



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE: TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : BOUTASSOUNA Abdelmoumene et LAHNNACH Aissa

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Génie Civil

OPTION : Matériaux de construction

Thème

Contribution à l'étude de l'adhérence du support en béton avec des mortiers de réparation à base des matériaux locaux

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mme. Bendjillali Khadra	MAA	Présidente
Mme. Bellakhel Haizia	MCB	Examinatrice
Mr. Krobba Benharzallah	MAA	Encadreur
Mr. Bouziani Tayeb	MCA	Co-encadreur

Promotion : Juin - 2015

REMERCIEMENT

Nous remercions avant tout Allah de nous avoir gardés en bonne santé afin de mener à bien ce projet de fin d'étude. Nous remercions également nos familles pour les sacrifices qu'elles ont faits pour que nous terminions nos études.

*Nous exprimons toutes nos profondes reconnaissances à notre encadreur Mr. **Krobba Benharzallah**, qui nous a témoigné de sa confiance, de son aide scientifique et par son expérience et sa compétence.*

*Nous tenons également à remercier Mr. **Bouziyani Tayeb**, pour son soutien et son expérience dont nous avons eu l'honneur de profiter à de nombreuses reprises.*

*Nous remercions les membres de jury Mme. **Bendjillali Khadra** et Mlle. **Bellakhel Hizia**, qui ont accepté de juger ce travail. Nous remercions aussi tous nos amis pour leur aide, leur patience, leur compréhension et leur encouragement.*

Abdelmoumene & Aissa

Table des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale	

Chapitre 1 : Dégradation du béton

I.1 Causes générales des dégradations du béton	03
I.1.1. Déplacements des coffrages	03
I.1.2. Ségrégation du béton frais	03
I.1.3. Décoffrage prématuré	04
I.1.4. Retrait lors du durcissement	04
I.1.5. Contraintes thermiques	05
I.1.6. Absorption d'eau par le béton	05
I.1.7. Corrosion des armatures	05
I.1.7.1. Déroulement du processus de corrosion	06
I.1.8. Réactions chimiques	07
I.1. 9. Tassements	08
I.1. 9.1 Tassement uniforme	08
I.1. 9.2 Tassements différentiels	08
I. 10. Désordres dus à un défaut de conception	09
I.2. Conditions pour une réparation durable	09
I.3. Problème d'incompatibilité déformationnelle entre les matériaux de réparation	09
I.4. Retrait	10
I.4.1.1. Retrait endogène	11
I.4.1.2. Retrait thermique après prise	11
I.4.1.3. Retrait de dessiccation (séchage)	11
I.4.1.4. Retrait de carbonatation	11
I.4.1.5. Gonflement après prise	11
I.4.2. Moyens de mesure	12
I.5. Absorption capillaire	12
I.5.1. Description du système poreux dans un béton	12

Chapitre2 : Matériaux et technique de réparation

II.1.Définitions de réparation en béton	13
II.2.Normes et guides pour la réparation des ouvrages.....	14
II.3.Adhérence	15
II.3.1Définitions d'adhérence.....	15
II.3.2. Adhérence entre les deux matériaux.....	16
II.3.3 paramètres influents	16
II.3.4.Moyens de mesure pour quantifier l'adhérence	17
II.4. Essai d'arrachement par traction directe ou pull-off test.....	18
II.4.1Normes pour les essais d'adhérence	19
II.5.Essais de flexion	21
II.6.Essais de cisaillement :(slant shear)	22
II.7.Essai de fendage par coin : Wedge Splitting Test (WST).....	22
II.8.Compatibilité mortier réparation-béton	23
II.8.1Choix du matériau de réparation et principe de compatibilité.....	23
II.8.2Différents types de compatibilité.....	24
II.8.3.Facteurs d'influence de la compatibilité entre la réparation et le support.....	25
II.9Matériaux de réparation	26
II.9.a) Mortier de ragréage	27
II.9.b)Mortier de surfacage (ou mortier d'égalisation)	27
II.9.C)Enduit de protection (ou mortier de recouvrement)	27
II.9.1.Catégorie de mortiers de réparation	27
II.9.2.Critères de sélection des mortiers de réparation	28
II.9.3.Epaisseur des mortiers de réparation	30
II.9.4.L'objectif de la réparation	30
II.10.Propriétés des matériaux de réparation	30
II.10.1.Compatibilité avec le béton en place.....	31
II.10.2.Adhérence	31
II.10.3. Module d'élasticité	32
II.10.4.Perméabilité	32
II.10.5.Compatibilité chimique.....	33
II.11. Technique de réparation	33
II.11.1Mise en place et conditions de réparation	33
II.11.2Comportement structural d'une réparation	34

II.12.Préparation de la surface de béton	35
II.13.Méthodes de préparation des surfaces	35
II.13.1.Décapage chimique	35
II.13.2.Nettoyage mécanique	36
II.13.3.Décapage au jet	36
II.13.4.Sablage au jet	37
II.13.5.Grenaillage	38
II.13.6.Gravure à l'acide	38
II.14.Fibres	38

Chapitre3 : Caractérisation des matériaux et méthodes expérimentales

III.1. Granulats	42
III.2. Les caractéristiques de ces sables sont les suivants.....	43
III.2.1. Masses volumiques	44
III.2.2. Essai d'équivalent de sable.....	45
III.2.3. Compacité.....	46
III.2.4. Analyse granulométrique.....	47
III.3 Le ciment	50
III.3.1 Masse volumique absolue (poids spécifique)	50
III.3.2 Surface spécifique	50
III.3.3 Consistance normale.....	51
III.3.4 Temps de prise	51
III.3.5.Analyse chimique et minéralogique	52
III.3.6.Synthèse des résultats	52
III.4 L'adjuvant.....	53
III.5. les fibres	53
III.5.1.Définition	53
III.5.2.Le mouillage	53
III.6.L'eau de gâchage	53
III.7.Essais effectués sur les types des mortiers	53
III.7.1) Essais mécaniques sur les mortiers	54
a)Essai de rupture par flexion	54
b)Essai de rupture par compression	55
c)Retrait	55
d)L'essai d'absorption d'eau par capillaire	56
III.7.2) Essais mécaniques sur le mortier : adhérence.....	57

a) Essai d'arrachement par traction directe ou pull-off test.....	57
b) Essais de flexion.....	58
c) Essais de cisaillement (slant shear).....	59
d) Essai de fendage par coin : Wedge Splitting Test (WST)	59

Chapitre4 : Formulation du béton et caractérisation des matériaux de réparation

IV.1. Formulation du béton	61
IV.1.1. Dosage en ciment	61
IV.1.2. Dosage en eau	62
IV.1.3. Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux.....	62
IV.1.3.1. dosage S et G.....	63
IV.1.4. Coefficient de compacité	63
IV.1.5. Confection du béton	64
IV.1.6. Essai d'affaissement au cône d'Abrahams	65
IV.2. Compositions des mortiers	66
IV.2.1) Essais mécaniques sur les mortiers	68
IV.2.1.a) Evolution de résistance à la compression	68
IV.2.1.b) Evolution de résistance à la Flexion.....	69
IV.2.1.c) Absorption d'eau par capillaire	70
IV.2.1.d) Variation du retrait	72

Chapitre5: Étude expérimentale du comportement des réparations structurales en béton de réparation

V.1) Collage de béton	75
V.2) Préparation de surface	76
V.3) coulage du mortier sur la partie du béton déjà réalisée	76
V.4) Présentations des résultats	78
V.4.1) Essai de fendage par coin (wedge splitting).....	78
V.4.2) Essai de cisaillement (slant shear).....	82
V.4.3) Résistance à la flexion	84
V.4.4) Essai d'arrachement (pull-off).....	86

Liste des figures

Chapitre 01 : Dégradation du béton

Figure I.1. Causes des dégradations selon la norme NBN ENV 1504-9.....	02
Figure I.2. Déplacements des coffrages.....	03
Figure I. 3. Ségrégation du béton.....	04
Figure I .4. Défaut de coffrage.....	04
Figure I .5. Contraintes thermiques	05
Figure I .6. Corrosion des armatures du béton.....	06
Figure I .7.Phénomène de corrosion, éclatement du béton.....	06
Figure I .8. Déformation du béton autour de l'acier, après formation de Fissures internes Microfissure.....	07
Figure I .9. Réactions chimiques du béton.....	07
Figure I .10. Les tassements	08
Figure I .11 . Représentation du système béton dégradé – matériau de réparation.....	09
Figure I .12. Différents types de retrait.....	11

Chapitre 02 : Matériaux et technique de la réparation du béton

Figure II.1.Structure générale de la norme NF EN 1504.....	14
Figure II.2.Modèle idéalisé d'un système de réparation.....	16
FigureII.3.Différentes techniques utilisées pour caractériser l'adhérence des Mortiers	17
Figure II.4. Adhérence mesurée avec les méthodes.....	18
Figure II.5. La méthode Essai d'arrachement par traction directe ou pull-off test.....	18
Figure II .6. Effet du diamètre et de la profondeur de carottage sur la cohésion Superficielle moyenne des dalles préparées	20
Figure II.7. Dispositif de flexion par quatre points pour les poutres10×10×50cm.....	21
Figure II .8. Mode de rupture probable de prisme de béton avec rainure remplie avec literie ou en matériau composite.....	21
Figure II .9 . Essai d'adhérence en cisaillement par compression.....	22
Figure II .10.Essai WST, Wedge Splitting Test.....	23
Figure II .11. Essai WST selon la norme chinoise	23
Figure II .12.Principe de compatibilité entre la réparation et le substrat.....	24
Figure II.13.Critères de sélection d'un mortier de réparation basés sur la durabilité.....	29

Figure II.14. Courbe contrainte-déformation en compression et traction simple pour un béton usuel.....	34
Figure II.15. Décapage chimique.....	35
Figure II. 16. Nettoyage mécanique.....	36
Figure II. 17. Décapage au jet.....	37
Figure II. 18 .Grenailage.....	37
Figure II.19. Courbe force-déplacement pour une éprouvette de béton soumise à la traction avec et sans ajout de fibres	38
Figure II. 20. Illustration de l'influence des tailles des fibres sur la formation des fissures.....	41

Chapitre 03 : Caractérisation des matériaux et méthode expérimentales

Figure III. 1. les différents types du sable utilisé.....	42
Figure III. 2. les différents types du gravier.....	43
Figure. III 3. Diffractogramme aux rayons X du Sable de dune utilisés	43
Figure. III.4. Diffractogramme aux rayons X du sable alluvionnaire et sable Calcaire utilisés.....	44
Figure. III.5. Essai d'équivalence de sable.....	46
Figure. III.6. Courbes granulométriques des différents sables utilisés.....	48
Figure. III.7. Courbes granulométriques des graviers utilisés.....	48
Figure III.8. Aspect commercial du ciment utilisé.....	50
Figure III.9. Dispositif pour l'essai de résistance en flexion.....	54
Figure III.10. Dispositif de rupture en compression.....	55
Figure III.11. Appareillage pour la mesure du retrait.....	55
Figure III.12. Schéma de l'essai d'absorption d'eau par capillaire	57
Figure III.13. Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire.....	57
Figure III.14 .Machine et méthodes l'essai pull-off.....	58
Figure III.15. Dispositif d'essai flexion quatre points	59
Figure III.16. Dispositif de flexion par quatre points pour les poutres 10×10×50cm.....	59
Figure III.17. Essai d'adhérence en cisaillement par compression.....	60
Figure III.18. Essai WST selon la norme chinoise GB-8185.....	60
Figure III.19. Dispositif de cube sur la prise.....	61

Chapitre 04: formulation du béton et caractérisation des mortiers réparation

Figure IV.1 .Organigramme méthode de Dreux-Gorisse.....	62
Figure IV.2. Courbes de référence.....	64

Figure IV.3 Les éprouvettes cubique 10x10x10 cm ³ et cylindrique 10x20 cm ³	66
Figure IV.4. Les éprouvette cylindriques 10x20 cm ³ sur la presse.....	67
Figure IV.5 : Etalement du mortier.....	69
Figure IV.6: Résistance à la compression en fonction de la durée.....	70
Figure IV.7: Résistance à la flexion en fonction de la durée.....	71
Figure IV.8. Evolution de l'absorption d'eau en fonction du temps.....	72
Figure IV.9. Evolution de l'absorption d'eau en fonction du temps : 4.47 à 8.66.....	73
Figure IV.10 . Variation du retrait en fonction du temps pour les différents mortiers....	74

Chapitre 05 : Étude expérimentale du comportement des réparations

Figure V.1. Moule d'Éprouvettes prismatique 10×10×10	75
Figure V.2. Moule d'Éprouvettes Cylindrique 10× 20	75
Figure V.3. Moule poutre de dimension 10×10×50	76
Figure V.4. Moule poutre de dimension 10×10×50.....	76
Figure V.5. Préparation de surface Éprouvettes cylindrique 10×20	76
Figure V.6. Préparation de surface Éprouvettes prismatique 10×15×15.....	76
Figure V.7. Coulage éprouvette prismatique deux couches de 5cm béton et 5cm mortier.....	77
Figure V.8. Éprouvette cylindrique 10×20 avant et après coulage de mortier.....	77
Figure V.9. Coulage éprouvette poutre de dimension 10×10×50.....	78
Figure V.10. Coulage éprouvette prismatique 10×15×15.....	78
Figure V.11. Essai de fendage sur prise.....	79
Figure V.12. Résultats d'essai de fendage chaque type de mortier.....	79
Figure V. 13. Essai de cisaillement (slant shear).....	82
Figure V. 14. variation de la résistance essai de cisaillement (slant shear).....	83
Figure V. 15: Essai Résistance à la flexion 4 point.....	85
Figure V.16. Variation de la résistance flexion 4 point.....	86
Figure V.17. Poutre 10X10X50 après cassement.....	87
Figure V.18. Mortier réparation sur dalle 15X15X10cm ³	87

Liste des tableaux

Chapitre 01 : Dégradation du béton

Tableau I.1 : Durée indicative d'utilisation de projet selon la norme NF ZN 19901

Chapitre 02 : Matériaux et technique de la réparation du béton

Tableau II.1.Principes et méthodes de réparation applicables aux matériaux réparation.....15

Tableau II.2. Dispositions principales des normes et règlements relatifs à la mesure de l'adhérence sur béton ou de la cohésion des surfaces.....19

Tableau II.3. Donnée ci-dessous énumère quelques propriétés physiques et mécaniques des différentes fibres utilisées.....40

Tableau II.4.Avantage et domaines d'utilisation de certaines fibres.....41

Chapitre 03 : Caractérisation des matériaux et méthode expérimentales

Tableau III.1. Masses volumiques apparente pour des sables et graviers utilisés.....44

Tableau III.2. Masse volumiques absolue pour chaque type de sable et gravie.....45

Tableau III.3. Représenté la compacité pour chaque type de sable.....45

Tableau III.4. Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable.....46

Tableau III.5.Valeurs de l'équivalent de sable de différents sables46

Tableau III.6. Analyse granulométrique pour matériaux utilisés.....47

Tableau. III.7.Coefficients obtenus à travers l'analyse granulométrique49

Tableau. III.8. Coefficient d'absorption d'eau des sables utilisés.....50

Tableau III.9. Analyse chimique du ciment utilisé.....51

Tableau III.10.Analyse minéralogique du ciment utilisé.....52

Tableau III.11. Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment (CPJ 42.5).....52

Chapitre 04: Formulation du béton et caractérisation des mortiers réparation

Tableau IV.1. Composition du béton.....66

Tableau IV.2. Classification de l'ouvrabilité.....67

Tableau IV.3. Classification de l'ouvrabilité.....67

Tableau IV.4. Les composants de ces types de mortier.....68

Tableau IV.5.Variation de la résistance à la compression en fonction du temps.....70

Tableau IV.6.Variation de la résistance à la flexion en fonction du temps.....71

Tableau IV.7.Les résultats l'absorption d'eau en fonction du temps.....72

Tableau IV.8.Coefficient d'absorptivité C_c en $(g.cm^2. min^{-0.5}) . 1000$	73
Tableau IV.9 Evolution du retrait ($\mu m/m$) en fonction du temps.....	74
Chapitre 05:Étude expérimentale du comportement des repartions structurales en béton	
TableauV.1 .Résultats d'essai de fendage	79
Tableau V.2. Analyse de résulta de adhérence	80
TableauV.3. Résultats d'essai de cisaillement.....	82
Tableau V. 4.Analyse de résulta d'essai de cisaillement.....	84
TableauV.5 .La résistance flexion 4 point.....	85

Nomenclature

C: Compacité.

C_c: Coefficient de capillarité

C/S: Rapport ciment sable.

E/C: Rapport eau /ciment.

Esv: Equivalent de sable visuel.

Esp: Equivalent de sable au piston.

M: Masse du matériau.

M_f: Module de finesse.

M_s: Masse des grains solides.

MD: Mortier de sable de dune.

MDC: Mortier de sable de dune et sable de calcaire.

MDA: Mortier de sable de dune et adjuvant.

MDCA : Mortier de sable de dune et sable de calcaire et adjuvant.

MDAV: Mortier de sable de dune et adjuvant et la fibre.

MDCAV : Mortier de sable de dune et sable de calcaire et adjuvant et la fibre.

SA: Sable alluvionnaire.

SD: Sable dunaire.

SC : Sable calcaire.

SP40 : Adjuvant super plastifiant (MEDAPLAST40).

P: Porosité.

R_c: Résistance à la compression.

R_f: Résistance à la flexion.

Sp: Surface spécifique de Blaine.

V: Volume total du matériau.

V_s: Volume des grains solide.

γ_{app} : Masse volumique apparente.

γ_{abs} : Masse volumique absolue.

ملخص

ما يقرب من نصف إصلاح الهياكل الخرسانية يؤدي إلى فشل سابق لأوانه. ان تقنيات الاصلاح تتمثل في وضع طبقات بسمك قليل او كثير من مواد الاصلاح (مالطات الاصلاح). ويرجع ذلك أساسا إلى انفصال مادة الاصلاح مع الطبقة المراد اصلاحها، والناجمة عن عدم وجود التصاق على سطح الخرسانة الذي يؤدي الى تلفها.

الهدف من هذا العمل هو دراسة الالتصاق الركييزة مع مادة الإصلاح, و تستند مادة الاصلاح من المواد المحلية (رمل الكتبان والرمل الكلسي)، وذلك باستخدام طرق الاختبار المختلفة لتقييم الالتصاق.

الكلمات المفتاحية: مالطات الاصلاح, الالتصاق, رمل الكتبان والرمل الكلسي.

RESUME

Environ la moitié des réparations effectuées sur les structures en béton conduit à une défaillance prématurée. La technique de réparation consiste à appliquer des couches plus ou moins épaisses de matériaux de réparation (mortier de réparation). Ceci est principalement dû au décollement de la couche de réparation, causé par un manque d'adhérence sur la surface du béton dégradé.

L'objectif de ce travail consiste à étudier l'adhérence du support en béton avec des mortiers de réparation à base de matériaux locaux (sable de dune et sable calcaire), en utilisant de différentes méthodes d'essai pour évaluer l'adhérence.

Mots clés : Mortier de réparation, adhérence, sable de dune, sable calcaire.

ABSTRACT

About half of repairs to concrete structures lead to premature failure. Repair techniques consist to apply a or less thick layer of repair materials (mortar repair). This is mainly due to the separation of the repair layer, caused by a lack of adhesion to the surface of damaged concrete.

The objective of this work is to study the adhesion of the concrete substrate with based repair mortars local materials (dune sand and calcareous sand), using different test methods to evaluate adhesion.

Key words: Mortar repair, Adhesion, Dune sand, Calcareous sand.

Introduction générale

Les structures en béton ou en béton armé, sont affectées par le temps de différentes manières selon leurs géométries, leurs expositions aux charges appliquées. Ainsi, le béton se fissure du fait de diverses causes : chargement, corrosion, retrait...etc. Il arrive donc que les structures nécessitent une réparation ou un entretien qui prend une part grandissante dans le secteur de la construction.

Environ la moitié des réparations effectuées sur les structures en béton conduit à une défaillance prématurée. Ceci est principalement dû au décollement de la couche de réparation, causé par un manque d'adhérence sur la surface du béton dégradé.

L'objectif de ce travail consiste à étudier l'adhérence du support en béton avec des mortiers de réparation à base de matériaux locaux, en utilisant des différentes méthodes d'essai pour évaluer l'adhérence.

Dans ce cadre, notre mémoire est organisé de la manière suivante :

Les deux premiers chapitres sont consacrés aux causes et conséquences des dégradations des bétons et aux matériaux et technique de réparation des bétons dégradés. Un troisième chapitre est réservé aux caractérisations des matériaux et méthodes d'essais utilisés. Un quatrième chapitre est dédié à la formulation des bétons et à la caractérisation des mortiers de réparation élaborés. Les résultats d'essai de notre étude expérimentale sont ensuite regroupés dans un cinquième chapitre avant de terminer par des conclusions générales et des perspectives.

Introduction

Les causes de la détérioration du béton sont nombreuses, tout comme les techniques de réparation. Pour être efficace, la réparation d'un ouvrage en béton doit s'appuyer sur une méthode rationnelle et analytique dont la première étape consiste à déterminer la cause de la détérioration et de choisir en conséquence les matériaux et les techniques les plus adaptés.

Selon la norme **NBN ENV 1504-9**, la protection et la réparation du béton exigent une préparation approfondie. Cette norme décrit les principales étapes d'un processus de réparation, à savoir :

- L'évaluation de l'état de la structure.
- L'identification des causes de dégradation.
- La détermination des objectifs de la réparation ou de la protection.
- Le choix de la méthode.
- L'établissement des exigences auxquelles les produits ou les systèmes doivent satisfaire
- La spécification des exigences d'entretien propres à la protection ou à la réparation choisie.

Pour mener à bien les deux premières étapes du processus, il est nécessaire de connaître les différentes formes sous lesquelles les désordres peuvent apparaître, leurs causes et la façon de les identifier. : [1]

Tableau I.1. Durée indicative d'utilisation de projet selon la norme NF ZN 1990

Catégorie de durée d'utilisation de projet	Durée indicative d'utilisation de projet (années)	Exemples
1	10	Structures provisoires
2	25	Éléments structuraux remplaçables
3	25	Structures agricoles et similaires
4	50	Bâtiments et autres structures courantes
5	100	Bâtiments monumentaux Ponts et autres ouvrages de génie civil

Les désordres qui affectent les structures en béton peuvent être classés en trois grandes catégories (voir la **figure I.1**) :

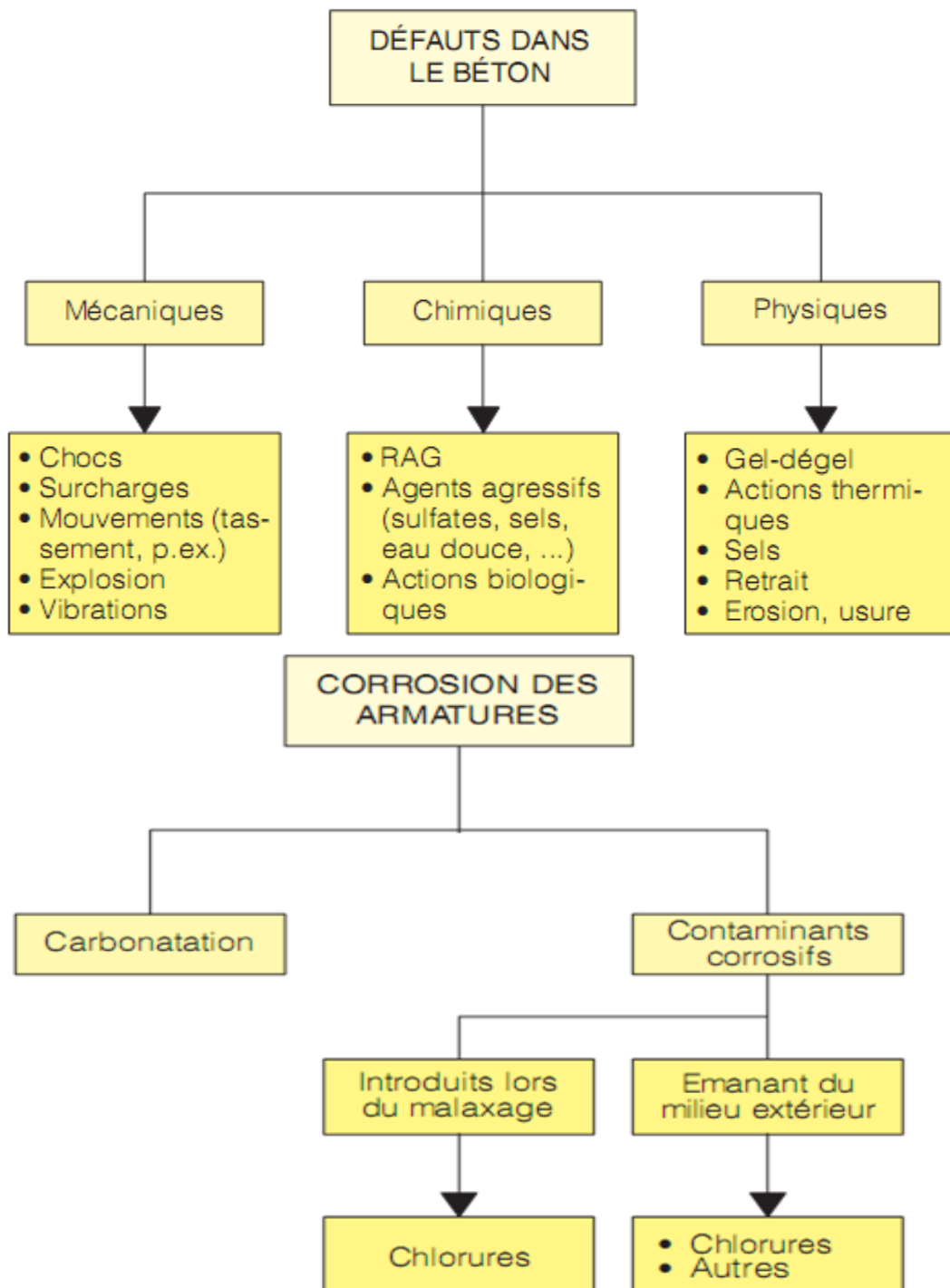


Figure I.1. Causes des dégradations selon la norme NBN ENV 1504-9

Cette partie répertorie les principaux types de dégradations du béton armé qui peuvent être classés suivant 3 catégories :

- Attaque chimique et réaction interne de dans le béton, réaction alcali-granulats (RAG).
- Attaques physiques.
- Dégradation d'ordre mécanique.

I.1. Causes générales des dégradations du béton

Les signes apparents extérieurs des désordres d'un ouvrage en béton sont souvent des fissures, des désagrégations et des épaufrages. Les causes de ces problèmes sont multiples, Les principaux désordres rencontrés sur les ouvrages de génie civil peuvent être attribués au vieillissement de la structure soumise à de nombreuses contraintes environnementales, à des causes accidentelles (chocs, surcharges, incendies...) ou à des erreurs de conception, de construction ou de réparation [5].

I.1.1. Déplacements des coffrages

Les coffrages sont dimensionnés pour résister au poids de béton frais, mais ils sont toujours déformables. La déformation provoquée par le béton frais peut alors entraîner, dans les parties déjà durcies mais encore jeunes, l'apparition de fissures importantes.

Pour empêcher l'apparition de telles fissures il faut :

- Vérifier que le coffrage est bien conçu
- Revêtir la surface du bois utilisé pour le coffrage afin d'empêcher l'absorption qui induit un gonflement du bois;
- Vérifier périodiquement les montages et l'exécution pendant le coulage.



Figure I.2.Effondrement des coffrages

I.1.2. Ségrégation du béton frais

Entre la fin du bétonnage et le début de prise se produit un phénomène de sédimentation (Tassement) : par gravité, les grains lourds en suspension sont attirés vers le bas. L'eau qui reflue (ressuage) entraîne à son tour une partie des grains les plus fins vers la surface de l'élément. Il en résulte, dans la zone inférieure de l'élément, une concentration plus élevée en gros grains et, dans la partie supérieure, une concentration plus forte en pâte de ciment.

Les conséquences du phénomène se traduisent par le blocage du béton frais avec des fissures visibles qui suivent le tracé des armatures les plus proches [3].



Figure I.3. Ségrégation du béton

I.1.3. Décoffrage prématuré

La vitesse et l'économie actuellement recherchées dans la construction ont pour conséquence que le coffrage est retiré avant que le béton ait acquis une résistance suffisante.

Le décintrement et le décoffrage prématurés d'un béton peuvent entraîner:

- Des déformations excessives de pièces minces fléchies
- Une fissuration des parties tendues
- Une microfissuration préjudiciable au niveau de la durabilité de la structure.



Figure I.4. Défaut de coffrage

I.1.4. Retrait lors du durcissement

Le retrait thermique peut être la cause de pré fissuration du béton. La prise puis le durcissement du béton se font avec un dégagement de chaleur ; le matériau se contracte au cours de son refroidissement. A ce phénomène viennent s'ajouter des effets de masse, la température d'hydratation pouvant être plus élevée au sein d'une pièce massive et plus faible au voisinage des parois par échange thermique avec l'extérieur. [4]

I.1.5. Contraintes thermiques

Les réactions d'hydratation du ciment provoquent un dégagement de chaleur. Sachant que le béton est un mauvais conducteur de chaleur et dans les pièces massives, cette dernière s'accumule au cœur, ce qui élève la température et accélère la réaction. De plus, le cœur des pièces refroidit moins vite que la surface. Dans le cas des pièces constituées de parties d'épaisseur différentes, des cisaillements apparaissent dans les zones de transition.



Figure I .5 . Effet de contraintes thermiques

I.1.6. Absorption d'eau par le béton

On constate souvent que parmi les différentes parties d'un même ouvrage construites avec les mêmes matériaux, certaines sont saines tandis que d'autres sont gravement détériorées. Cela est dû à la différence de quantité d'eau absorbée par le béton.

Il n'est pas possible d'empêcher le gonflement du béton dû à l'augmentation de la teneur en eau. Le remède est soit de tenir compte de la dilatation du béton dans des ouvrages soumis à des cycles de séchage et d'humidification, soit de maintenir le béton humide en le gainant dans une sorte d'épais manchon de bois empêchant la dessiccation de la masse [3].

I.1.7. Corrosion des armatures

La corrosion est un phénomène électrochimique qui se traduit par l'oxydation de l'acier du béton par un agent oxydant du milieu. Le pH du béton sain est très basique et a une valeur d'environ 13. Ce milieu est favorable à la formation d'une couche protectrice autour de l'acier ; c'est le phénomène de passivation.

La corrosion de l'acier provoque la réduction de la section de l'armature (partiellement, localement ou en totalité). De plus, la réaction chimique de formation de la rouille (mélange d'oxydes et d'hydroxyde de fer) s'effectue avec une expansion (le volume de l'acier devient 3 à 4 fois supérieur). Ce gonflement provoque dans le béton des contraintes d'expansion

importantes, supérieures à la résistance à la cohésion du béton. La manifestation visuelle qui en résulte se présente sous forme de fissures en surface qui s'amorcent à partir de l'acier.

Des fissures internes reliant les armatures peuvent aussi disloquer le béton. La décohéation peut présenter des pustules ou des plaques de béton. Les manifestations diffèrent selon l'épaisseur du béton, l'écartement et le diamètre des aciers. Il en résulte que l'élément en béton armé ne fonctionne plus, au point de vue de la résistance des matériaux, comme il a été calculé primitivement. [2]



Figure I.6 Corrosion des armatures du béton

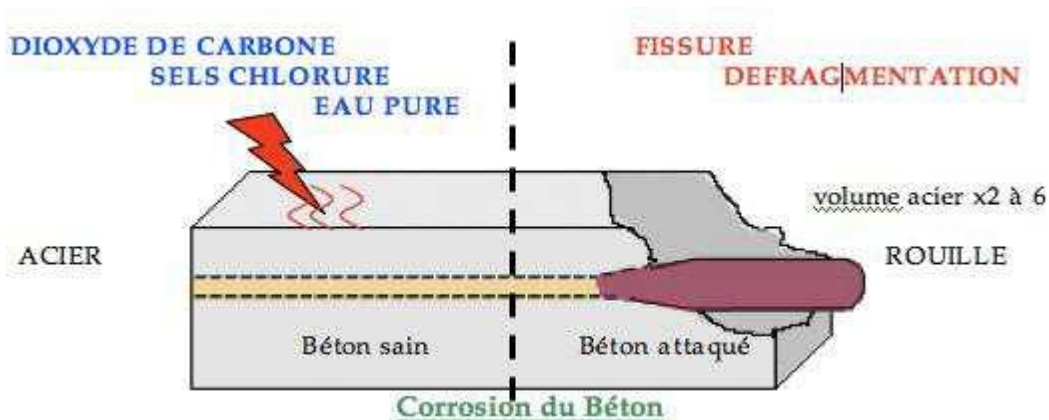


Figure I.7. Phénomène de corrosion, éclatement du béton

La corrosion de l'acier du béton armé apparaît donc après la destruction de la couche passive due à la diffusion de certains agents dits de corrosion dans le béton. [5]

I.1.7.1. Déroulement du processus de corrosion

Le mécanisme comprend deux phases :

La première, dite phase d'incubation, dépend en grande partie des processus assurant le transport des éléments agressifs jusqu'à l'armature, mais aussi des réactions chimiques se produisant au sein du béton et des réactions électrochimiques à l'interface.

La seconde phase est la période de croissance pendant laquelle la corrosion se produit avec une certaine vitesse, conduisant à la formation de la rouille et aux états ultimes de dégradation.

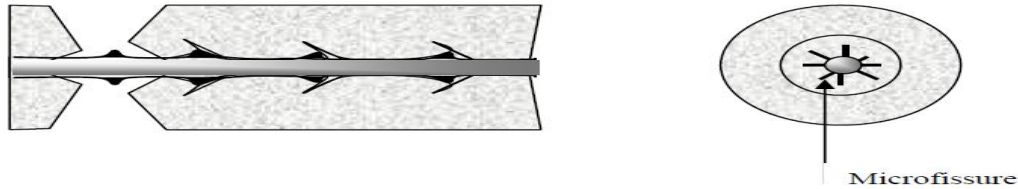


Figure I .8. Déformation du béton autour de l'acier, après formation de fissures internes.
(Microfissure)

I.1.8. Réactions chimiques

Il existe deux sortes de milieux agressifs vis à vis du béton :

- Les milieux fluides : eaux douces, eau de mer, liquides organiques, gaz... etc.
- Les milieux solides : produits de stockage, sols, ... etc.

En fonction de la concentration de l'agent agressif, de la mobilité de son milieu, de la température ambiante et de la durée d'exposition, ces milieux peuvent attaquer le béton et provoquer des dégâts irréversibles si des précautions de protection ne sont pas prises à temps.

La vitesse de dégradation du béton dépend également de plusieurs facteurs dont notamment :

- La nature des différents constituants (ciment, agrégats...) et la composition minéralogique du ciment
- La composition du béton
- Le mode de sa mise en œuvre
- L'âge du béton et les conditions climatiques

Les symptômes d'attaque chimique sont la désagrégation et l'épaufrage des surfaces, l'agrandissement des fissures et des joints. **[3]**

Pour éviter ces désordres il faut utiliser un béton dense et de bonne qualité car il empêche la pénétration des solutions chimiques, il résiste mieux et plus longtemps aux attaques chimiques qu'un béton ordinaire.



Figure I .9. Réactions chimiques dans le béton.

I.1. 9. Tassements

I.1. 9.1.Tassement uniforme

Lorsque les tassements sont uniformes, ils ne provoquent pas de désordres dans les constructions, si ces dernières possèdent une certaine raideur. Ce type de tassements se rencontre principalement lorsque les fondations assez rigides reposent sur une importante couche de sol compressible ou un bi-couche. Généralement, dans le cas de sol compressible dont la couche est importante toutes les mesures nécessaires sont prises au moment de la conception. [6].



Figure I .10. Les tassements

I.1.9.2 .Tassements différentiels

Lorsqu'un sol tasse d'une façon inégale sous les différents points d'une fondation, on dit qu'il y a un tassement différentiel. Il se manifeste soit par un basculement soit par de graves désordres dans les éléments non structuraux et parfois dans la structure elle-même si les efforts sont incompatibles avec la sécurité des matériaux.

Les causes des tassements différentiels sont multiples, mais les plus fréquemment rencontrés sont :

- Les sols compressibles
- Les remblais récents
- Les remblais d'épaisseurs
- La non homogénéité du sous-sol de fondations
- L'emploi des fondations hétérogènes
- Les affouillements du sol sous les fondations
- La modification du volume de certains sols en fonction de la teneur en eau...

I.1.10. Désordres dus à un défaut de conception

Si certains schémas de fissuration correspondent à un type de sollicitations bien défini, on peut aussi, à partir du relevé des fissures, essayer de comparer l'état d'une structure à celui prévu par le calcul, dans le but de déceler des anomalies de fonctionnement. Si le tracé des fissures est conforme au schéma prévu, une indication sur le risque de dépassement d'un chargement normal est donnée par la valeur de l'ouverture des fissures et sa variation [2].

I.2. Conditions pour une réparation durable

Plusieurs auteurs ont développé des méthodologies permettant d'améliorer la qualité des réparations effectuées sur les ouvrages d'art, et donc de prolonger leur durée de vie. Ils comparent le support de béton à réparer et le produit de réparation à un système composite (**Figure I.11.**) Pour assurer la durabilité des réparations, tous les composants de ce système doivent être pris en compte [5]

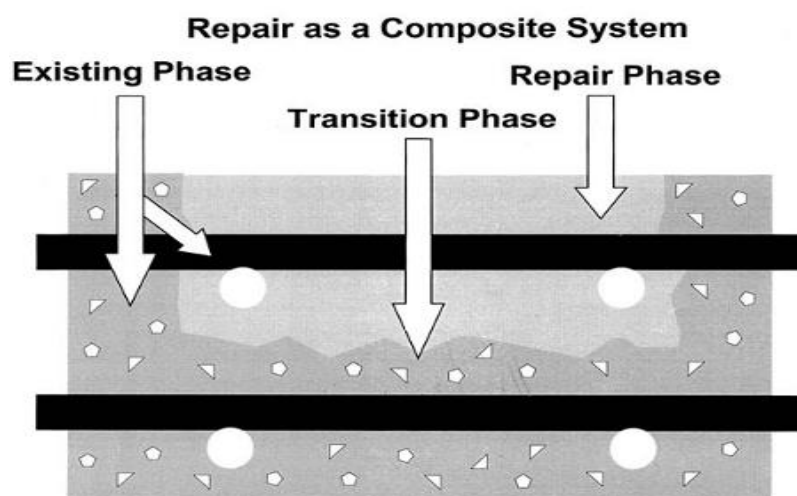


Figure I.11. Représentation du système béton dégradé – matériau de réparation

I.3. Problème d'incompatibilité déformationnelle entre les matériaux de réparation

La véritable problématique des réparations en béton ne réside pas dans la capacité de mettre en œuvre un matériau de réparation dont les propriétés intrinsèques, tant mécaniques que de durabilité, soient appropriées. Le problème est davantage, sinon entièrement, lié à la nature et la composition du béton et aux matériaux de réparation. En effet, on relie deux matériaux dont les propriétés sont différentes. En particulier, la contraction du matériau de réparation est empêchée au niveau de l'interface des matériaux de réparation. Cette déformation gênée explique en bonne partie la difficulté accrue du travail de réfection par rapport à la construction neuve. [6]

Dans la littérature, il y a beaucoup d'approche du comportement de la couche de réparation.

Une approche très globale, basée sur le concept de la compatibilité a été proposée par **Plum (1990)** [7]. Selon cette approche, l'aspect le plus fondamental d'une réparation est la compatibilité des propriétés du couple support des et matériaux de réparation, notamment du point de vue de la déformation. A l'égard de la compatibilité, a insisté sur l'importance des propriétés suivantes :

- Module d'élasticité,
- Retrait
- Fluage,
- Dilatation thermique

Le module élastique, le fluage, le retrait et les déformations thermiques sont les propriétés principales décidant la compatibilité déformationnelle. En effet, le matériau à cimentaire se déforme non seulement sous l'action de charges externes, mais aussi sous l'action des conditions hydriques et thermiques environnantes.

I.4. Retrait

est l'une des Le retrait causes à l'origine des déformations imposées et qui peut conduire au dépassement de la résistance en traction des matériaux cimentaires. C'est une variation dimensionnelle négative pour la durabilité.

Le retrait est un phénomène très complexe, qui est la cause du processus d'hydratation du ciment et des échanges hydriques avec le milieu environnant tout au long de la vie du matériau. Généralement, il se développe fortement aux jeunes âges. Pour le matériau de réparation et mince adhérent, lorsqu'il est coulé sur la surface du support en béton (considéré comme stabilisé), ce support absorbe une partie de l'eau du matériau de réparation ce qui induit son

gonflement. En parallèle, le retrait du matériau de réparation est empêché par le support à l'interface. Le résultat est un risque de désordre prématuré dans le système matériau de réparation.

I.4.1. Différents types de retrait

A partir de la prise du mortier, le retrait est le raccourcissement spontané du matériau non chargé. Le retrait peut être divisé en plusieurs types présentés dans la **Figure I.12**.

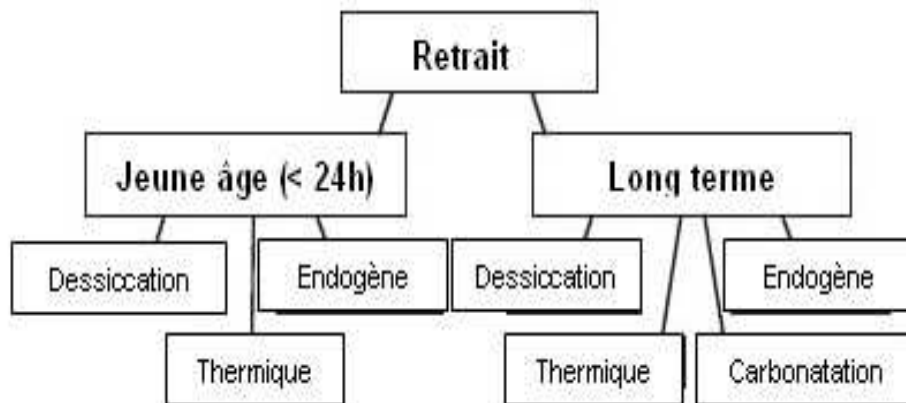


Figure I .12. Différents types de retrait

I.4.1.1. Retrait endogène.

Il représente la somme du retrait d'autodessiccation et de la contraction de Le Chatelier mais ces deux effets ne sont pas entièrement dissociables. [8]

I.4.1.2. Retrait thermique

La prise du ciment s'accompagne d'un dégagement de chaleur et, dans les zones massives ou isolées thermiquement, d'un échauffement du mortier. Après la prise, ce dégagement de chaleur ralentit et le mortier durcit. Le retrait thermique après prise est la contraction du mortier due à ce refroidissement

I.4.1.3. Retrait de dessiccation (séchage)

Il est dû au déséquilibre hygrométrique entre la pâte de ciment et le milieu ambiant essentiellement lié au départ de l'eau du mortier par évaporation.

I.4.1.4. Retrait de carbonatation

Il est provoqué par la réaction de la portlandite avec le CO₂ présent dans l'air ambiant :



Il en résulte la formation de carbonate de calcium et d'eau. Cette transformation s'accompagne d'une légère diminution de volume. Cette réaction est fonction de l'humidité relative

I.4.1.5. Gonflement après prise

Il apparaît dans des mortiers conservés sous l'eau et est lié à la structuration de la pâte de ciment par hydratation.

I.4.2. Moyens de mesure

La mesure du retrait peut se décomposer en deux parties en considérant la mesure du retrait à jeune âge lorsque le matériau est frais et la mesure du retrait du mortier durci. La distinction entre les deux est ainsi faite car au jeune âge et à l'état durci, le mortier n'a pas les mêmes propriétés, il n'est pas dans le même état physique. Il existe divers types de mesures de retrait

I.5. Absorption capillaire

Le substrat béton n'est pas un support fermé. Il présente toute une série de pores, de capillaires dont la présence risque d'influencer l'adhérence, notamment en réglant les phénomènes d'échange à l'interface.

Quand on a affaire à un support poreux, la zone inter faciale sera moins affaiblie par la présence d'eau excédentaire car le réseau capillaire est capable d'absorber une certaine quantité d'eau et ainsi de diminuer le rapport E/C en surface.

Un support poreux signifie aussi une surface de contact plus grande, ce qui a pour effet d'augmenter l'énergie de rupture nécessaire à la séparation : des cavités, dues à la présence de bulles d'air au moment de la mise en œuvre du béton support, peuvent jouer ce rôle. [9]

I.5.1. Description du système poreux dans un béton

Les pores se forment dès le moment de la prise et les modifications qu'ils subissent ensuite, dépendent des conditions dans lesquelles se fait le durcissement.

On distingue :

- Les pores de compactage (dus à la mise en œuvre du béton);
- Les pores du granulat;
- Les pores de la pâte de ciment;
- Ainsi que les bulles d'air emprisonnées. [9]

II.1. Définitions de réparation en béton

Dans le domaine de réparations, plusieurs termes sont souvent employés en référence à l'action de remettre en bon état une structure déficiente. Par contre, les nuances entre ces différents termes peuvent parfois être subtiles et il est important de connaître leur définition avec précision.

Peu importe l'ampleur avec laquelle une structure doit être améliorée, un système réparé comporte deux bétons aux caractéristiques différentes. Ceci est au cœur de la problématique des réparations avec des matériaux cimentaires : un substrat considéré stable est lié à un béton de réparation beaucoup plus jeune et sujet à des changements volumétriques au cours des premiers mois. Qui plus est, il est un peu trop simple de considérer le système en seulement deux phases. En fait, l'interface entre les deux matériaux est une zone faisant partie du système global qui comporte des propriétés différentes des deux bétons qu'il relie. Ainsi, une analyse plus juste de la réparation est basée sur l'interaction entre le béton d'origine, le matériau de réparation et l'interface qui les unit. [9]

Deux principaux types de réparation peuvent être distingués en fonction de l'importance de l'intervention dans l'élément : réparation de surface ou réparation profonde. Les réparations de surface consistent à retirer une mince couche du béton d'origine détériorée en surface (de l'ordre de 25 à 75mm) pour en dégager généralement le premier rang d'armature. En fait, ce type d'intervention vise essentiellement à restaurer le béton de recouvrement et affecte généralement peu le comportement structural de l'élément. Dans le cas de réparations profondes, la structure doit parfois être soutenue lors de la réparation car la section restante n'est plus suffisante pour résister à la charge imposée. Dans le manuel d'entretien des structures.

La réparation sans surépaisseur et avec surépaisseur sont plutôt privilégiées comme méthodes d'intervention. Les réparations sans surépaisseur sont employées pour réparer de petites surfaces tandis que les réparations avec surépaisseur sont utilisées pour tous les éléments d'une structure.

II.2. Normes et guides pour la réparation des ouvrages

Norme NF EN 1504

La norme NF EN 1504 est composée de dix parties qui décrivent toutes les étapes de réparation, du diagnostic de la pathologie du béton à la maintenance de l'ouvrage après réalisation des travaux. La structure générale de la série de normes est présentée sur la **figure II.1. [5]**

II.1. [5]

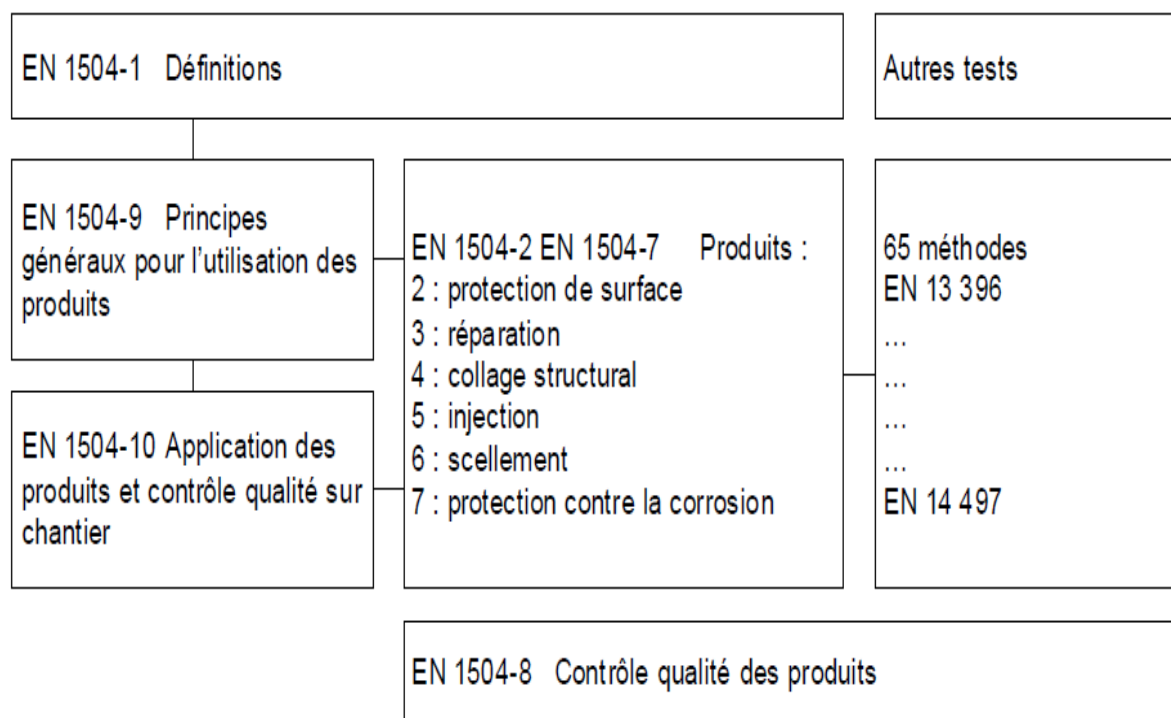


Figure II.1. Structure générale de la norme NF EN 1504 [5]

Onze principes de réparation sont détaillés, ainsi que les méthodes associées en fonction du type de défaut observé (**Tableau II-1**). La partie 3 [NF EN 1504-3] traite plus précisément la réparation des ouvrages avec des mortiers modifiés ou non par des polymères ou des résines. Les principes de réparation et les méthodes associées sont présentés dans le **tableau II-1**

Tableau II.1.Principes et méthodes de réparation applicables aux matériaux de réparation

Principe	Exemples de méthodes basées sur les principes	Partie correspondante de l'EN 1504
Principes et méthodes relatifs aux défauts dans le béton		
3. Restauration du béton	3.1. Application manuelle de mortier	3
	3.2. Nouveau béton ou mortier coffré	3
	3.3. Pulvérisation de béton ou mortier	3
	3.4. Remplacement d'éléments	
4. Renforcement structural	4.1. Ajout ou remplacement de barres de renforcement incorporées ou externes	6
	4.2. Ajout d'armature ancrée dans des trous pré-creusés ou sciés	
	4.3. Collage d'une plaque de renforcement	4
	4.4. Ajout de mortier ou de béton	3, 4
	4.5. Injection dans les fissures, les vides ou les interstices	5
	4.6. Colmatage des fissures, des vides ou des interstices	5
	4.7. Précontrainte (précontrainte par post-tension)	
5. Augmentation de la résistance physique	5.1. Revêtement	2
	5.2. Imprégnation	2
	5.3. Ajout de mortier ou de béton	3
Principes et méthodes relatifs à la corrosion de l'armature		
7. Préservation ou restauration de la passivité	7.1. Augmentation de la couche avec du mortier ou du béton supplémentaire	3
	7.2. Remplacement du béton pollué ou carbonaté	3
	7.3. Ré-alkalinisation électrochimique du béton carbonaté	
	7.4. Ré-alkalinisation du béton carbonaté par diffusion	
	7.5. Extraction électrochimique des chlorures	

II.3.Adhérence

II.3.1Définitions d'adhérence

La qualité de la réparation dépend de l'adhérence du mortier de réparation au support à réparer.

La théorie de l'adhésion repose sur deux phénomènes principaux :

- L'adhésion mécanique : elle est assurée par ancrage mécanique du matériau de réparation qui pénètre dans les pores et les aspérités de surface du support avant durcissement. La préparation de la surface à réparer est donc une étape essentielle pour garantir une bonne adhésion du mortier de réparation. Différentes techniques destinées à éliminer le béton dégradé peuvent être utilisées (marteau-piqueur, hydro-démolition) et auront des conséquences sur la rugosité du support. [8]

- L'adhésion spécifique : elle prend en compte les interactions chimiques, électrostatiques et une approche thermodynamique ou mouillage. Pour choisir un matériau de réparation pouvant adhérer au support en béton, il faut maximiser le travail d'adhésion, ou minimiser l'énergie interraciale. Ce calcul nécessite la connaissance des énergies libres de surface des solides et liquides mis en jeu

L'adhésion présente également deux aspects, selon qu'on s'intéresse aux mécanismes et à la cinétique de formation du lien entre les deux matériaux ou au principe de séparation en mesurant quantitativement le niveau d'adhésion.

II.3.2. Adhérence entre les deux matériaux

Comme il a été mentionné précédemment, le système de réparation est un modèle en trois phases : substrat, interface et réparation (voir **Figure II.2**). L'adhérence entre les deux matériaux se situe au niveau de la zone de transition, endroit généralement plus poreux et, par conséquent, de résistance mécanique plus faible. Cette augmentation de la porosité au niveau de l'interface est explicable par un double effet, similaire à ce qui est observé à l'échelle du matériau entre la pâte et le granulat. L'effet de paroi (wall effect) entre le support stable et la réparation fraîche amène la création de vides à l'interface puisque le tassement entre les particules de ciment ne se fait pas aussi bien près du support que dans un espace libre. De plus, l'hydratation est limitée au joint puisque les pores capillaires ne peuvent pas être comblés dans toutes les directions à cause du substrat, voyant l'interface comme une zone de faiblesse, plusieurs recherches ont été réalisées afin de mieux comprendre son influence sur la durabilité d'une réparation.

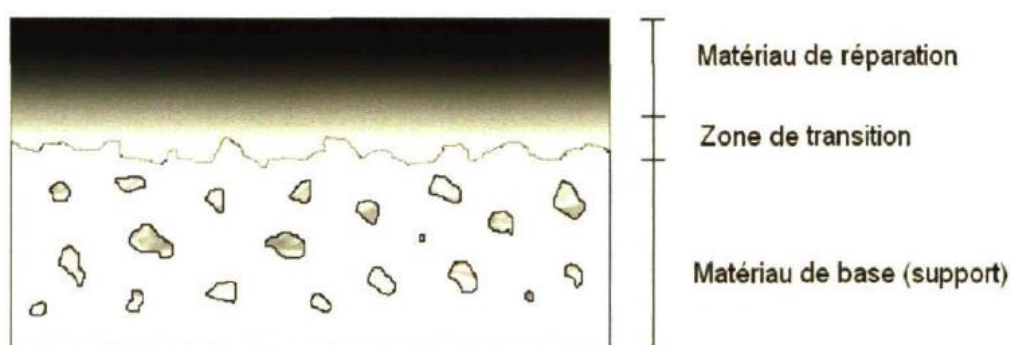


Figure II.2. Schéma d'un système de réparation

II.3.3 Paramètres influents

Pour le cas d'un produit de réparation à base de liant hydraulique appliqué sur béton, l'adhérence dépend du support et du mortier. Pour le béton, la rugosité, la porosité, la cohésion superficielle et l'eau interstitielle sont les paramètres influant sur l'adhésion de la future couche. Pour le mortier de réparation, les paramètres sont la nature et la concentration du liant, les modules de rigidité et l'absorption capillaire. Les conditions environnementales (température, humidité relative, cure... etc.) sont également des facteurs influents. Des recherches ont introduit la notion d'appétence, définie comme « ce qui pousse l'être à aller vers ce qu'il aime ». En transposant cette définition dans le cas du mortier, on peut définir ce terme par « ce qui pousse le mortier à créer le contact avec son support ». On peut résumer les facteurs influant l'adhérence comme suit :

- Les propriétés thermodynamiques du liquide et du solide qui caractérisent la mouillabilité du support,
- La rugosité modifiant la mouillabilité du support par l'intermédiaire de l'angle de contact et de la surface spécifique,
- L'absorption capillaire, dépendant de la porosité du béton mais aussi des propriétés thermodynamiques et de la viscosité de la nouvelle couche,
- La composition chimique du mortier et du béton. [8]

II.3.4. Moyens de mesure pour quantifier l'adhérence

Les tests de quantification de l'adhérence sont des tests de rupture entre deux matériaux. Ces essais peuvent être effectués par traction, par flexion et/ou par cisaillement direct ou indirect

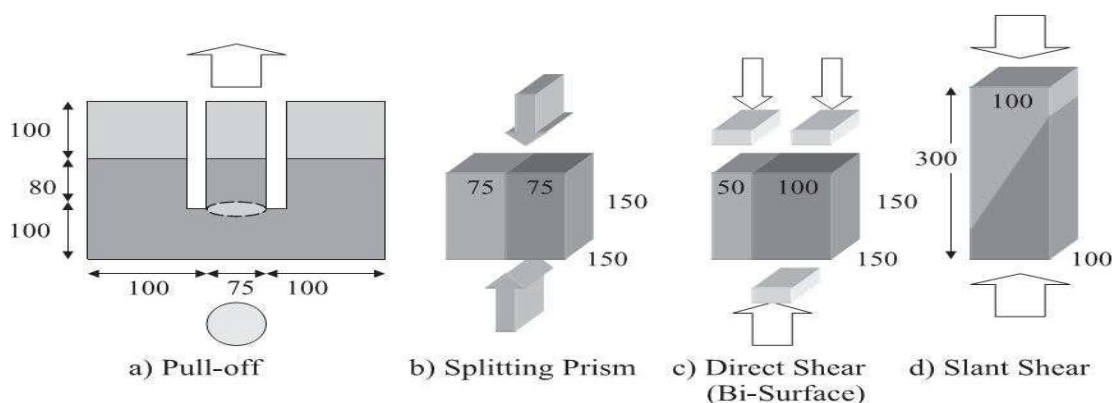


Figure II .3. Différentes techniques utilisées pour caractériser l'adhérence des mortiers [5]

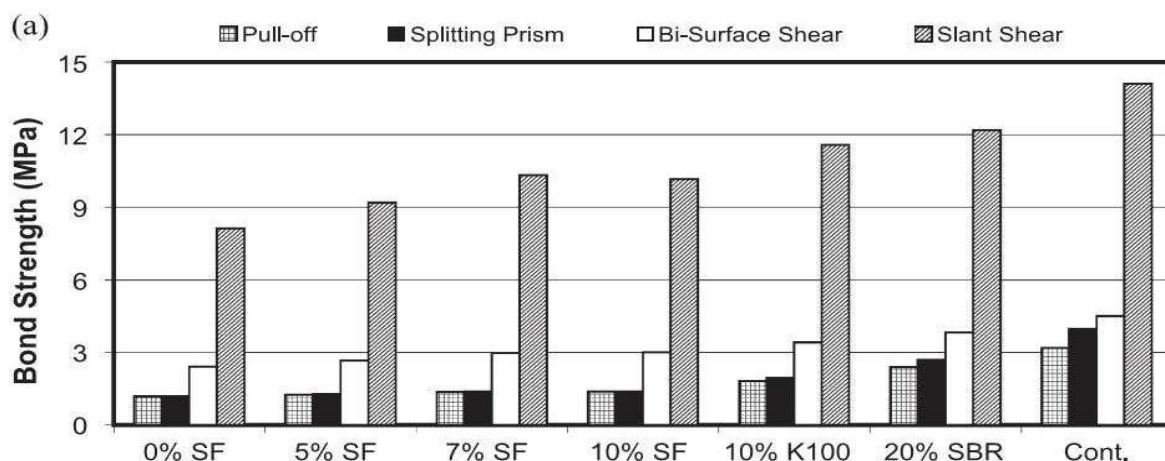


Figure II .4. Adhérence mesurée avec différentes méthodes [8]

II.4. Essai d'arrachement par traction directe ou pull-off test

C'est l'essai le plus simple à réaliser et le plus utilisé en industrie. Il peut être effectué en laboratoire et sur site. Le principe de l'essai est décrit dans la norme **EN 1015-12**.

Il est d'ailleurs effectué par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment pour l'âge souhaité certification des enduits par exemple. D'autres normes le décrivent avec des paramètres qui peuvent différer, ce qui peut poser des problèmes pour comparer les résultats obtenus à un âge souhaité, des carottages sont effectués sur un ensemble support-mortier.

(Tableau II.2)

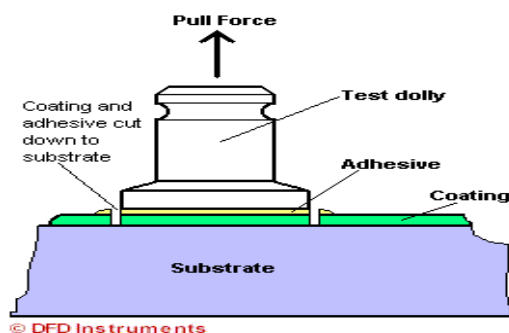


Figure II. 5. Essai d'arrachement par traction directe ou pull-off test

Des disques métalliques complétés par une tige filetée sont collés par la suite sur le mortier afin de pouvoir exercer un effort de traction à l'aide d'une pompe hydraulique et mesurer la force à l'arrachement. Ces carottages peuvent aussi être effectués sur site ce qui constitue le principal avantage. Cet essai et le traitement des résultats sont rapides à effectuer. On en déduit la force à l'arrachement et on définit le mode de rupture pour chaque essai. La rupture peut être cohésive dans le support ou dans le mortier ; elle peut être aussi adhésive, c'est-à-dire suivant l'interface ; ou mixte, à la fois cohésive et adhésive. Dans ce type d'essai, pour

qu'un produit testé soit considéré conforme aux prescriptions, il faut une proportion plus importante de rupture cohésive dans le support. Le pull-off test dépend de nombreux facteurs et ces derniers peuvent perturber la mesure de l'adhérence. L'épaisseur et le diamètre du disque métallique, la distance entre les carottages (carottages effectués sur la même dalle de 40 cm × 40 cm) dans le cas de certification, la profondeur de carottage, la vitesse de mise en charge, le nombre d'essais, la perpendicularité de la traction et la cohésion du support sont autant de facteurs qui peuvent influencer les résultats. [10]

L'inconvénient avec un essai de ce type est le fait que l'on ne caractérise pas forcément l'interface, puisque la rupture peut être cohésive dans le support ou dans le mortier. La conséquence principale est alors la grande dispersion des résultats et le nombre important d'essais à réaliser.

II.4.1. Normes pour les essais d'adhérence

Le **tableau II.2** résume les principales informations disponibles sur la réalisation des essais d'adhérence par traction, décrites dans plusieurs normes et prescriptions d'origine belge, britannique, canadienne, européenne et néerlandaise. Une rubrique indique l'objet de la norme (mesure de la cohésion superficielle du support, mesure de la résistance en traction du béton et mesure de l'adhérence de la réparation).

Tableau II.2. Dispositions principales des normes et règlements relatifs à la mesure de l'adhérence sur béton ou de la cohésion des surfaces

Norme	Objet	Matière et épaisseur du disque	Diamètre ou section des disques	Profondeur carottage [†]	Vitesse (/s)	Nombre d'essais	Prescription
CSA A23.2-6B	A [*]	-	3,5 D max	min 30 mm	100 N/s	3	
G0008	C [‡]	-	-	-	-	-	≥ adhérence
G0007	C	-	-	-	-	-	≥ adhérence tjrs ≥ 1 MPa
NBN B14-210	A	indéformable	min 16 cm ² (mieux 50cm ²)	≥ épaisseur réparation	progressive	5	-
NBN B15-201	A,T [*]	-	100 cm ²	complet	-	3/5	-
NBN B15-211	T	acier dur	surface de la carotte	min ≥ √S (mieux ≥ 2√S)	0,1 ± 0,05 MPa	-	-
BS1881-7	A	≥ 0.4 diamètre du disque	-	nécessaire	0,05 ± 0,03 MPa	6	-
prEN 1542	A	acier : 20 mm alu : 30 mm	50 mm	15 ± 5 mm	0,05 ± 0,01 MPa	-	-
prEN 1766	C	-	-	-	-	-	3/2,5 MPa
CUR 20	A	acier : 20 mm alu : 30 mm	50 ± 5 mm	15 ± 5 mm	0,05 ± 0,01 MPa	-	-

[†] si mesure d'adhérence, à compter à partir de l'interface

^{*} A = adhérence du système de réparation

[‡] C = cohésion du support en béton

^{*} T = traction directe

On pourrait retenir dans un premier temps les valeurs de résistance moyenne de **1.5 MPa** pour les réparations non structurales et de **2 MPa** pour les réparations structurales. [10]

II.4.2. Programme expérimental

Essentiellement, le programme expérimental consiste en la conduite d'essais de cohésion superficielle sur des supports en béton fabriqués aux fins de cette étude et dont la surface non coffrée a été préparée mécaniquement.

Le programme expérimental est mené de façon à mettre en évidence l'effet éventuel des paramètres d'essai suivants sur la mesure de cohésion superficielle. Les paramètres considérés sont :

- Type de colle : colles époxy à prise rapide ;
- Epaisseur de colle : **1 et 2 mm**³; diamètre du disque : **50 et 100 mm** ;
- Profondeur d'entaille : **0, 15 et 30 mm** ;
- Vitesse moyenne de mise en charge : **0,14 et 0,47 MPa/s**
- L'appareil utilisé est constitué d'un trépied sur lequel repose la cellule de mise en charge et d'une pompe à main. La charge est transmise au disque métallique par l'intermédiaire d'une rotule et d'une tige filetée.
- Les supports, des plaques de **50x50x10 cm**, ont été fabriquées avec un béton ordinaire

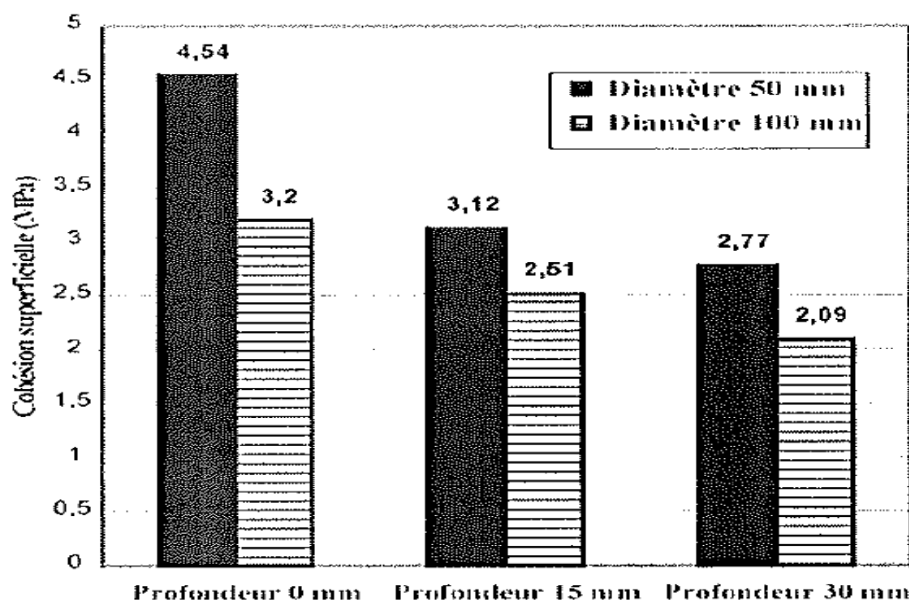


Figure II .6 . Effet du diamètre et de la profondeur de carottage sur la cohésion superficielle moyenne des dalles préparées. [10]

II.5. Essais de flexion

Afin d'obtenir plus d'informations sur le décollement d'une couche de mortier, des essais de flexion trois points statiques et en fatigue ont été réalisés sur un ensemble mortier-support métallique. L'adhérence est apportée interposée entre le support et la couche de mortier. L'inconvénient de cette méthode provient du fait que la couche étudiée n'est pas au contact d'un support poreux et ne subit pas la succion de ce dernier. Cependant, l'analyse et la compréhension des phénomènes de décollement sont facilitées par le choix de ce type de support. [10]

Pour tester la compatibilité de la cernent de literie et système composite avec un support en béton, la rainure sur le prisme de béton a été rempli avec la literie ou le système composite à la fin du durcissement du béton et a été laissé dans une chambre environnementale ventilé pour un durcissement supplémentaire. La procédure expérimentale développée avant, en utilisant un simple faisceau avec troisième point de chargement, était considéré comme une méthode appropriée pour évaluer la compatibilité entre les matériaux de réparation et de substrat. Selon les modes de défaillance (compatible ou incompatible) sont classés en

- 1 et 2: compatible; 3, 4 et 5: incompatible

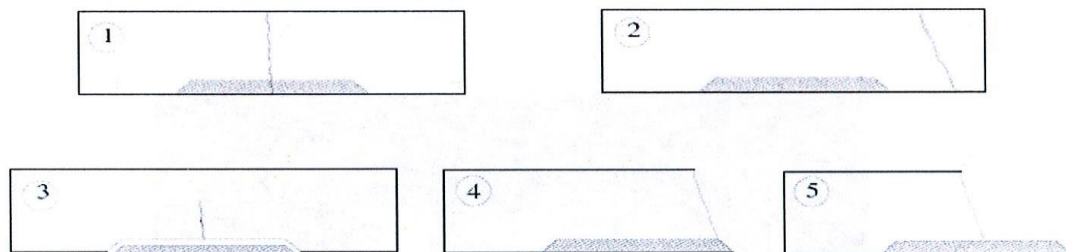


Figure II 8. Mode de rupture probable de prisme de béton avec rainure remplie avec literie ou en matériau composite

II.6. Essais de cisaillement :(slant shear)

Un des essais de cisaillement est l'essai de cisaillement par compression. Il est utilisé dans la norme **BS6319** (partie 4) pour l'évaluation de l'adhérence des matériaux de réparation.

Le paramètre influant sur l'essai est l'angle d'inclinaison de l'interface (**Figure II .9**) .La rupture n'est pas forcément localisée à l'interface et la rugosité du support influence le mode de rupture. Une couche peu rugueuse engendre une rupture adhésive suivant l'interface alors qu'une couche rugueuse peut engendrer une rupture cohésive comme pour l'essai de traction

directe. La différence des modules élastiques entre le support et la couche de réparation peut générer des concentrations de contraintes et perturber l'essai. [8]

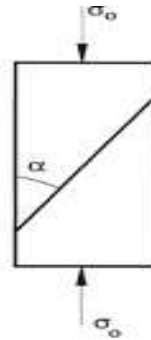


Figure II .9. Essai d'adhérence en cisaillement par compression [8]

II.7.Essai de fendage par coin : Wedge Splitting Test (WST)

L'essai consiste à appliquer une force horizontale à l'aide d'un coin et de roulements à billes sur le composite support-mortier par exemple. Une entaille est réalisée sur la partie supérieure de l'interface pour initier la fissure au niveau de l'interface .Cet essai permet de propager le décollement du support et de la nouvelle couche au niveau de l'interface. Il permet de mesurer l'ouverture de la fissure et la force appliquée et de calculer l'énergie de fissuration entre un support et un enduit.

L'inconvénient de cet essai est la préparation des éprouvettes du fait de leur forme et de la nécessité d'une bonne rectitude. Le principe de cet essai est représenté dans la **figure II 10.** [8]

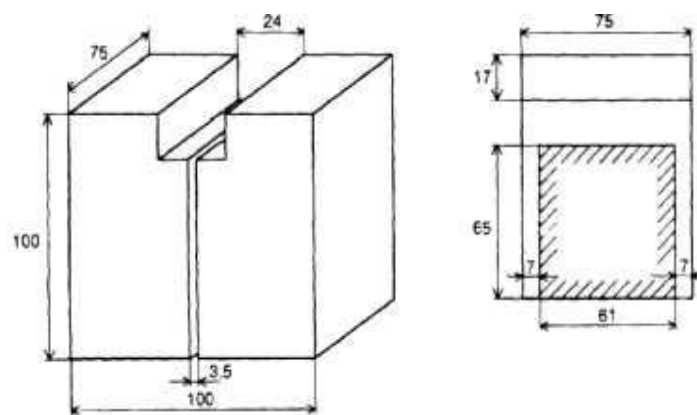


Figure II .10. Essai WST, Wedge Splitting Test

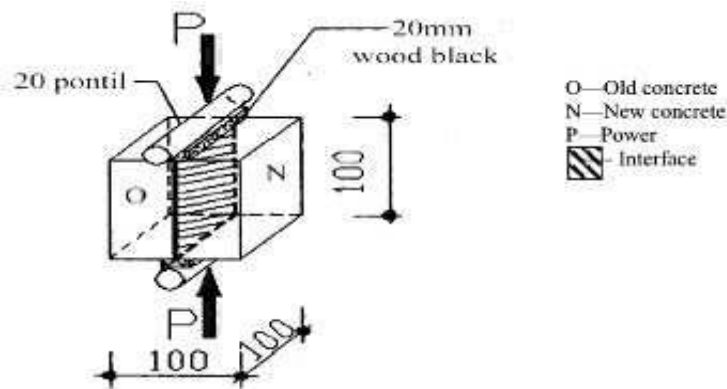


Figure II .11.Essai WST selon la norme chinoise

II.8.Compatibilité mortier réparation-béton

II.8.1Choix du matériau de réparation et principe de compatibilité

Une étape cruciale dans le processus de réhabilitation est le choix du matériau de réparation. Toutefois, la montée en flèche du domaine des réparations au cours des dernières décennies a contribué à rendre davantage complexe l'étape de conception, avec un nombre sans cesse croissant de matériaux de réparation souvent mal documentés, laissant les ingénieurs et professionnels devant la difficulté de procéder à une sélection éclairée. Ainsi, une approche répandue pour la sélection du matériau de réparation était celle l'utilisation d'un matériau de réparation ayant des caractéristiques similaires au matériau de base. Par contre, cette approche se montre un peu trop simpliste, car elle néglige les changements volumétriques importants du matériau de réparation suite à sa mise en œuvre, phénomène qui constitue la problématique majeure du domaine des réparations. Un concept plus rigoureux est ensuite apparu, celui de compatibilité. Par définition, la compatibilité est définie comme une optimisation entre les propriétés déformationnelles, de perméabilités, chimiques et électrochimiques entre le béton existant et le béton de réparation. Cet équilibre doit notamment assurer que les contraintes internes induites par des changements de volumes ou effets chimiques n'excéderont pas les valeurs limites et ce, pour toutes sections du système durant une période spécifique de temps, et sous l'action de plusieurs types de changements environnementaux ou chargements. Finalement, un matériau de réparation et un substrat possèdent une bonne compatibilité mécanique, s'il peut, durant a durée de vie anticipée, maintenir un état de contrainte interne inférieure à la résistance du système (la résistance du support), de la réparation ou de l'interface entre les deux matériaux. [9]

II.8.2 Différents types de compatibilité

Globalement, quatre types de compatibilité peuvent être distingués : déformationnelle, de perméabilité, chimique et électrochimique.

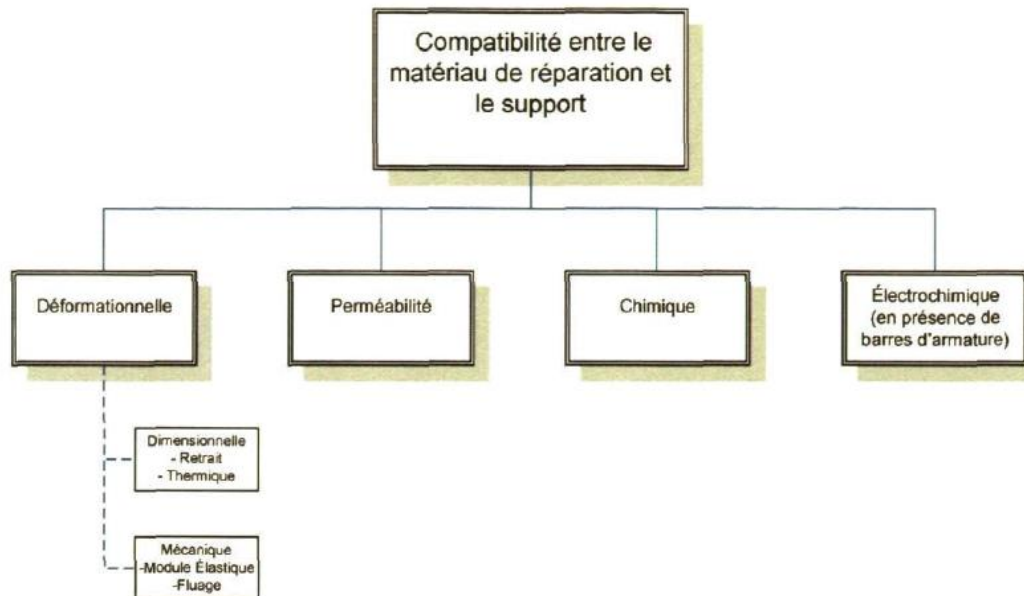


Figure II .12.Types de compatibilité entre la réparation et le substrat. [9]

La compatibilité déformationnelle est la composante la plus importante ou critique de toute réparation de béton, parce qu'elle se pose presque inévitablement. Or, la présence d'un béton d'origine très stable lié à un béton de réparation entraîne forcément des contractions qui peuvent ultimement mener à la fissuration et/ou au décollement de la réhabilitation. Donc, le matériau de réparation doit être compatible d'un point de vue déformationnelle avec le support et offrir une bonne qualité de l'interface afin de minimiser le risque d'échec du système réparé. Pour une réparation préventive, les propriétés ou phénomènes qui influencent principalement la compatibilité déformationnelle incluent le retrait de séchage et le coefficient de dilatation thermique. Dans le cas d'une réparation structurale, le matériau de réparation est sous contrainte et deux autres composantes importantes s'ajoutent à la compatibilité déformationnelle i.e. le fluage et le module élastique. Ainsi, les différentes propriétés de la compatibilité déformationnelle (ou mécanique) conditionnent la réponse mécanique du système réparé aux sollicitations thermiques, hygrométriques et gravitaires. L'objectif est d'obtenir une combinaison de propriétés qui assure une contribution de la zone réparée

équivalant aux sollicitations de conception, indépendamment des changements climatiques ou environnementaux.

Un second type de compatibilité est celui des perméabilités (substrat et matériau d'apport). Par perméabilité, il est entendu l'aptitude du béton à laisser traverser soit un liquide ou un gaz. Intuitivement, un matériau de réparation montrant une faible perméabilité semble un critère désirable pour freiner la pénétration d'agents agressifs dans la matrice. Pour les nouvelles structures, cette affirmation se révèle juste, mais dans le cas des réfections, il est nécessaire d'être prudent. Dans le cas des bétons nouveaux, réduire la perméabilité a pour but principalement d'optimiser la durabilité. Par contre, concernant les réparations, la durabilité et la perméabilité sont moins fortement liées. Une faible perméabilité de la réparation risque d'emprisonner l'eau et les ions se trouvant dans la porosité du support au moment de la réfection et réduit possiblement la durabilité du système global. En fait, c'est l'aspect premier à considérer dans le cas des réparations puisque l'eau ne pouvant pas sortir du système, risque de générer des pressions hydrauliques/osmotiques à l'interface et provoquer ultimement la fissuration/décollement. De plus, une faible perméabilité de la réhabilitation est souvent obtenue pour des bétons présentant un faible rapport eau/ciment et d'un dosage en ciment important. Ce dosage important en ciment augmente le retrait et puisque le matériau est gêné par la présence du support, la tendance à fissurer devient non négligeable. Viser une très faible perméabilité de la réparation peut être problématique pour la durabilité du système réparé puisque l'apparition de fissures devient une source de danger pour la durabilité du système réparé. La perméabilité de la réparation ne semble pas un critère dominant comparativement à la fissuration de la réparation en matière de durabilité. Ainsi, minimiser la fissuration de la réparation plutôt que minimiser la perméabilité est primordial afin de permettre une durabilité satisfaisante du système réparé. [9]

II.8.3.Facteurs d'influence de la compatibilité entre la réparation et le support

Jusqu'ici, il a été question des principaux facteurs internes qui peuvent affecter la durabilité d'une réparation i.e. l'adhérence et la compatibilité des propriétés du matériau de réparation avec le support. Par contre, le système réparé est soumis à des perturbations externes que ce soit des changements de température, des variations d'humidité, différents cycles (chargements, gel/dégel, mouillage/séchage) ou des attaques chimiques. Ces différents facteurs peuvent altérer le matériau de réparation ou même l'adhérence entre les deux matériaux cimentaires et nuire à la compatibilité entre les deux matériaux

Les changements thermiques affectent directement la compatibilité déformationnelle du

matériau composite ou plus spécifiquement la compatibilité thermique. Le béton de masse est souvent plus enclin à la fissuration due à la chaleur, car il présente des gradients thermiques importants. Dans le cas des réparations cimentaires, l'importance du phénomène thermique pour la durabilité est davantage liée à la disparité des coefficients de dilatation thermiques des deux matériaux. La différence entre ces coefficients implique des contraintes thermiques au niveau de l'interface, lesquelles s'additionnent aux contraintes de retrait et aux contraintes dues au chargement, accroissant ainsi les risques de délamination de la réparation. [9]

II.9. Matériaux de réparation

Dans les années 60, il n'existait pas de mortier de réparation sur le marché. L'entrepreneur préparait donc le mortier sur chantier. Actuellement, plusieurs types de produits sont proposés sur le marché. Les produits utilisés pour la réparation des ouvrages en béton peuvent être classés en trois catégories, selon le liant, qui assure la cohésion de l'ensemble, est de nature hydraulique (ciment), organique réactif (résine synthétique) ou mixte, c'est-à-dire à la fois hydraulique et organique réactif.

Les produits à base de liants hydrauliques peuvent se subdiviser eux-mêmes selon que le liant en question est modifié ou non par un polymère organique.

Les produits à base de résines synthétiques sont assez différents les uns des autres selon les transformations physiques et chimiques qui se produisent au cours de leur mise en œuvre et selon la structure du polymère obtenu finalement (linéaire ou réticulée).

Les produits mixtes dont le liant actif est constitué à la fois de ciment et de résine synthétique réactive font intervenir à la fois la prise et le durcissement du liant hydraulique et la réticulation du polymère organique. [11]

II.9.1. Types de mortiers :

.a) Mortier de ragréage

Un mortier de ragréage est utilisé pour réparer des dégradations ou défauts, due à une mise en œuvre ou un comportement déficient du béton, ou à la corrosion des armatures, ou encore à des sollicitations mécaniques ; physiques ou chimiques. L'opération de ragréage consiste à remplir les vides, et à remplacer le béton déficient à des qualités moindre par du mortier présentant les qualités requises.

Le mortier de ragréage doit être appliqué en couches d'une épaisseur d'au moins 5 mm, et supérieures à $3 D_{max}$. Le recouvrement des armatures avec le mortier de ragréage doit être en tout point d'au moins 10 mm, et supérieurs à D_{max} (Où D_{max} est le diamètre maximal).

b) Mortier de surfacage (ou mortier d'égalisation)

Le mortier de réparation dont l'objet principal est de rétablir la continuité de surface du béton, ces discontinuités pouvant provenir de défauts de surface du béton (pores, retassures,...), soit des sollicitations physiques ou chimiques résultant en la mise à nu des granulats du béton. Il s'agit de mortiers de catégorie **I**.

- Il peut aussi s'appliquer sur des surfaces réparées au mortier de ragréage.
- L'épaisseur d'une couche de surfacage peut varier de 8 mm, avec de l'ordre de 5 mm.
- En tout point (sur des granulats mis à nu), l'épaisseur doit être d'au 2 mm.

Dans la suite du texte, seul le vocable " Mortier de réparation" sera utilisé, étant entendu que ce vocable recouvre aussi bien les mortiers de ragréage que les mortiers de surfacage.

C) Enduit de protection (ou mortier de recouvrement)

Constituant d'un système de réparation dont l'objet est de protéger la surface du béton contre les sollicitations physico-chimiques provenant de l'environnement.

Il peut aussi s'appliquer sur des surfaces réparées au mortier de ragréage ou de surfes enduits de protection font partie des revêtements minéraux [12].

II.9.2. Catégorie de mortiers de réparation

En fonction des résistances mécaniques, on distingue 4 catégories de mortiers de réparation :

Catégorie I :

Mortier destiné à la réparation de défauts ou dégradations superficielles, dûe à une mise en œuvre déficiente (nids de gravier,...), à la corrosion d'armatures (défaut de recouvrement) ou à des sollicitations mécaniques, physiques ou chimiques, en vue de restituer l'aspect géométrique ou esthétique de la structure.

Catégorie II :

Même domaine d'emploi que la catégorie I, mais, en plus, pour des réparations structurelles au béton.

Cela signifie que le ragréage vise à restituer ou à améliorer la portance de l'élément considéré.

Catégorie III :

Même domaine d'emploi que la catégorie II, mais pour laquelle des exigences particulières sont imposées du point de vue résistances mécaniques et/ou durabilité, à l'exclusion toutefois des mortiers soumis à une usure mécanique.

Catégorie IV :

Même domaine d'emploi que les catégories II ou III, mais en plus soumis directement à une usure mécanique (par exemple pour le ragréage de béton routier, chapes industrielles,...), et qui peuvent contenir des additifs complémentaires (par exemple fibres d'acier ou synthétiques).

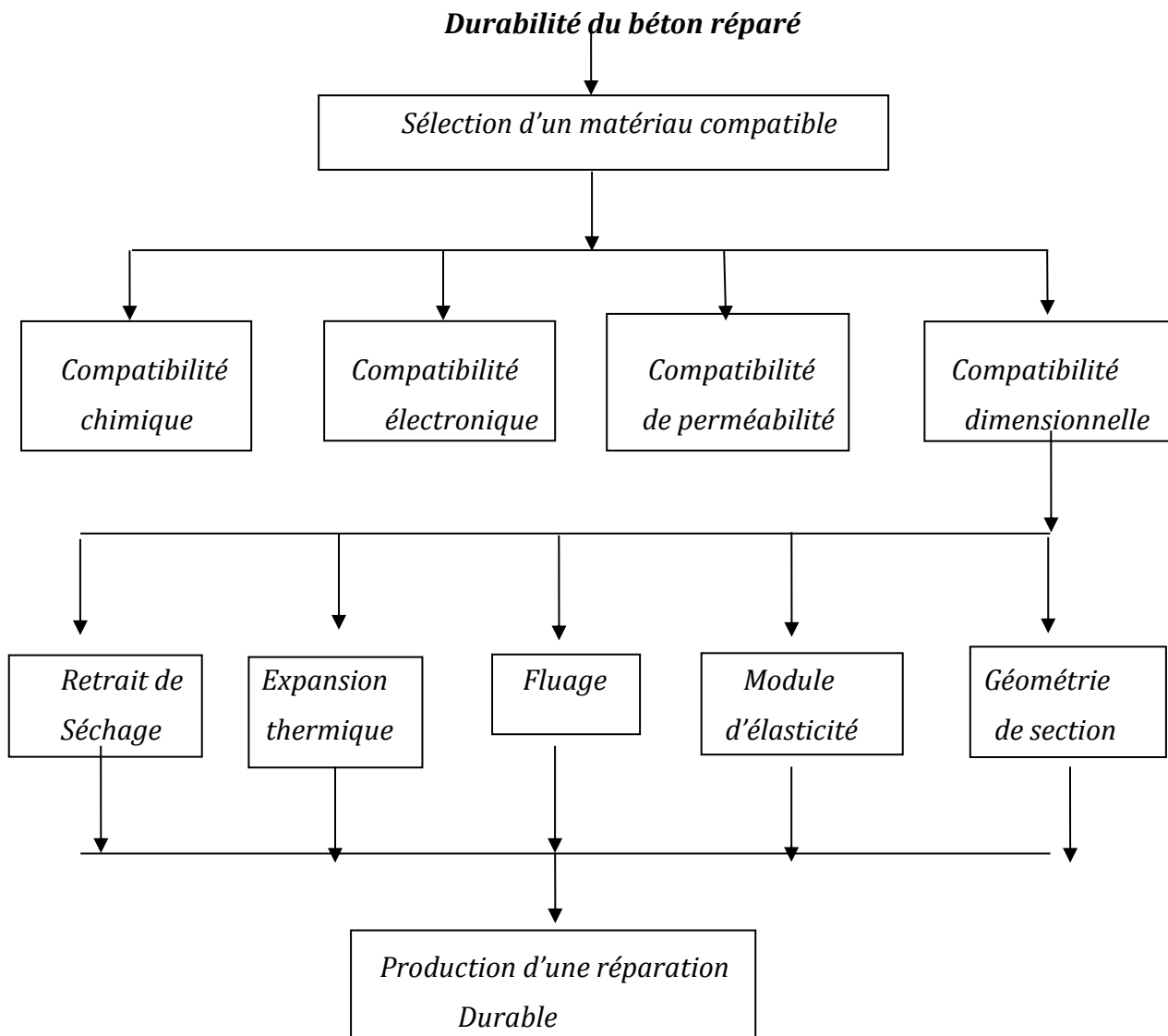
Remarque

Les mortiers des catégories **III** et **IV** ne sont pas uniquement destinés à des travaux de réparation. Ils peuvent être prévus pour une construction neuve.

Les exigences relatives aux catégories **III** et **IV** ne sont pas précisées dans ce document. Le concepteur établit dans le cahier des charges, sur la base des spécifications de la catégorie **II**, les exigences complémentaires auxquelles ces produits doivent satisfaire [11]

II.9.3. Critères de sélection des mortiers de réparation

La majorité des travaux se sont attachés à rechercher les critères à satisfaire pour les mortiers afin d'assurer une performance suffisante des bétons réparés. Ces critères insistent sur les qualités de durabilité, de compatibilité vis-à-vis du béton et d'économie. Parmi les nombreux exemples de sélection nous en présentons [12] dans la figure II.13 suivante un exemple pour la sélection d'un mortier de réparation basé sur la durabilité.



FigureII.13. Critères de sélection d'un mortier de réparation basés sur la durabilité.

Les produits utilisés pour la réparation des ouvrages en béton peuvent être classés en trois catégories, selon que le liant, qui assure la cohésion de l'ensemble, soit de nature hydraulique (ciment), organique réactif (résine synthétique) ou mixte, c'est-à-dire à la fois hydraulique et organique réactif. Les mortiers à base de liants hydrauliques avec ajouts sont constitués principalement d'un liant (ciment), des granulats (roulés et concassés), d'ajouts (fibres et adjuvants).

II.9.4.Épaisseur des mortiers de réparation

- Épaisseur nominale par couche
- L'épaisseur nominale par couche est définie par le fabricant.
- Épaisseur minimale par couche
- L'épaisseur minimale est fixée par le fabricant. Elle ne peut être inférieure à $3 D_{max}$.
- Le recouvrement des armatures avec le mortier de ragréage doit être d'au moins 10 mm.

Si, pour l'une ou l'autre raison, il n'est pas possible de réaliser un recouvrement des armatures de minimum 10 mm, il y a lieu d'adapter le système de réparation de façon à garantir la protection des armatures avec un recouvrement plus faible, par exemple par l'application d'un revêtement complémentaire [12].

II.9.5.Objectifs de la réparation

Il est défini par l'étude des causes et effets de la dégradation :

- non structurelle : la réparation traite des dégradations ne portant pas atteinte à la stabilité de l'ouvrage (épaufrures, dégradations de surface).
- Structurelle : la réparation traite des dégradations qui portent atteinte à la stabilité de l'ouvrage (dégradation d'éléments de structure, dégradations généralisées en profondeur).

Le produit choisi devra restaurer la forme du béton et participer à la reprise des efforts (dans la limite, définie par une étude spécialisée). Il devra également protéger les armatures contre la corrosion due à la carbonatation.

Critères de choix du produit [12] :

- ✓ Adhérence.
- ✓ Résistances mécaniques.

Épaisseur d'application

II.10.Propriétés des matériaux de réparation

Il existe trois principales catégories de matériaux de réparation pour surfaces en béton : le mortier à base de polymères, le mortier cimentaire modifié par des polymères et le mortier cimentaire simple. Chaque catégorie a des propriétés physiques spécifiques.

Il est important de comprendre ces propriétés, car elles conditionnent le choix des matériaux de réparation qui doivent être compatibles, autant que faire se peut, avec les propriétés du

béton à réparer. Pour cela, il faut examiner les registres de composition du béton d'origine (lorsqu'ils existent) et prélever des carottes pour déterminer la résistance à la compression, la porosité et la teneur en chlorures, afin d'évaluer la compatibilité électrochimique du béton en place avec les matériaux de réparation envisagés.

Les mortiers à base de résines de polymères peuvent être composés d'époxy, de polyester, d'acrylique ou de polyuréthane. Les mortiers cimentaires modifiés par des polymères sont composés de polymères hydrosolubles. Bien que ces produits de réparation à base de polymères soient d'usages multiples et de plus en plus utilisés, ils peuvent cependant se détériorer prématurément s'ils sont mal utilisés. De plus, les propriétés de ces produits à base de polymères peuvent grandement différer de celles du béton à réparer, notamment en ce qui concerne la perméabilité, la résistance, le coefficient de dilatation perméabilité thermique, la porosité ou les propriétés électrochimiques, et lorsque c'est le cas, leur utilisation est en violation avec les principes élémentaires d'une bonne réparation. Enfin, les matériaux à base de polymères dépendent étroitement de la qualité de leur application. Il faut donc faire attention au moindre détail lorsque l'on choisit ce type de matériaux.

Les principaux facteurs à considérer dans les choix de la meilleure technique de réparation sont au nombre de deux : la compatibilité du matériau de réparation avec le béton en place et les conditions de service et de réparation.

II.10.1. Compatibilité avec le béton en place

Il est primordial que le matériau de réparation choisi soit compatible avec le béton sain avoisinant. De grandes différences de propriétés (par exemple, dans la rigidité ou dans le coefficient de dilatation thermique) peuvent se traduire par une réparation de courte durée ou un endommagement du béton sain avoisinant. Pour choisir la meilleure technique de réparation, on pourra recourir aux lignes directrices suivantes :

II.10.2. Adhérence

Une bonne adhérence entre le matériau de réparation et le béton en place est essentielle. Le matériau de réparation ne doit donc pas se rétracter pendant son mûrissement ou, s'il se rétracte, il ne doit pas causer la perte d'adhérence avec le béton sain en place. La perte d'adhérence se traduira inévitablement par l'échec de la réparation et des dommages possibles aux zones qui étaient saines avant la réparation.

L'intégrité de l'adhérence dépend de quatre conditions clés

- ✓ Une bonne préparation de la surface du béton en place – y compris l'application d'un agent de liaisonnement
- ✓ L'utilisation d'un béton ou d'un mortier de réparation qui nécessite très peu d'eau pendant sa mise en place.
- ✓ L'utilisation de techniques de construction qui minimisent le potentiel de retrait (béton sec compacté, béton projeté à mélange sec, béton à granulats pré-placés, etc.).
- ✓ L'utilisation de matériaux de réparation qui compensent le retrait une fois qu'ils ont été mélangés mis en place.

Pour garantir une bonne adhérence, il faut s'assurer que le coefficient de dilatation thermique (changement des dimensions causé par le changement de température) du matériau de réparation est identique à celui du béton en place, notamment dans le cas de structures exposées à de grandes variations de température en service et pour de grandes réparations (en longueur ou en épaisseur). Une bonne préparation de surface donne une surface sèche, plane et libre de saleté, de poussière, d'huile et de graisse. L'enlèvement des contaminants de surface permet aux agents de liaisonnement et aux matériaux de réparation d'avoir un contact direct avec une surface de béton existant plus grande et plus rugueuse. Les agents de liaisonnement (naturels ou synthétiques) augmentent la résistance et l'intégrité sur la surface du béton en place, ce qui en retour améliore son adhérence avec le matériau de réparation.

II.10.3. Module d'élasticité

Le module d'élasticité d'un matériau mesure sa rigidité. Il est important que le matériau de réparation et le béton à réparer aient la même rigidité. Car lorsque deux matériaux de modules d'élasticité différents sont en contact, leur différence en déformabilité crée des problèmes sous certaines conditions de charge.

II.10.4. Perméabilité

La perméabilité est la capacité d'un matériau à laisser passer des liquides ou des substances gazeuses.

Les matériaux de réparation de surface devraient avoir une perméabilité à la vapeur d'eau similaire à celle du béton en place. De larges réparations, couches ou revêtements imperméables peuvent entraver l'évacuation de l'humidité du béton en place et créer des boursouffures au niveau de la ligne d'adhérence ou dans le matériau le moins résistant.

II.10.5. Compatibilité chimique

Le matériau de réparation doit être chimiquement compatible avec l'armature d'acier, autres pièces métalliques enfouies, le béton en place ainsi qu'avec les revêtements protecteurs ou les scellants.

Lorsque la différence en perméabilité ou en chlorures entre la surface réparée et le béton avoisinant est trop importante, cela crée des régions anodiques de chaque côté de la surface réparée, ce qui accélère la vitesse de corrosion et cause la défaillance prématurée de la surface réparée ou du béton avoisinant.

II.11. Technique de réparation

II.11.1 .Mise en place et conditions de réparation

Une dernière étape cruciale dans le processus de réparation est la mise en place du matériau. La technique généralement utilisée en réhabilitation cimentaire, la réparation de surface localisée pour sa facilité d'exécution. Les étapes de la méthode consistent d'abord à retirer le béton endommagé et à dégager les premières barres d'armature dans le cas du béton armé. Ensuite, une préparation de surface est réalisée pour donner au support une bonne rugosité afin d'améliorer l'adhérence avec le matériau de réparation. Différents équipements sont disponibles pour réaliser un traitement de surface, mais l'important est de donner une bonne rugosité en minimisant la microfissuration de la surface du support. Un nettoyage est important par la suite afin de retirer toute poussière ou saleté qui diminuerait la résistance de l'adhérence. L'utilisation d'un agent de liaison est possible, quoique déconseillé par nombre de spécialistes, pour améliorer les propriétés mécaniques de l'interface. L'emploi d'un agent de liaison est délicat puisque peu de recherches ont été réalisées sur le sujet et qu'en pratique, son application demande beaucoup de plus de connaissances pour assurer la durabilité du système réparé. Finalement, la mise en place du matériau de réparation est effectuée, suivie de la période de cure. Diverses mesures préventives, comme les imperméabilisants, les membranes et systèmes de protection cathodique sont disponibles pour accroître la durée de vie de l'ouvrage lorsque la réparation est soumise à des conditions d'exposition agressives.

L'état du support avant l'application du matériau de réparation est important pour la durabilité de l'ouvrage. Mis à part, le traitement de surface mentionné précédemment, l'état de chargement sur le support influence aussi l'efficacité de la réparation. En fait, certaines études ont montré que la fissuration occasionnée par le retrait de séchage pouvait être diminuée en laissant une portion de la charge morte agir sur la structure durant la réparation. La mouillabilité du support a aussi son influence. [9]

II.11.2. Comportement structural d'une réparation

L'analyse structurale d'une réparation nécessite d'abord la compréhension du comportement mécanique des matériaux en cause. Toutefois, l'analyse est complexe puisque les matériaux possèdent des compositions différentes (ciment, granulats, sable, eau, adjuvant, air entraîné, ...) et que leurs caractéristiques (module élastique, retrait, fluage, hydratation, ...) évoluent dans le temps et sous différentes conditions (température, humidité, chargements, ...). De plus, le béton est un matériau hétérogène, mais pour simplifier l'approche, celui-ci est souvent considéré comme étant homogène et isotrope à l'échelle macroscopique. L'avantage structural du béton est surtout son comportement en compression puisqu'en général, la résistance en traction simple est dix fois moins importante que la résistance en compression. Donc, sous sollicitation statique simple en compression, la relation charge/déformation du matériau est quasi linéaire pour des niveaux de contrainte faibles à modérés (entre 50 et 60 % de la limite ultime du matériau). Lorsque la contrainte est supérieure à 60% de la contrainte de rupture, le matériau réagit de façon « non linéaire » et cette tendance de non proportionnalité est caractérisée par la progression de microfissures qui se rejoignent, formant ainsi des macrofissures menant ultimement à la rupture du matériau. La nature quasi-fragile du béton offre peu de ductilité ou de déformation plastique avant la rupture. Par ailleurs, sur une base comparative, les bétons ordinaires (**BO**) sont généralement plus « ductiles » que les bétons à hautes performances (**BHP**). Il est important de ne pas confondre ductilité et rigidité puisque la rigidité régit la déformation d'un matériau avant la limite d'élasticité (voir I sur la **Figure II.14**) et la ductilité décrit plutôt la déformation entre la limite d'élasticité et la rupture. [8]

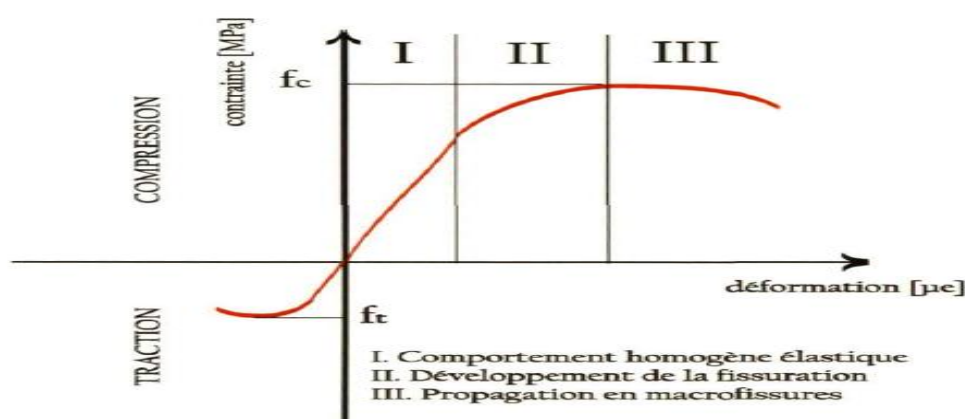


Figure II.14. Courbe contrainte-déformation en compression et traction simple pour un béton usuel [10]

II.12. Préparation de la surface de béton

La préparation de la surface de béton en vue de l'application d'un revêtement ou d'un produit de réparation englobe toutes les étapes qui suivent l'élimination du béton dégradé. Nombre de ces étapes s'imposent lorsqu'on n'enlève pas ou guère de béton.

Une bonne préparation permet de disposer d'une surface sèche, égale et plane qui est exempte de salissures, de poussière, d'huile et de graisse. L'élimination des contaminants de surface assure un contact direct entre les matériaux de réparation et le substrat, augmentant la surface réelle et la rugosité du support, et assurant une meilleure adhérence du produit appliqué.

Cependant, l'état optimal de la surface de béton dépend du type de réparation envisagé et de l'état du support. Par ailleurs il n'est pas toujours possible de déterminer quoi enlever car, parfois, les zones endommagées ou dégradées ne sont pas bien définies.

La meilleure solution est d'enlever toute la couche de béton dans laquelle le granulat se détache de la matrice sans effort important. [9]

II.13. Méthodes de préparation des surfaces

II.13.1. Décapage chimique

Le béton contaminé par l'huile, la graisse ou les salissures peut être nettoyé à l'aide d'un détergent, de phosphate tri sodique ou de divers produits de décapage exclusifs.

Après avoir utilisé ces produits, il faut frotter vigoureusement la surface à la brosse et rincer à fond avec de l'eau afin d'éliminer tous les résidus. Il ne faut pas se servir de solvants pour nettoyer le béton, car ils ont pour effet de dissoudre les agents contaminants et de les faire pénétrer davantage dans le matériau. L'acide chlorhydrique n'est guère efficace lorsqu'il s'agit d'éliminer l'huile ou la graisse.



Figure II.15. Décapage chimique. [9]

II.13.2. Nettoyage mécanique

Les appareils servant au nettoyage mécanique sont de deux types : rotatifs et à percussion.

Les appareils rotatifs sont ceux à disques et les meuleuses, qui sont habituellement employés pour les supports de béton à faible résistance en compression et dont la finition n'a pas été faite à la truelle d'acier. Ils ne conviennent pas pour le béton dense et dur, car ils risquent de le polir plutôt que de l'abriter.



Figure II.16. Nettoyage mécanique. [9]

II.13.3. Sablage au jet

Les machines de décapage au sable utilisent de l'air comprimé pour projeter à grande vitesse, au moyen d'une lance, un flot de sable (granulométrie comprise entre 2 et 2,5) ou un autre type d'abrasif. On se sert d'un sable plus fin pour éliminer la laitance, et d'un sable anguleux qui coupe mieux que le sable rond pour enlever un revêtement sur support en béton. Si l'on veut éviter la contamination de la surface de béton lors de la phase de préparation, il faut que l'entrée d'air de la décapeuse au sable soit munie d'un bon intercepteur d'huile. Il importe de tenir compte de la dureté du béton pour déterminer si le sablage au jet est la méthode la plus économique lorsqu'il faut procéder à un nettoyage poussé.

On peut utiliser le décapage au sable pour assurer la préparation finale de la surface, c'est-à-dire pour enlever la laitance, les salissures, l'huile et les autres contaminants.

Dans le cas du sablage à sec, il se pose des problèmes de poussière et d'enlèvement des débris. Les grandes quantités de béton dégagé et de sable sont ramassées à l'aide d'un aspirateur industriel et les ouvriers portent habituellement des casques alimentés en air comprimé. En raison de la poussière produite et des risques qu'il entraîne pour la santé, le sablage à sec n'est guère répandu, de nos jours.



Figure II.17. Sablage au jet. [9]

II.13.4.Grenaillage

La grenailluse utilise un abrasif métallique (grenaille d'acier) pour décaper la surface de béton. La grenaille, propulsée par une roue folle et projetée sur le béton, est récupérée par la machine. Cette méthode sert généralement au nettoyage ou à la scarification du béton jusqu'à une profondeur de 3 mm. Lorsqu'on doit mettre en place une chape ou un autre type de revêtement, on procède à un décapage plus énergique afin d'exposer le granulats grossiers. On obtient ainsi une abrasion en profondeur : la matrice de mortier est éliminée, parfois à une profondeur qui permet de dégager le gros granulats. Il y a trois facteurs qui influent sur la profondeur de décapage :

- La granulométrie de l'abrasif (la grosse grenaille attaque la surface plus profondément);
- La quantité d'abrasif (un robinet de réglage permet à l'opérateur d'augmenter le débit d'abrasif pour assurer une gravure plus profonde);
- La vitesse de la machine (qui ne doit pas être trop grande si l'on veut obtenir une gravure plus profonde).

La largeur de la zone à nettoyer, la profondeur de la couche à enlever, la dureté du béton et la présence de revêtements, influent sur la cadence de travail. Par exemple, dans le cas d'un revêtement élastomérique lourd sur plancher ancien, la grenaille rebondira sur la surface au lieu de la décaper. En outre, si le revêtement est usé par endroits, la gravure du béton nu sera plus profonde, ce qui produira une surface irrégulière. Pour les réparations en forte épaisseur, l'irrégularité de la surface ne pose pas de problèmes mais, dans le cas de couches minces, il faut que la surface soit plane.



Figure II. 18. Grenaillage.

II.13.5. Gravure à l'acide

La gravure à l'acide permet d'enlever assez de ciment durci pour rendre la surface rugueuse, ce qui améliore l'adhérence entre le produit de réparation et le support. En raison des risques de corrosion, le comité de l'ACI recommande de n'utiliser la gravure à l'acide que si aucune autre méthode de préparation des surfaces n'est acceptable.

II.13.6. Décapage thermique

Le décapage thermique sert généralement à nettoyer les surfaces de béton qui doivent recevoir des revêtements ou des couvertures.

II.14. Fibres

Plusieurs recherches ont été effectuées pour étudier l'effet de l'incorporation des fibres dans la matrice cimentaire sur le comportement et la performance des mortiers. A titre indicatif, la **figure II.19** montre d'une manière phénoménologique l'effet d'adjonction des fibres dans une éprouvette de béton soumise à la traction. On remarque que l'ajout des fibres augmente la résistance du béton et lui confère une ductilité relativement grande.

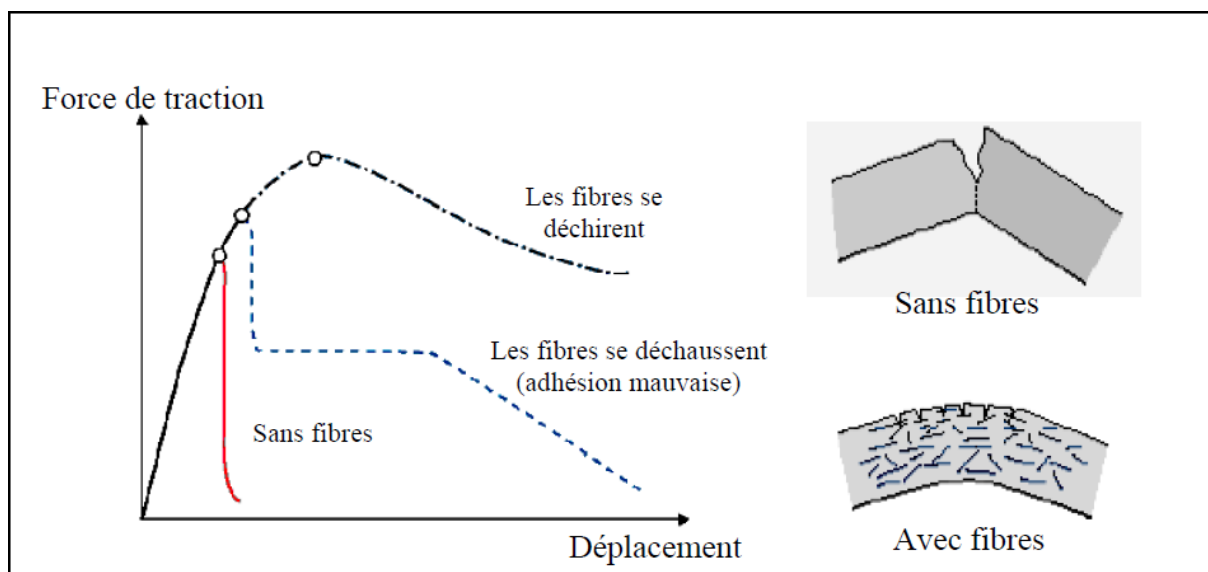


Figure II.19. Courbe force-déplacement pour une éprouvette de béton soumise à la traction avec et sans ajout de fibres

Plusieurs types de fibres ont été utilisés, parmi lesquelles on distingue [15] :

- Les fibres métalliques (acier, fonte)
- Les fibres organiques (polypropylène, polyesters, polyamides et polystyrène)
- Les fibres minérales (amiante, verre, carbone)
- Les fibres végétales (jute, sisal, coir, bois, bambou, palmier)

Les qualités généralement recherchées sont les suivantes:

- Adhésivité à la pâte de ciment.
- Bonne résistance à la traction.
- Stabilité chimique dans le milieu basique (ciment).
- Durabilité.
- Economie
- Sécurité d'emploi en cours de manipulation

Tableau II.3. Propriétés physiques et mécaniques des différentes fibres utilisées

Type des Fibres	Densité	Diamètre typique [µm]	Résistance à la traction [GPA]	Module d'élasticité [GPA]	Allongement à la rupture [%]	Adhérence dans la pâte de ciment	Résistance dans la pâte de ciment
Acier	7,85	150-1000	0,30-2,50	160-210	3-4	modérée	suffisante
Verre	2,7	10-15	1,80-3,00	75	2-3	bonne	suffisante
Polypropylène	0,9	> 4	0,50-0,75	5-18	5-15	bonne	bonne
Amiante	2,6	0,02-20	1,00-4,50	160	2-3	excellente	excellente
Polyester	1,4	-	0,70-0,85	8	11-13	-	-
Carbone	1,7-2,0	5-9	1,70-2,00	250-400	0,5-1,5	-	-
cellulose	1,5	14-45	1,50	20-40	8-12	-	-
Jute	1,45	18-2000	1,45	-	3-4	-	-
Sisal	1,5	10-50	1,50	15,2	3	-	-
coir	1,08	20-700	1,08	2,8	37,7	-	-

Le choix de la nature, la géométrie, les dimensions et le dosage fibres à incorporer dans le mélange dépend des utilisations prévues. D'après leur dimensions, les fibres peuvent être classées comme suit

- Les macro-fibres : ($\varnothing = 300 \div 1000$)µm Leur dosage est limité à 2 ou 3% pour des raisons de maniabilité. Leur nombre ne leur permet pas d'intervenir efficacement sur le comportement du matériau. Elles confèrent au béton une ductilité et une résistance améliorées dans le stade de fissuration.
- Les micros fibres : ($\varnothing = 150 \div \leq 300$) µm

Leur grande surface spécifique, leur nombre et la qualité de leur liaison avec la matrice permettent d'augmenter la résistance à la propagation des microfissures.

- Les méso-fibres : ($\varnothing \leq 150 \mu\text{m}$)

Le grand dosage utilisé ($> 5\%$) leur permet d'intervenir avant le début de la fissuration (pic de la contrainte) par la limitation de la coalescence des microfissures lorsque les microfibrilles deviennent inefficaces. Les méso-fibres ont un faible élanement, et elles agissent essentiellement comme élément de couture des macro-fissures sur une courte plage d'où elles sont moins efficaces mécaniquement que les microfibrilles, mais elles compensent cette inefficacité par leur nombre.

La figure II.20 schématise l'influence de la taille des fibres sur les processus de déformation et des éprouvettes de mortiers. On constate que l'ajout des macro-fibres agit principalement sur la ductilité du mortier en augmentant les déformations à la rupture. Par contre, l'ajout des micro-fibres semble améliorer la résistance et avec un degré moins la ductilité du matériau. Finalement, le tableau II.4 présente le domaine d'utilisation ainsi que les avantages acquis par l'utilisation de certaines fibres. [15]

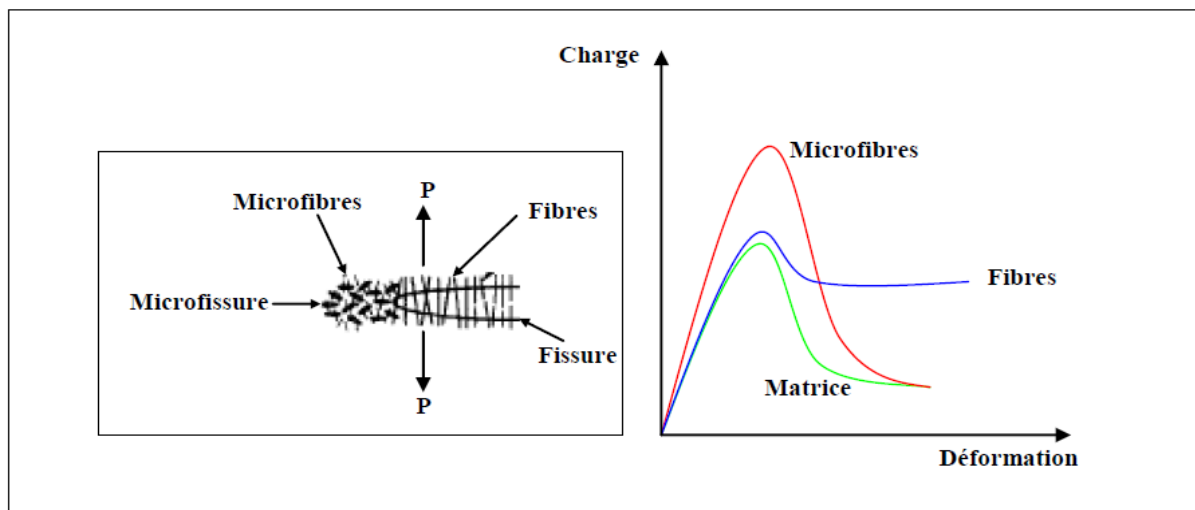


Figure II.20. Influence des tailles des fibres sur la formation de la fissure

Tableau II.4. Avantages et domaines d'utilisation de certaines fibres

Fibre	Avantages (améliorations)	Domaines d'utilisation	Quantité recommandée
Acier	Résistance à la traction. Résistance à la flexion La ductilité.	dallages industriels, dallage de parking, pistes, pieux, silos déversoirs de barrage préfabriqués, béton projeté	(0,3 – 2) % en volume
Fonte ductile	Pas corrodables, légère amélioration de la résistance à la compression. Bonne résistance à la flexion	Mortier, béton classique, béton projeté Travaux de réparation des tunnels	1,7 % en volume.
polypropylène	Résistance aux chocs, réduction de l'écaillage, diminue le retrait à jeune âge, améliore la maniabilité	Dallages, réparation des ouvrages, béton projeté, béton pompé, enduits, mortier projeté,...	(0,05 – 0,2)% en volume
Verre	Résistance à la traction, ductilité en compression et en traction, réduction d'écaillage	Fabrication de panneaux très minces, éléments décoratifs préfabriqués.	-

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons caractériser les différents matériaux (sable alluvionnaire, sable dunaire, sable calcaire, gravier, ciment) utilisés dans l'étude expérimentale et les essais réalisés au niveau du laboratoire de recherche de génie civil de l'université de Laghouat.

III.1. Granulats

Le sable : Le sable est le composant principal du mortier, qui représente le squelette granulaire du mélange donc il participe à la résistance.

- Pour notre cas il s'agit du sable de dunes et de sable calcaire ont été utilisés pour la caractérisation des mortiers étudiés et de sable alluvionnaire pour la formulation de béton.

*Un sable de dune provenant de la région Nord de la ville de Laghouat (Oasis Nord), il est noté dans ce qui suit « **SD** »

* Un sable calcaire est issu des résidus de la station de concassage des roches calcaires dite Station d'Ouezzane située au nord de la commune de Laghouat près du pont d'Oued M'zi. En effet, il est noté dans ce qui suit « **SC** ».

*Un sable alluvionnaire provenant d'oued M'zi (région de Laghouat), il est noté dans ce qui suit « **SA** ».

En vue de leur utilisation dans la confection du mortier, le sable doit être soumis à des essais de laboratoire, essentiellement l'analyse granulométrique, l'essai de l'équivalent de sable, ces différents essais permettent d'identifier un sable.

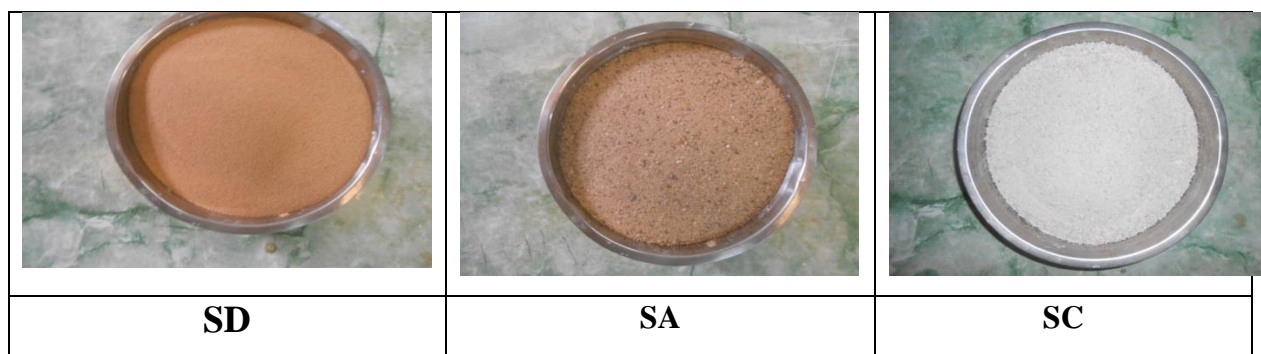


Figure III.1. Les différents types de sables utilisés

Gravier

Les graviers utilisés (3/8 et 8/15) sont de nature silico-calcaire concassés provenant de la station d'Ouezzane (Laghoutat).



Figure III.2. Les différents types de graviers utilisés

III.2. Les caractéristiques des sables utilisés

a). Caractéristiques chimiques

Les différents minéraux constituant les sables utilisés sont donnés par les diffractogrammes DRX suivants (Figure. III.3, III.4, III.5) :

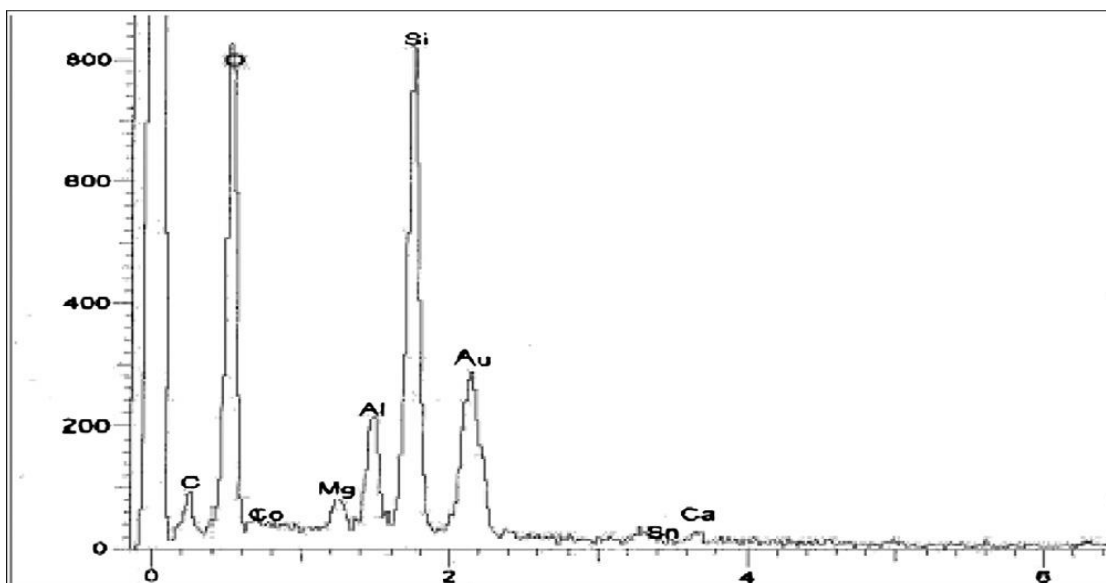


Figure. III. 3 .Diffractogramme aux rayons X du sable de dunes utilisé [14]

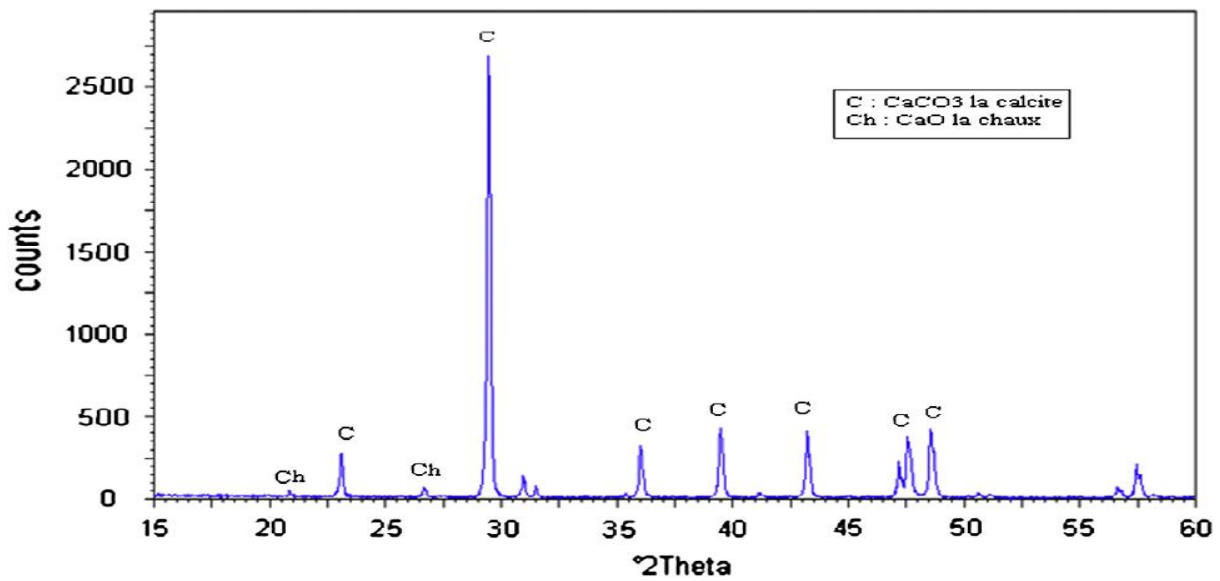


Figure.III.4.Diffractogrammes aux rayons X du et sable calcaire utilisés [27].

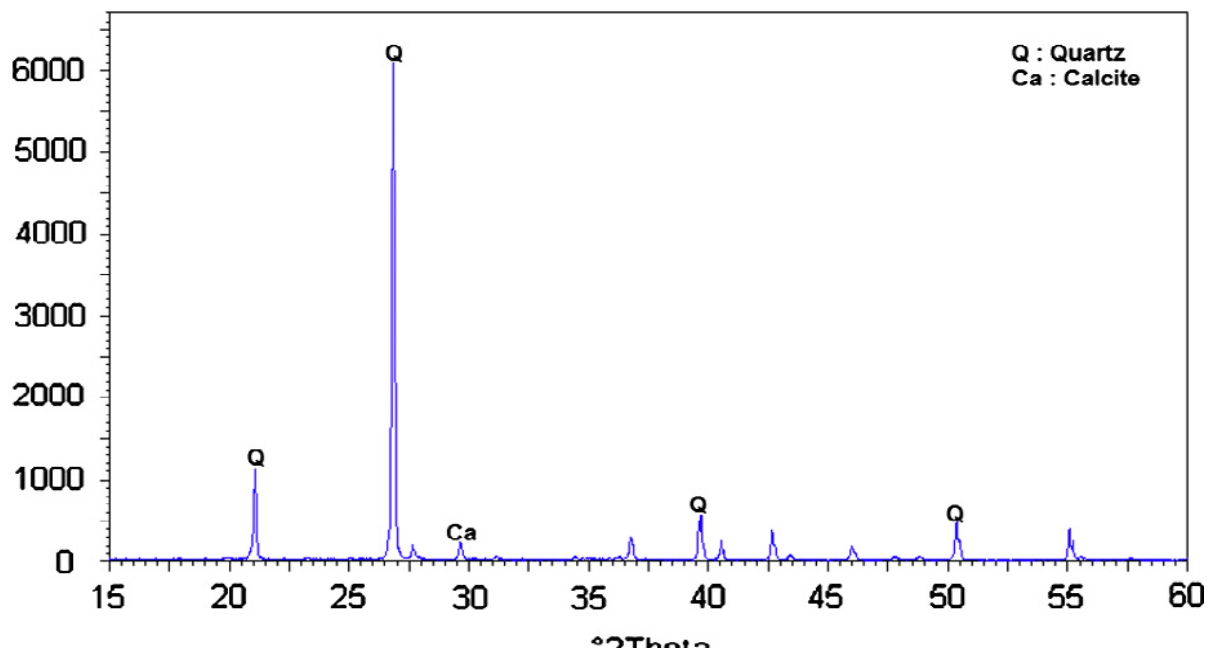


Figure.III.5.Diffractogrammes aux rayons X du sable alluvionnaire utilisés [27].

b). Caractéristiques physiques

III.2.1. Masses volumiques

*Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est la masse de l'unité de volume du matériau à l'état naturel (tous vides inclus). Elle est donnée selon la norme **NFP 18-555** comme suit : [16]

$$\rho_s = \frac{M_1 - M_2}{V_{ap}}$$

M_1 : Masse totale (matériaux avec récipient) (kg) ;

M_2 : Masse du récipient vide (kg) ;

V_{ap} : Volume du récipient égale à 1 litre (m^3).

Tableau.III.1. Masses volumiques apparente des granulats utilisés.

granulats	SA	SD	SC	G 3/8	G8/15
ρ_s (kg/m ³)	1500	1502	1522	1370	1360

***Masse volumique absolue (spécifique)**

La méthode utilisée est la méthode de l'éprouvette graduée. La masse volumique absolue est la masse par unité de volume d'un matériau (tout vide déduit) est donnée selon la norme

NFP 18-555 par la relation suivante

$$\rho = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

M : Masse des granulats (kg) ;

V_1 : Volume d'eau (m^3) ;

V_2 : Volume totale (eau + granulats) (m^3) ;

Tableau.III.2. Masses volumiques absolues des granulats utilisés.

granulats	SA	SD	SC	G3/8	G8/15
ρ (kg/m ³)	2600	2551	2505	2520	2550

III.2.2. Compacité

La compacité C_p c'est le rapport du volume de matière pleine au volume total. Il est défini par la relation

$$C = \frac{\gamma_{app}}{\gamma_{abs}} * 100$$

Tableau .III.3 . Compacité des sables utilisés

Type de Sable	SD	SA	SC
C _p %	59	57	61

III.2.3.Essai d'équivalent de sable (NF P 18-598)

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution floculante , après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment (H1) et du sédiment + floculant (H2).

Selon la norme NF P 18-598. L'équivalent de sable est donné par les relations ci-dessous [16]

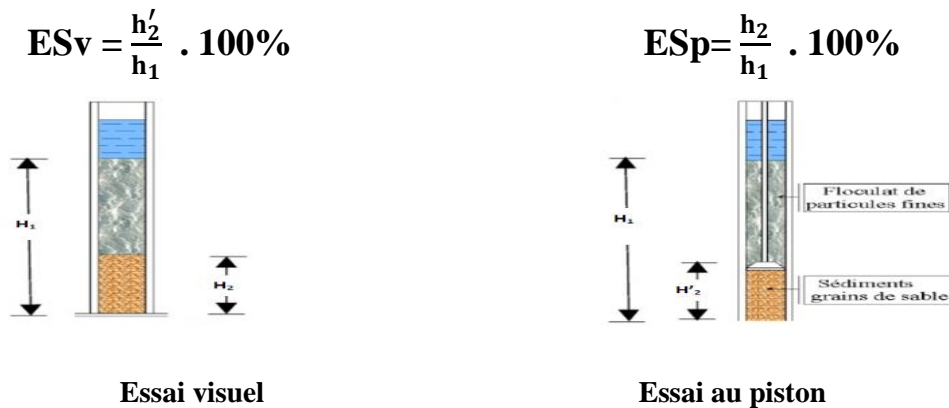


Figure.III.6.Essai d'équivalente de sable.

TableauIII.4.Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable

ES visuel	ES piston	Qualité de sable
ES _v < 65	ES _p < 60	« Sable argileux » risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
65 ≤ ES _v ≤ 75	60 ≤ ES _p ≤ 70	« Sable légèrement argileux » de propreté admissible pour bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
75 ≤ ES _v ≤ 85	70 ≤ ES _p ≤ 80	« Sable propre » à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité
ES _v ≥ 85	ES _p ≥ 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

Tableau III.5.Valeurs de l'équivalent de sable de différents sables

Type de sable	SD	SA	SC
ES p	82	84	63
ES v	91	87	67

III.2.4. Analyse granulométrique (EN 933-1)

L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer les différents diamètres de grains qui constituent un granulat. Pour cela l'analyse consiste à séparer et classer à l'aide de tamis ces grains selon leur diamètre. Les grains ainsi isolés peuvent être pesés pour déterminer la proportion de chacun dans le granulat. La représentation graphique de l'analyse permet d'observer et d'exploiter ces informations très simplement. Les manipulations et les conditions de manipulation sont décrites par la norme **NF EN 933- 1**. Elle concerne les granulats d'un diamètre supérieur à 80 micromètres (0.08mm). [18]

Le refus désigne la partie des grains retenue dans un tamis. Le refus cumulé représente tous les grains bloqués jusqu'au tamis considéré (les grains du tamis considéré plus les grains bloqués dans les tamis de mailles supérieures). Le tamisât ou passant désigne la partie qui traverse le tamis.

Les masses cumulées des différents refus sont exprimées en pourcentage par rapport à la masse initiale de l'échantillon de granulat. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités soit numériquement soit graphiquement. Cela permet d'observer la proportion de refus cumulé ou de tamisats jusqu'à un diamètre de grain par rapport au granulat. (La représentation graphique est plus explicite).

Les résultats d'analyse granulométrique des différents granulats utilisés sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau III.6. Analyse granulométrique pour matériaux utilisés

Tamis (mm)	4	3.15	1	0.63	0.315	0.16	0.08	FOND
SA Tamisat%	100	99	93	87	77	41	23	0
Tamis (mm)	1	0.8	0.63	0.4	0.25	0.16	0.08	FOND
SD Tamisat%	100	100	99.8	98.2	88	48.43	15.5	1
Tamis (mm)	3.15	1.6	0.8	0.63	0.315	0.2	0.08	FOND
SC Tamisat%	100	88.43	63.96	42.64	36.2	26.7	21.5	13.7
Tamis (mm)	10	8	6.3	5	4	3.15	2	/
G3/8 Tamisat%	100	93.46	67.48	40.31	21.82	1.8	0	/
Tamis (mm)	20	16	12.5	10	8	6.3	5	/
G8/15 Tamisat%	100	99.7	82.91	28.18	5.8	0.54	0	/

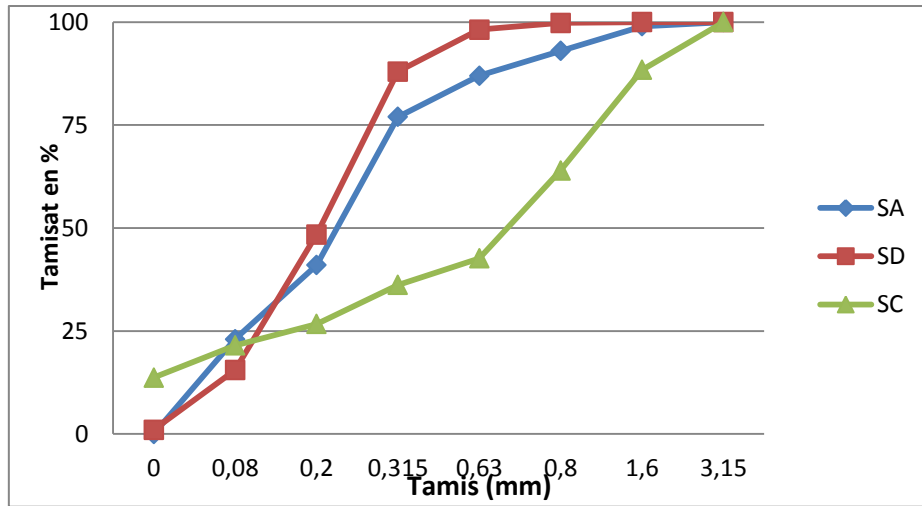


Figure.III.7. Courbes granulométriques des différents sables utilisés.

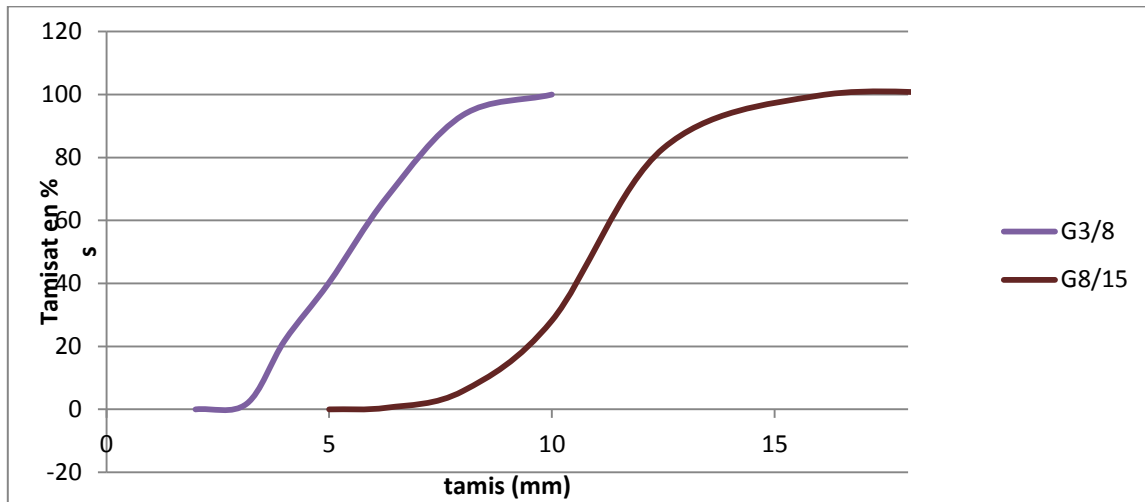


Figure. III.8. Courbes granulométriques des graviers utilisés.

***Module de finesse**

Le module de finesse du sable, est défini comme étant le centième de la somme des refus (exprimés en % de poids) au tamis 0.16-0.315-1.25-2.5 et 5.0 ;

$$M_f = \frac{\sum \text{des refus sur les tamis}(0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-5)}{100}$$

Tableau.III.7. Modules de finesse obtenus à travers l'analyse granulométrique

Modules de finesse	SA	SD	SC
M_f	2.5	0.5	2.25

*Capacité d'absorption d'eau

C'est une mesure des pores accessibles à l'eau. Elle est déterminée en mesurant l'augmentation de masse d'un échantillon séché à l'étuve après avoir été immergé dans l'eau pendant 24 heures et séché superficiellement [26].

$$A_b(\%) = \frac{M_a - M_s}{M_s} \cdot 100$$

M_s : Masse de l'échantillon séché à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante ;

M_a : Masse de l'échantillon après imbibition dans l'eau pendant 24h à T=20°C

Les résultats des essais sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau III.8. Coefficients d'absorption d'eau des granulats utilisés.

	SD	SA	SC	G3/8	G8/15
$A_b\%$	0.55	1.77	1.12	2.26	2.44

III.3. Le ciment

On a utilisé le même type de ciment pour fabriquer le mortier et le béton, le ciment portland dont la dénomination est CPJ-CEM II 42.5R, qui satisfait la norme algérienne « NA442/2000 ».

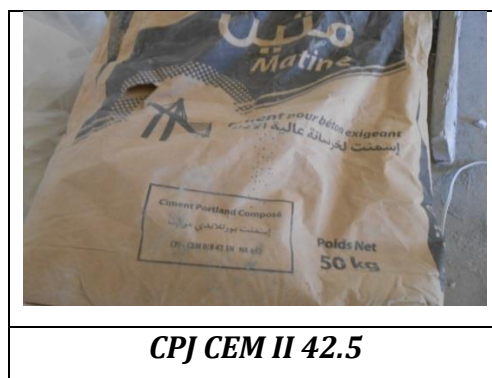


Figure III.9. Un sac du ciment utilisé.

III.3.1.Masse volumique absolue (poids spécifique)

La masse volumique absolue ρ du ciment avait été mesurée au moyen du densimètre le Chatelier. Le poids spécifique du ciment utilisé est de **3.1 g/cm³**.

III.3.2.Surface spécifique

La finesse du ciment exprimée par sa surface spécifique (**SP**) est mesurée à l'aide du perméabilimètre de Blaine, dont la description complète est donnée dans la norme européenne **EN196-6**. [19]

La surface spécifique se mesure en fonction du temps que met un volume d'air que l'on fait passer à travers une poudre de ciment. Plus la surface spécifique de cette poudre est élevée et plus que le temps mis par l'air pour traverser la poudre est lent.

$$S_p = K \cdot \sqrt{t} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\sqrt{e^3}}{1 - e} \cdot \frac{1}{\sqrt{\eta}}$$

K : La constante de l'appareil.

η : La viscosité de l'air à la température de l'essai.

t : Temps mesuré en seconde.

e : La porosité.

ρ : Masse volumique absolue.

La surface spécifique du ciment utilisé est de **3880 cm² /g**.

III.3.3.Consistance normale

L'essai de consistance permet de déterminer le pourcentage d'eau nécessaire pour préparer une pâte dite de consistance normale qui sera utilisée dans l'essai de prise. La consistance normale est égale à **27%**.

III.3.4. Temps de prise

Il constitue une indication précieuse pour la mise en œuvre des mortiers et des bétons.

Il varie en fonction de la nature de ciment, de la finesse de mouture qui favorise l'hydratation et de la température qui influe sur la vitesse des réactions chimiques et accélère la prise.

L'essai de prise est réalisé avec l'appareil de Vicat, qui est le moyen le plus couramment utilisé suivant la norme **EN 196-3 [20]**

- Temps de prise à chaud : **40 min.**

- Temps de prise à froid : **2h 30 min.**

III.3.5. Analyse chimique et minéralogique

L'analyse chimique du ciment utilisé a révélé des éléments qui sont présentés en pourcentage dans le **tableau III.9**. Les analyses ont été effectuées au laboratoire de la cimenterie de M'sila, étalées sur une période d'un mois.

Tableau III.9. Analyse chimique du ciment utilisé

Elément	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	Cl	CaO
%	19.70	4.52	3.49	62.15	1.79	2.27	0.49	0.25	0.02	1.00

Nous avons remarqué que le ciment utilisé contient des pourcentages appréciables de chaux et de silice. L'analyse minéralogique du ciment utilisé est donnée par le tableau suivant :

Tableau III.10 .Analyse minéralogique du ciment utilisé

Elément	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
%	60.31	17.40	6.13	11.97

III.3.6. Synthèse des résultats

Les principales caractéristiques physiques et mécaniques du ciment utilisé sont reprises dans le tableau suivant :

Tableau III.11 .Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment (CPJ 42.5)

Caractéristiques	Résultat
Masse volumique apparente	1.3 g/cm ³
Masse spécifique	3.1 g/cm ³
Surface spécifique	3880 cm ² /g
Consistance normale	27%
Temps de prise à chaud	40 min
Temps de prise à froid	2h 30 min
Résistance à la compression à 28 j	46 MPa
Résistance à la flexion à 28 j	7.8 MPa

III.4. Adjuvant : (MEDAPLAST SP 40)

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau, fabriqué par la société Algérienne Granitex-NP, c'est une solution de Polynaphalene sulfone (**PNS**), commercialisé sous le nom de « **MEDAPLAST SP 40**».

Sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de **0,6 % à 2,5 %** (en extrait sec) du poids de ciment. [21]

Aspect Liquide

Couleur Marron

PH 8,2

Densité 1,20 ±0.01

Teneur en chlore <1g/l

Extrait sec 40%

III.5. Les fibres

III.5.1. Définition de fibres

La plante est une graminée et est un membre de la famille poacée. C'est une plante permanente qui ne disparaît pas pendant l'hiver et qui pousse indépendamment formant des nappes. Grâce à la faible consommation d'eau, **l'alfa** est endémique dans la région méditerranée d'ouest, une région plutôt sèche.

Le rôle des fibres, dans une matrice fragile, est le renforcement et la couture de la matrice après la fissuration, donc elles doivent posséder des caractéristiques satisfaisantes. D'autre part les fibres doivent être inertes dans le milieu cimentaire.

III.5.2. Le mouillage

Les fibres sont immergées dans l'eau pendant 24h. Ensuite, on laisse les fibres dans l'air pendant 2h pour avoir des fibres humides à surfaces sèches.

III.6. L'eau de gâchage

L'eau utilisée dans cette partie expérimentale est l'eau de robinet de laboratoire de département de Génie civil de Laghouat.

III.7. Essais effectués sur les types des mortiers

Les principaux essais expérimentaux entrepris lors de cette étude sur les mortiers à état frais et les mortiers à l'état durcis sont :

- Résistance mécanique à la flexion
- Résistance mécanique à la compression
- Retrait
- Absorption capillaire.

III.7.1. Essais mécaniques sur les mortiers

Des essais mécaniques sont utilisés pour caractériser les mortiers à différents âges :

- 1- La flexion à trois points sur trois éprouvettes de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$.
- 2- La compression pure sur les demi-éprouvettes issues du test précédent.

a) Essai de rupture par flexion

L'essai s'effectue conformément à la norme **EN 196-1 [22]**.

Les éprouvettes sont soumises à une flexion à trois points. La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée.

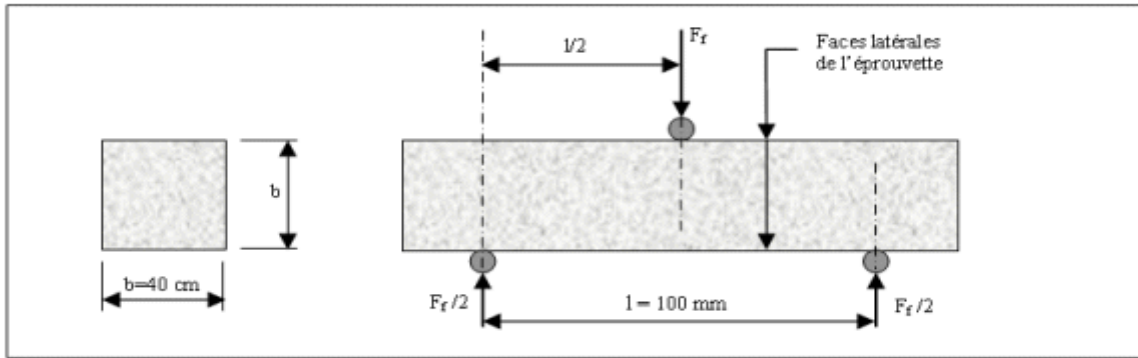


Figure III.10. Dispositif pour l'essai de résistance en flexion

Si F_f désigne la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut :

$$F_f \cdot \frac{l}{4}$$

La contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est :

$$R_f = \frac{1.5 L F_f}{b^3}$$

Cette contrainte est appelé la résistance à la flexion compte tenu des dimensions b et L , si F_f est exprimée en Newton (N), cette révision en Mega Pascal (MPa) vaut :

$$R_f \text{ (MPa)} = 2,34 \cdot 10^{-3} \cdot F_f$$

b) Essai de rupture par compression

L'essai de compression s'effectué conformément à la norme **EN 196-1** sur les demi-prismes des éprouvettes obtenus après rupture en flexion, comme indiqué sur la figure suivante :

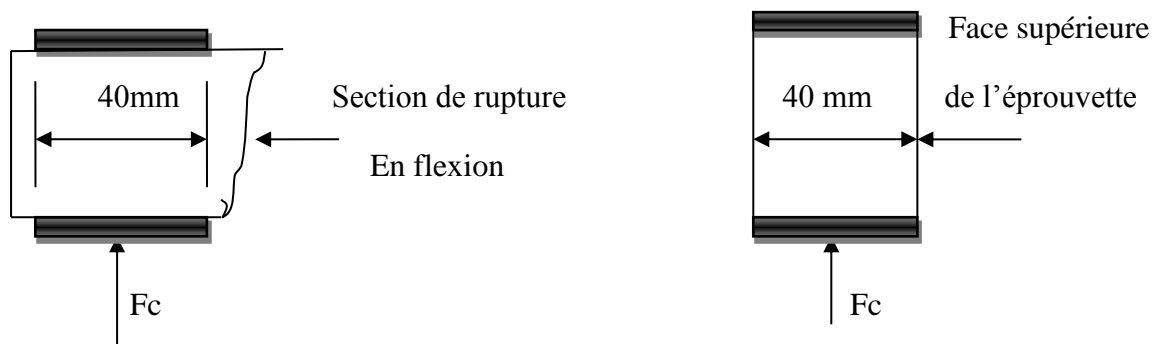


Figure III.11. Dispositif de rupture en compression

c) Retrait

En l'absence de toute charge, le mortier se déforme spontanément et subit une diminution de volume absolu. Dans le cas des bétons de sable ou de mortiers, les problèmes de retrait sont encore plus à craindre, compte tenu de la demande en eau supplémentaire pendant la fabrication.

Les mesures de retrait ont été effectuées sur les éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ conformément à la norme **NFP15-433** munies à leurs deux extrémités des plots comme indiqué sur la figure suivante, et qui après démoulage sont placées dans un refractomètre équipé d'un comparateur permettant de réaliser des mesures de retrait.

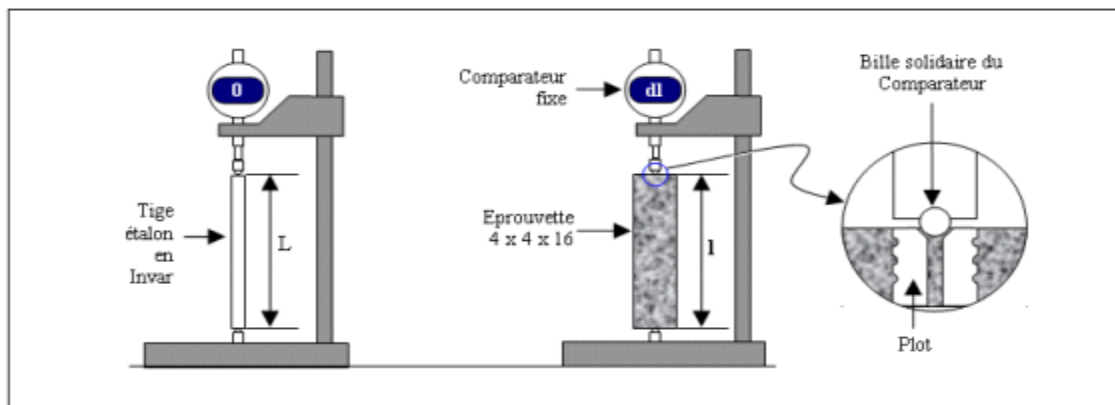


Figure III.12. Appareillage pour la mesure du retrait.

Conduite de l'essai

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon en Invar de longueur $L = 160 \text{ mm}$. Soit $dl(t)$ la valeur lue sur le comparateur au temps t ; l'éprouvette a une longueur au temps considéré:

$$l = L + dl(t)$$

Soit $l(t_0)$ la longueur de l'éprouvette au temps t_0 choisi d'origine. En général, cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps t sera:

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0)$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par ε et a pour expression:

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L}$$

$\Delta l(t)$ est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même moule. Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air, $\Delta l(t)$ est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau, $\Delta l(t)$ peut être positif: il y a alors gonflement.

d) L'essai d'absorption d'eau par capillarité

Dans le but d'étudier l'absorption d'eau des mortiers à 28 jours du durcissement, Nous avons adopté un essai généralement appliqué à des terres cuites et des pierres calcaires (normes **NF P10-502**). Il s'agit de mettre en contact la base des éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{cm}$, avec une nappe d'eau à 4mm de profondeur et de suivre l'évolution de la masse de ces éprouvette au cours du temps. La nappe d'eau est maintenue à niveau constant par un trop-plein. Les faces latérales sont imperméabilisées à l'aide d'un film plastique (un ruban plastique adhésive) qui force l'eau à adopter un cheminement uni-axial et éviter l'évaporation par ces mêmes faces. La masse d'eau absorbée est déterminée par des pesées successives des échantillons. La seule précaution à prendre consiste à éliminer la pellicule d'eau retenue sur la face inférieure de l'échantillon avant chaque pesée à l'aide d'un papier absorbant [23]

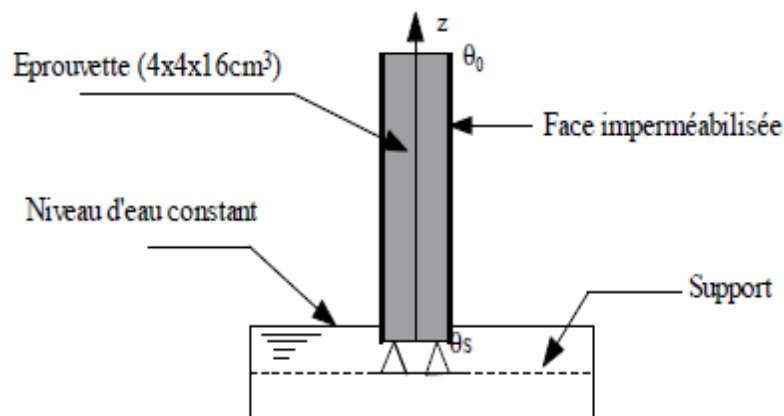


Figure IV.13. Schéma de l'essai d'absorption d'eau par capillarité

L'essai de capillarité est réalisé à l'âge de 28 jours sur des éprouvettes, prismatique. Le coefficient de capillarité (c_c), été obtenu en utilisant l'expression suivante :

$$C = \frac{M}{S\sqrt{t}}$$

M : la quantité d'eau absorbée en (g)

S : la surface d'éprouvette en contact avec l'eau en (cm^2)

T : durée d'absorption en (min)

C_c : le coefficient de capillarité en ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1/2}$)



Figure III.14. Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire

III.7.2. Essais mécaniques sur mortier (essai d'adhérence)

a) Essai d'arrachement par traction directe ou pull-off test

C'est l'essai le plus simple à réaliser et celui qui est le plus utilisé en industrie. Il peut être effectué en laboratoire et sur site. Le principe de l'essai est décrit dans la norme EN 1015-11. Il est d'ailleurs effectué par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

(CSTB) pour la certification des enduits par exemple

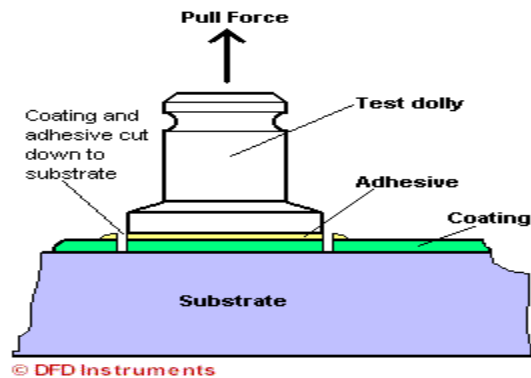


Figure III.15. Machine et méthodes l'essai pull-off

b) Essais de flexion

L'essai de flexion choisi pour assurer une distribution uniforme de la contrainte, a été effectué sur une machine de type triaxial à une vitesse constante. Le dispositif de flexion quatre points est réalisé comme suit :

- La poutre reposant sur deux appuis constitués par deux rouleaux identiques distants de 30 cm, est soumise à une charge transmise par une plaque en fer reposant elle-même sur deux appuis distants de 10 cm de façon à assurer une bonne distribution de la charge et une stabilité.

- Un capteur de déplacement est fixé au milieu de la facette inférieure de l'éprouvette par l'intermédiaire d'un support sur les traverses.

$$\sigma_f = \frac{(F \times L)}{b^3}$$

σ_f : résistance à la flexion (en MPa).

L: distance entre les deux appuis (en mm).

F: charge maximale enregistrée à la rupture (en N).

b = h: côté de l'éprouvette (en mm).

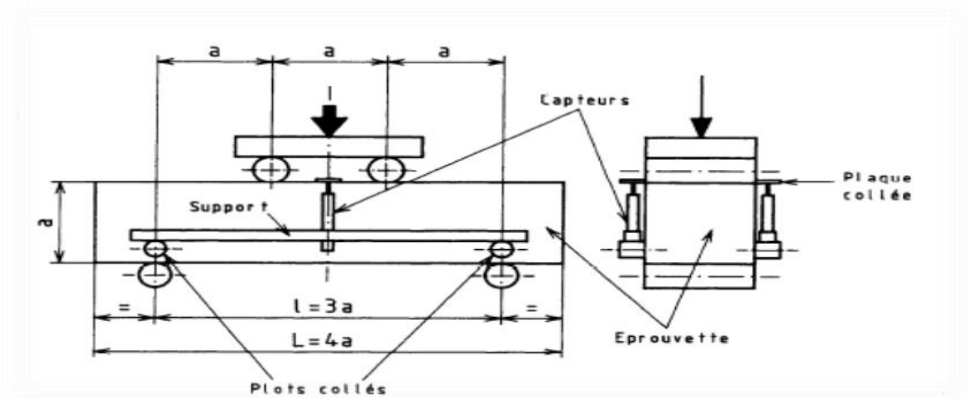


Figure IV.16. Dispositif d'essai flexion quatre points

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif montré sur la **figure III.17**:



Figure III.17. Dispositif de flexion par quatre points pour les poutres 10×10×50cm.

c) Essais de cisaillement (slant shear);

Un des essais de cisaillement est l'essai de cisaillement par compression. Il est utilisé dans la norme **BS6319 (partie 4)** pour l'évaluation de l'adhérence des matériaux de réparation. Le paramètre influant sur l'essai est l'angle d'inclinaison de l'interface. La rupture n'est pas forcément localisée à l'interface et la rugosité du support influence le mode de rupture. [28]

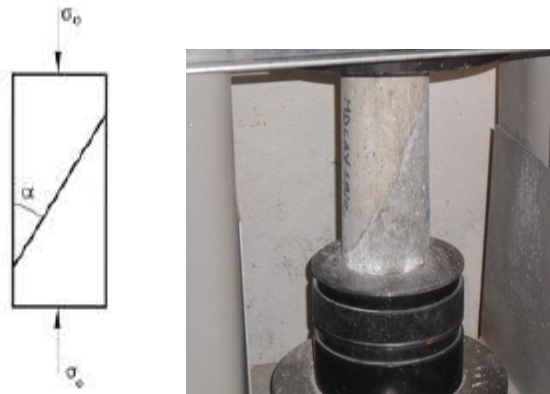


Figure III.18. Essai d'adhérence en cisaillement par compression

d) Essai de fendage par coin : Wedge Splitting Test (WST) [28]

Le principe de cet essai est représenté dans la **figure III.19** L'essai consiste à appliquer une force horizontale à l'aide d'un coin et de roulements à billes sur le composite support-mortier par exemple. Une entaille est réalisée sur la partie supérieure de l'interface pour initier la fissure au niveau de l'interface. Cet essai permet de propager le décollement du support et de la nouvelle couche au niveau de l'interface. Il permet de mesurer l'ouverture de la fissure et la force appliquée et de calculer l'énergie de fissuration entre un support et un enduit]. L'inconvénient est principal réside dans la préparation des éprouvettes du fait de leur forme et de la nécessité d'une bonne rectitude.

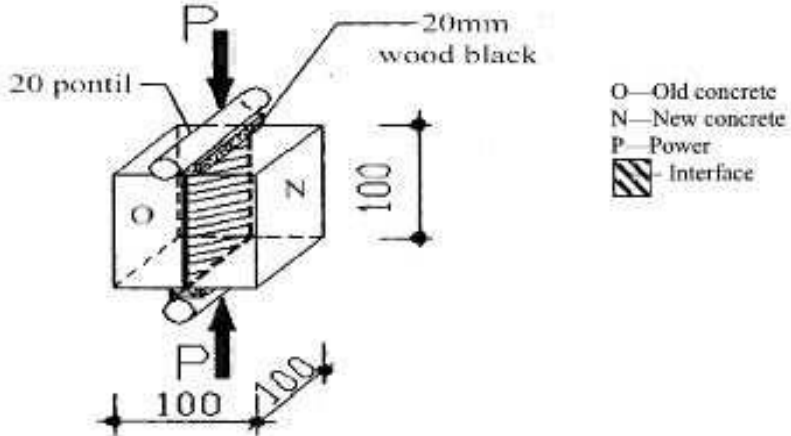


Figure III.19.Essai WST selon la norme chinoise GB-8185



Figure III.20.Dispositif pour Essai WST selon la norme chinoise

IV.1. Formulation du béton

L'étude de la composition consiste donc à définir le mélange optimal de différents granulats et sable ainsi que le dosage en ciment afin de réaliser un béton de bonne qualité, nous avons utilisé la méthode de Dreux-Gorisse.

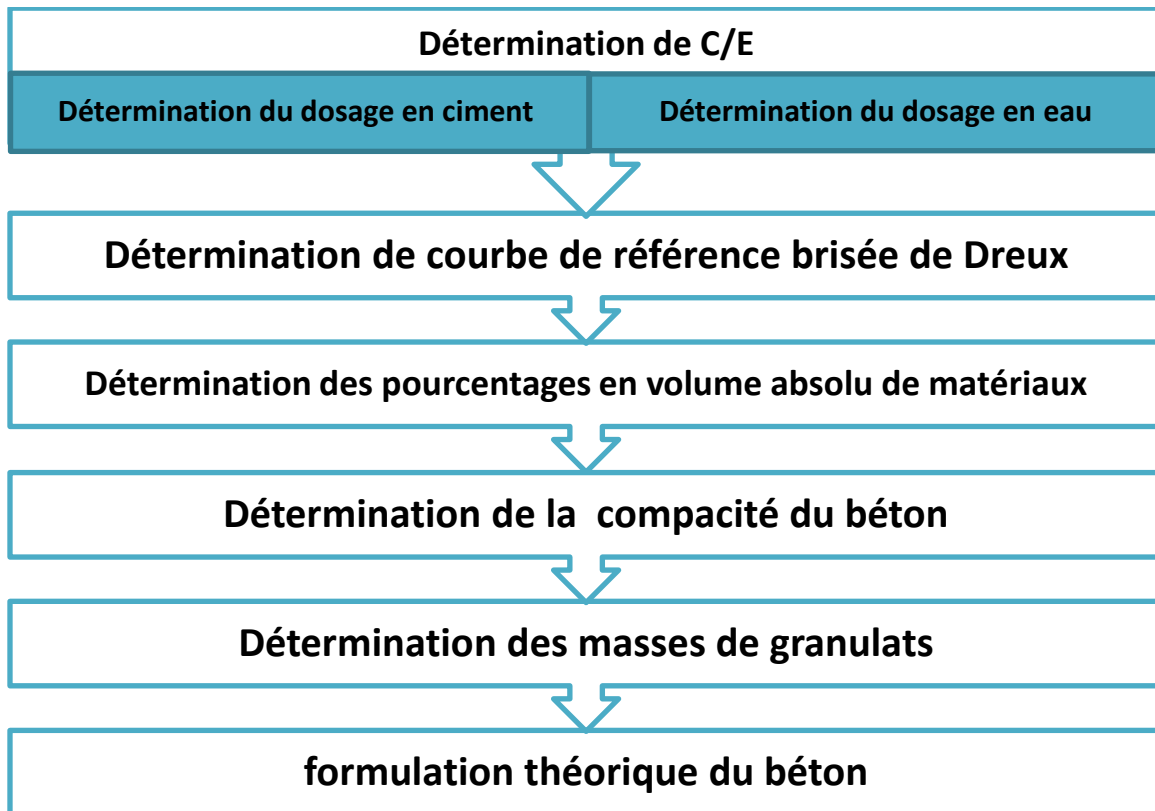


Figure IV.1. Organigramme de la méthode de Dreux-Gorisse.

IV.1.1. Dosage en ciment

Le ciment employé est de la classe **45MPa**, il a une résistance vraie moyenne à 28 jours $f_c = 25\text{MPa}$, les granulats sont de bonne qualité, on peut donc calculer $\frac{C}{E}$ par la formule de Boolomey suivante :

$$f_c = G.F_{CE} \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

f_c : résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en MPa,

F_{CE} : classe vraie du ciment (à 28 jours) en MPa,

C : dosage en ciment (en kg/m^3),

E : dosage en eau totale sur matériaux secs (en litre pour $l m^3$),

G : coefficient granulaire

On vise dans notre travail une résistance à la compression à 28 jours $F_{c28}=25MPa$ et une ouvrabilité *mou* ($AFF=11cm$), donc on trouve d'après la relation de Bolomey : $\frac{C}{E} = 1.73$

En utilisant ce rapport et les abaques de la méthode Dreux, on trouve le dosage de ciment : $C=370 kg/m^3$

IV.1.2. Dosage en eau

Le dosage en eau total sera approximativement

$$E = \frac{370}{1.73} = 214 \text{ Kg}/m^3$$

IV.1.3. Détermination des pourcentages en volumes absolus des matériaux

Tracé de la droite de référence:

La droite de référence de Dreux représente la courbe idéale d'un matériau à minimum de vides. C'est une droite brisée dont le point de brisure est défini par son abscisse X et son ordonnée Y (Figure IV.2):

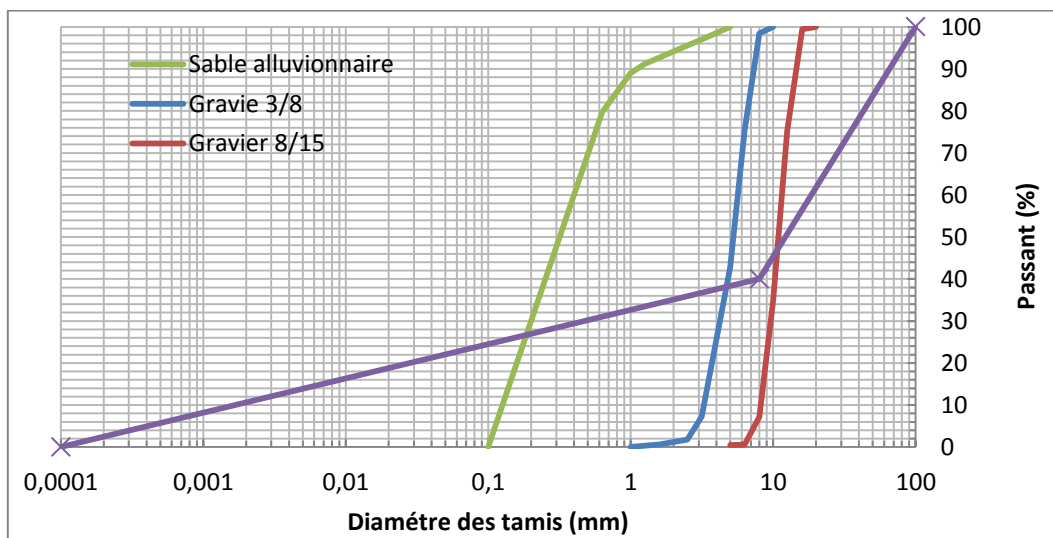


Figure IV.2. Courbes de référence

En abscisse :

Si $D_{max} \leq 20 \text{ mm}$ $X = D_{max} / 2$

Si $D_{max} > 20 \text{ mm}$ $\text{Module}(X) = (\text{Module}(D_{max})+38) / 2$

$D_{max} < 16 \text{ mm}$

$D_{max} / 2 = 8 \text{ mm}$ **x=8**

En ordonné :

$$Y = 50 - \sqrt{1.25 D_{max}} + K' \quad \text{ou } K' = K + K_s + K_p$$

$$K_p = 5 \quad K_s = (6M_f s - 15) = -1.5 \quad K = 2$$

$$Y = 50 - \sqrt{1.25(D_{max})} + K' = 50 - (4.47 + 5.5) = 40.03$$

$$Y = 40$$

IV.1.3.1 Dosage sable et graviers

Le point de rencontre de la ligne de partage avec la courbe de référence donne

% de sable39.82%

% de gravier 3/8.....11.82%

% de gravier 8/15.....48.35%

IV1.4. Coefficient de compacité

C = 0.800 (Tableau Compacité du béton en fonction de D_{max} , de la consistance (molle dans notre cas) et du serrage (piquage dans notre cas)).

Donc le volume total absolu est: $1000 \times 0.800 = 800 \text{ L}$

a) Volume absolu du ciment

$$V_c = \frac{370}{3.1} = 119 \text{ L}$$

b) Volume absolu des granulats

$$V_g = 800 - 119 = 681 \text{ L}$$

c) Volume absolu de sable

$$V_s = (681) \cdot 0.398 = 271 \text{ L}$$

d) Volume absolu de gravier 3/8

$$VG=(681) \cdot 0,118=780.4L$$

e) Volume absolu de gravier 8/15

$$VG=(681) \cdot 0,483=329L$$

Les masses volumiques absolues sont les suivants :

- Sable : $\gamma_s=2,6 \text{ kg/L}$
- Gravier 3/8: $\gamma_g =2,52 \text{ kg/L}$
- Gravier 8/15: $\gamma_g =2,55 \text{ kg/L}$
- Eau: $\gamma_E=1,00 \text{ kg/L}$

Les dosages en matériaux secs seront donc en **kg** pour **1m³**

SablePs=271 X 2,6=**704.6kg**

Gravier3/8.....PG=80.4X 2,52=**202.6kg**

Gravier8/15.....PG=329X2,55=**839kg**

Ciment**370 kg**

Eau totale**214 kg**

Dans le Tableau suivant, on résume la composition de béton :

Tableau IV.1 .Composition du béton

Matériaux	Quantité /m ³	
	Volume L	Masse kg
Ciment	119	370
Sable 0/5	271	704
Gravier 3/8	80.4	202.6
Gravier 8/15	329	839
Eau totale	214	214
Somme	1013.4	2330.2

IV.1.5. Confection du béton

Le mélange est préparé à l'aide de la bétonnière, selon le procédé suivant :

- Verser le gravier après l'avoir laver et sécher.
- Ajouter le sable et le ciment
- Puis verser l'eau progressivement.

Le temps de malaxage variera de 10 à 12 minutes. Nous avons préparé une gâchée pour un dosage de 370 kg/m^3 , après des éprouvettes $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ et $10 \times 20 \text{ cm}^3$ (Figure IV.3) ont été préparées pour les essais mécaniques.



Figure IV.3. Les éprouvettes cubiques ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$) et cylindriques ($10 \times 20 \text{ cm}^3$)

A) Essais à l'état frais

V.1.6. Essai d'affaissement au cône d'Abrams

La maniabilité de béton peut se définir, en général, par la plasticité désirée mesurée par affaissement au cône d'Abrams, selon la norme **NFP18-451**. Il s'agit de mesurer l'affaissement d'une masse de béton frais. Sur la base des résultats obtenus, il est possible de classer le béton selon sa maniabilité (**Tableau V.2**).

Tableau V.2. Classification de l'ouvrabilité du béton frais

Qualification du béton	Serrage	Aaffaissement(cm)
très ferme	Vibration puissante	0-2
ferme	Bonne Vibration	3-5
plastique	Vibration courante	6-9
mou	Piquage	10-13
fluide	Léger piquage	≥ 14

L'affaissement du béton frais après enlèvement du cône est de **11 cm** ce qui montre que la classe de consistance de notre béton est **MOU**.

B)Essai à l'état durci

Essai de compression simple

Les résultats des résistances à la compression f_{c28} à 28 jours de béton sont **27 MPa** pour les cubes, et **25.75 MPa** pour les cylindres.



Figure.IV.4.Essai de compression simple sur des éprouvettes cylindrique

Tableau IV.3.Résultats d'essai de compression simple trouvés

	7jours(Mpa)	28jours (Mpa)
Cube	15.5	27
cylindre	14.5	25.75

IV.2.Compositions des mortiers

On a utilisé six types de compositions de mortiers, en utilisant les divers types de sables

- Type1 : mortier à sable de dunes(**MD**)
- Type2 : mortier à sable de dune et sable de calcaire (**MDC**)
- Type3 : mortier à sable de dune avec adjuvant (**MDA**)
- Type4 : mortier à sable de dune et sable calcaire avec adjuvant (**MDCA**)
- Type5 : mortier à sable de dune avec et adjuvant avec de fibre (**MDAV**)
- Type6 : mortier de fibre à sable de dune et sable de calcaire avec adjuvant et de fibre (**MDCAV**)

Les composants des différents types de mortiers sont donnés dans le Tableau suivant :

Tableau V.4. Les composants de ces types de mortier

	MD		MDC		MDA		MDCA	
	Volume l	Masse kg	Volume l	Masse kg	Volume l	Masse kg	Volume l	Masse kg
Ciment	144.7	455.81	152.97	481.86	152.73	481.1	159.31	501.81
Sable de dune	535.81	1367.4	283.21	722.75	565.53	1443.24	297.73	759.82
Sable calcaire	/	/	283.1	709.44	/	/	297.73	745.82
Medaplast sp 40	/		/	/	/	9.62	/	10.04
Eau total	300.84	300.84	286.04	286.04	257.87	257.87	246.19	246.19
Eau eff (%60eau)	/	/	/	/	180.5	180.5	200.73	200.73
Eau abs (40%eau +SP40)	/	/	/	/	77.36	77.36	45.46	45.46
Air occlus	46.00	/	44.5	/	46.00	/	44.5	/
Volume total	1000	2124.04	1000	2200.09	1000	2191.83	1000	2263.6

- En ce qui concerne les mortiers **MDA** et **MDCA** nous avons ajouté des fibres pour obtenir les mortiers **MDAV** et **MDCAV** avec un dosage en fibres de 15g/l, tout en gardant la même composition.

A) Caractérisation des mortiers à l'état frais

La maniabilité peut se définir, en général, par la plasticité désirée mesurée par étalement selon la norme **C 1437 – 07** [29]. L'étalement du mortier est réalisé avec la table à choc (**Figure.IV.5**). Nous avons trouvé un étalement de : **16.8 cm**.



Figure.IV.5. Etalement du mortier par la table à secousses

B) Confection et préparation des éprouvettes

Afin de permettre une meilleure interprétation des résultats, chaque essai est réalisé sur des échantillons de même taille. Des éprouvettes prismatiques de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, ont été utilisées pour la détermination de la résistance à la flexion et la résistance à la compression.

Les principaux essais expérimentaux entrepris lors de cette étude sur les mortiers frais et les mortiers durcis sont :

- L'essai par flexion
- L'essai de rupture par compression
- L'essai de retrait
- L'essai d'absorption capillaire.

V.2.1. Essais mécaniques sur les mortiers

V.2.1.a) Evolution de résistance à la compression

Les résultats d'essai de la résistance à la compression en fonction de l'âge pour les éprouvettes conservées à l'intérieur du laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat. Sont récapitulés sur le **tableau.IV.5** et présentés par la **figure.IV .6**.

Tableau.IV.5. Variation de la résistance à la compression en fonction du temps

Age	Résistance la compression (MPa)					
	MD	MDC	MDA	MDCA	MDAV	MDCAV
3 jours	12,56	18,8	19,59	25	15,94	16,79
7 Jours	15,92	20,99	25,68	29,73	20,43	19,55
28 Jours	22,01	28,06	33,19	32,8	22,62	26,09

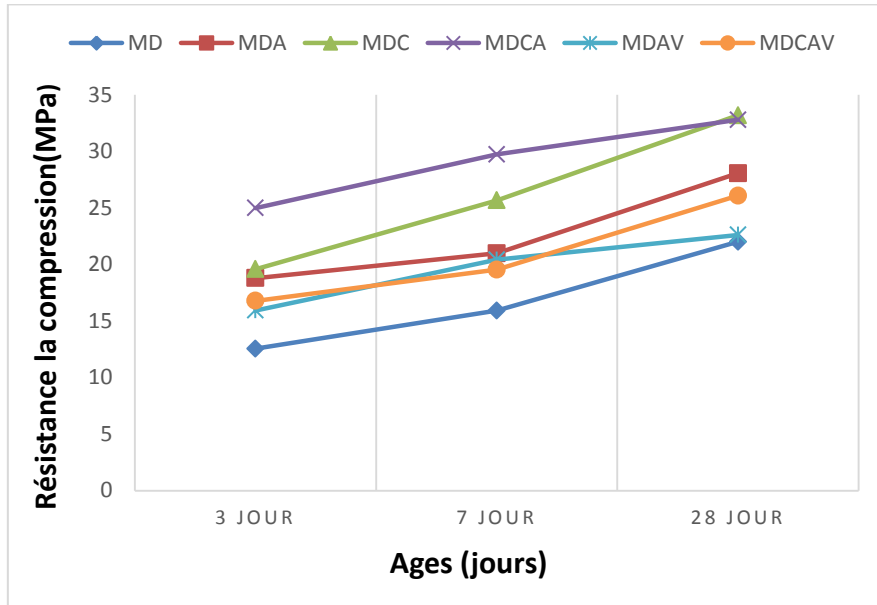


Figure IV.6. Résistance à la compression en fonction de la durée

Analyse des résultats

D'après la **figure IV.6**, on remarque que, pour tous les mortiers la résistance à la compression augmente progressivement avec l'âge. On peut expliquer par le développement du phénomène d'hydratation du ciment dans les mortiers en fonction du temps.

On constate d'après ces résultats une nette augmentation de la résistance en compression du mortier **MDC** qui atteint à **28 jours 33.19 MPa**, Alors que la résistance du **MD** est de **22.01 MPa**.

Les résultats de la résistance à la compression des mortiers **MDC** et **MDCA** sont supérieures aux résistances des autres types de mortier.

On remarque aussi que l'ajout d'adjuvant aux mortiers **MD** et **MDC**, a amélioré d'une façon très nette la résistance à la compression. Mais lors de l'ajout des fibres, on ne constate aucune amélioration de la résistance à la compression.

IV.2.1.b) Evolution de résistance à la flexion

Les résultats d'essai de la résistance à la flexion en fonction de l'âge pour les éprouvettes conservées à l'intérieur du laboratoire, étaient comme suit (voir **Tableau. IV.6** et **Figure.IV.7**):

Tableau. IV.6.Variation de la résistance à la flexion en fonction du temps

Age	la résistance à la Flexion(Mpa)					
	MD	MDA	MDC	MDCA	MDAV	MDCAV
3 JOUR	3,21	3,94	5	5,16	3,71	4,13
7 JOUR	4,05	4,32	5,96	5,58	4,17	4,16
28 JOUR	5,4	5,07	6,45	7,01	5,73	5,61

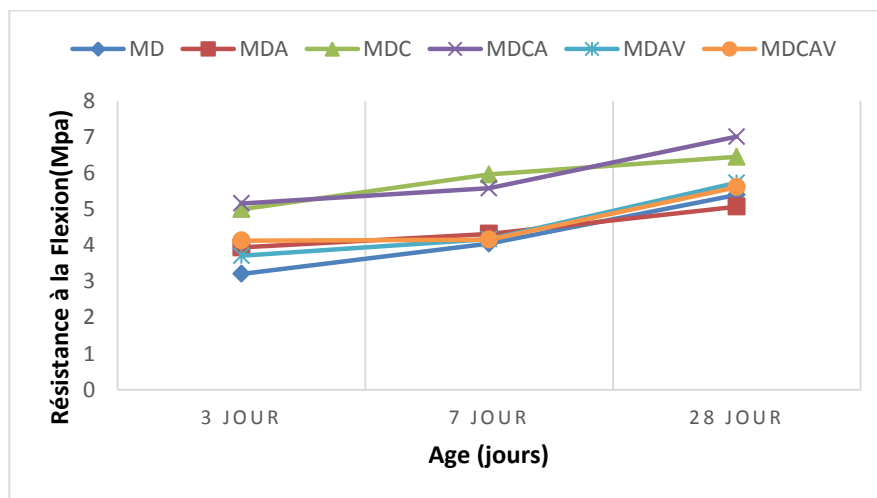


Figure.IV.7. Résistance à la flexion en fonction de la durée

Analyse des résultats

Selon la **figure.IV.7**, On remarque que la résistance à la traction augmente en fonction de l'âge jusqu'à 28 jours, ceci est dû au développement de l'hydratation de ciment en fonction du temps. Il est à noter également que, à jeune âge les résistances des **MDC** et **MDCA** sont supérieures à celles des autres types de mortiers. On remarque aussi :

- Lorsqu'on ajoute les fibres, les résistances à la traction ont diminué légèrement.
- Lorsqu'on ajoute l'adjuvant, il y a une augmentation de la résistance.

V.2.1.c) Absorption d'eau par capillarité

Après un séchage des échantillons dans l'étuve et le conditionnement de ces échantillons, les résultats d'expérience d'essai sont données par le **tableau .IV.7** et représentés en courbes par la **figure.IV.8** et la **figure.IV.9**:

Tableau .IV.7. Les résultats l'absorption d'eau en fonction du temps

Types de mortiers	$S\sqrt{t}$ (cm ² .min)	2.24	3.87	5	8.66	12.04	16.31	37.95
MD	M(g)	9.63	14.31	20.19	35.5	48.13	64.44	123.94
MDC		5.63	8.31	11.56	21.3	29.06	39.94	80.69
MDA		4.31	4.88	8.63	14.56	20.06	26.63	51.88
MDCA		3.31	4.44	7.25	14.19	19.69	27.31	57.31
MDAV		3.31	5.56	8.00	15	20.81	28.75	58.69
MDCAV		4.06	6.31	8.81	17.19	23.56	32.5	65.44

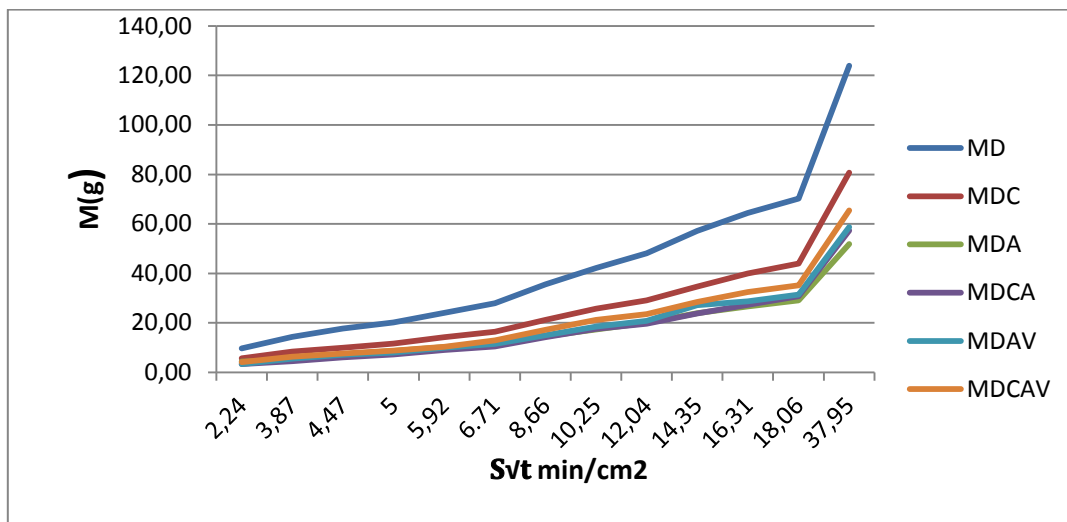


Figure.IV.8. Evolution de l'absorption d'eau en fonction du temps

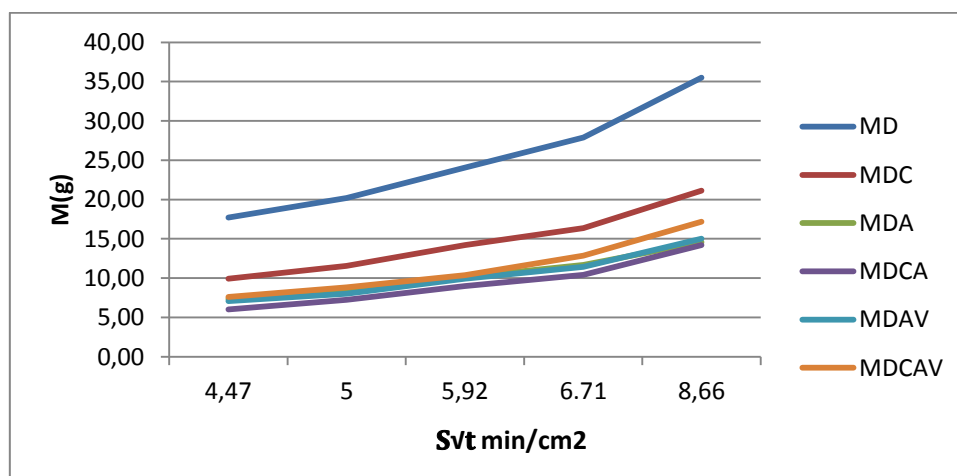


Figure.IV.9. Evolution de l'absorption d'eau en fonction du temps : 4.47 à 8.6

Le coefficient d'absorption par capillarité peut être déterminé par la formule suivante :

$$C_c = \frac{M}{S\sqrt{t}}$$

Avec : $S=a^2 =4^2 =16\text{cm}^2$

Tableau IV.8.Coefficient d’absorptivité C_c en $(\text{g.cm}^2.\text{min}^{-0.5}).1000$

Types des mortiers	MD	MDC	MDA	MDCA	MDAV	MDCAV
Cc	4.13	2.53	1.85	1.86	1.86	2.11

Analyse des résultats

Selon la **figure.IV.8**, On remarque que le coefficient d’absorptivité augmente dans les premières minutes. Il est à noter également que le coefficient d’absorptivité des **MD** est supérieur par rapport à ceux des autres types de mortiers.

Cependant, on remarque une diminution de l'absorption d’eau par capillarité lorsqu'on ajoute l'adjuvant superplastifiant. Toutefois, l'ajout des fibres ne modifie pas les valeurs du coefficient d’absorption d’eau par capillarité des mortiers préparés.

En conclusion, les résultats obtenus du coefficient d’absorption peuvent être dues aux types de sable utilisé et à sa granularité (par exemple le sable de dune est fin, d’où la grande porosité de mortier **MD**).

V.2.1.d). Variation du retrait

Les mesures de retrait sont déterminées sur des éprouvettes conservées à l’air libre à l’intérieur du laboratoire. La variation du retrait en fonction du temps est présentée dans le tableau IV.9 et visualiser graphiquement sur la **figure IV.10** suivante:

Tableau.IV.9 . Evolution du retrait ($\mu\text{m/m}$) en fonction du temps.

L’Age (jours)	Retrait x 10^6 ($\mu\text{m/m}$)					
	MD	MDC	MDA	MDCA	MDAV	MDCAV
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	214,58	97,92	156,25	193,75	150,00	62,5
4	529,17	360,42	427,08	414,58	397,92	222,92
7	797,92	622,92	712,50	608,33	593,75	454,17
16	1191,67	1035,42	1072,92	910,42	920,83	804,17
28	1321,20	1194,00	1190,00	1071,00	1052,50	951,10
33	1333,33	1197,92	1195,83	1060,42	1083,33	977,08

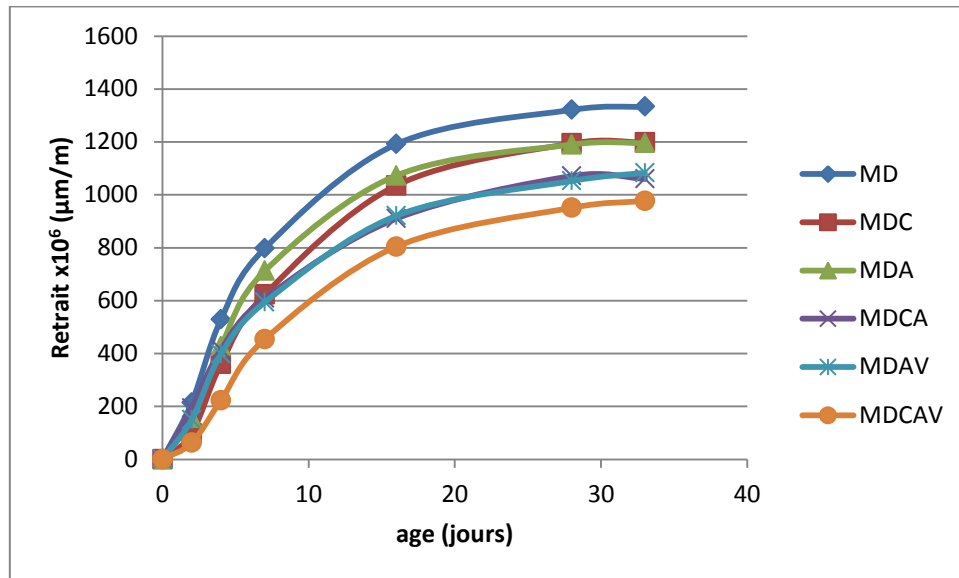


Figure.IV.10. Variation du retrait en fonction du temps pour les différents mortiers.

Il est bien connu que l'hydratation et les échanges d'eau avec l'atmosphère provoquent dans les mortiers de ciment, indépendamment de toute sollicitation mécanique externe, des déformations de retrait. Nous avons remarqué pour chaque composition de mortiers, deux phases distinctes qui apparaissent dans le développement des déformations. La vitesse d'évolution est élevée pendant les premiers 15 jours, pour l'ensemble des mortiers, puis ralentit fortement pour devenir parfois constante au-delà de 33 jours. Ils présentent une progression continue des déformations qui se poursuit en fonction du temps.

Le retrait dépend aussi de la teneur en éléments fins, c'est le cas des sables de dunes, pour lequel le retrait est le plus élevé. Le mortier de sable de dune **MD** présente en général un retrait plus grand que les autres types de mortiers. On remarque la même constatation pour le mortier **MDC**.

Nous remarquons le faible retrait pour les mortiers **MDA** et **MDCA**. Cela est peut être due à l'introduction de l'adjuvant qui diminue la quantité d'eau dans les mortiers, de même pour le cas des fibres (**MDAV**, **MDCAV**), qui améliorent la cohésion des mortiers.

Donc, l'utilisation de l'adjuvant et des fibres ont un impact positif sur les mortiers, par la diminution de retrait qui est la cause principale des fissurations.

Introduction

L'étude expérimentale du comportement mécanique des mortiers de réparation structurale est réalisée selon les quatre essais suivants :

- Essai de fendage par coin wedge splitting
- Essai de cisaillement (slant shear)
- Essai de flexion
- Essai d'arrachement (pull-off)

V.1. Collage de béton

Pour la réalisation de cet essai, nous avons confectionné quatre éprouvettes :

- Eprouvettes **10X10X10cm** deux couches de **5cm** béton et **5cm** mortier (**Figure V.1**)
- Eprouvettes cylindriques **10×20 cm**, coulées en deux parties en diagonale béton puis mortier (éprouvettes inclinées à **30°** par rapport à l'horizontal) (**Figure V.2**)
- Poutres de dimension **10×10×50cm**, coulées avec le béton sauf la partie centrale de 20cm de long et 1.5cm d'épaisseur (**Figure V.3**)
- Eprouvettes prismatiques **10×15×15cm** coulées en béton (**Figure V.4**)



Figure.V.2. Moule d'éprouvettes cylindrique 10× 20cm



Figure.V.1. Moule d'éprouvettes prismatique 10×10×10 cm

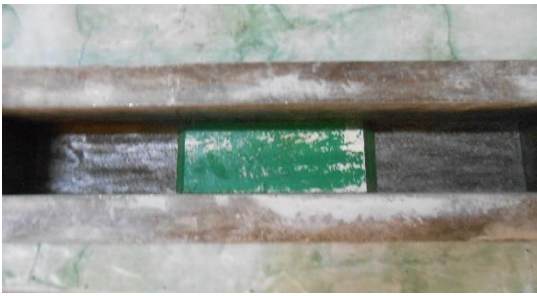


Figure V.3. Moule éprouvette de dimension 10×10×50cm



Figure V.4. Moule éprouvette de dimension 10×10×50cm

V.2. Préparation de surface

La préparation de la surface de chaque type d'éprouvette est effectuée après 28 jours d'âge.

- La méthode utilisée est l'injection d'eau à grande pression sur la surface pour créer une certaine rugosité de la surface de l'éprouvette (voir Figure V.5 et Figure V.6).



Figure V.5. Préparation de surface Eprouvettes cylindrique 10×20.



Figure V.6. Préparation de surface Eprouvettes prismatique 10×15×15.

V.3. Coulage du mortier sur la partie du béton déjà réalisé

Après vérification de l'affaissement, on procède au coulage du mortier. L'affaissement du mortier est réalisé avec la table à choc (**étalement**). Pour le mortier, nous avons trouvés un affaissement de **16.8cm**.

- Cas des éprouvettes prismatiques **10×10×10 cm**, on applique une couche de mortier de **5cm** sur la partie du béton de **5cm** (Figure V.7).



Figure V.7. Coulage des éprouvettes prismatiques en deux couches 5cm béton et 5cm mortier

- Cas des éprouvettes cylindriques **10×20 cm**, le coulage de la partie mortier sur la partie béton est coulée en diagonal avec **30°** d'inclinaison de l'horizontal. Le remplissage du mortier est réalisé à l'aide des tubes en PVC (**FigureV.8**).



FigureV.8. Eprouvette cylindrique 10×20cm avant et après coulage de mortier

- Cas des poutres de dimension $10 \times 10 \times 50$ cm, le coulage de la partie centrale de 20 cm est effectuée sur 1.5cm sur la partie en béton (**Figure.V.9**).



Figure V.9. Coulage des éprouvettes poutres de dimension $10 \times 10 \times 50 \text{cm}^3$

- Cas des éprouvettes prismatiques $10 \times 15 \times 15$ cm, le béton est coulé sur 10cm, après 28 jour, on applique une couche de mortier de 1.5 cm sur la couche de béton (**Figure.V.10**).



Figure V.10. Coulage des éprouvettes prismatiques $10 \times 15 \times 15 \text{cm}^3$

V.4. Présentations des résultats

V.4.1. Essai de fendage par coin (wedge splitting)

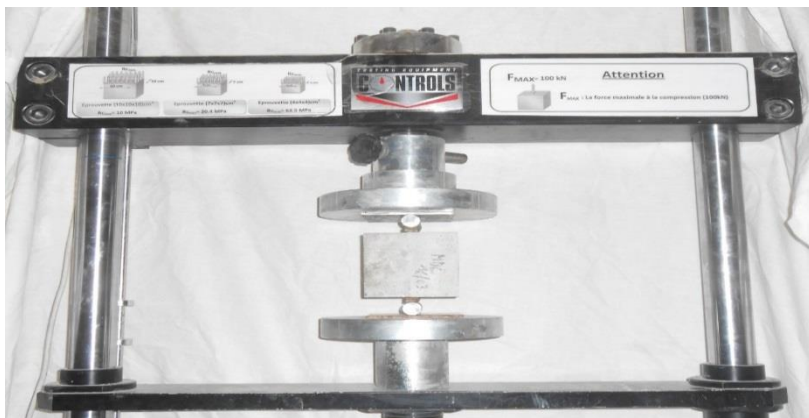


Figure V.11. Essai de fendage sur presse.

Tableau V.1 .Résultats d'essai de fendage

Type mortier	MD	MDC	MDA	MDCA	MDAV	MDCAV	Béton
F (kN)	19,56	23,14	21,02	28,63	16,00	16,31	30.33
F (kN)	18,76	25,50	21,39	29,96	17,80	15,20	38.04
F (kN)	19,12	26,74	22,84	29,06	14,80	14,80	38,19
Moyenne	19,15	25,13	21,75	29,22	16,2	15,43	35.52

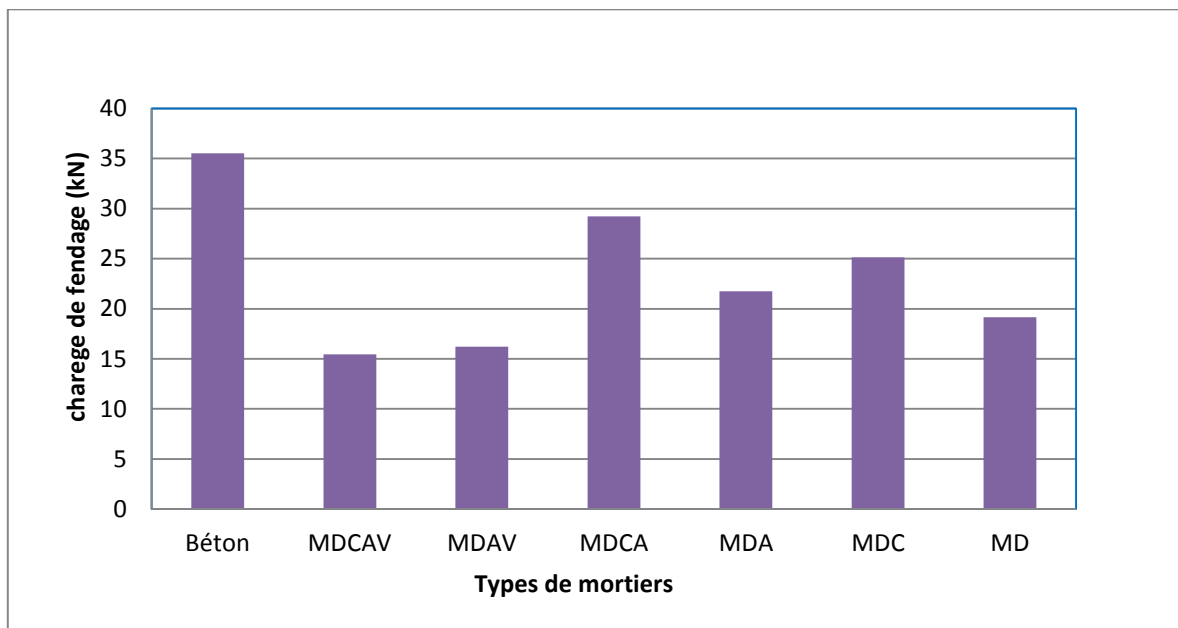


Figure V.12. Résultats d'essai de fendage chaque type de mortiers

Interprétation des résultats

A) Résistance

- Les éprouvettes en béton représentent la résistance maximale (béton témoin) qui est de l'ordre de **35.2 kN**.
- Les meilleurs résultats d'essais par fendage qui ont été obtenus sont **29,22 kN** pour **MDCA**, **25.13kN** pour **MDC** (notons que l'ajout d'adjuvant superplastifiant a amélioré la résistance par fendage de mortier **MDC**). Dans le cas des mortiers **MD** et **MDA**, ils viennent en deuxième position en termes de résistance avec **19,15 kN** et **21,75 kN** respectivement (cependant dans ce cas, l'adjuvant ajouté à **MD** n'a pas apporté une augmentations de résistance).
- L'ajout des fibres pour les éprouvettes **MDCA** a conduit à une chute de résistance d'environ **52.8%** (de **29,22kN** pour **MDCA** à **15,43kN** pour **MDCAV**). La même remarque est constatée en

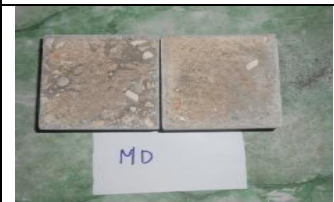





Chapitre 05 : Étude expérimentale du comportement des repartions

ajoutant les fibres pour les mortier **MDA** on constate la chute de résistance est d'environ **25%** (de **21.75 kN** pour **MDA** à **16.2 kN** pour **MDAV**).

B) Adhérence

L'adhérence dans notre cas est estimée visuellement sur éprouvettes après les essais de l'écrasement. Une bonne adhérence est atteinte lorsque la rupture est engendrée soit coté mortier ou coté béton (c'est-à-dire, lorsqu'elle évite la surface de liaison entre mortier et béton). L'analyse des éprouvettes après rupture est récapitulée dans le **tableau V.2**.

Tableau V.2. Analyse de l'adhérence après écrasement (essai par fendage)

Type de mortier	Constatacion visuelle	Conclusion sur l'adhérence
	MD une grande partie du mortier est collé sur la partie du béton et quelque grain de béton sur la partie du mortier.	Moyenne
	MDC des traces de mortier sont collées sur le béton et vice versa.	Mauvaise
	MDA l'adhérence est visible sur les deux partie, des grains de béton sur la partie mortier	Bonne
	MDCA les deux surfaces sont rugueuses il y en a collage des particules de mortier l'une sur l'autre	Moyenne
	MDAV une grande partie de la surface du mortier est collée sur la surface du béton	Bonne
	MACAV quelques grains de la partie du béton sont collés sur la partie du mortier.	Moyenne

V.4.2. Essai de cisaillement (slant shear)

Le dispositif d'essai de l'essai de cisaillement est donné par la **figure V.13**.



Figure V.13. Essai de cisaillement (slant shear)

Les résultats d'essai sont récapitulés dans le **tableau V.3** est présentés par la **figure V. 14**.

Tableau V.3 .Résultats d'essai de cisaillement

Type mortier	Force (KN)	Contrainte (Mpa)	Moynne Contrainte (Mpa)
MD	155	19.74	19.19
	141.2	17.98	
	156	19.86	
MDC	174	22.15	21.93
	176	22.41	
	166.7	21.22	
MDA	179	22.79	23.75
	194.4	24.75	
	186.1	23.69	
MDCA	194	24.70	26.31
	217	27.63	
	209	26.61	
MDAV	159.2	20.27	20.14
	160.8	20.47	
	154.5	19.67	
MDCAV	201.8	25.69	25.94
	190.4	24.24	
	219.1	27.90	
Béton	213.6	27.20	25.13
	186.9	23.80	
	191.7	24.41	

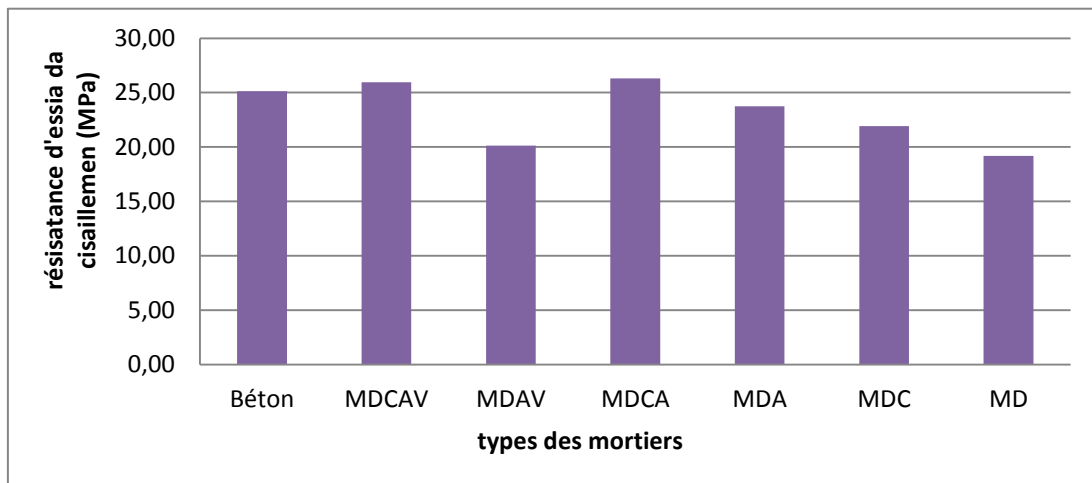


Figure V. 14. Variation de la résistance essai de cisaillement (slant shear)

Interprétation des résultats

A) Résistance

a) La résistance de cisaillement optimale a été obtenue avec **MDCAV** et **MDCA** telle que

$$R_e \text{ MDCAV} = 25.94 \text{ MPa.} \quad R_E \text{ MDCA} = 26.31 \text{ MPa}$$

On remarque que les fibres n'ont pas augmenté la résistance de cisaillement. Par contre elles l'ont légèrement diminué.

b) L'éprouvette de mortier de sable de dune **MD** a donné une résistance au cisaillement de **19.19MPa**

- En ajoutant l'adjuvant au **MDA**, la résistance au cisaillement a augmenté de **24% (23.75MPa)**
- En ajoutant des fibres, la résistance a chuté de **15% (20.14Mpa)**.

c) La résistance témoin est de **25.13Mpa** :

- On remarque que les résistances de **MDCA** et **MDCAV** sont supérieures à la résistance témoin de béton.
- Les autres éprouvettes (**MD, MDC, MDA et MDAV**) ont donné des résistances inférieures à celle du béton témoin.

Remarque:

- Le mélange de deux sables (**SD et SC**) a donné une bonne résistance par rapport à un seul sable.
- L'influence de l'adjuvant sur les deux compositions est significative (augmentation de la résistance).

B) Adhérence

L'adhérence dans notre cas est estimée visuellement sur éprouvettes après les essais de l'écrasement. Une bonne adhérence est atteinte lorsque la rupture est engendrée soit coté mortier ou coté béton (c'est-à-dire, lorsqu'elle évite la surface de liaison entre mortier et béton). L'analyse des éprouvettes après ruptures est récapitulée dans le **tableau V.4**.

Tableau V.4. Analyse de l'adhérence après écrasement (essai par cisaillement).

Type de mortier	Constataion visuelle	Conclusion sur l'adhérence
	MD : on constate que la rupture dans les sens longitudinales des deux éprouvettes et diagonale dans une seule éprouvette ce qui démontre que l'adhérence est parfaite entre les deux partie	Bonne
	MDC : on remarque qu'une grande partie du béton est collée sur le mortier après la rupture donc l'adhérence est assez bonne à l'interface	Bonne
	MDA : la rupture est réalisée avec une partie de béton sur le mortier et une partie du mortier sur le béton. Le collage est parfait après rupture	Bonne
	MDCA : la rupture est dans le sens longitudinal, donc aucune séparation entre mortier et béton.	Bonne
	MDAV : le comportement de la rupture est le même que celui du MDA	Bonne
	MACAV : le comportement de la rupture est similaire que celui du MDCA	Bonne

V.4.3. Résistance à la flexion

L'essai de la résistance à la flexion est réalisé avec le dispositif présenté dans la **figure V. 15**.



Figure V. 15. Essai Résistance à la flexion à 4 points

Les résultats de l'essai de flexion à quatre points sont donnés par le **tableau V.5** et présentés graphiquement sur la **figure V.16**.

Tableau V.5. Valeurs de la résistance à la flexion à quatre points

Type mortier	MD	MDC	MDA	MDCA	MDAV	MDCAV	Béton
Force (kN)	13.55	15.60	17.56	21.45	16.20	18.78	19.92
Contrainte (MPa)	4.07	4.68	5.27	6.44	4.86	5.63	5.98

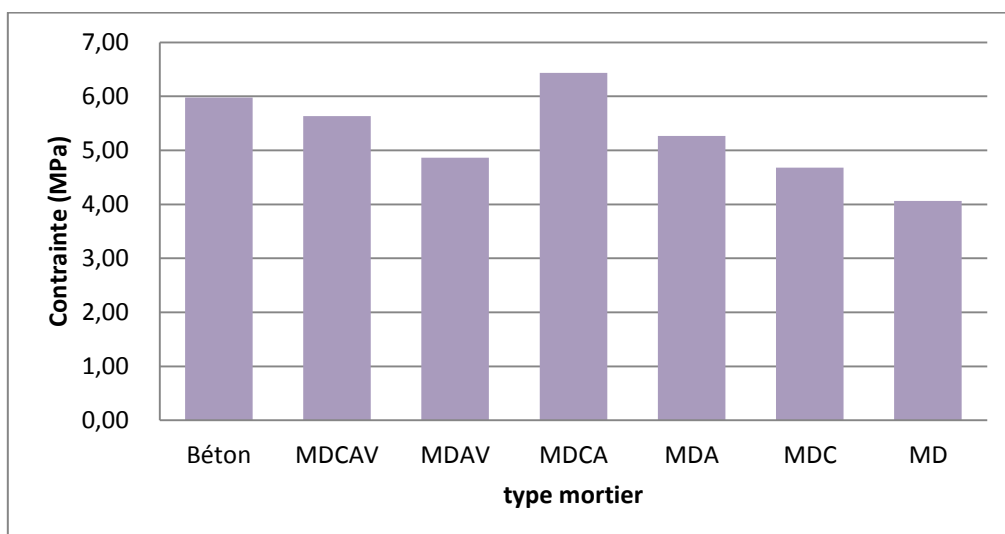


Figure V.16. Variation de la résistance à la flexion quatre points

Interprétation des résultats

A) Résistance

a) Le béton témoin a donné une valeur de résistance à la flexion de **5.98 MPa**

6.44 et 5.63MPa pour **MDCA** et **MDCAV** respectivement.

b) Les autres compositions **MD**, **MDA**, **MDAV** et **MDV** ont donné des résistances à la flexion inférieures par rapport au béton témoin. La mauvaise composition est celle du **MD** avec une diminution de environ 32% par rapport au béton témoin.

c) Les deux mortiers **MDCA** et **MDCAV** ont donné de meilleures résistances à la flexion

➤ Remarque

Les fibres n'ont pas apporté un plus en résistance à la flexion.

B) Adhérence

La rupture est réalisée au niveau du point d'appui sur une ligne transversale sur les **05** mélanges, à l'exception du mélange **MDCA** où la ligne de la rupture est légèrement en diagonale. On peut conclure que l'adhérence est assez bonne sur les 6 mélanges vu que les deux surfaces sont restées collées.



Figure V.17. Poutres 10X10X50 cm après écrasement

V.4.4. Essai d'arrachement (pull-off)



Figure V.18. Mortier réparation sur dalle 15X15X10cm

L'essai a été réalisé sur 44 éprouvettes au laboratoire mais l'opération de carottage n'a pas eu lieu faute de disponibilité de la carotteuse pour extraire les carottes et effectuer l'essai d'arrachement.

Conclusion générale

Le choix de la technique de réparation doit reposer sur une étude préalable permettant d'identifier les causes des dégradations et sur une bonne préparation des zones à réparer. Les choix d'un mortier de ragréage et d'un revêtement de protection adéquats constituent la seconde condition pour obtenir un résultat.

Au cours de notre étude, nous avons évoqué plusieurs aspects rentrant dans la qualité de réparation de béton à savoir:

- La nature des mortiers rentrant dans la fabrication des mortiers.
- Les différents modes de traitement de l'interface permettant d'évaluer la qualité de l'adhérence entre le béton et le mortier de réparation.

En ce qui concerne les matériaux, nous avons utilisés principalement des matériaux locaux (sable de dune et calcaire et fibres d'origine naturelles (alfa) qui ont une importance capitale du point de vue économique, d'où la réduction des coûts, une importance écologique, produits moins polluant et d'une grande disponibilité

Quant à la qualité d'adhérence, nous avons mis en évidence plusieurs procédés de traitement de la surface afin de créer une rugosité permettant une meilleure adhérence.

En utilisant diverses compositions de matériaux, nous avons obtenu des résultats encourageants en terme d'adhérence et dans notre cas, le bon résultat est trouvé avec un mélange optimal, réalisé en mélangeant les deux sables (sable de dune et sable calcaire) à part égale tout en ajoutant des fibres et un adjuvant.

A cet effet, et sous la lumière des résultats de notre travail, nous recommandons aux spécialistes de réparation de béton à utiliser les mortiers de réparation à base des matériaux locaux (mélange de sable de dune et calcaire) qui ont montré leurs efficacités sur tous les plans, économique écologique et résistance.

- [1] : **KROBBA B.** : *Cour 3^{ème} année licence MDC* ; Département de Génie civil : Université Amar Tlidji de Laghouat, Année universitaire 2012-2013.
- [2] : **OUZAA K.** : *Réhabilitation des structures* ; Polycopié de cours, Université des sciences et de la technologie d'Oran MOHAMED BOUDIAF (U.S.T.O). Année universitaire 2014-2015
- [3] : **SIDNEY M.J.** : *Dégradation, entretien et réparation des ouvrages du génie civil*, Editions Eyrolles, 1969.
- [4] : **CHOUKIR .A** : *La fissuration des ouvrages en béton*, Revue Marocaine du Génie Civil N° 42, 1992, (35-42). Librairie Aristide Quillet, 1976.
- [5] : **TCHETGNIA NGASSAM I.L.**: *Durabilité des réparations des ouvrages d'art en béton*. Thèse de Doctorat. Université Paris-Est, 2013.
- [6] : **TRUNG-HIEU N.** : *Durabilité des réparations à base cimentaire : analyse comparée de l'influence des propriétés mécaniques du matériau de réparation*, Thèse de Doctorat en génie civil, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2010.
- [7] : **PLUM D. R.** *The behaviour of polymer materials in concrete repair and factor influencing selection*. The structural Engineer, 68 (17/4): 337-346. 1990.
- [8] : **NICOT M. P.** : *Interactions mortier-support : éléments déterminants des performances et de l'adhérence d'un mortier*, Thèse de doctorat en génie civil, Université Toulouse III – Paul Sabatier, 2008.
- [9] : **MATHIEU M. T.** : *Propriétés mécaniques et comportement des réparations structurales en béton*, Maîtrise en génie civil, Faculté de science et génie, Université Laval, Québec, p. 157, 2010.
- [10] : **COURARD L. ET BISSONNETTE B.**: *Essai dérivé de l'essai d'adhérence pour la caractérisation de la cohésion superficielle des supports en béton dans les travaux de réparation*, Matériaux et Structures, 37 :342-350, 2004.
- [11] : **NF P95-101** : *Réparation et renforcement reprise du béton dégradé superficiellement*, Paris pp. 8-18 Novembre 1993.
- [12] : **UNION BELGE POUR L'AGREMENT TECHNIQUE DANS LA CONSTRUCTION (UBAtc)**: *Mortiers de réparation à base de liants hydrauliques, Agrément technique - Secteur du Génie Civil*, p. 45, 2002.
- [13] : **ROSSI P., ULM F et CHAUVEL D.**: *Choix et application des produits des réparations et de protection du béton*, 1996.
- [14] : **MAILVAGANAM N.P., PYE G.B. ET ARNOTT M.R.**: *Réparation du béton : Préparation de la surface* : Solution constructive n ° 2 4. Conseil national de recherches du Canada Décembre. ISSN 1206-1239,1998

- [15] : **KROBBA B.** : *Contribution à la formulation d'un mortier de réparation à base de sable de dune*, mémoire de magistère, centre universitaire Ammar Tlélidji de Laghouat, 2005.
- [16] : **NFP18-555** : *Granulats-mesures des masses volumiques, coefficients d'absorption et teneur en eau*. décembre 1990.
- [17] : **NFP 18-598** : *Granulats-détermination de la propreté des sable ; équivalent de sable .indice de classement*.
- [18] : **EN 933-1** : *Partie2 ; détermination de la granularité-tamis de contrôle, dimensions nominales des ouvertures*, mai1996
- [19] : **EN196-6** : *Méthode, d'essais des, ciments : détermination de la finesse*, aout 1990.
- [20] : **EN 196-3** : *Méthode, d'essais des, ciments : détermination du temps de prise et de la stabilité*. Norme homologuée, aout 1995.
- [21] : **MEPLAST SP40** : Fiche technique de la société GRANITEX-NP, BP 85, 16270 Oued Smar Alger.
- [22] : **NF-EN 196-1**: *Méthodes d'essais des ciments – Partie 1: détermination des résistances mécaniques*. Norme homologuée, Août 1995.
- [23] : **NF P10-502** AFNOR, *Pierre - Essai d'absorption d'eau*, Paris, 1990.
- [24] : **NF EN 1015-11**. *Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 11: Détermination de la résistance à la flexion et à la compression du mortier durci*. AFNOR 1999.
- [25]: **LI G., XIE H., et XIONG G.**: *Transition zone studies of new-to-old concrete with different binders*. Cement and Concrete Composite, vol. 23, pages 381-387, 2001.
- [26]: **NORME FRANÇAISE P18-555** : *Granulats – Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables*, Éditions AFNOR, Paris, 1990.
- [27] : **ZAITRI R. , BEDERINA M., BOUZIANI T., MAKHLOUFI Z., HADJOUJDA M.**: *Development of high performances concrete based on the addition of grinded dune sand and limestone rock using the mixture design modelling approach*, Construction and Building Materials, Vol 60:8-16, 2014.
- [28]: **BS 6319**: *Part 4. Slant shear test method for evaluating bond strength of epoxy systems*, BSI, Londres, 1984.
- [29] : **ASTM C 1437 – 07**: *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007 (disponible sur: www.astm.org)