

SOMMAIRE

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------|
| INTRODUCTION GENERALE | 1 |
| PARTIE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE | 4 |
| CHAPITRE 1: PROCESSUS DES REPARATIONS DES OUVRAGES DEGRADES EN BETON | 5 |
| 1.1. INTRODUCTION | 6 |
| 1.2. DEGRADATION DU BETON | 7 |
| 1.2.1. Origines et causes de dégradation du béton | 8 |
| 1.2.1.1 Dégradations d'origine physique | 8 |
| 1.2.1.2. Dégradations d'origine mécanique | 10 |
| 1.2.1.3. Dégradations d'origine chimique | 11 |
| 1.2.1.4. Autres causes de dégradation | 16 |
| 1.2.2. Facteurs d'influences sur la dégradation des ouvrages | 17 |
| 1.2.2.1. Facteurs liées à la conception de la structure | 17 |
| 1.2.2.2. Facteurs liées à la construction de la structure | 18 |
| 1.2.2.3 Facteurs liées à la nature des matériaux | 18 |
| 1.2.2.4. Facteurs liées aux conditions climatiques et environnementaux | 19 |
| 1.2.3. Symptômes et manifestations de dégradation | 19 |
| 1.3. REPARATION DES OUVRAGES | 22 |
| 1.3.1. Définition | 22 |
| 1.3.2. Système de réparation | 22 |
| 1.3.3. Préparation des surfaces à réparer | 24 |
| 1.3.3.1. Enlèvement du béton dégradé | 24 |
| 1.3.3.2. Nettoyage de la surface | 25 |
| 1.3.3.3. Humidification de la surface | 26 |
| 1.3.3.4. Protection et remplacement des aciers | 26 |
| 1.4. CRITERES DE SELECTION DES MATERIAUX DE REPARATION | 27 |
| 1.4.1. Présentation des produits de réparation | 28 |
| 1.4.1.1. Les liants hydrauliques | 28 |
| 1.4.1.2. Les polymères (Produits à base de résines de synthèse) | 28 |
| 1.4.1.3. Les liants mixtes (liants hydrauliques associés à des polymères) | 28 |
| 1.4.1.4. Les latex | 30 |
| 1.4.2. Choix des produits | 31 |
| 1.5. PROBLEME DES REPARATIONS | 32 |
| 1.5.1. Les phénomènes agissants sur le comportement des réparations minces | 34 |
| 1.5.1.1. Le retrait | 34 |
| 1.5.1.1.1. Le retrait plastique | 35 |
| 1.5.1.1.2. Le retrait thermique | 35 |
| 1.5.1.1.3. Le retrait de carbonatation | 36 |
| 1.5.1.1.4. Le retrait endogène | 36 |
| 1.5.1.1.5. Le retrait de séchage | 40 |

| | |
|--------------------------------------------------------|-----------|
| 1.5.1.2. Le Fluage..... | 45 |
| 1.5.1.2.1. Paramètres influençant le fluage | 48 |
| 1.5.1.2.2. Fluage en traction | 51 |
| 1.5.1.2.3. Capacité d'adaptation par fluage | 51 |
| 1.5.2. Durabilité d'une réparation en béton..... | 53 |
| 1.5.2.1. Définition d'une réparation durable..... | 53 |
| 1.5.2.2. L'interface béton vieux- béton neuf | 54 |
| 1.5.2.3. Mécanismes d'adhérence | 55 |
| 1.5.2.4. Paramètre influençant l'adhérence..... | 56 |
| 1.5.2.4.1. Rugosité et intégrité du substrat..... | 56 |
| 1.5.2.4.2. L'utilisation d'un agent de liaison..... | 57 |
| 1.5.2.4.3. Propriété du matériau de réparation..... | 58 |
| 1.5.2.4.4. Mouillage préalable du substrat..... | 60 |
| 1.6. CONCLUSION..... | 61 |
| CHAPITRE 2: LES BETON DE SABLE..... | 62 |
| 2.1. INTRODUCTION | 63 |
| 2.2. ORIGINES DES BETONS DE SABLE | 63 |
| 2.3. DEFINITION | 64 |
| 2.4. LES COMPOSANTS DU BETON DE SABLE..... | 64 |
| 2.4.1. Sables..... | 64 |
| 2.4.2. Les fines d'ajouts (filler)..... | 64 |
| 2.4.2.1. Filler calcaire..... | 66 |
| 2.4.2.2. Fumé de silice..... | 66 |
| 2.4.3. Les ciments..... | 67 |
| 2.4.4. L'eau..... | 68 |
| 2.4.5. Les adjuvants..... | 68 |
| 2.4.6. Autres ajouts..... | 69 |
| 2.4.6.1. Les fibres..... | 69 |
| 2.4.6.2. Les gravillons..... | 69 |
| 2.4.6.3. Les colorants..... | 69 |
| 2.5. PROPRIETES DES BETONS DE SABLE..... | 70 |
| 2.5.1. Résistance et maniabilité..... | 70 |
| 2.5.2. Granulométrie- Résistance..... | 70 |
| 2.5.3. Durabilité..... | 72 |
| 2.6. FORMULATION DES BETONS DE SABLE..... | 72 |
| 2.7. DEFORMATION DES BETONS DE SABLE..... | 75 |
| 2.7.1. Le retrait des bétons de sable..... | 76 |

| | |
|----------------------------------------------------------------|------------|
| 2.7.2. Comportement des bétons de sable au fluage..... | 77 |
| 2.8. EXEMPLES D'APPLICATIONS DES BETONS DE SABLE | 81 |
| 2.9. CONCLUSION | 83 |
| PARTIE II : ETUDE EXPERIMENTALE..... | 84 |
| CHAPITRE 3: MATERIAUX, MELANGES ET PROCEDURES | 85 |
| 3.1. INTRODUCTION..... | 86 |
| 3.2. MATÉRIAUX UTILISÉS..... | 86 |
| 3.2.1. Sable..... | 86 |
| 3.2.2. Ciment..... | 87 |
| 3.2.3. Eau de gâchage..... | 88 |
| 3.2.4. Les ajouts minéraux..... | 88 |
| 3.2.4.1. Filler calcaire..... | 88 |
| 3.2.4.2. Fumée de silice | 89 |
| 3.2.5. Superplastifiant..... | 90 |
| 3.2.6. Latex | 90 |
| 3.2.7. Fibres polypropylène..... | 90 |
| 3.3. MÉLANGES..... | 91 |
| 3.3.1. Formulation du béton de sable..... | 91 |
| 3.3.2. Formulation du béton de sable de réparation..... | 92 |
| 3.4. COMPOSITION DES BETONS..... | 92 |
| 3.5. MODE OPERATOIRE..... | 94 |
| 3.6. CONFECTION DES EPROUVETTES..... | 95 |
| 3.7. ESSAIS RÉALISÉS..... | 95 |
| 3.7.1. Essai réalisé à l'état frais..... | 95 |
| 3.7.2. Essais réalisée à l'état durci..... | 95 |
| 3.8. CALCULE DU MODULE D'ELASTICITE..... | 97 |
| 3.9. PROCEDURE DE REPARATION DES EPROUVETTES..... | 97 |
| 3.9.1. Préparation des surfaces..... | 97 |
| 3.9.2. Réparation des surfaces..... | 98 |
| 3.10. CONCLUSION..... | 99 |
| CHAPITRE 4 : PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS.. | 100 |
| 4.1. INTRODUCTION..... | 101 |
| 4.2. FORMULATION DU BETON DE SABLE | 102 |
| 4.2.1. Effet d'ajout de filler calcaire | 103 |
| 4.2.1.1. Résistance mécanique a la compression | 104 |
| 4.2.1.2. Résistance mécanique a la traction..... | 106 |
| 4.2.2. Effet d'ajout du superplastifiant..... | 106 |
| 4.2.2.1. Maniabilité | 107 |
| 4.2.2.2. Résistance à la compression..... | 108 |
| 4.2.2.3. Résistance à la traction..... | 110 |
| 4.2.3. Influence de la réduction du rapport E/C | 110 |
| 4.2.3.1. Maniabilité | 111 |
| 4.2.3.2. Résistance à la compression | 112 |
| 4.2.3.3. Résistance à la traction | 113 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2.3.4. Retrait du béton de sable (BS-SPE2)..... | 114 |
| 4.3. FORMULATION DU BETON DE SABLE DESTINEE A LA REPARATION..... | 116 |
| 4.3.1. Addition du fumée de silice..... | 117 |
| 4.3.1.1. Effet de fumé de silice sur le béton frais..... | 117 |
| 4.3.1.2. Effet de fumée de silice sur la résistance à la compression..... | 118 |
| 4.3.1.3. Effet de fumée de silice sur la résistance à la traction..... | 118 |
| 4.3.1.4. Effet de fumée de silice sur le retrait et la perte de masse..... | 119 |
| 4.3.2. Addition de fibres polypropylène..... | 121 |
| 4.3.2.1. Effet de fibres polypropylène sur le béton frais..... | 122 |
| 4.3.2.2. Effet de fibres polypropylène sur la résistance à la compression..... | 122 |
| 4.3.2.3. Effet de fibres polypropylène sur la résistance à la traction..... | 123 |
| 4.3.2.4. Effet de fibres polypropylène sur le retrait et la perte de masse..... | 125 |
| 4.3.3. Addition de latex..... | 126 |
| 4.3.3.1. Effet de latex sur le béton frais..... | 126 |
| 4.3.3.2. Effet de latex sur la résistance à la compression..... | 126 |
| 4.3.3.3. Effet de latex sur la résistance à la traction..... | 127 |
| 4.3.2.4. Effet de latex sur le retrait et la perte de masse..... | 129 |
| 4.3.4. Addition d'une combinaison (fibres polypropylène + latex)..... | 130 |
| 4.3.4.1. Effet d'une combinaison (fibres+latex) sur le béton à l'état frais..... | 131 |
| 4.3.4.2. Effet d'une combinaison (fibres+latex) sur la résistance a la Compression..... | 131 |
| 4.3.4.3. Effet d'une combinaison (fibres+latex) sur la résistance a la traction..... | 131 |
| 4.3.4.4. Effet d'une combinaison (fibres+latex) sur le retrait et la perte de masse..... | 132 |
| 4.4. CAPACITE D'ABSORPTION D'EAU DES DIFFERENTES FORMULATIONS DE BETONS DE SABLE..... | 134 |
| 4.5. MODULE D'ELASTICITE DES DIFFERENTS MATERIAUX..... | 135 |
| 4.6. REPARATION DES ELEMENTS EN BETON | 137 |
| 4.6.1. Procédure de réparation | 138 |
| 4.6.2. Evaluation de la compatibilité déformationelle..... | 139 |
| 4.6.2.1. Réparations soumises au séchage seule..... | 139 |
| 4.6.2.2. Réparations soumises à une contrainte de compression..... | 141 |
| 4.7. CONCLUSION..... | 144 |
| CONCLUSION GENERALE..... | 147 |
| PERSPECTIVES..... | 150 |
| BIBLIOGRAPHIE | 151 |
| ANNEXE..... | 154 |

Liste des figures

| N° | Figure | Page |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 1.1 | Stratégie d'intervention à réparer [9]..... | 23 |
| 1.2 | Les trois principales étapes d'une bonne réparation. [9] | 24 |
| 1.3 | Facteurs affectant la compatibilité des matériaux de réparation [1] [13]..... | 33 |
| 1.4 | Déformation endogène de la pâte de ciment [9]..... | 37 |
| 1.5 | Résistance en compression des différents matériaux de réparations [9]. | 38 |
| 1.6 | Retrait endogène des différents matériaux de réparations [9]..... | 38 |
| 1.7 | Développement de la résistance en compression des différents matériaux [14]..... | 39 |
| 1.8 | Développement de du module de Young des différents matériaux [14]..... | 39 |
| 1.9 | Développement de la résistance en traction par fendage [14]. | 40 |
| 1.10 | Résultats des essais de retrait endogène [14]..... | 40 |
| 1.11 | Relation entre retrait et perte de masse en conditions contrôlées de température et d'humidité [14]..... | 41 |
| 1.12 | Processus de fissuration due au séchage [9] [13] [14]. | 42 |
| 1.13 | Prisme de séchage uniaxial [9]..... | 42 |
| 1.14 | Retrait de séchage des différents bétons [9]. | 43 |
| 1.15 | Perte de masse des différents bétons [9]..... | 43 |
| 1.16 | Résultats de pertes de masse au séchage des matériaux de réparation [14] | 43 |
| 1.17 | Résultats de retrait avec séchage des matériaux de réparation [14]. | 44 |
| 1.18 | Relaxation de la contrainte de compression sous l'application d'une déformation constante de 360 $\mu\text{m/m}$ [9]..... | 46 |
| 1.19 | Déformation d'un béton soumis à une charge constante dans le temps. Principe de sommation du fluage propre, du fluage de séchage et du retrait libre [9].... | 47 |
| 1.20 | Fluage à 28 jours en fonction de la teneur en granulats pour un béton chargé à 14 jours à une contrainte représente 50% de la résistance ultime en compression [9]..... | 48 |
| 1.21 | Influence de l'âge au moment du chargement sur la cinétique du fluage [9]..... | 49 |
| 1.22 | Fluage d'un béton exposé `a différents degrés d'humidité [9]..... | 50 |
| 1.23 | Rapport fluage total spécifique/ retrait total [9]..... | 52 |
| 1.24 | Indicateurs de durabilité d'une réparation en béton [14]..... | 54 |
| 1.25 | Système de réparation à trois phases [9]..... | 55 |
| 1.26 | Mécanismes d'adhérence [8] [9]..... | 55 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1.27 : Influence de la technique d'enlèvement du béton détérioré [9]..... | 57 |
| 1.28 : Effets possibles du retrait différentiel entre deux bétons [8]..... | 59 |
| 1.29 : Test de traction directe sur éprouvettes bicouches constituées d'un substrat en béton ordinaire et d'un matériau de réparation [9]..... | 60 |
| 2.1 : Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance [24]..... | 71 |
| 2.2 : Effet de la granularité sur la résistance [24]..... | 71 |
| 2.3 : Evolution de la compacité en fonction du dosage en fines pour deux types de sable [27]. | 72 |
| 2.4 : Effet du dosage et de la finesse d'un correcteur calcaire même dosage en ciment [27]..... | 73 |
| 2.5 : Amélioration des résistances par synergie de différents ajouts [27]..... | 74 |
| 2.6 : Retrait d'auto-dessiccation (BS-BO) [32]..... | 77 |
| 2.7 : Retrait total en fonction du taux de séchage BS [22]..... | 77 |
| 2.8 : Evolution de la perte en poids (%) dans le temps (jours) [32]..... | 78 |
| 2.9 : Fluage propre (BS et BO) [34]..... | 78 |
| 2.10 : Taux de déformation du fluage propre (BS et BO) [32]..... | 78 |
| 2.11 : Modèle du fluage propre du BS [34]..... | 80 |
| 3.1 : La courbe granulométrique du sable concassée..... | 87 |
| 3.2 : La courbe granulométrique du filler calcaire..... | 89 |
| 4.1 : L'évolution de la résistance a la compression en fonction du temps et du dosage en FC... | 104 |
| 4.2 : Effet du dosage de FC sur la résistance mécanique à la compression à 28 jours..... | 105 |
| 4.3 : Effet du dosage de FC sur la résistance mécanique à la compression à 90 jours..... | 105 |
| 4.4 : L'évolution de la résistance à la traction en fonction du temps et du dosage en FC..... | 106 |
| 4.5 : Effet du superplastifiant sur l'affaissement..... | 107 |
| 4.6 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et du SP..... | 108 |
| 4.7 : Effet du superplastifiant sur la résistance à la compression à 28jours..... | 109 |
| 4.8 : Effet du superplastifiant sur la résistance à la compression à 90jours..... | 109 |
| 4.9 : L'évolution de la résistance à la traction en fonction du temps et du SP..... | 110 |
| 4.10 : Effet du rapport E/C sur l'affaissement..... | 111 |
| 4.11 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et du SP..... | 112 |
| 4.12 : Effet du rapport E/C sur la résistance à la compression a 28jours..... | 113 |
| 4.13 : Effet du rapport E/C sur la résistance à la compression à 90jours..... | 113 |
| 4.14 : Effet du rapport E/C sur la résistance à la traction à 28jours..... | 114 |
| 4.15 : L'évolution de la résistance à la traction en fonction du temps et du E/C..... | 114 |
| 4.16 : Déformation du retrait du béton de sable BS-SPE2..... | 115 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.17 : Pertes de masse du béton de sable BS-SPE2..... | 115 |
| 4.18 : Effet du Fumée de silice sur la résistance à la compression en fonction du temps..... | 118 |
| 4.19 : Effet du Fumée de silice sur la résistance à la traction en fonction du temps..... | 119 |
| 4.20 : Effet du Fumée de silice sur la déformation du retrait..... | 120 |
| 4.21 : Effet du Fumée de silice sur la perte de masse..... | 121 |
| 4.22 : Effet de fibres polypropylène sur la résistance à la compression en fonction du temps... | 123 |
| 4.23 : Effet de fibres polypropylène sur la résistance à la traction en fonction du temps..... | 124 |
| 4.24 : Effet de fibres polypropylène sur la déformation du retrait..... | 125 |
| 4.25 : Effet de fibres polypropylène sur la perte de masse..... | 125 |
| 4.26 : Effet du latex sur la résistance à la compression en fonction du temps..... | 127 |
| 4.27 : Effet du latex sur la résistance à la traction en fonction du temps..... | 128 |
| 4.28 : Effet du latex sur la déformation du retrait..... | 129 |
| 4.29 : Effet du latex sur la perte en masse..... | 130 |
| 4.30 : Effet d'une combinaison fibre+latex sur la résistance à la compression en fonction du temps..... | 131 |
| 4.31 : Effet d'une combinaison fibre+latex sur la résistance à la traction en fonction du temps..... | 132 |
| 4.32 : Effet d'une combinaison fibre+latex sur la déformation du retrait..... | 133 |
| 4.33 : Effet d'une combinaison fibre+latex sur la perte de masse..... | 133 |
| 4.34 : Capacité d'absorption d'eau des différentes formulations..... | 135 |
| 4.35 : Variation du module d'élasticité des différents matériaux..... | 137 |

Liste des tableaux

| N° | Tableau | Page |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1.1 | Principaux symptômes de la dégradation de béton [2]..... | 21 |
| 1.2 | Propriétés des matériaux de réparation de béton typique [10]..... | 29 |
| 1.3 | Propriétés types* du béton modifié aux résines et du béton de ciment Portland [3]. | 30 |
| 1.4 | Tableau comparatif des caractéristiques des produits les plus utilisés [12]..... | 32 |
| 1.5 | Résistance et module en compression et résistance en traction à 28jours.. | 38 |
| 2.1 | Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment [24]..... | 65 |
| 2.2 | Amélioration d'un béton de sable par ajouts successifs avec un dosage en ciment 350Kg/m ³ [27] | 73 |
| 2.3 | Composition des bétons d'essais (BS-BO) [32]..... | 75 |
| 2.4 | Caractéristiques mécaniques des bétons d'essais (BS-BO)[32]..... | 75 |
| 2.5 | Formulation et caractéristiques mécaniques des bétons de sable de réparation de quelques ouvrages. | 82 |
| 3.1 | Caractéristiques physiques du sable..... | 87 |
| 3.2 | Caractéristiques physiques du ciment. | 88 |
| 3.3 | Composition chimique du ciment. | 88 |
| 3.4 | Composition minéralogique du ciment | 88 |
| 3.5 | Caractéristiques physiques du filler calcaire. | 89 |
| 3.6 | Caractéristiques physiques de la fumée de silice. | 89 |
| 3.7 | Compositions du béton de sable..... | 91 |
| 3.8 | Composition des trois séries 1-2-3 des bétons de sable..... | 93 |
| 3.9 | Composition des quatre séries 1-2-3-4 des bétons destinée a la réparation..... | 94 |
| 4.1 | Caractéristiques mécaniques du B.S à l'age de 28jours..... | 103 |
| 4.2 | Composition du béton de sable BS2..... | 107 |
| 4.3 | Composition du béton de sable BS-SP4..... | 111 |
| 4.4 | Caractéristiques du béton de sable témoin BS-SPE2..... | 116 |
| 4.5 | Composition du béton de sable témoin BS-SPE2..... | 117 |
| 4.6 | Affaissement du béton de sable témoin avec F.S..... | 117 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.7 : Affaissement du béton de sable avec fibres polypropylène..... | 122 |
| 4.8 : Affaissement du béton de sable avec latex..... | 126 |
| 4.9 : Résultats d'essais de traction pour deux modes de cure de béton de latex..... | 128 |
| 4.10 : Affaissement du béton de sable avec (fibres+ latex)..... | 130 |
| 4.11 : Valeurs du Module d'élasticité des matériaux de réparation..... | 136 |
| 4.12 : Béton de Réparation et conditions de surface..... | 138 |
| 4.13 : Etat d'adhérence des réparations sous chargement..... | 142 |

Liste des photos

| N° | Photo | Page |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 1.1 | : Exemple de dommages causé par le gel-dégel | 10 |
| 1.2 | : Intrados des ponts dégradés. | 10 |
| 1.3 | : Barrières de retenue dégradée. | 10 |
| 1.4 | : Carbonatation du béton. | 12 |
| 1.5 | : Différents types de dégradation [6]. | 13 |
| 1.6 | : Fissuration caractéristique en faïençage causée par la réaction alcalis- silice dans un mur de soutènement à Ottawa | 15 |
| 1.7 | : Faïençage lié a une attaque sulfatique..... | 15 |
| 1.8 | : Dégradation causé par incendie. | 16 |
| 1.9 | : Dégradation causé par surcharge. | 16 |
| 1.10 | : Différent types de fissures. | 20 |
| 1.11 | : Ecaillage | 21 |
| 1.12 | : Désintégration..... | 21 |
| 1.13 | : Nettoyage de la surface..... | 26 |
| 1.14 | : Enlèvement des aciers corrodés | 27 |
| 2.1 | : Microstructure du fumé de silice (forme sphérique)..... | 67 |
| 3.1 | : Fumé de silice forme de poudre..... | 90 |
| 3.2 | : Corps d'éprouvettes à réparés..... | 98 |
| 3.3 | : Surfaces préparés après nettoyage..... | 98 |
| 4.1 | : Etat d'éprouvettes avant et après réparation de surface..... | 138 |
| 4.2 | : Eprouvettes réparés sur le site d'exposition..... | 140 |
| 4.3 | : Position des éprouvettes réparés après 4 mois..... | 141 |
| 4.5 | : Etat de fissures pour chaque réparation..... | 143 |

Abréviations

| | |
|---------------|-------------------------------------------------------------|
| BO | Béton ordinaire. |
| BS | Béton de sable normal |
| BS.FB | Béton de sable témoin additionné aux fibres polypropylène |
| BS.FS | Béton de sable témoin additionné au avec fumée de silice |
| BS.SP | Béton de sable normal avec superplastifiant |
| BS.SPE | Béton de sable normal avec superplastifiant avec E/C réduit |
| BS.LFB | Béton de sable additionné au latex + fibres |
| BS.LTX | Béton de sable additionné au latex |
| E/C | Rapport massique de l'eau efficace sur le ciment. |
| FC | Filler calcaire |
| FS | Fumée de silice. |
| SP | Superplastifiant |
| SSS | Saturé surface sèche |