



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

**FACULTÉ DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE
DÉPARTEMENT DE GENIE CIVIL**

MÉMOIRE DE MASTER

Présenté par : DJIREB Amel & BENAÏSSA Aïcha

DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE.

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : STRCUTURE

Thème

**Comportement mécanique des bétons autoplaçant
réparés par du mortier autoplaçant à base de
fumée de silice et des fibres mixtes**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr. Belaidi Akram Salah Eddine	Professeur	Président
Mme. Merghoub Messaouda	Maitre Assistant A	Examinatrice
Mr.BOUKHELKHAL Aboubakeur	Maitre de Conférence B	Rapporteur
Mr.BENABED Benchaa	Professeur	Co-rapporteur

Promotion : Septembre - 2020

REMERCIEMENT

On tient tout d'abord à remercier notre dieu, le tout puissant qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Notre profonde gratitude à nos chers parents qui nous ont encouragé tout au long de notre parcours scolaire et universitaire.

Nous tenons à remercier nos encadreurs Monsieur BOUKHELKHAL Aboubakeur maître de conférence B, et Monsieur BENABED Benchaa professeur à l'université de Laghouat, pour leurs précieux conseils et aides durant toute la période du travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury : monsieur BELAIDI Akram Salah Eddine et Mme MERGHOUB Messaouda pour l'intérêt qu'ils ont porté, en acceptant d'examiner notre travail de fin d'étude.

. Également nous remercions énormément tous les enseignants du département de génie civil à l'université de Laghouat, ainsi que le personnel de laboratoire de recherche de génie civil, qui nous a offert toutes formes d'aides.

Enfin nous remercions tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce travail de recherche à :



Ma grande famille plus particulièrement à mes très chers parents qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours scolaire et universitaire.

À la lumière de mes jours à celle que j'aime beaucoup,

Elle m'encourage dans tous mes projets **Ma MAMAN**

À mes deux frères : **Mohammed Walid , Sadek Amine**

et à ma sœur : **Imane.**

À ma grand-mère **Fechkeur Khedidja** (que dieu la garde dans son paradis).

À mes meilleures et intimes amies : **Maria, Khaouter, Rokaya.**

À toute **la promotion 2019/2020** de génie civil en particulier celle de structure.

Je souhaite qu'ils trouvent ici toute l'expression de ma reconnaissance.

Amel

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

- ♣ Ma très chère mère (**BENAISSA-R**) qui m'a Toujours soutenus durant toutes les périodes de vie, que Dieu le tout puissant les protèges et les gardes.
- ♣ A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur ,celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir ,que dieu te garde, à toi mon père (**BENAISSA Mustapha**).
- ♣ A mes frères **Salim Mohamed Aissa et Dadi** ; et Mes sœurs **Fatima, Siham, Missou**, vous m'avez épaulé en tout temps.
- ♣ A tous mes chers amies **Rokaya , Khadidja,Chaima,Fati**.
- ♣ A toute la promotion du structure **2019/2020**.

AICHA

Résumé

Le béton est un matériau le plus utilisé dans le domaine de construction, mais il reste un matériau fragile sous l'effet des efforts des charges accidentelles et différentes altérations d'origines physiques, chimiques et mécaniques, pour cette raison des recherches considérables ont été menées pour le rendre plus résistant et plus durable. Dans ce contexte, notre travail vise à préparer des mélanges de mortier autoplaçant ayant des propriétés de résistance et durabilité améliorées, destinés aux travaux de réparation, dont on a partiellement remplacé la quantité de ciment par différentes quantités de fumée de silice et de fibres de verre et d'alfa. On a envisagé à préparer et tester 10 mélanges, un à base de ciment, trois contenant différentes quantités de fumée de silice : 5, 10 et 15%, trois autres compositions incluent trois pourcentages de fibres d'alfa 0,2 ; 0,4 et 0,6% alors que dans les autres mélanges, nous avons ajouté des quantités de fibres mixtes (fibre d'alfa, fibres de verre) en vue d'améliorer la résistance à la flexion.

Les essais menés dans cette présente étude sont les suivants : l'essai d'étalement au mini cône et l'écoulement à l'entonnoir en V à l'état frais. A l'état durci, nous avons envisagé à effectuer les mesures suivantes : résistances à la flexion et la compression, retrait, absorption de l'eau et essais de réparation.

Les résultats obtenus prouvent que l'addition de fumée de silice résulte une augmentation du dosage de superplastifiant pour garder le caractère autoplaçant de mortier. L'emploi de fumée de silice et des fibres d'alfa cause une réduction considérable de temps d'écoulement.

Mots clés : mortier de réparation, fibres, alfa, verre, fluidité, écoulement.

ملخص

تعتبر الخرسانة من المواد الأكثر استخدامًا في مجال البناء، مع ذلك فهي تظل مادة هشة تحت تأثير القوى والأحمال العرضية وظواهر الفيزيائية، كيميائية وميكانيكية، ولهذا السبب تم إجراء بحوث بهدف تحسين مقاومته وديمومته. في إطار يهدف بحثنا هذا إلى تحضير ملاط ذاتي الرص ذو مقاومة وديمومة محسنين، مخصص لأعمال ترميم الخرسانة، حيث تم استبدال كمية الإسمنت جزئياً بكميات مختلفة من دخان سيليس لتحسين. في البداية برمجنا تحضير 10 خلطات، واحدة مرجعية مكونة من الإسمنت و بدون إضافات، ثلاثة تحتوي على كميات مختلفة من دخان سيليس: 5، 10 و

15 %، ثلاث خلطات أخرى تحتوي ثلاث نسب ألياف الحلفاء 0,2 ; 0,4 ; 0,6 % ، بينما في الخلطات الأخرى، قمنا بإضافة كميات من الألياف المختلطة (ألياف الحلفاء، ألياف زجاج) لتحسين المقاومة للانحناء.

الاختبارات التي أجريت في هذه الدراسة هي: اختبار انتشار باستعمال المخروط الصغير والتدفق بواسطة القمع . في حالة تصلب الملاط، خططنا لإجراء القياسات التالية: مقاومة الانحناء والضغط، الانكماش، امتصاص الماء، واختبارات الترميم .

أثبتت النتائج المتحصل عليها أن إضافة دخان سيليس يتطلب زيادة تركيز الملدن المتفوق للحصول على ملاط ذاتي رص. استخدام دخان سيليس وألياف الحلفاء يعمل على خفض من زمن التدفق.

الكلمات المفتاحية: ملاط الترميم، ألياف، الحلفاء، زجاج، سيولة، التدفق.

Abstract

Concrete is the most widely used material in the construction industry, but it remains a fragile material under the effect of the forces of accidental loads and various alterations of physical, chemical and mechanical origins, for this reason considerable research has been carried out. to make it stronger and more durable. In this context, our work aims to prepare self-consolidating mortar mixtures with improved strength and durability properties, intended for repair work, the amount of cement of which has been partially replaced by different amounts of silica fume and glass fibers. and alfa. It was envisaged to prepare and test 10 mixtures, one based on cement, three containing different amounts of silica fume: 5, 10 and 15%, three other compositions include three percentages of 0.2 alpha fibers; 0.4 and 0.6% while in the other blends we have added amounts of mixed fibers (alfa fiber, glass fiber) to improve flexural strength. The tests conducted in this study are: the mini-cone spread test and the fresh-state V-funnel flow. In the hardened state, we planned to perform the following measurements: flexural and compressive strengths, shrinkage, water absorption and repair testing.

The results obtained prove that the addition of silica fume results in an increase in the dosage of superplasticizer to maintain the self-consolidating character of the mortar. The use of silica fume and alfa fibers causes a considerable reduction in flow time.

Key words: repair mortar, fibers, alfa, glass, fluidity, flow.

Table des matières

Remerciement.....	(I)
Dédicaces.....	(II)
Résumé.....	(III)
Table des matières.....	(IV)
Liste des figures.....	(IIV)
Liste des tableaux.....	(IIIV)
Introduction générale	(01)
 CHAPITRE I : Revue sur les bétons autoplaçants	
I.1. Introduction.....	(03)
I.2. Définition.....	(03)
I.3. Domaine d'utilisation et d'application des BAP.....	(04)
I.4. Avantages des BAP.....	(06)
I.4.1. Avantages techniques et économiques.....	(06)
I.4.2. Avantages écologiques.....	(07)
I.5. Inconvénients des BAP.....	(07)
I.6. Spécificité de la composition des bétons autoplaçants	(07)
I.6.1. Quantité de fines importante.....	(07)
I.6.2. Volume de pâte élevé.....	(08)
I.6.3. Utilisation de superplastifiants.....	(08)
I.6.4. Un faible volume de gravillons.....	(08)
I.7. Constituants des bétons autoplaçants	(09)
I.7.1. Ciment.....	(09)
I.7.2. Ajouts minéraux.....	(09)
I.7.2.1 Bénéfices fonctionnels	(09)
I.7.2.2. Bénéfices économiques.....	(09)
I.7.2.3. Bénéfices écologiques.....	(10)
I.7.3. Granulats.....	(10)
I.7.4. Eau de gâchage.....	(10)
I.7.5. Adjuvants.....	(10)
I.7.5.1. Superplastifiants.....	(10)
I.7.5.2. Agents de viscosité.....	(11)
I.8. Formulation des bétons autoplaçant.....	(11)
I.8.1. Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers.....	(11)
I.8.2. Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte.....	(12)
I.8.3. Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire.....	(13)
I.8.4. Méthode basée sur un plan d'expérience.....	(13)
I.8.5. Approche basée sur l'utilisation du mortier du béton équivalent MBE.....	(14)
I.9. Caractérisation BAP a l'état frais.....	(14)

I.9.1. Essai d'étalement.....	(14)
I.9.2. Essai de boîte en L.....	(15)
I.9.3. Essai de stabilité au tamis.....	(16)
I.10. Caractérisation des BAP à l'état durci.....	(16)
I.10.1. Résistance à la compression.....	(16)
I.10.2. Résistance à la traction.....	(17)
I.10.3. Module d'élasticité.....	(19)
I.10.4. Retrait.....	(20)
I.10.4.1. Retrait thermique.....	(20)
I.10.4.2. Retrait endogène.....	(20)
I.10.4.3. Retrait plastique.....	(21)
I.10.4.4. Retrait de séchage (dessiccation)	(22)
I.11. Comparaison entre le béton autoplaçant et le béton ordinaire.....	(24)
CHAPITRE II : Dégradation et réparation des structures en béton armé	
II.1. Introduction	(25)
II.2. Causes générales des dégradation des structures en béton armé	(25)
II.2.1. Causes mécaniques	(26)
II.2.1.1. Abrasion	(26)
II.2.1.2. Chocs	(26)
II.2.1.3. Surcharges	(27)
II.2.1.4. Tassement	(27)
II.2.2. Causes physiques	(27)
II.2.2.1. Retrait	(28)
II.2.2.2. Ressuage	(28)
II.2.2.3. Cycle gel- dégel	(28)
II.2.3. Causes chimiques	(29)
II.2.3.1. Alkali-réaction	(29)
II.2.3.2. Action des sulfates	(30)
II.2.3.3. Corrosion des armatures	(30)
II.2.4. Désordres dus à un défaut de conception	(31)
II.2.4.1. Fissures de perte d'adhérence	(31)
II.2.4.2. Fissures typiques des corbeaux	(32)
II.2.4.3. Fissures d'éclatement dans les zones de béton comprimé	(33)
II.2.4.4. Fissures en tête des poteaux servant d'appuis aux poutres préfabriquées	(33)
II.2.5. Autres causes de dégradation des betons	(34)
II.3. Réparation des structures en béton armé	(35)
II.3.1. Techniques de réparation	(35)
II.3.1.1. Chemisage:	(35)
a-Chemisage en béton armé	(35)
b-Chemisage en acier.....	(37)
II.3.1.2. Ragréage	(38)
a-Ragréage – Application manuelle	(38)
b-Ragréage – Bétonnage en place	(39)
II.3.1.3. Injection	(39)

II.3.1.4. projection(béton projeté)	(39)
II.3.2. Matériaux des réparation	(40)
II.3.2.1. Mortiers de réparation	(40)
a-Mortier autoplaçant.....	(41)
b- Mortiers à base de ciment modifiés ou non par des polymères.....	(41)
c- Mortiers à base de résine époxy	(44)
d-Mortier fibré	(44)
II.3.2.2.Les fibres	(49)
II.3.2.2.1.Types des fibres	(45)
a-Fibres naturelles	(46)
b-Fibres synthétiques d'origine minérale.....	(47)
c-Fibres synthétiques organique	(49)
II.3.2.2.2.Rôle des fibres	(50)
II.3.2.2.3. Caractéristiques des fibres	(51)
II.3.2.2.4. Utilisation des fibres dans la Construction	(51)
II.3.2.2.5. Influence des fibres sur les propriétés des BAPF à l'état frais	(53)
II.4.Essais réalisée sur les matériaux du réparation	(53)
II.4.1. Essai de compression simple.....	(53)
II.4.2. Essai de traction	(54)
II.4.3. Essai de cisaillement oblique (cisaillement compression).....	(54)
II.4.4. Essai de flexion 3 points	(55)
II.4.5. Essai de flexion 4 points	(56)
II.4.6. Essai d'arrachement	(56)
II.4.7. Essai en traction par fendage	(57)
II.4.8. Essai de retrait	(57)
II.4.9. Module d'élasticité	(58)
CHAPITRE III : Caractérisation des matériaux et protocole expérimental	
III.1. Introduction	(60)
III.2. Caractéristiques des composants	(60)
III.2.1. Granulats.....	(60)
III.2.1.1. Analyse Granulométrique	(61)
III.2.1.2. Masse volumique	(62)
III.2.1.3. Coefficient de l'absorption.....	(62)
III.2.1.4. Équivalent de sable	(63)
III.2.2. Ciment.....	(64)
III.2.3. Fibres	(65)
III.2.3.1. Fibres d'Alfa.....	(65)
III.2.3.1.1. Masse volumique	(65)
III.2.3.2. Fibres de verre.....	(65)
III.2.4. Fumées de silice.....	(66)
III.2.4.1. Masse volumique	(66)
III.3. Formulation de béton autoplaçant (BAP).....	(67)
III.3.1. Formulation du mortier autoplaçant (MAP).....	(67)
III.3.1.1. Rapport eau/liant(E/L).....	(68)

III.3.1.2. Rapport sable/mortier (S/M).....	(68)
III.3.1.3. Dosage de superplastifiant (Sp).....	(68)
III.3.1.4. Séquence de malaxage du MAP.....	(69)
III.4. Protocole expérimental.....	(69)
III.4.1. Essais sur MAP à l'état frais	(69)
III.4.1.1. Essais d'étalement au mini-cône.....	(70)
III.4.1.2. Essai de l'entonnoir en v	(71)
III.4.2. Essais Réalisées sur le mortier à l'etat durci.....	(71)
III.4.2.1. Essai de résistance à la Compression.....	(71)
III.4.2.2. Résistance à la flexion simple.....	(72)
III.4.2.3. Expérience d'absorption d'eau par immersion.....	(73)
III.4.2.4. Essai de retrait.....	(73)
III.4.3. Essai de réparation.....	(74)
III.4.3.1. Essai de flexion	(74)
III.4.4. Essai de cisaillement oblique (cisaillement par compression).....	(75)
III.5. Synthèse	(75)

CHAPITRE IV : Analyse et discussion des résultats

IV.1. Introduction	(76)
IV.2. Composition des mélanges étudiés.....	(76)
IV.2.1. Mortier autoplaçants témoin.....	(76)
IV.2.2. Autre composition de MAP.....	(76)
IV.3. Présentation et discussion des résultats	(77)
IV.3.1. Essais réalisée à l'état frais.....	(77)
IV.3.1.1. Essai d'étalement	(77)
IV.3.1.2. Essai d'écoulement	(78)
IV.3.1.3. Demande en superplastifiant.....	(79)
IIIV. Conclusion générale.....	(80)

Références Bibliographiques

Liste des figures

Figure I.1 : Béton autoplaçant pour des voiles	(04)
Figure I. 2 : Mise en œuvre des bétons autoplaçants	(05)
Figure I. 3 : comparaison entre la mise en place d'un béton traditionnel et d'un BAP.....	(05)
Figure I.4 : élément préfabriqué en BAP	(06)
Figure I.5 : coulage en béton autoplaçant	(07)
Figure I.6 : Dispersion des granulats par excès de pâte	(09)
Figure I.7 : phénomène de blocage (ségrégation)	(09)
Figure I.8 : phénomène de défloculation	(12)
Figure I.9 : Notion d'excès de pâte : La pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats.....	(14)
Figure I.10 : Essai d'Etalement pour Mortier autoplaçant	(16)
Figure I.11 : Représentation schématique de l'essai à la boîte en L	(16)
Figure I.12 : Représentation schématiques de l'essai de l'essai de stabilité au tamis	(17)
Figure I.13 : Variation des résistances mécaniques en compression de BAP en fonction de la composition du liant	(18)
Figure I.14 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV correspondant.....	(18)
Figure I.15 : Comparaison des modules d'élasticité d'après les codes de construction de BAP et de béton vibré avec leurs valeurs expérimentales.....	(19)
Figure I.16 : Comparaison des retraits endogènes d'un béton vibré et de cinq BAP	(21)
Figure I.17 : Retrait plastique de BAP et de béton vibré de structure (T = 20°C, 50% HR) . ..	(22)
Figure I.18 : Retrait plastique des formules de BAP et de bétons vibrés dérivés.....	(22)
Figure I.19 : Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et de cinq BAP	(23)
Figure I.20 : Retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré correspondant	(23)
Figure I.21 : Composition d'un béton ordinaire et d'un BAP	(24)
Figure II.1 : les principales causes de la dégradation des structure en béton armé	(25)
Figure II.2 : Abrasion du béton	(26)
Figure II.3 : Choc sur une glissière de sécurité et une pile de pont	(27)
Figure II.4 : Fissuration et éclatement du béton sous charges trop importantes	(27)

Figure II.5: Ressuage du béton après vibration	(28)
Figure II.6 : Exemple de dommages causé par le gel-dégel	(29)
Figure II.7: Exemple de béton dégradé par l'alcali-réaction	(30)
Figure II.8: Différents types de dégradations	(31)
Figure II.9: Fissures de perte d'adhérence	(32)
Figure II.10 : Fissure à l'extrémité du corbeau	(32)
Figure II.11 : Disposition de ferrailage pour éviter la dégradation du corbeau	(33)
Figure II.12: Fissures en tête de poteau servant d'appui aux poutres préfabriquées	(34)
Figure II.13 : Détail des armatures	(34)
Figure II.14 : Chemisage d'un poteau.....	(35)
Figure II.15: Différents arrangements de chemisages des poteaux en BA.....	(36)
Figure II.16: conception de l'ancienne et les nouvelles armatures de chemisages.....	(37)
Figure II.17 : Chemisage en acier.....	(38)
Figure II.18 : Application manuelle de mortier.....	(38)
Figure II.19 : La réparation d'une fissure à l'aide d'une injection.....	(39)
Figure II.20 : Béton projeté par voie sèche et par voie humide.....	(40)
Figure II.21: Projection de béton	(40)
Figure II.22 : Principes de stabilisation d'un latex.....	(42)
Figure II.23: Resurfaçage d'éléments en béton (dalle de sol).....	(43)
Figure II.24 : Éprouvette d'un mortier fibré.....	(45)
Figure II.25: Différentes types de fibres.....	(46)
Figure. II.26: Organigramme des différents types de fibres.....	(47)
Figure II.27: Fibres de verre.....	(47)
Figure II.28: Différentes formes géométriques de fibres.....	(48)
Figure II.29: Exemples de fibres métalliques.	(48)
Figure II.30: Fibres de Carbone.....	(49)
Figure II.31: Fibre polypropylène.....	(50)
Figure II.32: Illustration de l'apport du renfort par des fibres.....	(51)
Figure II.33: Essai de traction	(54)

Figure II.34 : Essai de cisaillement oblique	(55)
Figure II.35 : Essai de compression	(55)
Figure II.36: Principe de l'essai de flexion 3 points	(56)
Figure II.37 : Essai de flexion a 4 points	(57)
Figure II.38: Dispositif expérimental des essais d'arrachement par traction directe	(57)
Figure II.39: Principe de l'essai de fendage	(58)
Figure II.40 : Mesure du retrait	(58)
Figure II.41: Principe de l'essai de Module d'élasticité.....	(59)
Figure III.1: Sable alluvionnaire	(60)
Figure III.2 : Gravier 3/8	(60)
Figure III.3 : Gravier 8/15	(60)
Figure III.4 : Courbe granulométrique de Sable et gravier 3/8, G8/15	(61)
Figure III.5 : Mesure d'absorption	(63)
Figure III.6 : Essai L'équivalent de sable	(64)
Figure III.7 : Essai de mesure la masse volumique des fibres d'Alfa	(65)
Figure III.8 : fibres de verre	(65)
Figure III.9: fumées de silices	(66)
Figure III.10: Fumées de silices Vue au MEB	(66)
Figure III.11 : Essai de mesure la masse volumique de fumées de silice	(66)
Figure III.12 : essai de l'étalement au mini-cône	(68)
Figure III.13 : essai de l'écoulement au V-tunnel	(68)
Figure III.14 : Séquence de malaxage du MAP	(69)
Figure III.15 : Essais d'étalement au mini-cône	(70)
Figure III.16 : Essai d'écoulement au v-tunnel	(71)
Figure III.17 : Dispositif de calcul de la résistance à la compression	(71)
Figure III.18 : Essai de flexion simple	(72)
Figure III.19 : Mesure du retrait	(73)

Figure III.20 : Poutrelles après réparées.....	(74)
Figure III.21 : essai de flexion est illustré par trois points	(74)
Figure III.22 : étapes de l'essai de coupe oblique	(75)
Figure IV.1 : Variation du diamètre d'étalement en fonction du pourcentage de fumée de silice et des fibres d'alfa	(78)
Figure IV.2 : Variation de temps d'écoulement en fonction du pourcentage de fumée Silice et des fibres d'alfa	(78)
Figure IV.3 : Variation du dosage de superplastifiant en fonction le pourcentage de la fumée de silice	(79)

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Les caractéristique des mortiers.....	(41)
Tableau II.2 : Caractéristiques moyennes des fibres les plus utilisées.....	(51)
Tableau II.3 : Application des divers renforcements de fibres dans les produits à base de ciment.....	(52)
Tableau III.1 : Résultats de masse volumique de sable et de gravier G3/8, G8/15.....	(62)
Tableau III.2 : Résultats de coefficient d'absorption de sable et de gravier G3/8,G8/15.....	(63)
Tableau III.3 : Composition chimique de ciment.....	(64)
Tableau III.4 : Caractéristiques physiques mécaniques du ciment.....	(64)
Tableau IV.1: composants de mortier témoin dans 1m ³	(76)
Tableau IV.2 : Composition de différents mélanges dans 1m ³	(77)

Introduction générale

Le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde. Depuis sa découverte, le béton a énormément évolué à travers le temps en termes de qualité, de facilité d'utilisation, de malléabilité, de technologie de fabrication et d'esthétique. Plusieurs types de bétons plus efficaces et performants sont apparus ces dernières années en raison des exigences architecturales et technologiques croissantes tels que : les bétons à hautes performances (BHP), les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres métalliques (BFM) et les bétons autoplacants (BAP), ce dernier est considéré comme l'un des développements les plus importants de la technologie dans le domaine de la construction, en raison de sa fluidité et sa capacité à couler librement dans le coffrage et se compacter et expulser l'air emprisonné sans utiliser des vibrateurs.

Le béton autoplacant a été développé dans les années 90 au Japon afin de réaliser des structures en béton durable tout en améliorant le processus de construction et de mise en place, telle que la capacité de remplissage, et la résistance à la ségrégation.

Les structures en béton sont exposées à la détérioration de certains de ses éléments au fil du temps, qui sont dues à des influences physiques, mécaniques et chimiques internes ou externes liées au milieu dans lequel elles sont présentes, nous devons donc les réparer avec un matériau de réparation afin de les rendre fonctionnelles.

L'objectif de cette étude est d'élaborer des mortiers autoplacants ayant des propriétés améliorées, plus résistant, durable, économique et écologique destinés pour les travaux de réparation, dont on a partiellement remplacé une quantité de ciment par différentes quantités de fumée de silice pour améliorer ses performances, en particulier sa résistance à la compression et sa durabilité. En outre, des fibres mixtes sont incorporées (fibre d'alfa, fibres de verre) en vue d'améliorer la résistance à la flexion.

Notre mémoire est organisé sous forme de quatre chapitres avec une introduction générale et conclusion générale. Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les bétons autoplacants dans lequel nous définirons le béton autoplacant et ses constitutions, les méthodes de formulations ainsi que ses caractéristiques à l'état frais et à l'état durci. Le deuxième chapitre présente une revue sur les principales causes de dégradation des structures en béton armé. Les techniques et les matériaux de réparation sont également décrits dans ce chapitre.

Le troisième chapitre, mettra l'accent sur les différents matériaux utilisés et les essais réalisés dans notre étude. Le quatrième chapitre, sera consacré à l'interprétation et la discussion sur les résultats issus de différents essais effectués.

En fin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale dont nous synthétiserons les principaux résultats obtenus.

Chapitre I :
Revue sur les bétons autoplaçants

I.1. Introduction

Les BAP ont été développés dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon, leur objectif était d'augmenter les cadences de travail en réduisant l'effectif du personnel sur chantier et le temps de mise en œuvre de bétons.

Dans ce premier chapitre qui fait l'objet d'une initiation au BAP, on présente une synthèse bibliographique sur les bétons autoplaçant ou les BAP, avec les notions fondamentales relatives aux caractéristiques des BAP, les méthodes de formulation de ces bétons, la présentation des propriétés des BAP à l'état frais (fluidité, ouvrabilité, homogénéité) et les différents essais empiriques et rhéologiques qui caractérisent ce type de béton, de leurs propriétés mécaniques à l'état durci, ainsi que certains indicateurs de durabilité.

I.2. Définition

Le béton autoplaçant est défini comme suit dans l'Annexe nationale NA de la norme SN EN 206-1 : Le béton frais est appelé autoplaçant lorsqu'il se compacte suffisamment grâce à son poids propre tout en ne présentant pas de ségrégation, ce sont des bétons très fluides, une caractéristique principale de ces bétons réside dans le fait qu'ils se mettent en place sans vibration, Ils sont très déformables et épousent parfaitement les formes des coffrages les plus complexes grâce à leurs bonne uniformité une fois mis en place, ils offrent des structures résistantes et durables [1].



Figure I.1 : Béton autoplaçant pour des voiles



Figure I. 2 : Mise en œuvre des bétons autoplaçants.

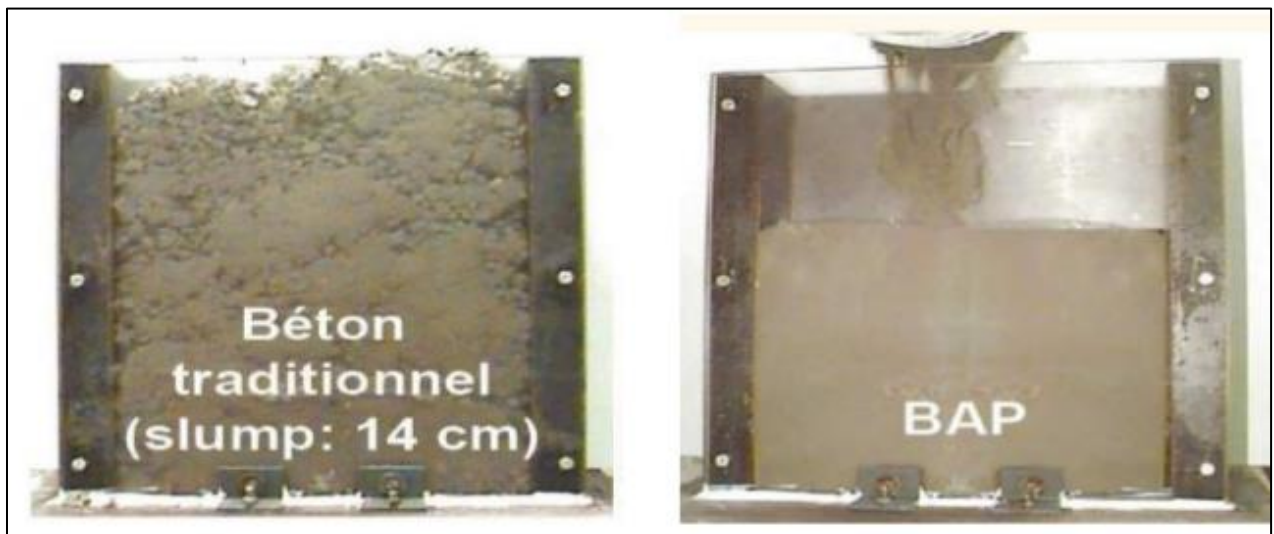


Figure I. 3 : comparaison entre la mise en place d'un béton traditionnel et d'un BAP.

Le béton autoplaçant, aussi nommé béton auto-nivelant (BAN) ou bien autocompactant c'est un béton qui présentent des caractéristiques différentes que celles des bétons ordinaires par son importante fluidité c'est grâce aux divers adjuvants superplastifiants qui le composent, le BAP est un béton très fluide, très déformable, stable et mis en œuvre sans vibration (la compaction des BAP s'effectuant uniquement par le seul effet gravitaire), les BAN (Bétons Auto-Nivelant) constituent une famille de BAP correspondant aux applications horizontales (dallage, plancher...)[1].

I.3. Domaine d'utilisation et d'application des BAP

La technologie de bétonnage par BAP ne cesse d'augmenter dans nombreux domaines de la construction : constructions, renforcement et réparation d'ouvrages d'art (application de couches minces dans des endroits difficile d'accès), construction d'éléments préfabrification à haute résistance, moulage et mise au point de béton pour toute utilisation (bétons coulés sous l'eau pour des réparations, béton confinés, pieux...) [1], les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation

d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant des :

- Densités de ferrailage importantes.
- Formes et géométries complexes : (voiles, courbes ...).
- Voiles minces et de grande hauteur : (piles de ponts ...).
- Voiles de grande hauteur sans reprise de bétonnage.
- Reprises en sous-œuvre.
- Accès difficiles voire impossibles pour déverser le béton dans le coffrage et pour assurer la vibration.
- Voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures.
- Exigences architecturales et qualité de parement élevée [2].



Figure I.4 : élément préfabriqué en BAP.



Figure I.5 : coulage en béton Autoplaçant.

I.4. Avantages des BAP

I.4.1. Avantages techniques et économiques

- Mise en œuvre sans vibration (Rendements améliorés et exécution plus rapide).
- Bétonnages plus rapides et optimisation de productivité sur chantier.
- Coulage de murs verticaux de grande hauteur.
- Bétonnage de formes complexes avec un excellent remplissage.
- Plus grande fluidité pour un meilleur pompage.
- Qualité accrue des surfaces de béton
- Réduction/suppression des travaux de ragréage
- Facilité de bétonnage d'éléments avec une armature dense ou importante
- Remplissage de parties difficilement accessibles
- Diminution de la pénibilité du travail et suppression de l'apparition du syndrome du vibreur.
- Enrobage des armatures amélioré.
- Optimisation de la qualité de parement.
- Amélioration des conditions de travail sur le chantier.
- Absence de nuisance sonore liée à la vibration durant l'exécution.

Outre l'amélioration de la productivité des entreprises, le béton BAP permet d'accroître la qualité et la durabilité des ouvrages en béton [4]

I.4.2. Avantages écologiques

- Valorisation des déchets de construction (récupération de ces déchets au niveau des chantiers, industries, carrières, stations de concassage).
- Diminution de la quantité de CO₂ émise par l'industrie cimentaire (due à la réduction de la quantité de ciment nécessaire au BAP). [5]

I.5. Inconvénients des BAP

Malgré toutes les qualités des bétons BAP ils présentent aussi des inconvénients comme par exemple :

La nécessité d'une main d'œuvre qualifiée, on distingue la composition des BAP implique un dosage délicat des matières premières, il est donc préférable de faire appel à une entreprise spécialisée pour réaliser ces bétons.

La liquidité des BAP est très précise et réclame donc un étroit partenariat entre la société de fabrication et l'entrepreneur du chantier., en effet, suivant le type de coffrage, sa disposition ou sa taille, on préférera plutôt un type de liquidité ou un autre, cela rajoute donc des contraintes dans les préparatifs du chantier puisque beaucoup de discussions s'imposent de plus, la rigueur dans les délais est de mise, sans quoi la liquidité du béton peut varier cet aspect prend beaucoup plus d'importance que pour les bétons vibrés rajoutons à cela que les matières premières en elles-mêmes sont spécifiques et ne sont pas toujours disponibles de stock chez les fabricants [5]

I.6. Spécificité de la composition des bétons autoplaçants

Les approches de composition des BAP sont basées sur les critères suivants :

I.6.1. Quantité de fines importante

Les compositions des bétons autoplaçants comportent une importante quantité de fines, (environ 500 kg/m³ de diamètre inférieur à 80 µm) pour assurer la maniabilité et éviter les risques de ségrégations et de ressuage. Les plus utilisées sont [6]:

- Les fillers calcaires (calcite, dolomite) : qui agissent comme des accélérateurs de prise, par la formation d'hydrates.
- Les fillers siliceux.
- Les fumées de silice D.
- Les cendres volantes.
- Les laitiers de haut fourneau S : adaptent aux ouvrages en contact avec le sol.

Ces deux derniers ajouts permettent d'obtenir un maintien d'ouvrabilité plus long, et apportent une résistance complémentaire à long terme, et aussi améliorent la durabilité, diminuent la perméabilité, les retraits et la réactivité à court terme.

I.6.2. Volume de pâte élevé

Le rôle de la pâte (ciment + eau efficace + air occlus + additions) est d'écarter les granulats, afin de diminuer les frottements qui provoquent la limitation vis-à-vis de l'étalement du béton et la capacité de remplissage des coffrages.

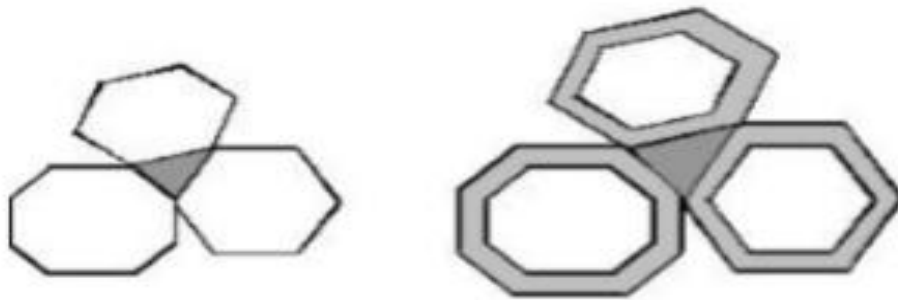


Figure I.6 : Dispersion des granulats par excès de pâte.

I.6.3. Utilisation de superplastifiants

La maniabilité des BAP est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Cet ajout ne doit pas être très élevé, sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de ségrégation et du ressuage, on opte pour une éventuelle utilisation d'un rétenteur d'eau (agent de viscosité).

I.6.4. Un faible volume de gravillons

Les risques de blocage (figure I.7) pour un confinement donné augmentent avec l'augmentation des teneurs en gros granulats, les BAP peuvent être réalisés avec des granulats roulés ou concassés, le diamètre maximal des gravillons dans un BAP étant compris entre 10 et 20 mm, le rapport gravillons/sable pour les BAP est voisin de 1.

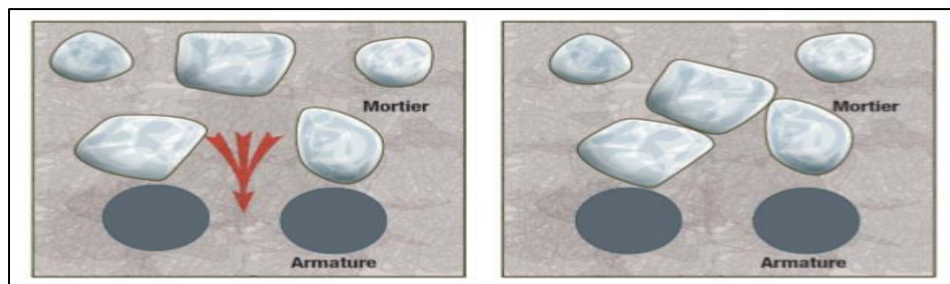


Figure I.7 : phénomène de blocage (ségrégation).

I.7. Constituants des bétons autoplaçants

I.7.1. Ciment

Les BAP peuvent être réalisés avec la plupart des ciments. Cependant, compte tenu des exigences de démoulage aux jeunes âges, les BAP utilisés dans l'industrie du béton contiennent presque toujours du ciment CEM I 52.5 ou 42.5.

I.7.2. Ajouts minéraux

Les ajouts minéraux sont des matériaux finement divisé et pouvant être ajouté au béton pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. [7]

Ces ajouts se sont principalement :

- Fillers calcaires (calcite, dolomite,).
- Fillers siliceux.
- Laitiers de haut fourneau.
- Cendres volantes.
- Fumées de silice.

L'utilisation des ajouts minéraux à des bénéfices : fonctionnels, économiques et écologiques : [8]

I.7.2.1. Bénéfices fonctionnels

- L'incorporation des particules fines améliore la maniabilité, les propriétés mécaniques et la durabilité du béton, elles diminuent la demande en eau (à l'exception des particules très fines qui augmentent la demande en eau vu leur grande surface spécifique).
- La substitution d'une quantité de ciment par des fines diminue la chaleur d'hydratation dégagée lors de la confection du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

I.7.2.2. Bénéfices économiques

- La majorité des ajouts minéraux sont des sous-produits de différentes industries (exploitation des déchets).
- Le remplacement du ciment qui est un grand consommateur d'énergie par des ajouts minéraux permet de réduire le coût du béton.

I.7.2.3. Bénéfices écologiques

Le développement durable du béton permet entre autres de réduire l'émission des gaz à effet de serre, la production d'une tonne de ciment libère environ la même quantité de CO₂ dans l'atmosphère le remplacement d'une partie de ciment par des ajouts cimentaires permettra de diminuer de façon systématique la quantité de CO₂ émise.

I.7.3. Granulats

Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés ou concassés, toutefois, comme pour un béton ordinaire, la forme des granulats a une influence sur le comportement rhéologique. Le coefficient de frottement est plus faible entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés. Cependant pour le sable, et face au problème de surexploitation des gisements, il est préférable d'utiliser un sable concassé qu'un sable roulé.

Afin d'empêcher tout risque de blocage lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats entre 16 mm et 20 mm. [9]

I.7.4. Eau de gâchage

L'eau utilisée en générale pour l'élaboration des bétons est l'eau du réseau public, il doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organique).

I.7.5. Adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques qui incorporé dans les bétons lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieure à 5% du poids du ciment, provoquent des modifications des propriétés ou du comportement de ceux-ci [10].

I.7.5.1. Superplastifiants

Un super plastifiant est un adjuvant qui, introduit dans un béton, un mortier ou un coulis, permet de réduire le dosage en eau et d'ajuster sa fluidité, ceci entraîne une augmentation de la résistance mécanique, les principaux superplastifiants sont à base de :

- Copolymère formaldéhyde naphthalène sulfonate (PNS).
- Copolymère formaldéhyde mélamine sulfonate (PMS).
- Polymère avec fonction acrylate (PA).
- Polymère avec des fonctions carboxylate (PC).
- Monomère avec les fonctions phosphonate et/ou carboxylate (MPC) [11].

Les superplastifiants interagissent avec les particules de ciment et éventuellement avec les additions en s'absorbant à leur surface ce qui permet d'éviter le phénomène de floculation au contact de l'eau. (Figure I.8).

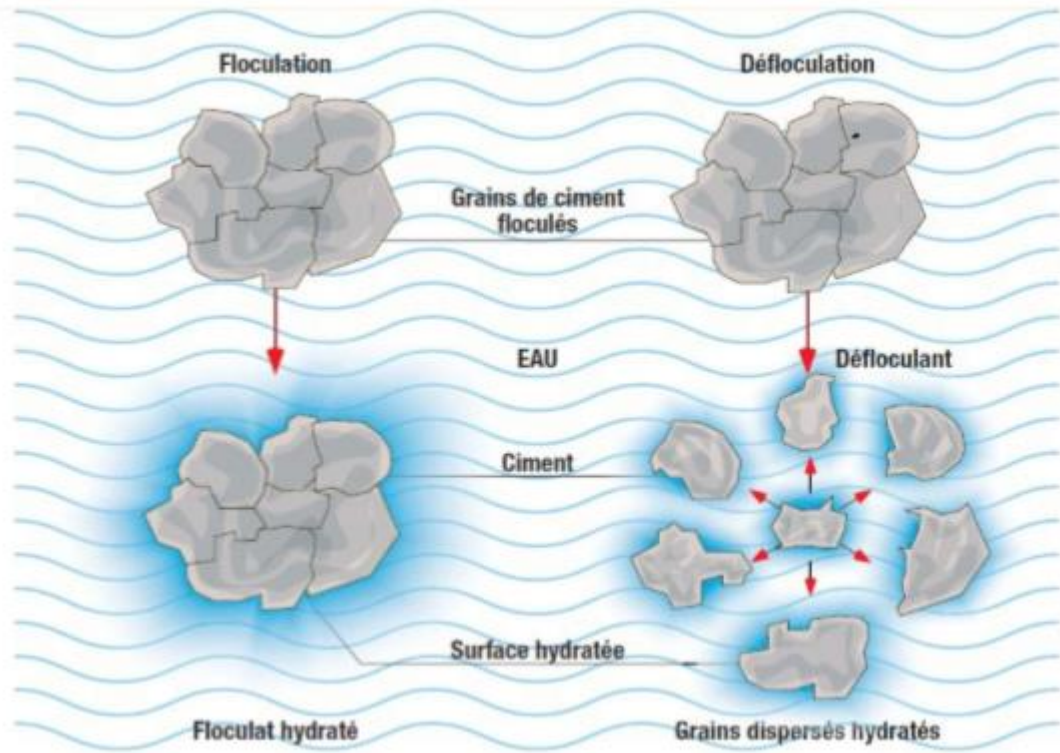


Figure I.8 : phénomène de défloculation.

I.7.5.2. Agents de viscosité

L'agent de viscosité est un polymère qui interagit avec l'eau et rend la pâte du béton plus visqueuse, une meilleure cohésion de la pâte permet de maintenir une distance entre les granulats, ce qui réduit leurs interactions de friction et de collision lors de l'écoulement du matériau et évite le phénomène de blocage au droit d'un obstacle.

I.8. Formulation des bétons autoplaçants

Il existe dans la littérature des techniques de formulation moins empiriques, en présente ci-dessous une revue des grandes familles d'approche :

I.8.1. Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers

Cette méthode, proposée initialement par des chercheurs japonais OKAMURA, OUCHI, HAY, et NAG, elle permet l'obtention de formulation fortement dosée en ciment et conduit à des

volumes de pâte importants, les bétons qui en découlent sont sous dosés en granulats, surdoses en liant et économiquement peu viable.

La méthode repose sur les concepts suivants

- Quantité de gravillons limitée à 50% de leur compacité (rapport entre le volume de grains le volume total du système grains + vides) afin de minimiser les risques de blocage.
- Volume de sable arbitraire de l'ordre de 40% du volume totale de mortier.
- Rapport $E/poudre(E/P)$ et dosage en superplastifiant optimisés à partir d'essais sur mortiers en effectuant des essais d'étalement au mini-cône et V-funnel, ces essais permettent de calculer deux paramètres :

$$\Gamma_m = \frac{(D)^2 - (D_0)^2}{(D_0)^2} \quad \text{Et} \quad R_m = \frac{10}{t} \quad \dots\dots\dots (I.1)$$

Où D est l'étalement, D_0 est le diamètre inférieur du cône et t est le temps d'écoulement du mortier. Certains auteurs montrent que pour un BAP acceptable il faut avoir : $\Gamma_m = 5$ et $R_m = 1$.

I.8.2. Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte

Le béton est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte, dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant, la formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage (figure I.9).

Des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton, cette méthode a été développée par Van Bui et Montgomery consiste à minimiser la quantité de la pâte tout en répondant simultanément à deux critères :

- Fluidité de la pâte : ce critère conduit à définir un volume minimal de la pâte décrit par L'équation suivante :

$$V_{p\grave{a}te\ mini} = 1 - \frac{1 - V_{vides}}{(\frac{e_{mini}}{D_{moyen}} + 1)^3} \quad \dots\dots\dots (I.2)$$

Où D_{moyen} est le diamètre moyen des granulats (mm), e_{mini} est la distance minimale entre les granulats nécessaires pour fluidifier le béton.

Introduction d'un volume limite de granulats, V_{bi} , de taille d_i , volume au-delà duquel, le béton ne s'écoule plus en milieu confiné.

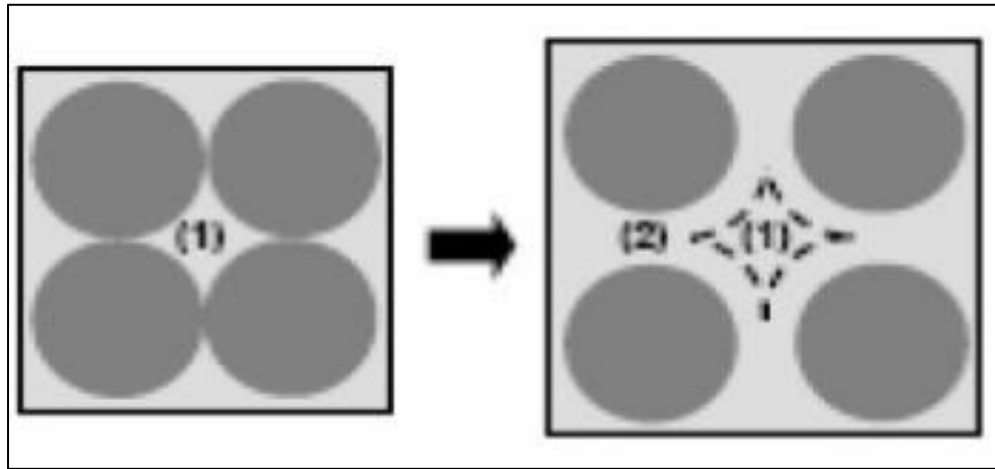


Figure I .9 : Notion d'excès de pâte : La pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2).

1.8.3. Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire

Cette méthode se base sur l'optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons, en considérant maintenant que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte, plus la quantité d'eau qui écarte les grains (2) est importante, plus la suspension est fluide, à quantité d'eau constante, si on minimise la porosité (1) de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange, sedran et de larrard [13] ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie), le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage, à l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton.

1.8.4. Méthode basée sur un plan d'expérience

Le principe de cette méthode est l'utilisation d'un plan d'expérience pour connaître l'effet des paramètres de composition du béton. khayat et al [14] ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de fines (C+A), le rapport massique eau sur fines $E/(C+A)$, la masse de superplastifiant et la masse d'agent de viscosité. Chaque facteur est varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions effectuées à 25. Au final, les modèles obtenus sont fournis avec les résultats des essais, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs.

1.8.5. Approche basée sur l'utilisation du mortier du béton équivalent MBE

Le principe de la méthode mortier de béton équivalent (MBE) est basé sur le fait qu'il existe une corrélation simple reliant les propriétés rhéologiques d'un béton au mortier qui le compose [15], cependant, le mortier qui joue un rôle sur la rhéologie du béton n'est pas directement le mortier déduit du béton, en effet, dans un béton, une partie de la pâte et des grains de sable adhère aux gravillons et ne participe pas à la rhéologie, le MBE et le nom donné au mortier qui participe à la rhéologie, il peut être obtenu expérimentalement en tamisant le béton frais au tamis de 5mm, la composition du MBE qui conduit aux mêmes propriétés rhéologiques que celle du mortier tamisé est déduite de celle du mortier du béton en corrigeant la quantité de sable de manière à ce que la surface granulaire du MBE soit la même que celle du béton.

1.9. Caractérisation BAP a l'état frais

Les bétons autoplaçants sont des matériaux encore relativement nouveaux au monde de construction, les caractéristiques les plus importantes pour la mise en œuvre du BAP sont la fluidité, la viscosité et la résistance envers la ségrégation, il existe de nombreux procédés pour effectuer le contrôle de ces propriétés sur béton frais, ils vont du complexe et coûteux rhéomètre à béton, jusqu'au simple cône servant à la mesure de l'étalement (Slump Flow).

En France, trois essais de caractérisation ont été préconisés en l'an 2000, pour l'association française de génie civil, ces recommandations sont devenues sur site les essais de références pour valider une formule de BAP, ces trois essais sont : l'essai d'étalement, l'essai à la boîte en L et, l'essai de stabilité au tamis.

1.9.1. Essai d'étalement

Pour la détermination de l'étalement (SLUMP FLOW) on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement, ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante (≥ 800 par 800 mm), puis il est rempli de BA, le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement, la valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue qui devrait être comprise entre 600 et 800 mm.

Pour l'association française de génie civil les valeurs ciblées d'étalement sont généralement fixées dans la fourchette 60 à 75 cm, il est possible aussi de mesurer le temps

d'écoulement du béton pour atteindre un étalement de 50 cm (noté T50) ce qui donne un indice sur la viscosité d'un mélange de béton.

Les figures suivantes représentent d'une façon claire l'essai de l'étalement :



Figure I.10 : Essai d'étalement pour mortier autoplaçant.

I.9.2. Essai de boîte en L

La boîte en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables, le mode opératoire est exprimé d'après l'[AFGC] comme suit : la partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litres), après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute, puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage, la distance libre entre les barres est de 39 mm., quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H1 et H2 et on exprime le résultat en termes de taux de remplissage $H2/H1$, lorsque le béton s'écoule mal à travers

Ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation.

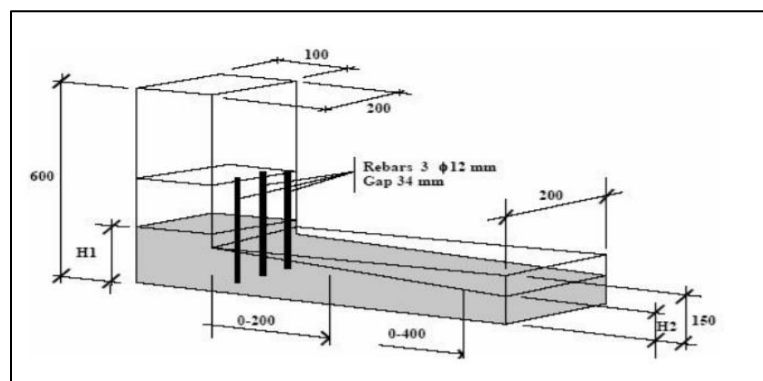


Figure I.11 : Représentation schématique de l'essai à la boîte en L.

I.9.3. Essai de stabilité au tamis

L'essai de stabilité au tamis vise à qualifier les BAP vis-à-vis du risque de ségrégation, il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un BAP en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier, cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité, la procédure de cet essai est la suivante ; À la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans un seau, après une attente de quinze minutes, un échantillon de 4,8 kg est versé du seau sur un tamis de maille 5 mm (Figure I.12), deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversée le tamis, le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon donne l'indice de ségrégation, la mesure de cet indice conduit à classer les formules de BAP de la façon suivante [17] : la mesure du pourcentage de laitance conduit à classer les formules de béton autoplaçants de la façon suivante : $0\% \leq \text{Plaitance} \leq 15\% \rightarrow$ stabilité satisfaisante $15\% \leq \text{Plaitance} \leq 30\% \rightarrow$ stabilité très mauvaise, ces critères sont particulièrement adaptés aux applications en éléments verticaux. [18]

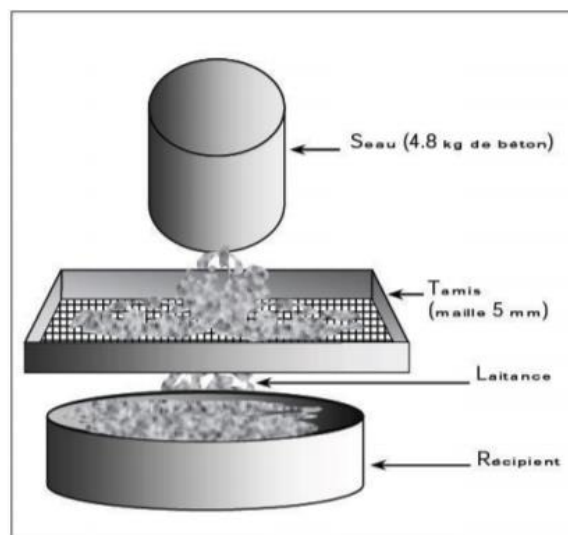


Figure I.12 : Représentation schématiques de l'essai de l'essai de stabilité au tamis.

I.10. Caractéristiques des BAP à l'état durci

I.10.1. Résistance à la compression

L'évolution des résistances à la compression des BAP semble être voisine de celle des bétons ordinaires en raison de l'utilisation fréquente de fillers calcaires connus pour avoir un effet accélérateur sur l'hydratation des silicates de calcium, aux très jeunes âges, les résistances des BAP peuvent être affectées lorsque ces bétons contiennent des quantités importantes de superplastifiants, un dosage trop élevé pouvant conduire à un retard de prise considérable.

Il est possible cependant d'atteindre des résistances mécaniques élevées au démoulage en optimisant le choix et le dosage en adjuvants, en fonction des propriétés pouzzolaniques des additions, les résistances mécaniques des BAP peuvent continuer à croître au-delà de 28 jours.

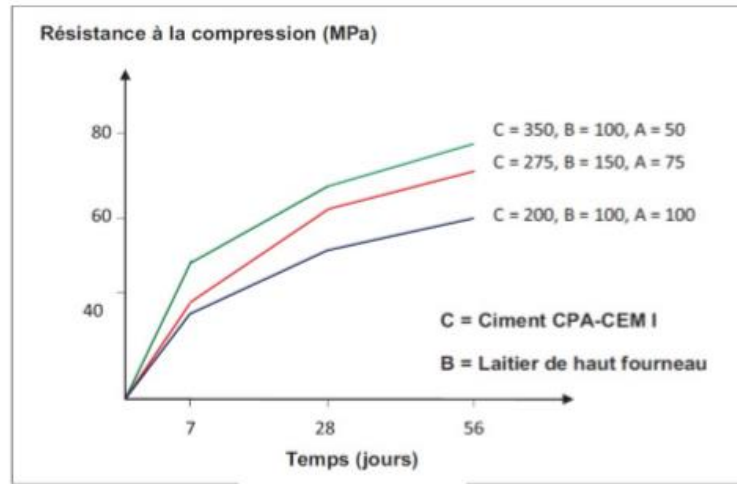


Figure I.13 : Variation des résistances mécaniques en compression de BAP en fonction de la composition du liant.

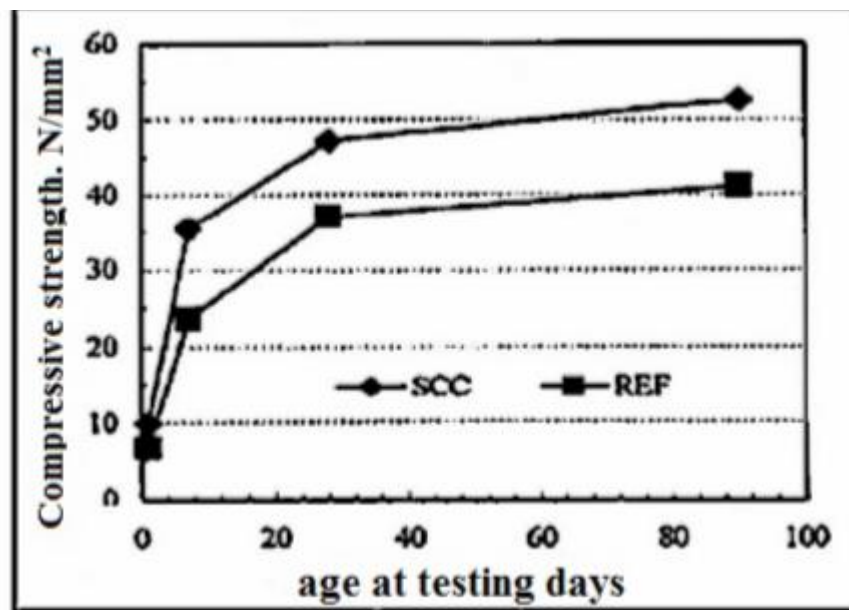


Figure I.14 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV correspondant.

I.10.2. Résistance à la traction

La particularité des BAP peut entraîner des variations de résistance, par exemple, la quantité de fines ou bien le volume de sable peuvent influencer la résistance en traction [17], ils montrent que l'augmentation de la quantité de sable ou/et volume de fines entraîne une élévation de la résistance en traction en effet, la résistance d'un béton à la traction est conditionnée par de

nombreux paramètres, on peut noter que la microstructure de la pâte cimentaire et la porosité de l'auréole de transition sont fréquemment utilisés dans la littérature pour expliquer les variations ou les résultats de résistance à la traction obtenus, pour certains auteurs [17], la porosité de l'auréole de transition des BAP est inférieure à celle des BV, donc, la résistance en traction des BAP est supérieure à celle des BV (de l'ordre de 10%), ces résultats sont repris par Pinaud [19], il suggère que la qualité de l'interface pâte granulats est meilleure dans les BAP et la faible proportion de granulats diminue le risque de propagation des premières fissures.

I.10.3. Module d'élasticité

Le module d'élasticité dépend à la fois des proportions et des modules des différentes phases constituant un béton or un BAP est composé d'un volume de pâte important et de ratio G/S plus faible qu'un BV, d'après différents codes (Eurocode ou DTU), le module d'élasticité est fonction de la résistance en compression des bétons. Donc, à résistance égale, un BAP devrait avoir le même module qu'un béton vibré. Or, [20] [21] ont montré que le module est similaire pour les BAP et les BV (figure I.15), [17] constatent que les modules des BAP sont très proches de ceux des BV, d'autres auteurs indiquent un module plus faible que ceux des bétons vibrés [18].

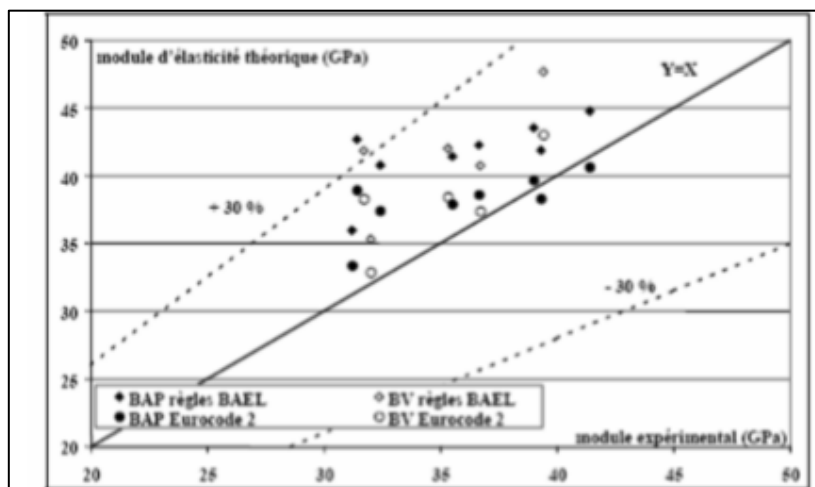


Figure I.15 : Comparaison des modules d'élasticité d'après les codes de construction de BAP et de béton vibré avec leurs valeurs expérimentales.

Comme pour la résistance à la compression, d'autres paramètres influencent le module d'élasticité, turcay et montrent une diminution du module des BAP avec l'augmentation du volume de pâte mais selon ces mêmes auteurs, l'influence du volume sur le module est négligeable. En effet, [19] observe des valeurs de déformations à la rupture très proches pour les BAP et les BV, parallèlement au volume de pâte, il est observé une diminution du module avec l'augmentation du

rapport E/L (résultat en accord avec la diminution de la résistance en compression et la diminution de la compacité de la matrice) [19].

I.10.4. Retrait

Le retrait se présente comme la réduction de volume liée au départ ou à la consommation d'eau au sein du béton non contraint extérieurement, il correspond à des variations dimensionnelles mettent en jeu des phénomènes physique avant, pendant ou après la prise des bétons, ces variations donnent lieu à l'apparition de fissures dans le béton.

Plusieurs types de retrait existe dès la fabrication du béton jusqu'à maturité on notera :

I.10.4.1. Retrait thermique

La réaction d'hydratation peut devenir fortement exothermique et provoquer de forts gradients de température, au cœur d'éléments massifs de structure, la température peut atteindre 50 à 70°C, par conséquent, des retraits différentiels d'origine thermique vont s'ajouter pour obtenir l'équilibre de l'élément avec les températures du milieu environnant la durée de la relation d'hydratation est relativement courte puisque 60% de l'hydratation (en rapport avec la quantité de ciment qui pourra réellement être hydratée de l'ordre de 60 à 70% du volume de ciment) est obtenue au bout d'un jour et, 90% au bout de 4 à 5 jours, par conséquent le retrait thermique est effectif à très court terme.

I.10.4.2. Retrait endogène

En ce qui concerne le retrait endogène, les BAP présentent des déformations comparables à celles des bétons vibrés, en effet, même si certains auteurs [16] attribuent aux BAP un retrait endogène inférieur ou égal à celui des bétons vibrés voir (figure I.16), d'autres contestent cette tendance et soutiennent l'idée de comportements différés équivalents pour les deux types de béton, l'évolution des réactions d'hydratation, à l'origine du retrait endogène, dépend de la quantité d'eau disponible dans le béton pour faire réagir les différents réactifs, par conséquent, l'amplitude de ce retrait chimique va être directement liée au rapport E/C (autrement dit à la résistance mécanique), le retrait endogène d'un béton sera d'autant plus fort que son rapport E/C sera faible (ou sa résistance en compression élevée), ce phénomène existe pour tout type de béton, en particulier les BAP qui ne se distinguent pas des bétons vibrés sur ce point, le plus, pour des bétons à faible rapport E/C, le retrait endogène des BAP est comparable à celui des bétons vibrés.

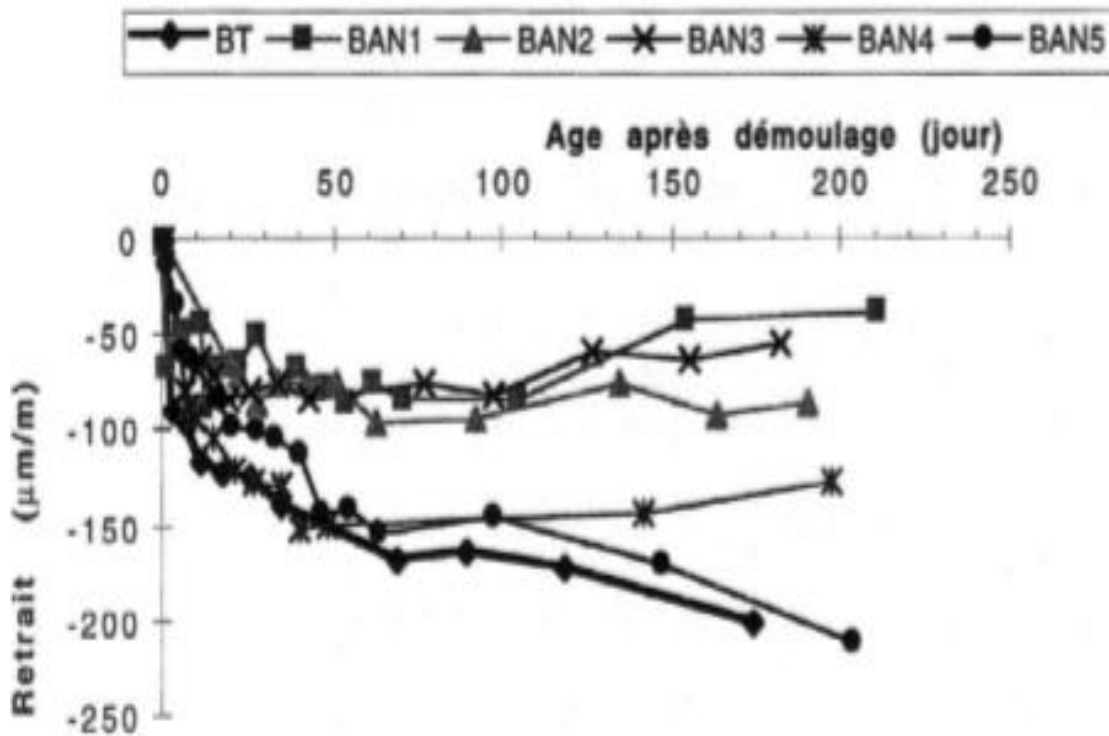


Figure I.16 : Comparaison des retraits endogènes d'un béton vibré et de cinq BAP.

I.10.4.3. Retrait plastique

Il est dû à l'évaporation de l'eau de la surface libre du béton frais après sa mise en place, il risque de fissurer cette surface, ce qui est défavorable pour la durabilité ; pour remédier à ce problème, une cure humide est indispensable [22].

Pour les déformations au jeune âge, autrement dit le retrait plastique, plusieurs travaux se sont attachés à les expliciter en étudiant notamment les différences potentielles de comportement entre BAP et béton vibré, les premiers auteurs observent des retraits plastiques deux à trois fois plus grands pour les BAP que pour les bétons vibrés voir (figure I.17), [11] (figure I.18), l'amplitude maximale du retrait plastique des BAP est environ cinq fois supérieure à celle des bétons vibrés.

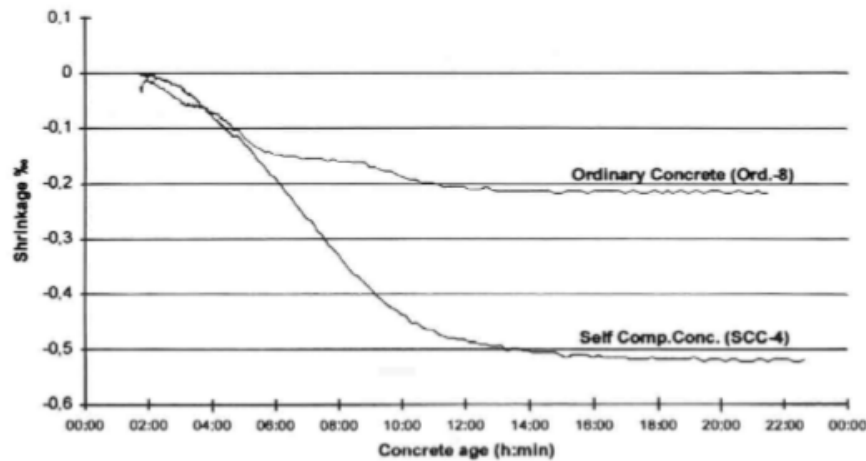


Figure I.17 : Retrait plastique de BAP et de béton vibré de structure. sstructure (T = 20°C, 50% HR).

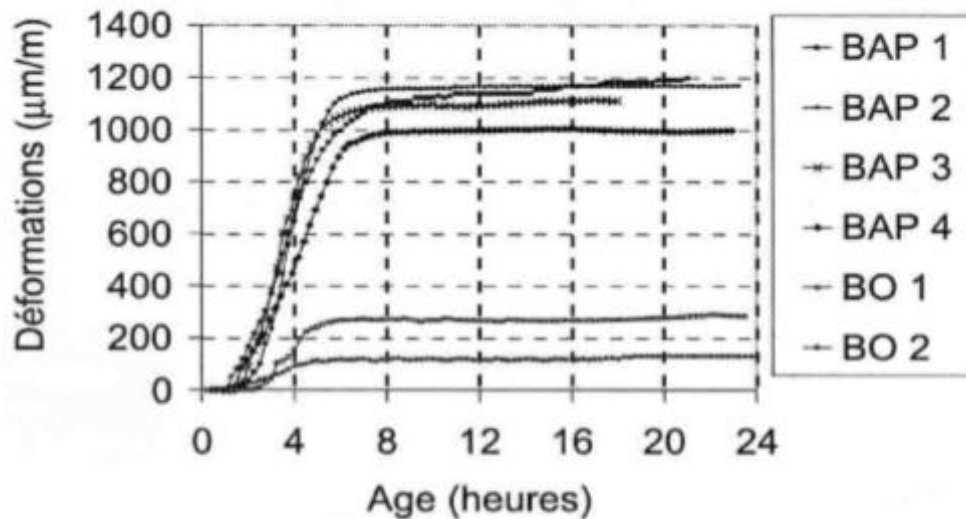


Figure I.18 : Retrait plastique des formules de BAP et de bétons vibrés dérivés.

I.10.4.4. Retrait de séchage (Dessiccation)

Les données de la littérature sur le retrait de dessiccation des BAP sont très contradictoires, certains auteurs trouvent des déformations pour ces bétons plus importantes que celles mesurées sur des bétons vibrés voir (figure I.19), ce retrait apparaît être d'autant plus faible que le rapport G/S des BAP est élevé.

D'autres auteurs annoncent des retraits équivalents pour les deux types de béton à résistance mécanique constante, d'après ces données, l'ordre de grandeur du retrait de dessiccation des BAP varie de 550 à 700 $\mu\text{m/m}$ (à 180 jours).

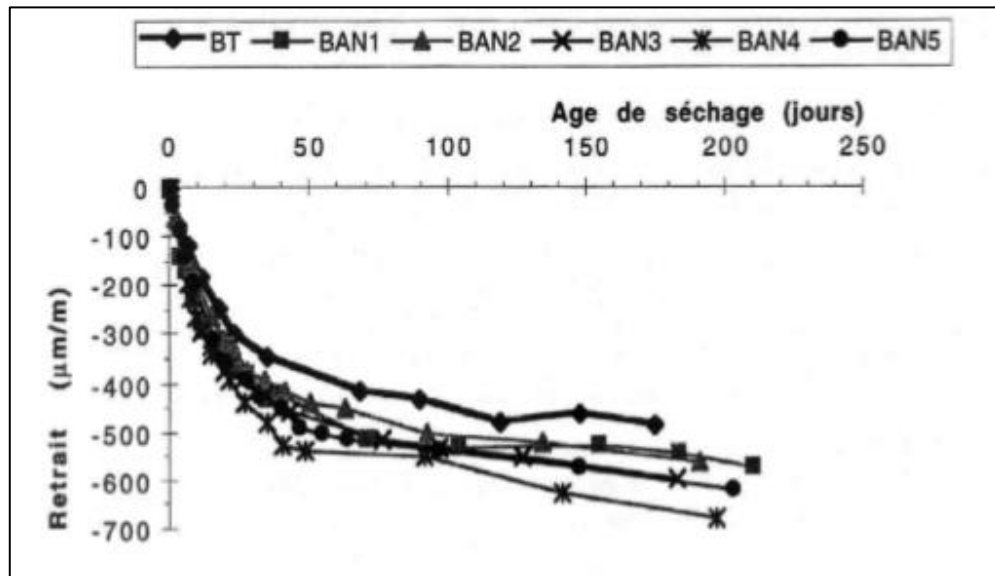


Figure I.19 : Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et de cinq BAP.

Enfin, d'autres auteurs observent des retraits de séchage des BAP moins importants voir (figure I.20) que ceux des bétons vibrés auxquels ils sont comparés (quantité de ciment et rapport E/C équivalents, volume de pâte différent), augmenter le volume de pâte pour une même quantité d'eau et diminuer le rapport E/L conduit à diminuer le retrait de séchage, comme expliqué précédemment, le retrait de dessiccation provient de l'évaporation de l'eau contenue dans les pores du béton vers le milieu extérieur, le dessèchement est d'autant plus fort que la quantité d'eau initiale dans le matériau est grande et les tensions créées par cette perte en eau s'amplifient également [21].

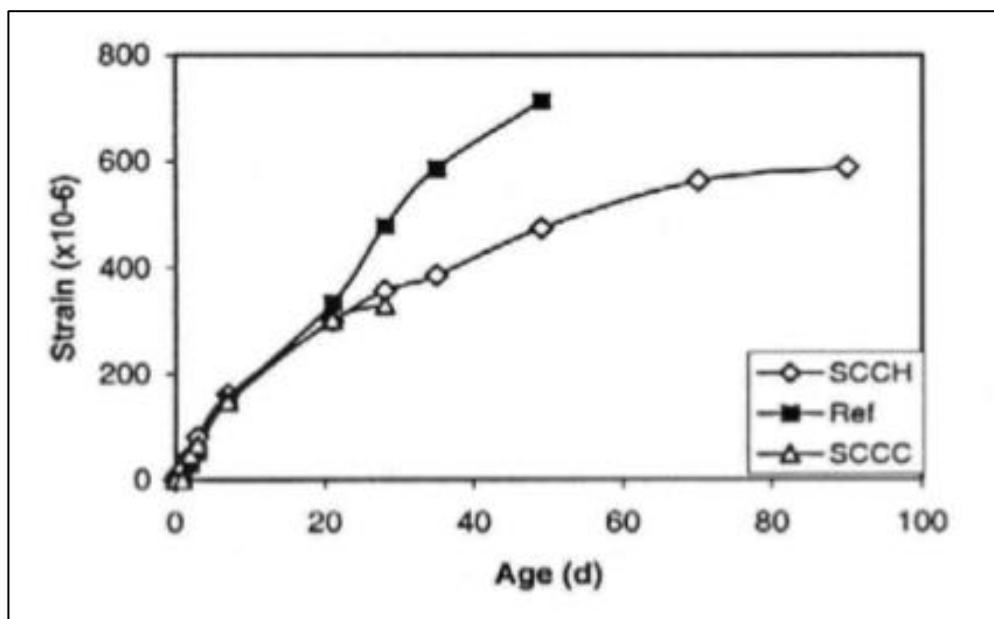


Figure I.20 : Retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré correspondant.

I.11. Comparaison entre le béton autoplaçant et le béton ordinaire

Ce sont ses propriétés à l'état frais qui distinguent essentiellement les bétons autoplaçant des BO et les BAP qui sont formulés différemment.

La formulation de ce type de bétons BAP n'est pas aussi simple que dans le cas des bétons ordinaires car il s'agit de concilier deux propriétés contradictoires : la fluidité et la stabilité, les BAP se caractérisent par une quantité de fines élevée et l'emploi de superplastifiant avec l'apparition d'une nouvelle famille d'adjuvants, appelés : rétenteurs d'eau ou agents de viscosité, entre également parfois dans leurs formulations, ces derniers vont donner de la viscosité à la pâte des BAP, pour lui conférer un certain nombre de propriétés qui visent à limiter la résistance à la ségrégation.

Les BAP se distinguent donc des bétons ordinaires, ou bétons à vibrer, par le fait qu'ils présentent un volume de pâte (ciment + sables + eau + adjuvant + fines) plus élevée que les bétons ordinaires.

La figure si dessous illustre les constituants d'un BAP et le béton ordinaire (figure I.22).

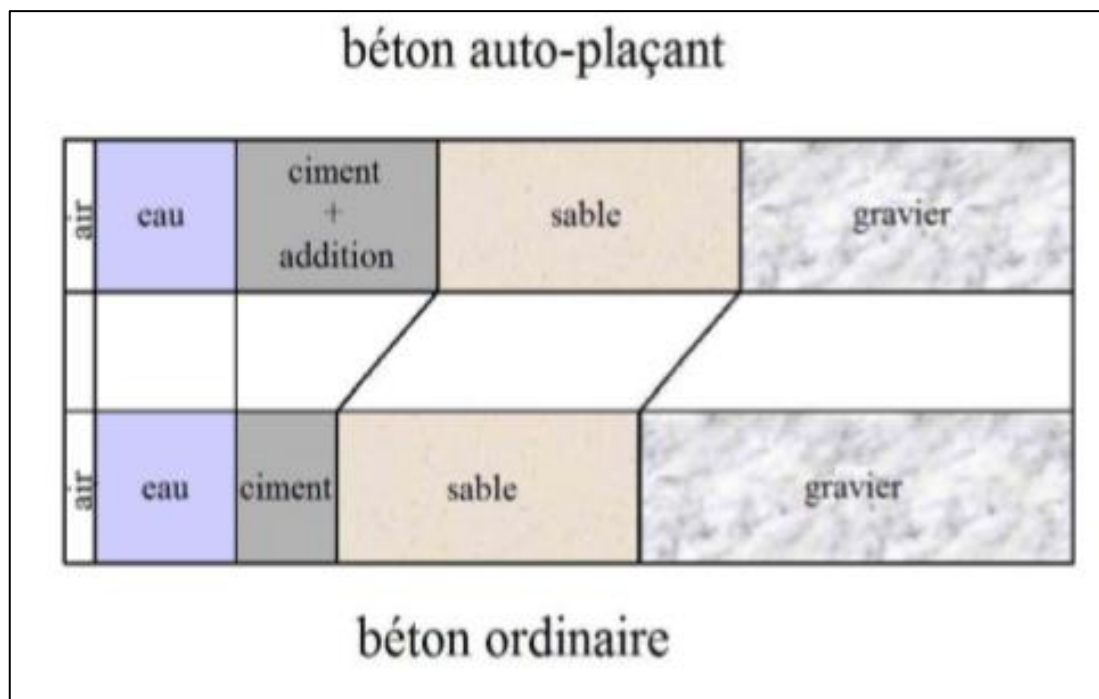


Figure I.21 : Composition d'un béton ordinaire et d'un BAP.

Chapitre II :

Dégradation et réparation des structures en béton armé.

II.1. Introduction

Les structures de génie civil réalisées en béton armé sont très concernées par les problèmes de dégradations, de vieillissements, de corrosions, d'agressions diverses ...etc. Ces structures étant « plus sensibles », il est indispensable de les protéger efficacement et d'assurer une inspection et un entretien régulier de ces structures.

En effet, les coûts de réparations de ces ouvrages sont en général très élevés et nécessitent souvent l'arrêt complet de l'exploitation pendant la phase de réhabilitation (les réservoirs et châteaux d'eau, les ponts, les bâtiments et complexes industriels, les aqueducs, etc....). La réparation de ces Ouvrages nécessitera la mise en œuvre des techniques particulières, telles que : renforcements de la structure par collage de matériaux composites (fibres de carbone, tissus imprégnés de résines spéciales thermodurcissables), injections, béton projeté, etc.... ou dans certains cas : modifications complètes de l'ouvrage, ..etc[24]. Dans ce chapitre, nous aborderons les causes de la dégradation de ces structures et les solutions possibles (matériaux et techniques.) pour leur réparation.

II.2. Causes générales de dégradation des structures en béton armé

Lorsque nous constatons une dégradation sur un ouvrage en service, il est actuellement difficile de dire si celle-ci est apparue pendant la construction, peu après, ou longtemps après. Or à l'analyse, il apparaît le plus souvent qu'une dégradation n'a pas une cause unique et qu'elle est favorisée par un grand nombre de paramètres, relatifs tout autant à la nature du matériau qu'à la conception de l'ouvrage ou à la technologie de son exécution [25]. Et l'une des principales causes de la dégradation des structures est résumée dans l'organigramme suivant :

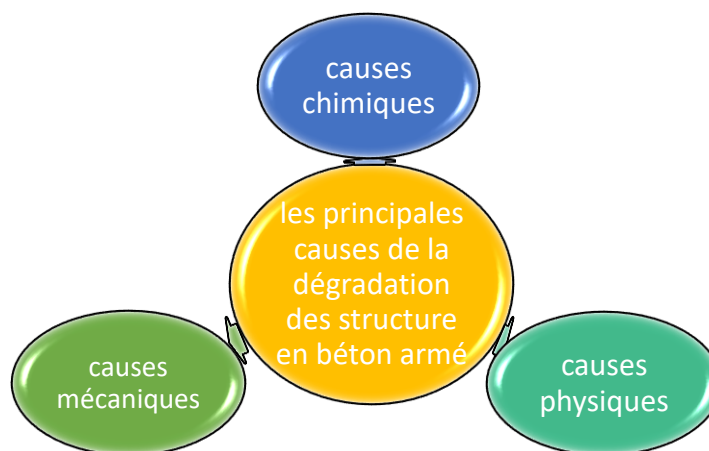


Figure II.1: les principales causes de la dégradation des structure en béton armé.

II.2.1. Causes mécaniques

Ces désordres se manifestent fréquemment par l'apparition de fissures, éventuellement aggravées par une déformation inacceptable de la structure. Lorsque des contraintes brusques, comme un impact ou une explosion, provoquent une dislocation plus ou moins importante du béton, le lien entre les dégâts et leur cause est généralement évident. Avant de procéder à des réparations, on s'assurera toutefois que d'autres mécanismes de dégradation actifs ne doivent pas être traités au cours des travaux.

Des désordres résultant d'une faible surcharge permanente ou d'un tassement des appuis sont en effet plus lents à se manifester, notamment en raison du fluage du béton. Outre une inspection in situ, une étude de stabilité sera nécessaire afin d'évaluer l'action d'une surcharge éventuelle [26].

II.2.1.1. Abrasion

Usure accompagnée d'une perte de matière consécutive au frottement d'un élément par un abrasif ou par le passage répétitif des piétons, véhicules et chariots industriels,...etc. L'abrasion du béton est essentiellement due à un manque de compacité du béton à la mise en œuvre. La fissuration de surface résulte d'un manque d'étanchéité au niveau des joints de coffrage ou de la reprise de bétonnage [27].



Figure II.2: Abrasion du béton.

II.2.1.2. chocs

Le béton éclate sous l'effet de chocs produits par des engins de transport ou de levage, [27].
Exemples : piles de pont, ... (Figure II.3)



Figure II.3 : Choc sur une glissière de sécurité et une pile de pont.

II.2.1.3. surcharges

Il s'agit d'ouvrages ayant supporté des charges trop importantes qui ont entraîné des fissurations et des éclatements du béton [27].



Figure II.4 : Fissuration et éclatement du béton sous charges trop importantes.

II.2.1.4. Tassement

On trouve aussi le tassement localisé des surfaces de coulage causé par la présence d'armature dans le béton engendrant ainsi des vides ou des fissures au voisinage de ces armatures. Une augmentation du diamètre ou un mauvais compactage favorisera l'apparition des fissures [28].

II.2.2. Causes physiques

D'un point de vue physique il est important de noter que le béton est un matériau hydraulique et poreux et qu'à ce titre, il est sujet à un certain nombre de phénomènes qui sont basés sur le comportement de l'eau en son sein et sur les échanges d'eau avec le milieu extérieur [27].

II.2.2.1. Retrait

Le retrait est en effet un phénomène physico-chimique qui existe de façon systématique au sein d'un béton et qui se développe sous diverses formes depuis la prise du béton jusqu'à son vieillissement. Le symptôme caractéristique de l'action du retrait sur un ouvrage est la fissuration qui peut être soit orientée, soit multidirectionnelle [27].

II.2.2.2. Ressuage

Le ressuage correspond à l'exsudation superficielle d'une partie de l'eau de gâchage à la face supérieure du béton frais. Il peut aussi se manifester en dessous des barres d'armature horizontales situées au voisinage de la face supérieure. Ces barres constituent des points fixes qui gênent le tassement, ce qui engendre la création des fissures qui pénètrent jusqu'au lit d'armatures [29].

Dans l'exemple suivant, on constate qu'une partie de l'eau de gâchage s'est accumulée à la surface d'une dalle en béton fraîchement coulée (Figure II.5).



Figure II.5: Ressuage du béton après vibration.

II.2.2.3. Cycles gel- dégel

Le gel dans l'eau en circulation à l'intérieur de la structure ou dans des fissures déjà existantes à la suite d'une chute de la température va être accompagné par une augmentation du volume de l'eau. La pression qui en résulte conduit à la dégradation du béton. La dégradation du béton dû au gel-dégel se rencontre principalement dans les régions froides. Elles se produisent notamment sur les parties non protégées par un revêtement étanche, et sont amplifiées par les utilisations de sel antiverglas. Les symptômes les plus courants sont l'écaillage présent à la surface de la structure (Figure. II.6), et le gonflement de tout ou une

partie de la structure accompagné le plus souvent d'une fissuration en réseau. A l'état ultime, il se produit parfois une désagrégation complète du matériau [28].



Figure II.6 : Exemple de dommages causé par le gel-dégel.

II.2.3. Causes chimiques

Les armatures en acier sont naturellement protégées par le béton qui libère une solution basique ($\text{pH} > 13$). L'acier des bétons armés est passif, cependant plusieurs agents peuvent s'attaquer à cette protection de fait et provoquer des fissurations du béton et un risque potentiel de détérioration des armatures[27].

II.2.3.1. Alkali-réaction

L'alkali-réaction, que l'on appelle aussi communément réaction alkali-granulat, désigne la réaction chimique entre la silice mal cristallisée contenue dans les granulats réactifs et certains ions de la solution interstitielle. Les conséquences macroscopiques de la réaction sont le gonflement des ouvrages atteints qui entraînent de la fissuration et la chute des caractéristiques mécaniques du béton. Ces phénomènes sont préoccupants pour les gestionnaires des structures atteintes car ils mettent en péril la sécurité des personnes et l'exploitation des ouvrages[27].

Cette réaction se produit entre la solution interstitielle du béton, riche en alcalin, et certains granulats lorsqu'ils sont placés dans un environnement humide. Des gels gonflants apparaissent en développant des micros faïençages et un éclatement du béton (Figure II.7).



Figure II.7: Exemple de béton dégradé par l'alcali-réaction.

II.2.3.2. Action des sulfates

Les sulfates proviennent essentiellement du milieu extérieur. Ils sont présentent un risque majeur d'agression chimique pour le béton. Ces sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollution domestique ou industrielle. La dégradation par les ions sulfates se traduit par une expansion, par exemple le sulfate de magnésium contenu dans l'eau salée qui comporter également des sels de type chlorure de sodium, Chlorure de magnésium, sulfate de calcium..., sont les plus nuisibles parmi ces sels. Ils réagissent avec la chaux hydratée pour donner du gypse, Par ailleurs, son action sur les aluminates du ciment se traduit par la formation d'ettringite. L'expansion due à la cristallisation de l'eau de mer jusqu'aux armatures. L'ettringite, le gypse, Ces composés provoquent le gonflement du béton créant en son sein des tensions qui engendrent des fissurations [27].

II.2.3.3. Corrosion des armatures

Les armatures sont généralement placées à une dizaine de centimètres de la surface. Si les armatures entrent en contact avec l'air ou l'eau, différentes réactions chimiques se produisent au voisinage de ces armatures. Le volume d'oxyde produit par la corrosion est, environ, huit fois celui du métal duquel il est issu, ce qui provoque des fissures et des épaufrures [Les dommages dus à la corrosion se manifestent par des expansions qui conduisent à la formation des fissures qui provoquent éventuellement du couvret du béton. (Figure. II.8)

-Perte de l'adhérence des barres et la diminution de leur diamètre effectif, qui engendrent une perte de capacité en traction.

-Un éclatement de béton, car la rouille résulte de la formation de produits fortement gonflants qui dépendent de l'état de l'oxydation dont le volume peut être jusqu'à six fois supérieures au volume initial.

- Perte de section des barres d'acier [28].



Eclats en formation



Poutre support de réservoir



Pile de pont

Figure. II.8: Différents types de dégradations.

II.2.4. 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 détecter 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. Des fissures correspondant à un schéma non prévu constituent, aussi, une indication de fonctionnement anormal. La plupart du temps les fissures résultent d'une insuffisance consécutive à des oublis ou à des impasses au niveau des études, parfois aussi d'un manque de coordination entre le bureau d'études et le chantier [30] [31].

II.2.4.1. Fissures de perte d'adhérence

Des fissures longitudinales le long d'une barre (Figure II.9), si elles sont provoquées par une mise en traction de cette barre, révèlent une rupture d'adhérence, qui peut être due, par exemple, à un recouvrement insuffisant; ces fissures constituent un danger grave de corrosion et correspondent à un fonctionnement défectueux.

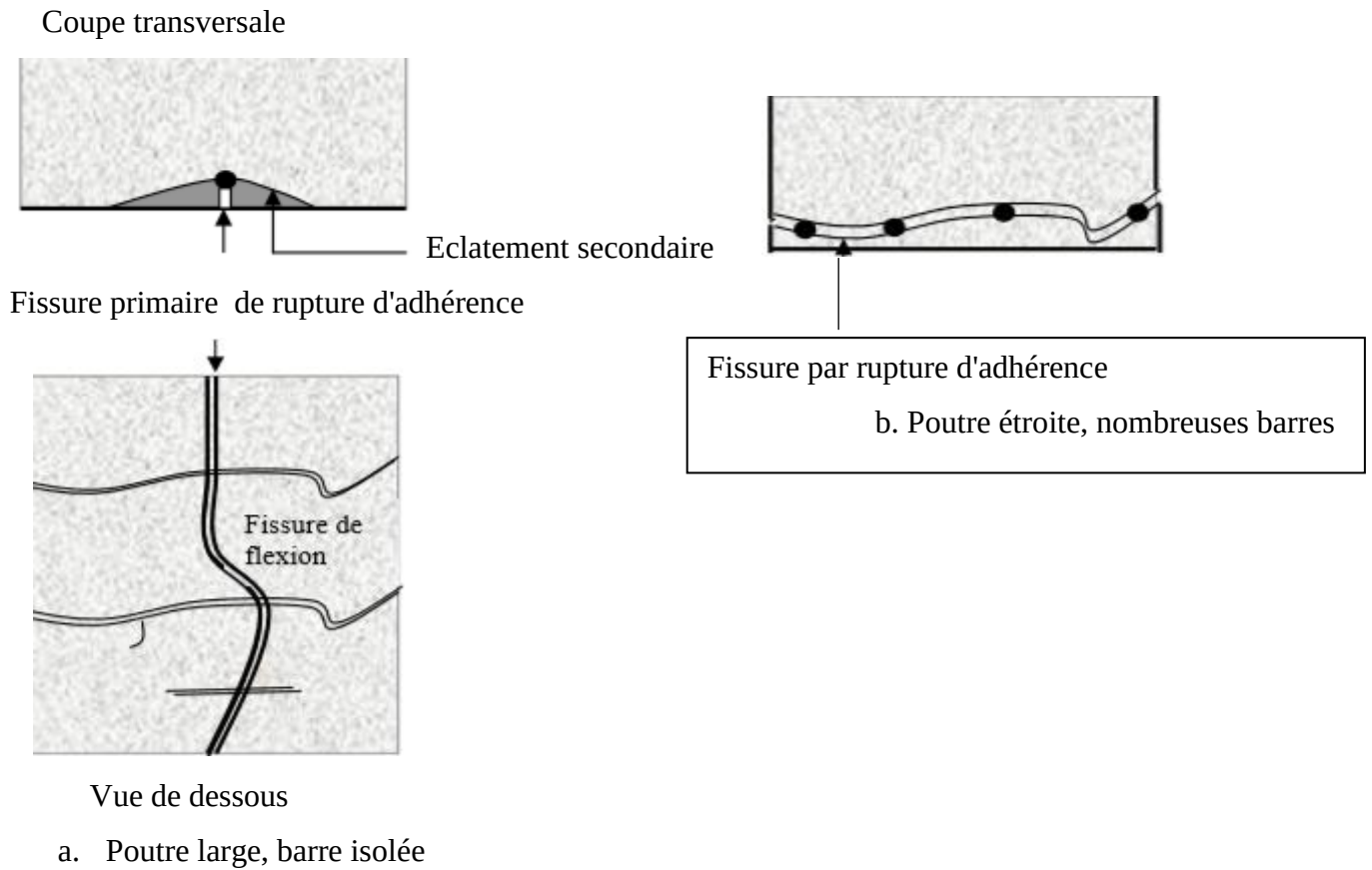


Figure II.9 : Fissures de perte d'adhérence .

II.2.4.2. Fissures typiques des corbeaux

Dans le cas d'une charge localisée P appliquée à faibles distance du nez de la console, il existe un risque de fissuration presque à la verticale (Figure II.10). On constate que la stabilité du nez de la console dépend de la position correcte d'armatures , qui est fonction du rayon de courbure [31]. Il est donc conseillé de compléter le ferrailage principal par des aciers en forme de boucle, de faible diamètre, et disposés à plat (Figure II.11).

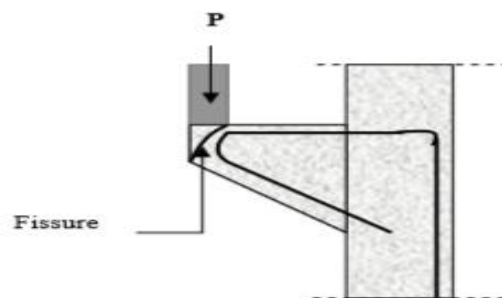


Figure II.10 : Fissure à l'extrémité du corbeau.

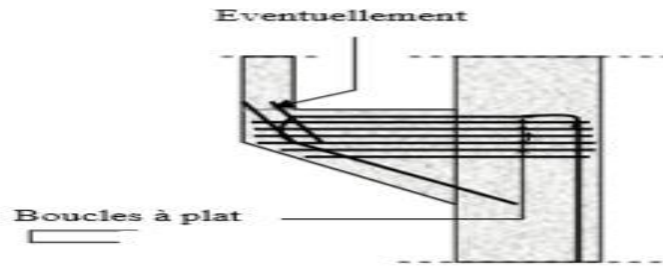


Figure II.11 : Disposition de ferrailage pour éviter la dégradation du corbeau.

II.2.4.3. Fissures d'éclatement dans les zones de béton comprimé

Un cas particulier intéressant de correspondance entre la fissuration et l'état limite ultime est la formation de fissures d'éclatement de béton dans une zone comprimée. C'est le signe de l'épuisement de la résistance en compression du béton et donc, si la charge est maintenue, d'un risque immédiat d'effondrement s'il s'agit d'un poteau uniformément comprimé ou de la face comprimée d'une poutre fléchie [31].

II.2.4.4. Fissures en tête des poteaux servant d'appuis aux poutres préfabriquées

Ces désordres ont pour cause les moments produits par les gradients thermiques, ignorés ou sous-estimés dans les justifications. La différence de température entre le dessus et le dessous du plancher entraîne un allongement différentiel qui tend à " bomber " la poutre côté chaud (terrasse). Dans le cas des poutres continues, cette déformation, bloquée par le clavetage, donne naissance à des moments positifs générant des tractions très importantes au droit des appuis des poutres sur les poteaux avec le risque d'une fissuration de la tête du poteau et du clavetage (Figure II.12) Pour éviter cette fissuration [31], il faut poser les poutres sur un bain de mortier de manière à éviter tout point dur pouvant produire des épaufrures au droit des poteaux,

- Prévoir une isolation en partie supérieure de la dalle,
- Disposer des armatures pour assurer la continuité des poutres et renforcer la tête des poteaux (Figure II.13).

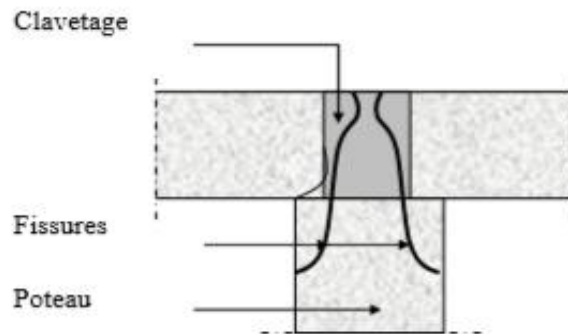


Figure II.12 : Fissures en tête de poteau servant d'appui aux poutres préfabriquées.

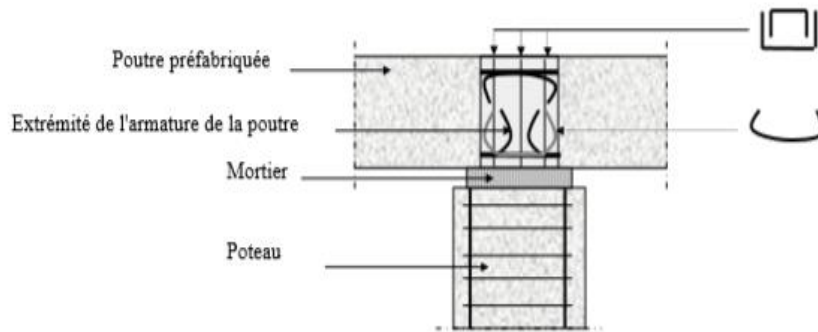


Figure II.13 : Détail des armatures.

II.2.5. Autres causes de dégradation des bétons

Nous avons vu que les bétons se dégradent à cause des milieux dans lesquels ils sont placés car ils y subissent des agressions physiques et chimiques. Certaines causes, essentiellement dues à une mauvaise mise en œuvre, peuvent également participer à la dégradation des bétons [32].

II.2.5.1. Mauvais positionnement des armatures

Les armatures (généralement en acier) placées trop près du parement béton lors du coulage provoquent à terme des fissurations de surface [33].

II.2.5.2. Mauvaise qualité des bétons employés

Un béton trop faiblement dosé en ciment, mal vibré, présentera un aspect défectueux : nids d'abeilles, faïençage, fissures superficielles, trous laissant les armatures apparentes.

II.2.5.3. Vibration trop importante

Une vibration trop longue peut entraîner une ségrégation du béton et par conséquent une mauvaise répartition des constituants. Les efforts mal répartis entraînent alors des fissurations et des élancements du béton.

II.2.5.4. Absence de cure du béton

La cure du béton est indispensable par temps chaud venté. Sans protection de surface, le béton se fâence en surface.

II.2.5.5. Cycles humidité / sécheresse

Les cycles répétés d'humidité/sécheresse entraînent des variations dimensionnelles du béton pouvant créer des fissures et par conséquent la corrosion des aciers [27].

II.3. Réparation des structures en beton armé

Dans le secteur du bâtiment, il existe plusieurs interventions de réhabilitation, de maintenance, de réparation et de renforcement, correspondant à des métiers différents, et ces interventions prennent la forme des matériaux et techniques de réparation, que nous mentionnerons comme suit;

II.3.1. Techniques de réparation

Pour réparer un ouvrage en béton, on peut procéder soit par simple ragréage, lorsqu'il ne s'agit que de réparer des épaufrures (ou éclats superficiels de faible importance), soit en faisant une véritable restructuration, lorsqu'il faut reconstituer un volume de béton, souvent armé, qui participe à la résistance de l'ouvrage [25].

II.3.1.1. Chemisage

a)- chemisage en béton armé

consiste en une augmentation considérable des sections par la mise en œuvre d'un ferrailage additionnel à l'ancien élément et d'un nouveau béton d'enrobage pour favoriser l'accrochage, ce dernier sera mis en œuvre après la confection du coffrage [34].

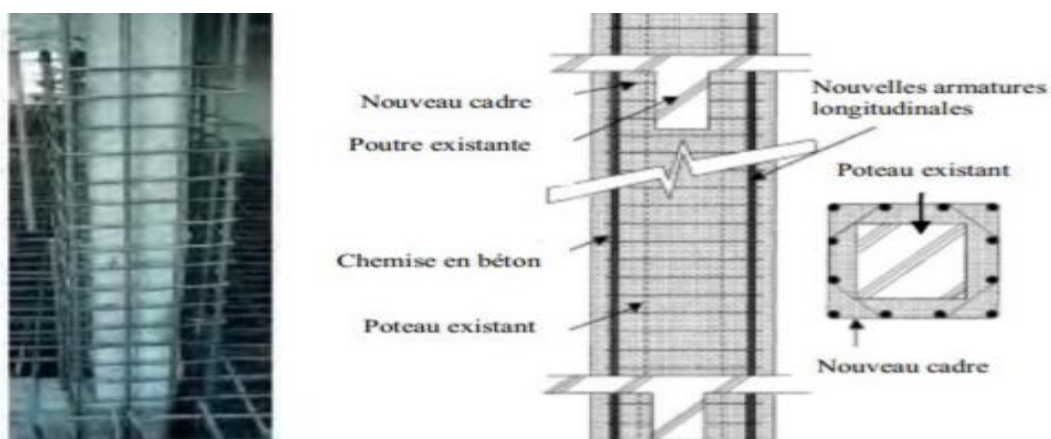


Figure II.14 : Chemisage d'un poteau .

Les chemisages en béton armé sont appliqués sur le périmètre des poteaux et des murs, qui est le cas idéal, ou parfois d'un ou plusieurs côtés (Figure. II.15) selon les besoins suivants :

- *Augmentation de la portance,
- *Augmentation de la résistance en flexion et/ou au cisaillement,
- *Augmentation de la capacité de déformation,
- *Amélioration de la résistance des jonctions par recouvrement défailantes.

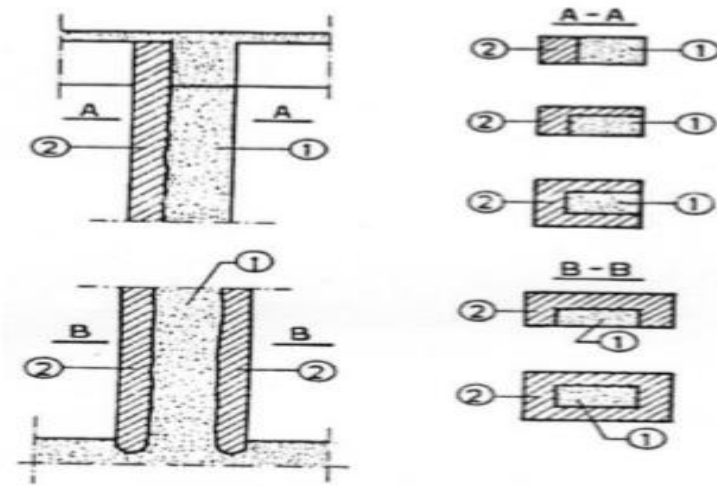


Figure II.15 : Différents arrangements de chemisages des poteaux en BA

(1)- Poteau existant

(2)- La façon de chemisage.

Il convient que l'épaisseur des chemisages permette de disposer à la fois des armatures longitudinales et transversales avec un enrobage adéquat. Lorsque les chemisages ont pour objectif d'augmenter la résistance en flexion, il convient de prolonger les barres longitudinales jusqu'à l'étage contigu par l'intermédiaire de percées dans la dalle, tandis qu'il convient de disposer des épingles horizontales au niveau des nœuds par le truchement de trous horizontaux percés dans les poutres. Les épingles ne sont pas nécessaires dans le cas de nœuds intérieurs entièrement confinés.

Lorsque seule une augmentation de capacité de résistance et de déformation vis-à-vis de l'effort tranchant est à considérer, éventuellement avec une amélioration de la jonction par recouvrement, il convient que l'extrémité des chemisages (à la fois le béton et les armatures) préserve un espace par rapport à la dalle de l'ordre de 10 mm. Dans les cas habituel de chemisages sur la périmètre, l'action composée de l'ancien et le nouveau béton est parfois assuré seulement par la liaison naturel des deux matériaux, qui peuvent être renforcés avec la rugosité de l'ancien surface, et parfois ils sont renforcés en soudant quelques barres repliées vers le haut entre les armatures longitudinales existant et le nouveau (Figure II.16). Ce raccordement est nécessaire

quand le poteau est détérioré complètement ou quand sa hauteur est trop grande, dans ce cas il y a un danger de flambement des nouvelles armatures longitudinales. Cependant, les essais en laboratoire ont prouvé que, en général, le degré d'action composée obtenu est très satisfaisant même avec le transfert de la force de renforcement en soudant les armatures longitudinales .

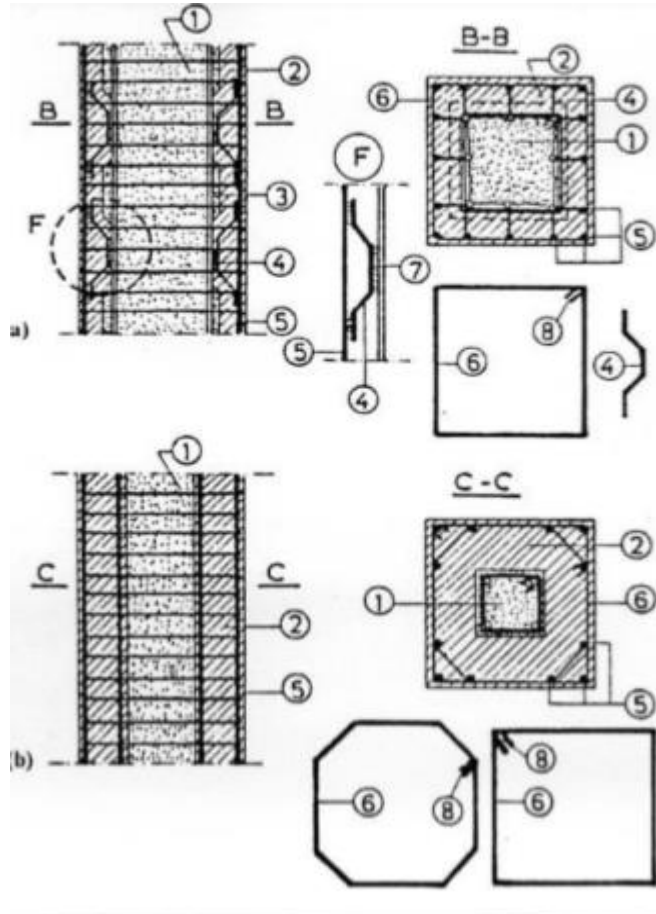


Figure II .16 : connections de l'ancienne et les nouvelles armatures de chemisages.

b)- Chemisage en acier

Les chemisages en acier sont appliqués principalement aux poteaux afin d'augmenter leur résistance à l'effort tranchant et d'améliorer la résistance des jonctions par recouvrement insuffisantes. Ils peuvent également être considérés comme contribuant à l'augmentation de la ductilité par le confinement qu'ils apportent. Les chemisages en acier disposés autour des poteaux rectangulaires sont généralement constitués de quatre cornières auxquelles sont soudées soit des plaques en acier continues, soit des bandes d'acier horizontales discontinues plus épaisses. Les cornières peuvent être collées au béton par l'intermédiaire d'un liant époxydique ou peuvent y être plaquées, sans aucun espace sur toute leur hauteur. Les bandes peuvent être soumises à un traitement thermique préalable au soudage, afin d'assurer par la suite un certain confinement positif sur le poteau [35].



Figure II.17 : Chemisage en acier.

II.3.1.2. Ragréage

Le ragréage est la technique traditionnelle de réparation des bétons. Il permet de reconstituer les sections d'armatures qui ont disparues, de stopper le phénomène de corrosion des aciers par passivation et de protéger les armatures par reconstitution manuelle ou mécanique de l'enrobage à l'aide de mortier de réparation. La technique de réparation du béton consiste à :

- Éliminer les zones de faible cohésion ;
- Dégager l'armature corrodée jusqu'à une zone où celle-ci est saine;
- Nettoyer l'armature;
- Remplacer l'armature si la perte de section est trop forte;
- Passiver les armatures corrodées par application de produit;
- Reconstituer manuellement l'enrobage de béton à l'aide de mortier de réparation;
- Mise en place d'une protection de surface.

Il est nécessaire de bien dégager toutes les armatures corrodées et de les passiver sur la totalité de la corrosion sous peine de corrosion rapide des aciers sains et non passivés [36].

a)-Ragréage – Application manuelle

La mise en place des mortiers est réalisée classiquement à la truelle en serrant fortement pour éviter les bulles d'air et obtenir ainsi une bonne adhérence.

Pour le dressage des arêtes, une règle peut être utilisée [37].



Figure II.18: Application manuelle de mortier.

b)-Ragréage – Bétonnage en place

Coulage ou injection de béton ou mortier Pour des volumes de béton importants ou des épaisseurs de béton d'au moins 5 à 10 cm :

- pour le coulage, possibilité de connexions avec le support ;
- ajustement nécessaire des coffrages,
- éviter l'emprisonnement d'air [37].

II.3.1.3. Injection

Il s'agit d'un autre système de réparation de fissures et de brèches passives, applicable à des murs en maçonnerie appareillée ou en brique, qui consiste à introduire un liquide sous pression pour colmater entièrement le vide entre les lèvres de la fissure. En durcissant et en adhérant au support, ce liquide restitue à l'élément endommagé sa continuité d'origine. Les caractéristiques du liquide généralement à base de composants époxydiques et la pression d'injection varient en fonction des matériaux du mur et de la taille du trou à reboucher [38].



Figure II.19 : Réparation d'une fissure à l'aide d'une injection.

Les travaux d'injection permettent :

- l'amélioration des caractéristiques mécaniques et physiques du matériau constitutif de l'ouvrage et du sol à proximité immédiate de l'extrados ;
- le rétablissement de la liaison de l'ouvrage avec le terrain ;
- l'amélioration de l'étanchéité [39].

II.3.1.4. Technique de projection (béton projeté)

Lorsque la surface dégradée est importante, on peut employer la technique du béton projeté (par exemple, pour réparer un bâtiment après un incendie). Cette technique consiste à projeter du béton convenablement dosé sur un support préalablement sablé. Sous l'effet de sa vitesse de projection et des accélérateurs de prise, ou raidisseurs, qui y sont inclus, le béton s'accroche très solidement sur le support et forme avec lui une structure homogène. La technique du béton projeté est compétitive dès lors que la surface de béton à traiter est suffisamment importante, ce qui permettra d'amortir le coût de la mise en œuvre du matériel. Son application nécessite de disposer

d'une distance de recul de 1m par rapport à la surface à traiter pour pouvoir intervenir soit horizontalement, soit verticalement, et d'une emprise de 100 mètres carrés environ, dans un rayon de moins de 700 mètres du lieu d'intervention, afin d'y installer le compresseur, et y stocker et mélanger les matériaux à projeter. La mise en œuvre est souvent réalisée par voie sèche, ce qui permet une bonne adhérence de la couche rapportée sur le support ,Il existe principalement deux techniques de projection du béton qui sont illustrées dans la (Figure II.20) [25].

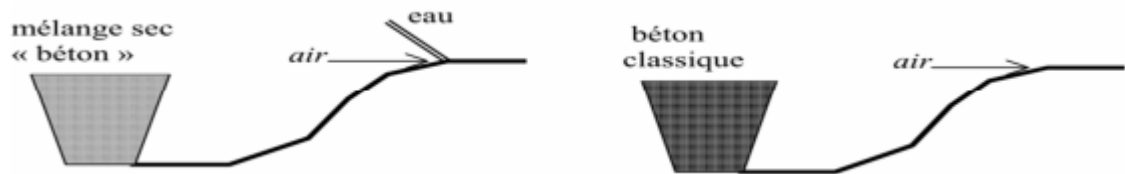


Figure II.20 : Béton projeté par voie sèche et par voie humide.

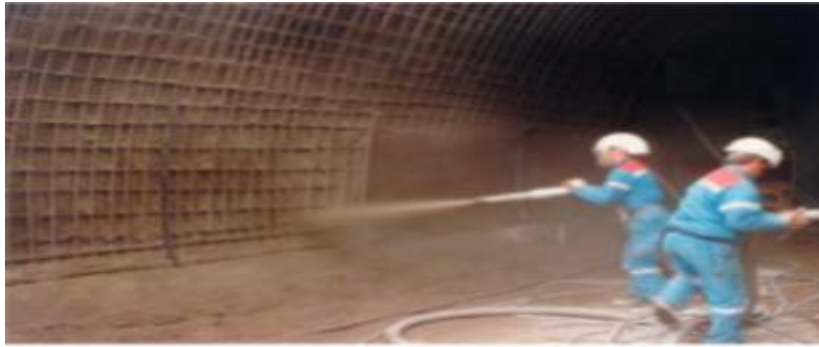


Figure II.21 :Projection de béton.

II.3.2. Matériaux de la réparation

La recherche de nouveaux procédés de restructuration afin de réduire les coûts de réparation, amène à réfléchir sur l'application des méthodes et des matériaux ponctuels de réhabilitation. [33]. L'objectif du renforcement par des nouvelles matériaux (mortier fibré haute performance et matériaux composites) est de rendre à l'ouvrage existant son état structurel initial et d'accroître sa capacité, et parmi les matériaux de réparation les plus couramment utilisés ; nous constituons le malaxage, la mise en œuvre et la cure [40], parmi ces matériaux sont :

II.3.2.1. Mortiers de réparation

La norme EN 1504 définit deux catégories de mortiers de réparation : mortier de réparation structurale et non structurale. Pour les mortiers non structuraux, ils sont appliqués sur une surface de béton pour restituer l'aspect géométrique ou esthétique de la structure. Pour les mortiers structuraux, ils sont appliqués à une structure en béton pour remplacer le béton défectueux et pour

restituer à la structure son intégrité et sa durabilité. Les mortiers de réparation peuvent être classés en deux familles selon leurs compositions, à savoir des mortiers à base de liant hydraulique et mortiers à base de liants hydrauliques modifiés par des polymères. Ces derniers peuvent modifier et améliorer les propriétés mécaniques, physiques et de durabilité du matériau [24] ; et il y a des plusieurs types des mortiers de réparation sont :

a)-Mortier autoplaçant

Le mortier autoplaçant est un alternative économique au coulis de ciment en plus d'offrir une stabilité volumétrique supérieure. Ce produit est de très grande fluidité, il est composé de ciment, eau, de sable, et d'adjuvants spécialisés ; le mortier autoplaçant (MAP) peut être pompé pour être mis en place. Le mortier autoplaçant est habituellement utilisé pour remplir des conduites, des tunnels, réservoirs souterrains, des espaces vides ou des zones désaffectées. Le mortier autoplaçant peut être injecté pendant 2 heures sur des distances allant jusqu'à 100 mètres (maximum 3 heures). Et aussi le mortier autoplaçant (MAP) se caractérise par des propriétés physiques et mécaniques présentées dans le tableau suivant : [41].

Tableau II.1: Caractéristiques des mortiers autoplaçant

La masse volumique (kg/m ³)	2100
Rc à 7 jrs (MPa)	≥2
Rc à 28 jrs (MPa)	35
L'étalement (cm)	30

b)-Mortiers à base de ciment modifiés ou non par des polymères

Les mortiers et bétons ordinaires à base de ciment Portland (CC), d'eau et de granulats sont très souvent utilisés comme matériaux de réparation. Suivant les besoins du projet et spécificités de l'ouvrage à réparer, on utilisera des adjuvants (fluidifiants, agents viscosants, entraîneurs d'air, accélérateurs / retardateurs de prise, inhibiteurs de corrosion, réducteurs de retrait, etc.) et ajouts cimentaires (fillers calcaires, fumée de silice, cendres volantes, laitiers de haut-fourneau, pouzzolanes naturelles) pour obtenir ou améliorer certaines propriétés. Dans tous les cas, les bétons et mortiers doivent être conçus de manière à en maximiser la compatibilité avec le béton d'origine. Dans les mortiers et bétons à base de ciment modifiés par des polymères (PCC), ces derniers sont

normalement ajoutés au ciment à raison de 0,05 à 0,20 kg de polymère pur par kilogramme de ciment et cette quantité est généralement spécifiée par le rapport P/C :

$$P/C = \text{masse de polymère} / \text{masse de ciment} [42].$$

Il existe un grand nombre d'additifs polymériques, que l'on peut classer en trois catégories : latex, résines liquides et polymères solubles dans l'eau. Les latex sont de loin les plus utilisés c'est la raison pour laquelle nous développerons surtout leur description ci-après.

♣ Mortiers de ciment de polymères – latex

Les latex sont les adjuvants polymères les plus répandus pour les bétons (Figure II.22). Ils sont constitués d'une dispersion de particules de polymère dans de l'eau. L'emploi le plus commun des additifs latex pour mortier de réparation est le resurfaçage d'éléments en béton (Figure II.23), notamment les revêtements de tabliers, dalles routières et sols industriels. L'adjonction du latex se fait sur place dans le mixer. Il est préférable de mélanger d'abord le ciment et le sable et d'ajouter ensuite l'eau et le latex. Les propriétés du mélange frais varieront de manière importante en fonction de l'ordre dans lequel le latex et l'eau seront introduits. Si le latex est introduit avant l'eau, le mélange sera moins ouvrable que dans le cas contraire. Cet effet est probablement dû au fait que le latex développe des caractéristiques thixotropes s'il est séché de manière brutale par absorption dans un matériau sec. Il est dès lors recommandé d'ajouter successivement l'eau, puis le latex. Comme noté précédemment, l'eau contenue dans le latex doit être prise en compte dans le calcul de la quantité d'eau de gâchage [42].

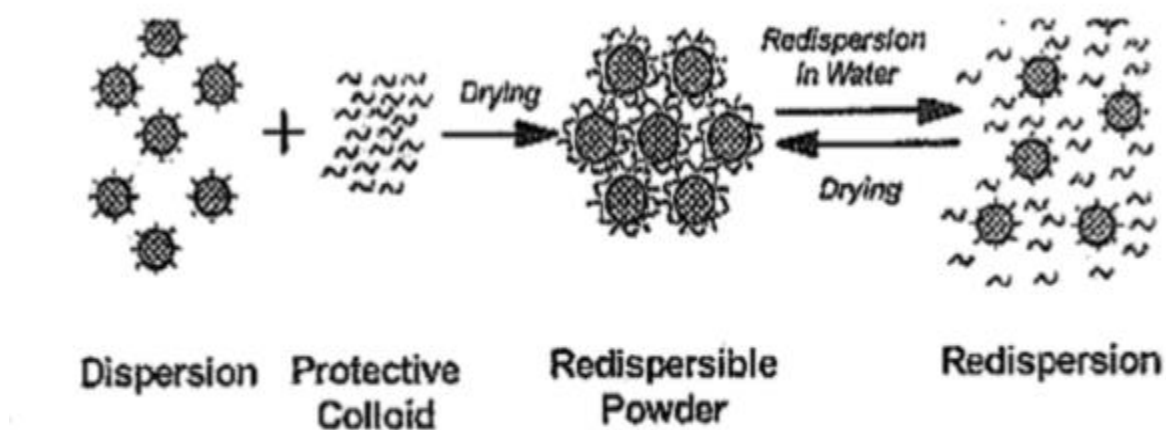


Figure II.22:Principes de stabilisation d'un latex.



Figure II.23: Resurfaçage d'éléments en béton (dalle de sol).

-Les polymères de type élastomères les plus employés dans ces latex sont :

- Le caoutchouc naturel;
- Le styrène butadiène (SBS);
- Le polyacrylonitrile (PAN);
- Le butadiène;
- Le polychloroprène.

-Les polymères thermoplastiques les plus utilisés sont :

- le polyvinyle acétate, ou copolymère de vinyle acétate avec un monomère comme le chlorure de vinyle, le chlorure de vinylidène
- le polystyrène ou copolymère de styrène avec différents monomères acrylate;
- le PVC ou copolymère de chlorure de vinyle avec des monomères tels que le chlorure de vinylidène;
- les polyacrylates et leurs copolymères.

♣ *Mortiers de ciment de polymères – éthers celluloses*

Les éthers celluloses sont des polymères dérivés de la cellulose (maillons d'anhydroglucose réunis par une liaison glycosidique) et solubles dans l'eau. La cellulose en tant que telle n'étant pas soluble dans l'eau, la substitution des groupes hydroxyles sur la chaîne de cellulose modifie cette propriété. Cette solubilité dépend de la longueur de la chaîne, de la nature, du nombre et de la répartition de ces groupements. Ils sont employés dans l'agroalimentaire, les cosmétiques, le domaine pharmaceutique, les peintures et, dans une moindre mesure, la construction. On les retrouve comme agents rétenteurs d'eau et agents épaississants : ils

contribuent à l'ajustement de la rhéologie des produits. Ils font généralement chuter le module de Young et la densité. Ce sont aussi des agents entraîneurs d'air : le volume poreux augmente, ce qui permet la création de réserves d'eau. Ils améliorent la résistance à la fissuration et permettent de contrôler le retrait par leur effet retardant ou rétenteur d'eau. Ils forment des films forts et flexibles dans la structure du mortier, ce qui lui confère une meilleure adhérence quand il est appliqué sur un support.

c)- Mortiers à base de résine époxy

Dans les bétons et mortiers à base de résine époxy (famille des PC), la teneur en résine époxy peut varier de 4 à plus de 20% suivant l'utilisation :

- faible teneur (4 - 8 %) : économiques, mais peu maniables et perméables, ils doivent être mis en place par vibrodamage;
- Teneur moyenne (8 - 15 %) : matériau "truellable"; les plus courants;
- Forte teneur (plus de 15 %) : systèmes autolissants, ne nécessitant plus de primer d'accrochage (à appliquer en surface horizontale). La prise et le durcissement sont fortement dépendants de la température. La température optimale de mise en œuvre se situe entre 10 et 30 °C. En-dessous de 5 °C, la mise en œuvre est aléatoire et les performances mécaniques seront diminuées du fait des propriétés hygroscopiques des durcisseurs. Les résistances mécaniques sont généralement atteintes après 2 à 3 jours de polymérisation :
- R compression de 50 à 110 N/mm² (MPa) ;
- R flexion : environ 1/3 des résistances en compression ;
- Résistance à l'abrasion : 5 à 15 fois supérieure à celle des bétons de ciment ;
- Adhérence supérieure à la cohésion du béton ;
- Bonne résistance aux agents chimiques [42].

d)-Mortier fibré

Le mortier fibré se compose de différents types de sables majoritairement siliceux, de ciments spéciaux (ciments de classe CEM I), de fibres synthétiques ainsi que d'adjuvants (Figure II.26)[43].Le mortier fibré peut être utilisé aussi bien en intérieur qu'en extérieur. On l'emploie :

- Pour la réparation d'ouvrages courants de maçonnerie ou le renforcement d'ouvrages tels que balcons, corniches, surfaces en béton ;
- Pour la fabrication de chapes. Celles réalisées avec du mortier fibré sont plus résistantes puisqu'elles présentent une résistance à la compression à 28 jours de 20 MPa. [43].



Figure II.24 : Epreuve d'un mortier fibré.

-Avantages des fibres dans le mortier

Est plus compact et plus résistant ainsi :

- ✓ Il bénéficie d'une meilleure résistance à la compression ;
- ✓ Il est moins sujet aux risques de fissurations lors de la phase de retrait ;
- ✓ Il endure mieux les chocs et les agressions extérieures (pluies acides, pollution) ;
- ✓ Il offre peu de prise à la corrosion, qui résulte de la carbonation du béton et des ions chlorure. [43]. Et ces fibres différentes de l'une à l'autre en termes de types et de caractéristiques, et maintenant nous allons en apprendre davantage sur ces fibres leur définition et leurs types et aussi leur utilisation dans la construction.

II.3.2.2. Les fibres

Le terme de fibre se rapporte à un corps solide flexible, de forme sensiblement cylindrique, d'un diamètre de quelque centimètre dont la longueur égale à quelques milliers de fois ce diamètre. Ce terme est généralement aussi utilisé pour définir le constituant élémentaire des structures textiles. Par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150 mm, de la fibre de grande longueur ou filament continu.

Dans le rapport sur l'état de l'art publié par le comité 544, de L'American Concrete Institute en 1982 nous pouvons lire : "Les fibres sont produites à partir d'acier, de plastique, de verre et de matériaux naturels sous différentes formes et dimensions " [44].

II.3.2.2.1. Types des fibres

A fil des années des fibres de toute nature ont été expérimentées pour renforcer des bétons et des mortiers .la compatibilité chimique avec la pâte de ciment ,et les caractéristiques mécaniques sont les qualités à atteindre des fibres .les fibres sont classées selon leur origine (synthétique ,naturelles ou artificielle),leurs dimension (macro ou microfibras)leur forme (ondulée, droite,...etc.)et leurs propriétés mécaniques .le choix des fibres dépend de l'usage recherché (pièces mince massives ,renforcement de pate pure de matériau de béton ,réparation de structures ,etc..),de leurs propriétés (résistance et module plus ou moins élevés ,adhérence plus ou moins bonne...) de leur disponibilité et de leur prix [45]. Plusieurs types de fibres ont fait leur preuve dans le renforcement du béton et on peut distinguer principalement celles qui sont citées ci-dessous.

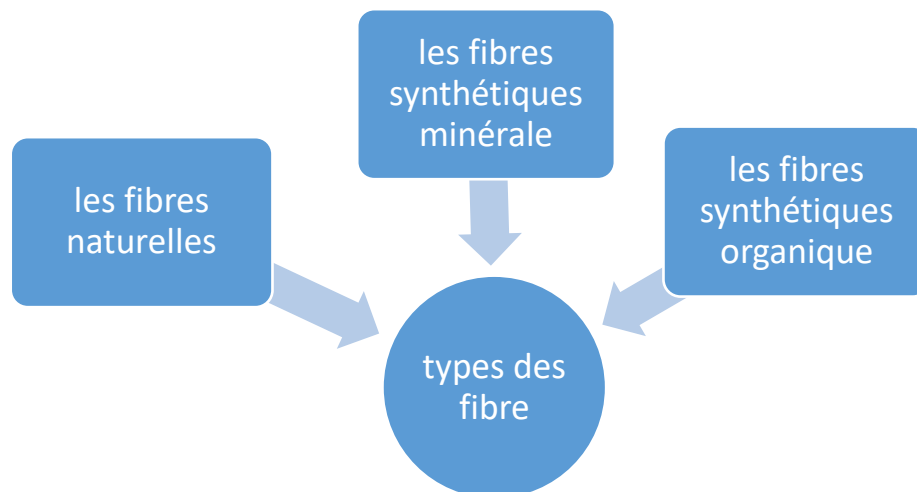


Figure II.25 :Différentes types de fibres.

a)-Fibres naturelles

Les fibres naturelles sont classées généralement en fonction de leurs origines (animale, végétale et minérale).

Les fibres d'origine végétale sont constituées majoritairement de cellulose et possèdent des propriétés mécaniques supérieures à celles d'origine animale. Ces dernières, telles que la laine et la soie, sont largement utilisées dans le domaine du textile. Les fibres d'origines végétales peuvent être classées en sous familles selon d'où elles ont été extraites ; graines, fruits, écorce, feuilles, bois, tiges ou canne [46]. Les différents types de fibres naturelles sont présentés sur la Figure. II.26.

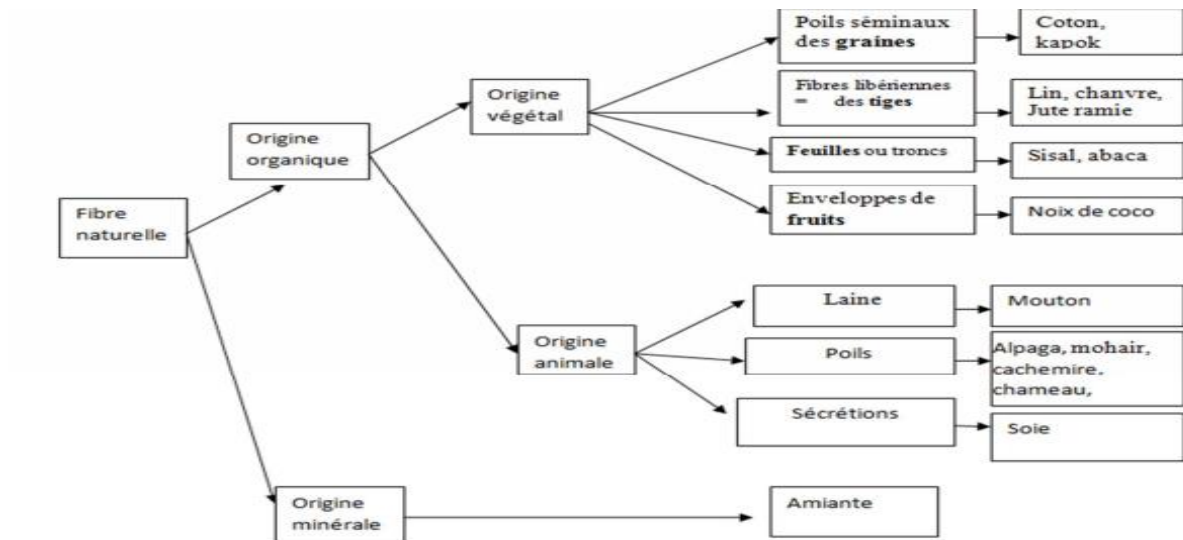


Figure II.26 : Organigramme des différents types de fibres.

b)-Fibres synthétiques d'origine minérale

♣ *Fibre de verre*

Bien que le béton armé de fibre de verre soit un produit industriel récent il a trouvé des applications diverses. Son application dans les panneaux de revêtement de façade découle de la possibilité qu'offre la fabrication par projection de donner au produit l'aspect (couleur, texture de la surface) désiré par l'architecte et de pouvoir enrober des âmes isolantes. Avec les techniques complémentaires (emboutissage, pressage) [46].



Figure II.27: Fibre de verre.

♣ *Fibre métallique*

Ce type de fibre, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, a été et reste encore l'objet de recherches très importantes dans le monde on se limite aux fibres d'acier qui sont

sans doute les plus utilisées dans le domaine du génie civil. En effet, les propriétés mécaniques du béton renforcé par ces fibres sont influencées par la résistance d'adhésion interfaçage entre fibre et matrice [46].

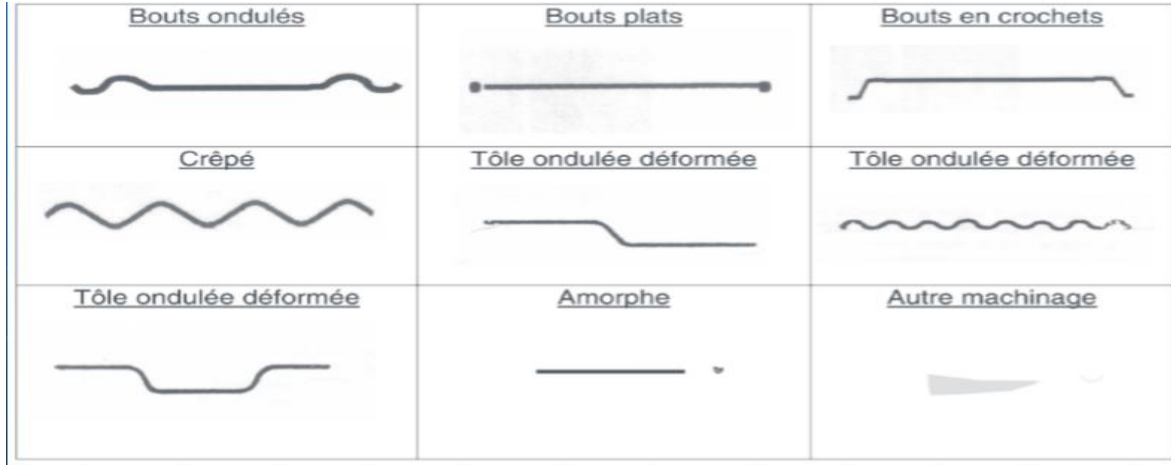


Figure II.28: Différentes formes géométriques de fibres.



Figure. II.29: Exemples de fibres métalliques.

♣ *Fibres de carbone*

Suivant les conditions de fabrication, il existe toute une variété de fibres de carbone mais actuellement trois types de fibres sont commercialisés :

- Les fibres hautement résistant (H.R);
- Les fibres à module intermédiaire (I.M);

-Les fibres à hauts modules (H.M).

Les fibres de carbone sont très fragiles ce qui rend l'opération de malaxage du béton de ces fibres très difficile. Pour cela, elles sont ajoutées par la suite au béton par projection. Par ailleurs, le béton de ces fibres présente des caractéristiques de durabilité très Intéressantes [46].



Figure. II.30: Fibres de Carbone.

c)-Fibres synthétiques organique

♣ *Fibre polypropylène*

Ces fibres obtenues par extrusion du polypropylène, se présentent en faisceaux ou sous forme de filament individuel. Lorsqu'elles sont utilisées sous forme de faisceaux,

- Elles se séparent lors de malaxage.;
- Elles se répartissent de façon multidirectionnelle dans le béton.

Les fibres polypropylène permettent en particulier de mieux contrôler le retrait plastique du béton frais mais n'améliorent pas son comportement post fissuration (contrairement aux fibres métalliques).

- Elles améliorent la maniabilité et la cohésion du béton (en particulier dans le cas de béton projeté) ;
- Elles sont particulièrement souples et insensibles chimiquement mais peu résistantes au feu (température de fusion comprise entre 140 à 170°C). Les propriétés des fibres polypropylène sont intéressantes pour les pièces à démoulage immédiate (meilleur comportement au jeune âge);
- Elles améliorent l'aspect et la précision des angles, des tranches ou des arêtes des pièces moulées ;

- Elles permettent de réaliser des parements esthétiques, avec des motifs très précis, et sont utilisées aussi pour la formulation des bétons projetée ou des mortiers de réparation [46].



Figure. II.31: Fibre polypropylène.

♣ *Fibre d'amiante*

Ces fibres sont considérées comme les renforcements les plus anciens des matrices cimentaires et sont aussi utilisées pour la confection de tissus résistants aux feux. Elles sont en fait des bâchettes de microfibrilles extrêmement fines, difficilement fusibles (vers 1500 °C) et ont l'avantage d'être inattaquables par les ciments. Elles possèdent un excellent comportement au feu, une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité élevé. Elles sont aussi plus résistantes aux agressions chimiques et micro-organismes, ainsi que leur résistance électrique élevée. Les fibres d'amiante sont utilisées dans les applications suivantes : (voiles, tuyaux, panneaux, matériaux d'isolation thermique et protection contre le feu, tuyaux d'égout, plaques de toitures plates et ondulées, revêtements de mur.) [46].

II.3.2.2.2. Rôle des fibres

Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition de fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton comme la résistance à la compression et la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité. Il a été constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut être apprécié sous deux volets :

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures (Figure II.32) ;

• La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes (Figure II.32, b) [47].

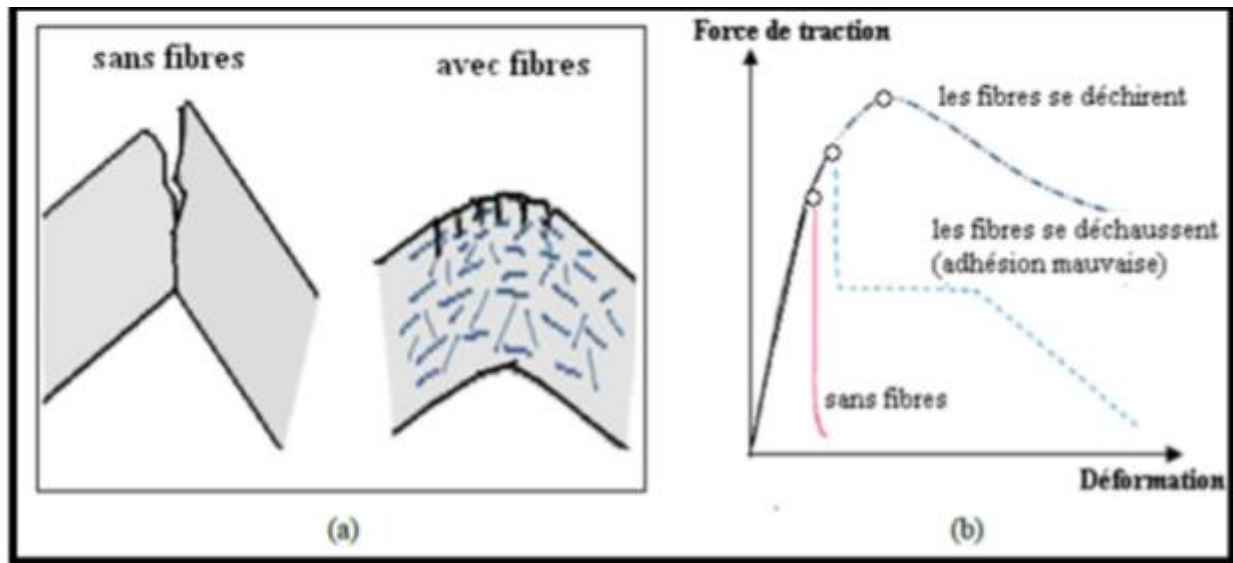


Figure :II.32: Illustration de l'apport du renfort par des fibres.

II.3.2.2.3. Caractéristiques des fibres

Chaque fibre présente des caractéristiques et des propriétés spécifiques : dimensions (diamètre inférieur en général à 1 mm, longueur en général inférieure à 60 mm...), formes (lisses, crantés, ondulées, à crochet...), résistances mécaniques (résistance à la traction), ce qui génère des performances mécaniques et des propriétés très variées, suivant donne les caractéristiques moyennes des fibres les plus utilisées [48].

Tableau II.2: les caractéristiques moyennes des fibres les plus utilisées :

Fibres	Diamètre (mm)	Longueur	Masse volumique (Kg/cm ³)	Résistance traction (Mpa)	Module E (Mpa)	Allongement (%)	Coefficient de dilatation 10 ⁻⁶ °C ⁻¹	R au feu (°C)
Amiante (chrysolite)	0.0002 à 0.002	5 à 20	2.6 à 3	300 à 1000	80 000 à 150 000	2 à 3		1500
Polypropylène	0.01 à 0.1	25 à 75	0.9	400 à 600	4000 à 8000	15 à 20	90	150
Verre (au zirconium)	0.006 à 0.020	40 à 70	2.6	1500 à 3000	80 000	2 à 3	9	600
Acier	0.2 à 0.5	20 à 50	7.9	1000 à 3000	200 000	3 à 4	11	1500
Carbone	0.005 à 0.01	Variable	2	2000	400 000	0.5	1	400 à 1500
Fonte amorphe	30 à 60 x 0.03 x 1	30 à 60	7.2	2500	130 000	2		300
Aramide	0.012	10	1.4	2800	80 000	4.2	-2	300

II.3.2.2.4. Utilisation des fibres dans la construction

Les fibres de toute nature sont très employées dans différents ouvrages dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques et physiques. A titre d'exemple le tableau II.3 résume les diverses applications des fibres dans les produits cimentaires. L'utilisation des fibres végétales dans le renforcement des ciments est relativement récente. En effet, beaucoup de recherches sont en cours dans le but d'arriver à substituer les fibres d'amiante par les fibres végétales. Actuellement, les fibres végétales sont de plus en plus utilisées dans les dalles et la production des tuiles et les dallages de parking ainsi que dans le renforcement du plâtre [49]. Par ailleurs, l'utilisation des fibres de polymère, de carbone et d'acier est de plus en plus pratiquée dans plusieurs domaines et spécialement dans la fabrication des panneaux et dans la restauration et la réparation des ouvrages anciens endommagés.

Tableau II.3: Application des divers renforcements de fibres dans les produits à base de ciment

Types de fibres	Application
Verre	Panneaux préfabriqués, murs, rideaux, tuyaux d'égout, toiture en voile Mince, enduit
Acier	Élément de toitures en béton cellulaire, linteau, revêtement de chaussée, tabliers de pont, produit réfractaire, tuyaux en béton, piste d'atterrissage, réservoirs sous pression, travaux de restauration bâtiments.
Polypropylène nylon	Pieux de fondation, pieux précontraints, panneaux de revêtement, élément flottant de débarquement et amarres pour les marinas, réparation des routes, tuyau sous-marin, travaux de restauration bâtiments
Amiante	Voiles, tuyau, panneaux matériaux d'isolation thermique, tuyaux d'égouts plaques de toitures plates et ondulées, revêtement des murs.

Carbone	Élément ondulé pour la construction des planchers, membrane simple ou double courbure, coques, plancher d'échafaudage.
Particules de mica	Panneaux, tuyaux, travaux de restauration
Végétale	Dalles, tuiles.

II.3.2.2.4. Influence des fibres sur les propriétés des BAPF à l'état frais

Grunewald a réalisé un programme dédié aux propriétés des BAP fibrés en fonction de la teneur en fibres, du type de fibres (métallique et polypropylène avec différentes géométries) et du rapport massique sable/granulat. Pour la composition de référence, le rapport sable/granulats de 40% était utilisé car considéré comme optimal pour la compacité du béton [47]. Après les différents essais d'ouvrabilité réalisés sur les différentes compositions des bétons à l'état frais, des conclusions ont été tirées :

Grünwald 2004[50] mentionne qu'une augmentation de la limite d'élasticité est fonction de l'augmentation du volume des fibres dans les BAP. Parallèlement, Grünwald et al 2001, ont rapporté que pour obtenir un affaissement donné, la longueur des fibres doit être réduite avec l'augmentation du volume des fibres ; en d'autres termes, pour un type de fibre donné, le taux d'affaissement diminue avec l'augmentation du volume des fibres.

Sahmaran et al. 2005, [51] ont étudié l'effet de la combinaison des fibres métalliques de différentes formes et natures sur les propriétés rhéologiques et mécaniques. Les auteurs concluent que la maniabilité est fonction des propriétés des fibres (volume, longueur, aspect ratio et la forme).

Khayat et al. 2000, [52] ont rapporté que l'inclusion des fibres dans les BAP pourrait modifier de manière significative les propriétés rhéologiques par leurs formes et leurs interactions avec les agrégats, par conséquent une augmentation de la résistance à l'écoulement.

II.4. Essais réalisés sur les matériaux de réparation

Les matériaux utilisés dans le processus de réparation sont testés selon le type et le degré de dégradation et selon le composant dégradé et son type, la restauration des éléments porteurs diffère les uns des autres. Le mortier autoplacant fibré est spécialement formulé pour cet isolement comme nous l'avons fait dans nos recherches [53].

Là où elle doit être caractérisée par des caractéristiques liées aux objectifs que nous voulons comme : la viscosité, l'adhérence et l'homogénéité, et pour tester ces propriétés nous faisons plusieurs essais que nous mentionnons :

II.4.1. Essai de compression simple

La connaissance de la résistance à la compression f_{c28} du matériau est nécessaire afin de qualifier les matériaux. Trois essais sont réalisés à 28 jours sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm, suivant la norme **NF EN 12390-3**. [54].

$F_{c28} = f/s$ d'où

f_{c28} : résistance de compression [MPa]

F : charge maximale [N]

S : surface de contact [mm²]



Figure II.33: Essai de compression.

II.4.2. Essai de traction

Cet essai est le plus fréquemment utilisé pour déterminer le comportement mécanique d'un matériau ; l'essai de traction est caractérisé par la facilité de mise en œuvre et par la richesse des informations fournies, et le principe de cet essai est mentionné dans EN 1015-11 et cela a été fait au centre scientifique technologique (CSTB) [53].

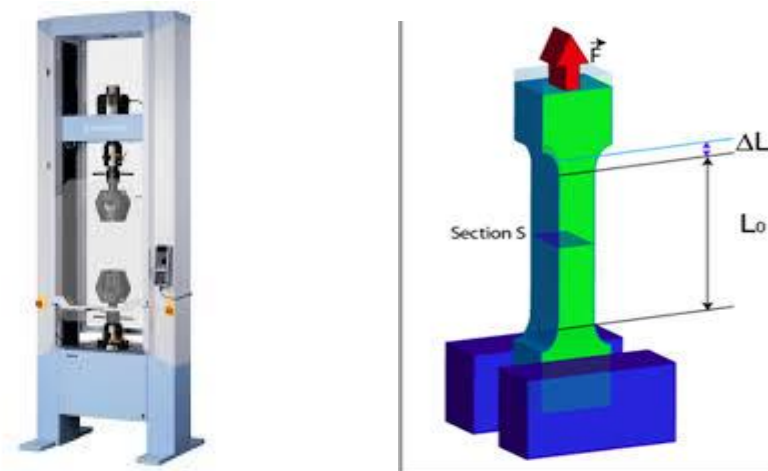


Figure II.34: Essai de traction.

II .4.3. Essai de cisaillement oblique: (cisaillement compression)

Cet essai est réalisé sur des éprouvettes béton réparées conformément à la norme **BS6319** et il vise à tester l'adhérence entre le matériau de réparation et le matériau à réparer [53].

La résistance de la liaison au cisaillement est exprimé en (N/mm²). Selon la norme française **EN 12615(1999)**, la contrainte de cisaillement à l'interface doit être calculée comme suit pour chaque éprouvette reconstituée :a²

$$\sigma_c = \frac{F \sin \alpha \cos \alpha}{(a)^2} \dots \dots \dots (II.1)$$

F:la force d'application (N)

a:la cote de la section transversale adopté (mm)

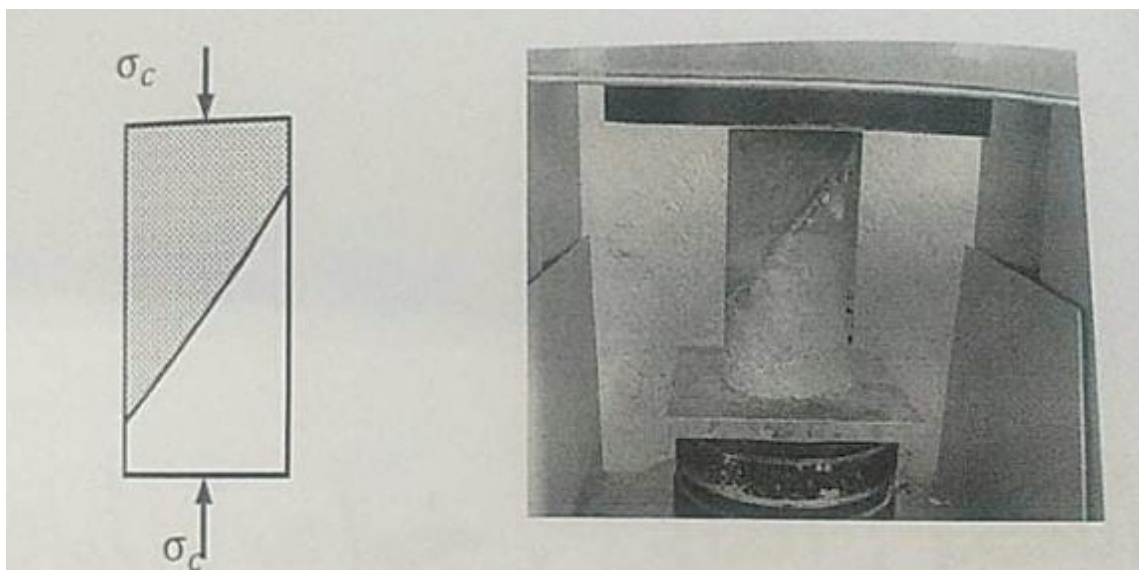


Figure II.35: Essai de cisaillement oblique.

II.4.4. Essai de flexion 3 points

Le but de l'essai est de connaître la résistance à la flexion F_{cf} de l'éprouvette prismatique. Trois essais sont réalisés sur des éprouvettes prismatiques conformément à la norme **NF EN 12390-5**. Le principe de l'essai est détaillé sur la figure ci-dessous :

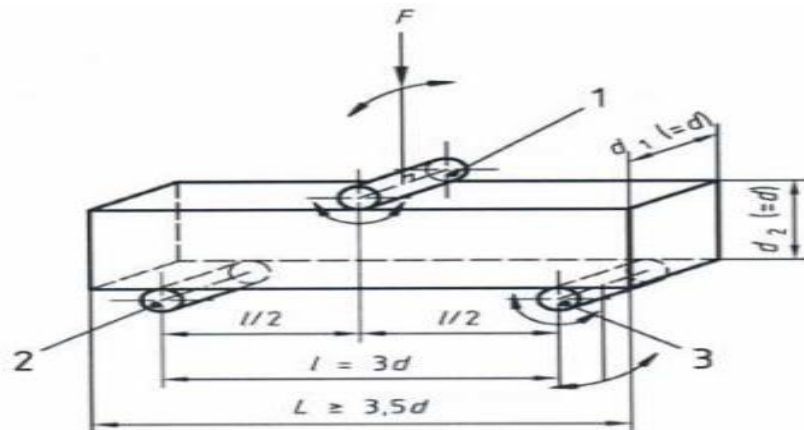


Figure II.36: Principe de l'essai de flexion 3 points.

$$F_{cf} = \frac{3}{2} \times \frac{p \times l}{d_1 \times d_2^2} \dots\dots\dots (II.2)$$

F_{cf} : résistance en flexion [MPa]

P : charge maximale [N]

L : écartement entre les rouleaux d'appui (mm)

d_1 et d_2 : les dimensions latérales de l'éprouvette (cm)

II.4.5. Essai de flexion 4 points

Cet essai est réalisé pour assurer une répartition uniforme des contraintes entre le béton de réparation et béton réparé. Elle se déroule sur un appareil spécial de flexion avec une vitesse constante, il peut s'agir de deux ou quatre points [53]. ; comme le montre la figure suivante :

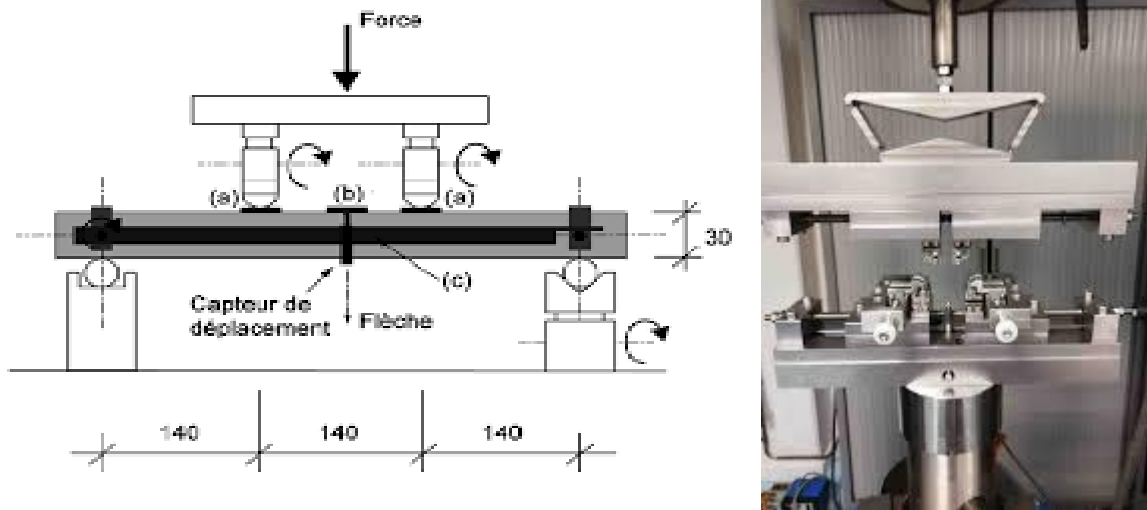


Figure II.37: Essai de flexion à 4 points.

II.4.6. Essai d'arrachement

Le but de l'essai est de connaître la contrainte moyenne d'adhérence σ_a afin d'obtenir l'adhésion et donc la capacité du transfert des efforts lors de l'application des renforts (colle/composite). Les essais sont exécutés selon les normes **NF EN 1542**. La contrainte d'adhérence doit être supérieure à 1,5 MPa .

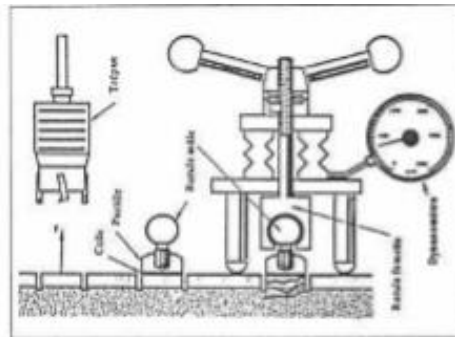


Figure II.38: Dispositif expérimental des essais d'arrachement par traction directe.

II.4.7. Essai de traction par fendage

Le but de l'essai est de connaître la résistance à la traction du mortier fibré σ_t d'une éprouvette cylindrique. Dans cet essai, on applique à l'éprouvette un effort de compression. Cet effort induit des contraintes de traction dans le plan passant par ces deux génératrices. La rupture, due à ces contraintes de traction, se produit dans ce plan. Le calcul permet de définir la contrainte de traction correspondant à cette rupture. Trois essais sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 16mm et de hauteur 32mm âgées de 28 jours selon la norme **NF EN 12390-6**.

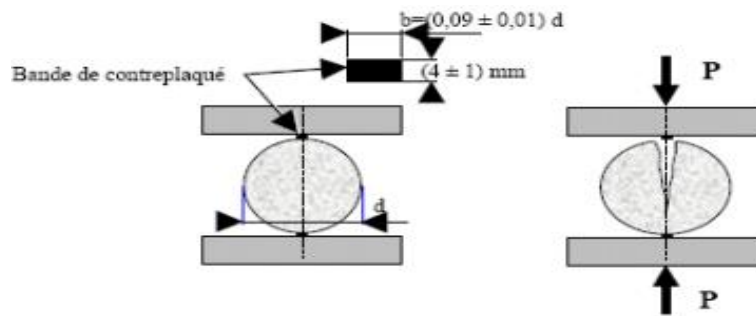


Figure. II.39: Principe de l'essai de fendage.

$$\delta t = \frac{2 \times f}{\pi \times L \times d} \dots\dots\dots (II.3)$$

σ_t : résistance en traction par fendage [MPa]

F : charge maximale [N]

L : longueur de la ligne de contact de l'éprouvette [16cm]

d : diamètre nominal de l'éprouvette [32 cm].

II.4.8. Essai de retrait

Le but des essais est de connaître la contrainte $c (\Delta l/L)$, appelée aussi variation de longueur en mm/m ou en %. Trois essais par ambiance sont réalisés sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm³ équipées de plots (10 mm de longueur et 80 mm de diamètre). Deux ambiances ont été testées:

- ambiance normalisée ($\theta=21 \pm 2^\circ$ et HR=60 $\pm$ 10%) ;
- ambiance immergée ($\theta=20^\circ$ et HR=100%).

Cette seconde ambiance permettra de valider l'utilisation de ces matériaux en ambiance agressive, représentant l'ambiance des ouvrages d'assainissement. Ces essais ont été réalisés selon la norme NF EN 12617-4. Trois éprouvettes 4x4x16 cm³ par ambiance (normalisée et saturée) ont été coulées. Un retractomètre a été utilisé pour déterminer les variations de longueur (Figure II.43). Les mesures de retrait sont réalisées 1 jour après le démoulage.



Figure II.40 : Mesure du retrait.

II.4.9. Module d'élasticité

Trois essais sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 16cm et de hauteur 32 cm âgées de 28 jours, suivant la norme NF EN 13286-43. L'extensomètre utilisé est constitué de deux anneaux rigides, chacun étant fixé à la paroi de l'éprouvette avec trois vis. La distance entre les deux anneaux est égale à 35 cm.



Figure II.41: Principe de l'essai de module d'élasticité.

Chapitre III :

**Caractérisation des matériaux,
formulation et protocole expérimental.**

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, la première phase présente les caractérisations des matériaux locaux utilisés, la deuxième phase présente les essais expérimentaux, à l'état frais et à l'état durci du béton et mortier autoplaçant.

III.2. Caractéristiques des matériaux

III.2.1. Granulats

Dans cette étude on a utilisé deux types de granulats, un sable alluvionnaire issu de carrière d'oued M'Zi située au Nord-Est de la commune de Laghouat, ce sable est généralement utilisé tout projet de construction de la région, et un gravier utilise provient d'une roche de la région de Laghouat, pour la formulation de notre béton on a choisi deux fractions 3/8 et 8/15.



Figure III.1 : Sable alluvionnaire.



Figure III.2: Gravier 3/8.



Figure III.3: Gravier 8/15.

III.2.1.1. Analyse Granulométrique

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat, on appelle tamisât ou passant l'ensemble des grains qui passent à travers le tamis, et refus l'ensemble des grains qui sont retenus sur le tamis.

La figure III.4, présente les courbes granulométriques des matériaux étudiés, d'après cette analyse, nous ne constatons que les matériaux possèdent de courbe granulométriques serrée.

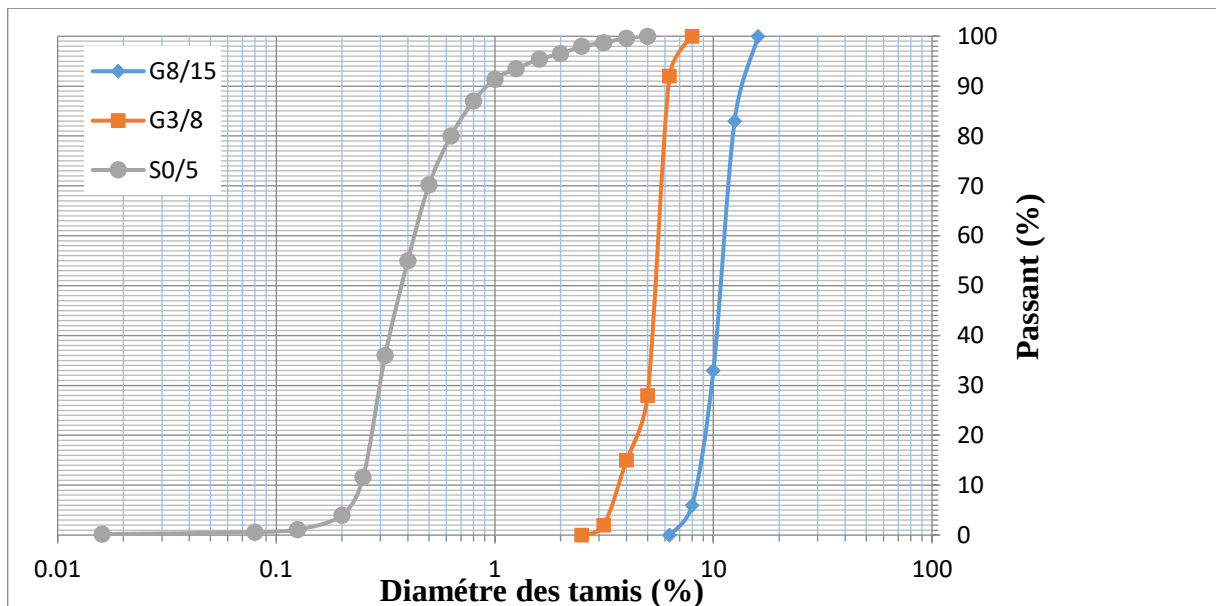


Figure III.4 : Courbe granulométrique de sable et gravier 3/8, G8/15.

a. Module de finesse

Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (M_f), le module de finesse des sables est défini comme étant le centième de la somme des refus (exprime en % de poids) aux tamis : (0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 5).

Lorsque M_f est comprise entre :

- 1.8 et 2.2 : le sable est à majorité de grains fins
- 2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel
- 2.8 et 3.3 : le sable est un peu grossier, il donnera des bétons résistants mais moins maniables [54].
- Module de finesse du sable alluvionnaire (SA) est : $M_f=1.87$

III.2.1.2. Masse volumique

Les masses volumiques de matériaux utilisés sont mesurées selon la norme française, Masse volumique absolue NF P 18-555, c'est la masse par unité de volume absolue du corps, c'est-à-dire de la matière qui constitue le corps, sans tenir compte du volume des vides, on a utilisé l'éprouvette graduée pour le gravier et le pycnomètre pour le sable.

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_1 - V_2}$$

ρ_s : masse volumique absolue kg/m³.

M_s : masse des grains solides.

V_1 : volume de l'eau.

V_2 : volume total (grains + vide).

Les masses volumiques des granulats utilisés sont présentées dans le tableau III.1

Tableau III.1 : Résultats de masse volumique de sable et de gravier G3/8, G8/15.

Type de granulat	SA	G3/8	G8/15
Masse volumique absolue(kg/m ³)	2,62	2,64	2,67

III.2.1.3. Coefficient d'absorption

La plupart des granulats stockés dans une atmosphère sèche pendant un certain temps, peuvent par la suite absorber de l'eau, le processus par lequel le liquide pénètre dans la roche et l'augmentation de poids qui en résulte est appelé absorption, l'absorption peut varier dans de très larges mesures suivant la nature du granulat, elle peut varier de 0 à plus de 30% du poids sec pur granulat léger, en général, les granulats naturels utilisés pour la confection du béton sont peu poreux et n'absorbent pratiquement pas d'eau lorsqu'ils sont gâchés avec le ciment et l'eau. Chaque résultat de matériaux représente la moyenne de trois essais.

$$A_{bs} = (M_h - M_s)/M_s$$

M_s : Masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve 109° (20 heures).

M_h : masse de l'échantillon imbibé.



Figure III.5 : Mesure d'absorption.

Tableau III.2 : Résultats de coefficient d'absorption de sable et de gravier G3/8, G8/15.

Type de granulat	SA	G3/8	G8/15
Coefficient d'absorption	0,84	4,97	3,84

III.2.1.4. Équivalent de Sable

Il est défini par la norme NF P 18-598 ; cet essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5mm, il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent, l'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier.

On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout, au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

- Hauteur h1 : sable propre +éléments fins.
- Hauteur h'2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention, est :

$$E_{sp}(\%) = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

Selon que la hauteur h2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine Esv (équivalent de sable visuel) ou Esp (équivalent de sable au piston).

L'équivalent du sable alluvionnaire est $EP=87,5 \%$

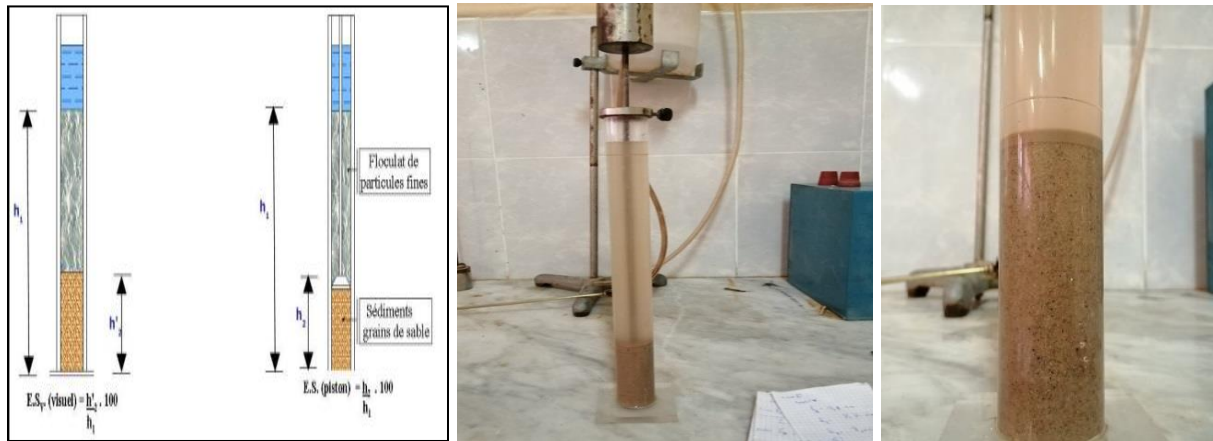


Figure III.6 : Essai d'équivalent de sable.

D'après les résultats de valeur de l'équivalent de sable, nous déduisons que le sable utilisé est très propre, indique d'absence presque totale des fines argileuses, le module de finesse obtenue 1,87 de cette valeur située dans les limites (1,8 et 2,2) le sable est à majorité de grains fins.

III.2.2. Ciment

Pour la confection des bétons un seul type de ciment qui a été utilisé, ciment portland CEM I 42.5, fabriqué par la cimenterie de Biskra, les compositions chimiques et les caractéristiques physiques mécaniques du ciment utilisé sont présentées dans les tableaux III.3 et III.4

Tableau III.3 : Composition chimique de ciment.

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	K ₂ O	SO ₃	L.O.i
Pourcentage	18,37	4,26	3,89	64,04	1,52	0,12	-	-	3,01	4,23

Tableau III.4 : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.

caractéristiques	valeurs
La consistance de pate de ciment (%)	27
Début de prise (s)	170
Fin de prise (s)	255
Densité spécifique	3.1
Finesse (g/cm ²)	3921
Résistance à la compression 28 jours (MPa)	42.5

III.2.3. Fibres

III.2.3.1. Fibres d'alfa

On a utilisé des fibres d'alfa issues de sud de la région de Laghouat de longueur 40 cm et de couleur : vert jaunâtre et on les a découpés en des longueurs de $1,5 \pm 0,25$ cm.

III.2.3.1.1. Masse volumique

Les étapes de l'essai sont comme suit :

- On prend un échantillon de fibre d'Alfa de longueur $1,5 \pm 0,25$ cm.
- On immerge cet échantillon dans l'eau d'une durée de 24h et on pèse M_2 .
- Remplir le pycnomètre d'eau distillée au niveau 0 (M_1).
- Nous mettrons l'échantillon à l'intérieur du pycnomètre et on pèse M_3 .

$$\rho = \frac{M_1}{M_1 + M_2 - M_3}$$

La masse volumique de fibres d'alfa est : $1,05 \text{ Kg/m}^3$.



Figure III.7 : Essai de mesure la masse volumique des fibres d'alfa.

III.2.3.2. Fibres de verre

On a préparé des fibres de verre de longueur entre $1,5 \pm 0,25$ cm.



Figure III.8 : Fibres de verre.

III.2.4. Fumées de silice

Les fumées de silice sont formées de sphériques très fines (environ $1\mu\text{m}$) présentant une très forte teneur en silice (SiO_2) amorphe, elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de Ferro-silicium.

Les fumées de silices ont des propriétés pouzzolaniques, seules les fumées de silice satisfaisant aux spécifications suivantes doivent être utilisées :

- Teneur en silice amorphe $> 85\%$;
- Pertes au feu $< 4\%$ en masse ;
- Finesse $15 \text{ m}^2/\text{g}$.

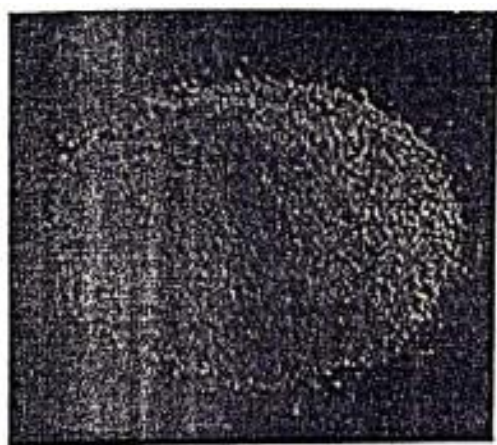


Figure III.9: Fumées de silices

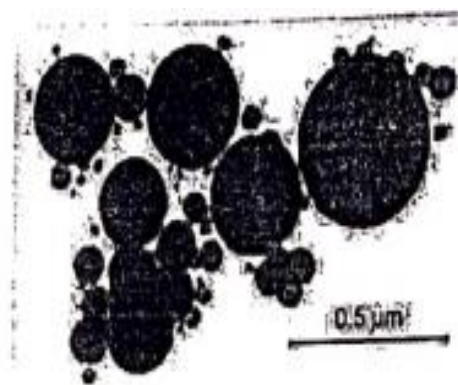


Figure III.10: Fumées de silices vue au MEB

III.2.4.1. Masse volumique

Pour fumées de silice on a utilisé le benzène avec le densimètre de la Chatelier

La masse volumique de fumée de silice est : $2,23 \text{ kg/m}^3$



Figure III.11 : Essai de mesure la masse volumique de fumées de silice.

D'après les résultats de valeur de l'équivalent de sable sur tableau, nous déduisons que le sable utilisé est très propre, indique d'absence presque totale des fines argileuses, le module de finesse obtenue 1,87 de cette valeur se situe dans les limites (1,8 et 2,2) le sable est à majorité de grains fins.

III.3. Formulation de béton autoplaçant(BAP)

La méthode de formulation adoptée dans notre travail est celle proposée par le japonais OKAMURA, appelée la méthode générale, elle est simple et peut produire un BAP de propriétés adéquates à la majorité des applications, par ailleurs, cette méthode présente l'avantage d'être applicable même en utilisant des matériaux locaux, mais à conditions de faire quelques modifications notamment au niveau de la teneur en sable.

Le BAP est fortement liée à celle du MAP et en suivant les étapes de la méthode générale, la formulation du MAP constitue une étape primordiale en vue de confectionner un BAP.

III.3.1. Formulation du mortier autoplaçant (MAP)

Dans notre étude trois types de mortier ont été formulés qui sont les suivants :

- Mortier à base de fumée de silice.
- Mortier à base de fibres d'alfa.
- Mortier à base d'un mélange de fumée de silice et de fibres d'alfa.

Dans le BAP, la phase du mortier est une phase très importante, car elle fournit la lubrification entre les particules des grès granulatés, et la stabilité globale du béton, les propriétés requises pour que le mortier puisse être considéré comme autoplaçant sont : une fluidité élevée et une résistance suffisante aux ségrégations statiques et dynamiques.

Du moment que le mortier occupe un volume important dans les BAP (presque 70% du volume du BAP), les résultats d'essais sur le MAP seront concluants et peuvent donner une grande idée sur le comportement rhéologique du BAP.

Selon Domone et Jin [55] les mortiers sont testés pour les raisons suivantes :

- Les BAP ont un volume en gros granulats moins important que le béton ordinaire, et donc les propriétés du mortier sont dominantes.
- L'évaluation des propriétés du mortier est une partie intégrale de la formulation des BAP, et donc la connaissance des propriétés du mortier est utile.
- Tester un mortier est beaucoup plus commode et simple que tester un béton.

Les mortiers sont testés à travers l'essai d'étalement au mini-cône et l'essai d'écoulement en V schématisés dans les figures (III.12), (III.13).

Ces tests ont pour but de déterminer la teneur en eau (rapport Eau/Liant), la teneur en sable (rapport sable/mortier) et le dosage plastifiant (rapport superplastifiant/liant).

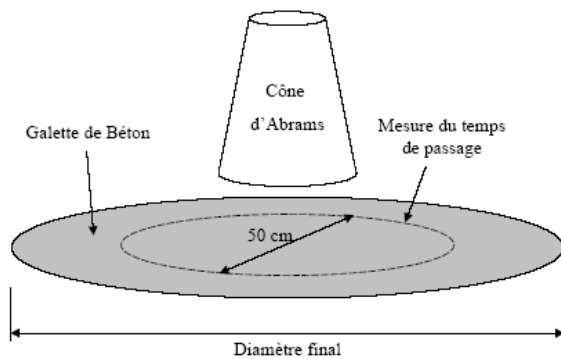


Figure III.12 : Essai de l'étalement au mini-cône.

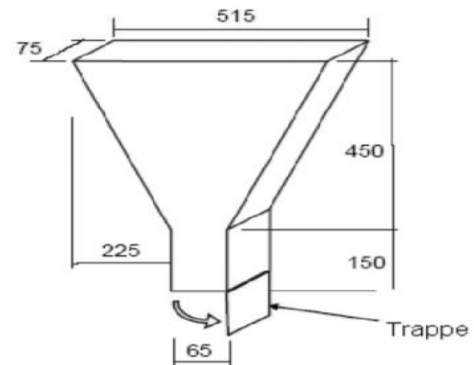


Figure III.13 : Essai de l'écoulement au V-tunnel

III.3.1.1. Rapport Eau/Liant (E/L)

Des études ont montré que le rapport E/L optimum pour produire un BAP est compris dans l'intervalle 0.84 et 1.07 en volume qui correspond à l'intervalle 0.28 et 0.45 en masse, les rapports E/L au-dessus et en dessous de cet intervalle peuvent causer un blocage ou une ségrégation du mélange, des essais préliminaires réalisés par M ElHADJ AISSA (thèse doctorat) ont montré qu'il faut aller jusqu'au rapport en masse de 0.4 afin d'avoir un MPA satisfaisant ayant un étalement supérieur à 270mm, pour tous les essais de mortier nous avons fixé le rapport eau/liant à 0.4.

III.3.1.2. Rapport Sable/Mortier (S/M)

L'optimisation du rapport Sable/mortier consiste à développer les meilleures caractéristiques du mortier à l'état frais pour assurer par la suite de bonnes caractéristiques du BAP à l'état frais et à l'état durci, le principe de la méthode consiste à rechercher la composition optimale pour les rapports sable/mortier de 0,5 ; 0,45 et 0,4 tout en faisant varier le rapport superplastifiant/liant (Sp/l).

III.3.1.3. Dosage de superplastifiant (Sp)

D'après la littérature on a choisi le dosage du superplastifiant égale à 1%, c'est le dosage de saturation, le rôle de ce dernier est prépondérant pour le maintien de la maniabilité (en fonction de la nature chimique) l'amélioration de la résistance et la compacité.

III.3.1.4. Séquence de malaxage du MAP

Après avoir déterminé les valeurs de la teneur en eau, de la teneur en sable et de la quantité de plastifiant utilisé, nous pouvons dire que nous avons obtenu la composition idéale pour le mortier autoplaçant de référence, l'étape suivante consiste à étudier l'effet de la fumée de silice sur les propriétés du mortier autocompactant à l'état frais, et pour cela nous avons ajouté la quantité de ciment en le mélange de référence de fumée de silice dans les proportions de 5%, 10% et 15%, compte tenu de la proportion de superplastifiant suffisante pour maintenir constantes les différentes propriétés du mortier autoplaçant, pour rappel, cette étape n'est pas une règle générale, nous ajoutons également des pourcentages de fibres d'alfa dans la mesure où cela n'affecte pas les propriétés fraîches MAP.

Après avoir calculé la quantité de chaque composant de mortier autoplaçant, nous procédons au malaxage du mélange de la manière suivante : mélange de la poudre sèche avec du sable pendant 15 secondes avant d'ajouter de l'eau afin d'homogénéiser le mélange, puis nous ajoutons 70% de l'eau de gâchage, qui est l'eau potable du robinet avec un débit constant jusqu'à la fin de la première minute, pendant la deuxième minute, nous entrons régulièrement dans le plastifiant avec les 30% restants de l'eau qui a été mélangé laissant le processus de mélange pendant encore trois minutes, la durée du processus de mélange total est de cinq minutes, la figure (III.14) résume toutes ces étapes d'une manière simple et précise.

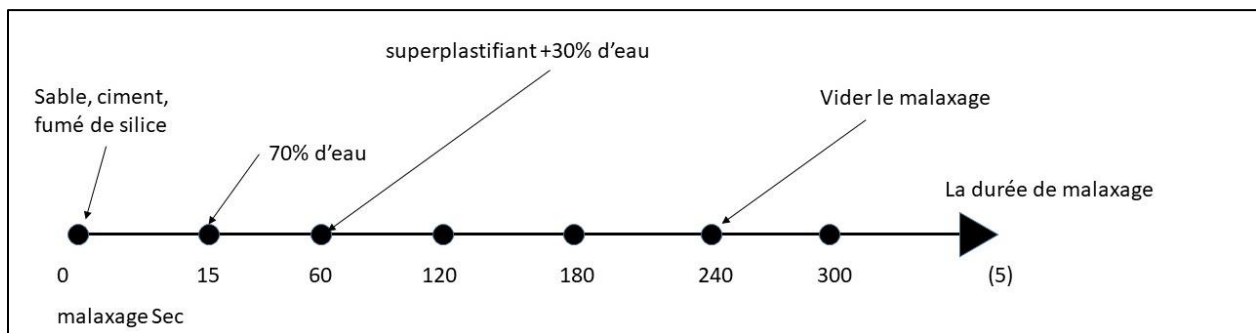


Figure III.14 : Séquence de malaxage du MAP.

Nous mentionnons ici que nous avons utilisé un malaxeur installé avec un axe vertical d'une capacité de 5 litres pour mélanger le mortier.

III.4. Protocole expérimental

III.4.1. Essais sur MAP à l'état frais

Les essais avec des boues fraîches visent à déterminer les deux rapports S/M et SP/B dans un premier temps, et à étudier l'effet de fumée de silice et des fibres d'alfa sur la rhéologie de

mortier autoplaçant comme deuxième étape, l'essai de diffusion vise à calculer la déformation du mortier en mesurant le diamètre de son étalement, et en surveillant la stabilité du mortier en notant son homogénéité après l'arrêt de la diffusion, la viscosité du mortier est calculée dans une mesure du temps à travers l'essai du petit entonnoir en forme de V, avec une diffusion confinée entre 27 et 33 cm, et un temps d'écoulement allant de 2 à 10 secondes, Chai a suggéré le même timing pour un temps d'écoulement et de diffusion de plus de 30 cm. Dans cette étude, dans le but d'obtenir un lisier d'auto-compactage, les trois mesures suivantes doivent être étudiées.

- Grand étalement : cette propriété se traduit par une valeur de diffusion confinée entre 27 et 33 m.
- Viscosité appropriée : un temps d'écoulement compris entre 2 et 10 secondes permet de donner une bouillie de viscosité adaptée.

III.4.1.1. Essais d'étalement au mini-cône

L'essai consiste à remplir le petit cône de mortier, placé sur une plaque à surface propre et humidifiée, le cône est ensuite soulevé et le mortier en sort en formant une galette qui s'élargit sous son propre poids, la valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette du mortier ainsi obtenue.

La tendance à la ségrégation et au ressuage peut être détectée visuellement, le sable doit être réparti uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette.

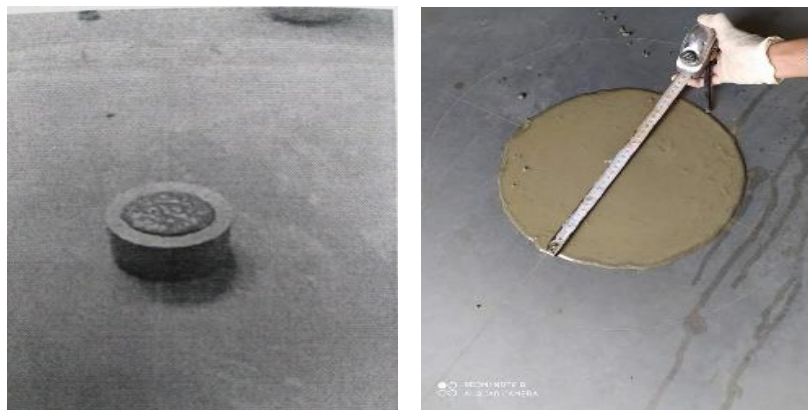


Figure III.15 : Essais d'étalement au mini-cône.

III.4.1.2. Essai de l'entonnoir en v

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante : rempli de mortier, puis on mesure le temps d'écoulement entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bac de l'entonnoir.

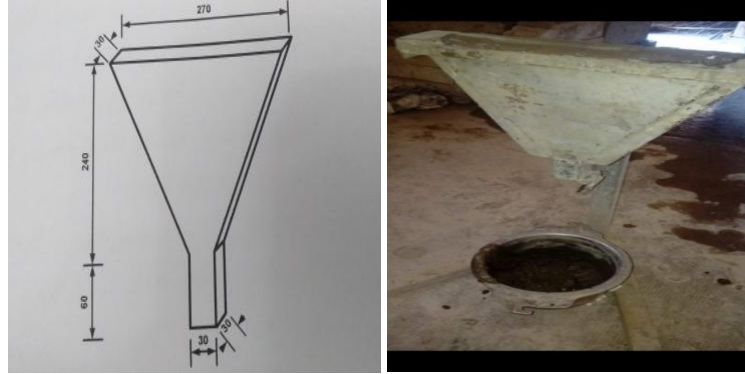


Figure III.16 : Essai d'écoulement au v-tunnel.

III.4.2. Essais réalisés sur le mortier à l'état durci

Cet essai consiste à sélectionner les échantillons d'étude, les propriétés physiques et mécaniques, en déterminant la résistance à la compression, la résistance à la flexion sur des éprouvettes de dimensions (16x4x4 cm), d'une durée de vie de 3, 7, 28 et 56 jours, et la vitesse de propagation des ondes ultrasonores, les âges 28 et 56 jours et l'essai d'absorption d'eau par immersion est réalisé sur trois échantillons, au bout de 28 jours, après traitement dans de l'eau saturée en chaux, les valeurs prises en compte sont les valeurs moyennes des valeurs individuelles des trois échantillons d'essai.

III.4.2.1. Essai de résistance à la compression

Nous testons la résistance à la compression sur des échantillons de forme cubique avec un nombre de 6 pièces pour chaque mélange résultant de l'écrasement de trois échantillons d'essai de flexion, les échantillons sont soumis à une charge accrue jusqu'à rupture moyenne en utilisant une presse hydraulique d'une capacité de 2000 KN, cette machine est équipée d'un affichage numérique il permet d'entrer dans la zone d'échantillon, la vitesse de chargement (2.5 kN /S).

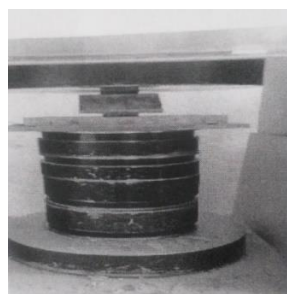


Figure III.17 : Dispositif de mesure de la résistance à la compression.

Après lecture et enregistrement de la résistance à la compression de chaque essai, nous calculons la résistance à la compression avec la relation ($\sigma_c = F / a^2$).

- σ_c : Résistance à la compression (MPa)
- F : Force de compression (Newton)
- a : Section de l'échantillon (mm)

III.4.2.2. Résistance à la flexion simple

Cet essai a été mené selon la norme NF P18 -433, la méthode représentée en plaçant les échantillons de forme prismatique sur deux supports et en les soumettant à une charge accrue concentrée dans le milieu jusqu'à rupture figure (III.18), cette charge est appliquée à l'aide d'un compresseur connecté à un ordinateur pour la lecture numérique qui contrôle la vitesse de la charge appliquée (kN / S) dans laquelle nous entrons avant de mener les essais.



Figure III.18 : Essai de flexion simple.

La résistance de réfraction est donnée de la même manière, la résistance à la flexion est obtenue par un simple calcul de la résistance des matériaux, la contrainte de flexion maximale se stabilise au centre de l'échantillon et est calculée selon la relation suivante :

$$\sigma_f = \frac{1.5FL}{b^3}$$

σ_f : Résistance à la flexion (MPa)

F: Force de flexion (Newton)

L: Distance entre les deux supports (m)

b : Largeur de l'échantillon (mm)

III.4.2.3. Essai d'absorption d'eau par immersion

Cet essai a été réalisé selon la norme ASTM C642 97, on sèche d'abord les échantillons dans une étuve à 106 ° C pendant une période de 72 heures pour assurer une sécheresse complète des échantillons, on extrait les échantillons après cette exposition au froid, puis nous pesons les échantillons, nous immergeons les échantillons dans de l'eau en dessous de 21 ° C pendant une période de 72 heures, après cette étape, les échantillons sont essuyés avec une serviette puis pesés, après quoi vous calculez le pourcentage d'absorption d'eau par le mortier autoplaçant selon la relation suivante :

$$\text{Rapport d'absorption} = [(\text{poids de l'échantillon après immersion} - \text{son poids sec}) / \text{poids sec}] \times 100$$

III.4.2.4. Essai de retrait

Nous versons des échantillons de divers mélanges dans des moules (16×4 x 4 cm) équipés de petits écrous conçus pour mesurer le changement de longueur des échantillons après leur retrait des moules.

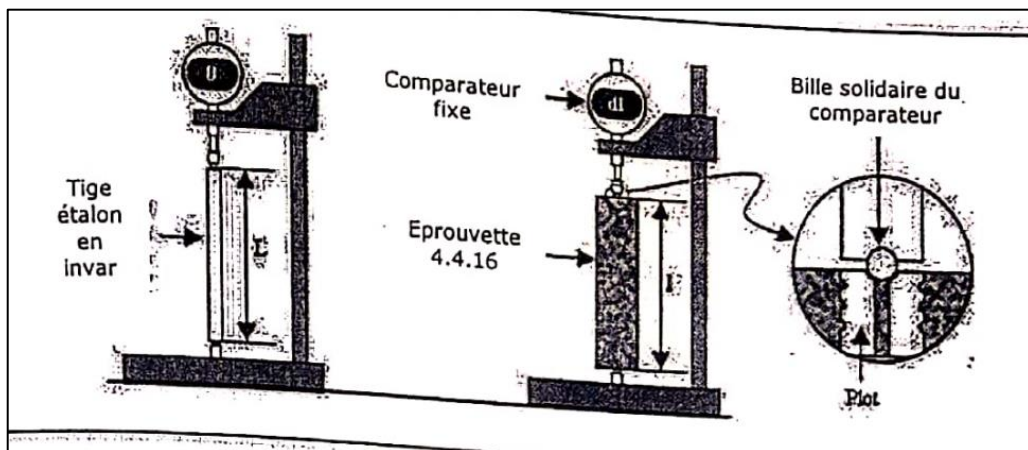


Figure III.19 : Mesure du retrait

III.4.3. Essai de réparation

Pour vérifier les propriétés de notre mortier, destiné aux travaux de réparation, et pour comparer différents mélanges, nous réalisons deux essais.

III.5.3.1. Essai de flexion

Dans cet essai, on fabrique des poutrelles en béton armé avec des dimensions (50x10x10 cm) de béton autoplaçant après 4 heures, nous déformons après 28 jours, nous préparons ces affluents avec tous nos sept mélanges après encore 28 jours on le fait exposant à se plier pour voir le comportement du mortier de chaque mélange.

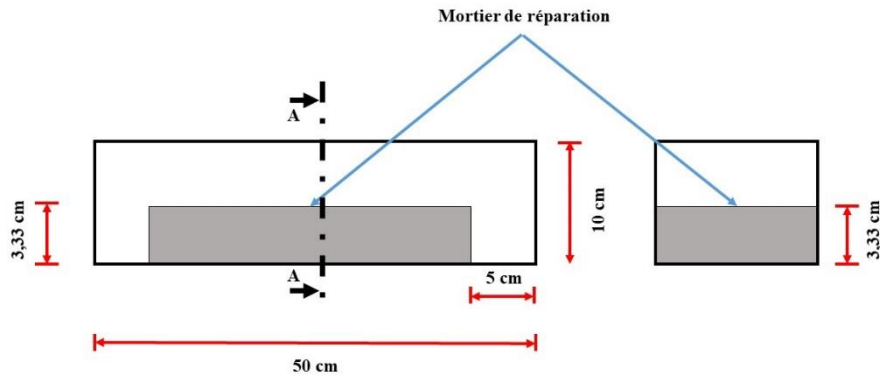


Figure III.20 : Poutres réparées.

La résistance à la flexion est obtenue par un simple calcul de la résistance des matériaux, contrainte de la flexion maximale est stable au centre de l'échantillon, et est calculé par la relation suivante :

$$\sigma_f = \frac{1,5FL}{b^2}$$

σ_f : Résistance à la flexion (MPa)

F : force de flexion (Newton)

L : La distance entre les deux supports (Mm)

b : largeur de l'échantillon (mm)

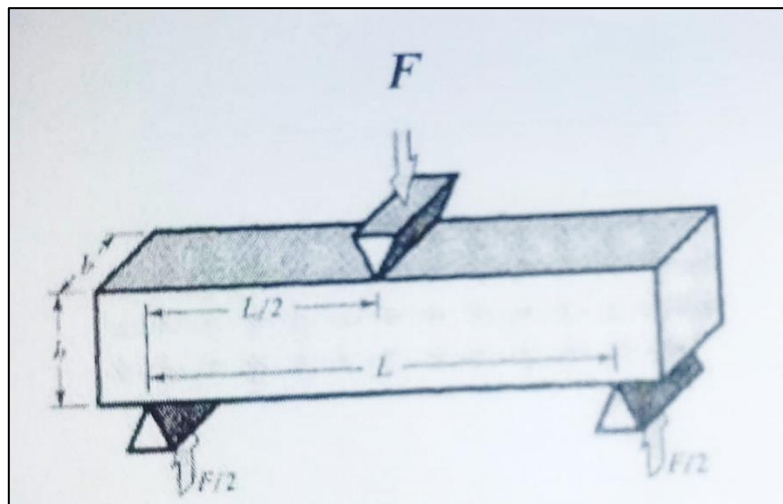


Figure III.21 : Essai de flexion est illustré par trois points.

III.4.4. Essai de cisaillement oblique (cisaillement par compression)

Dans cet essai, nous réalisons des échantillons cylindriques d'un diamètre (10 cm) et d'une hauteur (20 cm) de béton autoplaçant qui sont déformés en diagonale puis nous les réparons après 28 jours avec divers mélanges et nous les présentons pour un test de pression après 28 jours figure (III.23) et étapes de l'essai de cisaillement oblique.

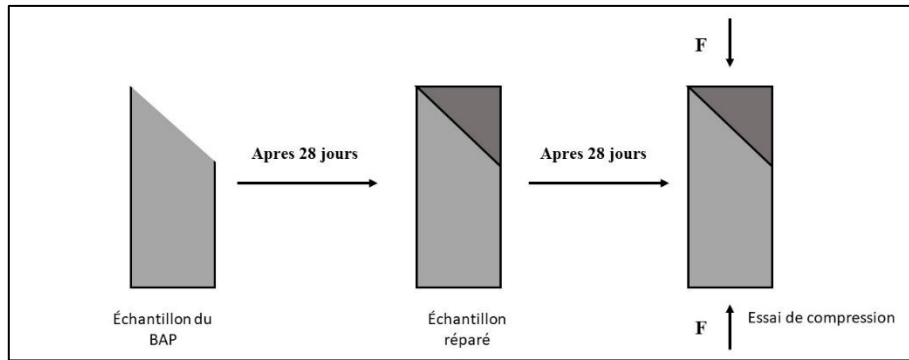


Figure III.22 : Etapes de l'essai de cisaillement oblique.

III.5 Synthèse

Dans ce chapitre, on a étudié les caractéristiques des matériaux utilisés (sable, gravier, fumée de silice et fibres d'alfa). On a fait certains essais à l'état frais, c'était prévu de faire des essais sur le mortier à l'état durci mais à cause de la crise sanitaire due au COVID-19, on n'a pas les réaliser car ils nécessitent des délais importants de plus de 56 jours.

CHAPITRE IV :
Analyse et discussion des résultats.

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons exposer et analyser les résultats des différents essais effectués sur différentes compositions du mortier autoplaçant (MAP) à l'état frais. L'objectif de ces essais est d'étudier en premier lieu l'influence de la fumée de silice et des fibres d'alfa et des fibres mixtes (verre+alfa) sur les caractéristiques du MAP tels que l'étalement et le temps d'écoulement. A l'état durci, une campagne d'essai très large a été programmée surtout pour les essais de réparation, néanmoins la fermeture du laboratoire en raison de la pandémie covid-19 n'a pas permis d'effectuer cette étape.

IV.2. Composition des mélanges étudiés

IV.2.1. Mortier autoplaçants témoin

La composition du MAP de référence est donnée dans le tableau IV.1. Il est à noter que le dosage de SP a été choisi égal à 1,1% en se basant sur des travaux antérieurs. Pour vérifier les caractéristiques de ce mélange, des essais d'étalement et d'écoulement ont été réalisés et les résultats sont présentés dans le même tableau. Le dosage de superplastifiant choisi a donné de bons résultats d'étalement et de temps d'écoulement 30,25 cm et 6 s, ces valeurs sont à l'intérieur de la plage ciblée (respectivement 27-33 cm et 2-10 s).

Tableau IV.1: Composants de mortier témoin dans 1m³

Ciment (kg)	Sable (kg)	SP		Eau (g)	W/B	S/M	Etalement (cm)	Temps d'écoulement (s)
		(%)	(kg)					
690,65	1285	1,1	7,6	282,13	0,4	0,5	30,25	6

IV.2.2. Autres compositions de MAP

➤ Superplastifiant

Le choix du rapport de superplastifiant pour chaque mélange s'est fait de manière purement expérimentale où nous avons essayé de varier le pourcentage de superplastifiant à chaque fois pour qu'il nous donne un étalement et un temps d'écoulement acceptables. Nous avons commencé avec un dosage de SP de 1,1% et ce pourcentage varie selon le type et le pourcentage de matériau additionné. Le tableau IV.2 présente la composition de différents mélanges ainsi que le dosage de SP nécessaires pour avoir la fluidité et la viscosité souhaitées. Comme rappel, 10 compositions ont été désignées, en plus de mélange de référence, trois compositions contiennent différents pourcentages de fumée de silice 5, 10 et 15%, trois autres compositions comportent trois pourcentages de fibre d'alfa 0,2 ; 0,4 et 0,6%, les trois dernières compositions incluent différentes combinaisons de fumée de silice et fibres de verre et fibres d'alfa.

Tableau IV.2 : Composition de différents mélanges dans 1m³

Mélanges	E/P	Ciment (kg)	Fumée de silice (kg)	Fibres d'alfa (kg)	Fibres de verre (kg)	SP		Sable (kg)	Eau (kg)
						(kg)	(%)		
100C	0,4	690,65	0	0	0	7,6	1,1	1285	282,13
5FS		656,12	34,53			8	1,25		
10FS		621,59	69,06			10	1,45		
15FS		587,05	103,6			17	1,55		
0,2FA		690,65	0	1,38	0	7,6	1,1		
0,4FA				2,76					
0,6FA				4,14					
10FS0,6FA0,4FV		621,29	69,06	4,14	3,59	10	1,45		
0,4FA0,4FV		690,65	0	2,76	3,59	7,6	1,1		
0,6FA0,4FV				4,14					

Nota :

100C : mortier à base de 100% de ciment ;

5FS: mortier à base de 5% de fumée de silice et 95% de ciment ;

0,2FA: mortier à base de 0,2% de fibres d'alfa ;

0,2FV: mortier à base de 0,2 de fibres de verre.

IV.3. Présentation et discussion des résultats**IV.3.1. Essais réalisée à l'état frais****IV.3.1.1. Essai d'étalement**

La figure IV.1 montre la variation du diamètre d'étalement en fonction du pourcentage de la fumée de silice (FS) et des fibres d'alfa. On constate que le diamètre d'étalement est considérablement augmenté avec l'augmentation des fibres d'alfa (FA) et de superplastifiant dans les mélanges de mortier à base de FS .L'ajout de FS avec 5, 10 et 15% provoque un accroissement de l'étalement respectivement par environ 1,3 ; 3,1 et 4%. En plus, l'emploi de FA avec 0,2 ; 0,4 et 0,6% cause une augmentation de l'étalement respectivement de 4,3 ; 5,75 et 7,47 par rapport le MAP témoin.

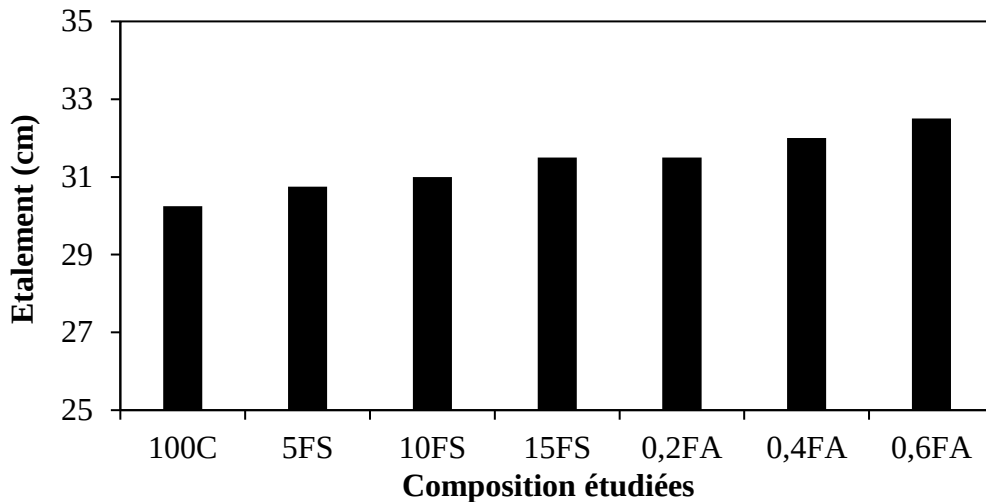


Figure IV.1 : Variation du diamètre d'étalement en fonction du pourcentage de fumée de silice et des fibres d'alfa.

IV.3.1.2. Essai d'écoulement

La variation du temps d'écoulement en fonction du pourcentage de fumée de silice et des fibres d'alfa est présente dans la figure IV.2. Nous observons que le temps d'écoulement du mélange de témoin est supérieur par rapport aux autres mélanges, ce que signifie que le mélange 100C est le plus visqueux. L'incorporation FA et de dosage de superplastifiant dans les mélanges de mortier à base FS engendre une diminution remarquable du temps d'écoulement. Les mélanges 5FS, 10FS et 15FS ont eu une réduction de leur temps d'écoulement respectivement de 48,33 ; 41,33 et 51,67%. L'addition de FA avec 0,2 ; 0,4 et 0,6% résulte une diminution du temps d'écoulement respectivement de 59,17 ; 54,67 ; 46,67%.

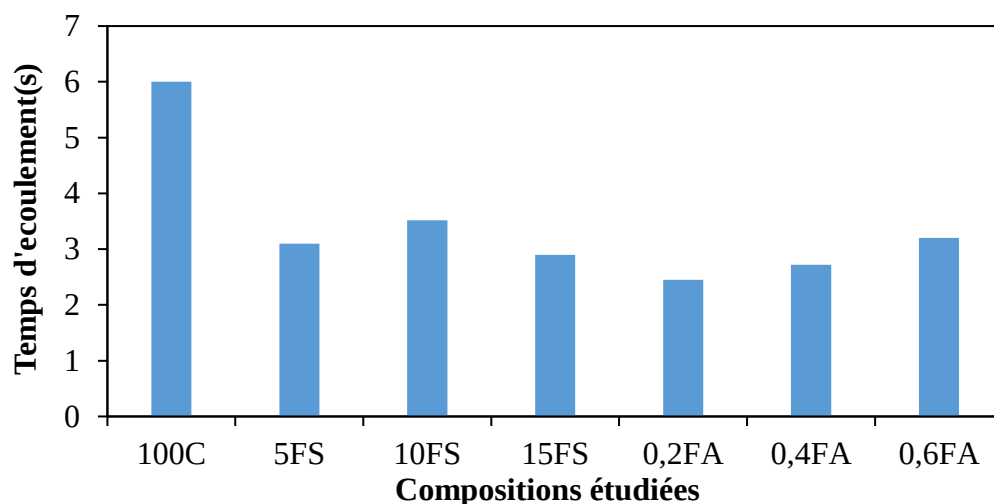


Figure IV.2 : Variation de temps d'écoulement en fonction du pourcentage de fumée de silice et des fibres d'alfa.

IV.3.1.3. Demande en superplastifiant

La figure IV.3 montre la variation du dosage de superplastifiant en fonction de la teneur en fumée de silice. D'après cette courbe nous remarquons qu'il existe une relation proportionnelle entre le dosage de superplastifiant et le pourcentage de FS. En effet, l'augmentation de la quantité de FS exige une augmentation de dosage de SP pour avoir la fluidité et la viscosité désirées. L'ajout de 5 ,10 ,15 % de fumée de silice conduit à une augmentation du dosage de superplastifiant respectivement par environ 13,63 ; 31,18 ; 40,90%.

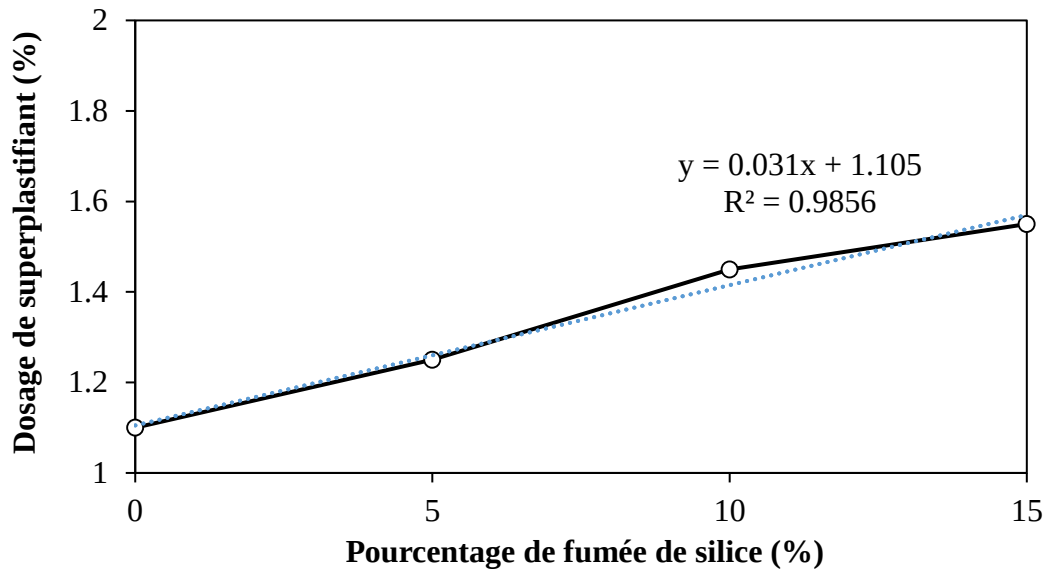


Figure IV.3 : Variation du dosage de superplastifiant en fonction du pourcentage de fumée de silice.

Conclusion générale

Les essais réalisés dans ce travail permettent de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ Le dosage de superplastifiant optimal pour le mortier de référence est de 1,1% ;
- ✓ L'ajout de fumée de silice nécessite une augmentation du dosage de superplastifiant pour formuler des mortiers de bonne fluidité ;
- ✓ L'ajoute de fibres à une relation avec la maniabilité du mortier d'où la maniabilité augmenté avec l'augmentation de dosage des fibres ;
- ✓ Il y a une relation proportionnelle entre la fumée de silice et le dosage de superplastifiant d'où l'augmentation de FS nécessite une augmentation du dosage de superplastifiant.

Références bibliographiques

- [1] OKAMURA.H, "Self-compacting concrete journal of advanced concrete technology", 1994.
- [2] PATRICK G , "Domaines d'utilisation privilégiés des BAP", Septembre 2016.
- [3] NASRI.S, "Caractérisation aux moyens des essais non destructifs (NDT) et Essai direct d'un béton autoplaçant(BAP) à base de matériaux locaux (effet de la nature du sable) ", Mémoire de magister, Université de Mohamed Boudiaf-M'sila, 2016, p165.
- [4] partieI chapitre 02 | Béton | Polymère (<https://www.scribd.com/document/378268506/parteI-chapitre-02>).
- [5] BENADDAD S, BENATSOU N, "Etude à la compression d'un Béton autoplaçant avec additions minérales (Argile cuite et broyée et Fillers calcaires)".
- [6] ADAM M, "propriétés des bétons, traduit par le CRIB", édition Eyrolles.
- [7] BENAKLI S, "Caractérisation expérimentale des bétons autoplaçants obtenus par ajout des déchets de construction", thèse de magister, Université Mouloud Mammeri de tizi-ouzou.
- [8] Projet National de Recherche CERIB, "béton autoplaçant BAP" France, Octobre 2001.
- [9] CHUCHE C, "Les bétons autoplaçants", Dossier technique, MBT France.
- [10] EL-FODIL A, "Elaboration d'un béton autoplaçant à base de fillers de calcaire", thèse de magister, école nationale supérieure polytechnique, 2009.
- [11] Journée d'information sur les ciments, "les Bétons et les Adjuvants, « Les adjuvants, Définitions et opportunités d'utilisation » ", ERCE - CTC Est - GRANITEX, Alger, 2004.
- [12] Association Française de Génie Civil, "Bétons autoplaçants - Recommandations provisoires", documents scientifiques et techniques, AFGC, juillet 2000, p90.
- [13] GILLFS E, "Responsable pédagogique, CARMEUSE France, « Formation continue actualisant » ", 17 et 18 Octobre 2001.
- [14] BOUKENDAKDJI O, "Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires »", thèse de Doctorat de l'université de Blida, 2010.
- [15] SKARENDAHL A, PETERSSON O, "Self-Compacting Concrete: State-of-the-art report of RILEM Technical Conmmite 174-SCC", RILEM Publications, France, 2001.

- [16] LEGRAND, "La structure des suspensions de ciment", Le Béton Hydraulique, Presses de l'ENPC, 1982.
- [17] HU C, BARBIERI B, "Comparaison des retraits des bétons autonivelants et d'un béton fluide traditionnel", Science des matériaux et propriétés des bétons, 1ère Rencontre Internationale, Toulouse, 1998, p 265-272.
- [18] PONS G, PROUST E, ASSIÉ S, "Creep and Shrinkage of Self-Compacting Concrete: A different behavior compared with vibrated concrete", 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik,Iceland, 2003, p 645-654.
- [19] NEVILLE A, "Propriétés des Bétons", traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, édition Paris Eyrolles 2000.
- [20] SKARENDAHL A, PETERSSO O, "Self-Compacting Concrete. State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174-SCC", Edited by RILEM Publications, France, 2001.
- [21] OUCHI M, EDAMATSU Y, "A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar particles in self-compacting concrete", In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, Stockholm, 1999.
- [22] BILLBERG P, "Self-compacting concrete for civil engineering structures - the Swedish experience", Report 299, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1999, p80.
- [23] BUI V.K, AKKAYA Y, SHAH S.P, 'Rheological Model for self-consolidating concrete', ACI Materials Journal, 99, 6, p 549-559, novembre-décembre2002.
- [24] KHOBIZI S, "réhabilitation de structures en béton armé ", Mémoire de master ,Université 08 Mai 1945 Guelma , 2017.
- [25] OUZAA K, "Polycopié réhabilitation des structure", Université des sciences et de la technologie d'oran mohamed boudiaf USTO,2015.
- [26] GHOMARI F, "Pathologie des constructions," GCL 556, Université Tlemcen,2003.
- [27] BOUSMAT A , BELHACEN Mohamed A, "Synthèse bibliographique sur les principales dégradations affectant les constructions en béton armé", Mémoire de master, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem,2019.
- [28] GADRI K, "Processus des réparations minces des ouvrages en béton chapitre 1", thèse doctora Université Mohamed Khider,2007.

- [29] GRIMALDI G, "Visualisation des fissures des bétons par la méthode du ressuage ", bulletin de liaison des LPC n° 129, janvier-février 1984.
- [30] SIDNEY M.J, "Dégradation entretien et réparation des ouvrages du génie civil", Editions Eyrolles, 1969.
- [31] VICTOR DAVIDOVICI, " Enseignements tirés de la fissuration des structures en béton armé", Formulaire du béton armé, Tome 2, Editions du Moniteur, 1997.
- [32] LACHAUD R., SALOMON M., Les altérations du béton, Cahier de l'A.F.B.n° 225, octobre 1984. 2252, traité Construction 1995.
- [33] LASSOUED R, OUCHENANE K, OUCHENANE M, "Influence de l'enrobage de béton sur la corrosion des armatures et effet de la corrosion sur l'adhérence, Colloque National Pathologie des Constructions", Université Mentouri Constantine, Novembre 2008.
- [34] NEZAR R, "Renforcement des poutres en béton armé par polymères renforcés des fibres (PRF) en flexion simple », Université l'arbi ben m'hidi oum el bouaghi, Mémoire de master, 2018.
- [35] KASSOU A, "Vulnérabilité et Réhabilitation des Structures », Mémoire de master Génie Civil –Option : SCI-Prof ,2015.
- [36] Documents scientifiques et techniques "Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion", Novembre 2003.
- [37] Christophe B , Journée Technique "Gestion d'ouvrages d'art maritimes et portuaires Réparation du Béton",2014.
- [38] CESAR DIAZ G, "la réhabilitation des éléments structuraux de l'architecture traditionnelle méditerranéenne", Université polytechnique de Catalogne, Espagne, 2005.
- [39] Lorry-Alan Moalic, "Réhabilitation d'ouvrages en béton armé du diagnostic au confortement ", Projet de Fin d'Études élève ingénieur de 5ème année.
- [40] PHOUMMAVONG V, Université Nationale du Laos, Campus Numérique Francophone de Vientiane.
- [41] <https://dokumen.tips/documents/mortier-autoplacant-demix-beton-demix-beton-mortier-autoplacant-le-service.html>.
- [42] LUC C, BENOIT B , "Réparation des ouvrages en béton armé Partie 2 :Compatibilité et performances".

- [43] <https://construction-maison.ooreka.fr/astuce/voir/729311/mortier-fibré>.
- [44] KOUICI A, "Etude de l'effet de l'introduction des fibres végétales sur les propriétés des bétons autoplaçant (BAP) à l'état frais et durcis", Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016.
- [45] DE LARRAD, F., construire en béton : l'essentiel sur les matériaux, presses des ponts, 2002.
- [46] NASSAH D, "Influence de la quantité de fibres naturelles (alfa) et commerciales (polypropylène) sur les propriétés physicomécaniques des mortiers fibrés", Mémoire de master, Université mohamed, 2017/2018.
- [47] Naamaoui N, Haddadou N, "Elaboration et caractérisation de béton autoplaçant fibré avec ajout de poudre de marbre", Thèse de Doctorat, Université m'hamed bougara-boumerdes, 2015.
- [48] DEBICKI G, "le bétons fibres -chapitre 1", 1987.
- [49] MOKHTARI A, "influence des ajouts de fines minérales sur les performances mécaniques des bétons renforcés de fibres végétales de palmier dattier", Mémoire master, Université de kasdi merbah Ouargla, 2006.
- [50] GRÜNEWALD S, "Performance-Based Design of Self-Compacting Fiber Reinforced Concrete", Ph. D. thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 2004.
- [51] SAHMARAN M, YURTSEVEN A, YAMAN IO, "Workability of Hybrid Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete", Building and Environment Journal, 2005.
- [52] KHAYAT K.H., ROUSSEL Y, "Testing and Performance of Fiber-Reinforced Self Consolidating Concrete", Materials and Structures Journal, vol. 33, Jul 2000.
- [53] تحضير ملاط ذاتي الرص عالي الأداء مكون من الميكاكولين و الياف الزجاج موجه " , رعاد محمد جيلالي ناصر [53] 2019, مذكرة ماستر, "لاستعمال في الاعمال الترميمية
- [54] Maamoun saade , "Etude du comportement des vouts en maçonnerie renforcées par matériaux composites-application aux ouvrages d'assainissement", these doctora, Université d'artois, 2012.
- [55] NF EN 12390-3, "Essai pour béton durci Partie 3 : résistance à la compression sur éprouvettes"
- [56] NF EN 12390-5, "Essai pour béton durci – Partie 5 : résistance à la flexion sur éprouvettes"
- [57] NF EN 1542 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton. Mesurage de l'adhérence par traction directe..

[58] NF EN 13290-6, "Essai pour béton durci – Partie 3 : résistance en traction par fendage"

[59] NF EN 12617-4 (2002), " Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton- méthodes d'essai-partie 4 : détermination du retrait et du gonflement ", AFNOR..

[60] NF EN 13286-43 (2003), "Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques", AFNOR..