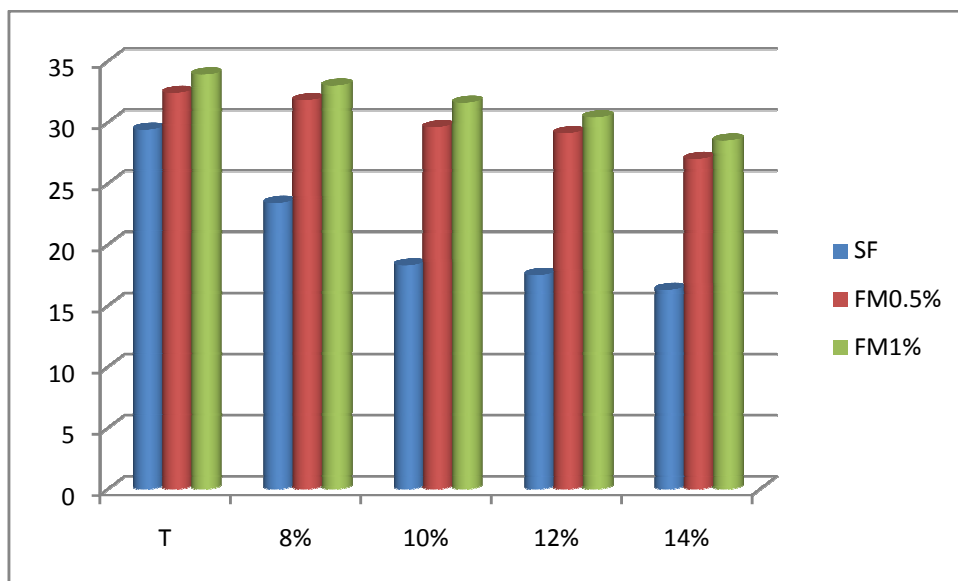


Figure 26 : Les valeurs obtenues de la résistance mécanique en compression pour différents teneurs d’argile pour 7 j

Les résultats sont présentés graphiquement sous forme des courbes sur la figure ci- dessous :

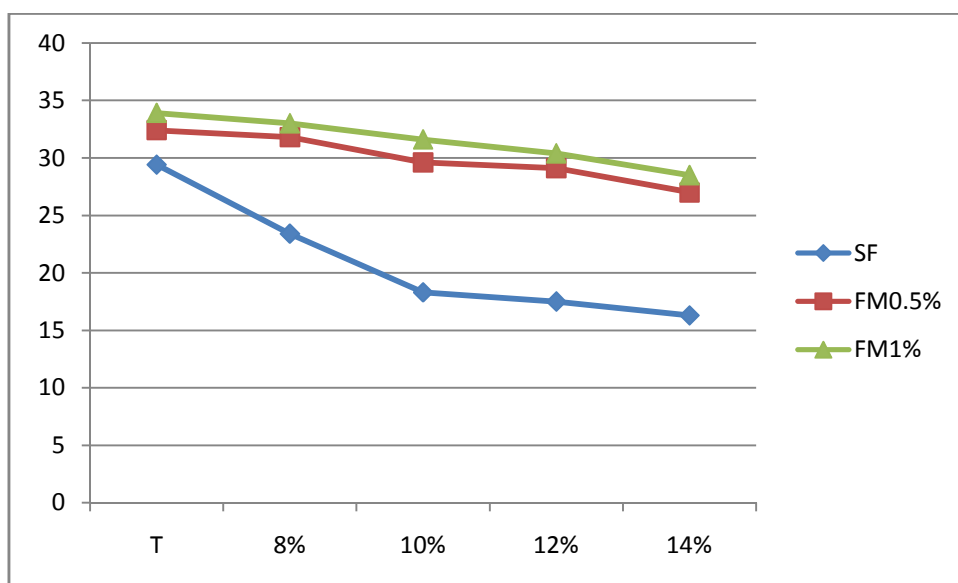


Figure 27 : Les résultats de la résistance mécanique à la flexion des différents pourcentages sans fibres et avec fibres7j.

Tableau 23 .La Résistance à la comperssion des différents types des mortiers 14 J (Mpa)

Type	T	8%	10%	12%	14%
Sans fibres	32.1	31.7	29.9	28.4	25.3
Fibres 0.5%	35	32.6	31.8	30.4	29.1
Fibres 1%	41	35.7	33.1	32.2	31.3

Les résultats sont représentés schématiquement sur l’histogramme de la figure ci-dessous

Ces valeurs présentées schématiquement sur l’histogramme de la figure suivante :

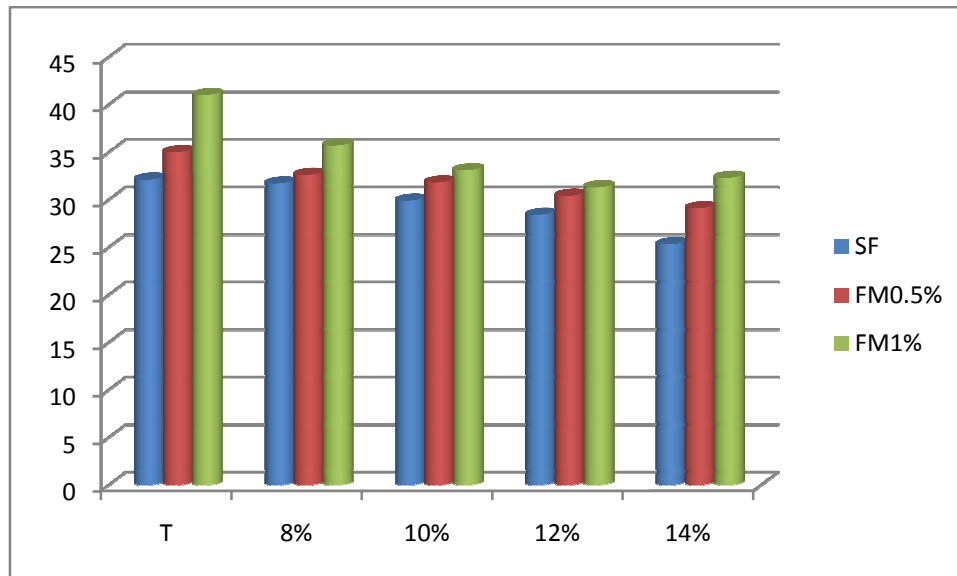


Figure 28 : Les valeurs obtenues de la résistance mécanique en compression pour différents teneurs d’argile pour 14 j

Les résultats sont présentés graphiquement sous forme des courbes sur la figure ci- dessous :

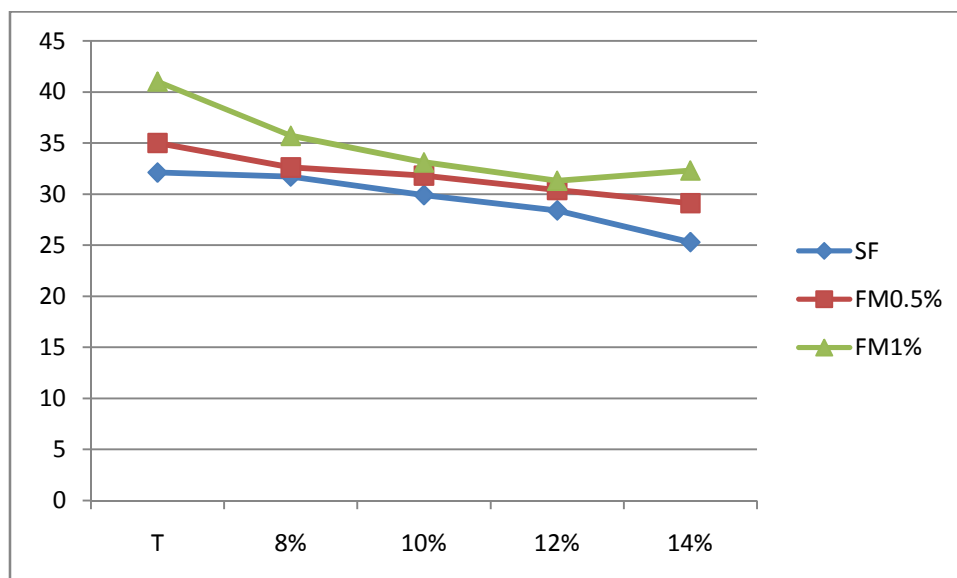


Figure29 : Les résultats de la résistance mécanique à la comperssion des différents pourcentages sans fibres et avec fibres 14j.

Tableau 24 .La Résistance à la compression des différents types des mortiers 28 (Mpa)

Type	T	8%	10%	12%	14%
Sans fibres	43.8	42.5	40.9	38.5	37.8
Fibres 0.5%	46.2	45.8	44.5	42.8	39.6
Fibres 1%	48.3	46.2	45	44.3	42.8

Ces valeurs présentées schématiquement sur l’histogramme de la figure suivante :

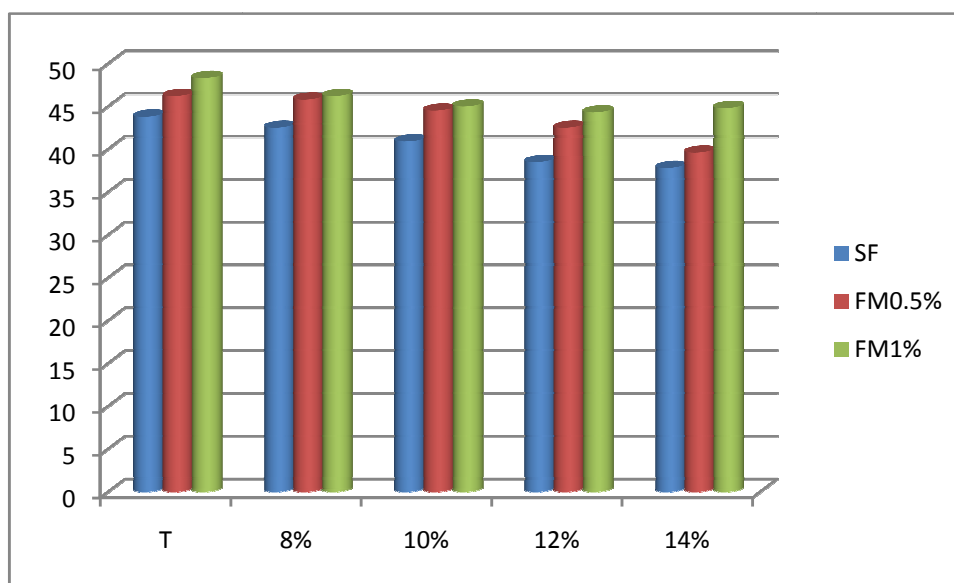


Figure 30 : Les valeurs obtenues de la résistance mécanique en compression pour différents teneurs d’argile pour 28 j

Les résultats sont présentés graphiquement sous forme des courbes sur la figure ci-dessous

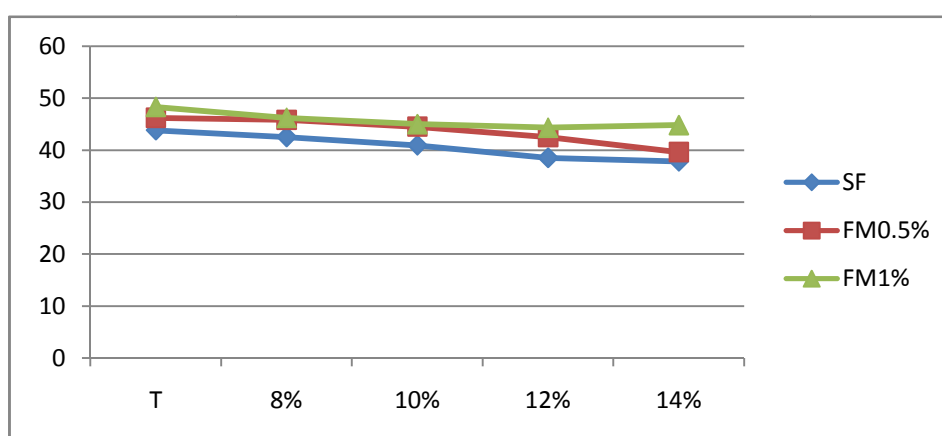


Figure31 : Les résultats de la résistance mécanique à la comperssion des différents pourcentages sans fibres et avec fibres 28j.

Commentaire

D'après les résultats obtenus, la résistance à la traction par flexion des éprouvettes de mortier diminue légèrement ou presque la même par rapport au témoin et la même que la résistance à la compression, ceci est dû aussi à l'effet peut être de malaxage et les vides créés entre les fibres d'acier ajoutées (l'augmentation est remarquable pour les fibres à crochet).

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

La construction en générale est grande consommatrice de matières premières à base de ciment. ces produits posent trois problèmes principaux :

- Leur impacte environnemental vis-à-vis notamment des fortes libérations de CO₂ lors de la fabrication du ciment ainsi que les gaz à effet de serre
- Difficulté technique à mettre en place ces produits qui, de par leur faible plasticité
- leur instabilité, imposant de la formulation peu optimisées par rapport au besoin réel de l'ouvrage final

Leur prix de revient dans un contexte de forte croissance du cout énergétique qui impact celui du ciment. Face à ce constant, la perspective de substitution partielle de ciment par la bentonite calcinée et métakaolin est une solution prometteuse qui procure les propriétés plastiques manquantes au ciment tout en participant aux réactions de durcissement nécessaire à l'obtention de la résistance requise.

L'étude s'est articulée autour des axes suivants :

- la caractérisation de tous les matériaux utilisés
- la formulation de différentes compositions de mortier.
- consiste à une étude rhéologique sur la pâte cimentaire
- consacrée aux résultats et interprétations.

Les résultats obtenus au cours de ce travail mènent aux conclusions suivantes :

1. L'ajout de fibre influe négativement sur la fluidité du mortier cela est due à la forme longitudinal de fibre qui empêche l'étalement de mortier
2. La masse volumique diminue avec l'augmentation du pourcentage de argile (métakaolin , bentonite calcinée) sans fibres et avec fibres a cause de leur densité est inférieure que la densité de ciment et le fibre .
3. la résistance à la traction par flexion des éprouvettes de mortier diminue légèrement ou presque la même par rapport au témoin
4. la résistance a la compression des éprouvettes aussi presque la même par rapport au témoin

CONCLUSION GENERALE

Ceci est du aussi à l'effet peut être de malaxage et les le vide créé entre les fibres d'acier ajouté.

La substitution partielle du ciment par le métakaolin et la bentonite calcinée influence aux résistances mécaniques du mortier. Cette influence peut être expliquée l'effet filler, l'accélération de l'hydratation du ciment et la réaction pouzzolanique du Métakaolin et bentonite calcinée avec la CH.

la réaction pouzzolanique, due à la présence de Métakaolin et bentonite calcinée, apporte la plus grande contribution à la résistance à la compression à long terme.

Référence Bibliographie

Référence Bibliographie

- [1] : GMIRA, A. (le 10 Juillet 2003). Etude texturale et thermodynamique d'hydrates modèles du ciment.
- [2] : KAMEL, S. (03 juillet 2007). Etude de l'influence de l'ajout du sable de dune et le laitier.
- [3] : Lamia, Y. (2011.). Caractérisation d'un composite à la rupture à base des.
- [4] : Mouhcine, B. (25 Novembre 2013). Formulation des différents bétons (BAP, BHP et BFUP) à haute teneur en additions minérales : Optimisation pour améliorer le coulage, résistance au jeune âge et la durabilité
- [5] : Riad, M. D. (2002). Propriétés physico – mécaniques des mortiers et des. Mortiers et des 3eme édition. Paris, Eyrolles 1975. Ciments élaborés à base de laitier granulé d'El Hadjar
- [6] : Par une réunion d'ingénieurs. « Matériaux de constructions ».
- [7] : KOMMAR. A. « Matériaux et éléments de constructions ».
- [8] : J. P. LATTEUR. « Les ciments belges composition et classification suivant la norme NBN ». Guide abrégé d'application. Febelcem, 1996. Site Web : <http://www.febelcem.be>
- [9] : « Cimbéton ». Documentation technique édité par le centre d'information sur le ciment et ses applications. Paris, France 1994.
- [10] : AFNOR. « Bétons et constituants du béton : ciments et chaux ». Tome 2
- [11] : ZARZOUR, M. (2015). valorisation de quelques argiles Marocaines pour l'élaboration de matériaux géo polymères
- [12] : Nassima, M.C. (2012-2013). Epuration des eaux usées : l'élimination des microullants.
- [13] : BOUZIDI, N. (le 23 septembre 2012). Influence des impuretés des kaolins sur les propriétés des produits de cuisson. Bejaia.
- [14] : Abdelhamid, K. R. (2012/2013.). Adsorption du phénol sur la bentonite de Maghnia.
- [15] : Mekkaoui, R.L. (2011, Mai 29 au 31) Emploi dumétakaolin de la région sud. Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, .
- [16] : Allaoua, B. (20/06/2006). Valorisation des fibres métalliques issues des déchets.
- [17] ; NADIA, m. M. (30- novembre-2010). CARACTERISATION EN STATIQUE DU COMPORTEMENT EN TRACTION DIRECTE DU BETON ARME DE FIBRES EN COPEAUX.