

N°Ordre...../FSI/UMBB/2019

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique
Université M'hamed Bougara de Boumerdès



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

Mémoire de fin d'étude
en vue de l'obtention du diplôme de **Master**

Spécialité : Génie civil
Option : Master Génie des Matériaux

Thème
Elaboration de béton fibré pour voussoirs
Effet de la compatibilité ciment-adjuvant

Réalisé par :
HAMBLI Nabil

Encadré par :
Pr CHAID Rabah

Anné Universitaire 2018-2019

Remercîment

Ce mémoire est l'occasion de remercier tous ceux, qui d'une façon ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce travail.

En premier lieu, je tiens à exprimer ma gratitude et mes vifs remerciements à Mr. le professeur CHAID Rabah pour avoir proposé et dirigé ce travail et pour sa totale disponibilité.

Le Laboratoire de projet M28

Merci à tous les membres de ce laboratoire. Je tiens à remercier plus particulièrement Mrs LACHACHI Hichem et Smail pour leurs accueil et pour leurs bienveillance. Mrs Kheloufi technicien supérieur de laboratoire, Je vous remercie également pour votre aide précieuse à la résolution des difficultés expérimentales rencontrées. Votre sympathie, votre bonne humeur et pour votre amitié. L'équipage de laboratoire et la centrale à béton, Je vous remercie pour votre accompagnement et pour vos avis éclairés à chacune des étapes de ce travail.

Ma famille,

Merci à mes parents, Saïd et Ouahiba, pour votre patience et votre compréhension.

Merci à ma soeur et à mon petit frère, pour votre bienveillance

Je saisisais cette occasion pour exprimer toute mes reconnaissance pour tous les enseignants du département de génie des procédés. A tous mes camarades de spécialité, qui partagent ce goût pour l'aventure.

J'adresse enfin mes respectueux remerciements aux membres de jury qui me font l'honneur d'accepter de juger ce travail.

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1-Introduction-----	3
2- Le béton-----	3
3. Constituants de base-----	4
3.1 Ciment-----	5
3.2. Les granulats-----	11
3.3. L'eau de gâchage-----	19
4. Fibres et adjuvants -----	19
4.1. Adjuvants-----	20
4.2. Les fibres-----	23
5. Propriétés du béton-----	27
5.1. Etat frais -----	27
5.2. Etat durcie-----	28
6. Traitement thermique	30
6.1. Introduction.....	30
6.2. Définition	30
6.3. Intérêt d'un traitement thermique	31
6.4. Cycle de traitement thermique des bétons	31
6.5. Règle pour la réalisation de traitement thermique	32
7. Conclusion	32

CHAPITRE II : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

Introduction.....	33
1. Etude et contrôle de constituants.....	34
1.1. Ciment.....	34
1.1.1. Ciment 52.5 SARIE.....	35
1.1.2. Ciment 42.5 Mâtine	36
1.2. Les granulats	37
1.2.1. Le sable	37
1.2.2. Le gravier	41
1.3. L'eau de gâchage	44
1.4. Adjuvants	44
1.4.1. SIKA VISCOCRETE KRONO 22HE	44
1.4.2. SIKA VISCOCRETE 665	45
1.5. Fibre.....	46
2. Etude rhéologique.....	48
2.1. Introduction.....	48
2.2. Matériaux, matériels et méthode	48
2.3. Résultats et discussion	49
➤ ciment CEMII42.5+KRono22He.....	49
➤ Ciment CEMII52.5 SARIE+SIKA VISCOCRETE 665.....	50
2.4. Comportement rhéologique des pâtes	51
➤ ciment 42.5+Sika 22HE.....	51
➤ ciment 52.5+viscocrete 665	52
2.5. Influence sur la consistance normalisée et les délais de prise	54
2.5.1. Méthode de travail	54

2.5.2. Interprétation des résultats	54
Conclusion	56
3. Formulation et traitement thermique.....	57
3.1. Introduction	57
3.2. Méthode DREUX GORISSE	57
3.2.1. La formulation de béton fibré avec ciment CEMII42.5 dosage 420kg/m ³	58
3.2.2. La formulation du béton fibré avec ciment CEMII52.5 dosage 380kg/m ³	59
3.3. Composition de la pâte.....	60
3.4. Malaxage du béton	61
3.5. Confection et cure des éprouvettes	62
3.6. Conservation des éprouvettes	62
3.7. Traitement thermique	63

CHAPITRE III : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

1. état frais	65
1.1. Masse volumique.....	65
1.2. Affaissement.....	66
2. Etat durcie	67
2.1. Masse volumique	65
2.2. Résistance à la compression	70
2.3. Résistance à la flexion.....	71
Conclusion.....	74

CHAPITRE IV : CONCLUSION ET PRESPECTIVES.

Conclusion.....	75
-----------------	----

Liste des figures

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Figure -1- constituants de béton.....	4
Figure -2- phases minéralogique de clinker.....	8
Figure -3- Thermo gramme de l'hydratation d'un ciment Portland montrant les cinq périodes du processus (E = ettringite, M = monosulfate).....	9
<i>Figure -4- Forme d'un granulat.....</i>	<i>13</i>
Figure -5- le module de finesse des sables.....	14
Figure -6- Mesure de l'équivalent de sable.....	17
Figure -7- effet de superplastifiants sur la rhéologie des pâtes cimentaires.....	22
Figure -8- béton sans fibre sollicité en traction.....	26
Figure -9- béton avec fibres sollicité en traction.....	26
Figure -10- mesure de l'affaissement.....	28
Figure -11- essai de compression.....	29
Figure -12- l'essai de flexion.....	30

Chapitre II : Matériaux et procédures expérimentales

Figure -13- courbe granulométrique de sable corrigé.....	41
Figure -14- analyse granulométrique par tamisage.....	43
Figure -15- viscosimètre rotatif Thermo Haak K10.....	48
Figure -16- variation de viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement.....	49
Figure -17- variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement.....	50
Figure -18- variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement.....	50
Figure -19- variation de la contrainte en fonction de la vitesse de cisaillement.....	51
Figure -20- variation de la viscosité et la contrainte en fonction de la vitesse de cisaillement S.P1.2%.....	51

Figure -21- variation de la contrainte et de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement S.P0.8%.....	52
Figure -22- variation de la contrainte et de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement S.P1.1%.....	52
Figure -23- variation de la contrainte et de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement S.P1.5%53	
Figure -24- appareil Vicat.....	54
Figure -25- début et fin de prise pour ciment 42.5.....	55
Figure -26- début et fin de prise pour ciment 52.5.....	55
Figure -27- malaxage du béton.....	61
Figure -28- confection des éprouvettes.....	62
Figure -29- conservation des éprouvettes.....	62
Figure -30- cycle de traitement thermique.....	64
Figure -31- masse volumique de béton à base CEMII à l'état frais.....	65
Figure -32- masse volumique de béton à base de CEMII52.5 à l'état frais.....	66
Figure -33- affaissement au cône D'ABRAMS.....	67
Figure -34- masses volumiques des bétons étuvés et non étuvés à base de CEMII 42.5.....	68
Figure -35- masse volumique des bétons étuvés et non étuvé à base de CEMII52.5.....	69
Figure -36- la résistance à la compression des bétons (1, 2, 3) à plusieurs âges.....	70
Figure -37- la résistance à la compression des bétons (A, B, C) à plusieurs âges.....	71
Figure -38- la résisistance à la flexion des bétons (1, 2, 3) à plusieurs âges.....	72
Figure -39- la résistance à la flexion des bétons (A, B, C) à plusieurs âges.....	73
Figure -40- résistance du béton en compression et flexion.....	73

Liste des tableaux

<i>Tableau -1- La teneur des constituants de béton en poids et en volume.....</i>	<i>4</i>
<i>Tableau -2- Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par DREUX.....</i>	<i>17</i>
<i>Tableau -3- Résistances mécaniques de quelques roches utilisées comme granulats.....</i>	<i>19</i>
<i>Tableau -4- type de fibres.....</i>	<i>25</i>

Tableau -5- Les essais physiques de CEMII52.5.....	34
Tableau -6- résistance à la compression de CEMII52.5.....	35
Tableau -7- composition chimique de CEMII52.5.....	35
Tableau -8- composition minéralogique du clinker CEMII52.5.....	35
Tableau -9- Les essais physiques de CEMII42.5.....	36
Tableau -10- résistance à la compression.....	36
Tableau -11- composition chimique de CEMII42.5.....	37
Tableau -12- composition minéralogique du clinker CEMII42.5.....	37
Tableau -13- Caractéristiques du sable de Bouzegzza.....	38
Tableau -15- Caractéristiques du sable de Boussaâda.....	39
Tableau -16- analyse granulométrique du sable de Boussaâda.....	39
Tableau -14 - analyse granulométrique du sable de Bouzegzza.....	38
Tableau -17- module de finesse des sables.....	40
Tableau -18- analyse granulométrique du sable de Boussaâda et sable de bouzegzza.....	40
Tableau -19- Caractéristique du (G ^{3/8}) de Bouzegzza.....	41
Tableau -20- Analyse granulométrique du (G ^{3/8}).....	42
Tableau -21- Caractéristique du gravier de Bouzegzza.....	42
Tableau -22- Analyse granulométrique du (G ^{8/15}).....	43
Tableau -23- Caractéristiques du KRONO 22HE.....	44
Tableau -24- Caractéristiques du VISCOCRETE665.....	45
Tableau -25- Caractéristique des fibres.....	47
Tableau -26- les pâtes de ciments employés pour la caractérisation rhéologique.....	49
Tableau -27- résultats des essais sur les pâtes de ciment.....	54
Tableau -28- composition du béton à base de ciment CEMII42.5MATINE.....	59
Tableau -29- composition du béton à base de ciment CEMII 52.5SARIE.....	60
Tableau -30- composition des bétons.....	61
Tableau -31- masse volumique de béton à base CEMII 42.5.....	65
Tableau -32- masse volumique de béton à base de CEMII52.5.....	66

Tableau -33- masse volumique à l'état durcie de béton à base de CEMII 42.5 avec et sans étuvage	67
Tableau -34- masse volumique de béton à base de CEMII 52.5 avec et sans étuvage (état durcie).....	68
Tableau -35- la résistance à la compression de béton à base de CEMII 42.5.....	70
Tableau -36- la résistance à la compression de béton à base de CEMII 52.5.....	71
Tableau -37- la résistance à la flexion de béton à base de CEMII 42.5.....	71
Tableau -38- la résistance à la flexion de béton à base de CEMII 52.5.....	72

INTRODUCTION GENERALE

Les bétons font partie des matériaux les plus utilisés dans l'industrie de la construction. Ces matériaux composites sont constitués de granulats auxquels sont liés par une pâte de ciment hydraté. Le processus d'hydratation déroule d'une manière très complexe. Encore aujourd'hui, les mécanismes de l'hydratation du ciment ne sont pas complètement compris. La quantité d'eau exigée par les réactions d'hydratation représente environ 30% de la masse de ciment. Or, l'obtention d'une ouvrabilité satisfaisante du béton pour l'opération de mise en œuvre exige une quantité d'eau supplémentaire. Avec le temps l'eau excédentaire s'évapore laissant des vides dans la pâte de ciment durcie. La porosité diminue la résistance mécanique et la durabilité du matériau.

Depuis les soixante dernières années, la technologie du béton exige une ouvrabilité et des propriétés mécaniques des matériaux toujours plus élevées. Afin de contrôler des propriétés spécifique du béton, des adjuvants chimique organique et inorganique sont aujourd'hui massivement introduits dans la formulation pour améliorer les performances mécanique et rhéologique du béton, par la diminution de la quantité d'eau de gâchage pour limiter la porosité {1}. Il est, de ce fait, possible de fabriquer des bétons fluides. Même avec moins d'eau qu'il n'en faut pour hydrater le ciment, et donc de fabriquer des bétons de très faible rapport eau/ciment. La réduction de rapport E/C garantit le développement d'excellent propriétés mécaniques et une grande durabilité à l'état durcie {2}. Les super plastifiants sont devenus de cette manière, des composés essentiels des béton à haut performance, des béton renforcer de fibres, du béton préfabriqué, des bétons autoplaçants....etc.

Les objectifs principaux de ce travail sont l'élaboration d'un béton fibré pour voussoir du tunnelier qui nécessite une attention particulière et une procédure doit être définie pour atteindre des qualités en termes de durabilité, ouvrabilité et des performances mécaniques élevées à jeune âge et à long terme.

* une résistance mécanique à la compression de 15 MPa à 8heurs.

* un affaissement au Cône d'ABRAMS de 16cm avec des rapport E/C plus faibles.

* des résistances à la compression supérieures à 40MPa à long terme.

Pour atteindre ces exigences, des adjuvants hauts réducteurs d'eau et des accélérateurs de durcissement sont incorporés dans la formulation de béton pour garantir le développement des propriétés mécaniques et physiques du béton tel que la résistance et la compacité, donc une durabilité accrue ainsi que des propriétés rhéologique lors de la mise en œuvre. D'autre

part des fibres synthétiques anti fissures sont utilisées afin d'éviter le retrait plastique et la fissuration lors du durcissement accéléré d'un traitement thermique à la vapeur.

Dans le premier chapitre, des connaissances théoriques et des recherches bibliographiques relatives aux bétons et ses constituants sont développés afin de faciliter la compréhension des résultats, les processus d'hydratation des phases cimentaire et du ciment portland, sont amplement décrits. Les principaux types de super plastifiants et leurs modes de dispersion sont également détaillés. Le deuxième chapitre présente les matériaux, les essais rhéologiques, les techniques de caractérisation et le durcissement accéléré utilisés au cours du travail expérimental. Le chapitre 3 réunit des résultats obtenus par des essais réalisés sur le béton frais et durcie. Le chapitre 4 présente les conclusions et les perspectives de ce travail.

synthèse bibliographique

1-Introduction

Le béton est un matériaux de construction dont les origines remontent à l'aube de la civilisation européenne, il y a plus de mille ans les romains utilisaient comme liant la chaux vive obtenue par le chauffage du calcaire, et Vitruve, ingénieur militaire de César, faisait explicitement référence au béton dans ses célèbre « dix livre d'architecture ».mais c'est seulement au XIX siècle que, grâce aux travaux de Smeaton, Vicat (ingénieur des ponts). La société moderne a connu un nouveau matériau de construction, économique, moulable, résistant : le béton. Ce matériau permis aux ingénieurs et architecte de libérer les formes et d'échapper aux restrictions imposées par la pierre.

A distance de plus d'un siècle, il est clair que les espoirs des ingénieurs de l'époque sont devenus à peu près réalité. Le béton est un matériau qui trouve son champ d'utilisation dans pratiquement tous les domaines de l'ingénierie civil.

Malgré sa longue histoire, le béton fait encore aujourd'hui l'objet de nombreuses études. Il s'agit en fait un milieu composite, formé par plusieurs espèces chimique de grande complexité et dont le comportement n'a pas encore été clarifié de manière satisfaisante, spécialement dans des conditions d'utilisation particulières. Actuellement, de nombreux travaux sont en cours pour caractériser le comportement du béton hors condition standards comme, par exemple, dans une ambiante agressive d'un point de vue chimique ou thermique.

2- Le béton

Le béton est un matériau de construction formé par un mélange de granulats, de sable, et d'eau aggloméré par un liant hydraulique (ciment), éventuellement complété par des adjuvants et des additions. Ce mélange, qui est mis en place sur le chantier ou en usine à l'état plastique, peut adopter des formes très diverses parce qu'il est modulable; il durcit progressivement pour former finalement un monolithe. Selon le choix du ciment et son

dosage par rapport aux granulats, selon la forme des granulats, selon l'utilisation d'adjuvants, les bétons obtenus peuvent avoir des caractéristiques très diverses. Dans les bétons courants, les granulats sont des grains de pierre, **sable**, gravier, cailloux et le liant est un ciment, généralement un ciment portland.

Les proportions des constituants d'un béton courant, présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau -1- La teneur des constituants de béton en poids et en volume

Constituants	Eau	Air	Ciment	Granulats
Volume (%)	14 - 22	1 - 6	7 - 14	60 - 78
Poids (%)	5 - 9	-	9 - 18	63 - 85

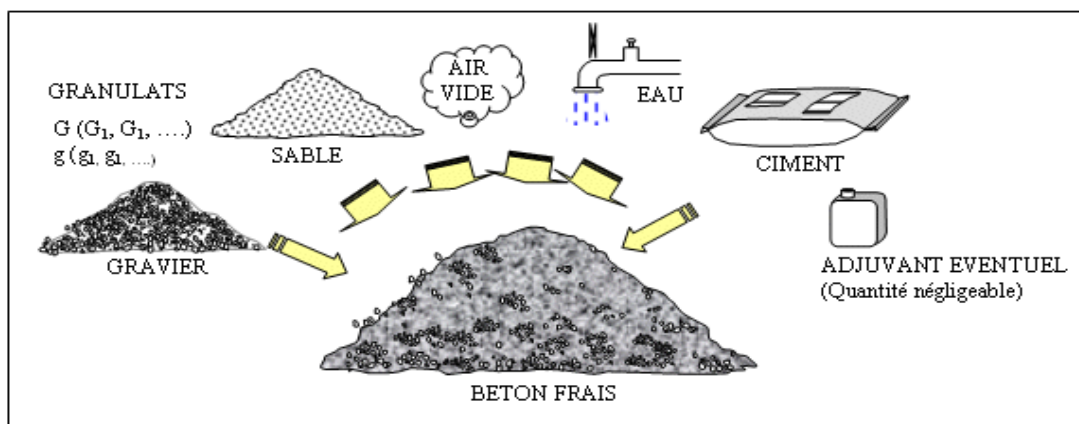


Figure -1- constituants de béton

Pour être durable, un béton doit :

- être bien composé.
- correctement mis en œuvre.
- protégé des causes possibles d'altération par des dispositions constructives adéquates.

3. Constituants de base

3.1 Ciment

Le ciment Portland est le ciment le plus couramment employé dans la fabrication des bétons ordinaires et constitue le matériau cimentaire exclusivement utilisé dans ce travail. Il fait donc l'objet d'une description précise. Tout d'abord, la nomenclature chimique spécifique aux ciments est nécessaire à la compréhension des formules des composés minéraux est présentée. Ensuite, le processus de fabrication du ciment Portland est décrit. Enfin, la composition minéralogique de ce ciment est détaillée.

3.1.1. Définition.

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minérale qui est sous forme de poudre finement broyée qui, gâché avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réaction et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. {3}.

3.1.2. Nomenclature chimique des ciments.

Dans la chimie du ciment, la composition des phases minérales n'est pas représentée par la formule chimique mais par une forme abrégée. Cette écriture est basée sur une abréviation de la formule des oxydes et exprimée comme une somme {4} : le silicate tricalcique par exemple, Ca_3SiO_5 , s'écrit généralement $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. Il est usuel d'abrégé les formules des oxydes courants en une simple lettre, telle que C pour CaO ou S pour SiO_2 . Le silicate tricalcique s'écrit alors C_3S . Cette représentation est couramment utilisée dans la littérature spécialisée.

Les abréviations les plus communément utilisées dans la nomenclature du ciment sont les suivantes :

C = CaO S = SiO_2 A = Al_2O_3 F = Fe_2O_3

M = MgO K = K_2O Š = SO_3 N = Na_2O

H = H_2O Č = CO_2

3.1.3. Composition du ciment Portland.

Le ciment Portland est un matériau inorganique. Il est formé de quatre phases minérales principales, C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF , de différents types de sulfate de calcium et de phases mineures. En raison du processus industriel de fabrication, ces phases ne sont pas pures et renferment des quantités variables d'ions étrangers dans leur réseau cristallin. Ces impuretés peuvent parfois modifier la structure cristalline des phases cimentaires et entraîner ainsi des

variations de leurs propriétés physico-chimiques. Les principaux minéraux entrant dans la composition du ciment Portland sont décrits ci-après.

a. Les phases du clinker.

Le clinker de ciment Portland est composé de deux phases à base de silicate de calcium, l'alite C_3S et la bélite C_2S , ainsi que de deux phases à base d'aluminate de calcium, la phase aluminat C_3A et la phase ferrialuminat C_4AF .

➤ L'alite (C_3S).

Le silicate tricalcique C_3S (Ca_3SiO_5) ou alite est le principal constituant du ciment Portland ; sa teneur massique varie de 40 à 80 % [5]. Ce minéral est le plus souvent impur dans le clinker. Le C_3S est essentiel pour le développement de la résistance mécanique au jeune âge. Compte tenu de son importance au niveau massique et pour les performances du ciment, l'alite est souvent envisagée comme un modèle raisonnable pour l'étude de l'hydratation initiale du ciment Portland, en particulier la prise et le développement de la résistance à la compression au jeune âge.

L'alite n'est pas un composé défini avec une composition constante et un nombre fixe d'ions étrangers occupant les sites du réseau cristallin. [6].

Le silicate tricalcique peut contenir une série d'oxydes étrangers, par exemple MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , ZnO , TiO_2 ... La quantité d'incorporation dépend de la composition des matériaux de départ, de la température de combustion et du refroidissement. Parmi les ions étrangers pouvant s'insérer dans le réseau cristallin, Mg^{2+} , Al^{3+} et Fe^{3+} sont les plus importants.

➤ La bélite (C_2S).

La teneur massique de la bélite varie de 15 à 30 % dans un ciment Portland. Cette phase connue sous le nom de silicate bi calcique C_2S (Ca_2SiO_4) existe sous quatre variétés allotropiques. [9]. Dans le clinker, seule la forme β est présente. La maille des cristaux de β - C_2S est de symétrie monoclinique et cette variété est la seule qui possède des propriétés

hydrauliques. Le silicate bicalcique contient, tout comme l'alite, des oxydes étrangers tels que MgO, Al₂O₃ et un peu de K₂O.

La formation de la bélite peut provenir :

- soit de la réaction d'une source de chaux avec une source de silice,
- soit de la décomposition de l'alite.

La teneur en chaux des matières premières joue donc un rôle primordial sur les conditions de formation du C₂S. En effet, une forte teneur en chaux favorise plutôt la formation du C₃S (3CaO.SiO₂). La bélite se rencontre fréquemment dans des nids créés par un manque local de CaO et, par conséquent, dus à une inhomogénéité du cru. Lors d'un refroidissement lent du clinker, la bélite entoure les cristaux d'alite. La phase fondue relativement pauvre en chaux prélève du CaO au C₃S engendrant ainsi un manteau de bélite sur l'alite.

La bélite joue un rôle dans le développement de la résistance mécanique à long terme. Elle atteint une résistance comparable à celle de l'alite mais beaucoup plus lentement.

➤ **La phase aluminat (C₃A)**

La phase aluminat est formée par l'aluminat tricalcique C₃A (Ca₃Al₂O₆) et est également connue sous le nom de célite [7]. Sa teneur massique peut atteindre 15 % du clinker de ciment Portland. Ce composé se forme à une température supérieure à 800°C à partir de l'aluminat monocalcique CA (CaAl₂O₄) par un ajout continu de chaux. Lors du refroidissement du clinker, la phase fondue conduit à une forme cristalline stable à température ambiante. Le C₃A pur cristallise dans un réseau cubique et ne présente aucun polymorphisme connu.

Plusieurs oxydes peuvent s'insérer dans le C₃A, en particulier les oxydes alcalins, Na₂O et K₂O, mais aussi MgO, Fe₂O₃, SiO₂, TiO₂, Cr₂O₃ et ZnO. Les oxydes alcalins peuvent s'insérer jusqu'à 5 % massique et sont les seuls à provoquer une modification de la symétrie du réseau cristallin de cubique en orthorhombique puis en monoclinique.

La phase aluminat présente la plus forte réactivité des quatre phases du clinker et joue, de ce fait, un rôle essentiel dans la plasticité des systèmes cimentaires à jeune âge plus particulièrement.

➤ **La phase ferrialuminate (C₄AF)**

La phase ferrite est composée par le ferrialuminate tétra calcique C₄AF (Ca₄Al₂Fe₂O₁₀) et représente 5 à 15 % de la masse du ciment. Ce composé ne présente pas de composition stœchiométrique définie ; il s'agit d'une solution solide de formule générale avec une composition variable dont les principaux composés sont C₂F, C₆AF₂, C₄AF, C₆A₂F et C₂A. La composition de la phase ferrite dépend de la teneur en fer et en aluminium des matières premières, mais elle correspond souvent à peu près à la composition de C₄AF. Comme pour toutes les phases du clinker, des ions étrangers peuvent s'insérer dans le C₄AF. L'insertion du magnésium, en particulier, est à l'origine de la couleur grise du ciment, le C₄AF pur étant de couleur verte.

La phase ferrite présente une réactivité équivalente à celle de la phase aluminat. Sa réactivité est d'autant plus faible que la teneur en Fe₂O₃ est grande.

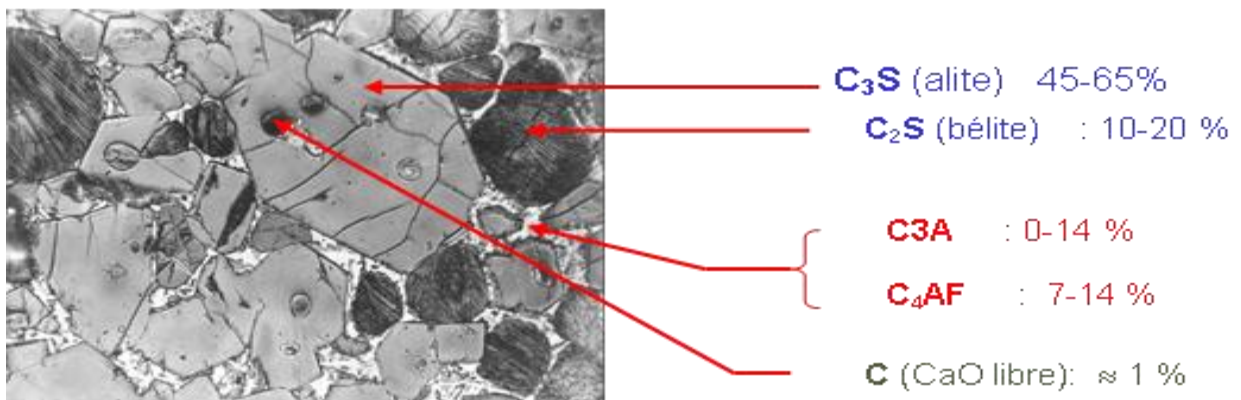


Figure : phases minéralogiques de clinker

Figure -2- phases minéralogiques de clinker

b. Constituants secondaires

- **Les sulfates de calcium**
- **Les phases mineures**

Les phases mineures les plus souvent rencontrées dans le ciment Portland sont la chaux libre (CaO), la magnésie libre (MgO) et les oxydes alcalins (K₂O, Na₂O).

- **Les alcalins (K₂O, Na₂O)**

Les alcalins proviennent des matières premières, en particulier de certains groupes argileux. Les alcalins solubles du ciment peuvent dépasser 1 % massique et la teneur en K_2O est en général plus élevée que celle en Na_2O .

3.1.4. Hydratation du ciment Portland

La réaction d'hydratation du ciment Portland est une combinaison des réactions d'hydratation des principaux constituants du clinker. Les phases successives du phénomène sont donc celles qui ont été présentées pour les phases pures. Elles sont cependant plus complexes du fait des interactions chimiques et thermiques qui se produisent entre les différents composés.

Le processus d'hydratation du ciment Portland peut être suivi à l'aide d'un thermogramme représentant la chaleur dégagée par le système réactionnel en fonction du temps. Une représentation est proposée figure. Elle permet d'identifier cinq périodes, selon les variations du flux de chaleur, lesquelles sont similaires à celles observées lors de l'hydratation du C_3S . Les cinq périodes de l'hydratation d'un ciment Portland sont la pré-induction, l'induction, l'accélération, la décélération et le renforcement.

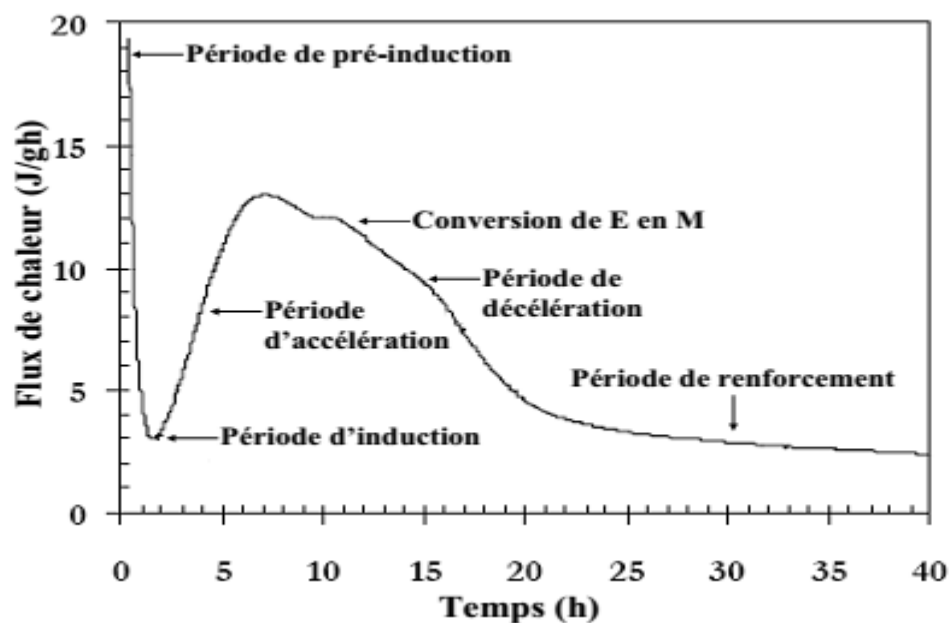


Figure -3- Thermo gramme de l'hydratation d'un ciment Portland montrant les cinq périodes du processus (E = ettringite, M = monosulfate).

a. Période de pré-induction (0 à 15 minutes)

Dès que le ciment entre en contact avec l'eau, les composés facilement solubles, tels que les sulfates alcalins Na_2SO_4 , K_2SO_4 et la chaux libre CaO , se dissolvent complètement dans l'eau de malaxage. Les sulfates de calcium $\text{Ca}_5\text{O}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ se dissolvent jusqu'à saturation. La phase aqueuse devient ainsi concentrée en ions Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} et OH^- . Ces processus de mise en solution sont très rapides et exothermiques, ils s'accompagnent d'un dégagement de chaleur important.

b. Période d'induction (15 minutes à 4 heures)

Après la période de pré-induction, le système eau-ciment entre dans la période d'induction. Cette période est identifiée par un flux de chaleur très faible et peut durer une à quatre heures.

Bien que l'hydratation se poursuive au cours de cette période, celle-ci est souvent appelée période dormante en raison de l'absence de dégagement de chaleur.

c. Période d'accélération (4 à 8 heures)

À la fin de la période d'induction, le dégagement de chaleur de la pâte de ciment augmente fortement. Cela traduit la reprise intense des différentes réactions d'hydratation du ciment anhydre. Plusieurs processus physico-chimiques sont responsables de cette accélération soudaine [8].

d. Période de décélération (8 à 24 heures)

Cette période est caractérisée par une nouvelle diminution progressive des vitesses d'hydratation. Les réactions précédemment décrites ralentissent en raison des nombreux produits d'hydratation qui font passer les cinétiques dans un régime de diffusion, mais aussi à cause de l'épuisement progressif des phases du clinker encore intactes.

Les phases C-S-H et la portlandite sont produites en continu par l'hydratation du C_3S et du C_2S .

e. Période de renforcement (1 à 28 jours)

Les réactions d'hydratation se poursuivent tant qu'il subsiste de l'eau. Lorsque l'eau contenue dans les pores est épuisée, une partie de l'eau des hydrates déjà formés est alors consommée. Ce processus est à l'origine de l'auto-dessiccation de la matrice cimentaire. Par conséquent, la poursuite des réactions d'hydratation à long terme est intimement liée au rapport E/C. Pour des rapports E/C suffisamment élevés, l'hydratation continue jusqu'à ce que le ciment ait été entièrement consommé. Cependant, les particules de ciment les plus grossières laissent des résidus non hydratés dans la pâte. Pour de faibles rapports E/C, l'hydratation peut s'interrompre en raison du manque d'eau [9]. Complètement hydratée, la pierre de ciment consiste principalement en un mélange de C-S-H et de portlandite.

3.2. LES GRANULATS

3.2.1. Généralités

Comme les trois quarts du volume d'un béton sont occupés par les granulats, il n'est pas étonnant que la qualité de ces derniers revête une grande importance. Non seulement les granulats peuvent limiter la résistance du béton, mais, selon leurs propriétés, ils affecteront la durabilité et les performances structurales du béton, En fait, on ne peut confectionner un béton résistant avec des granulats dont les propriétés sont médiocres.

A l'origine, on considérait les granulats comme des matériaux inertes dispersés dans la pâte de ciment, et cela pour des raisons purement économiques. On peut cependant juger les granulats comme des matériaux de construction liés en une masse cohérente par une pâte de ciment. En fait, les granulats ne sont pas réellement inertes et leurs propriétés physiques, thermiques et, dans certains cas, chimiques influencent les performances du béton.

Les granulats coûtent beaucoup moins cher que le ciment; il devient alors économique d'en inclure la plus grande quantité possible dans un béton, contrairement au ciment. Cependant, l'aspect économique n'est pas l'unique raison qui explique l'utilisation des granulats, car ces derniers confèrent au béton une plus grande stabilité sur le plan volumétrique et une meilleure durabilité que la pâte de ciment à elle seule [10].

3.2.2. Les caractéristiques des granulats

a. Caractéristiques géométriques

➤ Classe granulaire

. Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur des tamis à mailles carrés dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres.

On appelle « tamisât » la partie des granulats qui est passée à travers le tamis et le « refus » la partie qui est restée sur le tamis.

➤ Analyse granulométrique

Série principale européenne (NF EN 933-1)

0.063 -0.125 -0.25 -0.5 -1 -2 -4 -8 16 -31.5...

Série française principale (P 18 -560):

0.08 -0.16 -0.315 -0.63 -1.25 -2 -5 -10 -20...

On distingue les familles suivantes (NF EN 12-620):

Fine : fraction granulaire qui passe au tamis de 0.063mm;

Filler : Granulats dont la plupart des grains passent au tamis de 0.063 mm;

Sable 0 / D : $d = 0$ et $D \leq 4$ mm;

Gravier : mélange de sable et de gravillon $d = 0$ et $4 \leq D \leq 45$ mm;

Gravillon d / D : $d \geq 2$ mm et $4 \leq D \leq 63$ mm.

➤ Courbe granulométrique

On trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamisats sous les tamis dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique; la suite des valeurs de D est une progression géométrique de raison :

$$\sqrt[10]{10} \approx 1,25$$

La forme des courbes granulométriques apporte les renseignements suivants:

- Les limites d et D du granulat en question;
- La plus ou moins grande proportion d'éléments fins; exemple pour: sable fins, sable normal et sable grossier.
- La continuité ou la discontinuité de la **granularité**.

➤ **Forme des granulats et l'état de surface**

• **La forme des granulats**

La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques:

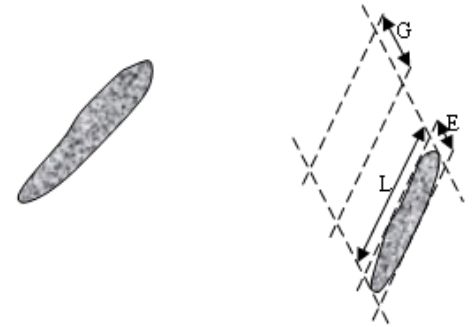


Figure -4- Forme d'un granulat

- La longueur L; distance maximale de deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulat,
- L'épaisseur E; distance minimale de deux plans parallèles tangents au granulat,
- La grosseur G; dimension de la maille carrée minimale du **tamis** qui laisse passer le granulat.

Le coefficient d'**aplatissement** A d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondéral des éléments qui vérifient la relation:

L'ancienne norme P 18 541 spécifiait que la valeur du coefficient d'aplatissement doit être: $A \leq 30\%$.

$$\frac{G}{E} > 1,58$$

Dans les mêmes conditions $L \leq G \leq E$,

- l'indice d'allongement $\beta = \frac{G}{L} \leq 1$
- l'indice d'aplatissement $\alpha = \frac{E}{G} \leq 1$

On peut déterminer aussi:

La forme des granulats influence:

- La facilité de mise en oeuvre et le compactage du béton.
- La **compacité** du mélange, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment.

- **L'état de surface:**

L'état de surface des granulats influence sur la **compacité** du mélange, l'adhérence du granulat à la pâte de ciment et sur la maniabilité du béton frais [14].

- **Module de finesse**

Le module de finesse (MF) du sable est défini dans la norme comme la somme des pourcentages cumulatifs retenus sur une série de tamis normalisés donnée, divisée par 100. Il indique la finesse d'un sable: plus le module de finesse est élevé, plus le sable est grossier.

B= trop fin Mod. finesse de dosage en eau alors la résistance du béton chute) ;

A= préférentiel Mod. finesse 2,20 à 2,80

(La mise en la résistance élevée) ;

C = trop grossier Mod. (manque ouvrabilité donc la mise en oeuvre est

difficile, une bonne résistance mécanique et risque de ségrégation limité) [14].

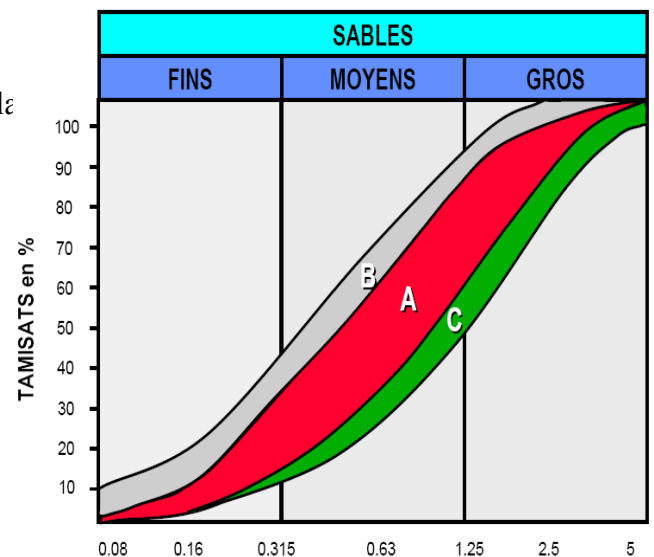


Figure -5- le module de finesse des sables

b. Les caractéristiques physico-chimiques

- **La masse volumique absolue**

La **masse volumique** absolue d'un matériau est la masse d'un mètre cube de ce matériau, déduction faite de tous les vides, aussi bien des vides entre les grains que des vides à l'intérieur des

La **densité** absolue est le rapport de la masse absolue d'une unité de volume du matériau à température donnée à la masse du même volume d'eau distillée à la même température.

➤ **La masse volumique apparente**

La masse volumique apparente est la masse du granulat occupant l'unité de volume, tous vides inclus. On la détermine en calculant le quotient:

La **densité** apparente à l'état compacté ou non compacté sera obtenue en établissant le rapport de la masse apparente d'une unité de volume du matériau à température donnée à la masse d'une même quantité d'eau distillée à même température.

➤ **La porosité et la compacité**

- **La porosité** : En général la **porosité** est le rapport du volume des vides au volume total.

On peut aussi définir la **porosité** comme le volume de vide par unité de volume apparent.

$$p = \frac{\text{volume des vides}}{\text{volume total}}$$

- **La compacité** : La **compacité** est le rapport du volume des pleins au volume total.

Ou volume des pleins par unité de volume apparent.

$$c = \frac{\text{plein}}{\text{vide} + \text{plein}}$$

La **porosité** et la **compacité** sont liées par la relation: **p + c = 1**

➤ **La teneur en eau**

La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec. On peut aussi définir la teneur en eau comme le poids d'eau W contenu par unité de poids de matériau sec.

$$W = \frac{E}{P_s} = \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

E = Poids d'eau dans le matériau.

P_s = Poids du matériau sec.

P_h = Poids matériau humide

Si W est exprimé en % :

$$W\% = 100 \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

Les granulats utilisés pour la confection du béton contiennent généralement une certaine quantité d'eau variable selon les conditions météorologiques. L'eau de gâchage réellement utilisée est par conséquent égale à la quantité d'eau théorique moins l'eau contenue dans les granulats. Il faut par conséquent disposer de moyens pour mesurer combien il y a d'eau dans les granulats.

➤ Propreté des granulats

La propreté est déterminée différemment dans le cas des granulats d/D (cailloux, gravillons) et dans celui des O/D (sables).

- **La teneur en fines argileuses**

Dans le cas des cailloux et gravillons. On lave l'échantillon sur le tamis de 500 μm ; c'est le pourcentage de passant à ce tamis qui constitue la teneur en fines argileuses. Cet essai est généralement suffisant pour caractériser la propreté des granulats alluvionnaires. Dans le cas des concassés de calcaires tendres, les fines recueillies lors de cet essai peuvent n'être pas argileuses. On peut caractériser ces fines, du point de vue de la surface spécifique, par l'essai au bleu, sachant que la surface spécifique des argiles nocives est de l'ordre de 100 fois celle des fines calcaires.

- **Essai au bleu:**

On détermine la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour recouvrir d'une couche mono-moléculaire des particules fines étudiées. Le résultat de l'essai est exprimé en grammes de bleu pour 100 grammes de fines.

- **Essai d'équivalent de sable**

Dans le cas des sables cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une solution flocculante. Après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes. Ensuite, on mesure la hauteur, dans l'éprouvette normalisée, du sédiment H_1 , et du sédiment + flocculat H_2 . Le résultat:

$$ES = (H_1/H_2) \times 100$$

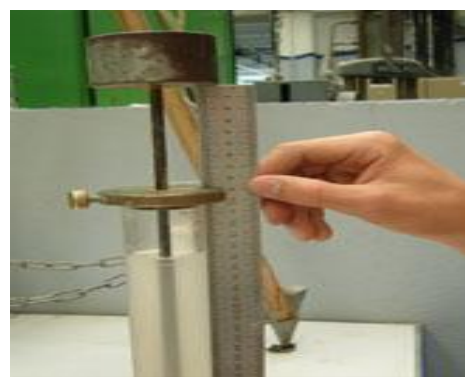
La limite entre le sable brut et l'argile est maintenant visible. Il est possible de mesurer à l'œil et au réglé, la hauteur de sable total et la hauteur de sable brut pour en déterminer la proportion.

Tableau -2- Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par DREUX

PS	Nature et qualité du sable
< 60	"Sable argileux" risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité
$60 \leq PS < 70$	"Sable légèrement argileux" de propriété admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
$70 \leq PS < 80$	"Sable propre" à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$PS > 80$	"Sable très propre" l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.



a) L'ES sans piston



b) L'ES avec piston (ESP)

Figure -6- Mesure de l'équivalent de

c. Caractéristiques mécaniques

Du point de vue de la résistance mécanique, une roche peut être caractérisée comme un béton et avec les mêmes aléas, par sa résistance à la compression et à la traction, par son module d'Young... etc. Ces caractéristiques ne sont pas déterminables sur un granulat, aussi a-t-on recours à des essais qui tentent d'imiter les sollicitations que subit un granulat dans un ouvrage.

➤ Essai micro-Deval

Essai micro-Deval est une variante qui se pratique sur des gravillons 4/6,3 ou 6,3/10 ou 10/14. 500g de gravillon sont placés avec une charge de 2 à 5 kg de billes d'acier de 10 mm de diamètre dans une Jarre cylindrique remplie d'eau. On fait tourner 15 minutes et on récupère le passant au tamis de 2 mm P. Le coefficient micro-Deval est:

$$MD = 100 \frac{P}{500}$$

Le coefficient micro-Deval est d'autant plus élevé que le granulat est moins bon. La corrélation statistique entre coefficients Deval et micro-Deval est :

$$D \times MD = 80$$

➤ Essai Los Angeles

Cet essai estime la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. Il se pratique sur les classes granulaires 4/6,3 ou 6,3/10 ou 10/14 comme le micro-Deval. On place un échantillon de 5 kg de granulat et 7 à 11 boulets de 417 g dans un tambour dont une génératrice intérieure est munie d'une plaque. Lorsque le tambour tourne, le granulat et les boulets s'accumulent sur la plaque pendant une fraction de tour et retombent ensuite. Le nombre de tours et la vitesse sont précisés par le mode opératoire.

On récupère ensuite le passant P au tamis de 1,6 mm. Le coefficient Los Angeles est:

$$LA = 100 \frac{P}{5000}$$

Le coefficient Los Angeles est d'autant plus élevé que le granulat est moins bon.

Tableau -3- Résistances mécaniques de quelques roches utilisées comme granulats

Nature	Micro-Deval en		Coef.			Coef	
	présence d'eau		Deval			Los Angeles	
Microgranite	5	à 10	10	à 28	15	à 25	
Granite	10	à 15	13	à 22	15	à 20	
Diorite	8	à 25	10	à 20	10	à 30	
Basalte	5	à 25	14	à 23	18	à 28	

3.3. L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage doit être propre, elle ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes :

- ✓ 2 g/l pour les bétons à haute résistance.
- ✓ 5 g/l pour les bétons à faible résistance.

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des sels dissous au-delà de :

- ✓ 15 g/l pour les bétons à hautes résistances.
- ✓ 30 g/l pour les bétons à faibles résistances.

4. Fibres et adjuvants

4.1. Adjuvants

4.1.1. Définition

Les super plastifiants sont des polymères solubles dans l'eau, lesquels possèdent de nombreuses applications dans l'industrie de la construction [2]. Ces matériaux sont également appelés réducteurs d'eau de haut rang. Ils font partie des adjuvants pour béton, lesquels sont définis, selon la norme EN 934-2, comme des matériaux qui sont ajoutés au

béton pendant le processus de malaxage, dans des quantités inférieures à 5% de la masse de ciment, afin de modifier ses propriétés à l'état frais et à l'état durci.

Il existe différents types de super plastifiant communément utilisés dans les matériaux de construction. Ils se différencient principalement par la nature des groupements anioniques portés par le polymère et par la façon dont ils engendrent une force répulsive entre les grains de ciment. Toutefois, quelle que soit leur nature, les superplastifiants apportent sans conteste des améliorations technologiques aux bétons qui les incorporent dans leur formulation.

4.1.2. Classification

On peut classer les adjuvants selon leur fonction dans les catégories suivantes :

- Les super plastifiants
- Les retardateurs
- Les accélérateurs
- Les hydrofuges

On peut également citer d'autres adjuvants tels que :

- Les produits de cure
- Les entraîneurs d'air
- Les ajouts cimentaires

a. Les accélérateurs

➤ Accélérateurs de prise

C'est un adjuvant dont la fonction principale est d'accélérer le début et la fin de prise du ciment. Ils agissent en modifiant sélectivement la solubilité et la vitesse d'hydratation des liants constituants anhydrides. Mais en contrepartie, l'accélération recherchée peut entraîner une résistance mécanique moins élevée que le témoin pendant les premières semaines.

➤ Accélérateur de durcissement

Ces adjuvants ont la fonction principale d'accélérer le développement des résistances initiales du béton. L'utilisation d'un super plastifiant haut réducteur d'eau permet d'obtenir des temps de prise rapides et un durcissement accéléré.

b. Les supers plastifiants

Un super plastifiant est un adjuvant qui, introduit dans un béton, un mortier ou coulis, a pour fonction principale de provoquer un accroissement important de l'ouvrabilité du mélange. En se fixant sur les grains de ciment, elle modifie la nature des charges électriques. L'action d'un super plastifiant passe nécessairement par son absorption sur les particules de ciment. Les grains de ciment ont alors tendance à s'éloigner les uns des autres du fait qu'ils ont tous la même charge et s'entourent d'un film d'eau très mince.

4.1.3. Modes d'action des super plastifiants

Le pouvoir fluidifiant des super plastifiants s'exerce par une combinaison de phénomènes physiques se produisant instantanément (à $t = 0$) [2]. Ces processus sont l'adsorption des super plastifiants, la répulsion électrostatique et l'encombrement stérique. La dispersion des particules de ciment par les super plastifiants conduit à une évolution des propriétés rhéologiques des pâtes et mortiers de ciment.

a. Adsorption des super plastifiants sur les grains de ciment

L'étude de l'effet dispersant des superplastifiants, menée par Flatt et al. [11] sur des suspensions modèles, a montré que seuls les superplastifiants adsorbés contribuaient à la dispersion. Les molécules de super plastifiant doivent d'abord s'adsorber à la surface des grains de ciment et, seulement après, elles peuvent exercer leur pouvoir fluidifiant.

L'adsorption des super plastifiants est influencée par les caractéristiques physicochimiques du ciment. Il a été rapporté que l'adsorption des polymères est meilleure lorsque la finesse du ciment est élevée [11]. Par ailleurs, les différentes phases cimentaires n'adsorbent pas les mêmes quantités de superplastifiant. Cela a pour origine les différents potentiels de ces composés.

b. La répulsion électrostatique

La dispersion engendrée par les superplastifiants est majoritairement due à la répulsion électrostatique [3]. Les superplastifiants s'adsorbent à la surface des particules de ciment par des interactions coulombiennes, des forces de Van der Waals ou des liaisons hydrogènes [3].

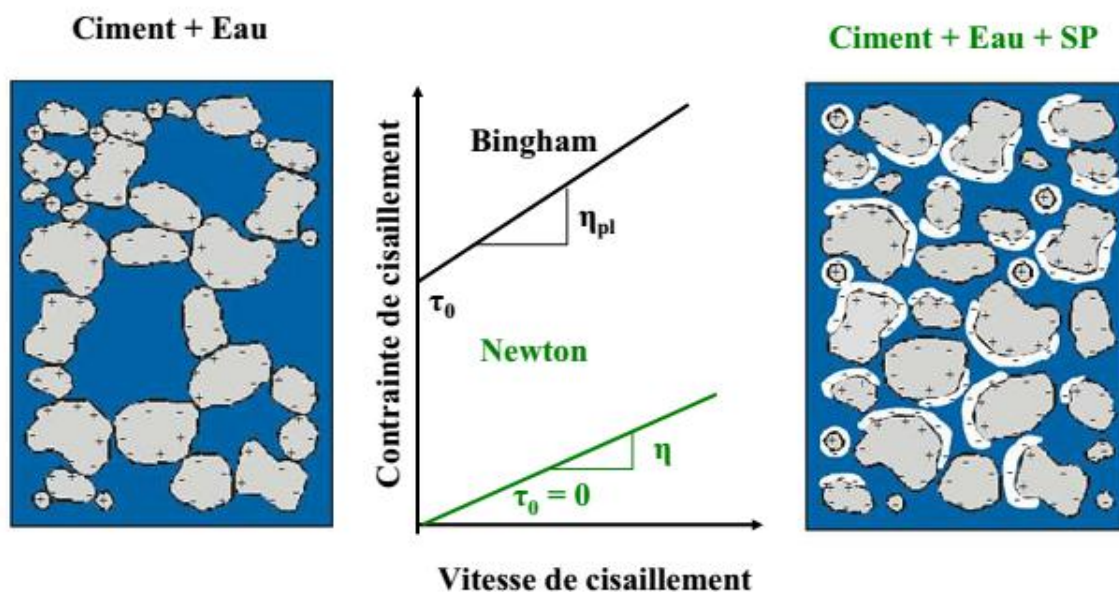
En se fixant sur les grains de ciment, les polymères anioniques changent la charge des particules de ciment.

c. L'encombrement stérique :

Les polymères anioniques s'adsorbent à la surface des particules et les chaînes secondaires s'étendent aux alentours. Lors du rapprochement de deux grains de ciment, les couches d'adsorption des super plastifiants se chevauchent. La densité de chaînes augmente et les molécules d'eau vont s'accumuler dans la solution. Cela a pour conséquence l'apparition d'une pression, laquelle maintient les particules séparées l'une de l'autre. L'encombrement stérique est donc une force purement répulsive, qui n'agit que si les molécules sont très proches.

d. Effets rhéologiques

En l'absence de super plastifiant, les particules de ciment s'agglomèrent en raison des charges opposées présentes à leur surface. Ce phénomène va se traduire par un seuil d'écoulement au niveau des propriétés rhéologiques. En présence de super plastifiant, les polymères organiques vont limiter l'agglomération des grains, ce qui aura pour conséquence une diminution voire une suppression du seuil d'écoulement [8]. De plus, lors de la dispersion des particules, la structure floculée va se dissoudre et l'eau retenue à l'intérieur va être libérée, de telle façon qu'elle pourra à nouveau contribuer à l'écoulement. La figure suivante reprend les effets des superplastifiants sur les propriétés rhéologiques d'une pâte de ciment.



4.1.4. Applications des superplastifiants

Depuis leur apparition, les superplastifiants ont trouvé de nombreuses applications dans l'industrie de la construction. L'emploi des superplastifiants permet de nombreuses améliorations techniques et technologiques tout au long du processus de fabrication du béton [12].

La maniabilité élevée associée à une bonne cohésion du matériau facilite les différentes étapes de la mise en œuvre :

- ✓ Si la quantité d'eau n'est pas trop diminuée, le pompage du béton peut être réalisé avec des vitesses plus rapides, sur des distances plus longues et à des hauteurs plus élevées, tout en diminuant la pression de 20 à 30 %.
- ✓ La mise en place nécessite moins de vibrations, voire aucune dans le cas des bétons autocompactants ou autoplaçants, d'où une économie de temps, de main d'œuvre et de matériel.

Le béton peut être placé dans des endroits difficiles d'accès grâce à sa grande fluidité obtenue, ce qui serait impossible avec un béton classique.

- ✓ Des avantages sont aussi apportés sur le long terme Les armatures sont parfaitement enrobées, même dans les éléments qui en possèdent un taux élevé, ce qui réduit considérablement les risques de corrosion.
- ✓ Les résistances mécaniques et la durabilité des bétons sont augmentées du fait de la faible porosité du matériau produit avec un volume réduit d'eau de gâchage.

4.2. Les fibres

4.2.1. Définition du béton de fibres

On appelle béton de fibres, un béton dans lequel on a incorporé une armature par inclusion directe de fibres isolées au moment du gâchage ou de la projection. Les fibres sont assimilables à un granulats spécial de forme très allongée et de forte résistance à la traction, susceptible d'améliorer légèrement la résistance à la traction du matériau et de ralentir la propagation des fissures. En pontant les fissures, les fibres améliorent le comportement post

fissuration de la matrice en maintenant une forte portance pendant l'accroissement des déformations [15].

La diversité des composites est essentiellement due à la variabilité du renfort fibreux qui peut être différencié selon son aspect géométrique (fibres courtes, longues, droites, ondulées, ...) ou le type de matériau constitutif (fibres polymériques, naturelles, métalliques, de verre...).

4.2.2. Différent types de fibres

Les fibres sont classées selon leur origine (naturelle, synthétique ou artificielle), leur forme (droite, ondulée, aiguille, ...etc.), leurs dimensions (macro ou microfibres) et leurs propriétés mécaniques. Les principales fibres utilisées sont les fibres organiques et les fibres inorganiques.

a. Les fibres organiques

Ces fibres ne sont pas utilisées pour renforcer le béton, vu que leurs caractéristiques mécaniques sont inférieures à celles du béton. Elles sont par contre mieux adaptées pour le renforcement des sols, notamment dans le corps des chaussées. Dans cette catégorie de fibres, nous pouvons citer :

- Les fibres végétales et animales

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).

- Les fibres synthétiques

cette famille regroupe plusieurs types de fibres comme le nylon, le polypropylène, l'acryle, le polyester ...etc.). Elles sont apparues à la fin du XIXème siècle sous le nom de rayonne. Elles sont dérivées de la cellulose naturelle. Aujourd'hui, la plupart des fibres synthétiques proviennent de produits dérivés du pétrole et de polymères dont la structure ressemble à celle des matières plastiques.

b. Les fibres non organiques

Ces fibres ont une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité élevé, comparativement à la matrice. Dans cette catégorie de fibres, nous pouvons citer :

- **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'ignifugeage, se sont aujourd'hui révélées cancérogènes.

- **Fibres artificielles** : ce type de fibres est le plus utilisé dans le domaine industriel en général et dans le domaine du génie civil en particulier. Il regroupe les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres métalliques et autres. Elles sont aujourd'hui les plus répandues dans l'industrie de la construction.

Tableau -4- type de fibres

Famille de fibres	Matériaux	caractéristiques
Fibre métallique	Acier, inox, fonte	Bonne résistance à la flexion, à la traction et à la rupture. Réduction de la dimension des fissures
Fibres organique	Aramide, Carbone, Kevlar, Polyamide Polypropylène	Réduction de la fissuration au jeune âge (retraits plastiques). Fibres souples, ce qui améliore leur ouvrabilité. Peu résistantes aux températures élevées (140-170°C maximum).
Fibres minérales	Basalte, Mica, Verre	Excellente tenue au feu (800°C maximum). Bonne isolation thermique. Permet la fabrication de parois très minces

4.2.3. Rôle des fibres

Le rôle principal des fibres est de mieux contrôler la fissuration du béton en état de service en limitant l'ouverture des fissures et de transformer le comportement fragile du béton en un comportement ductile. Le béton présente toujours des microfissures dues à différentes causes telles que le retrait, les contraintes thermiques, les contraintes appliquées au jeune âge, ...etc. Lorsqu'un béton fissuré est soumis à une traction, les lignes de tension s'infléchissent (figure)

et les tensions aux extrémités de la fissure augmentent [16]. Cette inflexion est due au fait que la charge ne peut pas être transmise par la fissure.

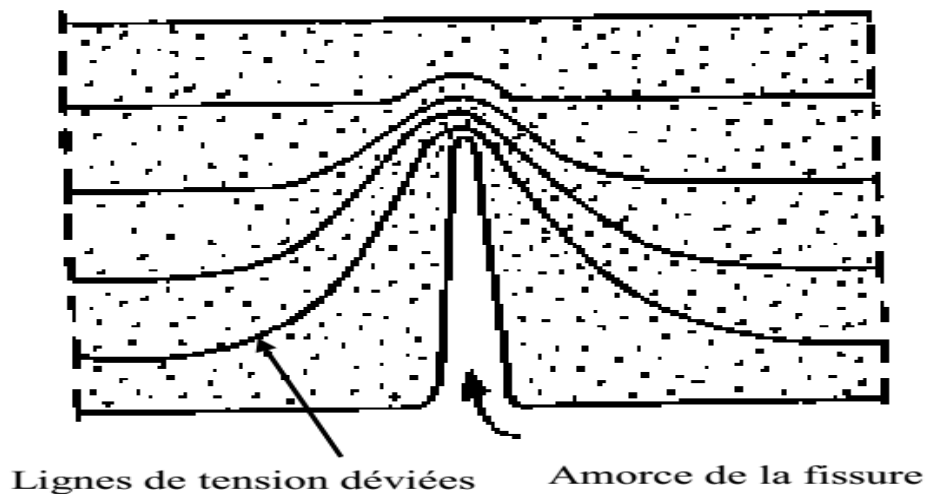


Figure -8- béton sans fibre sollicité en traction

Dans le cas d'un béton avec fibres, sollicité en traction, une partie de l'effort est reprise par les fibres pontant les fissures (Figure) ; cela empêche la rupture fragile du matériau car la propagation des fissures nécessiterait une plus grande énergie.

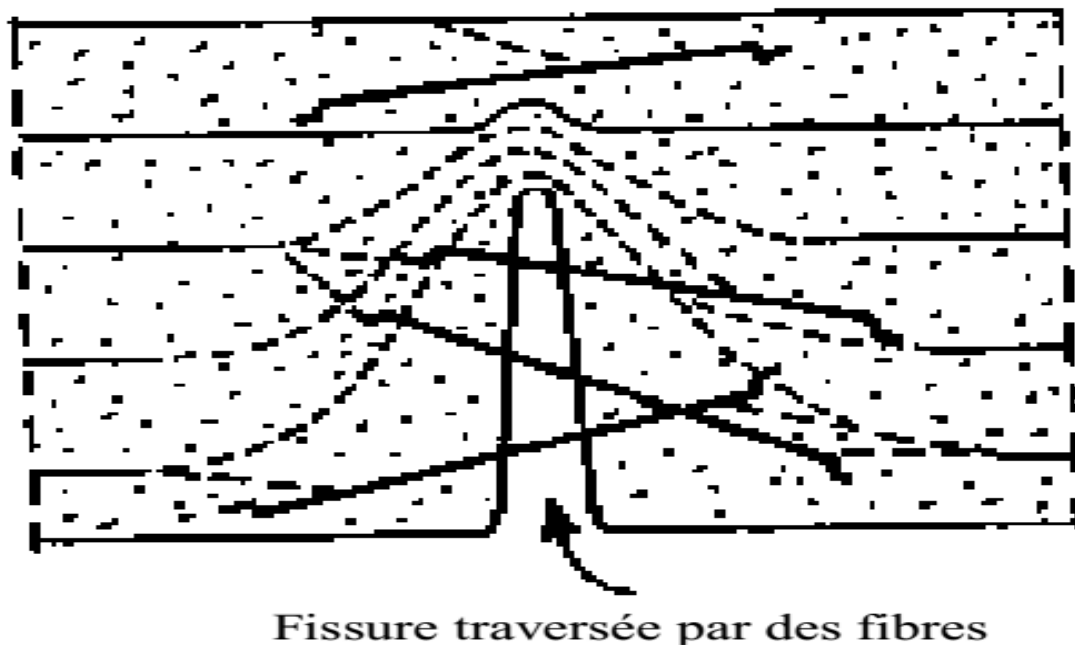


Figure -9- béton avec fibres sollicité en traction

4.2.4. Formulation du béton de fibres

Les méthodes de composition des bétons renforcés par des fibres métalliques [17], pour la plupart empiriques, sont basées essentiellement sur un grand nombre d'études expérimentales. Elles aboutissent à des recommandations qui ne sont pas adaptées à toutes les utilisations que l'on fait du béton de fibres et ne permettent pas de tirer le meilleur parti de ce composite. Suivant l'application industrielle envisagée, la composition du béton renforcé de fibres métalliques doit être à chaque fois spécifique et conduire à un composite optimisé vis-à-vis de l'objectif visé.

Pour mieux optimiser la composition des bétons de fibres, le laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) propose une méthode expérimentale basée sur la méthode de BARON LESAGE, utilisée pour les bétons courants [17]. Cette méthode est basée sur deux hypothèses:

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

5. Propriétés du béton

5.1. Etat frais

5.1.1. Masse volumique (NF EN 12350-6)

Le béton frais sera mis en place dans un récipient, celui-ci doit être rigide et étanche à l'eau et avec une masse et un volume connu déjà.

Après remplissage du béton dans le récipient en deux couches avec piquages, on arase sa surface avec une truelle et on le pèse ensuite pour calculer sa masse volumique selon la formule suivante :

$$MV = (m_2 - m_1) / V$$

Où :

- MV est la masse volumique du béton frais, en kilogrammes par mètre cube ;
- m_1 est la masse du récipient, en kilogrammes ;
- m_2 est la masse du récipient plus la masse de béton contenu dans le récipient, en kilogrammes;
- V est le volume du récipient, en mètres cubes.

5.1.2. Affaissement au cône d'Abrams (NF EN 12350-2)

- La plaque d'appui et le moule sont légèrement humidifiés et le moule est fixé contre la plaque d'appui.
- Le remplissage du béton s'effectue en trois couches, pour chaque couche le béton est piqué 25 reprise
- L'arasement du béton en excès de la dernière couche fait à l'aide de la tige de piquage
- Le moule est ensuite retiré par une remontée verticale et régulière
- Immédiatement après avoir retiré le moule l'affaissement mesuré par référence entre la hauteur du moule et le point le plus haut du béton affaissé.

5.2. Etat durcie

5.2.1. Masse volumique (NF EN 12390-7)

$$M_v = M / V$$

M_v : masse volumique.

M : masse de l'éprouvette.

V : volume de l'éprouvette.

5.2.2. Résistance à la compression (NA 5075NF EN 1239)

Cet essai est effectué sur une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester et cela conformément à la norme NF P 18- 406 [42].

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression du béton durci, qui peut être mesurée en laboratoire sur des éprouvettes. Les résistances sont mesurées sur des éprouvettes cylindriques, cubiques ou prismatiques.

L'éprouvette, cylindrique ou cubique, moulée ou carottée, est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section soumise au chargement de l'éprouvette.



Figure -11- essai de compression

5.2.3. Résistance à la flexion (NA 428 NF EN 12390-5)

Ce mode opératoire permet de déterminer la résistance en flexion des éprouvettes en béton. L'éprouvette prismatique est soumise à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. la charge maximale atteinte est enregistrée à la résistance à la flexion calculée.

La machine d'essai doit être de force appropriée conforme à la norme NF EN 12390-4. Les essais sont réalisés sur éprouvettes prismatiques (moulées ou sciées) conformes à la norme NF EN 12390-1. Une rectification est admise pour rendre conforme les caractéristiques des prismes.

6. Traitement thermique

6.1. Introduction

Du fait de forte demande de production, l'industrie de la préfabrication a souvent recouru à l'utilisation de la température. Plusieurs méthodes sont développées et appliquées afin d'avoir dans un laps de temps court des niveaux de résistance suffisante. Une température élevée,

accélère les réactions chimiques d'hydratation et affecte avantageusement la résistance au jeune âge. Elle réduit la période dormante et la structure globale de la pâte de ciment hydraté s'établit très tôt. Cet effet sur la résistance s'inverse entre 7 et 15 jours d'hydratation du fait qu'une hydratation rapide présente une structure physique moins compacte. En effet, une vitesse d'hydratation rapide due à des températures élevées retarde l'hydratation subséquente et conduit à une distribution non uniforme de produits hydratés. Par exemple, une augmentation de 20% de porosité est mesurée sur une pâte de ciment mûrie à 80°C.

6.2. DEFINITION

Un traitement thermique consiste à assujettir, par un procédé quelconque, la température du béton, juste après sa mise en œuvre et pendant une durée limitée, à des valeurs fixées a priori.

Il a pour objectif principale de conférer au béton des performances mécaniques accrues au jeune âge et de rendre les températures homogènes dans l'ensemble du béton constituant l'élément traité.

6.3. INTERET D'UN TRAITEMENT THERMIQUE

Le traitement thermique d'un béton frais est une technique qui permet :

- Le bétonnage par temps froid.
- L'accélération des cadences par réduction du temps de prise donc un avancement plus rapide des chantiers et une rotation accélérée.
- D'effectuer dans un délai raisonnable des opérations d'usinage
- De réduire les délais de livraison
- La facilité du réglage de fabrication par la prise en compte plus des informations provenant du contrôle des performances
- D'éviter l'influence de certaines conditions climatiques généralement les produits en béton sont stockés pendant un certain temps sur des parcs alors que leurs résistances, sont encore faible ce qui les rend sensible aux intempéries

6.4. CYCLE DE TRAITEMENT THERMIQUE DES BETONS

- En règle générale, la méthode de traitement thermique et son cycle doivent être déterminés en prenant en compte la géométrie des éléments, le type de ciment, la composition du béton, sa plasticité ainsi que les conditions de fabrication de façon à ce

que le démoulage, l'éventuelle mise en précontrainte, le levage ou le transport des éléments puissent être effectués en fin de Traitement.

- Les modalités de traitement doivent être étudiées de façon à éviter tout choc thermique ainsi que l'apparition de fissures ou de défauts de surface qui pourraient nuire à la durabilité du béton ou à l'aspect des éléments. C'est aussi l'objectif des règles définies dans la norme NF EN 13369 règles communes pour les produits préfabriqués en béton.
- Ces recommandations sont communes aux différents modes de traitement réalisés avec apport de chaleur ; cependant des précautions particulières doivent être prises en fonction de la technique de traitement choisie. [18]

6.5. Règle pour la réalisation de traitement thermique

En général, un cycle de traitement thermique comporte quatre phases définies chacune par un couple durée-température ou bien par une vitesse :

- **La phase de prétraitement (avant t1)**
- **La phase de montée en température (t1 à t2)**
- **La phase de maintien à la température de palier (t2 à t3)**
- **La phase de refroidissement (t3 à t4)**

7. Conclusion

À l'issue de cette étude bibliographique, qui constitue une restitution des caractéristiques connues des matériaux entrant dans la composition du béton préfabriqué, les points suivants peuvent être soulignés :

- Le béton est un matériau de construction formé par un mélange de granulats, de sable, et d'eau aggloméré par un liant hydraulique (ciment), éventuellement complété par des adjuvants et des additions.
- Le ciment Portland est un matériau inorganique. Il est principalement composé des quatre phases minérales du clinker (C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF) et de sulfates de calcium (di hydrate, hémi hydrate et anhydre). Des composés mineurs peuvent également être présents, en particulier des alcalins qui sont soit sous la forme de sulfates soit insérés dans le réseau cristallin des phases du clinker.
- Les super plastifiants sont des matériaux organiques multi composants. ils sont utilisés pour améliorer les propriétés rhéologiques des systèmes cimentaires. Ainsi pour améliorer les performance mécanique et phtisque des bétons par la réduction de rapport E/C et la diminution de la porosité.
- . Les fibres sont assimilables à un granulat spécial de forme très allongée et de forte résistance à la traction, et de ralentir la propagation des fissures.
- Une température élevée, accélère les réactions chimiques d'hydratation et affecte avantageusement la résistance au jeune âge. Et négativement à long terme à cause d'une élévation de porosité.

MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALES

Matériaux et procédure expérimentale

introduction

Le présent travail propose une méthodologie simplifiée, s'appuyant sur des méthodes de formulation de béton connue dans la littérature et sur des essais d'optimisation au laboratoire permettant la détermination d'une composition d'un béton fibré exige des hautes performances à jeune Age (15MPa) en se basant sur des essais de résistance à la compression (8h, 2j, 7j, 28j) et des mesures d'ouvrabilité. Pour ce faire, une large caractérisation physique et mécanique des matériaux utilisés a été conduite. Suivie d'une étude préliminaire ayant pour objectif d'étudier la rhéologie du couple ciment-adjuvant et en fin la composition et le traitement thermique.

Pour réaliser le travail, on passera par les étapes suivantes :

1ere étape : analyse physico-chimique et mécanique des constituants.

2ème étape : étude rhéologique du couple ciment-adjuvant

3ème étape : formulation et traitement thermique

4ème étape : conclusion

Matériel utilisés :

-balance électrique

-malaxeur

-étuve de séchage.

-tamiseuse pour l'analyse granulométrique

-appareil Vicat

-Cône d'Abrams

-appareil de résistance (compression et flexion).

1. Etude et contrôle de constituants

Dans cette partie on détermine les caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton. La connaissance de leurs caractéristiques est intéressante car chacune peut influencer sur les résultats de notre étude.

1.1. Ciment

Deux types de ciment sont utilisés dans ce travail. sont des ciments portland avec ajouts (CPJ) de classe de résistances 52.5 sarie et 42.5 matine et qui proviennent de la meme cimenterie de LAFARGE MSILA (ciment LCM type CEMII)

1.1.1. Ciment 52.5 SARIE

ciment portland au calcaire NA442 CEMII/A-L52.5N de classe de résistance très elvés même au jeune âge avec un faible retrait et un durcissement rapide.

❖ Caractéristiques physiques

N° d'essais	Caractéristiques	Résultats
-------------	------------------	-----------

1	consistance normale	28,60 %
2	début de prise	120 Min
3	fin de prise	270 Min
4	poids spécifique	3,1 g /cm ³
5	SSB	4943 cm ² /g
6	expansion à chaud (100°C)	1.0 mm

Tableau -5- Les essais physiques de CEMII52.5.

❖ caractéristiques mécanique

Tableau -6- résistance à la compression de CEMII52.5.

Age	norme	Résultats (MPa)
2 jours	NA 234 (essai de mortier normalisé)	28.27
7 jours		47.60
28 jours		56.80

❖ composition chimique

Tableau -7- composition chimique de CEMII52.5.

constituants	Résultats (%)
SiO ₂	19.21
Al ₂ O ₃	4.55
Fe ₂ O ₃	2.98
SO ₃	2.38
CaO	62.25
Na ₂ O	0.26
K ₂ O	0.66

Chlorure	0.03
MgO	3.43

❖ composition minéralogique du clinker

Tableau -8- composition minéralogique du clinker CEMII52.5.

Constituants	Résultats (%)
Silicates tricalciques (C3S)	62
Aluminates tricalcique (C3A)	8

❖ Domain d'application

- préfabrication lourde et légère
- infrastructure et éléments de super structures nécessitant un décoffrage rapide
- travaux nécessitant des résistances élevées à jeune âge.

1.1.2. Ciment 42.5 Mâtine

ciment portland au calcaire NA442CEMII/B-L42.5N

❖ caractéristiques physiques

Tableau -9- Les essais physiques de CEMII42.5.

N° d'essais	Caractéristiques	Résultats
1	- consistance normale	26 %
2	- début de prise	150 Min
3	- fin de prise	290 Min
4	- poids spécifique	3,00g/cm ³
5	- SSB	4293 cm ² /g
6	- Expansion à chaud (100°c).	1 mm

❖ **caractéristiques mécaniques**

Tableau -10- résistance à la compression

Age	norme	Résultats (MPa)
2 jours	NA 234 (essai de mortier normalisé)	20.80
7 jours		37.61
28 jours		45.10

❖ **composition chimique**

Tableau -11- composition chimique de CEMII42.5.

constituants	Résultats (%)
SiO ₂	18.62
Al ₂ O ₃	4.77
Fe ₂ O ₃	3.06
SO ₃	2.61
CaO	59.77
Na ₂ O	0.08
K ₂ O	0.62
Chlorure	0.02
MgO	1.87

❖ **composition minéralogique du clinker**

Tableau -12- composition minéralogique du clinker CEMII42.5.

Constituants	Résultats (%)
Silicates tricalciques (C3S)	61
Aluminates tricalcique (C3A)	7.5

❖ **domaines d'application**

- préfabrication léger.
- béton de haute performance.

1.2. Les granulats

1.2.1. Le sable

Deux sable ont été utilisés : sable grossier de bouzegzza (0/3) et sable fin de boussada (0/1).

Après traitement des deux sables, on a obtenu les résultats des essais physiques et l'analyse granulométrique suivant :

❖ **caractéristiques physiques**

Tableau -13- Caractéristiques du sable de Bouzegzza

Caractéristique	Résultat
Masse volumique	1,68 g/cm ³
Masse spécifique	2.68 g/cm ³
Teneur en eau	1.89 %
E.S.V	74.66 %
E.S.P	70.48 %

❖ **Analyse granulométrique et classe granulaire**

-Prise d'essais : 998.3

Tableau -14 - analyse granulométrique du sable de Bouzegzza.

Ouverture du tamis (mm)	Poids (g)	Pourcentage (%)	
	Refus cumulé	Refus cumulé	Tamisât
6,3	00	00	100
5	9.6	0.9	99.1
4	66.8	6.69	93.31

2	421.8	42.25	57.75
1	655.8	65.69	34.31
0,5	788.8	79.01	20.99
0,125	902.6	90.41	9.59
0,063	920.4	92.19	7.80
Fond de tamis	921	92.26	/

Module de finesse de sable bouzzegzza est : 2.84

❖ Caractéristiques physiques

Tableau -15- Caractéristiques du sable de Boussaâda.

Caractéristique	Unité	Résultat
Masse volumique	g/cm ³	1,45
Masse spécifique	g/ cm ³	2.63
Teneur en eau	%	3.42
E.S.V	%	84.55
E.S.P	%	75.34

❖ Analyse granulométrique et classe granulaire

-Prise d'essais : 846.4

Tableau -16- analyse granulométrique du sable de Boussaâda

Ouverture du tamis (mm)	Poids (g)	Pourcentage (%)	
	Refus cumulé	Refus cumulé	Tamisât
6,3	00	00	100
5	00	00	100
4	00	00	100
2	00	00	100

1	00	00	100
0,5	0.6	0.07	99.93
0,125	829.6	98.01	1.99
0,063	844.4	99.76	0.24
Fond de tamis	844.6	99.78	0.22

Module de finesse de sable Boussaâda est 0.99

D'après l'analyse granulométrique on voit que le sable **S1** dont le module de finesse est **Mf1= 2.84** est un peu grossier et nécessite une correction.

Pour la correction on utilise le sable **S2** avec un module de finesse **Mf2= 0.9**

❖ **La correction du sable selon la méthode d'ABRAMS**

➤ **Calcule du Mf et % des sables**

Tableau -17- module de finesse des sables.

sable	Tamis	5	4	2	1	0.5	0.125	Mf
S1		0.9	6.69	42.25	65.69	90.41	90.41	2.84
S2		0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	98.6	0.9

$$S1\% = (Mf - Mf2) / (Mf1 - Mf2) * 100 = 86.6\%$$

$$S2\% = (Mf1 - Mf) / (Mf1 - Mf2) * 100 = 13.4\%$$

❖ **Caractéristiques physiques du sable corrigé**

Tableau -18- analyse granulométrique du sable de Boussaâda et sable de bouzegza.

Ouverture du tamis (mm)	Poids (g)	Pourcentage (%)		Module de finesse
	Refus cumulé	Refus cumulé	Tamisât	
6,3	00	00	100	
5	00	0.8	99.2	
4	00	5.8	94.2	
2	00	36.6	63.4	

1	00	56.9	43.1	2.6
0,5		68.5	31.5	
0,125		91.4	8.6	
0,063		93.2	6.8	
Fond de tamis	/	/	/	

L'analyse granulométrique ainsi que le module de finesse ($M_f = 2.6$) et l'équivalent de sable, montre que le sable possède des caractéristiques lui permettant d'être utilisé dans la fabrication de notre béton.

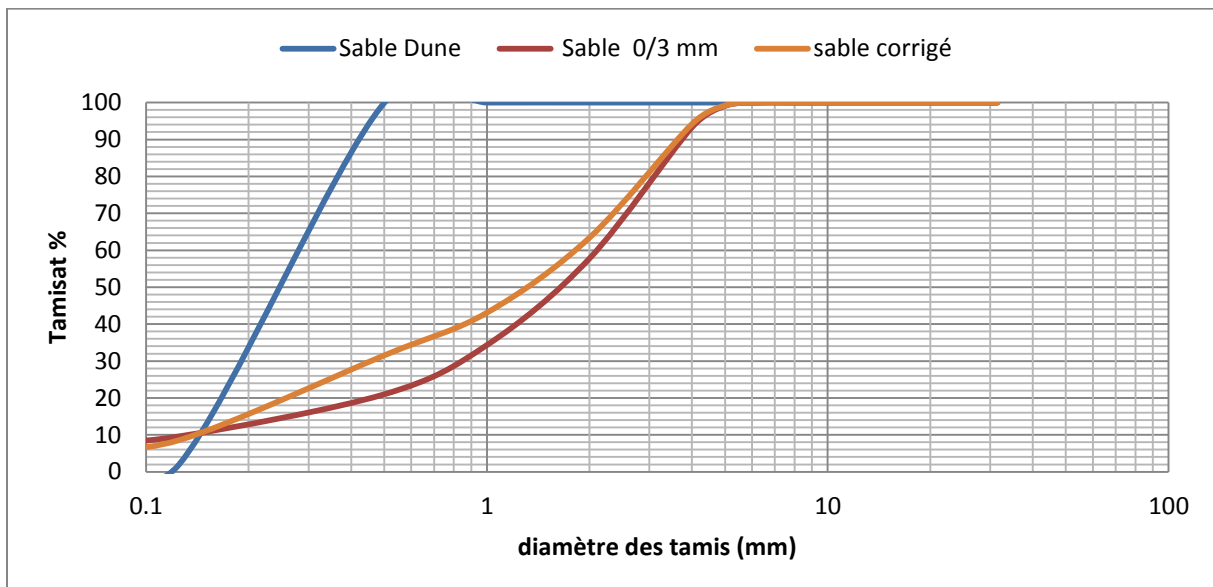


Figure -13- courbe granulométrique de sable corrigé

1.2.2. Le gravier

Pour les granulats nous utilisons deux fractions de gravier (3/8) et (8/15) de la même carrière de bouzegza.

1.2.2.1. Gravier 3/8

prise essai : 1698.8g

❖ caractéristique physiques

Tableau -19- Caractéristique du (G^3_8) de Bouzegza

Caractéristiques	résultats
Masse volumique	1.58 g/cm ³
Masse volumique imbibée	2.6 g/cm ³
Coefficient d'aplatissement	27 %
Coefficient Los Angeles	23 %
Absorbation	0.35 %
Teneur des fines	0.81

❖ **Analyse granulométrique**

Tableau -20- Analyse granulométrique du (G 3/8).

Ouverture du tamis (mm)	Poids (g)	Pourcentage (%)	
	Refus cumulé	Refus cumulé	Tamisât
10	0.0	0.0	100
8	0.0	0.0	100
6.3	438.8	25.83	74.17
5	1200.2	70.65	29.35
4	1554.6	91.51	8.49
2	1683.8	99.11	0.89
1	1684.8	99.17	0.83
0.063	/	/	/
Fond de tamis	1685	99.19	0.81

1.2.2.2. Gravier 8/15

prise essai : 3098.2g

❖ **caractéristique physiques**

Tableau -21- Caractéristique du gravier de Bouzegzza

Caractéristiques	résultats
Masse volumique	1.58 g/cm ³
Masse volumique imbibée	2.67g/cm ³
Coeff d'aplatissement	6.01 %
Coeff Los Angeles	27 %
absorption	0.32 %
Teneur des fines	0.79 %

❖ **Analyse granulométrique**

Tableau -22- Analyse granulométrique du (G 8/15).

Ouverture du tamis (mm)	Poids (g)	Pourcentage (%)	
	Refus cumulé	Refus cumulé	Tamisât
16	163.8	5.28	94.72
14	912.2	29.44	70.56
12.5	1536.2	49.58	50.42
10	2374.4	76.63	23.37
8	2811	90.73	9.37
6.3	3048	98.37	1.63
5	3065.4	98.94	1.06
4	3070.8	99.11	0.89
Fond de tamis	3073.8	99.21	0.79

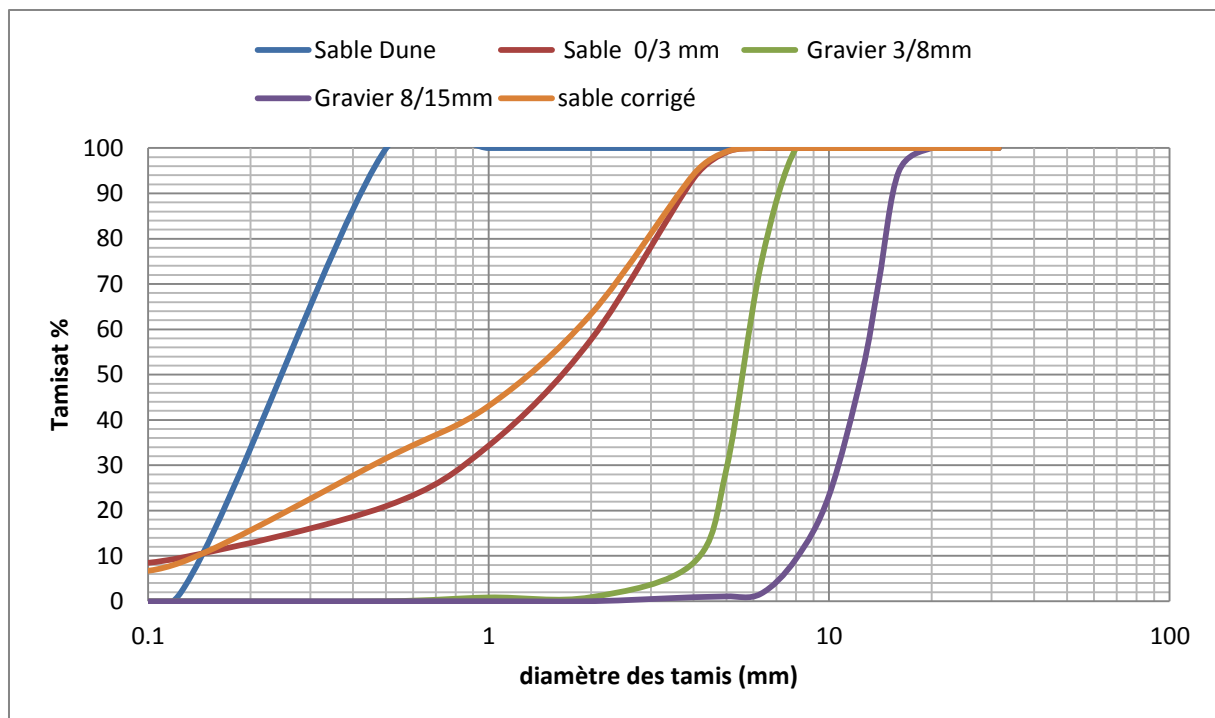


Figure -14- analyse granulométrique par tamisage.

1.3. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisé est l'eau potable de la wilaya d'Alger

1.4. Adjuvants

deux adjuvants sont incorporés dans ce travail chacun avec un type de ciment et voici leur présentation

1.4.1. SIKA VISCOCRETE KRONO 22HE

❖ présentation

Un super plastifiant haut réducteur d'eau de nouvelle génération non chloré et ne contient pas des constituants susceptibles de provoquer la corrosion d'armatures, il se présente sous la forme d'un liquide brun conforme à la norme NF EN 934-2

❖ caractéristiques

Tableau -23- Caractéristiques du KRONO 22HE

Forme	Liquide
Couleur	Brun
Ph	5
Densité	1.08
Extrait sec	44.2
Teneur en ion Cl	<0.1
Teneur en Na ₂ O	<2.5

❖ **domaine d'application :**

Permet la fabrication de :

- béton ferme à auto plaçant
- béton auto plaçant confectionné avec ou sans additifs
- béton à faible rapport E/C
- béton étuvé ou non

❖ **avantage**

- très forte réduction d'eau
- très forte résistance initiale
- amélioration de la durabilité par la diminution de rapport E/C
- confection de béton vibré ou à démoulage immédiat

❖ **plage de dosage**

- Plage d'utilisation recommandé est 0.4 à 1 % du poids de liant et selon les performances recherchées.

1.4.2. SIKA VISCOCRETE 665

❖ **présentation**

Le visocrete 665 est un super plastifiant réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré pour béton prêt à l'emploi compatible avec tous les ciments même avec un taux faible en C3A. Conforme à la norme NF EN 934-2.

❖ **caractéristiques**

Tableau -24- Caractéristiques du VISCOCRETE665.

Forme	Liquide
Couleur	Marron
Ph	4.8
Densité	1.06
Extrait sec	34.5
Teneur en ion Cl	<0.1
Teneur en Na ₂ O	<1.0

❖ **domaine d'application**

- béton plastique à auto plaçant transporter sur de longue distance et pompés.
- béton à longs maintien de rhéologie.

❖ **avantage**

- longue rhéologie
- évolution rapide des résistances à court et à longs termes
- réduction de la viscosité
- amélioration de la stabilité du béton et limitation de la ségrégation.

❖ **plage de dosage**

Plage d'utilisation recommandé est 0.4 à 2 % du poids de liant selon la fluidité et les performances recherchées.

1.5. Fibre

❖ **Présentation**

Sika fibre anti fissure est une fibre micro-synthétique polypropylène mono-filament permet d'améliorer la résistance à la fissuration par retrait plastique du béton et ainsi de réduire le risque de fissuration précoce.

❖ **Domaine d'application**

- résistance à la fissuration par retrait plastique
- béton de dallage et planchers

- éléments de voirie (chaussée, trottoirs, parking, piste....etc.)
- mortiers
- tenue au feu du béton
- ouvrage et structure soumis à des exigences de résistance au feu
- autres application
- béton nécessite une forte cohésion à l'état frais

❖ **Caractères généraux**

Grace à leur finesse les fibres sika anti fissure se dispersent très facilement et créent un réseau fibre très haute densité qui a pour principales conséquences :

- La limitation du faïencage et des fissurations dues au retrait plastique
- L'amélioration de la cohésion l'état frais en limitant les risques de ségrégation et de ressuage
- L'amélioration de la tenue au feu des bétons

❖ **Données technique**

Tableau -25- Caractéristique des fibres.

caractère	Valeur
Densité	0.91
Nature	Polypropylène
Longueur	12mm
Diamètre équivalent	34um
Densité linéaire	7.7dtex
Ténacité	34
Dosage	1 sac par m ³

2. Etude rhéologique

2.1. Introduction

la rhéologie du béton repose non seulement sur un choix adéquat du squelette granulaire (compacité. Ajout des fines. Diamètre maximale des grains...etc.)Mais aussi sur une qualité supérieure de la pâte de ciment qui vient se mettre dans les vides inter-granulaires du squelette. Des adjuvants peuvent être incorporés dans la pâte de ciment afin de garantir la fluidité et une certaine stabilité (résistance à la ségrégation).

le comportement rhéologique du béton est classiquement considéré comme celui d'un fluide à seuil (l'aptitude d'un béton à s'écoulé sous une faible contrainte)

cette partie est consacré à l'étude rhéologique des pâte du béton et a pour objectif de mettre en évidence et de comprendre l'influence du super plastifiant sur les propriétés rhéologiques des pates cimentaires à plusieurs dosages jusqu'au dosage optimum (point de saturation).

2.2. Matériaux, matériels et méthode :

Pour caractériser les propriétés rhéologiques des pâtes, nous avons utilisé les matériaux déjà cités dans le chapitre précédent comme l'ordre suivant :

mélange 1 : ciment CEMII 52.5N + super plastifiant viscocrete 665 et un rapport E/C de 0.28

mélange 2 : ciment CEMII 42.5N + acc de durcissement Krono 22HE et un rapport E/C de 0.26

Afin de déterminer le dosage de saturation en super plastifiant nous avons utilisé le viscosimètre rotatif à vitesse imposée Thermo Haake K10. Les réglages nécessaires avant de commencer l'essai concernent essentiellement la température de l'essai (20°C) l'ajustement du moteur et la réinitialisation de la vitesse. Nous avons utilisé une géométrie cylindrique pour notre programme caractérisée par un diamètre de cylindre intérieure de 18.4 mm celui de cylindre extérieure est de 23.6 mm, de longueur de 60 mm et de volume 55 cm³. Cela donne un gap de 2.6 mm qui est ainsi beaucoup plus grand que la taille de plus gros grains, ce qui favorise une bonne mesure.

-pour éviter les effets de prise. Tous les essais ont été réalisés à un temps égal après début de malaxage (t=5 min).

-Pour déterminer les paramètres déjà cités nous avons préparés des pâtes (ciment+ eau+ adjuvant) avec un rapport E/C fixe en variant le pourcentage en adjuvant jusqu'à le point de saturation.



Figure -15- viscosimètre rotatif Thermo Haak K10.

Tableau -26- les pâtes de ciments employés pour la caractérisation rhéologique.

Matériaux	CEMII42.5+KRONO 22		CEMII52.5+625	
Ciment (g)	500		500	
Eau (g)	130		140	
E/C	0.26		0.28	
S plastifiant %	0.8	1	1.1	1.3
	1.2	1.4	1.5	1.8

2.3. Résultats et discussion :

➤ ciment CEMII42.5+KRono22He

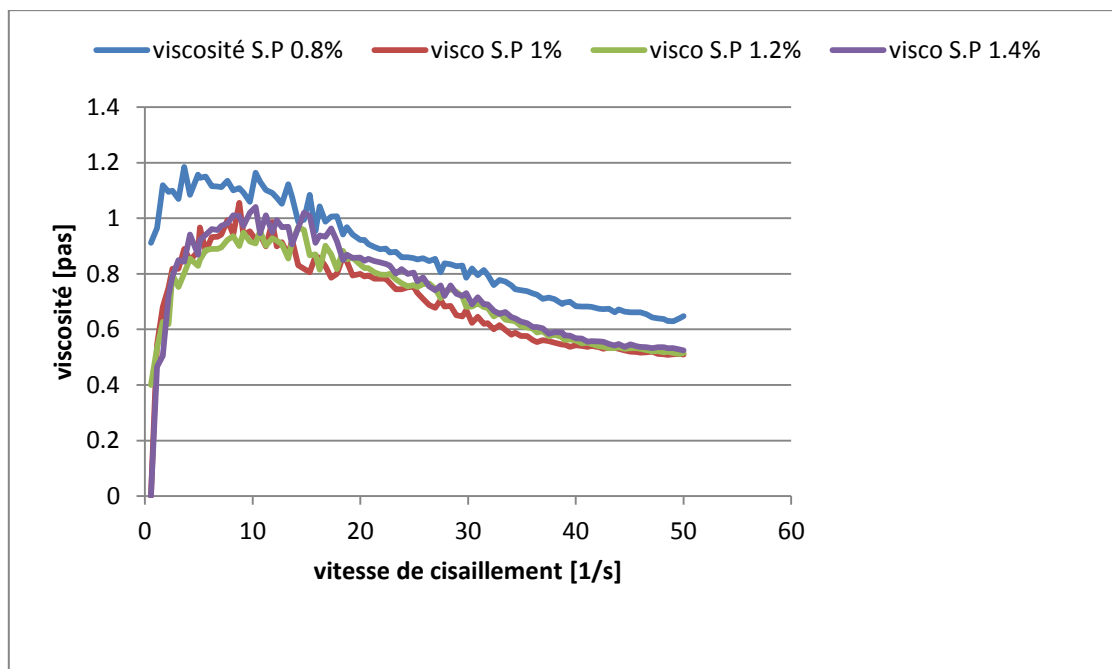


Figure -16- variation de viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement

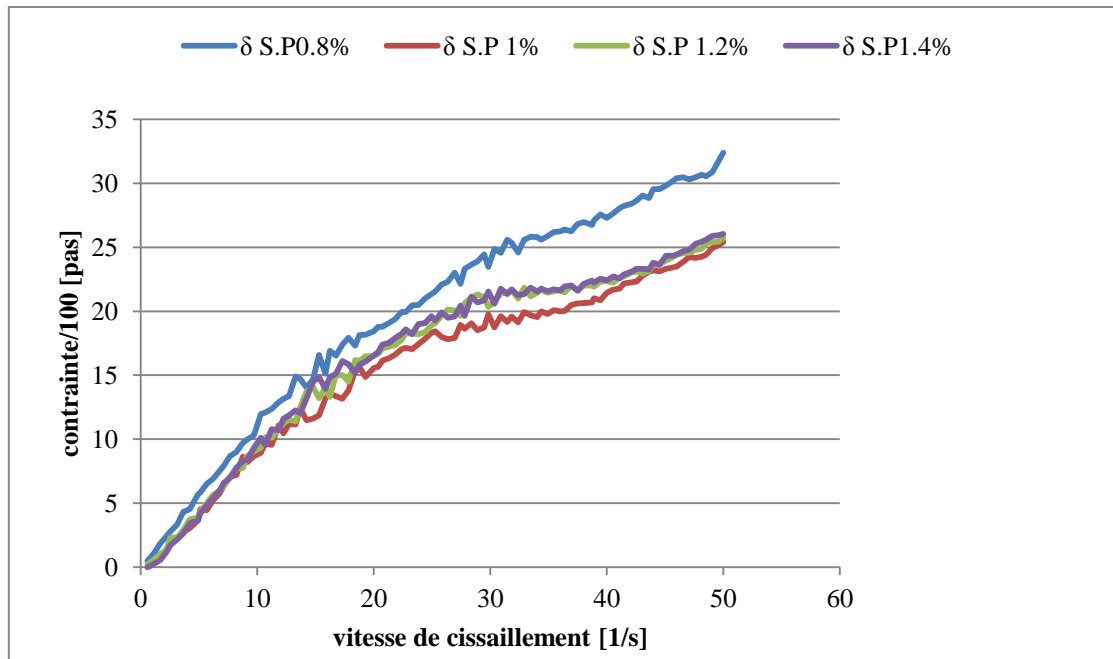


Figure -17- variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement

Les courbes de la viscosité et la contrainte marque une augmentation au dosage 1.2%. Donc le point de saturation de ciment CEMII42.5 MATINE en super plastifiant KRONO 22 HE a eu lieu pour un dosage de 1.5%.en dépassant se dosage des phénomènes de bullage et de ségrégation peuvent provoqués.

➤ **Ciment CEMII52.5 SARIE+SIKA VISCOCRETE 665**

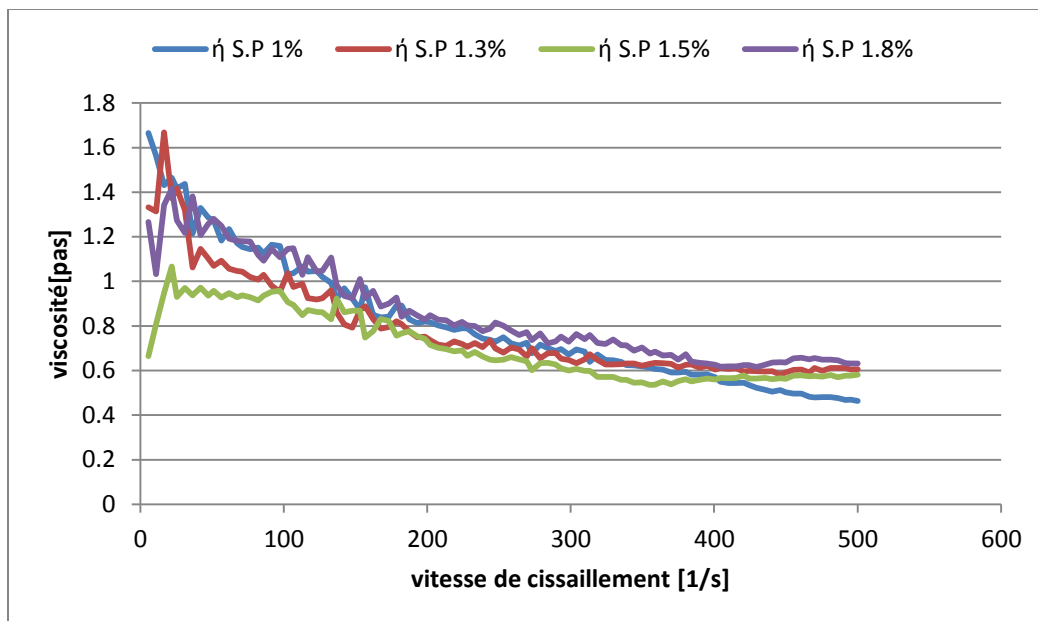


Figure -18- variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement

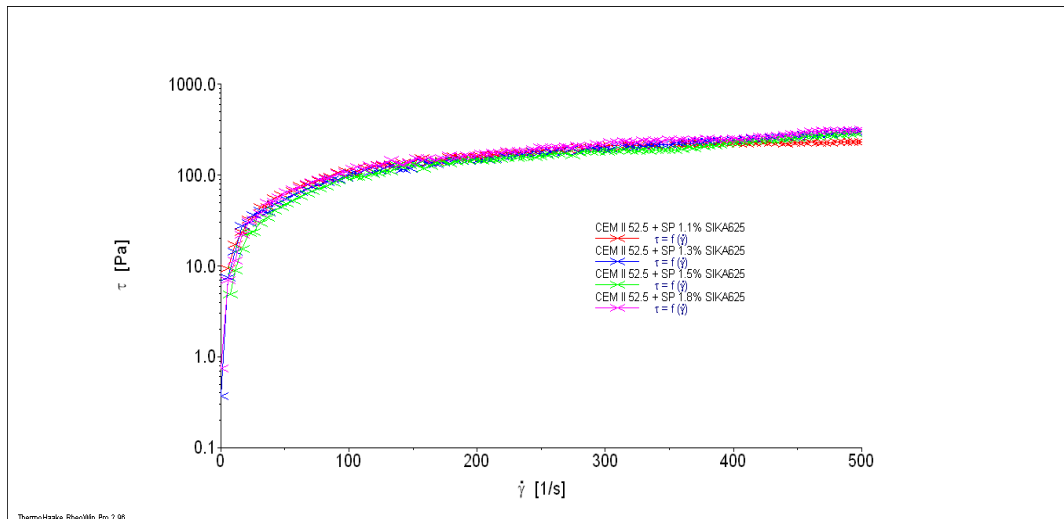


Figure -19- variation de la contrainte en fonction de la vitesse de cisaillement

Une diminution observée de la viscosité et la contrainte marquée jusqu'à le dosage 1.8% une croissance des valeurs est présentée. Donc le point de saturation de ciment CEMII52.5 Saria en super plastifiant Sika viscocrete 665 a eu lieu pour un dosage de 1.5%. En dépassant ce dosage des phénomènes de bullage et de ségrégation peuvent être provoqués.

2.4. Comportement rhéologique des pâtes

➤ ciment 42.5+Sika 22HE

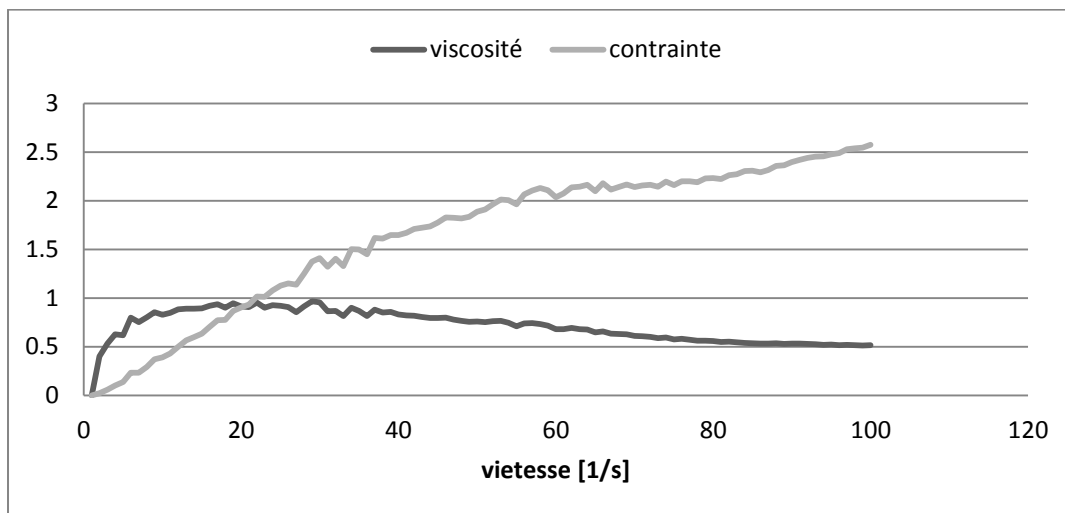


Figure -20- variation de la viscosité et la contrainte en fonction de la vitesse de cisaillement S.P1.2%

Une diminution de la viscosité dynamique lors de l'augmentation de la vitesse de cisaillement {0.968 au gradient de vitesse 141.2} après en marque une chute jusqu'au {0.515 au gradient

de vitesse 500.1} par contre les contraintes affichent une courbe croissante proportionnellement avec la vitesse de cisaillement. Le seuil de contrainte apparaisse au gradient {2.21 Pas}, une valeur de {324 Pas} comme une contrainte maximale.

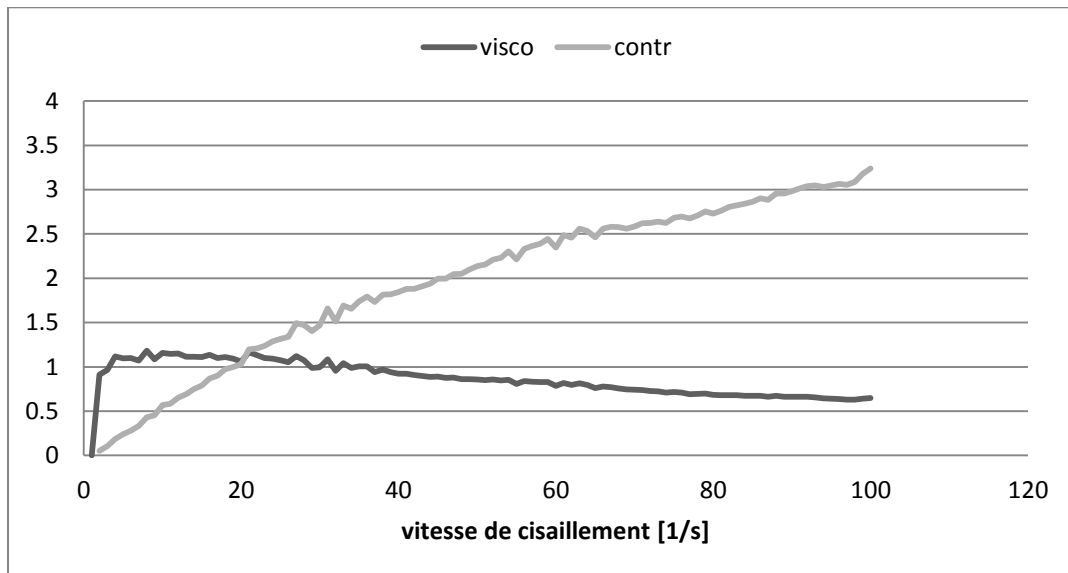


Figure -21- variation de la contrainte et de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement S.P0.8%

la viscosité dynamique diminue en augmentant la vitesse de cisaillement {1.184 au gradient de vitesse 36.52} après en marque une chute jusqu'au {0.648 au gradient de vitesse 500.1} par contre les contraintes affichent une courbe croissante proportionnellement avec la vitesse de cisaillement. Le seuil de contrainte apparaisse au gradient {5.17 Pas}. une valeur de {257.5 Pas} comme une contrainte maximale

➤ **ciment 52.5+viscocrete 665**

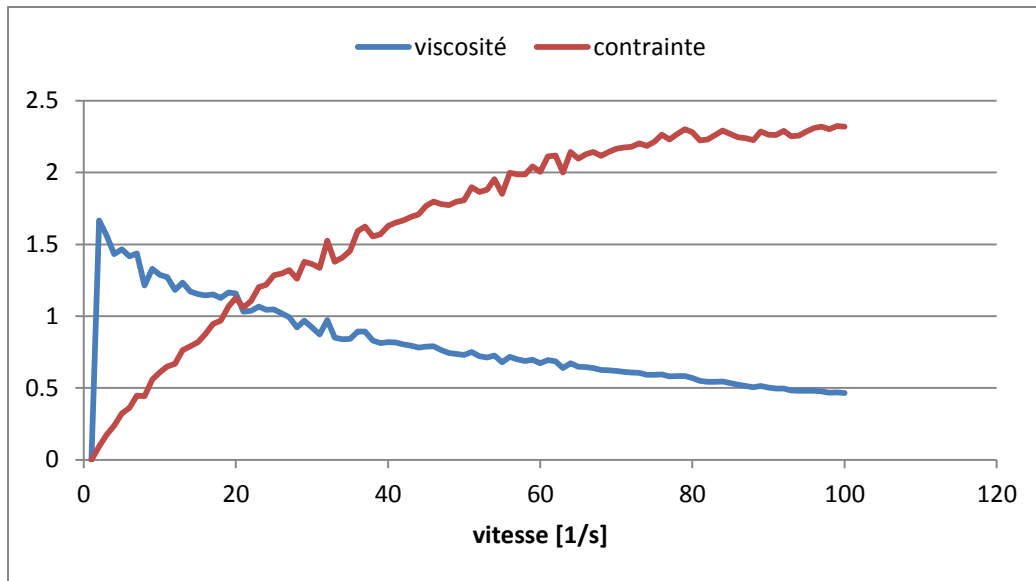


Figure -22- variation de la contrainte et de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement S.P1.1%

une relation proportionnelle des contraintes avec la vitesse de cisaillement et une diminution de la viscosité après qu'elle touche une valeur maximale de {1.66 Pas.s} jusqu'au la valeur {0.464 Pas.s}.le seuil de cisaillement est de {9.23 Pas} et {232 Pas} comme une contrainte maximale.

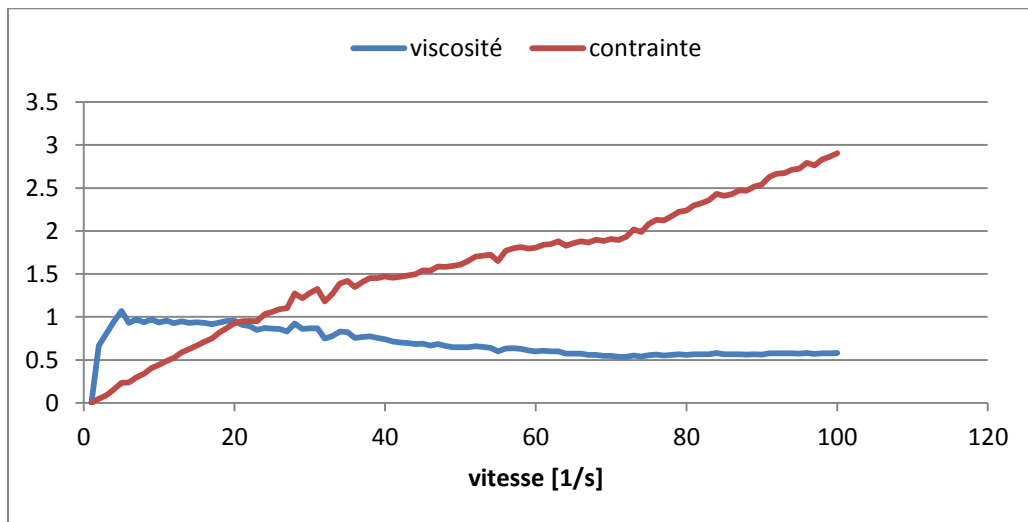


Figure -23- variation de la contrainte et de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement S.P1.5%

une relation proportionnelle des contraintes avec la vitesse de cisaillement et une diminution de la viscosité après qu'elle touche une valeurs maximale de {1.067 Pas.s} jusqu'au la valeur

{0.58 Pas.s}.le seuil de cisaillement est de {4.802 Pas} et {290.3 Pas} comme une contrainte maximale.

2.4.1. Interprétation des résultats

D'après les valeurs il apparaît que les mélanges se comportent comme des fluides viscoélastiques dont la contrainte de cisaillement évolue avec la vitesse de cisaillement. L'augmentation de cette dernière provoque une chute de viscosité pour que le mélange devint plus fluide .mais à des faibles seuils de cisaillement le fluide rencontre des difficultés d'écoulement (augmentation de viscosité), cette viscosité diminue sous l'effet d'augmentation de la contrainte de cisaillement donc cela nous permet de dire qu'il existe un phénomène Thixotrope.

Le super plastifiant joue un rôle de fluidifiant qui améliore les propriétés rhéologiques telles que la viscosité et le seuil de cisaillement. L'ajout de super plastifiant et l'augmentation de son dosage provoque une défloculation des grains de ciment qui se traduit par une chute de seuil de cisaillement ainsi que la viscosité ce qui veut dire que la suspension devint plus fluide et coulable et l'écoulement se rapproche de l'écoulement newtonien.

Les points de saturation de ciments sont déterminés par la méthode de rhéomètre pour des rapports E/C fixe et se présentent comme suit :

**1% de dosage d'accélérateur de durcissement KRONO 22HE pour le ciment CEMII42.5 MATINE.

**1.5% de dosage de super plastifiant VISCOCRETE 665 pour le ciment CEMII52.5 SARIE.

2.5. Influence sur la consistance normalisée et les délais de prise

2.5.1. Méthode de travail

L'évaluation de la consistance des pâtes de ciment est effectuée en appliquant essai de prise avec une appareil Vicat. Elle consiste à mesurer l'enfoncement de la sonde de consistance de Vicat au sein d'une pâte de ciment à différents temps. En pratique, un moule tronconique (hauteur 40 mm, diamètre inférieur 90 mm, diamètre supérieur 80 mm) est rempli avec de la pâte de ciment immédiatement à la fin du malaxage. La surface du moule est arasée à l'aide d'une truelle. La sonde de consistance (diamètre 10 mm, masse 300 g) est libérée et s'enfonce, sous l'action de son propre poids, dans la pâte. Les vibrations doivent être évitées au cours de cet essai. La valeur de l'enfoncement est mesurée à 1, 3 et 5 minutes d'hydratation ; le début du malaxage est pris comme origine du temps. À chacun de ces instants, la sonde est positionnée à un endroit de l'échantillon n'ayant pas encore été testé et à une distance convenable de la paroi du moule. De plus, entre deux mesures consécutives, la sonde est correctement nettoyée.

2.5.2. des résultats

Les résultats
le tableau

Tableau -27-
essais sur les
ciment.



Interprétation

sont inscrits sur
suivant :

résultats des
pâtes de

| Figure -24- appareil Vicat.

Pâte		Essais		
Mélange	Pourcentage en adjuvant	E/C	Début de prise (min)	Fin de prise(min)
CEMII 42.5 MATINE + KRONO22HE	0%	0.26	150	290
	0.4%	0.22	220	375
	0.6%	0.19	210	355
CEMII52.5 SARIE +VISCOCRETE	0%	0.28	120	270
	1%	0.25	135	270
	1.5%	0.23	225	365

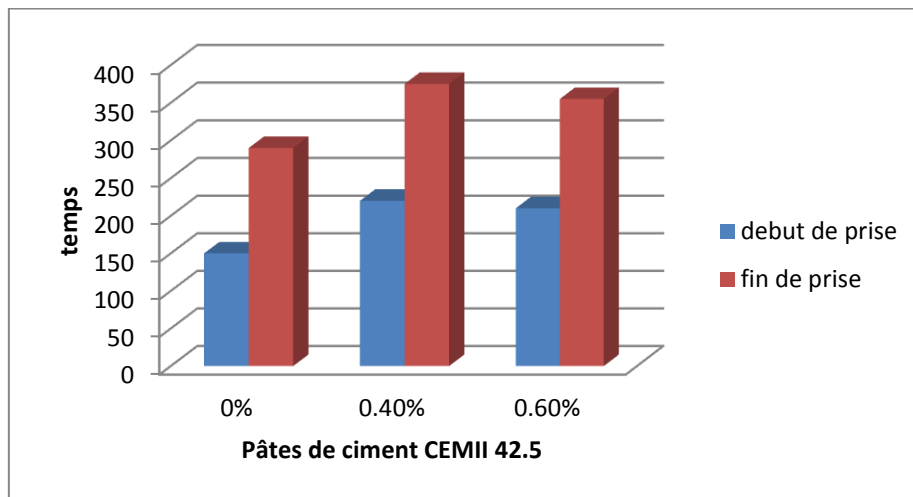


Figure -25- début et fin de prise pour ciment 42.5

On peut dire que l'adjuvant Krono 22He ne joue pas le rôle d'accélérateur de prise mais son effet est présent comme un retardateur de prise. Mais à ce qui concerne la quantité d'eau, l'incorporation de l'adjuvant nous permet d'avoir des faibles rapports E/C.

L'augmentation en dosage de l'adjuvant provoque une sédimentation de ciment et une augmentation de plasticité.

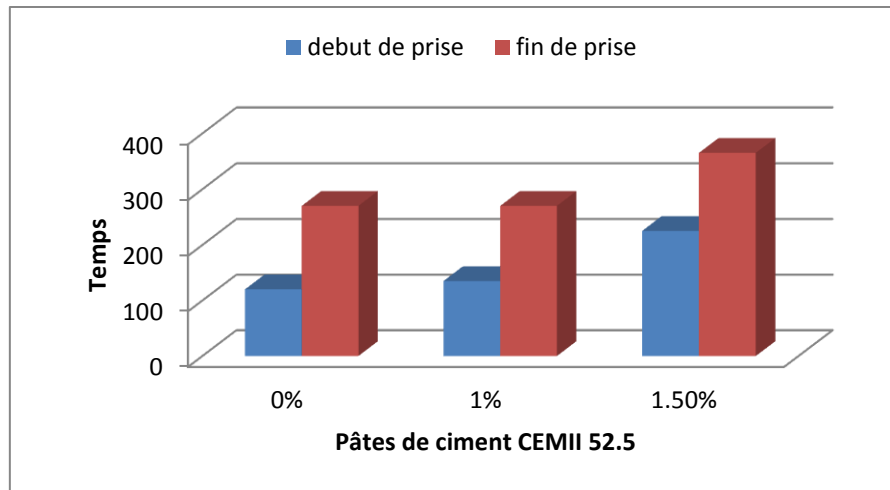


Figure -26- début et fin de prise pour ciment 52.5

le mélange témoin (0%) dispose de la durée de temps la plus basse, donc le super plastifiant n'a aucune influence sur les délais de prise. et telle que le Krono 22He, sa réduction d'eau est clairement observée.

Conclusion

Au début de l'hydratation, la pâte de ciment est un fluide viscoélastique, défini par un seuil d'écoulement et une viscosité plastique. Ces grandeurs rhéologiques évoluent avec l'avancement de l'hydratation et le fluide viscoélastique se transforme progressivement en un solide viscoélastique.

L'écoulement des pâtes et des mortiers de ciment frais est donc similaire à celui de toutes les autres suspensions de particules. Il est décrit, dans beaucoup de cas, avec une précision suffisante par le modèle de Bingham pour les suspensions viscoélastiques. Un seuil d'écoulement doit être franchi pour initier le mouvement, au-delà le système cimentaire se comporte comme un fluide visqueux dont la contrainte de cisaillement évolue linéairement avec la vitesse de cisaillement. Le seuil d'écoulement correspond ici à la force minimum à appliquer pour vaincre l'agglomération des particules de ciment. Pour une contrainte de cisaillement inférieure au seuil d'écoulement τ_0 , le mélange se comporte comme un solide élastique.

D'une façon globale, la fluidification des bétons frais par les superplastifiants peut être expliquée par la dispersion des grains de ciments. Les superplastifiants sont considérés actuellement comme de puissants dispersants. Ils permettent d'éviter l'agglomération des particules de ciment et de libérer l'eau emprisonnée dans ces agglomérats.

La défloculation et la dispersion des grains de ciment sont directement liées à l'adsorption des superplastifiants à la surface des particules. En effet, leur adsorption influence les caractéristiques physiques et chimiques des particules de ciments.

Lorsqu'un superplastifiant s'adsorbe sur un grain de ciment, ses fonctions acides dissociées modifient les charges de surface de la particule et minimisent les interactions entre les particules par la force de répulsion. Ce qui traduit par la diminution de la viscosité et le seuil de cisaillement.

La quantité d'eau nécessaire pour hydrater complètement les phases minérales d'un ciment Portland ordinaire est d'environ 20 à 30 % de la masse de ciment, soit un rapport E/C de 0,30. Or, la maniabilité d'un béton exige une teneur en eau supérieure.

L'ajout du super plastifiant entraîne une diminution de la masse d'eau de, ce qui se traduit par une diminution du rapport E/C.

Les pâtes préparées montrent des comportements rhéologiques différents selon le ciment et le super plastifiant utilisé. Avec le CEMII 52.5 SARIE et le super plastifiant VISCOCRETE 665, la préparation conserve sa plasticité tout au long de l'essai de consistance. En revanche, avec le CEMII 42.5 MATINE et le super plastifiant KRONO 22HE, une augmentation de plasticité apparaît dès 10 minutes d'hydratation.

3. Formulation et traitement thermique

3.1. Introduction

les méthodes habituelle de formulation de béton notamment celle de Dreux Gorisse restent destiné aux béton ordinaire qui généralement n'exigent que des dosage en ciment inférieure à 450kg/m³ et des rapport E/C supérieure à 0.4 toute on offrant un affaissement maximale de 12cm.pour la formulation de notre béton d'autres méthodes ont été développés comme la

méthode de Sherbrooke et la méthode de baron-léssage (1.2) qui consiste globalement à fixer des paramètres de départ et de cibler à travers plusieurs gâchés d'essais la maniabilité et la résistance souhaités.

La méthode Dreux Gorisse est utilisée seulement pour avoir un squelette granulaire le plus compacte.

3.2. Méthode DREUX GORISSE

❖ détermination du mélange optimal à minimum de vides

Sur le graphe d'analyse granulométrique on trace la courbe granulaire de référence OAB.

*point B à les coordonnées 100 % / correspond à la dimension de plus gros granulats

$$X=16\text{mm}$$

B=

$$Y=100\%$$

*point de brisure A à pour coordonnées

**en abscisse :

$$D < 20 \text{ donc } X = D/2$$

$$X = 8\text{mm}$$

**en ordonnée :

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

Les valeurs de K, K_s et K_p sont donnés par des tableaux.

-dosage de ciment est 450+fluide avec une vibration normale et des granulats concassés ça nous donne K=-2

$$K_s = 6M_f - 15$$

$$K_p = K + (5 \text{ à } 10)$$

$$K_s = 1.8$$

$$K_p = 8$$

$$X = 8\text{mm}$$

Point A=

$$Y=55.8\%$$

❖ dosage des granulats

La courbe granulaire OAB doit être tracée sur le même graphe que les courbes granulométrique des granulats composants.

On trace les lignes de partage entre chacun en joignant le point 95 % de la courbe granulaire première au point à 5% de la courbe du suivant et ainsi de suite.

On lira alors sur la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de partage le pourcentage en volume absolue de chacun des granulats.

Les résultats obtenue sont :

$$\text{Sable (0/1)} = 9\%$$

$$\text{Sable (0/3)} = 39\%$$

$$\text{Gravier (3/8)} = 14\%$$

$$\text{Gravier (8/15)} = 38\%$$

❖ coefficient de compacité

Avec un $D_{\max}=16\text{mm}$ et un béton plastique qui nécessite une vibration normale

On obtient $\gamma=0.815$

❖ détermination de volume de granulats

a. La formulation de béton fibré avec ciment CEMII42.5 dosage 420kg/m^3

$$V_c = C/3 \quad ; \quad V_c = 420/3 \quad ; \quad V_c = 140\text{l/m}^3$$

$$V_g = V_t - V_c \quad ; \quad V_g = 0.825 \cdot 1000 - 140 \quad ; \quad V_g = 685 \text{ l/m}^3$$

❖ détermination de volume absolue de chaque granulat

Volume du sable (0/1)=(685*9)/100=61.65 l/m³

Volume da sable (0/3)=(685*39)*100=267.15 l/m³

Volume de gravier (3/8)=(685*14)/100=95.9 l/m³

Volume de gravier (8/15)=(685*38)/100=260.3 l/m³

❖ **détermination de dosage en matériaux en kg/m³**

Donc on obtient :

Masse de sable (0/1)=159.47 kg/m³

Masse de sable (0/3)=700.75 kg/m³

Masse de gravier (3/8)=250.15 kg/m³

Masse de gravier (8/15)=681.35 kg/m³

Tableau -28- composition du béton à base de ciment CEMII42.5MATINE

MATERIAUX	TYPE	Quantité pour 1m ³ (kg)	Quantité pour 0.04 m ³ (kg)
Sable 0/1	Sable de dune	159.00	6.75
Sable 0/3	sable de carrière	701.00	29.81
Gravier 3/8	Concassé carrière	251.00	10.66
Gravier 8/15	//	681.00	28.94
Ciment	CEMII 42.5 LCM	420.00	16.8
Fibre	SIKA anti fissure	0.850	0.356
Adjuvant	SIKA VISCOCRET 22HE	/	/
Eau	POTABLE	/	/

b. La formulation du béton fibré avec ciment CEMII52.5 dosage 380kg/m³

$$V_c = C/3 \quad ; \quad V_c = 380/3 \quad ; \quad V_c = 126.7\text{l/m}^3$$

$$V_g = V_t - V_c \quad ; \quad V_g = 0.825 \cdot 1000 - 126.7 \quad ; \quad V_g = 698.3 \text{ l/m}^3$$

❖ détermination de volume absolue de chaque granulat

$$\text{Volume du sable (0/1)} = (698.3 \cdot 9) / 100 = 62.82 \text{ l/m}^3$$

$$\text{Volume da sable (0/3)} = (698.3 \cdot 39) / 100 = 272.22 \text{ l/m}^3$$

$$\text{Volume de gravier (3/8)} = (698.3 \cdot 14) / 100 = 97.72 \text{ l/m}^3$$

$$\text{Volume de gravier (8/15)} = (698.3 \cdot 38) / 100 = 265.24 \text{ l/m}^3$$

❖ détermination de dosage en matériaux en kg/m³

Donc on obtient :

$$\text{Masse de sable (0/1)} = 170.87 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Masse de sable (0/3)} = 756.31 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Masse de gravier (3/8)} = 270.13 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Masse de gravier (8/15)} = 734.06 \text{ kg/m}^3$$

Tableau -29- composition du béton à base de ciment CEMII 52.5SARIE.

MATERIAUX	TYPE	Quantité pour 1m ³ (kg)	Quantité pour 0.04 m ³ (kg)
Sable 0/1	Sable fin	171.00	6.85
Sable 0/3	Sable grossier	756.00	30.23
Gravier 3/8	Concassé carrière	270.00	10.81
Gravier 8/15	//	734.00	29.35
Ciment	CEMII 52.5 MSILA	380.00	15.20
Fibre	Sika anti fissure	0.850	0.356
Adjuvant	SIKA VISCOCRET 625	/	/
Eau	POTABLE	/	/

3.3. Composition de la pâte

Plusieurs essais ont été réalisés pour avoir la quantité d'eau nécessaire pour l'hydratation de ciment et qui confère au mélange un affaissement au Cône D4ABRAMS de 15 à 16 cm avec la fixation de dosage en ciment.

*dosage en ciment 380 et 420 kg/m³ pour CEMII 52.5 et CEMII 42.5

*un affaissement au Cône D'ABRAMS 16cm

La formulation du mélange pris pour la continuation des essais est inscrite dans le tableau suivant :

Tableau -30- composition des bétons.

Quantité pour 1m ³ (kg)						
Type matière	Béton à base de ciment 42.5 matine			Béton à base de ciment 52.5 sarie		
Sable 0/1	159.00			171.00		
Sable 0/3	701.00			756.00		
Gravier 3/8	251.00			270.00		
Gravier 8/15	681.00			734.00		
Ciment	420.00			380.00		
Adjuvant	1.7	2.5	3.4	3	3.8	4.2
eau	168	160	147	171	160	152
E/C	0.4	0.38	0.35	0.45	0.42	0.4

3.4. Malaxage du béton :

-Le malaxeur utilisé pour la fabrication des bétons est à axe vertical et il a une capacité de 100 litres,

La séquence de malaxage retenue est la suivante :

- Préparer les moules Nécessaires pour les différents essais, vérifier leur nombre et qu'ils sont bien graissés afin de faciliter par suite le décoffrage.

- Vérifier que tout le matériel est à disposition et que les matériaux sont bien séchés.
 - Peser les matériaux secs, les introduire dans le malaxeur et les prés humidifiés avec 10 % de l'eau de gâchage.
 - Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec pendant 30 secondes.
 - *ajouter la quantité déjà pesée des fibre synthétique pendant cette duré
 - Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement les deux tiers de l'eau de gâchage.
- Ensuit verser tout autour l'adjuvant et mélanger pendant 1 minute 30 secondes.
- Introduire la partie restante d'eau graduellement avec l'estimation visuel de la fluidité
 - Effectuer immédiatement les essais de caractérisation du béton frais.

Essais de cône d'ABRAMS.

Si l'affaissement de mélange n'atteindre pas les 16cm donc augmenter la quantité d'eau et en cas où il dépasse donc le béton sera rejeté

- Mettre en place les différents moules destinés aux échantillons correspondants aux essais programmés.

3.5. Confection et cure des éprouvettes

Des moules cubiques (15x15x15) cm³ ont été réalisés pour les essais de compression,

des prismes (7x7x28) cm³ pour les essais de flexion. La confection des éprouvettes est

faite conformément aux normes NF P 18-404 (déc. 1981). La conservation des éprouvettes couvertes par du plastique ou métallique a été faite à l'air pendant 24h ensuite, après démoulage elles sont conservées dans l'eau à 20°C.



Figure -27- malaxage du béton

- ✓ 48 éprouvettes cubique (15x15x15) cm³, dont 12 pour le traitement thermique.
- ✓ 12 éprouvette prismatiques (7x7x28) cm³.

3.6. Conservation des éprouvettes

Après le coulage les éprouvettes des béton sont laissées a température ambiante. Les éprouvettes ayant subi un traitement thermique mettez immédiatement dans l'étuve pendant 8h. Après 24 heures toutes les éprouvettes sont démoulées et conservé dans l'eau sous une température de 20 °C selon la norme **NF en 12390-3**



Figure -29- conservation des éprouvettes.

3.7. Traitement thermique

Les éprouvettes coulés est soumis aux cycle thermique à la vapeur afin d'accélérer le durcissement de béton

Le cycle complet de durcissement à la vapeur peut être résumé et décrit comme suite :

➤ **période prédéfinie (0.0h)**

Pendant cette période le chauffage à la vapeur peut être utilisé pour augmenter la température à 28°et 30c° et pour maintenir cette température initiale.

➤ **augmentation de la température (2h)**

Selon des recherches la vitesse d'élévation de la température dans les produits préfabriqués varie entre 10° et 15° par heure.

➤ **température de durcissement maximale**

La température maximale de durcissement peut influencer sur les résistances à long terme. la résistance à 28 jours des bétons durcis à des températures comprises entre 70° et 80°c est légèrement réduite par rapport à ceux durcis à des températures de 45° et 60°c. la température maximale appropriée se situé entre 55° et 60°c.

➤ **durée de cure à température maximale (5h)**

La durée de cure à la température maximale ne doit pas être confondue avec le temps pendant lequel la source de chaleur est allumée. Cette température est maintenue jusqu'aux la résistance à la compression pour le démoulage est atteinte.

➤ **période de refroidissement (1h)**

Une fois la résistance à la compression requise pour le démoulage des éprouvettes les couvercles de moules sont soulevés les éprouvettes de béton à partir de ce moment vont commencer à refroidir à l'air libre.

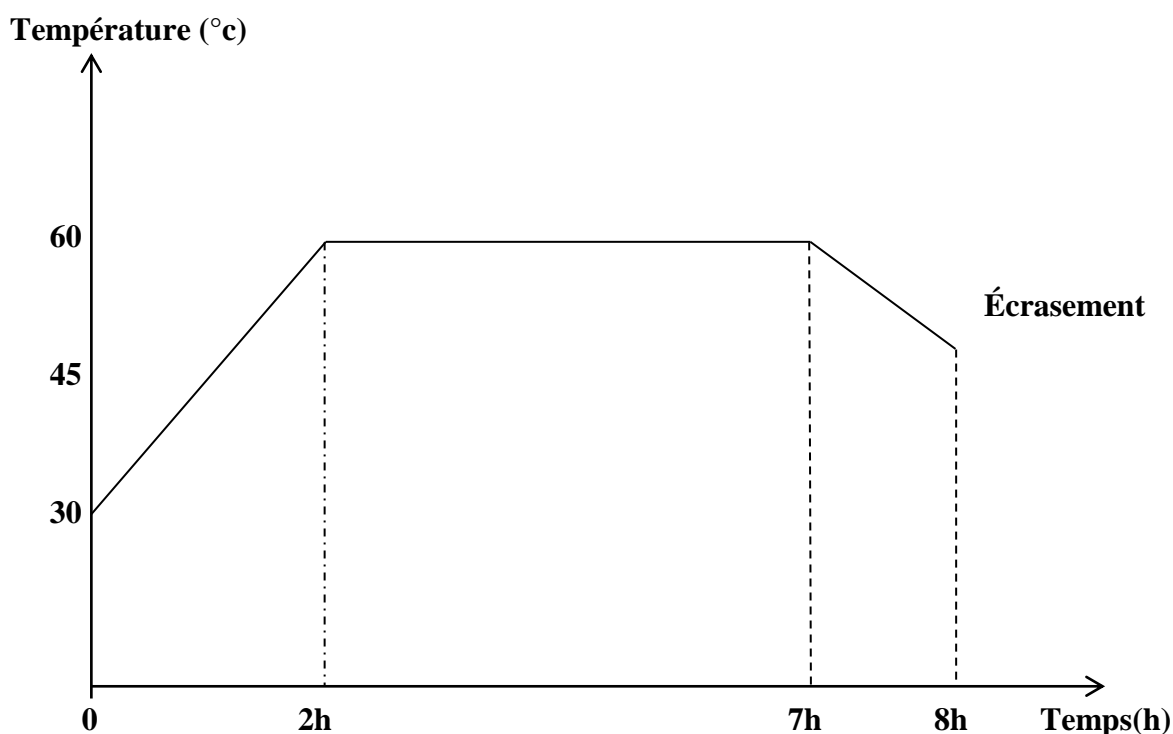


Figure -30- cycle de traitement thermique.

— Béton à base de CEMII42.5+ adjuvant KRONO22HE

— Béton à base de CEMII52.5+ adjuvant VISCOCRETE 665

PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS

1. état frais

1.1. Masse volumique (NF EN 12350-6)

➤ Béton à base de CEMII42.5 MATINE et KRONO22HE

Les masse volumique des bétons en différent dosage en adjuvant sont inscrits dans le tableau suivant :

Tableau -31- masse volumique de béton à base CEMII 42.5.

Type de béton		Masse volumique (kg/m ³)
Ciment	Dosage en adjuvant(%)	
CEMII42.5 MATINE	0.4	2379
	0.6	2402
	0.8	2359

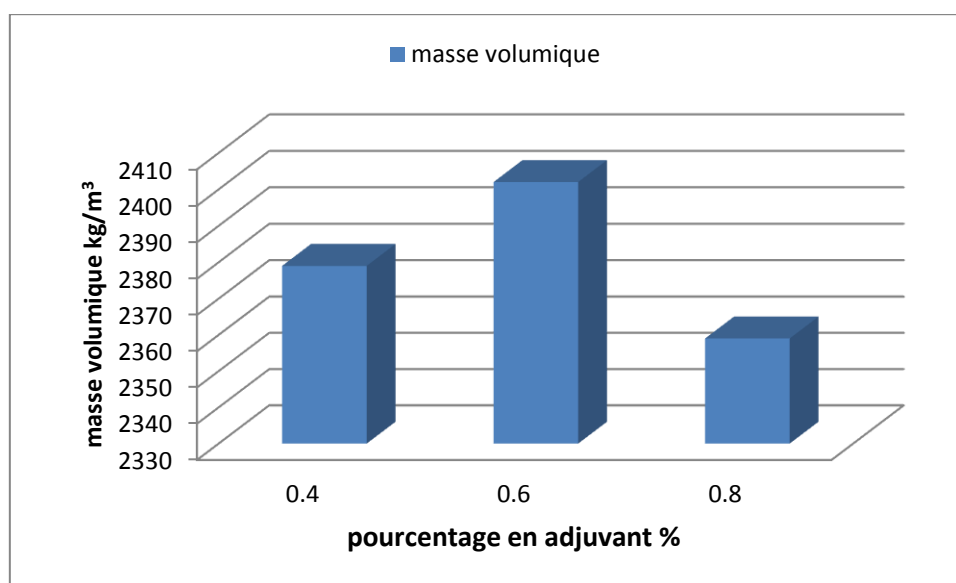


Figure -31- masse volumique de béton à base CEMII à l'état frais.

Le béton 2 (0.6%) dispose de la masse volumique la plus élevée de la série des bétons à base de CEMII 42.5. le béton 3 (0.8%) affiche une diminution du poids volumique.

➤ **Béton à base de CEMII52.5 SARIE et VISCOCRETE665**

Les masse volumique des bétons en différent dosage en adjuvant sont inscrits dans le tableau suivant :

Tableau -32- masse volumique de béton à base de CEMII52.5.

Type de béton		Masse volumique (kg/m ³)
ciment	Dosage en adjuvant (%)	
CEMII52.5 SARIE	0.8	2388
	1	2383
	1.2	2410

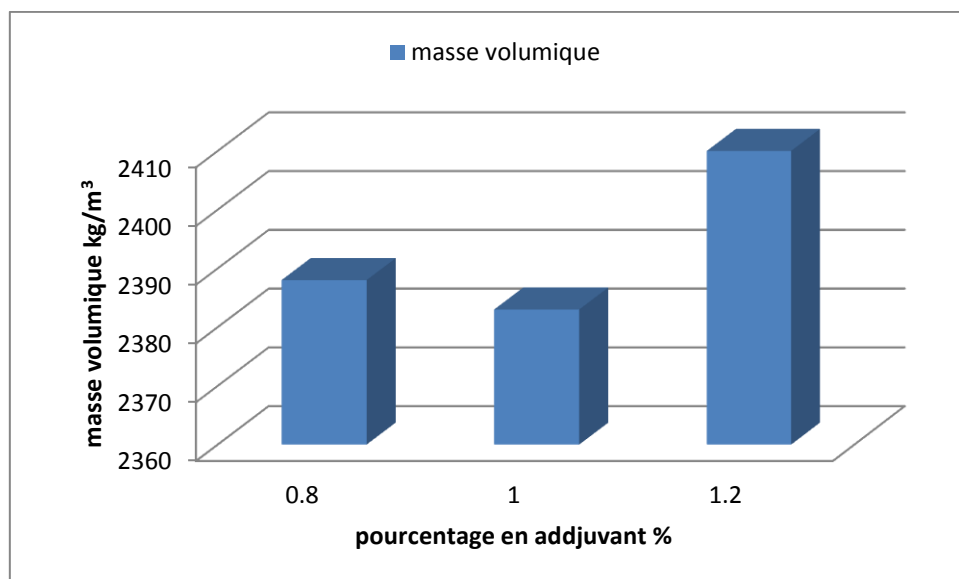


Figure -32- masse volumique de béton à base de CEMII52.5 à l'état frais.

Les bétons A et B ont presque la même masse volumique. Le béton C (1.2%) est le plus lourd de la série des bétons à base de CEMII 52.5.

1.2. Affaissement

Cet essai est réalisé juste après le malaxage du béton à l'aide de cône D' ABRAMS.

L'élaboration du voussoirs de tunnelier nécessite certaine propriétés rhéologique lors de la mise en œuvre pour facilite les opérations de pompage, remplissage de moule et la vibration.

Pour garantir la maniabilité nécessaire, les bétons pris pour la continuation des essais ont un affaissement compris entre 15 et 16cm.



Figure -33- affaissement au cône D'ABRAMS.

2. Etat durcie :

2.1. Masse volumique (NF EN 12390-7)

➤ béton à base de CEMII42.5 MATINE et KRONO22HE

Les masses volumiques des bétons étuvés et non étuvés sont inscrits dans le tableau suivant :

Tableau -33- masse volumique à l'état durcie de béton à base de CEMII 42.5 avec et sans étuvage

Type de béton		Masse volumique (kg/m ³)	
ciment	Dosage en adjuvant(%)	Sans étuvage	Avec étuvage
CEMII42.5 MATINE	0.4	2368	2370
	0.6	2363	2339
	0.8	2417	2403

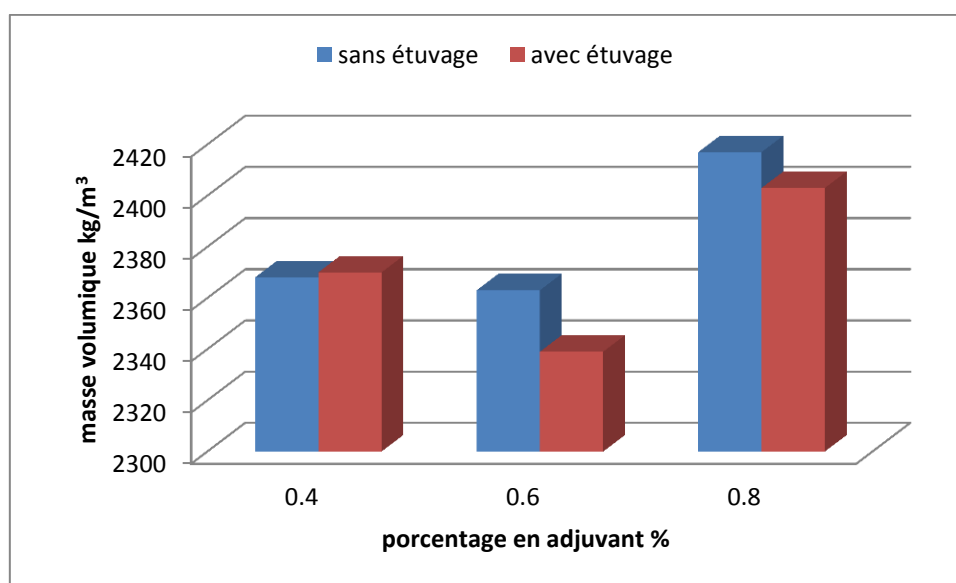


Figure -34- masses volumiques des bétons étuvés et non étuvés à base de CEMII 42.5.

Le béton 3 (0.8%) présente une masse volumique supérieur à celle des autres même avec étuvage. Les bétons non étuvés sont légèrement lourds par rapport à les autres.

➤ **béton à base de CEMII52.5 SARIE et VISCOCRETE665**

Tableau -34- masse volumique de béton à base de CEMII 52.5 avec et sans étuvage (état durcie)

Type de béton		Masse volumique (kg/m³)	
ciment	Dosage en adjuvant (%)	Sans étuvage	Avec étuvage
CEMII52.5 SARIE	0.8	2385	2359
	1	2408	2387
	1.2	2431	2420

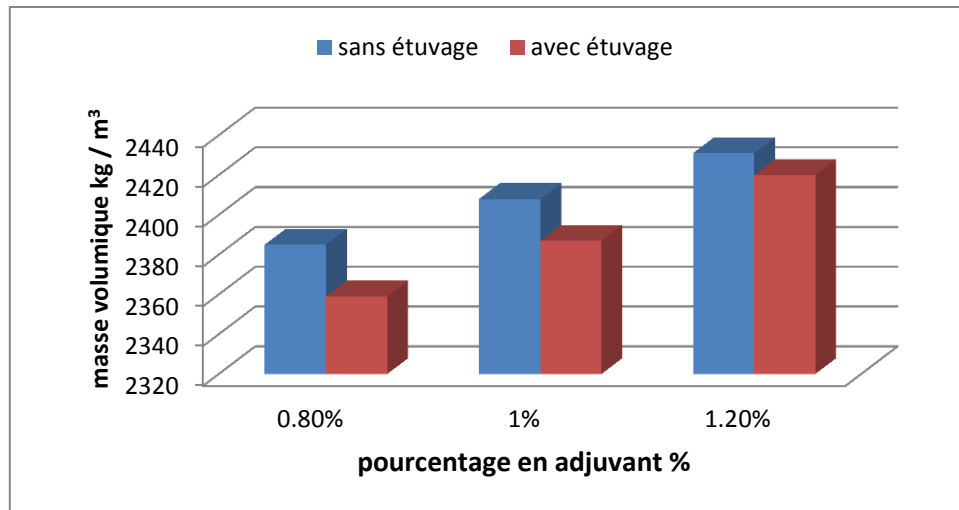


Figure -35- masse volumique des bétons étuvés et non étuvé à base de CEMII52.5.

Les bétons étuvés présentent des masses volumiques inférieures à celle des bétons sans durcissement accéléré. Ce pendant le béton C (1.2%) reste toujours en premier même avec étuvage.

✚ Interprétation et discussion :

D'après les résultats obtenus, on peut constater que les bétons respectent les critères du poids volumique. Les masses volumiques sont comprises entre 2300 et 2500 kg/m³. L'étuvage des éprouvettes provoque une diminution légèrement observé de la masse volumique. On peut attacher ce phénomène à la vaporisation d'eau lors du traitement thermique qui laisse des pores et des vides dans le béton et influe sur la porosité des échantillons. L'utilisation des fibres synthétique garantie un durcissement accéléré en conservant la compacité du béton.

L'augmentation de dosage en super plastifiant permet considérablement de réduire la quantité d'eau nécessaire à l'obtention des propriétés rhéologiques et des mesures d'ouvrabilité convenable. L'inclusion de ces polymère sert à garantir une meilleure dispersion des grains de ciment donc une pâte plus dense. Ce qui a pour conséquence une diminution notable de la porosité et une augmentation de la compacité et de poids de béton.

La masse volumique du béton dépend du poids individuel de chacun des constituants : ciment, sable, gravier, eau, élément annexes (fibres et adjuvant). La finesse et le dosage de ces constituants joue un rôle important sur le poids du béton

. Une sursaturation peut engendre des phénomènes tel que la ségrégation et le ressuage qui influe négativement sur des propriétés du béton à l'état frais même à l'état durcie.

2.2. Résistance à la compression (NA 5075NF EN 1239)

Cet essai a été effectué sur une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester et cela conformément à la norme NF P 18- 406 [42].

Les résultats sont inscrits sur le tableau suivant :

- béton à base de CEMII42.5 MATINE et KRONO22HE

Tableau -35- la résistance à la compression de béton à base de CEMII 42.5.

Type de béton	La résistance à la compression (MPa)			
	8heurs	2jours	7jours	28jours
Béton 1 (0.4%)	17.65	28.2	40.74	49
Béton 2 (0.6%)	23.35	32.49	45.74	51.33
Béton 3 (0.8%)	25.40	35.11	46.96	55.55

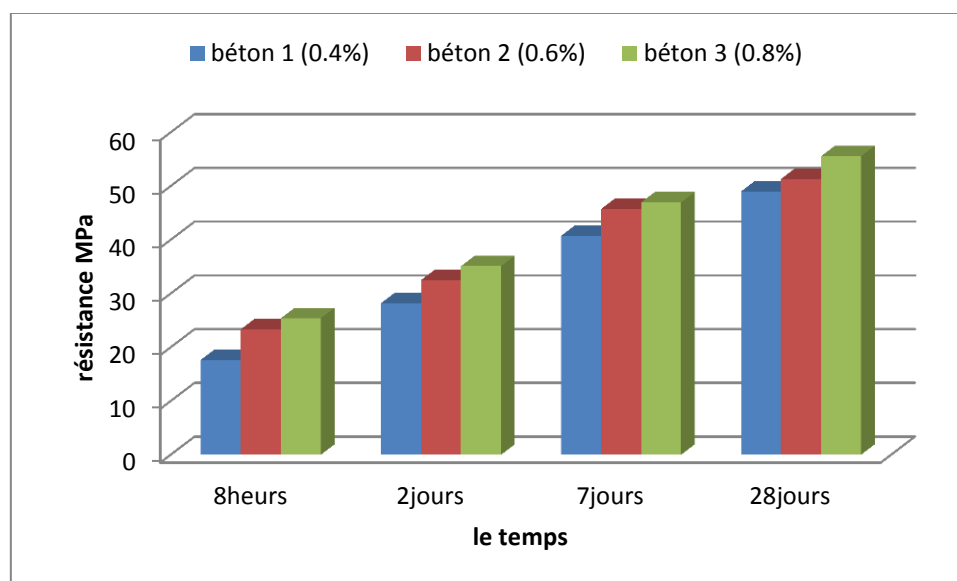


Figure -36- la résistance à la compression des bétons (1, 2, 3) à plusieurs âges.

Les bétons à base de CEMII42.5 affichent des bons résultats à tous les âges. Le béton 3 (0.8%) atteint des résistances supérieures à celle des autres durant tout le temps de durcissement.

➤ **Béton à base de CEMII52.5 SARIE et VISCOCRETE665**

Tableau -36- la résistance à la compression de béton à base de CEMII 52.5.

Type de béton	La résistance à la compression (MPa)			
	8heurs	2jours	7jours	28jours
Béton A (0.8%)	20.57	29.37	43.39	53.76
Béton B (1%)	21.56	34.71	47.63	56.92
Béton C (1.2%)	22.17	37.61	51.66	60.23

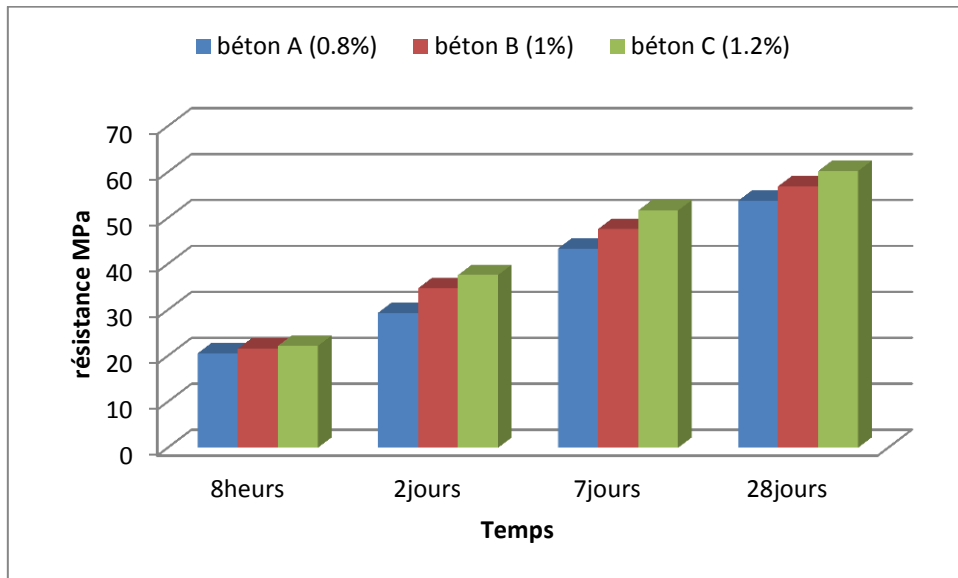


Figure -37- la résistance à la compression des bétons (A, B, C) à plusieurs âges.

Comme le béton précédent, les bétons à base de CEMII 52.5 présentent des bons résultats sur tous à long terme. Un rapprochement des résistances à jeune âge pour les trois bétons suit par une supériorité de béton C pendant les autres âges.

2.3. Résistance à la flexion (NF EN 12390-5)

Cette essai est effectué selon la norme NF P 18 – 407 (déc1981) sur prisme (7×7×28) cm.

Les résultats sont inscrits dans le tableau suivant :

➤ **Béton à base de CEMII42.5 MATINE et KRONO22HE**

Tableau -37- la résistance à la flexion de béton à base de CEMII 42.5.

Type de béton	La résistance à la flexion (MPa)		
	8heurs	7jours	28jours
Béton 1 (0.4%)	3.85	6.88	8.95
Béton 2 (0.6%)	4.52	7.65	9.20
Béton 3 (0.8%)	6.24	8.05	9.78

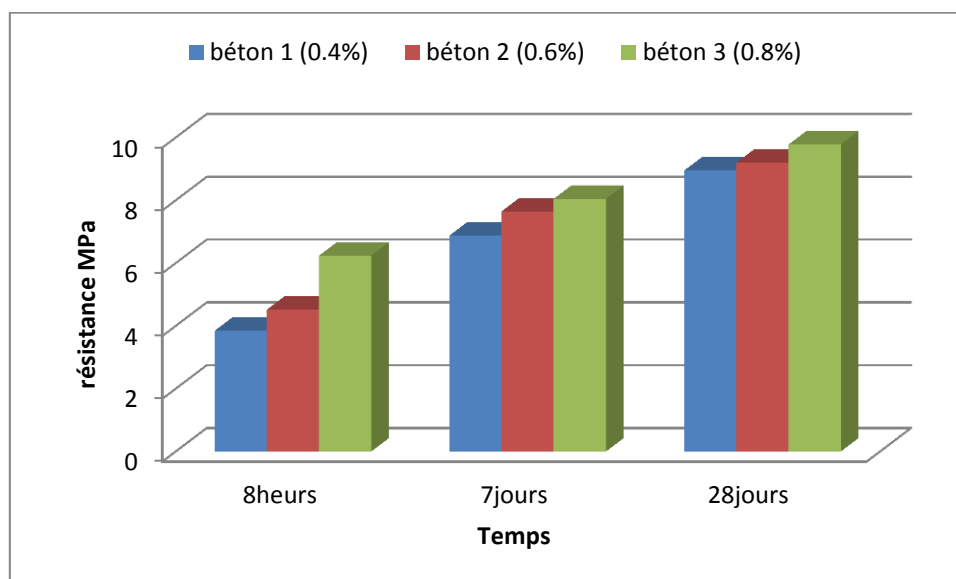


Figure -38- la résisistance à la flexion des bétons (1, 2, 3) à plusieurs âges.

Des faibles résistances à la flexion sont marqués à tous les âges, le béton 3 (0.8%) donne les meilleure résultats de la série des béton à base de CEMII 42.5 avec une résistance de 9.78 MPa.

➤ **béton à base de CEMII52.5 et VISCOCRETE665 :**

Tableau -38- la résistance à la flexion de béton à base de CEMII 52.5.

Type de béton	La résistance à la flexion (MPa)		
	8heurs	7jours	28jours
Béton A (0.8%)	0.97	7.14	9.04
Béton B (1%)	1.05	8.20	9.87
Béton C (1.2%)	2.63	8.54	11.33

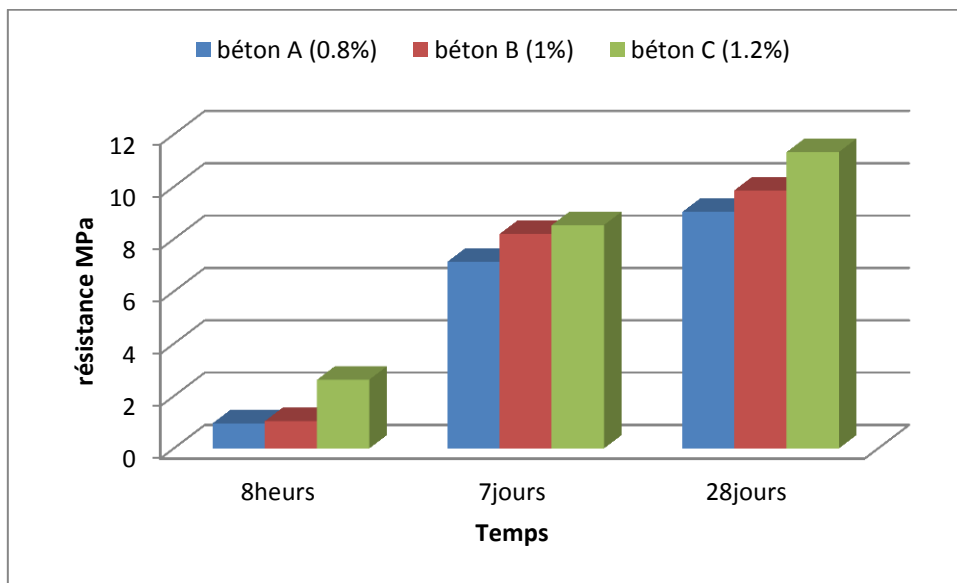


Figure -39- la résistance à la flexion des bétons (A, B, C) à plusieurs âges.

Tous les bétons à base de CEMII 52.5 présentent des faibles résistances à la flexion au jeune âge. L'augmentation en dosage de super plastifiant influe sur les résistances positivement. Le béton C marque une résistance maximale de 11.33 MPa.



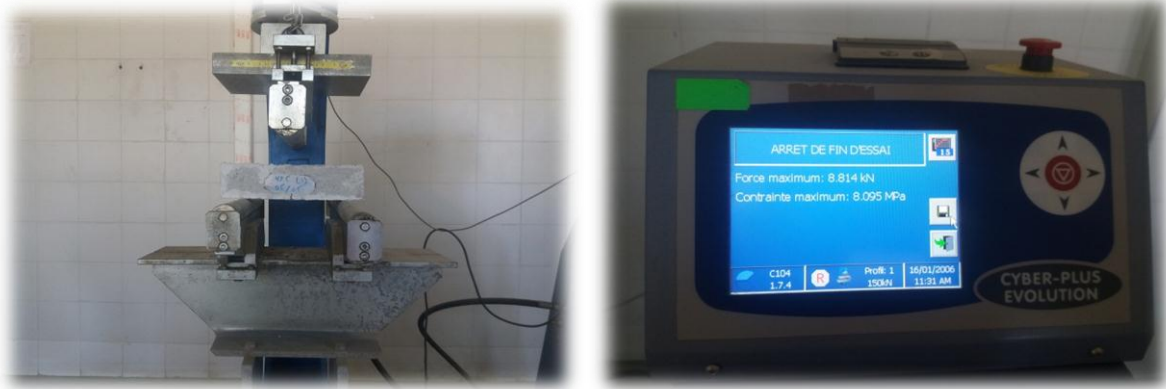


Figure -40- résistance du béton en compression et flexion.

✚ Interprétation de résultats

L'augmentation en pourcentage de l'adjuvant permet de développer les résultats de la résistance à la compression ainsi qu'à la flexion à tous âges de durcissement. Ces polymère fonctionne de façon à disperser les grains de ciment l'un éloigné de l'autre pour offrir au béton une fluidité satisfaisante en diminuant la quantité d'eau et le rapport E/C. cela traduit par une augmentation des performances mécaniques.

L'utilisation d'un accélérateur de durcissement permet d'atteindre des résistances mécanique soit à la compression soit à la flexion plus élevées au jeune âge. Même de conservé ces performance à long terme.

La finesse de ciment et sa classe de résistance ainsi que sa teneur en silicate de calcium C3S joue un rôle important pour la fabrication des bétons à haut performance puisqu'elle permet d'augmenter la compacité du béton et obtenir des résistances élevées à jeune et à long terme.

L'utilisation de la température pour un durcissement accéléré par étuvage des éprouvettes à la vapeur sert à accélérer les réactions chimiques de l'hydratation par la réduction de la période dormante, cela affect avantageusement les résistances à jeune âge.

Conclusion :

Grâce à l'utilisation des adjuvant et l'ajout des fibres dans la formulation nous avons obtenue des béton de bonne ouvrabilité et de résistance en compression à 8 heures égale à 25MPa.

Le squelette granulaire de la composition des bétons est obtenue par la méthode DREUX GORISSE autrement la composition de la pâte est le résultat des plusieurs essais en laboratoire en fixant des paramètres de départ pour atteindre des exigence bien définie. Les constituants de cette composition sont le sable de bouzegzza, les granulats de même Provence, des ciments de type CPJ-CEMII/A de classe de résistance 52.5 et 42.5 fournie du même fournisseur LAFARGE. Des produit SIKA sont incorporés à la composition, ces derniers sont d'abord des adjuvant accélérateur de durcissement et super plastifiant réducteur d'eau ensuite des fibre synthétique polypropylène de 12mm.

L'adjuvant KRONO 22HE dispose une fonction principale comme un accélérateur de durcissement son utilisation dans notre formulation nous a permet de développer des résistances mécaniques au jeune âge par l'augmentation de la vitesse d'hydratation de ciment en fixant rapidement sur les C_3S pour garantir une production plus élevée des cristaux C-S-H, ces résistances initiaux réduisent le délais de décoffrage et augmentent les cadence de production des éléments voussoirs. D'un autre point L'adjuvant KRONO 22HE présente des fonction secondaires comme la réduction d'eau, il diminue le dosage en eau sans modifier la maniabilité du béton, donc il sert à fabriquer du béton fluide avec des faibles rapport E/C. la réduction de ce rapport garantit le développement d'excellent propriétés mécaniques et une grande durabilité à l'état durcie. Lors d'une sursaturation de KRONO 22HE des effets secondaires peuvent se produire (des bulles d'air et ressuage) cela influe sur la porosité du béton.

Comme l'adjuvant KRONO le super plastifiant VISCOCRETE665 dispose de la fonction réducteur d'eau, son utilisation avec le CEMII 52.5 atteint les critères de résistance à jeune âge et garantit l'augmentation de cadence de production. Son mode action est de s'adsorber à la surface des grains de ciment (note: grâce à la finesse de CEMII 52.5 une meilleur adsorption comme résultats). En se fixant sur les grains de ciment, les polymères changent la charge des particules de ciment et provoque une défloculation des grains et une lubrification de la pâte. Ce processus permet de réduire la quantité d'eau sans affecter sur la maniabilité du béton ainsi d'augmenter les performances mécaniques et la compacité du béton.

L'étuvage des éprouvettes conçues dans le cadre de cette étude est mis à l'épreuve avec succès, il nous a permis d'atteindre les résistances souhaitées à jeune âge pour le décoffrage rapide et la continuité de la production de voussoir.

Les fibres polypropylène servent à éviter tous choc thermique et l'augmentation de la résistance à la fissuration par le retrait plastique tout au long de la mise en œuvre, étuvage et le durcissement de béton. L'emploi de Ces derniers améliorent la cohésion à l'état frais par la limitation des risques de ségrégation et de ressuage. Leurs influences sur les résistances mécaniques en particulier la résistance à la flexion est presque négligeable.

Si on cherche des béton à haut performance qui réponde à nos besoins d'un côté rhéologique comme la faciliter offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage sans affecter sur la durabilité et la résistance du béton ou bien plus d'améliorer ces performances mécanique à court et à long terme pour garantir le décoffrage rapide, l'augmentation de la cadence de fabrication et une telle résistance lors de service, tous cela, en prenant compte la vue économique : les béton à base de CEMII 42.5 comblent nos besoins et atteignent nos exigences. Ces bétons qui ont été exposé à deux type de durcissement accéléré atteignent des résistances mécaniques élevés à jeune âge et les conservent à long terme et offre une ouvrabilité convenable sans problèmes de combinaison incompatible ciment/adjuvant.

CONCLUSION GENERALE

Les objectifs principaux de notre travail était, d'une part d'optimiser une composition de béton à haut performance pour voussoirs de tunnelier, garantit la facilité de la mise en œuvre et la durabilité dans le temps.

D'autre part d'accélérer le durcissement de béton par l'inclusion des adjuvants accélérateurs de durcissement et l'utilisation de la température d'un traitement thermique à la vapeur afin de réduire les délais de décoffrage et d'augmenter les cadences de la production en conservant les performances par l'incorporation des fibres synthétiques dans notre formulation.

Le premier chapitre de travail a été consacré à l'étude bibliographique, il a porté sur les bétons et leur constituant, notamment les ciments et les adjuvants. La composition de ciment et l'hydratation de ses phases sont développées, les principaux types des adjuvants et leurs modes d'action sont également détaillés, ainsi des connaissances théorique relative aux traitements thermiques et leurs influence sur les performances de béton à court et à long terme.

Le dexieme chapitre, avait comme objectif la presentation des matériaux d'étude et des méthodes expérimentale, une caractérisation fondamentale des propriétés d'écoulement de combinaisons ciments/adjuvant compatible et incompatible est approfondie. Des méthodes de formulation de béton ainsi le cycle de traitement thermique sont amplement décrits.

Le troisième chapitre réunit les résultats obtenue par des essais à l'état frais et l'état durcie suit par une interprétation et discussion de ces résultats. Le dernier chapitre port sur la conclusion et les perspectives.

Si on cherche des béton à haut performance qui réponde à nos besoins d'un côté rhéologique comme la faciliter offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage sans affecter sur la durabilité et la résistance du béton ou bien plus d'améliorer ces performances mécanique à court et à long terme pour garantir le décoffrage rapide, l'augmentation de la cadence de fabrication et une telle résistance lors de service, tous cela, en prenant compte la vue économique : les béton à base de CEMII 42.5 comblent nos besoins et atteignent nos exigences. Ces bétons qui ont été exposé à deux type de durcissement accéléré atteignent des résistances mécaniques élevés à jeune âge et les conservent à long terme et offre une ouvrabilité convenable sans problèmes de combinaison incompatible ciment/adjuvant.



REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES



-
- {1}. KANTRO D.L. : Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste - A miniature slump test. *Journal of Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 2, No. 2, pp. 95-102, 1980.
- {2}. RAMACHANDRAN V.S., MALHOTRA V.M., JOLICOEUR C., SPIRATOS N. : Superplasticizers : properties and applications in concrete. CANMET, 404 pages, 1998.
- {3}. AÏTCIN P. C., JIANG S., KIM B. G., NKINAMUBANZI P.C., PÉTROV N. : L'interaction ciment/superplastifiant.. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, No. 233, pp. 87 – 98 + 109-114, 2001.
- {4}. BERKE N.S., DALLAIRE M.C., HICKS M.C., KERKAR A. : New developments in shrinkage-reducing admixtures. *Proceedings Fifth CANMET/ACI International Conference, Roma. Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, pp. 971-998, 1997.
- {5}. Georges DREUX, Jean FESTA « Nouveau guide du béton et de ses constituants » 8^{ème} édition Eyrolles Paris 1998.
- {6}. TAYLOR H.F.W. : *Cement Chemistry*. Academic Press Limited, San Diego, 1992.
- {7}. NF EN 197-1 : Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.
- {8}. GRIESSER A. : *Cement-Superplasticizer Interactions at Ambient Temperatures. Rheology, Phase Composition, Pore Water and Heat of Hydration of Cementitious Systems*. Thèse de Doctorat, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 2002
- {9}. BAROGHEL-BOUNY V. : *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons. Méthode, analyse, interprétations*. Editions LCPC, Paris, 1995.
- {10}. ODLER I. : *Special inorganic cements*. E&F Spon, New York, U.S.A., 395 pages, 2000.
- {11}. FLATT R.J., HOUST Y.F. : A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 8, pp. 1169-1176, 2001.
- {12}. VENUAT M. *Adjuvants et Traitements*. Editions Eyrolles, Paris, 1984.
- {13}. ADAM M. Neville, « propriétés de béton » Eyrolles Paris, 2000.
- {14}. Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese Normand F. MacLeod et Richard J. McGrath « Dosage et contrôle des mélanges de béton » 7^{ème} édition canadienne 2004
- {15}. [MAL. 93]. MALLICK P.K. (1993). *Fiber-reinforced composites*, second edition Marcel Dekker.
- {16}. [MAA. 77]. MAAGE , M., (1977) Interaction between steel fibers and cement based matrixes, RILEM, *Matériaux et constructions*, Vol. 10, n°59, p.297-301.1977.
- {17}. [LI. 92b]. LI, V.C., LEUNG, C.K.Y. (1992) Theory of the steady state and multiple cracking of random discontinuous fiber reinforced brittle matrix composites, *ASCE, journal of engineering mechanics*, 1992, vol. 118, N°11, p.2246-2264.
-

Résumé :

La production de revêtement de voussoirs préfabriqués pour l'avancement de tunnelier nécessite une attention particulier et une procédure doit être définie afin d'atteindre une certaine qualité en terme de durabilité, ouvrabilité et performances mécaniques à jeune âge et à long terme. Ces termes inclut tous les point critique comme la résistance à la compression, la faciliter de la mise en œuvre et l'endurance contre les agent agressifs lors de service.

Notre travail consiste à élaborer un béton qui garantit l'ouvrabilité nécessaire pour un remplissage parfait de coffrage et de ferrailage et les performance mécaniques à jeune âge pour le démoulage rapide et la continuité de la production des éléments voussoirs par l'incorporation des produits chimiques dans notre formulation et en suivant des méthodes et des procédures pour accélérer le durcissement et éviter les phénomènes qui peuvent influe sur la qualité de notre béton.

Mots clés : tunnelier-revêtement de voussoirs-résistance à la compression-durcissement accéléré.

المخلص :

يتطلب إنتاج الكسوة القطاعية الجاهزة للتقدم في TBM عناية خاصة من أجل تحقيق جودة معينة من حيث المتانة وقابلية التشغيل والأداء الميكانيكي في سن مبكرة وعلى المدى الطويل. تشمل هذه الشروط جميع النقاط المهمة مثل القوة الضاغطة وسهولة التنفيذ والتحمل ضد العوامل الخارجية أثناء الخدمة.

مهمتنا هي إنشاء الخرسانة التي تضمن قابلية التشغيل اللازمة لملء صب الخرسانة بشكل مثالي والأداء الميكانيكي في سن مبكرة للتشكيل السريع واستمرارية إنتاج عناصر القطاعات من خلال دمج المواد الكيميائية. في تركيبتنا و التقيد بأساليب وإجراءات لتسريع تصلب الخرسانة وتجنب الظواهر التي يمكن أن تؤثر على نوعية الخرسانة .

الكسوة القطاعية- القوة الضاغطة- تسريع التصلب-TBM- :كلمات مفتاحية